凍害により材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に向けて

～劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会報告書～

平成 26 年 9 月

北 海 道 土 木 技 術 会

コンクリート研究委員会

序

成熟した社会において，土木構造物の維持管理は大変重要な社会的課題である．しかし，土木構造物に求められる寿命は大変長く，それゆえ，その状態や性能の将来予測が極めて難しい．予測に関する「技術革新」なくしてこの状況を変えることは難しい．一方で，成熟した社会は，「革新技術」を受け入れにくい側面を持っている．その意味すること，そして，自身の社会的役割の高さを技術者は強く認識する必要がある．

非線形解析は，魅力ある技術である．そして，高度な技術でもある．非線形解析を強い非線形性を有する複数の材料からなる構造物のポストピーク領域まで適用するとなれば，技術者には並々ならぬ努力が求められる．

「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」は，非線形解析を材料劣化問題に活用するための学びの場として，北海道土木技術会コンクリート研究委員会のなかに2010年に立ち上げられた新しい委員会である．設立当初は，構成則の基礎基本である引張軟化と引張硬化の違いを知る委員はほとんどいなかった．この度，委員会活動の中間報告という位置づけでまとめたこの報告書からは，そのようなレベルからスタートしたことなど想像できないのではないだろうか．幹事長の小林竜太氏を中心とする幹事と委員の努力の賜物である．

本委員会は，この報告書の成果をベースとして，近い将来，凍害を受けたコンクリート構造物の構造性能評価手法に関する種々の革新技術を社会に提案する．この報告書をお読みになる方々への我々の意思を示し，序文の締めくくりとしたい．

平成 26 年 9 月 1 日

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会
劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
委員長　佐藤 靖彦（北海道大学大学院）

劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
委員構成

委 員 長	佐藤　靖彦	北海道大学大学院工学研究院
副委員長	渡邊　忠朋	北武コンサルタント株式会社
幹 事 長	小林　竜太	株式会社ドーコン
幹　　事	坂本　智明	北武コンサルタント株式会社
	加藤　貴博	株式会社ダイヤコンサルタント
委　　員	加藤　貴久	三菱樹脂インフラテック株式会社
	加藤　　剛	株式会社構研エンジニアリング
	亀海　貴寛	株式会社シー・イー・サービス
	川口　和広	JIP テクノサイエンス株式会社
	久保　元樹	日東建設株式会社
	坂口　淳一	北武コンサルタント株式会社
	坂田　浩一	株式会社長大
	佐藤　　真	株式会社シビテック
	塩原　龍法	株式会社開発工営社
	島多　昭典	独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所
	関下　裕太	株式会社北未来技研
	田中　雄太	株式会社タナカコンサルタント
	戸塚　智勝	北海道キング設計株式会社
	中田　雄之	株式会社開発調査研究所
	橋本　松市	株式会社開発調査研究所
	林田　　宏	独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所
	藤田　光則	株式会社ドーコン
	星野　淳一	JIP テクノサイエンス株式会社
	宮本　真一	北武コンサルタント株式会社
	山口　雅史	ショーボンド建設株式会社
	吉田　安寿	株式会社ドーコン
	和田　隆宏	北海道土木設計株式会社
旧 委 員	青柳　竜二	株式会社長大
	田口　史雄	独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所
	竹下孝一郎	株式会社長大
	豊蔵　宏貴	株式会社開発調査研究所
	中野　泰宏	日東建設株式会社
	花田　眞吉	中大実業株式会社
	藤田　真吉	株式会社シビテック
	吉永　文彦	札幌市建設局
	和田　賢治	株式会社長大

［注］敬称略・五十音順

劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
ＷＧ構成

ＷＧ１（構造解析）

主　査	小林　竜太	株式会社ドーコン
副　査	川口　和広	JIP テクノサイエンス株式会社
委　員	亀海　貴寛	株式会社シー・イー・サービス
	坂口　淳一	北武コンサルタント株式会社
	関下　裕太	株式会社北未来技研
	宮本　真一	北武コンサルタント株式会社
	吉田　安寿	株式会社ドーコン

ＷＧ２（凍害評価）

主　査	加藤　貴博	株式会社ダイヤコンサルタント
副　査	塩原　龍法	株式会社開発工営社
副　査	林田　　宏	独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所
委　員	加藤　貴久	三菱樹脂インフラテック株式会社
	加藤　　剛	株式会社構研エンジニアリング
	久保　元樹	日東建設株式会社
	小林　竜太	株式会社ドーコン
	坂田　浩一	株式会社長大
	坂本　智明	北武コンサルタント株式会社
	佐藤　　真	株式会社シビテック
	関下　裕太	株式会社北未来技研
	田中　雄太	株式会社タナカコンサルタント
	中田　雄之	株式会社開発調査研究所
	橋本　松市	株式会社開発調査研究所
	藤田　光則	株式会社ドーコン
	山口　雅史	ショーボンド建設株式会社
	和田　隆宏	北海道土木設計株式会社

ＷＧ３（普及啓発）

主　査	坂本　智明	北武コンサルタント株式会社
副　査	和田　隆宏	北海道土木設計株式会社
委　員	小林　竜太	株式会社ドーコン
	戸塚　智勝	北海道キング設計株式会社
	星野　淳一	JIP テクノサイエンス株式会社

劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会［報告書］

目　　次

序

第１章　活動の背景と目的 1

第２章　材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能に関する現状技術 2
2.1　はじめに 2
2.2　用語の定義 3
2.3　材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能に関する実験的検討の整理 4
2.4　材料劣化を考慮した非線形解析法の適用事例の整理 6
2.5　おわりに 9

第３章　非線形有限要素法による RC 部材の数値解析的検討 12
3.1　はじめに 12
3.2　用語の定義 13
3.3　RC 梁の載荷実験 19
3.3.1　実験概要 19
3.3.2　実験結果 23
3.4　RC 梁の載荷実験を対象としたブラインド解析 31
3.4.1　本検討の概要 31
3.4.2　解析手法 32
3.4.3　曲げ破壊型 RC 梁に対する検討 35
3.4.4　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁に対する検討 36
3.4.5　まとめ 37
3.5　RC 部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討 38
3.5.1　本検討の概要 38
3.5.2　解析手法 39
3.5.3　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる検討 42
3.5.4　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる検討 42
3.5.5　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる検討 45
3.5.6　まとめ 48

3.6　RC 梁の載荷実験を対象とした数値解析的検討 49
3.6.1　本検討の概要 49
3.6.2　解析手法 50
3.6.3　曲げ破壊型 RC 梁に対する検討 55
3.6.4　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁に対する検討 62
3.6.5　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型 RC 梁に対する検討 68
3.6.6　まとめ 80
3.7　おわりに 81

第４章　凍害で劣化したコンクリートおよび構造物の構造性能評価に関する現状 83
4.1　はじめに 83
4.2　凍害によるコンクリートの劣化メカニズムと構造性能 84
4.3　凍害による劣化現象の事例 91
4.4　点検における調査の現状 100
4.5　構造性能評価に関する検討事例 109
4.6　今後の課題 117
4.7　おわりに 118

第５章　今後の取り組みについて 121

付　録
付録−1：材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート 付-1-1
付録−2：投稿論文集 付-2-1
付録−3：委員会議事録集 付-3-1

第１章　活動の背景と目的

我が国では，高度経済成長期に建設された膨大な構造物が一斉に老朽化の時期を迎えつつあり，社会基盤施設の中に占める高齢化構造物の割合が急激に増加している．一方で，こうした構造物への補修や更新等に充当される社会資本投資は縮小される傾向にあるため，如何にして高齢化構造物の維持管理を効率的かつ効果的に行っていくかの方策が，構造物の管理者や技術者にとっての大きな課題となっている．既設構造物の中には，環境作用等によって劣化が生じている構造物が多数存在しており，満足させるべき性能に支障を来すほどに劣化が進行している構造物も現実に存在する．よって，こうした劣化が生じた構造物が，現時点においてどの程度の性能を有しているのか，将来において性能に支障を来す恐れがあるのかを確実に見極めた上で，適切な対策を講じていく必要がある．

コンクリート構造物の維持管理は，構造物の供用期間を通じて構造物が保有するべき性能（構造性能）を所要の水準以上に保持するために点検や将来予測を行い，その結果を評価・判定し，対策を講じる一連の行為である [1)]．しかしながら，現在行われている対策は，主に材料の耐久性確保に重点が置かれている場合が多く，構造物の変状に対してどの性能に影響を及ぼしているのかを把握した上での対策になっているとは言い難い状況にある．

膨大な社会資本ストックを効率的かつ効果的に維持管理することが急務となっている現在だからこそ，「材料」の維持管理から「構造物」の維持管理へ，つまり「コンクリートの状態評価」から「コンクリート構造物の性能評価」への発想の転換が必要であり，その意義は極めて明確であるものと考えられる．

このような背景に鑑み，「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会（以下，本委員会と称する）」では，先ず鋼材腐食やコンクリート劣化が構造性能に及ぼす影響に関する現状技術 [2),3)]について調査することとした．また，既設構造物の構造性能を定量的に評価するためには，非線形有限要素法に代表される構造解析技術の適用が不可欠と考えられることから，その知識や技術を習得するための基礎的な検討を行った．

なお，本委員会の目標は，積雪寒冷地特有の環境作用，すなわち凍結融解作用によって劣化したコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価することであり，現在継続して検討を進めているところである．これについては次期の活動成果として取りまとめる計画になっている．

【参考文献】

1）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］，2013.10.

2）土木学会 : 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，No.71，2006.

3）土木学会：続材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，No.85，2009.

第 2 章　材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能に関する現状技術

2.1　はじめに

土木学会「材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会（331 委員会）」の委員会報告書[28),30)] では，構造性能評価の現状について以下のように整理されている．

コンクリート構造物の要求性能を満足するためには，予定供用期間内での保有性能をある許容範囲内に保持されるように維持管理しなければならない．そのためにはコンクリート構造物の保有性能が時間的，空間的に精度よく予測されなければならないが，劣化因子のコンクリート中の移動や劣化反応メカニズムといった材料耐久性の研究に比べて，構造性能の予測技術は大きく遅れているのが現状である．しかし，近年は材料劣化に伴う構造性能の経時変化に着目した議論が活発に行われており，特に鉄筋腐食の問題に関しては，実験的および数値解析的な研究が比較的進んでいる状況にある．鉄筋腐食については，腐食した鉄筋の機械的性質やコンクリートとの付着特性の変化，耐力やじん性能に及ぼす影響を，鉄筋腐食や程度（劣化指標）と関連付けた整理が行われている．一方で，コンクリート自体が劣化する凍害やアルカリシリカ反応，化学的浸食については，材料耐久性に着目した研究は進められているものの，それらが構造性能に及ぼす影響に関する研究はあまり行われていないのが現状である．

また，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能を数値シミュレーションによって評価しようとした場合，数値解析結果の妥当性を検証するためには，実際に材料劣化が生じた部材の外力に対する応答が必要，つまり載荷実験結果が必要となる．しかし，各研究者や各機関における貴重な実験データは散在しているものの，統一的な指標で評価した成果は乏しく，材料劣化を考慮した数値解析手法の精度向上や汎用化を困難にしている．例えば，鉄筋腐食であっても RC 構造の耐荷性能は腐食とともに低下するという定性的な傾向では一致をみるものの，同程度の質量減少率や断面減少率の腐食であっても耐荷性能の低下率が相違する等，実験結果の信頼性が十分ではなく，どの実験結果を再現性のある実験事実とみなすかが明らかとなっていないのが現状である．このような実験結果の信頼性および再現性の低さは，数値解析技術の利用において，限られた実験結果をもとに材料劣化の要素モデルを構築し，結果を検証せざるを得ない状況を生み出している．したがって，数値解析モデルの構築や検証，解析結果の妥当性の評価において必要とされる，誤差を極力排除した信頼性の高い実験データの蓄積が求められている．

そこで，本委員会では，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に関する現状技術を把握するためには，既存報告書[例えば 28),30)] を整理・分析することが現状技術の把握への近道と考え，パワーポイントなどの資料を作成して委員会内で議論を行った．また，議論を進めていく中で，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能を直接的に評価するためには，非線形解析法の適用が有効であると認識したため，非線形解析法の適用事例についても整理・分析を行った．

2.2　用語の定義

本報告書では，以下のように用語を定義する．なお，本節で示した以外の用語については，示方書や各種学協会の指針や報告書等を参照されたい．

(1) 構造性能

構造物に要求される性能をいい，一般には，安全性，使用性，復旧性として定義される．

(2) 劣　化

性能が時間軸上で変化（一般には低下）していることをいう．すなわち，「劣化」は実際に現れた目視で確認できる「現象」ではなく，劣化した結果として「損傷」という状態として現れる．よって，塩害，中性化，アルカリシリカ反応，凍害等は「劣化」ではなく，あくまでも「劣化の原因」である．

(3) 損　傷

ひび割れや鋼材腐食等の「状態の変化」を表す呼称であり，つまり物理的な欠陥をいう．例えば，凍害によるひび割れやスケーリングは，「劣化」ではなく「損傷」である．

(4) 変　状

構造物やその部材があるべき健全な状態から，損傷や変形によってある性能が変化している状態をいう．よって，広義の意味では「損傷」が含まれる．例えば，曲げひび割れが生じた梁を想定した場合，「変状」は曲げひび割れの損傷や鉛直たわみの変形が生じた状態をいい，「損傷」は曲げひび割れ，「変形」は鉛直たわみである．

(5) 耐久性

構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性をいう．耐久性とは，安全性，使用性，復旧性等の要求性能が設計耐用期間にわたって確保されることを目的として設定されたものであり，安全性，使用性，復旧性といった独立した性能ではなく，これらの性能の経時変化に対する抵抗性である．

(6) 力学特性

材料の力学的な特性を示すもので，鉄筋コンクリートの場合には，コンクリートや鉄筋の応力－ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の付着－すべり関係，せん断伝達機構をいう．

(7) 劣化指標

性能が変化していることを評価するための指標をいう．例えば，塩化物イオン含有量等がそれに該当する．

2.3　材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能に関する実験的検討の整理

土木学会 331 委員会報告書 [28),30)] では，(1)鉄筋腐食，(2)アルカリシリカ反応，(3)化学的浸食に着目して，実験的な検討結果が整理されている．本節では，このうちの(1)鉄筋腐食，(2)アルカリシリカ反応について概説する．

(1)鉄筋腐食

劣化した構造物の内部に存在する腐食した鉄筋の断面積，形状，腐食状態を直接把握するのは困難であるため，腐食した鉄筋の機械的性質は，別の指標によって評価されることが多い．従来からの評価方法として JCI-SCI に規定されているコンクリート供試体中における鋼材腐食状態の評価方法があるが，これは小さな供試体の丸鋼を対象としているため実用上は適用に無理がある．近年の研究では，全体に対する腐食部分の質量減少率を用いて劣化指標を表現する事例があるが，測定区間における平均的な断面減少量であり，対象区間を広くとるなど，バラツキの程度を考慮する必要がある．

鉄筋の付着特性に及ぼす腐食鉄筋の影響としては，鉄筋表面の腐食生成物の存在によって鉄筋の付着が損なわれることや，腐食ひび割れの発生によりコンクリートによる鉄筋の拘束が解放されてコンクリートと鉄筋の付着が損なわれることであり，鉄筋からコンクリートに伝達する引張力の低下，鉄筋の抜け出しやすべり量の増加およびひび割れ分散性の喪失などの力学性能に影響を及ぼす．しかし，主鉄筋のみを電食にて腐食促進させ，せん断補強鉄筋の腐食を再現していない実験が多いことから，鉄筋腐食による付着低下を適切に評価する実験条件の選択が必要である．

曲げ耐力については，比較的小型の RC 試験体を用いて，鉄筋の力学特性，コンクリート強度，ひび割れ幅などの劣化指標に関する研究が行われているが，実構造部材を用いた研究ではコンクリートおよび鉄筋自体の材料劣化に関する報告は数多いが，部材の耐荷性との関係について検討された事例は多くない．鉄筋の質量減少率を劣化指標とした検討では，曲げ耐力は腐食とともに低下するという定性的な傾向では一致をみるものの，同程度の質量減少率や断面減少率の腐食において耐荷性能の低下率が相違している．

鉄筋の定着に着目した研究では，鉄筋腐食により腐食ひび割れが全長に生じると，破壊モードが曲げ引張破壊から脆性的な定着破壊に移行する場合があるため，鉄筋断面積の減少や腐食した鉄筋とコンクリートの付着力低下の考慮だけでは耐力予測は困難であり，腐食ひび割れ性状を考慮する必要がある．

鉄筋腐食がせん断耐力に与える影響に関する検討は曲げ耐力に比べて極めて少ないが，近年，せん断補強鉄筋や主鉄筋を腐食させた RC はりの載荷実験が行われている．せん断補強鉄筋のみを腐食模擬した検討では，数%の質量減少率では最大荷重が増加する場合もあり，メカニズムは不明である．主鉄筋腐食の場合，主鉄筋に沿った腐食ひび割れが大きくなり，顕著な斜めひび割れが減少し曲げ破壊に移行するなど，破壊モードが変化することに留意する必要がある．

疲労耐力については，部材を構成する鋼材またはコンクリートの疲労強度によって定まるため，既往の研究においても，腐食した鉄筋の疲労強度に関する検討が行われており，特に主鉄筋の腐食の影響を大きく受けるとされている．また，鉄筋の腐食ひび割れは，構造物の点検において主要な項目の１つではあるが，現状では疲労耐力を定量的に評価可能な指標にはなっていない．道路橋床版で見られるような押し抜きせん断破壊については，ひび割れ密度等が指標として用いられているが，現状ではひび割れ損傷等の疲労劣化の観点からの評価は見られるものの，鉄筋腐食と関連付けた評価は見られない．ただし，実際には疲労損傷と材料劣化が同時に起こっている可能性が高いため，質量減少量やひび割れ密度等の影響を考慮した指標が必要である．

じん性能については，正負交番載荷実験による耐荷性能，曲げ塑性変形および耐震性能に着目して検討が行われている．腐食程度が軽微（主鉄筋の質量減少率が 1%以下）な場合には，部材剛性やエネルギー吸収性能が腐食していない場合よりも向上する場合がある．ただし，質量減少率が小さい場合でも，かぶりコンクリートのひび割れ幅が大きくなった場合には拘束効果の向上が期待できず，耐荷性能の向上が見られない．腐食程度が大きい場合には，鉄筋の降伏強度や引張強度よりも伸び性能の低下が著しくなるため主鉄筋や帯鉄筋の破断が生じるという研究報告が多い．そのため，大変形領域では，主鉄筋の破断による耐荷力の急激な低下や帯鉄筋の破断によってせん断破壊が生じる可能性がある．

(2)アルカリシリカ反応（ASR）

アルカリシリカ反応では，採取コアの圧縮強度，弾性係数，超音波伝播速度，鉄筋破断状況およびひび割れ状況から，鉄筋の付着性能を評価して照査を行っているのが現状であり，実験等で得られた知見を直接的に構造性能評価に適用することが困難な状況にある．

ASR が生じたコンクリートの力学特性は，圧縮強度は膨張量が大きくなるほど低下する傾向にある．また，弾性係数は膨張量が大きくなるほど影響が大きく，約 1/3 程度まで低下した報告事例もあり，圧縮強度よりも弾性係数に与える影響の方が大きいようである．

鉄筋と ASR による劣化コンクリートとの付着や定着に着目した実験例は極めて少ないが，せん断補強筋の曲げ加工部の破断や定着不良，主鉄筋の定着不良を想定した実験ではせん断耐力が大幅に低下するという報告がある．

曲げ耐力については，膨張拘束時に鉄筋降伏や破断まで至らない RC はりでは，ケミカルプレストレス効果によって曲げ耐力はほとんど低下しないとされているが，最小鉄筋比以下の RC はりでは，劣化していない RC はりよりも曲げ耐力が小さくなるという報告がある．

せん断耐力については，コンクリート強度の低下に伴うコンクリート負担力の低下や発生したひび割れに伴うせん断補強筋の付着・定着の低下を受け，a/d が大きい場合には影響は小さく，a/d が小さい場合には劣化していないものと比較して 67%程度までせん断耐力が低下したという報告がある．せん断破壊型の部材が ASR によって曲げ破壊型へ移行するケースが多く認められ，破壊形態の移行や耐荷機構についての更なる検討が望まれる．

2.4　材料劣化を考慮した非線形解析法の適用事例の整理

2013 年に改定された土木学会コンクリート標準示方書［維持管理編］では，既設構造物の性能の評価方法として，(1)構造物の外観上のグレードによる方法，(2)設計での性能評価式による方法，(3)非線形有限要素法に代表される数値シミュレーション手法による方法，のいずれかによることが原則とされており，診断の目的や評価すべき性能に応じて適切な評価手法を選定することが示されている．(1)による方法は，構造物の性能と構造物の外観上のグレードを関連づけることで間接的に性能を評価する方法であり，現状においては最も現実的な評価方法である．しかしながら，半定量的かつ安全側の評価になることは避けられない．(2)による方法は，定量的な評価は可能であるが，平面保持の仮定や修正トラス理論といった古典的な鉄筋コンクリート力学理論に基づいて作成された性能評価式を適用するため，材料劣化による変状の程度が大きい場合等，性能照査で仮定した前提条件が成立していない場合には適用することができない．一方，(3)による方法は，定量的な評価が可能であり，かつ(2)の方法における適用上の制約条件もないため，最も汎用性の高い評価手法である．また，材料特性の空間的なバラツキやひび割れの影響等を直接的に考慮できる解析手法であり，要素毎に詳細調査で得られた変状の状態や材料特性を設定できるため，大きなバラツキを示す変状が生じた構造物や部材の性能を精度良く評価するのに適している．よって，(3)による方法は，現時点では検討途上段階ではあるものの，材料劣化が生じた部材や構造物への適用実績や検討事例が増えてきていることを鑑みると，近い将来には非線形解析法によって直接的に構造性能を評価することが主流になるものと考えられる．

そこで，本節では，材料劣化が生じた部材や構造物の構造性能評価に非線形解析法を適用した事例や研究成果を収集・分析することを目的として，土木学会や日本コンクリート工学会等における学術論文や委員会報告書を中心とした計30編に対する文献調査(**表2.4.1**)を実施して，それらの分析を行った．ここで，文献調査では，材料劣化による損傷を，①鋼材腐食，②定着不良，③コンクリート劣化，④その他，に区分して，独自に文献調査シートを作成して，同一フォーマットで整理することとした．なお，文献調査シートについては**付録－1**に示した．

(1) 鋼材腐食および定着不良に着目した論文の分析

鋼材腐食および定着不良に着目した論文では，1990 年代は材料構成則自体に劣化を考慮することはせず，鋼材腐食の膨張量を強制変位として扱うなどの工夫によって劣化をシミュレートしていたが，見かけ上の降伏点の低下で耐力低下を表現する研究も見られた．

2000 年代に入ると，実験的に鋼材を腐食させた試験体を用いて腐食量と耐力の関係を検討するといった研究が多くなり，近年では実物の橋梁を解体して耐力評価を行う研究も行われるようになった.これらの研究においては，解析手法として有限要素法（FEM）の適用が最も多く見られるが，剛体－バネモデル（RBSM）やファイバーモデルなどといった手法も適用されている．

なお，鋼材腐食および定着不良を対象とした場合における数値解析上の劣化のモデル化方法は以下のとおりである．

・鉄筋の断面積減少
・鉄筋の腐食量に応じた見かけ上の降伏点等の低下
・鉄筋の腐食形態（均一，局部）に応じた弾性係数や降伏強度の低減
・付着剛性や付着強度の低下，せん断ひずみ－せん断応力関係の変化
・付着パラメータによる制御（分散ひび割れ－分散鉄筋モデルの場合）
・定着区間の無視

(2) コンクリートの劣化に着目した論文の分析

コンクリートの劣化に着目した数値解析的研究は比較的最近であり，劣化が生じた RC 部材の構造性能評価に非線形解析法を適用した論文が見られるようになってきたのは 2000 年代後半である．論文の大部分は，アルカリシリカ反応（ASR）による劣化が対象とされており，凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能に関する論文は数少ない．また，研究初期では供試体を用いた実験および数値解析による研究がほとんどであったが，近年では実構造物を対象とした実験および数値解析による研究が行われている．なお，これらの研究では，解析手法として FEM やファイバーモデルなどが適用されている．コンクリートの劣化を対象とした場合における数値解析上の劣化のモデル化方法は以下のとおりである．

・ASR 膨張により生じるコンクリートの損傷を材料特性値（圧縮強度，弾性係数，引張強度）の低下と初期ひび割れの導入によって考慮
・凍結融解作用によるコンクリートの劣化を材料特性値（圧縮強度，弾性係数，引張強度）を低減させることで考慮

これより，材料劣化を考慮した非線形解析法の適用事例に関する文献調査を行った結果，凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能評価に非線形解析法を適用した事例はほとんどなく，未だ検討段階であることが明らかとなった．

なお，コンクリート構造物に対する非線形解析（ここでは非線形有限要素解析）では，コンクリートの圧縮・引張・せん断伝達モデル，鋼材モデル，付着モデルといった材料構成則は勿論のこと，コンクリートのひび割れモデルや要素寸法，非線形解析特有の求解法や収束計算方法の設定に大きな影響を受ける．そのため，非線形解析の適用にあたっては，先ず変状が生じていない状態に対する妥当性と信頼性を確認しておく必要がある．そこで，本委員会では材料劣化が生じていない健全な部材を対象として種々の解析的検討を行ってきた．その検討内容や検討結果については**第 3 章**にて取りまとめている．

表 2.4.1　材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査リスト

整理番号	区 分	文献題名	年 次	出典先	種 別
1	鋼材腐食	鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察	1989	JSCE	論　文
2		鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析	1997	JCI	論　文
3		有限要素法による鉄筋の腐食したRC梁の耐力性能評価	1997	JCI	論　文
4		引張主筋の腐食したRC梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究	1998	AIJ	論　文
5		強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験シミュレーション	2002	JCI	論　文
6		鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響	2002	PARI	報　告
7		鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究	2003	JSCE	論　文
8		鉄筋腐食を考慮したRCはり部材のせん断耐荷性能評価	2003	JCI	論　文
9		鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響	2006	JSCE	論　文
10		鉄筋の腐食分布がRCはり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響	2008	JSCE	論　文
11		塩害による鋼材腐食を考慮した実PC上部工の構造性能評価	2009	JCI	論　文
12		塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価	2010	JSCE	論　文
13		引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化	2011	JCI	論　文
14		著しい塩害を受けて劣化した道路橋PC上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析	2011	JSCE	論　文
15	定着不良	せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響	2004	JCI	論　文
16		鉄筋の定着不良を有するRC梁のせん断破壊性状の評価	2005	JCI	論　文
17		せん断補強筋に定着不良が生じたRCはりのせん断破壊挙動解析	2006	JSCE	論　文
18		主鉄筋に定着不良を有するディープビームの耐荷性状	2007	JCI	論　文
19	コンクリート劣化	ASRで劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究	2007	JCI	論　文
20		アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張予測解析	2007	JSCE	論　文
21		ASRを生じたPCはりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価	2009	JCI	論　文
22		コンクリート構造物におけるASR損傷と損傷後の構造性能の評価	2011	JSCE	論　文
23		ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討	2012	JCI	論　文
24		凍結融解作用により劣化したRCはり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価	2013	JCI	論　文
25	その他	コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム	2004	JCI	委員会報告書
26		地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計～設計と照査の現状と将来展望～	2005	JSCE	委員会報告書
27		材料劣化を考慮した既設RC橋脚の耐震性能に関する一検討	2006	JSCE	論　文
28		材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2006	JSCE	委員会報告書
29		コンクリート構造物の耐震設計～時空間における設計の課題と近未来像～	2008	JSCE	委員会報告書
30		続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2009	JSCE	委員会報告書

※表中の整理番号は，参考文献の番号と対応している．

2.5　おわりに

本章では，材料劣化がコンクリート構造物の構造性能に及ぼす影響に関する現状技術を把握することを目的として，土木学会「材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会（331 委員会）」の委員会報告書をベースに，これまでに行われた実験的検討や数値解析的検討について整理・分析を行った．

代表的な損傷である鉄筋腐食に対しては，構造性能評価に関する実験的・数値解析的な検討が精力的に進められているが，積雪寒冷地特有の環境作用すなわち凍結融解作用（凍害）によって劣化したコンクリート構造物や部材に対する検討事例は極めて少ないため，今後の実験データの蓄積や数値解析的検討が期待される．

なお，本委員会の最終目標は凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価するための手法を提案することであるが，先ずは材料の観点から見た凍害によるコンクリートの劣化メカニズムや劣化現象の事例，点検における調査の現状，構造性能評価の検討事例について整理を行った．この内容については**第 4 章**にて取りまとめている．

【参考文献】

1）橘吉宏，梶川康男，川村満紀：鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する考察，土木学会報告集，第 402 号／V-10，pp.105-114，1989.

2）松尾豊史, 西内達雄, 松村卓郎 : 鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.99-104，1997.

3）李翰承，友澤史紀，野口貴文，鹿毛忠継：有限要素法による鉄筋の腐食した RC 梁の耐力性能評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1147-1152，1997.

4）李翰承，友澤史紀，野口貴文，友澤史紀：引張主筋の腐食した RC 梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系報告集，第 506 号，pp.43-50，1998.

5）松尾豊史，松村卓郎，遠藤達巳，橘泰久：強制的に腐食させた RC ボックスカルバートの載荷実験シミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1297-1302, 2002.

6）加藤絵万，岩波光保，横田弘，伊藤始，佐藤文則：鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料 1044，2003.

7）佐藤文則，岩波光保，横田弘：鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.63-76，2003.

8）橋本航，森川英典，小林秀惠：鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん断耐荷性能評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1009-1014，2003.

9）大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集 E，Vol.62，No.3，pp.542-554，2006.

10）斉藤成彦，高橋良輔，檜貝勇：鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.601-611，2008.

11）上原子晶久，岩城一郎，鈴木基行：塩害による鋼材腐食を考慮した実 PC 上部工の構造性能評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.2，pp.1525-1530，2009.
12）田中泰司，山口貴幸，下村匠：塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の載荷試験と数値解析による評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.466-482，2010.
13）松尾豊史，松村卓郎，金津努：引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.33，No.1，pp.1121-1126，2011.
14）上原子晶久，岩城一郎，鈴木基行：著しい塩害を受けて劣化した道路橋 PC 上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.3，pp.333-350，2011.
15）前川宏一，中村光，佐藤靖彦，Kukrit Toongoenthong：せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.973-978，2004.
16）阿部仁，斉藤成彦，檜貝勇：鉄筋の定着不良を有する RC 梁のせん断破壊性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.337-342，2005.
17）澤部純浩，上田尚史，中村光， 国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集， Vol.62，No.2，pp.444-461，2006.
18）小倉弘崇，細田暁，奥野圭一：主鉄筋に定着不良を有するディープビームの耐荷性状，コンクリート工学年次論文集， Vol.29，No.3，pp.655-660，2007.
19）三浦達夫，長田光司，小野聖久，池田尚治：ASR で劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.3，pp.9997-1002，2007.
20）上田尚史，澤部純浩，中村光，国枝稔：アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析，土木学会論文集，Vol.63，No.4，pp.532-548，2007.
21）上田尚史，澤部純浩，中村光，国枝稔：ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1261-1266，2009.
22）上田尚史，中村光，国枝稔，前野裕文，森下宣明，浅井洋：コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.67，No.1，pp.28-47，2011.
23）金城和久，富山潤，金田一男，車谷麻緒：ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.970-975，2012.
24）林田宏，佐藤靖彦，小林竜太，吉田安寿：凍結融解作用により劣化した RC はり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol35，No.1，pp.901-906，2013.
25）日本コンクリート工学協会コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会報告書，2004.
26）土木学会コンクリート委員会　耐震設計研究小委員会：地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計～設計と照査の現状と将来展望～，土木学会コンクリート技術シリーズ No.67，2005.

27）名古屋和史，石川義樹，前原康夫：材料劣化を考慮した既設 RC 橋脚の耐震性能に関する一検討，第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.69-76，2006.2，
28）土木学会 : 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，No.71，2006.
29）土木学会：コンクリート構造物の耐震設計～時空間における設計の課題と近未来像～，土木学会コンクリート委員会，コンクリート技術シリーズ No.81，2008.
30）土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，No.85，2009.

第３章　非線形有限要素法による RC 部材の数値解析的検討

3.1　はじめに

本委員会では，凍結融解作用によって劣化したコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価することを目標として，そのために，非線形有限要素解析を適切に活用することを目指している．

本委員会の開始当初，多くの委員は非線形有限要素解析をあまり経験しておらず，また，コンクリート構造物の破壊挙動解析等の解析経験は豊富でも，鉄筋コンクリート部材の破壊現象を実際の目で確かめた経験のない委員もいた．非線形有限要素解析を用いて適切な構造性能評価を行うためには，鉄筋コンクリート部材の破壊現象や非線形有限要素解析の正しい利用方法を習得し，また，解析で得られた結果の妥当性を合理的に判断できることが重要である．そこで，本委員会ではそれらの基礎的な知識を習得するために，まずは劣化していない健全な鉄筋コンクリート部材を対象とした数値解析的検討を実施することから始めた．

まず，第一段階として，鉄筋コンクリート部材の破壊に対する理解を深めるため，破壊形式が異なる RC 梁部材 3 体の載荷実験を行い，目の前で起こるひび割れの発生と進展，部材の破壊現象を体験し観察した．また一方で，複数の委員が実験結果を見ずに，それぞれブラインドで非線形有限要素解析を実施し，各々の解析結果を比較し議論することで解析手法の習得を試みた．また，それらの議論を行うために，専門用語の整理も同時に行った．

RC 梁部材のブラインド解析では，解析者によって解析結果のばらつきが見られ，その考察を試みたが，解析プログラムやモデル化方法等の各種条件が異なるため，その要因の整理は困難であった．そこで，問題をシンプルにして分析するため，第二段階として RC 部材の一軸引張挙動に着目した解析検討を実施した．この検討により，コンクリートのひび割れや鉄筋のモデル化方法の違い，また，付着モデルやそのパラメータの違いによる結果への影響などを整理した．

そして，第三段階として，これまでの検討で得られた知見を踏まえて，再度，RC 梁部材の載荷実験を対象にした解析検討を実施し，実験結果の再現性の確認や各種パラメータに対する感度解析，また，解析結果の評価について考察を行った．

本章では，これら一連の解析的検討の結果について取りまとめた．なお，これらの検討は，研究者ではなく設計実務者の視点で実施したものであり，非線形有限要素解析に対する基礎的な知識の習得と，解析手法や解析結果の妥当性を確認するために，協議と試行錯誤を重ねたものである．

なお，本委員会においてこれまでに投稿した論文を**付録－２**に示した．

3.2　用語の定義

コンクリート構造物の解析に有限要素法を適用するにあたり，基礎的な主要用語について整理した．なお，本節で示した用語は，必ずしも用語本来の意味を正確に定義したものではないことに留意していただきたい．

(1) 有限要素法

微分方程式を近似的に解くための数値解析手法の一つで，連続体を有限の大きさの要素すなわち領域に分割し，それらは要素境界上の節点において連結されていると考えて，節点の釣合方程式を連立させて解く手法である．変位場を近似した形状関数（補間関数）を与える変位法と，内力を未知数とする応力法があるが，一般には変位法が広く用いられている．

(2) 節点

要素を構成する点であり，節点において要素を互いに結合し，変位の適合および力の伝達を行う．また，要素内の連続量（ひずみ等）は節点での物理量を変数とした連続関数によって定義される．

(3) 要素

連続体を有限の大きさに分割した領域である，節点によって形状が規定される．

(4) 自由度

節点が持つことができる変位・回転あるいは力・モーメントの成分数をいう．

(5) 形状関数

要素内の変位分布を節点の変位量から求めるための関数．補間関数とも呼ばれる．

(6) 境界条件

境界の状態を規定する条件であり，変位境界や荷重境界が一般的である．

(7) はり要素

曲げ変形を表現できる要素で，節点の変位（荷重）量は，部材直角方向変位（せん断力）と回転角（曲げモーメント）である．扱えるひずみは曲率から求まる軸方向ひずみである．

(8) トラス要素

軸変形を表現できる要素で，節点の変位（荷重）量は，軸方向変位（軸力）である．扱えるひずみは軸方向ひずみである．

(9) 板要素・シェル要素

面部材を表す要素で，板要素・シェル要素は，その厚さによって薄板・薄肉シェルと厚板・厚肉シェルに分類される．板要素は，平面シェルとして広義のシェル要素に分類されることもある．

(10) ソリッド要素

2 次元（三角形要素・四角形要素），3 次元（四面体要素・六面体要素）の実質的な領域を有する要素で，一般的に 2 次元のソリッド要素を平面要素，3 次元のソリッド要素を立体要素という．

(11) ジョイント要素（接合要素）

要素間を結ぶ要素で，2 点を結ぶ点ジョイント，隣り合う 2 次元ソリッド要素同士や板要素と 3 次元ソリッド要素の共有辺などに設ける線ジョイント，3 次元ソリッド要素同士の共有面などに設ける面ジョイントがある．厚さの概念がないのが特徴である．

(12) ファイバーモデル

はり要素では，剛性マトリックスが断面剛性により記述されるため，断面の力学性状が必要となる．その際，断面の力学性状を表す構成モデルである曲げモーメントー曲率関係を直接与える方法を部材モデルという．それに対して，部材断面を微小断面に分割し，それぞれ微小断面に応力ーひずみ関係を与えて，その結果に基づいて断面の力学性状を与える方法をファイバーモデルという．

(13) 平面応力

2次元問題における応力ーひずみ状態を示し，2次元平面の面直角方向の応力が0である状態を平面応力という．

(14) 平面ひずみ

2次元問題における応力ーひずみ状態を示し，2次元平面の面直角方向のひずみが0である状態を平面ひずみという．

(15) 微小ひずみ

物体に生じる変位が微小であり，変形前と変形後で同じ座標系を仮定して得られるひずみをいう．変位勾配，すなわちひずみの一次項のみを考慮したひずみである．

(16) 有限ひずみ

変形前と変形後で異なる座標系を設定して得られるひずみをいう．ひずみの二次項以上を考慮したひずみである．

(17) 材料非線形

部材を構成する材料の応力－ひずみ関係が線形でない場合をいう.

(18) 幾何学的非線形

変形が大きくなり，微小変形理論（変形が微小であり，荷重を載荷しても構造要素の幾何学的形状が変化しないという仮定）が成立しない状態をいう．すなわち，幾何学的関係であるひずみ－変位関係が線形近似できない場合をいう.

(19) 要素積分点

要素内の応力やひずみの評価点をいう．一般に剛性方程式を求める際の数値積分にガウスの求積法を用いることからガウス積分点ともいう．局所情報である応力やひずみは，このガウス積分点で出力される場合が多い.

(20) 分散ひび割れモデル

コンクリートのひび割れモデルの 1 つであり，複数本のひび割れが要素内に均一に分散していると仮定し，ひび割れによる不連続変位を要素の平均的なひずみとして取り扱うモデルをいう.

(21) 離散ひび割れモデル

コンクリートのひび割れモデルの 1 つであり，ひび割れによる不連続変位を要素間の節点を分離させて直接的に取り扱うモデルをいう.

(22) 固定ひび割れモデル

ひび割れの発生後，ひび割れの方向を固定して解析を進めるモデルをいう．応力状態の変化により，主応力方向とひび割れ方向が一致しなくなるため，ひび割れ面のせん断伝達モデルが必要となる.

(23) 回転ひび割れモデル

ひび割れの発生後，ひび割れの方向が主応力方向と常に一致するように，ひび割れ方向を回転させるモデルをいう．主ひずみ方向と主応力方向を一致させるため，ひび割れ面のせん断伝達モデルを必要としない.

(24) 分散鉄筋モデル

鉄筋がコンクリート要素内に分散して配置されていると仮定し，鉄筋の効果をコンクリート要素に重ね合わせたモデルをいう．このモデルでは，鉄筋とコンクリートは完全付着となるため，付着の影響は鉄筋およびコンクリートの応力－ひずみ関係で考慮する.

(25) 離散鉄筋モデル

鉄筋をトラス要素またははり要素でモデル化し，コンクリート要素境界に配置するか，コンクリート要素内に埋め込んだモデルをいう．接合要素を用いてコンクリート要素と結合することで，鉄筋とコンクリート間の付着挙動を直接モデル化することが可能となる．

(26) 平均化構成則

ひび割れなどの変位の不連続挙動を含む領域の挙動を平均化して表した構成則をいう．コンクリート構成則の一般的な記述方法であり，テンションスティフニングも平均化することで生じるモデルである．

(27) 付着モデル

鉄筋とコンクリートなど，異種材料の界面の挙動を表すためのモデルをいう．一般に，付着モデルとしては付着応力ーすべり関係が導入される．なお，付着応力ーすべり関係は，載荷条件，境界条件，拘束状態，かぶり厚等に影響を受けることに留意する必要がある．

(28) ひずみ硬化

応力ーひずみ関係において，初期降伏点以降の塑性変形を受けた状態で除荷した後，再載荷した時の降伏点が初期降伏点よりも高くなる現象をいい，加工硬化と呼ばれる場合もある．

(29) ひずみ軟化

応力ーひずみ関係において，最大応力点（ピーク強度）に達した後に，ひずみの増加につれて伝達される応力が徐々に減少する現象をいい，加工軟化と呼ばれる場合もある．コンクリートでは圧縮応力下，引張応力下ともにひずみ軟化が生じる材料である．

(30) テンションソフトニング

ひび割れの発生後，引張ひずみ（ひび割れの開口変位）の増加に伴って伝達される引張応力度が減少する挙動をいい，引張軟化とも呼ばれる．この引張応力ー引張ひずみ（ひび割れの開口変位）の関係を表す曲線は，引張軟化曲線と呼ばれる．

(31) テンションスティフニング

鉄筋とコンクリートの付着作用によって生じる挙動であり，鉄筋コンクリートにおいてひび割れの発生後すぐに鉄筋単体の挙動に漸近せずに，徐々に応力を低減させながら鉄筋単体の挙動に漸近する挙動をいう．完全付着を仮定し，鉄筋単体の挙動の差をコンクリートの引張応力下の応力ーひずみ関係としてモデル化したものをテンションスティフニングモデルと呼ぶ．

(32) RC ゾーン

鉄筋とコンクリートの相互作用が存在すると仮定した領域をいう.

(33) 破壊エネルギー

破壊するまでに材料に加えられる総エネルギーをいう. コンクリートの引張破壊エネルギーは引張軟化曲線の面積で与えられ，単位面積あたりの完全に開口したひび割れを形成するのに要するエネルギーである．圧縮破壊についても破壊エネルギーが定義されている.

(34) せん断伝達モデル

ひび割れ面のせん断伝達応力をモデル化した構成則をいう.

(35) バウシンガー効果

金属材料の繰返し載荷時において，除荷時に応力の符号が反転すると，一方向載荷の場合よりも早期に降伏が始まる現象をいう.

(36) 等価長さ

分散ひび割れモデルにおいて, 要素内で破壊時のエネルギー消費が破壊エネルギーに一致する応力－ひずみ関係の設定に必要な寸法をいう．等価長さは，要素形状や寸法，補間関数の次数やひずみの方向に依存する.

(37) 塑性モデル

硬化材料, すなわちひずみの増加とともに応力も増加する材料の非可逆変形を取り扱うものであり，弾塑性モデルとも呼ばれる．コンクリートの圧縮応力下における塑性は，金属材料のようにせん断応力成分のみに支配されるものではなく，土質材料と同様に拘束圧依存性を持つため Drucker-Prager 型の弾塑性モデルが用いられる場合が多い. 鉄筋などの鋼材の塑性は，拘束圧依存性を持たない von-Mises 型の弾塑性モデルが用いられる場合が多い

(38) 荷重増分法

求解法の 1 つであり, 制御パラメータとして荷重を増分させる方法をいう. 複数の荷重を制御できることが特徴である．最大荷重以降は，除荷と載荷の 2 つの経路があるため，荷重に対して唯一決定することが困難である．よって，最大荷重までの解析に用いられる.

(39) 変位増分法

求解法の 1 つであり, 制御パラメータとして変位を増分させる方法をいう. 複数の荷重を与える場合には，アルゴリズムの変更が必要となる．最大荷重以降は変位に対して荷重を唯一決定することができるため，最大荷重以降まで解析する場合に用いられる.

(40) 弧長増分法

求解法の 1 つであり，制御パラメータとして荷重と変位で表される量（弧長）を増分させる方法をいう．複数の荷重を与え，最大荷重以降の解析も実施できる．

(41) 収束計算

非線形解析において，釣り合い条件を満足する解を求めるための繰り返し収束計算をいう．収束計算の手法としては，Newton-Raphson 法，修正 Newton-Raphson 法，初期剛性法等が代表的である．

(42) 収束判定

非線形の釣り合い式を解く場合に生じる不平衡力が十分に小さくなったことを判断するための収束条件をいう．収束判定法としては，エネルギーで判定する場合，荷重で判定する場合，変位で判定する場合がある．

(43) 不平衡力

応力から求めた内力（等価節点力）と外力との差をいう．内力と外力が等しい場合を，力が釣り合っている状態（平衡状態）という．

(44) 収束

不平衡力が，設定した閾値以下になった状態をいう．すなわち，非線形の釣り合い方程式を解く際に，時間（荷重）の増分解法や時間（荷重）ステップにおける反復解法などによって残差ベクトルの大きさ（残差ノルム）などで評価される指標が許容値内に収まった状態を収束という．数値解析上は残差ベクトルが厳密にゼロになることはないため，一般的には残差ベクトルのノルムが十分に小さくなることで判定される．

(45) 発散

不平衡力が非常に大きくなる状態をいう．すなわち，非線形釣り合い方程式の収束計算の過程において，計算を重ねることにより誤差が蓄積して残差ベクトルが極端に大きくなり，計算が破綻することをいう．例えば，荷重－変位関係に最大点があるような場合に荷重制御での解析を行った場合には，最大点よりも大きな荷重を与えた場合には解が存在しないため発散する．また，コンクリートのひび割れ解析等においては，ひび割れの発生により剛性が急激に変化すると，要素剛性マトリックスが特異になって発散する可能性がある．

また，解析が不安定となって解が発散する原因として，ロッキングやアワーグラスモードがある．前者は要素の変形が拘束され，過大なせん断力を生じてひび割れを分散させたり，荷重を過大に評価する現象をいい，後者は要素がエネルギーを吸収せずに，砂時計のような形の変形を生じることをいう．

3.3　RC 梁の載荷実験

3.3.1　実験概要

(1) 供試体諸元

材料が劣化していない健全な RC 部材の破壊に至るまでのプロセスを把握することを目的に，単純支持された RC 梁を対象として対称 2 点荷重による静的載荷実験を実施した．

実験供試体は，曲げ破壊型およびせん断破壊型（せん断補強鉄筋が無い場合および有する場合）を想定した 3 体であり，断面寸法およびスパン長は統一した．図 3.3.1～図 3.3.3 に，供試体の形状寸法および配筋状況を示す．

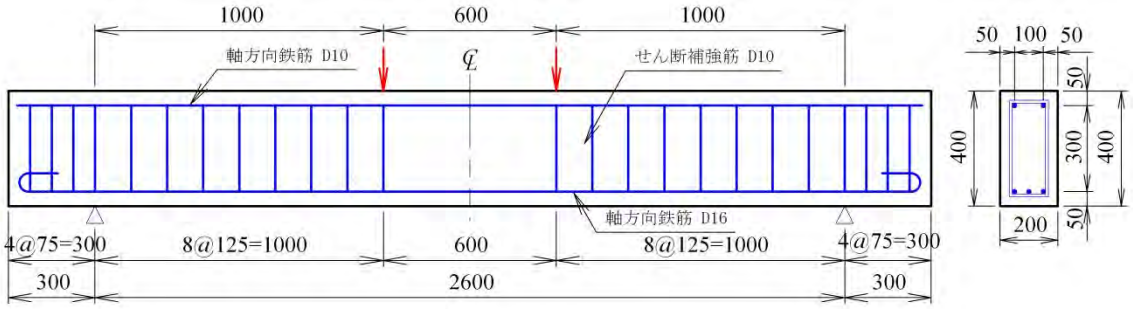


図 3.3.1　曲げ破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

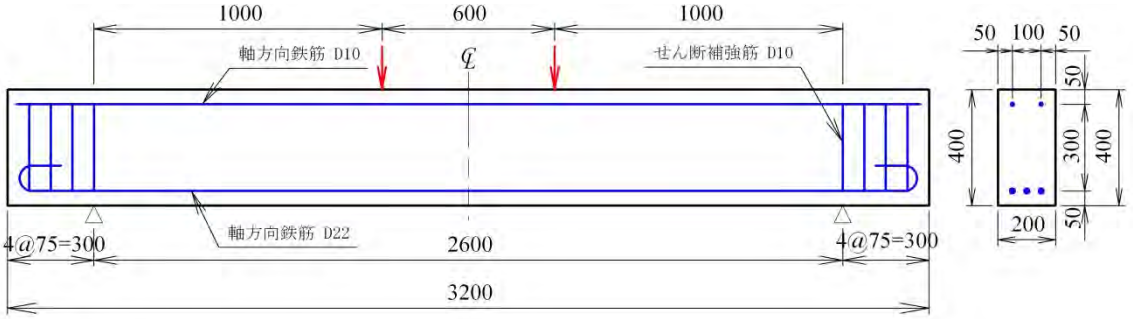


図 3.3.2　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

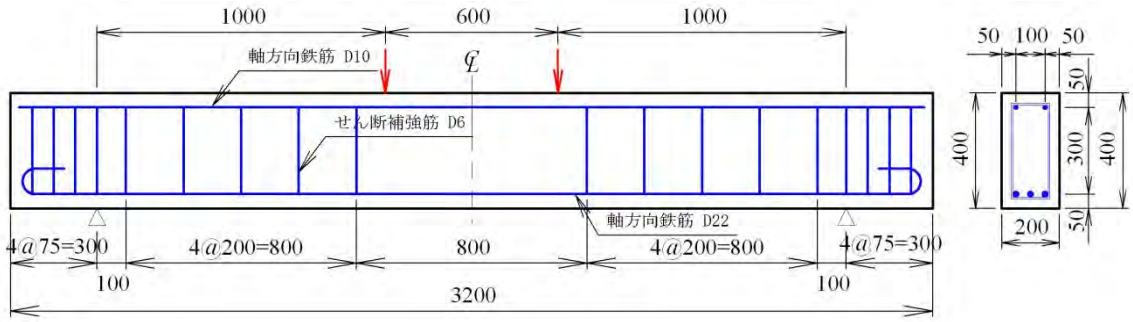


図 3.3.3　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

表 3.3.1 には，供試体の製作に使用したコンクリートの一軸圧縮試験から得られた圧縮強度を示している．なお，粗骨材の最大寸法は 20mm である．また，**表** 3.3.2 には，鉄筋の一軸引張試験から得られた降伏強度および弾性係数を示している．

表 3.3.1　コンクリートの材料特性

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)
曲げ破壊型供試体	25.7
せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体	
せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体	35.7

表 3.3.2　鉄筋の材料特性

鉄筋径	ヤング係数 (kN/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	備 考
D22	187	361	引張側軸方向鉄筋
D16	177	356	引張側軸方向鉄筋
D10	179	355	圧縮側軸方向鉄筋，せん断補強鉄筋
D6	179	360	せん断補強鉄筋

(2) 供試体の製作

写真 3.3.1 に，曲げ破壊型供試体の鉄筋の組立て状況を示す．写真中のケーブルは，ひずみゲージのリード線である．**写真** 3.3.1 に示した鉄筋を，**写真** 3.3.2 のように鋼製型枠に設置して，コンクリートを打設した．**写真** 3.3.3 に，コンクリート打設直後の様子を示す．コンクリート用バイブレータで締め固めた後，金属製のコテで表面処理を施した．

打設後，湿布養生を 8 日間行った．ただし，打設 2 日後に型枠を取り外したため，数時間気中に曝されている．打設後 9 日目からは湿布をはずし，気中養生を行っている．**写真** 3.3.4 および**写真** 3.3.5 に，湿布養生，気中養生の様子をそれぞれ示す．

(3) 載荷方法

載荷には，**写真** 3.3.6 に示すローゼン・ハウゼン型の載荷試験機を用いた．試験機の容量は 1,000 kN である．RC 梁の支承には，ローラーとピンを組み合わせたものを用い，鉛直方向のみを支持した（**写真** 3.3.7）．鋼板の幅は 90 mm である．また，荷重の伝達が局所化するのを避けるため，支承と供試体の間に石膏を介した．荷重は，**写真** 3.3.8 に示すように，荷重分配桁，ローラー，鋼板を介し，二点集中荷重を作用させた．鋼板の幅は 65 mm である．鋼板と供試体の間は，支承と同様，石膏を介している．

(4) 計測項目

実験においては，載荷荷重，スパン中央変位，鉄筋のひずみを計測している．供試体への載荷荷重は，試験機内蔵のロードセルを用いて測定した．**図 3.3.4～図 3.3.6** に，鉄筋のひずみ計測位置を示す．

写真 3.3.1　鉄筋の組立て

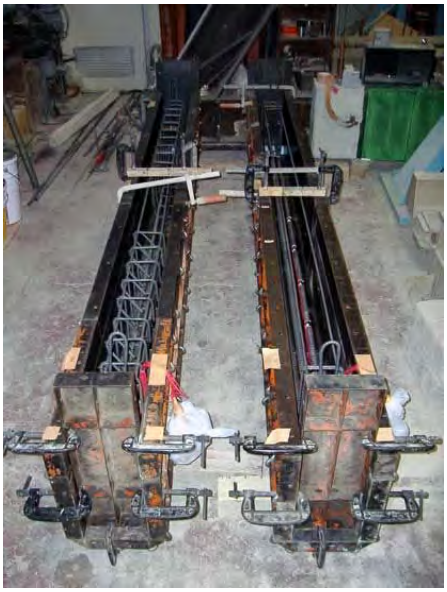


写真 3.3.2　型枠への設置

写真 3.3.3　打設直後の様子

写真 3.3.4　湿布養生の様子

写真 3.3.5　気中養生の様子

写真 3.3.6　載荷試験機

写真 3.3.7　支承

写真 3.3.8　二点集中荷重の載荷方法

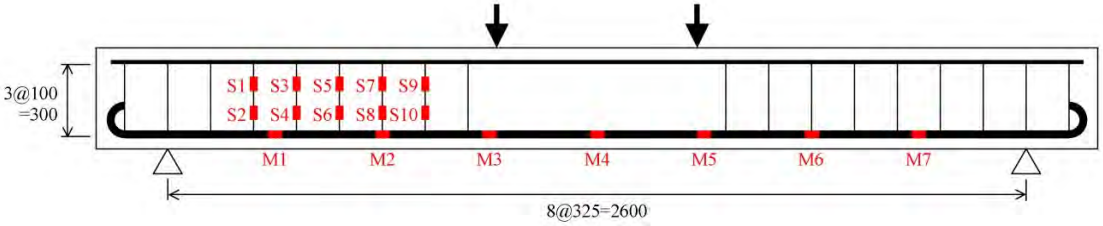


図 3.3.4　曲げ破壊型供試体の鉄筋のひずみゲージ貼付け位置

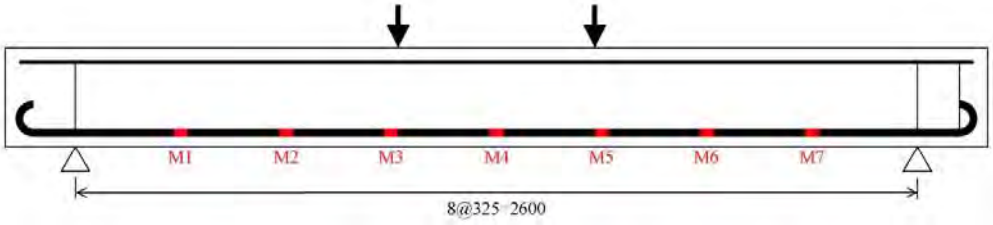


図 3.3.5　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の鉄筋のひずみゲージ貼付け位置

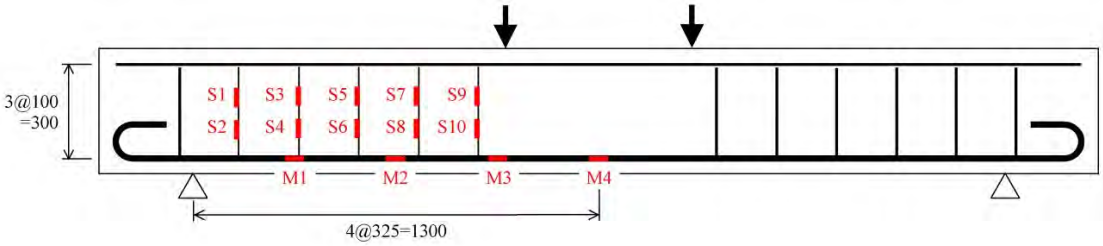


図 3.3.6　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の鉄筋のひずみゲージ貼付け位置

3.3.2　実験結果

(1) 破壊状況

写真 3.3.9～写真 3.3.11 に，RC 梁部材 3 体の実験終了後の供試体側面の写真を示す．

曲げ破壊型供試体は，梁下面からひび割れが鉛直方向に進展した後，最終的には載荷点近傍においてコンクリートが圧縮破壊して破壊に至った．

せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体は，梁下面からひび割れが鉛直方向に進展した後，**写真 3.3.10** に示すように右側のせん断スパンにおいて，急激に斜めひび割れが開口して破壊に至った．

せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体は，梁下面からひび割れが鉛直方向に進展した後，載荷点間の圧縮縁コンクリートが圧縮破壊して破壊に至った．ただし，せん断スパンにおけるひび割れの角度は，**写真 3.3.9** に示した曲げ破壊型供試体に比べて載荷点に向かって斜めに進展する傾向が見られた．

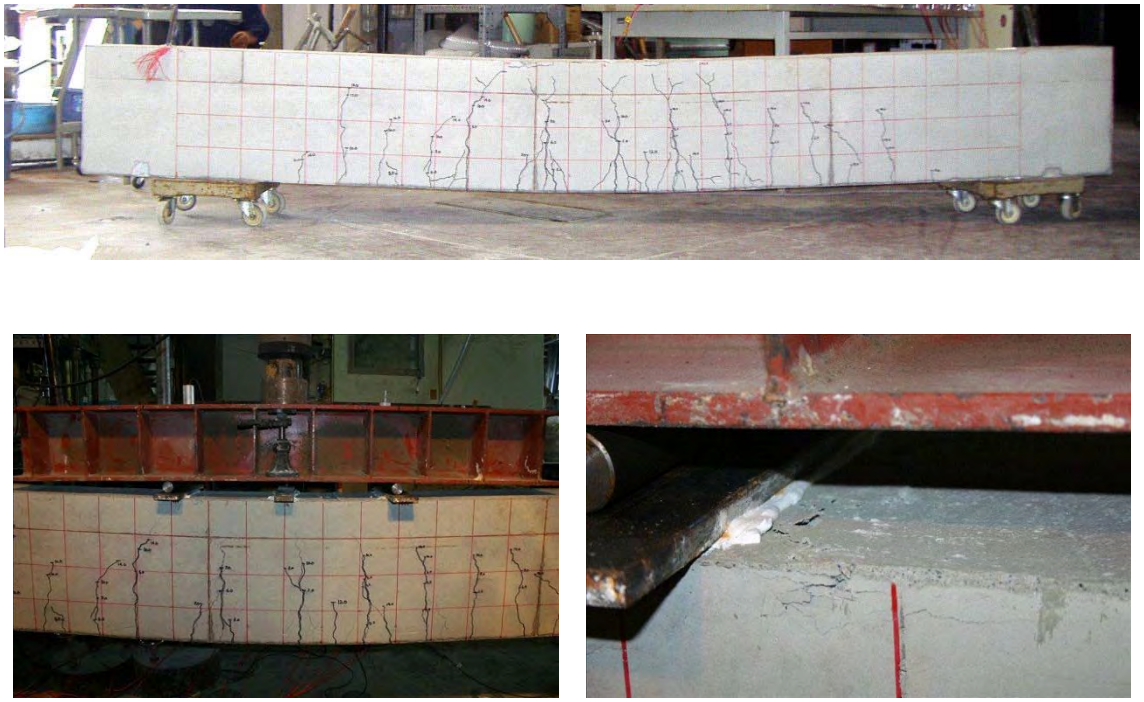
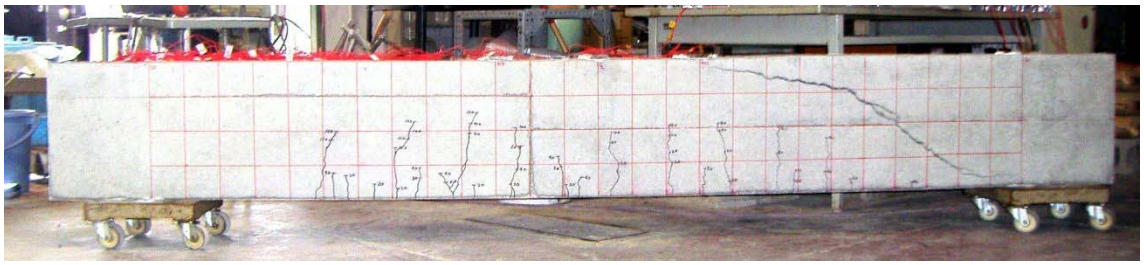
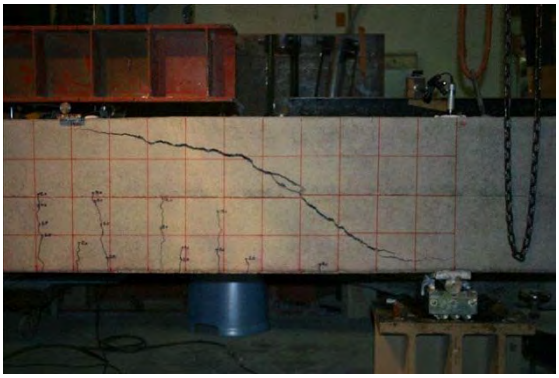


写真 3.3.9　曲げ破壊型供試体の実験終了後の損傷状況





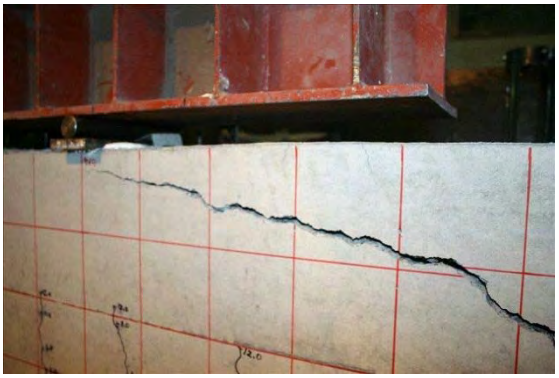


写真 3.3.10　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の実験終了後の損傷状況

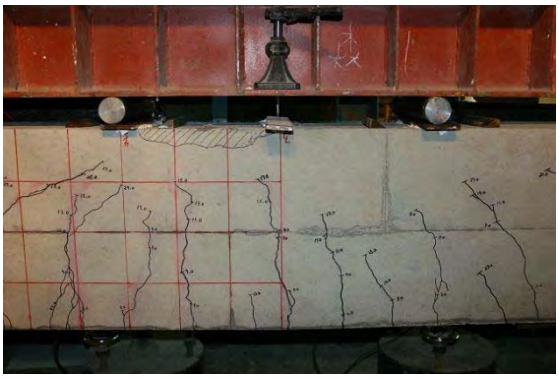


写真 3.3.11　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の実験終了後の損傷状況

(2) ひび割れの進展状況

図 3.3.7 に，曲げ破壊型供試体のひび割れ図を示す．本供試体におけるひび割れの発生から破壊に至るまでの状況は，以下のとおりであった．

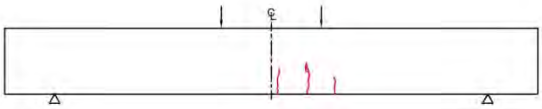
荷重約 30 kN　：純曲げ区間において，曲げひび割れが下縁から 2～3 本程度発生した．
荷重約 60 kN　：左右のせん断スパン内に曲げひび割れが 3～4 本程度発生した．
荷重約 100 kN ：純曲げ区間のひび割れが更に進展し，せん断スパン内のひび割れが若干載荷点方向に向かって斜めに進展した．
荷重約 140 kN ：引張鉄筋が降伏した後，純曲げ区間のひび割れが引張縁から 200 mm～300 mm の間まで進展，かつ，ひび割れ幅が広がった．
荷重約 170 kN ：載荷点近傍の圧縮縁において，コンクリートが圧縮破壊し，終局に至った．供試体下面からの進展してきたひび割れは，圧縮側の軸方向鉄筋位置に達した．

図 3.3.8 に，せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体のひび割れ図を示す．本供試体におけるひび割れの発生から破壊に至るまでの状況は，以下のとおりであった．

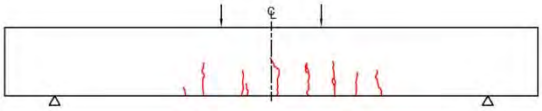
荷重約 20 kN　：純曲げ区間とせん断スパン内において，曲げひび割れが下縁から 10 本程度発生した．
荷重約 120 kN ：ひび割れが鉛直方向あるいは載荷点方向に，中立軸付近まで進展した．
荷重約 200 kN ：右側せん断スパン腹部において急激に斜めひび割れが開口し，破壊に至った．

図 3.3.9 に，せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体のひび割れ図を示す．本供試体におけるひび割れの発生から破壊に至るまでの状況は，以下のとおりであった．

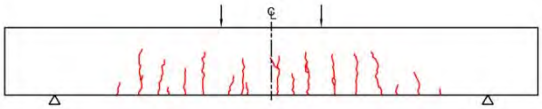
荷重約 50 kN　：純曲げ区間とせん断スパン内において，曲げひび割れが下縁から 8 本程度発生した．
荷重約 110 kN ：上記のひび割れが鉛直方向あるいは載荷点方向に，中立軸付近まで進展した．
荷重約 190 kN ：せん断スパン腹部において斜めひび割れが進展．
荷重約 290 kN ：純曲げ区間において圧縮縁コンクリートが圧縮破壊し，終局に至った．



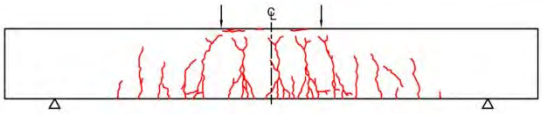
（a）荷重 40 kN 時



（b）荷重 60 kN 時

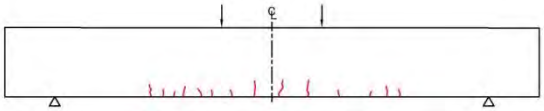


（c）荷重 120 kN 時

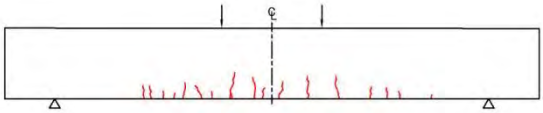


（d）荷重 170 kN 時

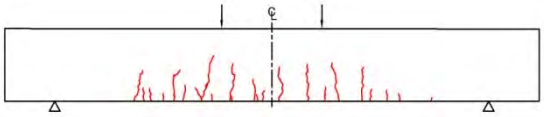
図 3.3.7　曲げ破壊型供試体のひび割れ状況



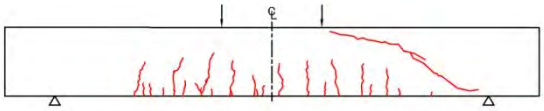
（a）荷重 20 kN 時



（b）荷重 60 kN 時

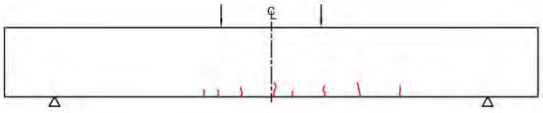


（c）荷重 120 kN 時

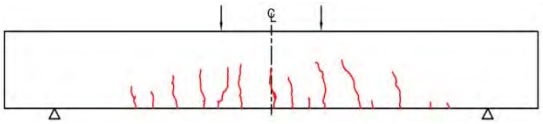


（d）荷重 200 kN 時

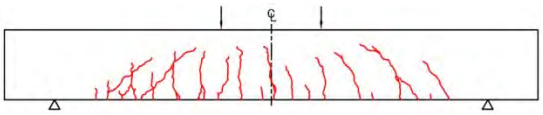
図 3.3.8　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体のひび割れ状況



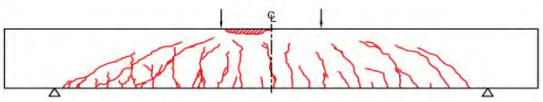
（a）荷重 50 kN 時



（b）荷重 110 kN 時



（c）荷重 190 kN 時



（d）荷重 290 kN 時

図 3.3.9　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体のひび割れ状況

(3) 載荷点荷重－スパン中央変位関係

図 3.3.10 および図 3.3.11 に，曲げ破壊型供試体およびせん断破壊型供試体の載荷点荷重とスパン中央の鉛直変位の関係を示す．

図 3.3.10 に示した曲げ破壊型供試体に関しては，載荷荷重 30 kN 付近でひび割れが発生した後，荷重 140 kN を越えた付近で軸方向鉄筋の降伏により剛性が低下した．その後は，スパン中央変位で 50 mm 近くまで荷重を保持し，載荷板近傍の圧縮縁コンクリートの圧縮破壊により荷重が低下した．

図 3.3.11 に示したせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体（図中の黒線）に関しては，荷重 200 kN 付近で生じた急激な斜めひび割れの開口に伴い荷重が低下した．一方，せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体（図中の赤線）に関しては，荷重 300 kN 付近で軸方向鉄筋が降伏して最大荷重に達した後，スパン中央変位で 15 mm 近くまで荷重を保持し，純曲げ区間において圧縮縁コンクリートの圧縮破壊により荷重が低下した．

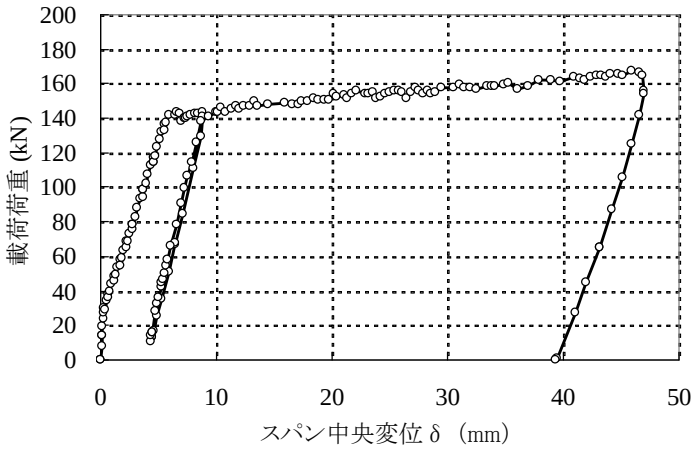


図 3.3.10　曲げ破壊型供試体の載荷点荷重－スパン中央変位関係

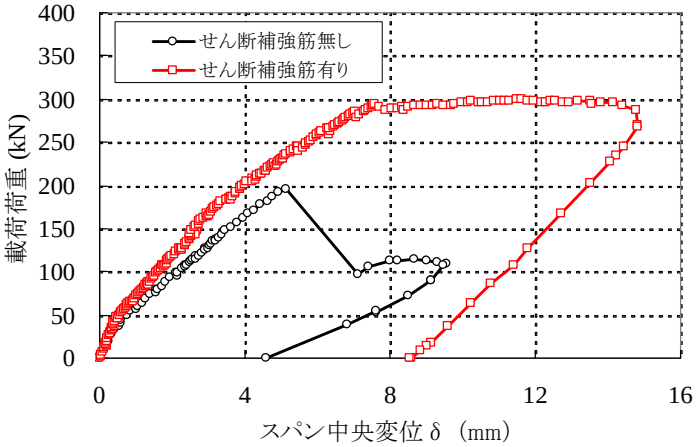


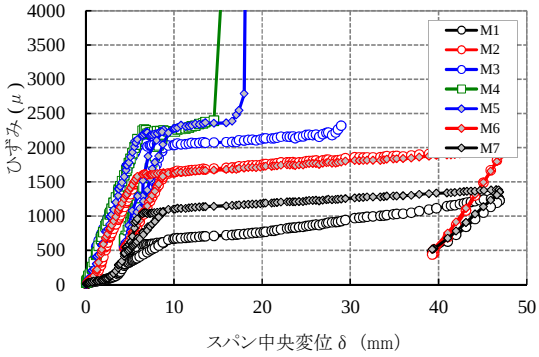
図 3.3.11　せん断破壊型供試体の載荷点荷重－スパン中央変位関係

(4) 鉄筋ひずみ－スパン中央変位関係

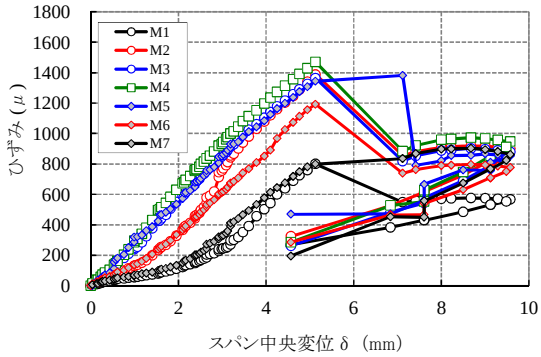
軸方向鉄筋の鉄筋ひずみ－スパン中央変位関係を**図 3.3.12** に，せん断補強鉄筋の鉄筋ひずみ－スパン中央変位関係を**図 3.3.13** に示す．

軸方向鉄筋のひずみに着目すると，**図 3.3.12** (a)に示した曲げ破壊型供試体と**図 3.3.12** (c)に示したせん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体では，スパン中央位置付近の計測点でひずみが急増しており，軸方向鉄筋の降伏が確認できる．一方，**図 3.3.12** (b)に示したせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体では，同様なひずみの増加が認められず，軸方向鉄筋の降伏前に斜めひび割れの開口により破壊に至っていることが分かる．

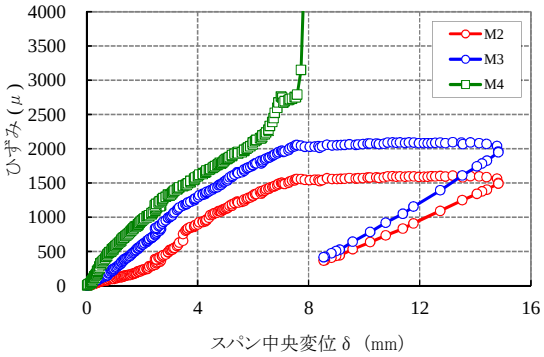
せん断補強鉄筋のひずみに着目すると，**図 3.3.13** (a)に示した曲げ破壊型供試体では，いずれの計測点においてもせん断補強鉄筋の降伏は認められなかった．一方，**図 3.3.13** (b)に示したせん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体では，スパン中央変位 4 mm 近傍で，いくつかの計測点でせん断補強鉄筋の降伏によるひずみの急増が見られた．ただし，**図 3.3.11** に示したせん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の荷重－変位関係において，せん断補強鉄筋に降伏が生じたスパン中央変位（変位 4mm 時点）で荷重の低下が見られないことから，せん断補強鉄筋の降伏は荷重の低下に直結しないことが分かる．



(a) 曲げ破壊型

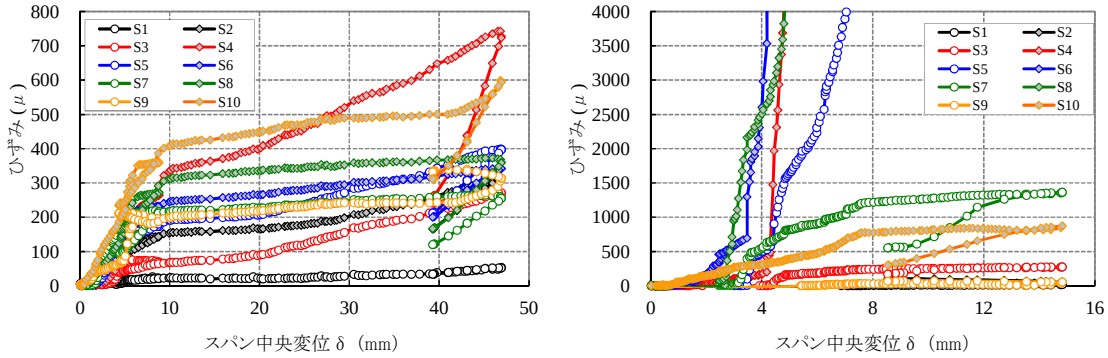


(b) せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型



(c) せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型

図 3.3.12　軸方向鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係



（a）曲げ破壊型　　（b）せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型

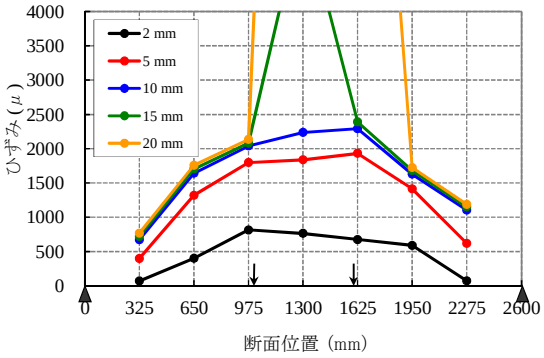
図 3.3.13　せん断補強鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

(5) 鉄筋のひずみ分布

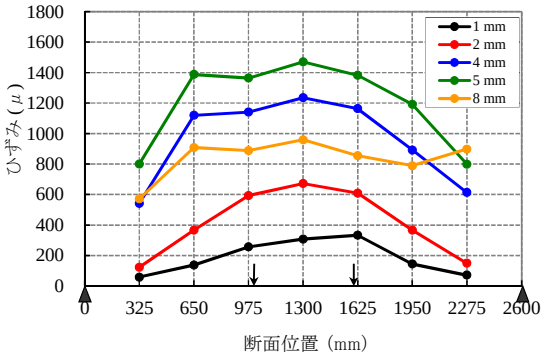
軸方向鉄筋のひずみ分布を**図 3.3.14** に，せん断補強鉄筋のひずみ分布を**図 3.3.15** に示す．ここで，図の横軸は**図 3.3.4**～**図 3.3.6** で左側の支点を 0 として部材軸方向の断面位置を示している．

軸方向鉄筋のひずみ分布に着目すると，**図 3.3.14** (a)に示した曲げ破壊型供試体と**図 3.3.14** (c)に示したせん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体では，スパン中央位置付近の計測点でひずみが急増しており，軸方向鉄筋の降伏が確認できる．なお，軸方向鉄筋が降伏した以降は載荷荷重がほぼ一定となるため，降伏が生じている領域を除いて鉄筋のひずみの増加は見られない．一方，**図 3.3.14** (b)に示したせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体では，斜めひび割れの開口により載荷荷重が低下するため，スパン中央変位 5 mm から 8 mm にかけてひずみが減少している．

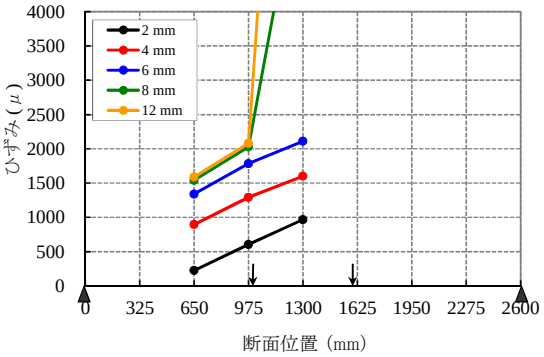
せん断補強鉄筋のひずみに着目すると，**図 3.3.15** (a)に示した曲げ破壊型供試体では，せん断補強鉄筋の降伏は認められなかった．一方，**図 3.3.15** (b)に示したせん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体では，スパン中央変位 4 mm 以降において，せん断補強鉄筋の降伏によるひずみの急増が見られる．



（a） 曲げ破壊型

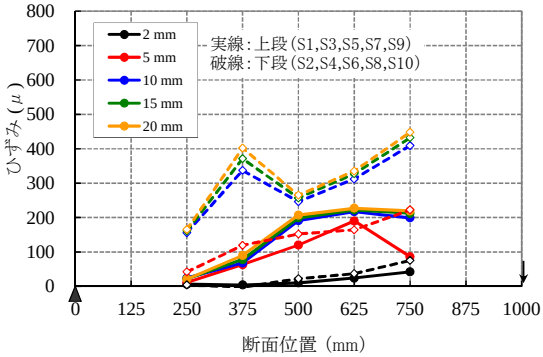


（b） せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型

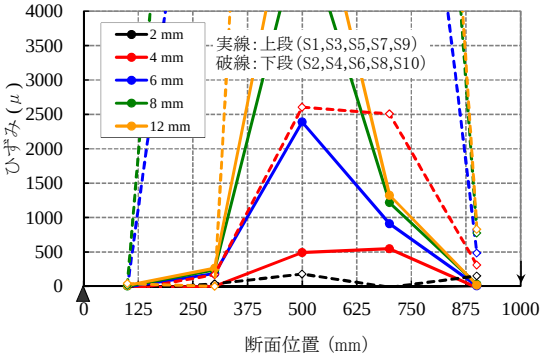


（c） せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型

図 3.3.14　軸方向鉄筋のひずみの分布



（a） 曲げ破壊型



（b） せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型

図 3.3.15　せん断補強鉄筋のひずみの分布

本節では，RC 部材が破壊に至るまでのプロセスを把握することを目的に実施した，単純支持された RC 梁の静的載荷実験の結果について取りまとめた．これらの載荷実験を対象に実施した数値解析的な検討結果を，次節以降の **3.4 節**および **3.6 節**にそれぞれ示している．

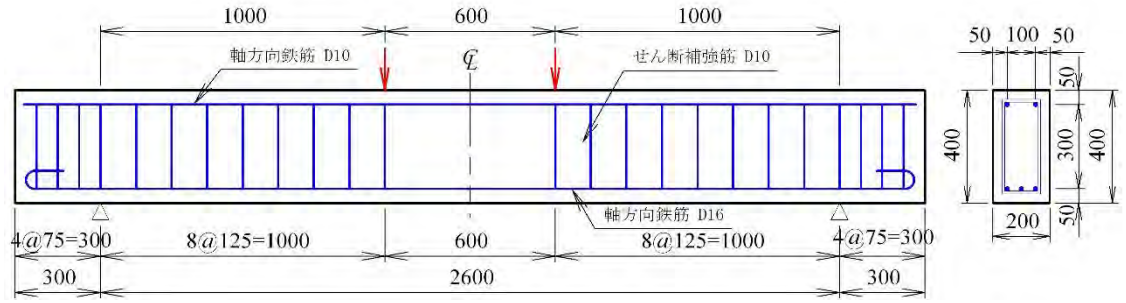
3.4　RC 梁の載荷実験を対象としたブラインド解析

3.4.1　本検討の概要

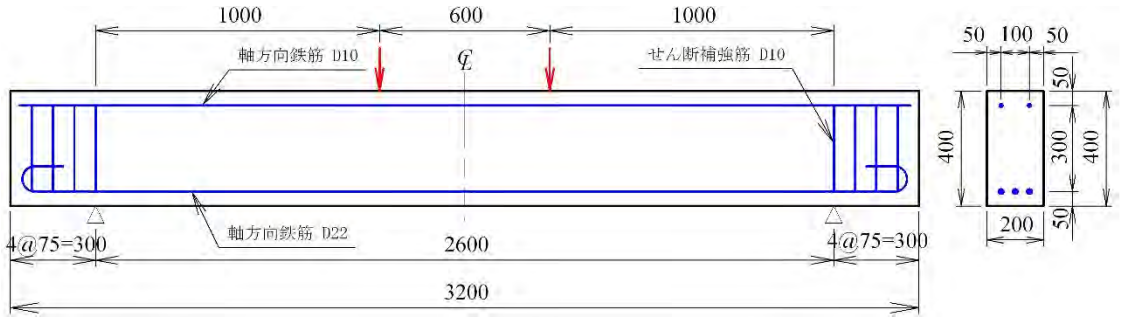
コンクリート構造物の非線形解析は，材料構成モデルやその組合せ，非線形解析特有の求解法や収束計算法等，数値解析結果が多くの因子に影響を受けるといった問題があり，現時点ではそれを一般化することが困難であることから，解析結果等の妥当性評価は個々の技術者の判断に委ねられているのが現状である．また，精度の良い解析プログラムを利用しても，解析者によってその結果や評価も異なる場合があり，良い解析結果を得るためには各々の問題点を理解し適切に使用することが重要である．

このようなことから，本節では本委員会における健全なコンクリート構造物に対する数値解析的検討の第 1 段として実施した検討結果について述べる．本検討では，前節（3.3 節）で示した曲げ破壊型 RC 梁およびせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁，計 2 体の実験供試体を対象とした設計実務者 3 名によるシミュレーション解析を実施した．なお，本検討では，市販されている代表的な 3 つの汎用構造解析プログラムを利用して，実験結果を事前に公開しないブラインド解析として実施し，3 者による解析結果の比較を行った．

図 3.4.1 に，対象とした RC 梁供試体の形状寸法および配筋状況を示す．



(a) 曲げ破壊型 RC 梁供試体



(b) せん断破壊型 RC 梁供試体（せん断補強鉄筋無し）

図 3.4.1　RC 梁供試体の形状寸法および配筋状況

3.4.2　解析手法

表 3.4.1 に，各解析者が適用した解析手法の仕様を示す．

本検討で用いた解析手法は，いずれの解析者も非線形有限要素法による平面応力場問題として取り扱った 2 次元解析である．使用した解析プログラムは，解析者 A が DIANA，解析者 B が MSC.Marc，解析者 C が WCOMD であり，解析対象はいずれの場合も構造および荷重条件の対称性を考慮したハーフスパンモデルとしてモデル化を行っている．

適用した有限要素タイプは，解析者 A，B はコンクリート要素には 8 節点平面応力要素を，鉄筋要素には埋め込み鉄筋要素あるいはトラス要素を用いている．一方，解析者 C も 8 節点平面応力要素を用いているが，鉄筋とコンクリートの特性を重ね合わせた RC 要素を用いているため鉄筋は直接にモデル化していない．また，コンクリートのひび割れモデルは，いずれの解析者も分散ひび割れモデルに分類される多方向固定ひび割れモデルを採用した．

荷重載荷法については，載荷点位置を鉛直方向に強制変位させる変位制御方式による増分解析とした．なお，1Step あたりの増分変位量は，曲げ破壊型では 0.1mm 刻みで 30mm までとし，せん断破壊型では 0.05mm 刻みで 10mm まで載荷させた．

表 3.4.1　各解析者が適用した解析手法の仕様一覧

項　目	解析者 A	解析者 B	解析者 C
解析次元	2 次元	2 次元	2 次元
解析手法	非線形有限要素法	非線形有限要素法	非線形有限要素法
解析プログラム	DIANA	MSC. Marc	WCOMD
解析範囲	ハーフスパン	ハーフスパン	ハーフスパン
要素タイプ	コンクリート：平面応力要素 鉄筋：埋め込み鉄筋要素	コンクリート：平面応力要素 鉄筋：トラス要素	平面応力要素 （鉄筋コンクリート(RC)要素）
境界条件	対称軸：水平方向変位成分拘束 支点部：鉛直方向変位成分拘束	対称軸：水平方向変位成分拘束 支点部：鉛直方向変位成分拘束	対称軸：水平方向変位成分拘束 支点部：鉛直方向変位成分拘束
荷重載荷法	強制変位（変位増分法）	強制変位（変位増分法）	強制変位（変位増分法）
ひび割れモデル	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）
収束計算法	割線剛性法	Newton-Raphson 法	修正 Newton-Raphson 法

(1) 解析者 A の解析モデル

図 3.4.2 には，解析者 A の有限要素モデルを示している．本モデルの要素サイズは，引張縁から軸方向鉄筋位置までの距離 50mm を基準とし，要素形状は縦横比を極力 1.0 に近づけるように配慮した．また，載荷点および支点部には，応力集中による局所的な破壊を防止するために実験時と同様に載荷板および支持板を設け，いずれも実験時に塑性化を伴うような変形が確認されなかったことから弾性体要素としてモデル化を行った．なお，これらの条件は他の解析モデルにも共通している．

図 3.4.5 には，解析者 A が採用したコンクリートの応力－ひずみ関係を示している．圧縮応力下では，圧縮ひずみ 3,500 μ までは土木学会コンクリート標準示方書 [1)]の耐力算定用の関係式を用い，それ以後は線形的に軟化するモデルを設定した．なお，降伏判定には Drucker-Prager の降伏基準を用いた．一方，引張応力下では，土木学会コンクリート標準示方書における引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルの引張軟化特性を適用した．なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は初期せん断剛性の 1%に低減させるモデルとした．

図 3.4.7 には，鉄筋要素の応力－ひずみ関係を示している．鉄筋には，塑性硬化を考慮したバイリニアモデル（図中の実線）を用い，降伏判定には von Mises の降伏基準を用いた．

(2) 解析者 B の解析モデル

図 3.4.3 には，解析者 B の有限要素モデルを示している．本モデルの要素サイズは，引張縁から軸方向鉄筋位置までの距離 50mm を基準としているが，ウェブ領域では部材高さ方向に 4 分割と，解析者 A の分割と比較して若干粗めに設定している．

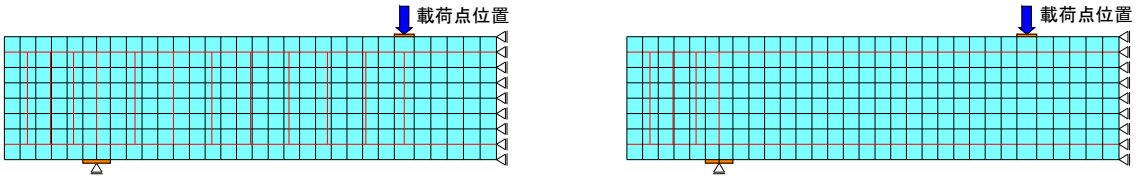
図 3.4.6 には，解析者 B が採用したコンクリートの応力－ひずみ関係を示している．圧縮応力下および引張応力下ともに，土木学会コンクリート標準示方書の最大応力点を越えた後の軟化領域を考慮した材料構成モデルを用いた．引張応力下では，コンクリートと鉄筋の付着効果に伴う Tension Stiffening 効果が考慮されている．なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は，ひび割れひずみのレベルに応じて低減させた．

鉄筋要素の応力－ひずみ関係は，解析者 A と同様にバイリニアモデルとしたが，コンクリートの引張応力－ひずみ関係において鉄筋との付着効果を考慮しているため，降伏強度を鉄筋単体の降伏強度よりも低減させた（**図 3.4.7** の点線）．なお，降伏判定にはコンクリート，鉄筋ともに von Mises の降伏基準を用いた．

(3) 解析者 C の解析モデル

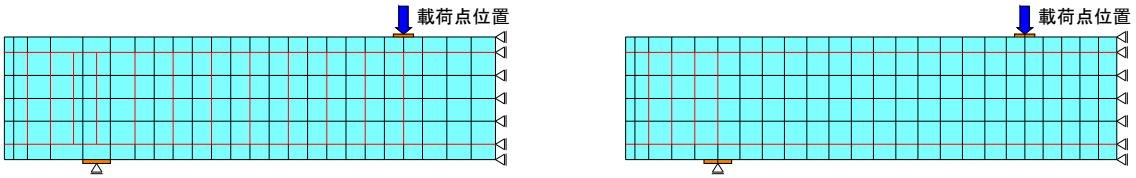
図 3.4.4 には，解析者 C の有限要素モデルを示している．本モデルの要素サイズは，RC 要素の特性を考慮した上で，要素と鉄筋の重心位置が概ね等しくなるように設定した．また，図中の水色の要素は鉄筋とコンクリートの付着作用が及ぶ領域（RC 要素）としたが，灰色の領域は付着作用が及ばないものと判断して無筋コンクリート要素を用いた．

解析者 C が採用したコンクリートの応力－ひずみ関係は解析者 B と同様である．ただし，付着－すべり，ひび割れ面におけるせん断伝達モデルやひび割れ直交方向における圧縮剛性低下の影響が考慮されている（岡村・前川モデル [2)]）．また，本解析プログラムでは Tension Stiffening 効果を考慮するために付着パラメータ C を与える必要があるが，鉄筋が配置されている方向に対しては一律に C=0.4 と設定した．一方，鉄筋が配置されていない方向の RC 要素や無筋コンクリート要素に対しては，プログラム内部で自動計算される破壊エネルギー G_F を算定し，この破壊エネルギーと要素寸法に対応した付着パラメータを設定した．



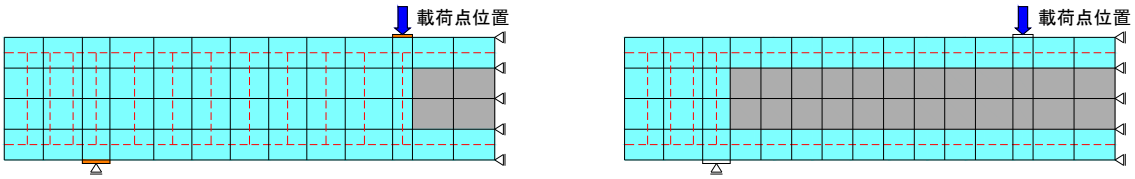
(a)曲げ破壊型の要素分割図　　(b)せん断破壊型の要素分割図

図 3.4.2　解析者 A の有限要素モデル



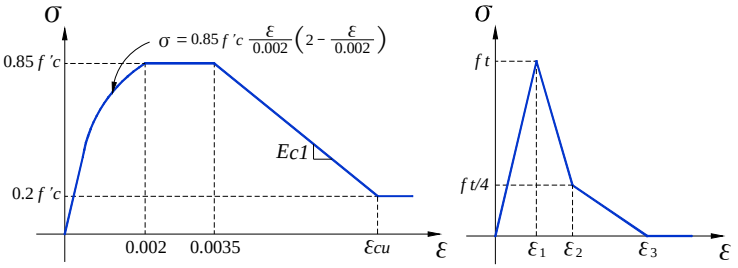
(a)曲げ破壊型の要素分割図　　(b)せん断破壊型の要素分割図

図 3.4.3　解析者 B の有限要素モデル



(a)曲げ破壊型の要素分割図　　(b)せん断破壊型の要素分割図

図 3.4.4　解析者 C の有限要素モデル



(a)圧縮側　　(b)引張側

図 3.4.5　コンクリートの応力ーひずみ関係（解析者 A）

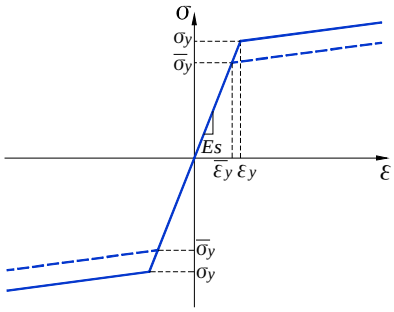
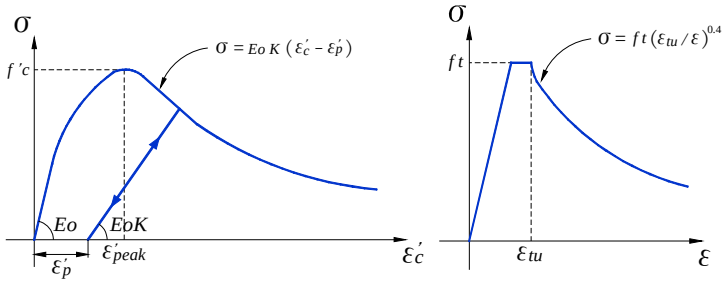


図 3.4.7　鉄筋の応力ーひずみ関係



(a)圧縮側　　(b)引張側

図 3.4.6　コンクリートの応力ーひずみ関係（解析者 B,C）

3.4.3　曲げ破壊型 RC 梁に対する検討

図 3.4.8 には，曲げ破壊型 RC 梁供試体の載荷点位置における荷重－変位関係を実験結果と解析結果で比較して示している．図より，いずれの解析者も鉄筋降伏時までの挙動は実験結果を概ね再現できていることが分かる．しかしながら，解析者 A の結果ではひび割れ発生後の剛性が他の結果に比較して若干小さく評価されている．また，鉄筋降伏後は解析者 C の結果が変位 25mm 近傍で荷重が急激に低下しているが，他の解析者の結果ではこのような傾向は見られない．

図 3.4.9 には，ひび割れ分布性状を実験結果と解析結果で比較して示している．図より，いずれの解析者もスパン方向に分散した鉛直方向の曲げひび割れが再現されており，実験で確認されたひび割れの定性的な特徴は捉えていることが分かる．

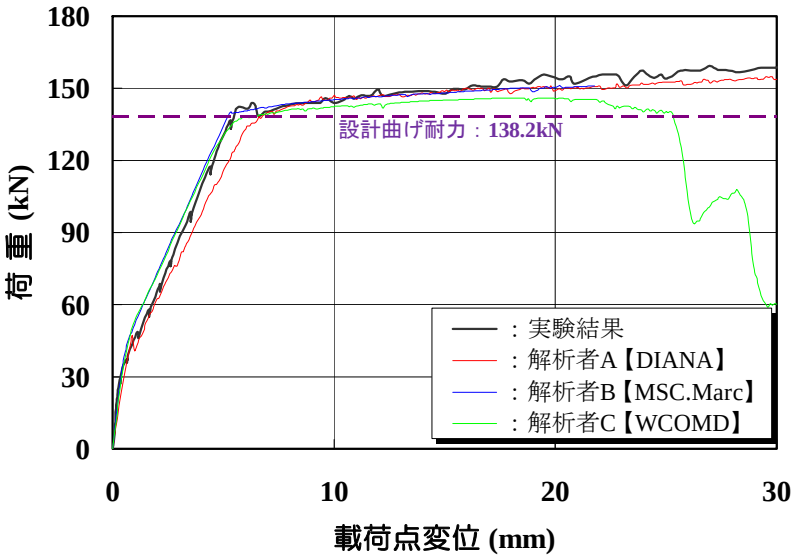
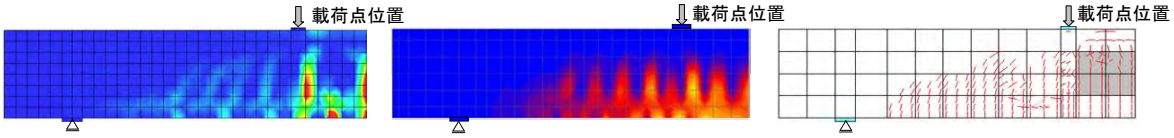
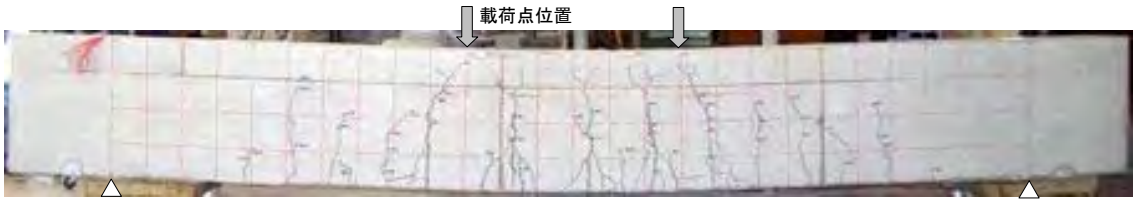


図 3.4.8　載荷点位置における荷重－変位関係に関する実験結果と解析結果の比較



(a)解析者 A(DIANA)　(b)解析者 B(MSC.Marc)　(c)解析者 C(WCOMD)



(d)実験結果

図 3.4.9　ひび割れ分布性状に関する実験結果と解析結果の比較

3.4.4　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁に対する検討

図 3.4.10 には，せん断破壊型 RC 梁供試体の載荷点位置における荷重－変位関係を実験結果と解析結果で比較して示している．図より，解析者 B，C の結果は実験結果を概ね再現できていることが分かる．一方，解析者 A の結果は他と比較して実験結果の再現性が低く，載荷初期の段階から剛性が小さく評価されている．これは，コンクリートの引張応力下のモデルやせん断剛性低減モデルの違いにより，ひび割れ発生後の剛性低下およびひび割れの進展過程が実験と異なっていることに起因しているものと推察される．

図 3.4.11 には，ひび割れ分布性状を実験結果と解析結果で比較して示している．図より，いずれの解析者も梁下面の曲げひび割れやウェブにおける明瞭な斜めひび割れが再現されており，実験で確認されたひび割れの定性的な特徴は捉えていることが分かる．

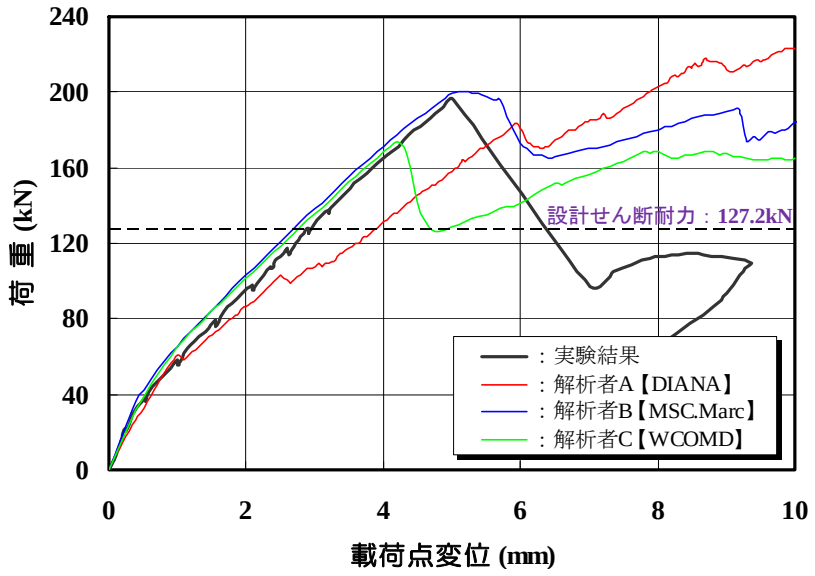
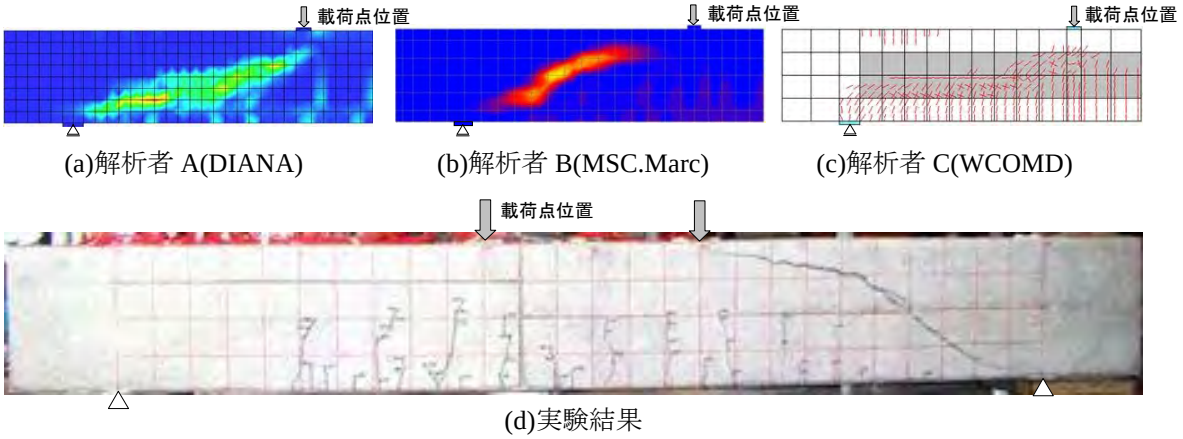


図 3.4.10　載荷点位置における荷重－変位関係に関する実験結果と解析結果の比較



(a)解析者 A(DIANA)　(b)解析者 B(MSC.Marc)　(c)解析者 C(WCOMD)

(d)実験結果

図 3.4.11　ひび割れ分布性状に関する実験結果と解析結果の比較

3.4.5　まとめ

本節では，本委員会における数値解析的検討の第 1 段として実施した，前節（3.3 節）で示した RC 梁供試体を対象とした解析的検討の結果について取りまとめた．本検討では，設計実務者 3 名が市販されている代表的な 3 つの解析プログラムを利用して，実験結果を事前に公開しないブラインド解析として実施し，解析結果の比較を行った．本検討で得られた知見をまとめると，以下に示すとおりである．

・曲げ破壊型の梁部材に関しては，いずれの解析者も鉄筋降伏までの挙動は実用可能な精度で予測可能であると考えられるが，鉄筋降伏後の終局荷重や終局変位の予測は現段階では困難な状況にある．ただし，ひび割れ分布性状は定性的には再現可能であることが明らかとなった．

・せん断破壊（斜め引張破壊）型の梁部材に関しては，載荷初期の挙動は再現可能であると考えられるが，解析者によって結果のばらつきが大きく，特に最大荷重の予測は現段階では困難な状況にある．ただし，ひび割れ分布性状は曲げ破壊型と同様に定性的には再現可能であることが明らかとなった．

なお，この解析者によって結果にばらつきが見られた原因としては，材料構成モデルやその組合せ，モデル化手法，収束計算法等の影響が考えられる．このことから，本委員会では健全なコンクリート構造物に対する数値解析的検討の第 2 段として，最も基礎的な一軸引張を受ける RC 部材を対象に，材料構成モデルの違いやコンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とその組み合わせ等が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．その検討内容や検討結果については，次節（3.5 節）にて取りまとめている．

3.5　RC 部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討

3.5.1　本検討の概要

前節では，本委員会で実施した RC 梁部材の載荷実験を対象としたシミュレーション解析による検討結果について述べた．本節では，本委員会における健全なコンクリート構造物に対する数値解析的検討の第 2 段として実施した検討結果について述べる．

RC 部材の非線形挙動を有限要素解析によって再現する場合には，ひび割れの発生や進展のモデル化および鉄筋のモデル化が数値解析結果に大きな影響を及ぼす[3)]．コンクリートのひび割れや鉄筋を有限要素解析で取り扱う場合には，両者に対してそれぞれ離散的に表現する方法（離散型モデル）と有限要素内に一様に分布させる方法（分散型モデル）があり，その組み合わせとしては，分散ひび割れ－分散鉄筋，分散ひび割れ－離散鉄筋，離散ひび割れ－離散鉄筋の 3 つに分類される．解析によって得られる応答値は，いずれのモデル，いずれの組み合わせに対しても同一の解が得られる必要があるが，各モデルの特性を十分に把握した上で適切な設定を行わなければ解析結果に大きな相違を生じる可能性がある．

そこで，本検討では①分散ひび割れ－分散鉄筋モデル，②分散ひび割れ－離散鉄筋モデル，③離散ひび割れ－離散鉄筋モデルを用いて，鉄筋コンクリートとして最も基礎的な一軸引張を受ける RC 部材を対象とした数値解析的な検討を実施した．なお，本検討では，各モデルにおけるパラメータの設定，コンクリートの引張側構成則，鉄筋の構成則，付着構成則の違いが解析結果に及ぼす影響について種々の検討を行った．

図 3.5.1 に，対象とした一軸引張供試体の形状寸法および配筋状況を示す．本検討では，玉井ら[4)]が実施した RC 部材の鉄筋降伏後の引張剛性（Tension Stiffening）を導いた一軸引張試験を解析対象とした．実験供試体は部材長 2,700mm，断面寸法 200mm×150mm の矩形断面であり，断面中心位置に異形鉄筋 D19 が 1 本配置された鉄筋比 1.0%の供試体である．**表 3.5.1** には，実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している．

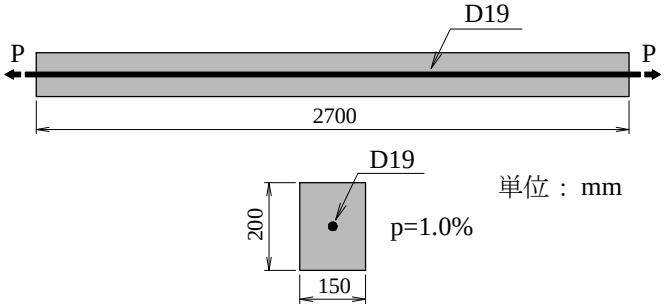


図 3.5.1　一軸引張供試体の形状寸法および配筋状況

表 3.5.1　コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値（左表：コンクリート，右表：鉄筋）

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
45.0	2.9	30.0	0.2

鉄筋径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D19	610.0	190.0	0.3

3.5.2　解析手法

本検討で用いた解析手法の構成は，いずれのモデルも平面応力場を仮定した 2 次元解析である．使用した解析プログラムは，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルには WCOMD を，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ－離散鉄筋モデルにはDIANA を使用した．

境界条件および荷重条件は，モデル端部の一端を拘束して，他端に水平方向を強制変位させる増分解析とした．なお，鉄筋を離散的にモデル化した場合（離散鉄筋モデル）は実験と同様に鉄筋先端位置に引張力を与えているが，RC 要素となる分散鉄筋モデルの場合は解の安定性に配慮してモデル端部の全節点に一様な引張力を与えている．

使用した有限要素タイプは，コンクリート要素にはいずれのモデルに対しても 8 節点平面応力要素を用いており，分散ひび割れモデルには多方向固定ひび割れモデルを採用した．鉄筋要素には，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルでは RC 要素に鉄筋比として与え，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは 3 節点梁要素を用いた．

収束計算法には，Newton-Raphson 法あるいは割線剛性法を採用した．

(1) 分散ひび割れ－分散鉄筋の解析モデル

図 3.5.2 には，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示している．本モデルでは，コンクリートと鉄筋の特性を重ね合わせた RC 要素を用いるため，部材高さ方向には 1 分割，部材軸方向には 10 分割を基本としている．

材料構成モデルのうち，コンクリートの引張軟化特性には岡村ら[2)]が提案した**図 3.5.3** に示す平均応力－平均ひずみ関係を適用した．また，Tension Stiffening 効果を考慮するための付着パラメータ C は，通常のコンクリートと異形鉄筋に対して与えられる C=0.4 を標準値とした．一方，鉄筋の応力－ひずみ関係には**図 3.5.4** の実線で示した鉄筋コンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係を適用した．

ここで，本モデルにおける検討内容は，部材軸方向の要素分割数と付着パラメータ C の相違が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．

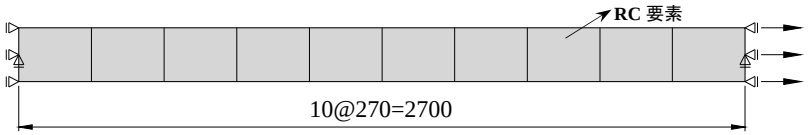


図 3.5.2　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルの要素分割図の一例

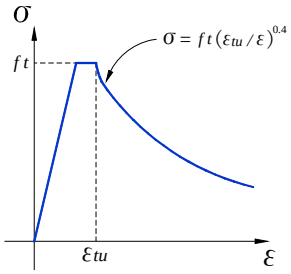


図 3.5.3　コンクリートの引張軟化特性

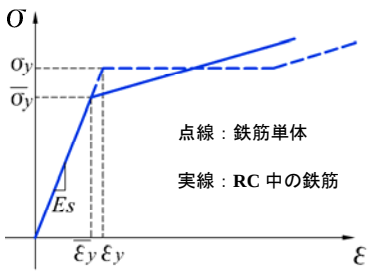


図 3.5.4　鉄筋の応力－ひずみ関係

(2) 分散ひび割れ－離散鉄筋の解析モデル

図 3.5.5 には，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示している．本モデルでは，鉄筋に梁要素を用いて離散的にモデル化するため，部材高さ方向に 2 分割して鉄筋要素をコンクリート要素に貼り付けた．また，部材軸方向は 56 分割を基本とした．

材料構成モデルについて，本モデルではコンクリートの引張軟化特性に Tension Stiffening モデル（**図 3.5.3**）と Tension Softening モデル（**図 3.5.6**）の両者の応力－ひずみ関係を適用した．ここで，Tension Softening モデルを適用した場合には，土木学会コンクリート標準示方書[1)]に準拠した引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルを用いて，要素の等価長さを軸方向の要素幅と仮定してひび割れ幅をひずみに変換している．なお，引張破壊エネルギーおよび等価長さは，それぞれ 0.1N/mm，48.2mm とした．一方，鉄筋の応力－ひずみ関係には鉄筋単体の応力－ひずみ関係（**図 3.5.4** の点線）を適用した．

コンクリートと鉄筋の要素間には，界面接合要素を用いて両者の相対変位（すべり）を考慮し，付着構成則にはマッシブなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の引き抜き試験により得られた島らの提案式[5)]を基本として，鉄筋ひずみの影響を考慮した**式 3.5.1** に示す付着応力－すべり－ひずみ関係（以下，τ - s - ε 関係）と**式 3.5.2** に示す付着応力－すべり関係（以下，τ - s 関係）の両者の付着モデルを適用した．なお，コンクリートの引張軟化特性に Tension Stiffening モデルを適用した場合は，マクロな付着挙動が応力－ひずみ関係に取り込まれていることから，コンクリートと鉄筋間は完全付着とした．ただし，鉄筋の平均降伏強度は，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルと同様に鉄筋単体の降伏強度よりも低下させた．

ここで，本モデルにおける検討内容は，コンクリートの引張軟化特性と付着応力の変化を含む付着構成則の相違が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．

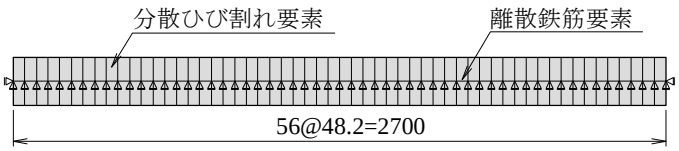


図 3.5.5　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルの要素分割図

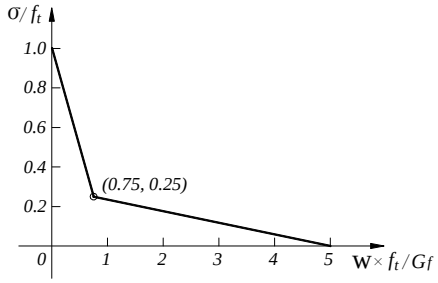


図 3.5.6　Tension Softening モデル

$$\tau = \frac{0.73 f'_c \left(\ln\left(1+5\cdot 1000s\right)\right)^3}{\left(1+\varepsilon\times 10^5\right)} \qquad \text{（式 3.5.1）}$$

$$\tau = \alpha\cdot 0.9 f'^{\,2/3}_c \left(1-e^{-40s^{0.6}}\right) \qquad \text{（式 3.5.2）}$$

ここに，

τ ：付着応力(N/mm^2)　f'_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)　ε ：鉄筋ひずみ

s：$s = S/D$　S：すべり量(mm)　D：鉄筋径(mm)　α ：付着応力の低減係数

(3) 離散ひび割れ－離散鉄筋の解析モデル

図 3.5.7 には，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示している．離散ひび割れモデルとして，コンクリート要素間には実験で得られた平均ひび割れ間隔（約 386mm）を参考にして，部材軸方向に合計 6 本のひび割れが発生するように界面接合要素を用いてモデル化し，ひび割れ間のコンクリートは全て弾性要素としてモデル化を行った．

ここで，一軸引張を受ける RC 部材を離散ひび割れモデルによって解析を行う場合，コンクリートの引張強度を一定にすると，部材軸方向の応力勾配が小さいために複数本のひび割れが同時に発生して引張剛性を適切に評価できないことが指摘されている．そのため，離散ひび割れ要素に設定する引張強度を 2.89～3.65N/mm^2（変動係数 8%）で変動させた．

また，鉄筋軸を横切るひび割れ面の近傍では，鉄筋の抜け出しに伴って鉄筋周辺からコーン状のひび割れが生じてコンクリートによる鉄筋の拘束力が弱まり，鉄筋とコンクリート間の肌離れによる付着劣化が生じる．そのため，**図 3.5.8** に示すように離散ひび割れ要素近傍に付着劣化域（ここでは，付着喪失区間 Lb と呼ぶ）を考慮するものとした．なお，付着喪失区間 Lb は，既往の文献 [3]を参考に片側 2.5D（D：鉄筋径）と設定し，この区間ではすべりに対して付着応力が発生しないように付着モデルの剛性をほぼ零としている．

材料構成モデルについて，本モデルでは離散ひび割れ要素（界面接合要素）の引張応力－ひび割れ幅（変位）関係に，**図 3.5.6** に示す Tension Softening モデルを適用した．また，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルと同様に，鉄筋の応力－ひずみ関係には鉄筋単体の応力－ひずみ関係を適用し，コンクリートと鉄筋の要素間には付着モデル（τ - s - ε 関係および τ - s 関係）を設定した．**図 3.5.9** には，本解析で用いた付着構成則の一例を示している．なお，図中の修正島モデルⅡは，澤部らの文献 [6]を参考にして，τ - s 関係の付着モデルに対して最大付着応力の変化や付着軟化域を考慮したモデルとしている（**式 3.5.2**）．

ここで，本モデルにおける検討内容は，付着喪失区間のモデル化と付着応力の変化を含む付着構成則の相違が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．

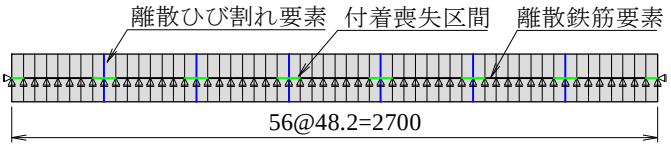


図 3.5.7　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルの要素分割図

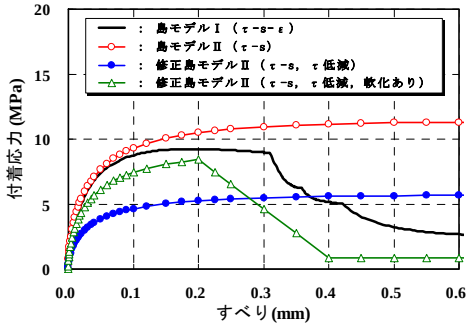


図 3.5.9　本解析で用いた付着構成則の一例

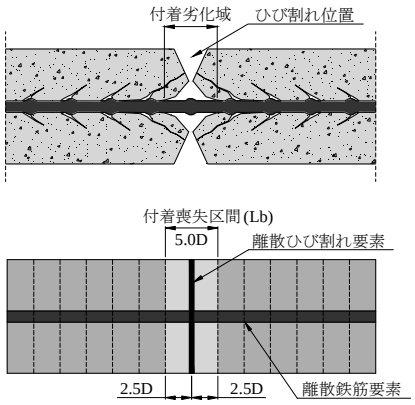


図 3.5.8　付着喪失区間のモデル化

3.5.3　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる検討

本モデルでは，部材軸方向の要素分割数と付着パラメータ C が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．なお，本検討では，要素分割数については 3，5，15，30 分割とした場合で比較し，付着パラメータ C については C=0.2，2.0 と設定した場合で比較を行った．

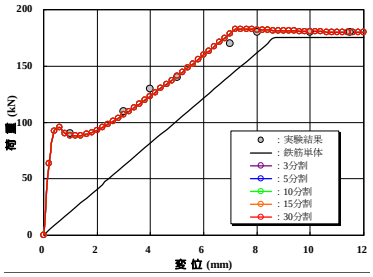
図 3.5.10 には，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルで得られた荷重－変位関係を示している．図より，変位 7.0mm 程度までは鉄筋とコンクリートの付着作用のために，ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートが引張力を負担する Tension Stiffening 効果によって，引張剛性が鉄筋単体の引張剛性よりも大きく，その後は鉄筋単体の挙動に近づくことが分かる．

(1) 要素分割数の影響

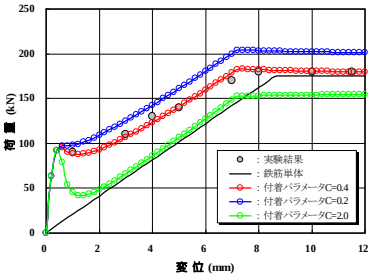
図 3.5.10 (a)は，部材軸方向の要素分割数を種々に変化させた場合の解析結果を比較したものである．図より，いずれの解析ケースも実験結果の荷重－変位関係と精度良く一致しており，かつ，要素分割数の影響は受けていないことが分かる．これは，本モデルにおけるコンクリート引張応力下の平均応力－平均ひずみ関係は要素寸法にかかわらず等しいことから，解の唯一性が保証されているためである．

(2) 付着パラメータの影響

図 3.5.10 (b)は，引張軟化勾配に影響を与える付着パラメータを変化させた場合の解析結果を比較したものである．図より，C＝0.4 と設定した場合は実験結果と精度良く一致しているが，C＝0.2 あるいは 2.0 と設定した場合には実験結果の荷重－変位関係を過大あるいは過小に評価しており，ひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの挙動のみならず，鉄筋降伏以後の挙動にも大きな影響を与えていることが分かる．



(a)要素分割数の影響



(b)付着パラメータの影響

図 3.5.10　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルにおける荷重－変位関係の比較

3.5.4　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる検討

本モデルでは，コンクリートの引張軟化特性と付着応力の変化を含む付着構成則の適用が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．第一の検討として，コンクリートの引張軟化特性に Tension Stiffening モデルと Tension Softening モデルをそれぞれ設定した場合で比較を行った．次に，付着構成則の検討では，付着モデルに τ - s - ε 関係と τ - s 関係をそれ

ぞれ適用した場合で比較した．また，τ-s関係に対して，最大付着応力の低減係数αを考慮した検討と付着軟化域を考慮した検討のこれらに対しても行うこととした．なお，低減係数αについてはα=0.8，0.5と設定した場合で比較を行った（修正島モデルⅡ）．

図 3.5.11～図 3.5.14 に，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルで得られた解析結果を示す．これらの図のうち，コンクリートと鉄筋の負担力の関係について，鉄筋の負担力は鉄筋の平均応力に鉄筋断面積を乗じて算出し，コンクリートの負担力は部材の全荷重から鉄筋負担力を差し引いて求めた．なお，図中には玉井ら[4)]による平均応力－平均ひずみの関係式をもとに算出した結果も併せて示しており，ここではそれを「計算値」と表記している．

(1) 引張軟化特性の影響

図 3.5.11 は，引張軟化特性に Tension Stiffening モデルと Tension Softening モデルをそれぞれ設定した場合の解析結果を比較したものである．図より，Tension Softening モデルを適用した場合にはひび割れ発生後に荷重が急激に除荷され，実験結果や Tension Stiffening モデルを設定した場合と比較すると引張剛性が小さく評価されている．これは，分散ひび割れモデルではひび割れが局所化せず部材全体に分散して発生するため，鉄筋のひずみが鉄筋軸方向にならされ，すべりが極大化する位置が表現できないためであると考えられる．したがって，Tension Stiffening モデルの方が荷重－変位関係の再現性は高いことが確認された．

(2) 付着構成則の影響

上記の解析検討において，ひび割れが局所化せず複数本のひび割れが同時に発生し，引張剛性を小さく評価したことから，ここでの解析では部材中央面から左右対称にひび割れが発生するように，簡易的に部材右半分の引張強度を 10%大きく設定して解析を行った．

図 3.5.12 は，付着モデルにτ-s-ε関係とτ-s関係をそれぞれ適用した場合の解析結果を比較したものである．図より，解析で得られた荷重－平均ひずみ関係は実験結果と概ね一致しているが，実験結果や Tension Stiffening モデルを設定した場合と比較すると，引張剛性が若干小さい傾向にあり，コンクリートの負担力も計算値と比較して小さく評価されている．ただし，コンクリートの引張強度を一定にしないことで，引張剛性が実験結果に近づくことが明らかとなった．

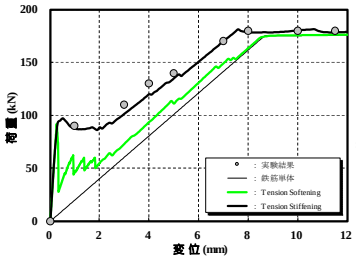


図 3.5.11　荷重－変位関係の比較（引張軟化特性の影響）

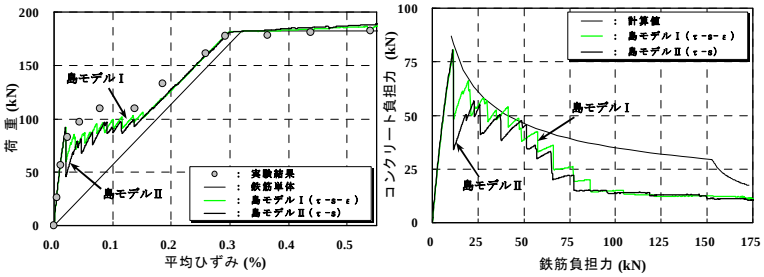


図 3.5.12　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係の比較（付着構成則の影響）

(3) 最大付着応力の影響

図 3.5.13 は，τ-s 関係の最大付着応力を低減させた場合の解析結果を比較したものである．図より，付着応力を低減することで引張剛性やコンクリートの負担力が増加しており，実験結果に近づく傾向にあることが分かる．また，鉄筋ひずみ分布に着目すると，ひずみが極大化する位置が低減係数 α=0.8 の場合では 10 箇所，α=0.5 の場合では 5 箇所となっており，付着応力が低下するに伴い少なくなる．したがって，分散ひび割れモデルに対して付着モデルに τ-s 関係を適用する場合には，最大付着応力を低減させることによって，分散ひび割れモデルでも局所的なひび割れの発生を模擬できることが明らかとなった．

(4) 付着軟化域の影響

図 3.5.14 は，τ-s 関係の最大付着応力を低減させ，かつ，付着軟化域を考慮した場合の解析結果を比較したものである．図より，低減係数 α=0.8 とした場合では，解析結果に大きな差異は見られず，付着軟化域の影響は小さいことが確認された．一方，低減係数 α=0.5 とした場合では，付着軟化域を考慮することにより平均ひずみ約 0.15%以降から引張剛性の低下が確認された．また，コンクリートの負担力は計算値よりも小さく評価され，付着軟化域の考慮によってその差異が大きくなる．鉄筋ひずみ分布に着目すると，低減係数 α=0.5 とした場合に鉄筋ひずみが極大化する位置は 5 箇所であり，付着軟化域を考慮しない場合と変わらないものの，鉄筋ひずみ分布の差異と極大化したひずみの減少が見られ，付着軟化域を考慮するとひび割れの局所化の程度に差異が生じることが確認された．

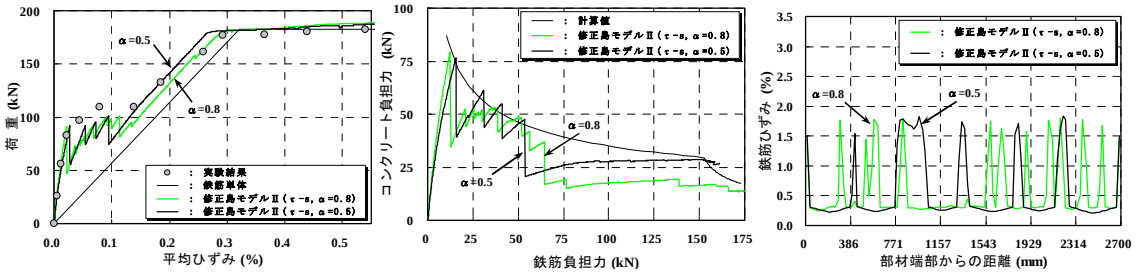


図 3.5.13　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係，
平均ひずみ 0.55%時における鉄筋ひずみ分布の比較（最大付着応力の影響）

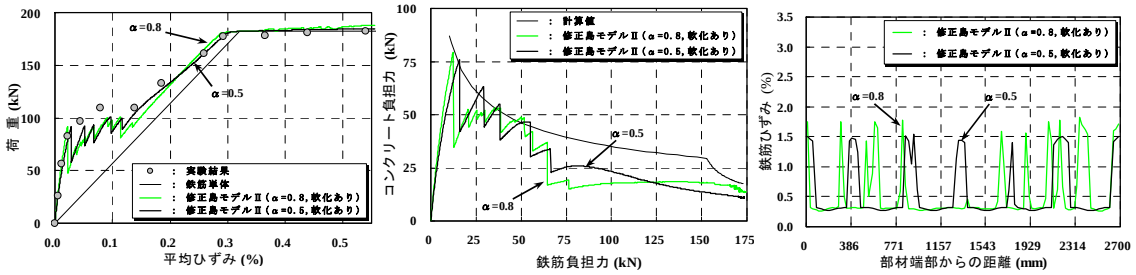


図 3.5.14　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係，
平均ひずみ 0.55%時における鉄筋ひずみ分布の比較（付着軟化域の影響）

3.5.5　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる検討

本モデルでは，付着喪失区間のモデル化と付着応力の変化を含む付着構成則の適用が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．第一の検討として，付着構成則に τ - s - ε 関係と τ - s 関係をそれぞれ適用した場合で比較した．次に， τ - s 関係に対して，付着喪失区間を考慮しない検討，最大付着応力の低減係数 α を考慮した検討，付着軟化域を考慮した検討を行うこととした．なお，低減係数 α については，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルと同様に α=0.8，0.5 と設定した場合で比較を行った（修正島モデルⅡ）．

図 3.5.15～図 3.5.18 に，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルで得られた解析結果を示す．

(1) 付着構成則の影響

図 3.5.15 は，付着モデルに τ - s - ε 関係と τ - s 関係をそれぞれ適用した場合の解析結果を比較したものである．図より，いずれの付着モデルもひび割れが 1 本ずつ順次発生させることによって荷重低下と剛性低下を繰り返し，解析結果は実験結果と良い一致を示していることが分かる．しかしながら， τ - s - ε 関係と τ - s 関係の解析結果を比較すると，荷重や負担力に若干の差異が見受けられる．これは， τ - s 関係は鉄筋ひずみの関数になっていないことから， τ - s - ε 関係のように鉄筋ひずみの増大による付着応力の低下が表現できないためである．そこで，この違いの程度を把握するために付着応力分布で比較を行った．

図 3.5.15 の右図に，鉄筋降伏後の平均ひずみ 0.55%時における付着応力分布を示す．図より，ひび割れ近傍における最大付着応力は， τ - s 関係の方が 15%程度大きく評価されていることが確認された．なお，合計 6 本のひび割れが全て発生した直後の平均ひずみ 0.15%時では，付着応力分布に大きな差異が認められないことを別途確認している．したがって，ひずみレベルが大きい領域では両者で若干の差異が生じるものの，本検討で対象とした一軸引張挙動においては簡略化した τ - s 関係でも実験結果をある程度の精度で再現できることが明らかとなった．

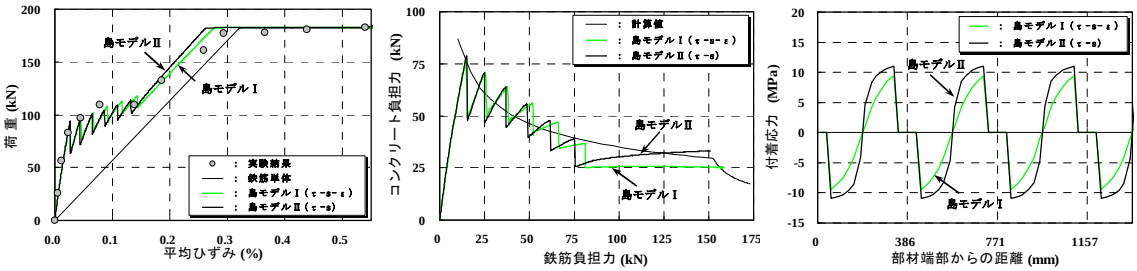


図 3.5.15　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係，平均ひずみ 0.55%時における付着応力分布の比較（付着構成則の影響）

(2) 付着喪失区間の影響

上述したように，本解析では鉄筋軸を横切るひび割れ面の近傍にある一定の付着喪失区間を設定している．この付着喪失区間は，ひび割れ面における鉄筋の抜け出しに伴って徐々に進展していくと考えられるが，解析でその進展の過程や形成領域を正確に再現することは極めて困難である．そのため，本検討では付着喪失区間を考慮しない解析ケースを設定して，その場合に適用可能な付着モデルについて検討を行った．

図 3.5.16 は，付着モデルに τ - s 関係を適用し，かつ，付着喪失区間を考慮しない場合の解析結果を比較したものである．図より，付着喪失区間を考慮しない場合（図中の赤線）は，付着喪失区間を考慮した場合（**図 3.5.15**）と比較して引張剛性は過大に評価しており，鉄筋のひずみ硬化による荷重増加が早期に起きていることも分かる．これは，付着喪失区間を考慮しない場合に，鉄筋ひずみがごく狭い範囲で増大することによるものと推察される．また，コンクリートと鉄筋の負担力の関係からも，コンクリート負担力が計算値よりも大きく評価されていることが確認された．

(3) 最大付着応力の影響

上記の解析検討において，付着喪失区間を考慮しない場合は引張剛性を過大に評価し，コンクリート負担力も計算値より大きく評価された．そこで，コンクリートによる負担力を低減させるために，τ - s 関係に対して最大付着応力の低減係数 α を考慮したモデル（修正島モデルⅡ）による比較検討を行った．

図 3.5.16 は，付着喪失区間を考慮せず，τ - s 関係の最大付着応力を低減させた場合の解析結果を比較したものである．図より，低減係数 α ＝0.5 とした場合が実験結果と精度良く一致することが確認された．したがって，付着応力を低減することでコンクリートによる負担力が減少し，それに応じて引張剛性も低下する．また，低減係数を小さくすることで鉄筋軸方向のひずみ勾配も小さくなるため，鉄筋の最大ひずみも減少することが確認された．このように，付着喪失区間を考慮しない場合においては，付着劣化を間接的に考慮するために最大付着応力を低減する必要があると考えられる．ただし，鉄筋降伏後の荷重増加が早期に生じる現象は付着応力を低減しても改善されないことが明らかとなった．

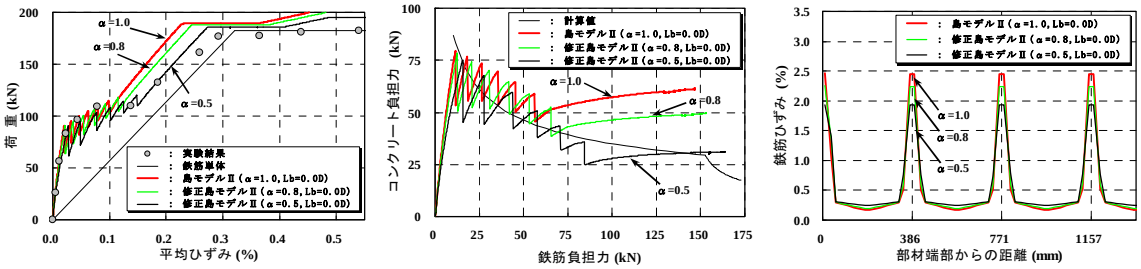


図 3.5.16　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係，平均ひずみ 0.55%時における鉄筋ひずみ分布の比較（付着喪失区間および最大付着応力の影響）

(4) 付着軟化域の影響

図 3.5.17 は，付着喪失区間を考慮しない場合における τ - s 関係の最大付着応力を低減させ，かつ，付着軟化域を考慮した場合の解析結果を比較したものである．図より，付着軟化域を考慮しない場合には低減係数 α=0.5 とした場合が最も実験結果と整合していたが，付着軟化域を考慮した場合には低減係数 α=0.8 とした方が実験結果と整合しており，鉄筋降伏後の荷重増加も生じないことが確認された．また，コンクリートと鉄筋の負担力の関係からも，低減係数 α=0.8 とした場合の方が計算値と一致している．

図 3.5.18 は，低減係数 α=0.8 とした場合の平均ひずみ 0.55%時における付着応力分布および鉄筋ひずみ分布を示す．図中には，これまでの検討で実験結果との整合性が高かった島モデルⅠ（τ - s - ε 関係）および修正島モデルⅡ（τ - s 関係，低減係数 α=0.5，付着喪失区間なし，軟化なし）による結果も併せて示している．なお，いずれの図も部材長の 1/2 の範囲だけ示している．図より，付着軟化域を考慮することによって，ひび割れ近傍における付着応力が低下していることが分かる．また，鉄筋ひずみが増大する領域が広がっており，付着喪失区間を考慮した τ - s - ε 関係と類似したひずみ分布が得られている．

以上のことから，離散ひび割れモデルに対して付着構成則に τ - s 関係を適用し，かつ，付着喪失区間を考慮しない場合には，最大付着応力を低減するとともに付着軟化域を考慮する必要があることが明らかとなった．すなわち，最大付着応力を低減させることによって付着劣化を模擬し，付着軟化域を考慮することによって鉄筋ひずみの増大に伴う付着応力の低下を模擬する必要がある．

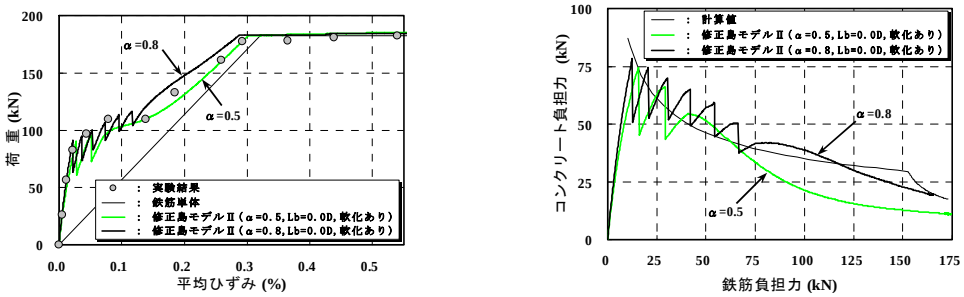


図 3.5.17　荷重－平均ひずみ関係，コンクリートと鉄筋の負担力の関係（付着軟化域の影響）

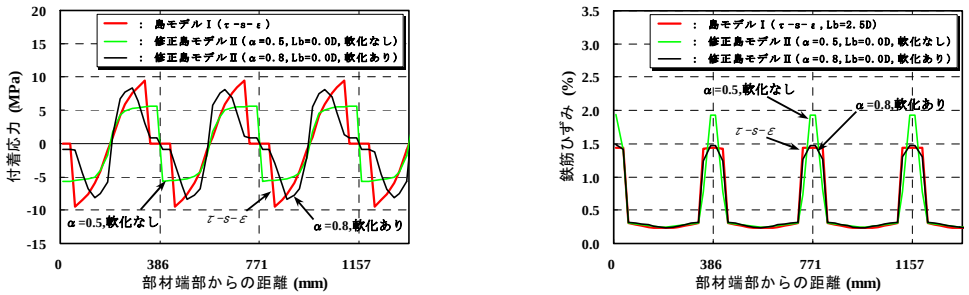


図 3.5.18　低減係数 α=0.8 とした場合の平均ひずみ 0.55%時における付着応力分布，鉄筋ひずみ分布の比較（付着軟化域の影響）

3.5.6　まとめ

本節では，本委員会における数値解析的検討の第 2 段として実施した，最も基礎的な一軸引張を受ける RC 部材を対象とした解析的検討の結果について取りまとめた．本検討では，3 つのモデルにおけるパラメータの設定や各種材料構成則の違いが解析結果に及ぼす影響について種々の検討を行い，各モデルにおける材料構成則等の適用性や解析上の留意事項について把握した．本検討で得られた知見をまとめると，以下に示すとおりである．

・分散ひび割れ－分散鉄筋モデルに関しては，コンクリートの引張軟化特性に Tension Stiffening モデルを用い，引張軟化勾配に影響を与える付着パラメータを適切に設定することで，実験結果を精度良く再現することが可能であることが明らかとなった．

・分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに関しては，コンクリートの引張軟化特性に Tension Softening モデルを適用すると，ひび割れが局所化せずに部材全体に分散して発生し，すべりが極大化する位置を表現できないため，引張剛性（コンクリート負担分）が過小に評価されることが確認された．しかしながら，コンクリートの引張強度を変化させることや付着モデルの最大付着応力を低減させることによって，分散ひび割れモデルでも局所的なひび割れの発生を模擬することが可能となり，実験結果の再現性が高くなることが明らかとなった．

・離散ひび割れ－離散鉄筋モデルに関しては，付着モデルに τ - s - ε 関係と τ - s 関係をそれぞれ適用すると解析結果に若干の差異があるものの，一軸引張挙動では簡略化した τ - s 関係でもコンクリートの引張強度のばらつきや付着喪失区間を考慮することで，実験結果をある程度の精度で再現することができる．また，付着モデルの最大付着応力を低減させることや付着軟化域を考慮すれば，付着劣化や鉄筋ひずみの増大に伴う付着応力の低下を間接的に表現することができ，モデル化することが困難な付着喪失区間を考慮しなくても実験結果を精度良く再現できることが明らかとなった．

本検討では，3 つのモデルにおける材料構成則等の適用性や解析上の留意事項について明らかにした．ここで得られた知見を踏まえて，本委員会では健全なコンクリート構造物に対する数値解析的検討として，実施した載荷実験の RC 梁部材を対象に再度数値解析を行った．ここでは，より詳細に実験結果と比較するために種々の検討を行った．その検討内容や検討結果については，次節（3.6 節）にて取りまとめている．

3.6　RC 梁の載荷実験を対象とした数値解析的検討

3.6.1　本検討の概要

本検討では，前節（3.5 節）に示した RC 部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討の知見を踏まえて，RC 梁の載荷実験を対象に非線形有限要素解析を実施した．解析結果から得られる荷重－変位関係，ひび割れの進展，せん断補強鉄筋および軸方向鉄筋のひずみや応力について実験結果と比較することで，数値解析による RC 部材の損傷の進展の再現性について確認した．これに加えて，数値解析のモデル化について感度解析を実施し，幾つかのパラメータに対して解析結果への影響を確認した．

解析対象は，3.3 節に示した単純支持対称 2 点載荷の静的載荷実験であり，実験供試体は図 3.6.1～図 3.6.3 に示す曲げ破壊およびせん断破壊を想定した RC 梁とした．また，解析には，汎用の有限要素解析プログラム DIANA を用いた．

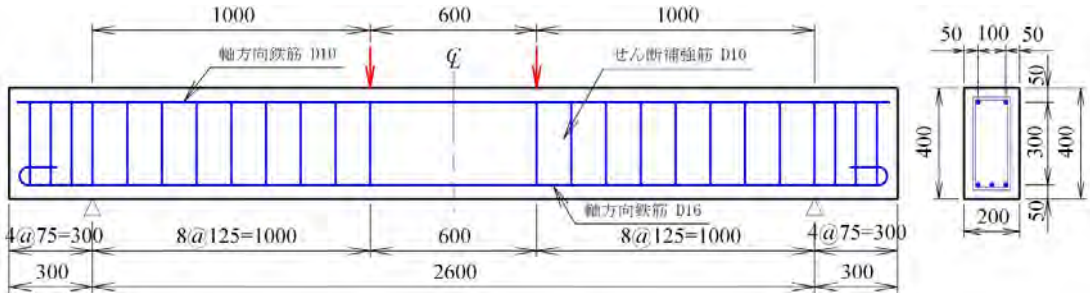


図 3.6.1　曲げ破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

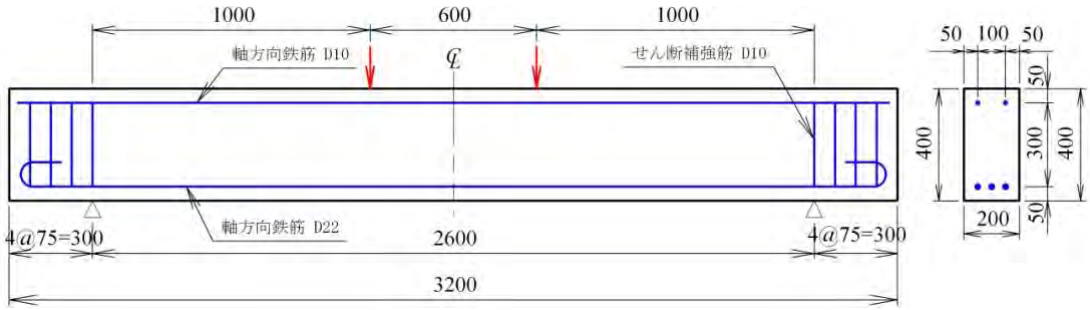


図 3.6.2　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

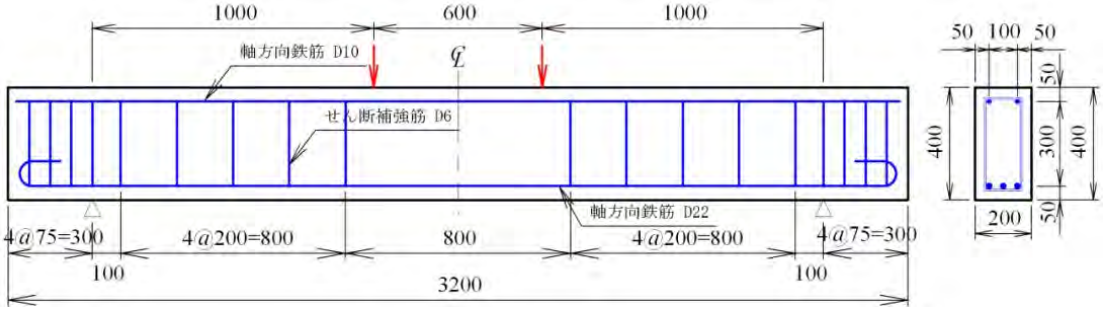


図 3.6.3　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

3.6.2　解析手法

(1) モデル化

本検討では，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルにより解析モデルを作成した．形状および材料のモデル化の概要を**表 3.6.1** および**表 3.6.2** に，応答解析の設定を**表 3.6.3** に示す．

表 3.6.1　形状のモデル化

項　目	概　要
解析次元	2 次元（平面応力問題）
モデル化範囲	ハーフスパン（1/2 対称モデル）
使用要素	・ コンクリート ； 平面応力要素（4 角形 2 次要素） ・ 軸方向鉄筋 ； 面タイプ埋込鉄筋要素（完全付着） ・ せん断補強鉄筋； 面タイプ埋込鉄筋要素（完全付着） ・ 載荷板・支点板； 平面応力要素（4 角形 2 次要素，3 角形 2 次要素）
境界条件	・ 支持点における節点の鉛直方向変位拘束 ・ 対称面（スパン中央）における節点の水平方向変位拘束
荷重条件	・ 載荷点に強制変位（鉛直方向）

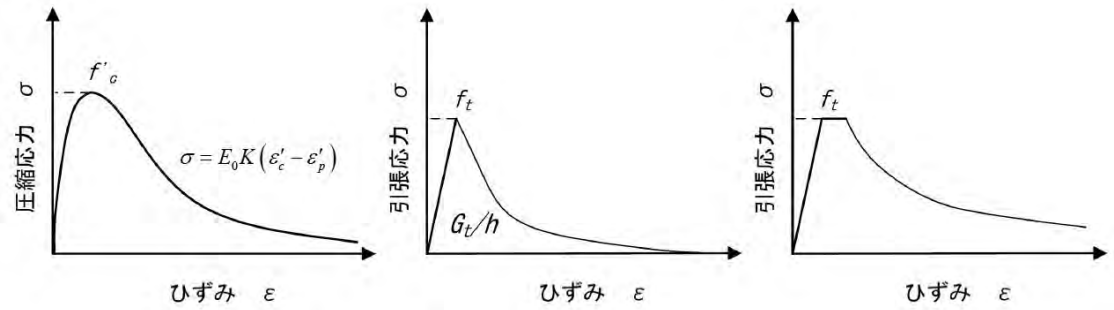
表 3.6.2　材料のモデル化

材　料	項　目	概　要
コンクリート	圧縮側降伏条件	Drucker-Prager 基準
	圧縮軟化曲線	コンクリート標準示方書 [1)]
	ひび割れモデル	多方向固定ひび割れモデル
	引張軟化曲線	【無筋要素】 引張軟化モデル（引張破壊エネルギーを考慮した Hordijk モデル） 【RC 要素】 引張剛性モデル（平均応力－平均ひずみ関係）
	等価長さ	要素面積の平方根（L_{eq} = 50.62 mm）
	せん断伝達モデル	ひび割れ後のせん断弾性係数は初期の 1/200 倍
鉄筋	降伏条件	Von Mises 基準
	構成モデル	降伏棚を無視したバイリニアモデル（コンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係）
	硬化係数	$0.01\times E_s$
載荷板・支点板	構成モデル	線形弾性モデル（$E = 2.0\times10^5$ N/mm^2，　ν=0.30）

表 3.6.3　応答解析の設定

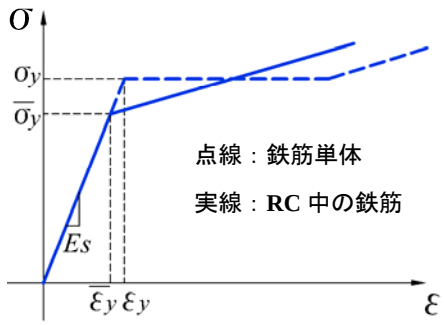
項　目	概　要
解析種別	静的解析（変位増分制御）
求解法	割線剛性法
収束判定基準	変位ノルム比で許容値 1.0×10^{-5}
最大収斂回数	１荷重ステップ当り 100 回
不平衡力の持ち越し	上記最大収斂回数以内に許容値に収まらなかった場合，不平衡力を次ステップに持ち越して計算を継続

適用したコンクリートの応力－ひずみ関係を図 3.6.4 に，鉄筋の応力－ひずみ関係を図 3.6.5 にそれぞれ示す．



（a）圧縮側　　（b）引張側（無筋要素，引張軟化）　　（c）引張側（RC 要素，引張剛性）

図 3.6.4　コンクリートの応力－ひずみ関係



$$\sigma_{cr} = \bar{\sigma}_s + \bar{\sigma}_c / \rho \qquad \bar{\sigma}_s = E_S \cdot \bar{\varepsilon} \qquad \bar{\sigma}_c = f_t \left(\varepsilon_{tu} / \bar{\varepsilon} \right)^c$$

σ_{cr}　：ひび割れ位置での鉄筋の応力
$\bar{\sigma}_s$　：要素内の鉄筋の平均応力
$\bar{\sigma}_c$　：要素内のコンクリートの平均応力
ρ　：鉄筋比（対象となるコンクリート要素内での鉄筋比）
E_S　：鉄筋のヤング係数
$\bar{\varepsilon}$　：要素内の鉄筋の平均ひずみ
f_t　：コンクリートの引張強度
ε_{tu}　：コンクリートのひび割れ発生限界ひずみ
c　：鉄筋の付着性状を表すパラメータ

図 3.6.5　鉄筋の応力－ひずみ関係

ここで，材料のモデル化手法について，その概要を以下にまとめる．なお，ここに示す項目は，本検討で実施した感度解析の対象としたパラメータである．

①コンクリートのひび割れモデル

分散ひび割れモデルにおいては，コンクリートのひび割れをモデル化する方法として，固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルがある．固定ひび割れモデルは，一度発生したひび割れの方向は変化しないと仮定するものである．固定ひび割れモデルのうち，多方向固定ひび割れモデルは，ひび割れが互いに鋭角に交差しうると考える分散ひび割れモデルであり，最小の相互ひび割れ間角度が設定される．本解析モデルにおいては，多方向固定ひび割れモデルを用いている．一方，回転ひび割れモデルでは，主応力軸と主ひずみ軸が一致するように常にひび割れ方向が回転するものである．したがって，固定ひび割れモデルでは，ひび割れ面にせん断応力が発生するのに対して，回転ひび割れモデルでは，ひび割れ面にせん断応力が発生しない．本検討では，多方向固定ひび割れモデルとの比較として，回転ひび割れモデルを用いた場合の解析を実施している．

②コンクリートの圧縮側構成則

本解析モデルにおいては，コンクリート標準示方書[1)]に記載されている最大応力点を超えた後の軟化域を考慮したモデルを用いている．本検討では，これとの比較として，曲げモーメントを受ける部材の断面破壊の限界状態に対する検討に用いられる，耐力算定用の応力－ひずみ関係を用いた場合の解析を実施している．

③コンクリートの引張強度

コンクリートの引張強度は，コンクリート標準示方書[1)]に記載されている圧縮強度からの算出式を用いて算出している．引張強度の影響を確認するために，本検討では，この引張強度の算定値に対する 70%，80%，90%，100%とした場合の解析を実施している．

④せん断剛性低減係数 β

コンクリートにひび割れが発生すると，応力の伝達はひび割れ界面の凹凸を介して行われるためせん断剛性が低下する．本解析モデルにおいては，ひび割れ後のせん断弾性係数をひび割れ前の 0.005 倍としている．本検討では，せん断剛性低減係数 β=0.005 を標準として，β=0.001，0.050，0.100 についても検討を実施している．

⑤鉄筋の 2 次勾配（硬化係数）

鉄筋の 2 次勾配は，平均応力－平均ひずみ関係における鉄筋降伏開始以降の勾配であり，降伏開始時の鉄筋の平均応力が低いほど高くなる．本検討では，2 次勾配 E'を E'=0.010 E_s を標準として，0.001 E_s，0.050 E_s，0.100 E_s についても検討を実施している．

⑥要素の等価長さ

要素内の破壊時のエネルギー消費が，破壊エネルギーに一致する応力－ひずみ関係の設定に必要な寸法を等価長さと呼ぶ．等価長さは，本来，要素形状および寸法等に依存する．本検討では，要素面積の平方根を等価長さの標準として，その 1/2 と 2 倍についても解析を実施している．

⑦変位増分量

鉄筋コンクリートの非線形解析では，増分解析により逐次解を求めていくのが一般的である．変位増分量は，変位増分制御による解析において，各計算ステップにおける変位の増分量である．増分解析において良好な収束解を得るためには，適切な大きさの荷重増分，変位増分，時間増分を設定する必要がある．

(2) 解析モデル

解析モデルの要素分割図を**図 3.6.6～図 3.6.8** に示す．図中には，鉄筋の配置位置を示している．RC 梁は，鉄筋の配置に応じて RC 要素または無筋要素によりモデル化している．なお，載荷板および支点板は，弾性要素によりモデル化している．

材料特性は，実験供試体の材料試験結果に従った．コンクリートの材料特性を**表 3.6.4** に，鉄筋の材料特性を**表 3.6.5** に示す．

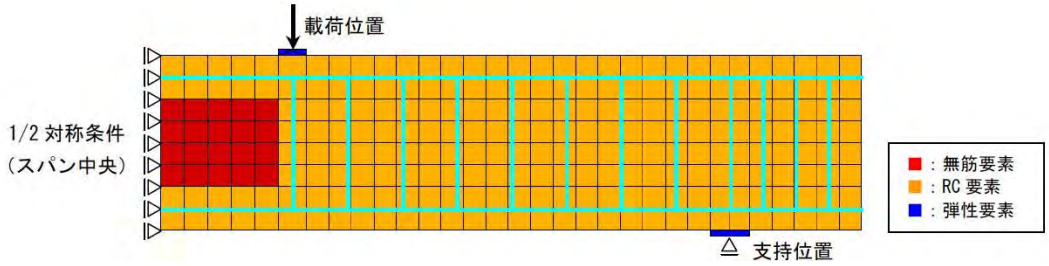


図 3.6.6　曲げ破壊型供試体の要素分割図

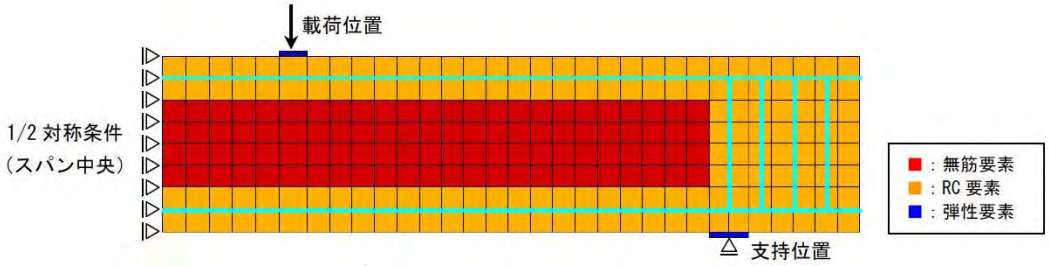


図 3.6.7　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の要素分割図

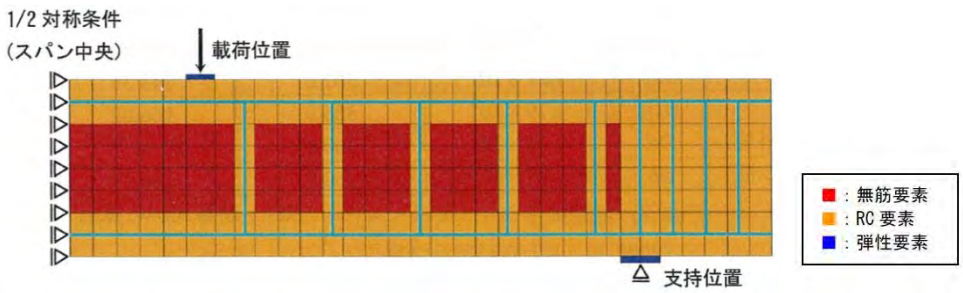


図 3.6.8　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の要素分割図

表 3.6.4　コンクリートの材料特性

項　目	材料 A	材料 B	備　考
圧縮強度 f'_c（N/mm^2）	25.7	35.7	圧縮試験結果
ヤング係数 E_c（kN/mm^2）	25.9	29.7	示方書 [1)]
引張強度 f_t（N/mm^2）	2.0	2.49	示方書式 [1)]から算定
ポアソン比　ν	0.2	0.2	示方書 [1)]
引張破壊エネルギーG_F（N/mm）	0.08	0.09	示方書式 [1)]から算定
粗骨材の最大寸法 G_{max}（mm）	20	20	配合条件より

材料 A：曲げ破壊型供試体およびせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体

材料 B：せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体

表 3.6.5　鉄筋の材料特性

供試体	鉄　筋	径	ヤング係数 E_s (kN/mm^2)	降伏強度 f_{sy} (N/mm^2)	平均降伏強度 $\overline{f_{sy}}$ (N/mm^2)
曲げ破壊型供試体	引張側軸方向鉄筋	D16	177	356.0	331.25
	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	236.10
	せん断補強鉄筋（支点外側）	D10	179	355.0	255.67
	せん断補強鉄筋（スパン）	D10	179	355.0	197.31
せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体	引張側軸方向鉄筋	D22	187	361.0	348.28
	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	236.10
	せん断補強鉄筋（支点外側）	D10	179	355.0	255.67
せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体	引張側軸方向鉄筋	D22	187	361.0	343.33
	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	166.02
	せん断補強鉄筋（支点外側）	D6	179	360.0	20.94
	せん断補強鉄筋（スパン）	D6	179	360.0	164.19

3.6.3　曲げ破壊型 RC 梁に対する検討

(1) 実験結果と解析結果の比較

1）荷重－変位関係

ここでは，荷重－変位関係に着目して，実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.9** に，実験および解析から得られた載荷点位置における荷重－変位関係を示す．図中には抽出点として，後述する最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す解析 Step を示している．

図より，実験結果と解析結果の荷重－変位関係は，載荷点変位 15 mm 付近までは概ね一致している．解析結果は，載荷点荷重 40 kN 付近のひび割れの発生や，載荷点荷重 140 kN 付近の軸方向鉄筋の降伏に伴う剛性の変化を，概ね再現できていることが確認できる．ただし，圧縮縁のコンクリートの損傷による載荷点荷重の低下が，解析結果では載荷点変位 15 mm 付近で見られ，実験に比べて小さな変位であった．

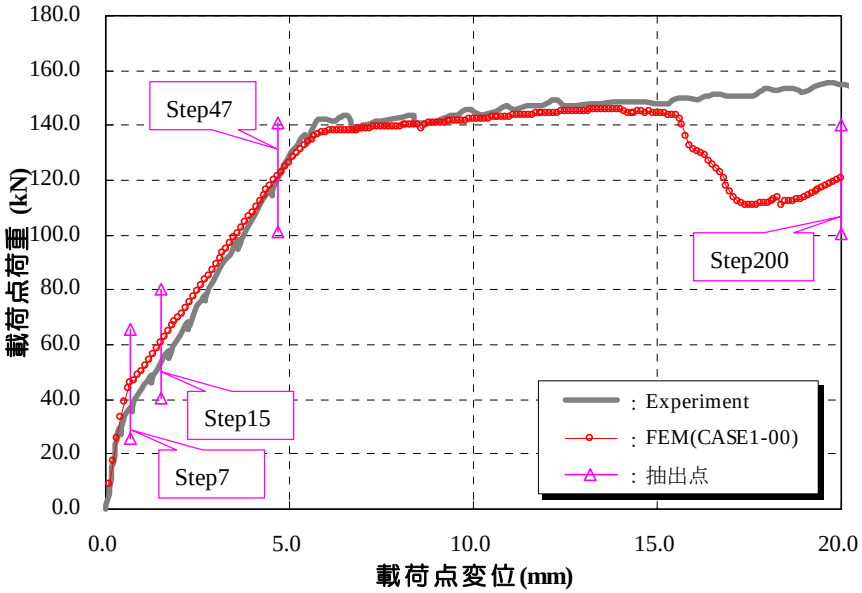


図 3.6.9　載荷点荷重－変位関係の比較および変化点の抽出

2）ひび割れの進展

ここでは，ひび割れの進展に着目して実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.10** に，実験で得られたひび割れ図と解析で得られた最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す．

図より，解析では支間にわたる RC 梁下面から進展するひび割れやスパン中央あるいは載荷点方向に向かって，ひび割れが斜めに進展する挙動が再現されており，解析結果は実験で確認されたひび割れの定性的な特徴を捉えていることが確認できる．ただし，せん断スパン内のひび割れに着目した場合，解析では引張側要素の高さ方向に 3 要素程度（供試体下面から 150 mm 程度）の範囲までひずみが大きい傾向にあるが，実験では高さ方向に 250 mm 程度までひび割れが進展していることから，解析では実験ほどひび割れが進展しないことが確認された．

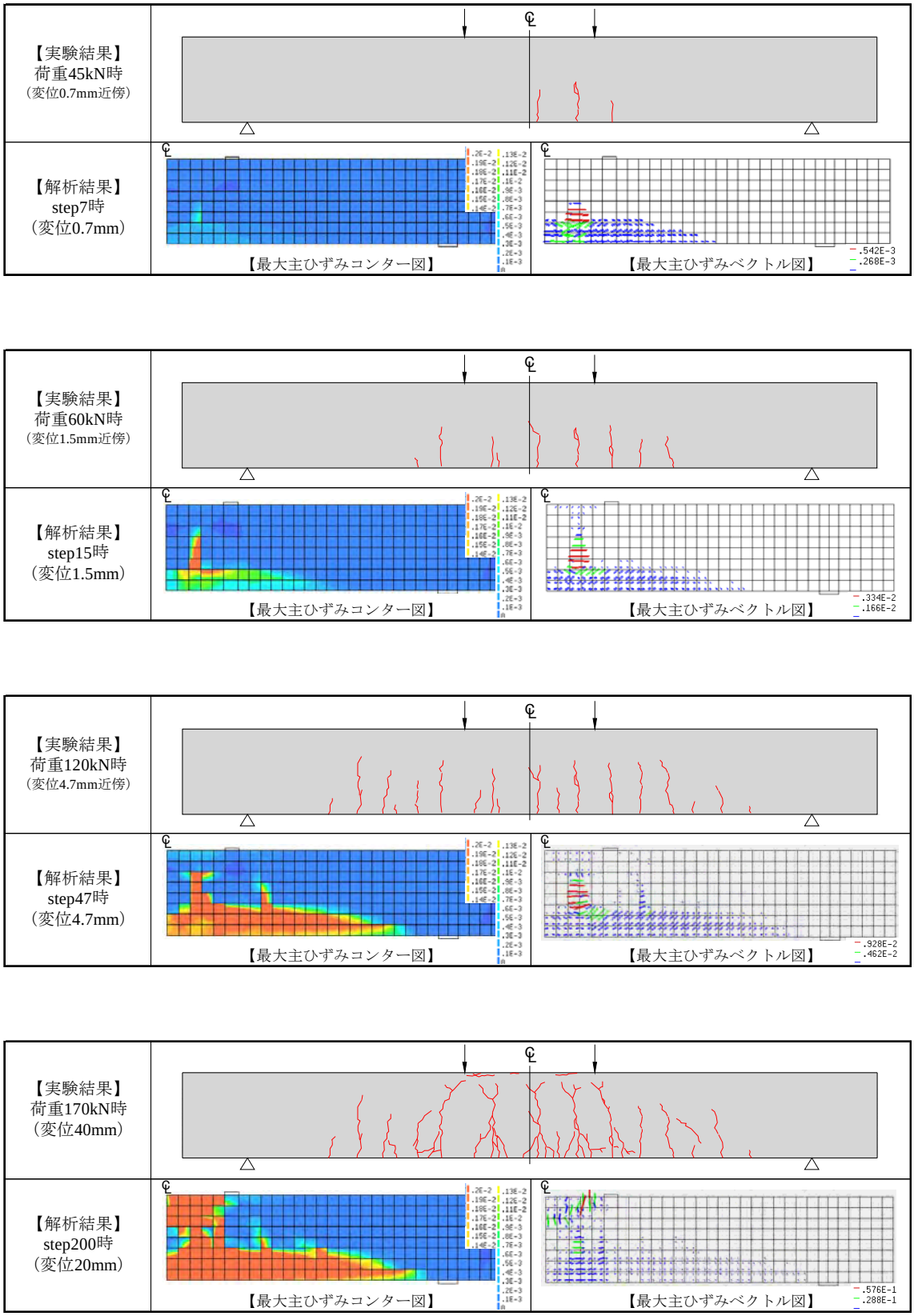


図 3.6.10　ひび割れ性状および進展の比較

3）せん断補強鉄筋のひずみおよび応力の比較

ここでは，せん断補強鉄筋のひずみおよび応力に着目して実験結果と解析結果を比較する．本解析では，材料構成則に平均応力－平均ひずみ関係を適用しているため，実験と比較する際には両者ともある領域で平均化させて比較する必要があるものと考えられる．せん断補強鉄筋のひずみおよび応力について，ひずみゲージ位置計 10 点の各領域に対して平均化領域を設定して整理した．平均化領域のモデル図を**図 3.6.11** に示す．実験および解析から得られたせん断補強鉄筋のひずみ（応力）－変位関係を**図 3.6.12**，**図 3.6.13** に示す．なお，実験結果の鉄筋応力度は，鉄筋の引張試験から得られたヤング係数および降伏強度に基づき，鉄筋ひずみの計測値を換算した．

図より，実験結果と解析結果を比較すると，定性的な挙動は概ね再現できているものの，解析結果のひずみと応力が小さい傾向にある．これは，ひび割れ性状と進展の比較でも述べたとおり，解析結果は RC 梁の上側のひずみが小さいために，平均化したひずみは実験結果よりも小さくなる傾向にあるものと考えられる．

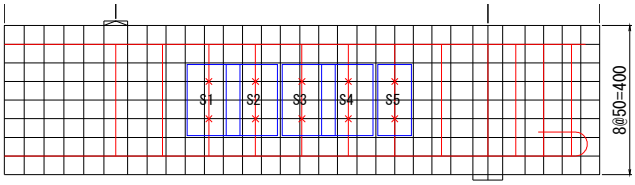


図 3.6.11　平均化領域のモデル図

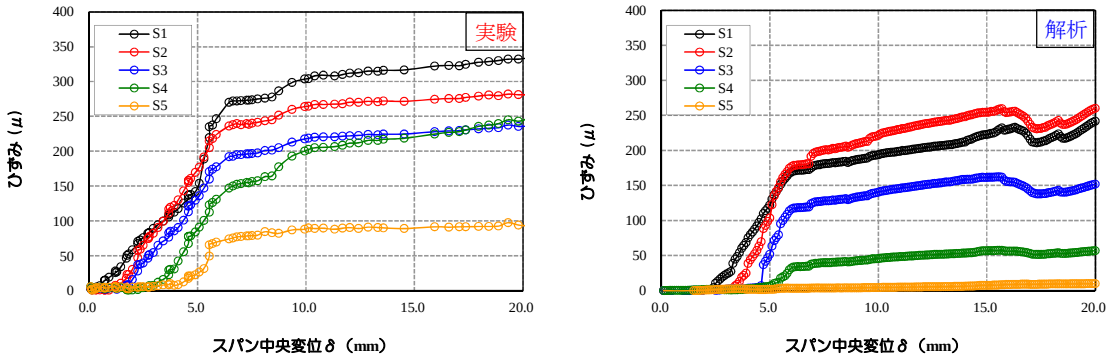


図 3.6.12　せん断補強鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

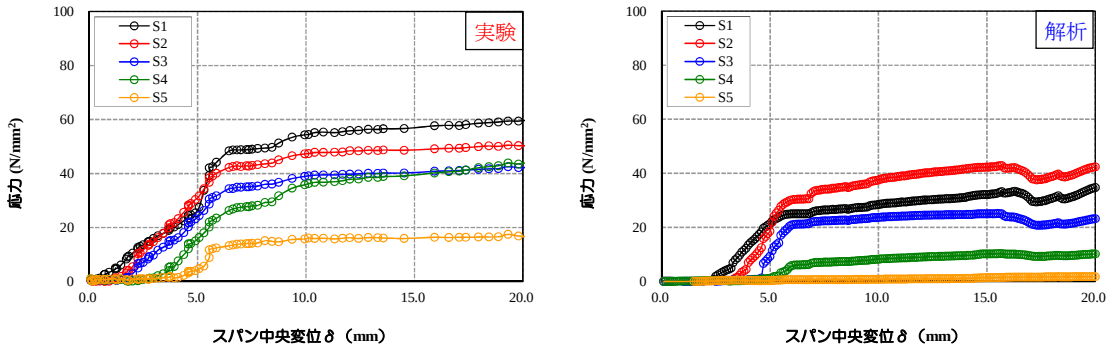


図 3.6.13　せん断補強鉄筋の応力－スパン中央変位関係

4）軸方向鉄筋のひずみおよび応力の比較

ここでは，軸方向鉄筋のひずみおよび応力に着目して実験結果と解析結果を比較する．軸方向鉄筋のひずみおよび応力についても，せん断補強鉄筋と同様の理由で，ひずみゲージ位置計 4 点の各領域に対して平均化領域を設定して整理するものとした．平均化領域のモデル図を**図 3.6.14** に示す．実験および解析から得られた軸方向鉄筋のひずみ（応力）－変位の関係を**図 3.6.15**，**図 3.6.16** に示す．なお，実験結果の鉄筋応力度は，鉄筋の引張試験から得られたヤング係数および降伏強度に基づき，鉄筋ひずみの計測値を換算した．

図より，実験結果と解析結果を比較すると，ひずみまたは応力の挙動は概ね再現できていることが確認できる．ただし，ひずみの急増が見られた M3～M5 計測点について，実験結果の方がひずみの急増し始める変位が大きい．このことは，解析においては，ある空間で平均化した材料構成則を適用しているのに対して，実験の計測値は計測位置における局所的な値であることが影響していると考えられる．

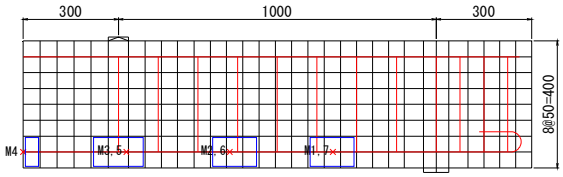


図 3.6.14　平均化領域のモデル図

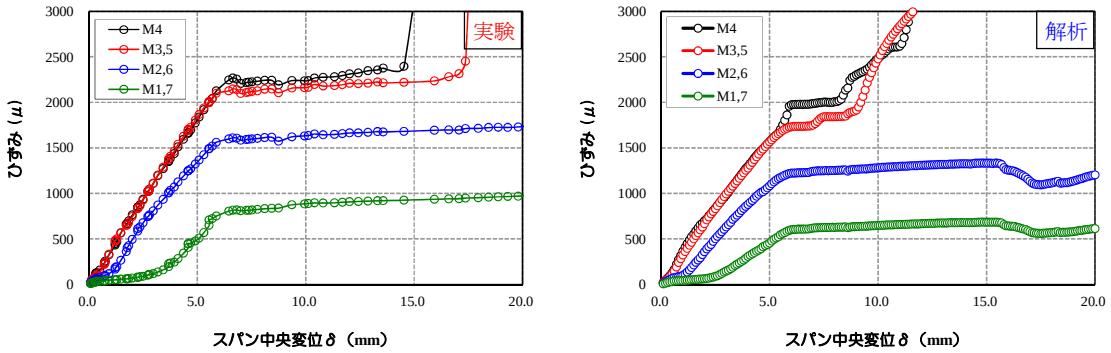


図 3.6.15　軸方向鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

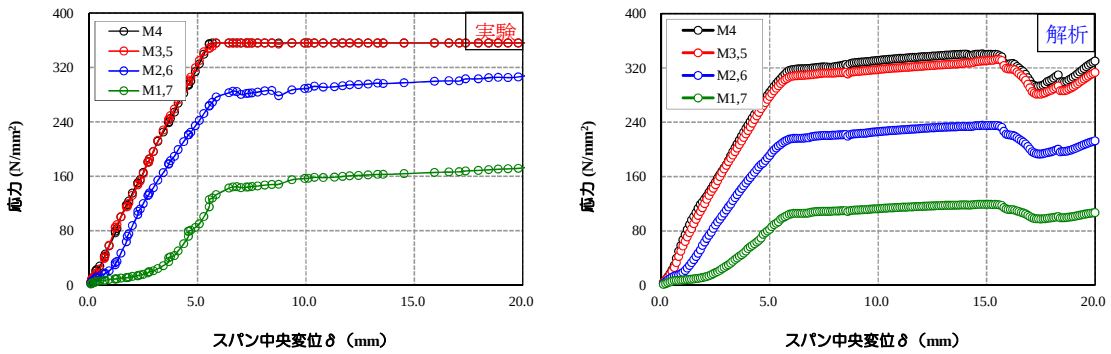


図 3.6.16　軸方向鉄筋の応力－スパン中央変位関係

(2) モデル化におけるパラメータの設定の影響

非線形有限要素解析では，コンクリートの圧縮・引張・せん断伝達モデル，鋼材モデル，付着モデルといった材料構成則は勿論のこと，コンクリートのひび割れモデルや要素寸法，非線形解析特有の求解法や収束計算方法の設定が，解析結果に大きな影響を及ぼす．ここでは，モデル化における種々のパラメータが解析結果に及ぼす影響を確認するために，**表 3.6.6** に示すケースについて解析を実施し，その結果を比較した．

着目したパラメータごとの載荷点荷重－載荷点変位関係を**図 3.6.17**～**図 3.6.23** に示す．図の載荷点荷重－載荷点変位関係に基づき，曲げ破壊型の RC 梁の解析結果に対する着目したパラメータごとの影響の概要を，次頁以降に箇条書きで整理している．なお，本検討と同様のパラメータによる，せん断破壊型の RC 梁に対する検討を 3.6.4 にまとめている．

表 3.6.6　検討ケース一覧

解析ケース	検討内容	解析パラメータ
CASE1-00	標準ケース	－
CASE1-01	コンクリートのひび割れモデルの影響	回転ひび割れモデル
CASE1-02	コンクリートの圧縮側構成モデルの影響	耐力算定用モデル
CASE1-03	コンクリートの引張強度の影響	圧縮強度からの推定値の 70%
CASE1-04		圧縮強度からの推定値の 80%
CASE1-05		圧縮強度からの推定値の 90%
CASE1-06	せん断剛性低減係数 β の影響	$\beta = 0.001$
CASE1-07		$\beta = 0.010$
CASE1-08		$\beta = 0.050$
CASE1-09		$\beta = 0.100$
CASE1-10	鉄筋の 2 次勾配の影響	2 次勾配　E’ = 0.001 Es
CASE1-11		2 次勾配　E’ = 0.050 Es
CASE1-12		2 次勾配　E’ = 0.100 Es
CASE1-13	要素の等価長さの影響	等価長さ=要素面積の平方根 1/2 倍
CASE1-14		等価長さ=要素面積の平方根の 2 倍
CASE1-15	変位増分量の影響	0.01mm / Step
CASE1-16		0.10mm / Step
CASE1-17		0.50mm / Step

・図 3.6.17 および図 3.6.18 より，コンクリートのひび割れモデルとコンクリートの圧縮側構成則は，本検討の範囲内では，載荷荷重が低下するときの変位に違いが見られたものの，載荷荷重 40 kN 付近のひび割れの発生や，載荷荷重 140 kN 付近の軸方向鉄筋の降伏に伴う剛性の変化に対してはほとんど影響しなかった．

・図 3.6.19 より，コンクリートの引張強度は，引張強度が小さいケースほど，載荷荷重 40 kN 付近のひび割れが発生する荷重が低下したものの，降伏荷重は一致した．

・図 3.6.20 より，せん断剛性低減係数 β は，ひび割れ発生以降の剛性に僅かに影響し，係数 β の小さいケースではひび割れ後の剛性が小さくなる傾向が見られた．ただし，降伏荷重は一致した．

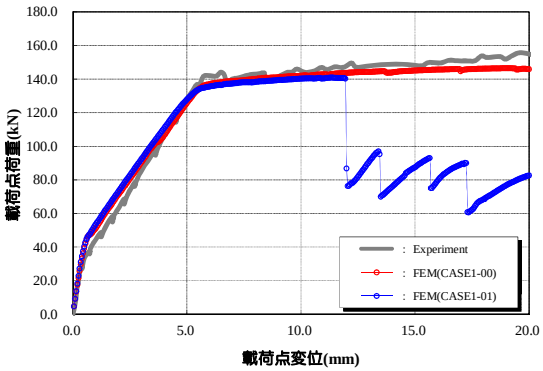


図 3.6.17　コンクリートのひび割れモデル

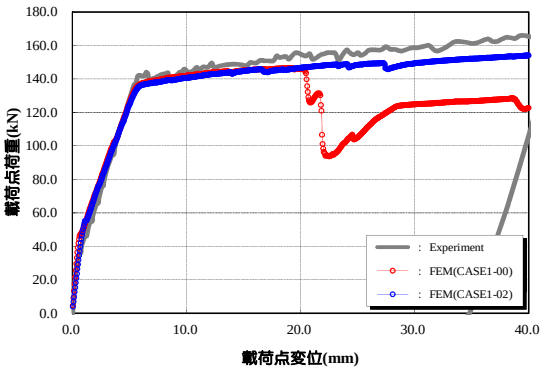


図 3.6.18　コンクリートの圧縮側構成則

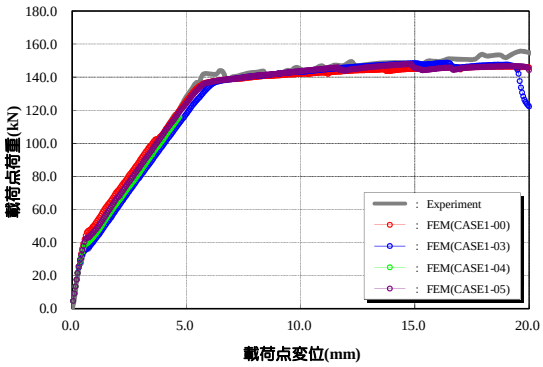


図 3.6.19　コンクリートの引張強度

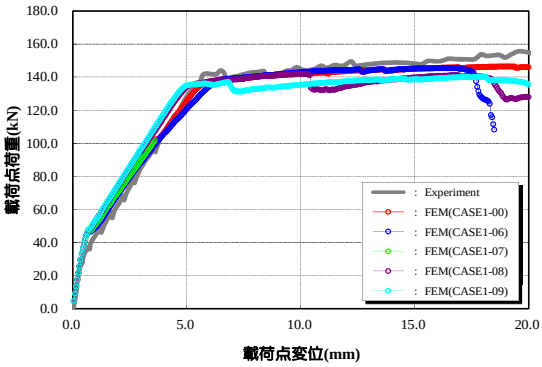


図 3.6.20　せん断剛性低減係数 β

・図 3.6.21 より，鉄筋の 2 次勾配は，軸方向鉄筋が降伏する載荷荷重 140 kN 以降の荷重の増加に大きく影響し，2 次勾配の大きいケースほど軸方向鉄筋の降伏後に載荷荷重の増加が見られた．

・図 3.6.22 より，要素の等価長さは，ひび割れ発生直後と軸方向鉄筋の降伏後の載荷点変位が大きくなった段階で僅かに影響が見られたが，解析結果にほとんど影響しなかった．

・図 3.6.23 より，本検討の範囲内では，変位増分量はほとんど解析結果に影響しなかった．

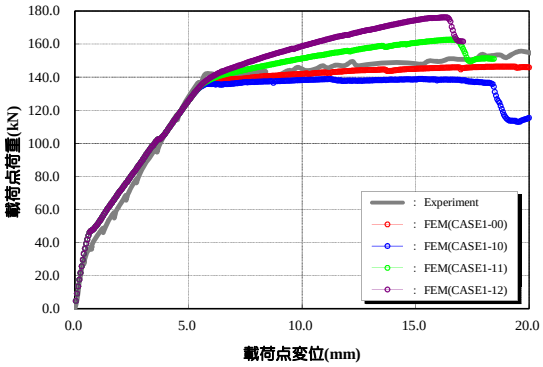


図 3.6.21　鉄筋の 2 次勾配

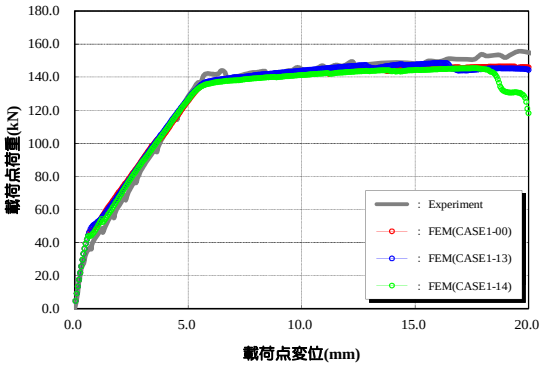


図 3.6.22　要素の等価長さ

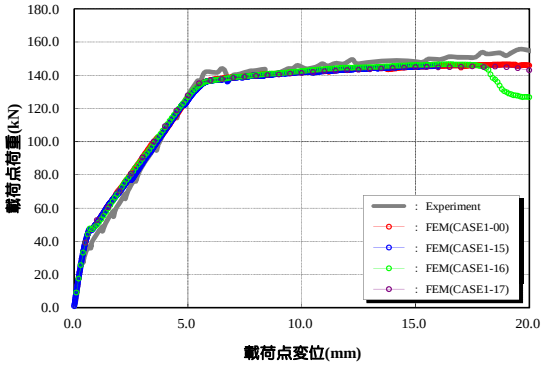


図 3.6.23　変位増分量

3.6.4　せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁に対する検討

(1) 実験結果と解析結果の比較

1）荷重－変位関係

ここでは，荷重－変位関係に着目して，実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.24** に，実験および解析から得られた載荷点の荷重－変位関係を示す．図中には抽出点として，後述する最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す解析 Step を示している．

図より，解析結果の荷重－変位関係は，載荷荷重 50 kN 付近の RC 梁下面のひび割れ発生による剛性低下や，載荷点変位 5 mm 付近で生じる斜めひび割れの開口による荷重の低下等，ひび割れ損傷による影響を再現できている．ただし，斜めひび割れ開口時の荷重や，ひび割れ発生時に，実験ほど荷重が低下しない等の結果の違いも見られた．

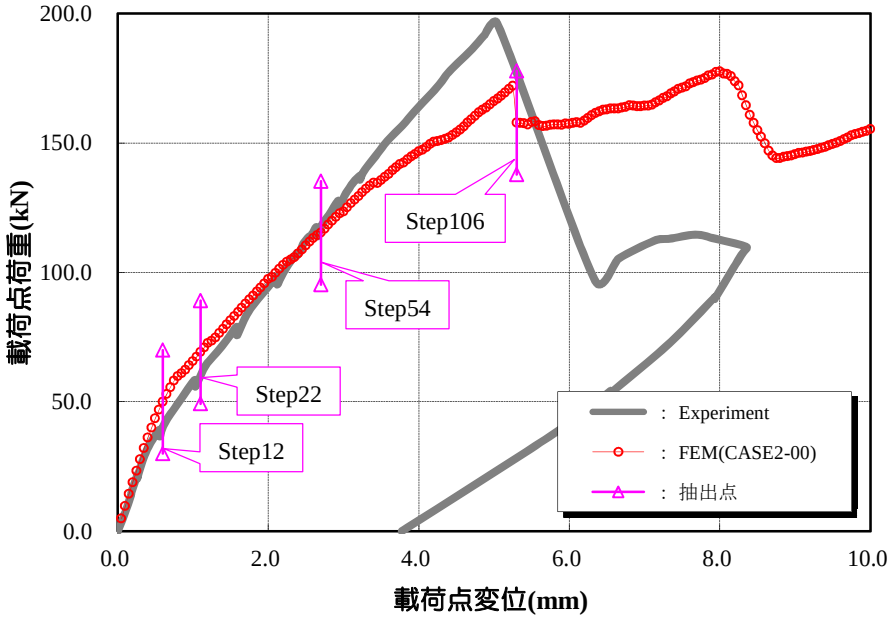


図 3.6.24　載荷点荷重－変位関係の比較および変化点の抽出

2）ひび割れの進展

ここでは，ひび割れの進展に着目して実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.25** に，実験で得られたひび割れ図および解析で得られた最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す．

図より，RC 梁の下面からの，鉛直方向のひび割れの進展と，載荷点変位 5 mm 付近で生じる支点から載荷点にわたる斜めひび割れの開口が再現されており，解析結果は，実験で確認されたひび割れの定性的な特徴を捉えている．

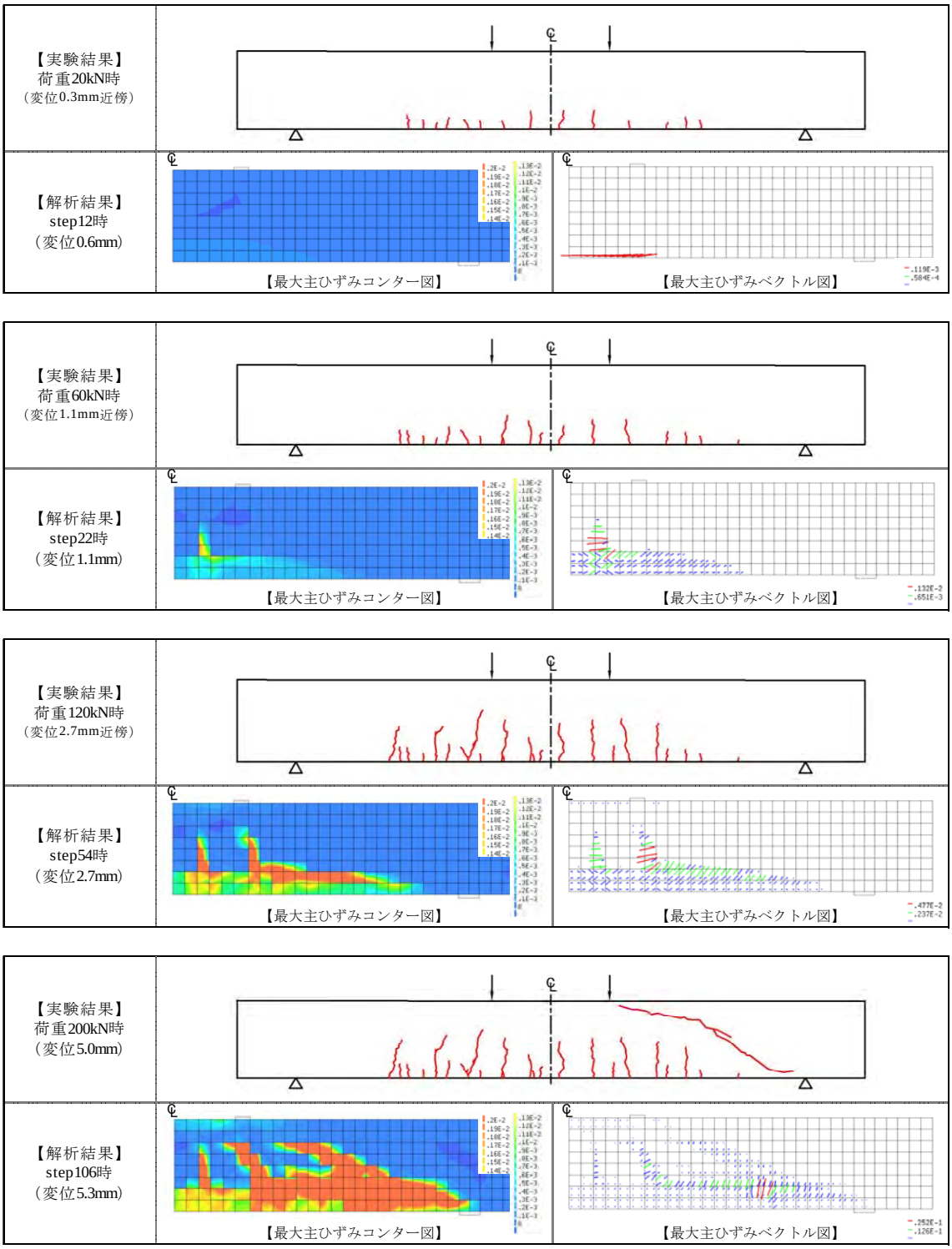


図 3.6.25　ひび割れ性状および進展の比較

3）軸方向鉄筋のひずみおよび応力の比較

ここでは，軸方向鉄筋のひずみおよび応力に着目して実験結果と解析結果を比較する．軸方向鉄筋のひずみおよび応力について，ひずみゲージ位置計 4 点の各領域に対して，平均化領域を設定して整理するものとした．平均化領域のモデル図を**図 3.6.26** に示す．実験および解析から得られた軸方向鉄筋のひずみ－変位関係と軸方向鉄筋の応力－変位関係を**図 3.6.27**，**図 3.6.28** に示す．なお，実験結果の鉄筋応力度は，鉄筋の引張試験から得られたヤング係数および降伏強度に基づき，鉄筋ひずみの計測値を換算した．

図より，実験結果と解析結果を比較すると，斜めひび割れが開口した載荷点変位 5 mm 以降も，解析結果でひずみと応力が保持されている．このことは，荷重－変位関係で述べたとおり，解析においては斜めひび割れの開口時の荷重の低下が小さいことと関連していると考えられる．

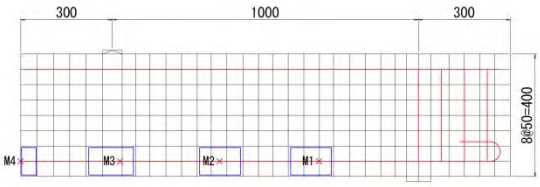


図 3.6.26　平均化領域のモデル図

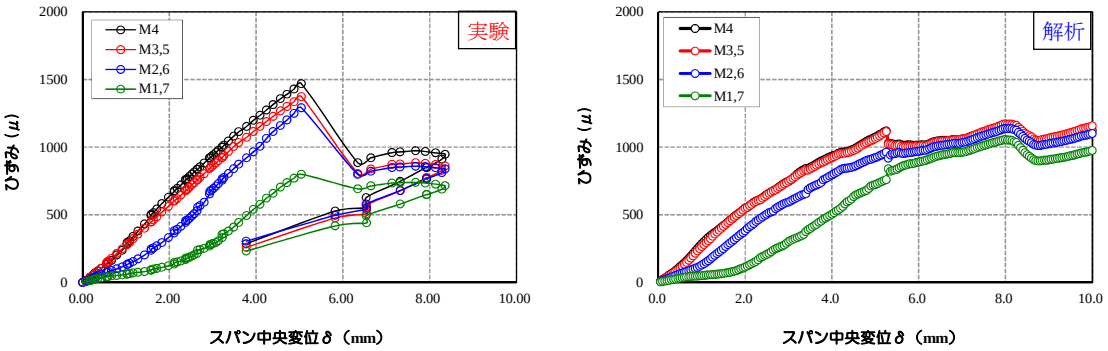


図 3.6.27　軸方向鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

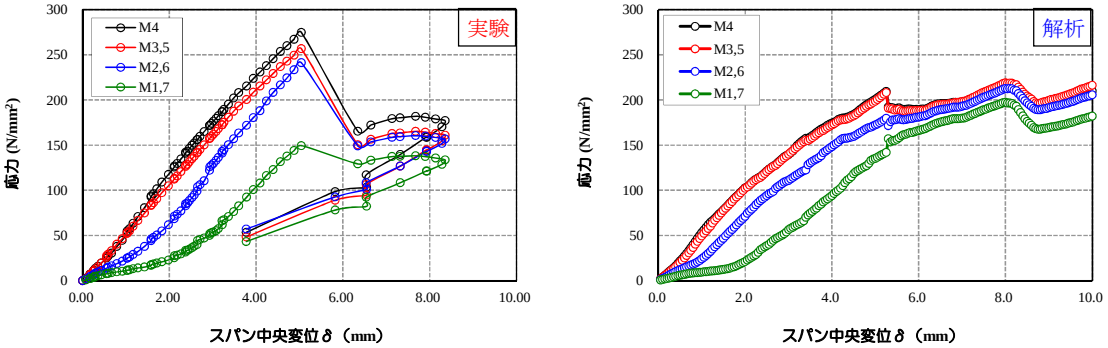


図 3.6.28　軸方向鉄筋の応力－スパン中央変位関係

(2) モデル化におけるパラメータの設定の影響

ここでは，せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型 RC 梁を対象として，モデル化における種々のパラメータが解析結果に及ぼす影響を確認するために，**表 3.6.7** に示すケースについて解析を実施し，その結果を比較した．

着目したパラメータごとの載荷点荷重－載荷点変位関係を**図 3.6.29**～**図 3.6.35** に示す．図の載荷点荷重－載荷点変位関係に基づき，せん断破壊型の RC 梁の解析結果に対する着目したパラメータごとの影響の概要を，次頁以降に箇条書きで整理している．

表 3.6.7　検討ケース一覧

解析ケース	検討内容	解析パラメータ
CASE2-00	標準ケース	－
CASE2-01	コンクリートのひび割れモデルの影響	回転ひび割れモデル
CASE2-02	コンクリートの圧縮側構成モデルの影響	耐力算定用モデル
CASE2-03	コンクリートの引張強度の影響	圧縮強度からの推定値の 70%
CASE2-04		圧縮強度からの推定値の 80%
CASE2-05		圧縮強度からの推定値の 90%
CASE2-06	せん断剛性低減係数 β の影響	$\beta = 0.001$
CASE2-07		$\beta = 0.010$
CASE2-08		$\beta = 0.050$
CASE2-09		$\beta = 0.100$
CASE2-10	鉄筋の 2 次勾配の影響	2 次勾配　E’ = 0.001 Es
CASE2-11		2 次勾配　E’ = 0.050 Es
CASE2-12		2 次勾配　E’ = 0.100 Es
CASE2-13	要素の等価長さの影響	等価長さ=要素面積の平方根 1/2 倍
CASE2-14		等価長さ=要素面積の平方根の 2 倍
CASE2-15	変位増分量の影響	0.01mm / Step
CASE2-16		0.10mm / Step
CASE2-17		0.50mm / Step

・図 3.6.29 より，コンクリートのひび割れモデルは，本検討の範囲内では，回転ひび割れモデルを用いた場合に，載荷点変位 2 mm 付近で，軸方向鉄筋を配置した要素の上側に沿ったひずみの増加に伴い載荷荷重が低下した．

・図 3.6.30 より，コンクリートの圧縮側構成則は，耐力算定用モデルを用いた場合に，載荷点変位 5 mm 付近で荷重が一旦増加しなくなる傾向が見られたが，軟化モデルに見られたような載荷荷重の低下が表れなかった．

・図 3.6.31 より，コンクリートの引張強度は，載荷荷重 50 kN 付近で生じる RC 梁下面のひび割れが発生する荷重に影響するとともに，最大荷重に影響した．ただし，最大荷重とコンクリートの引張強度との相関は，本検討においては確認されなかった．

・図 3.6.32 より，せん断剛性低減係数 β は，ひび割れ発生以降の剛性に僅かに影響し，係数 β の小さいケースでひび割れ後の剛性が小さい傾向が見られた．また，最大荷重についても，係数 β の小さいケースで小さい傾向が見られた．

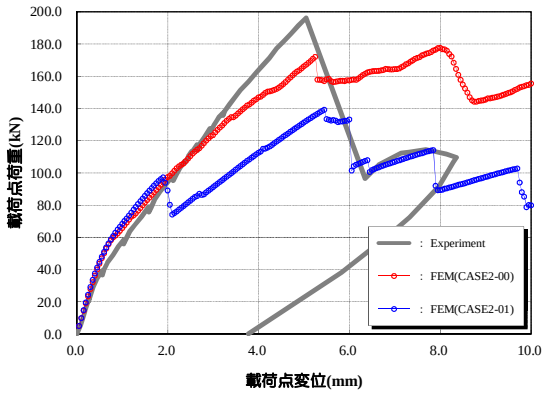


図 3.6.29　コンクリートのひび割れモデル

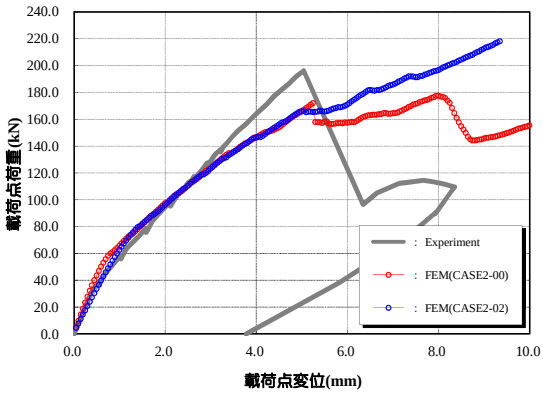


図 3.6.30　コンクリートの圧縮側構成則

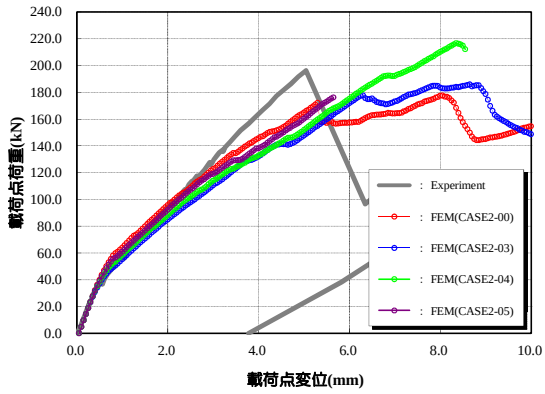


図 3.6.31　コンクリートの引張強度

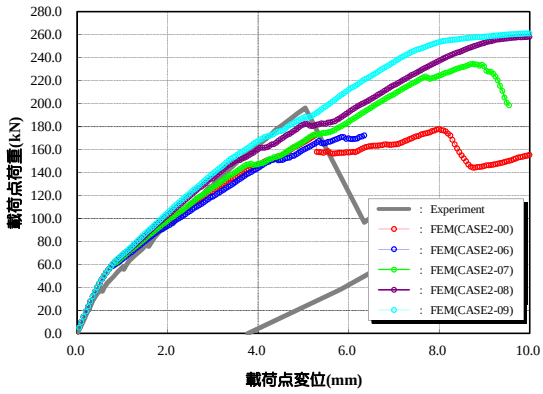


図 3.6.32　せん断剛性低減係数 β

・図 3.6.33 より，鉄筋の 2 次勾配は，載荷点変位 5 mm で荷重が低下したケースを除いて違いが無かった．対象としたせん断補強鉄筋の無いせん断破壊型の RC 梁においては，鉄筋に降伏が生じなかったため，2 次勾配は解析結果に影響しないものと考えられる．

・図 3.6.34 より，要素の等価長さは，RC 床版下面からひび割れが発生する載荷荷重 50 kN 以降で僅かに影響が見られた．等価長さが最も短く設定された CASE2-13 で，最大荷重が最も大きい結果であった．

・図 3.6.35 より，変位増分量によって，いずれのケースにおいてもひずみの増加が見られた損傷箇所は類似したものの，荷重が低下する載荷点変位に違いが見られた．

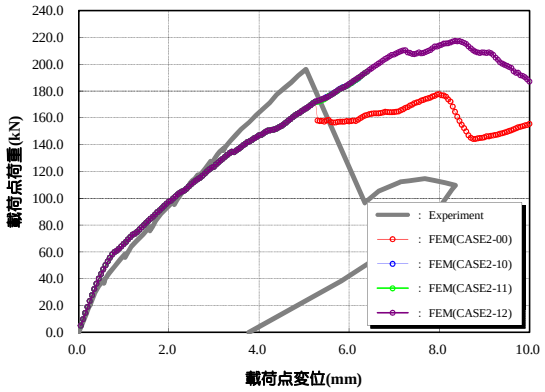


図 3.6.33　鉄筋の 2 次勾配

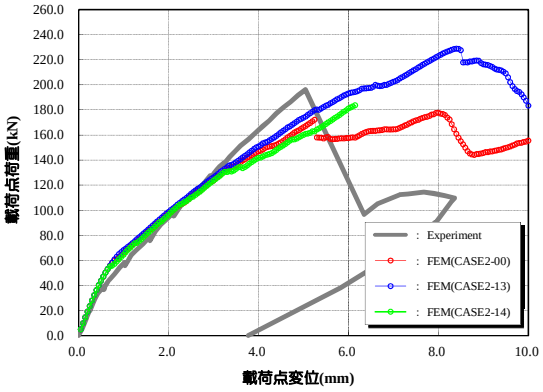


図 3.6.34　要素の等価長さ

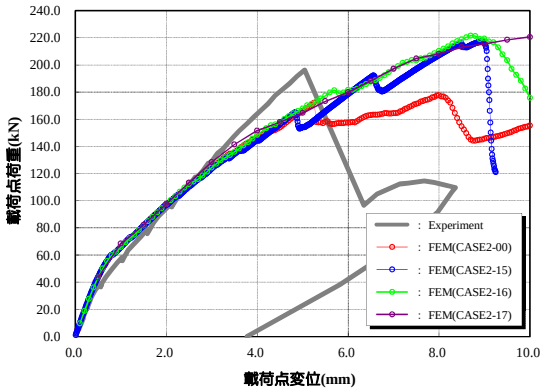


図 3.6.35　変位増分量

3.6.5　せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型 RC 梁に対する検討

(1) 実験結果と解析結果の比較

1）荷重－変位関係

ここでは，荷重－変位関係に着目して，実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.36** に，実験および解析から得られた載荷点の荷重－変位関係を示す．図中には抽出点として，後述する最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す解析 Step を示している．

図より，実験結果と解析結果の荷重－変位関係は，荷重強度に差が見られるものの，載荷荷重 50 kN 付近の RC 梁下面からのひび割れの発生や，載荷点変位 8 mm 付近の軸方向鉄筋の降伏に伴う剛性の変化を概ね再現できている．ただし，圧縮縁のコンクリートの損傷による載荷荷重の低下が，実験結果に比べて解析結果で小さな変位であった．

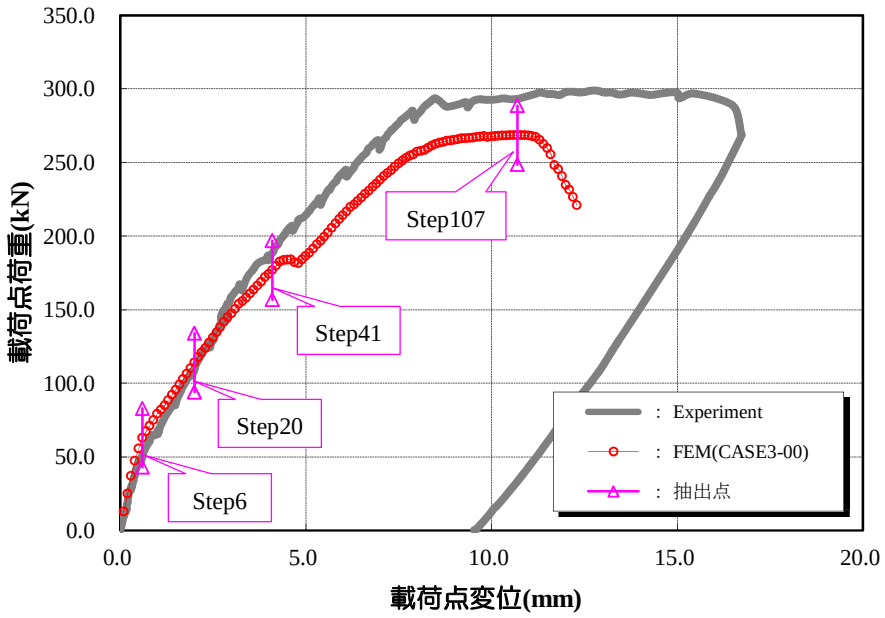


図 3.6.36　載荷点荷重－変位関係の比較および変化点の抽出

2）ひび割れの進展

ここでは，ひび割れの進展に着目して実験結果と解析結果を比較する．**図 3.6.37** に，実験で得られたひび割れ図および解析で得られた最大主ひずみコンター（ベクトル）図を示す．

図より，解析では支間にわたり RC 梁下面から進展するひび割れや，ひび割れが載荷点方向に向かって斜めに進展する挙動が再現されており，解析結果は，実験で確認されたひび割れの定性的な特徴を捉えていることが確認された．また，載荷荷重が低下する際に生じる載荷板間の圧縮縁コンクリートの損傷も，解析結果から確認された．

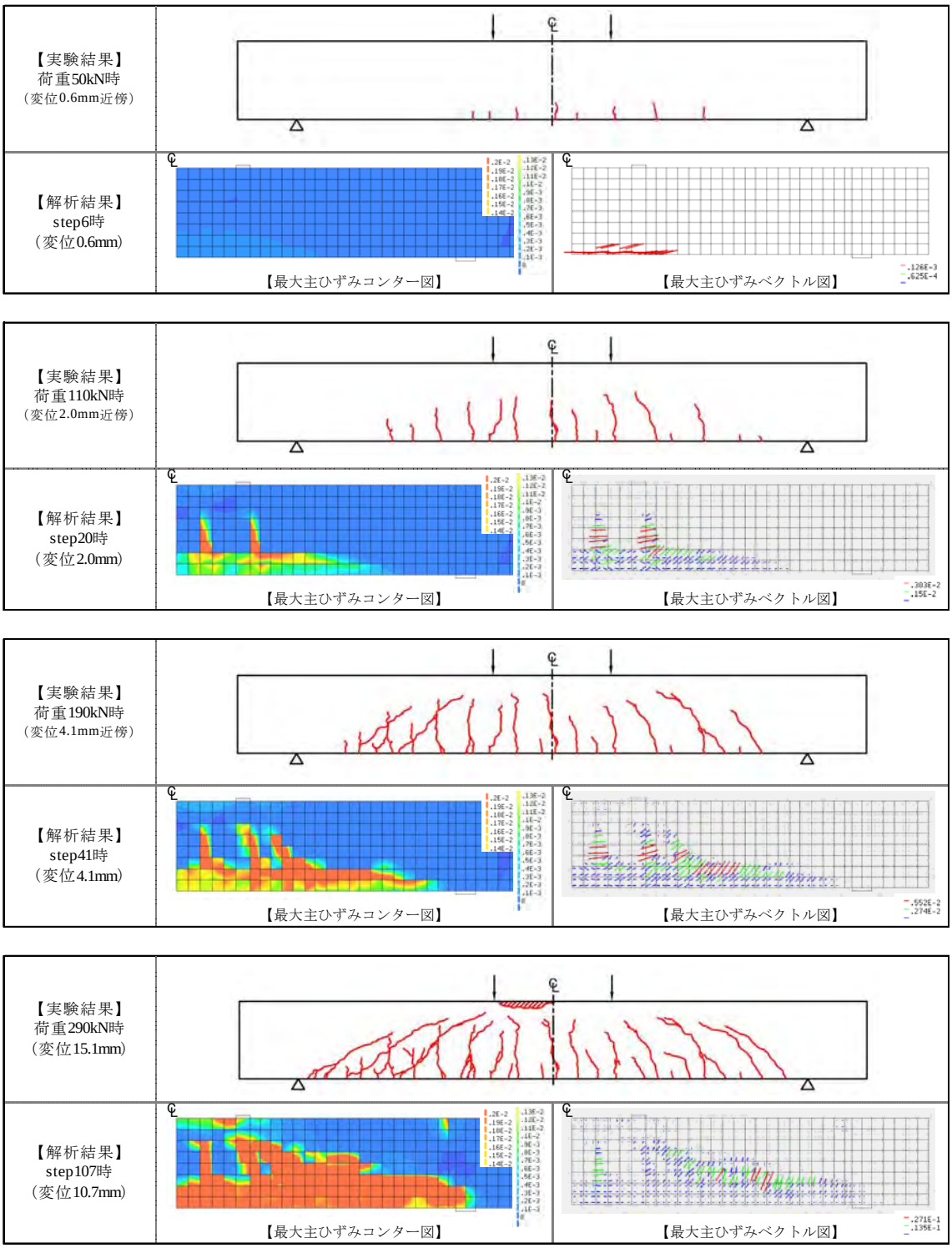


図 3.6.37　ひび割れ性状および進展の比較

3）せん断補強鉄筋のひずみおよび応力の比較

ここでは，せん断補強鉄筋のひずみおよび応力に着目して実験結果と解析結果を比較する．せん断補強鉄筋のひずみおよび応力について，ひずみゲージ位置計 10 点の各領域に対して平均化領域を設定して整理した．平均化領域のモデル図を**図 3.6.38** に示す．実験および解析から得られたせん断補強鉄筋のひずみ－変位関係とせん断補強鉄筋の応力－変位関係を**図 3.6.39**，**図 3.6.40** に示す．なお，実験結果の鉄筋応力度は，鉄筋の引張試験から得られたヤング係数および降伏強度に基づき，鉄筋ひずみの計測値を換算した．

図より，実験結果で確認されたように，載荷点変位 5 mm までに，せん断補強鉄筋のひずみが降伏により急増する挙動が，解析結果においても再現されている．ただし，応力に換算した結果は，解析結果で応力が小さい結果となった．この要因については，（2）せん断補強鉄筋のモデル化による影響において示す．

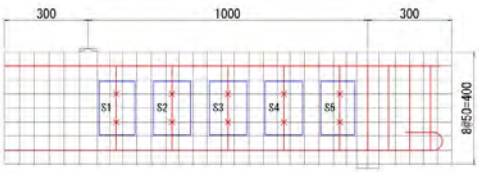


図 3.6.38　平均化領域のモデル図

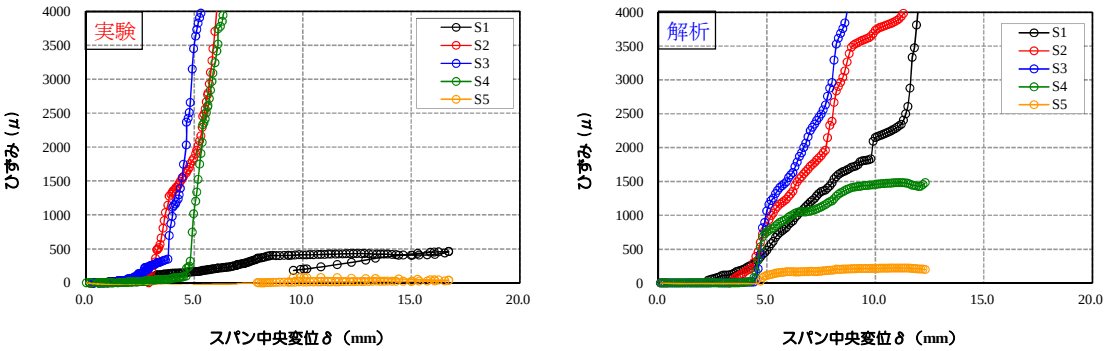


図 3.6.39　せん断補強鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

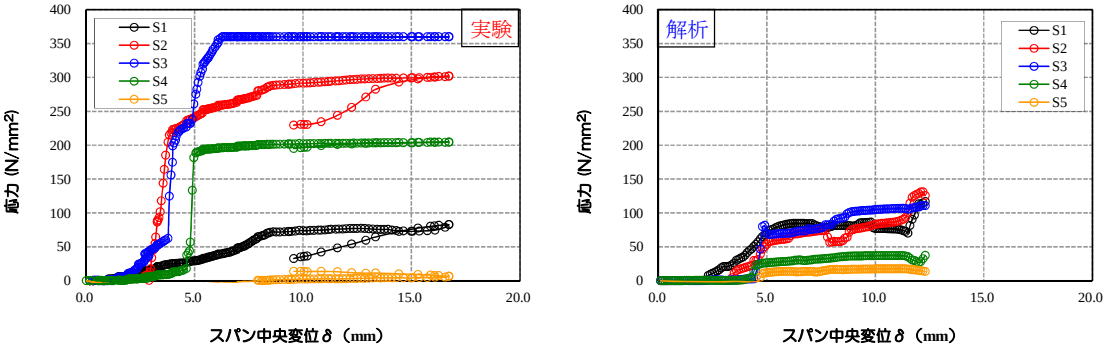


図 3.6.40　せん断補強鉄筋の応力－スパン中央変位関係

4）軸方向鉄筋のひずみおよび応力の比較

ここでは，軸方向鉄筋のひずみおよび応力に着目して実験結果と解析結果を比較する．軸方向鉄筋のひずみおよび応力について，ひずみゲージ位置計 4 点の各領域に対して，平均化領域を設定して整理するものとした．平均化領域のモデル図を**図 3.6.41** に示す．実験および解析から得られた軸方向鉄筋のひずみ－変位関係と軸方向鉄筋の応力－変位関係を**図 3.6.42**，**図 3.6.43** に示す．なお，実験結果の鉄筋応力度は，鉄筋の引張試験から得られたヤング係数および降伏強度に基づき，鉄筋ひずみの計測値を換算した．

図より，実験結果と解析結果を比較すると，解析が小さな変位で破壊に至って，ひずみまたは応力が低下し始める影響を受けているものの，実験結果を概ね再現できている．ただし，ひずみの急増が見られた M4 計測点について，実験結果のひずみが大きい．このことは，解析においては，ある空間で平均化した材料モデルを適用しているのに対して，実験のひずみは計測点近傍のひび割れ状況が計測値に影響しているためと考えられる．

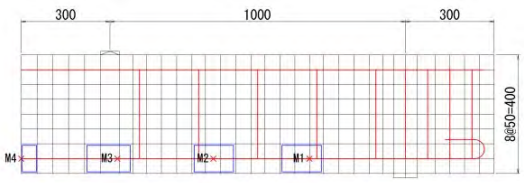


図 3.6.41　平均化領域のモデル図

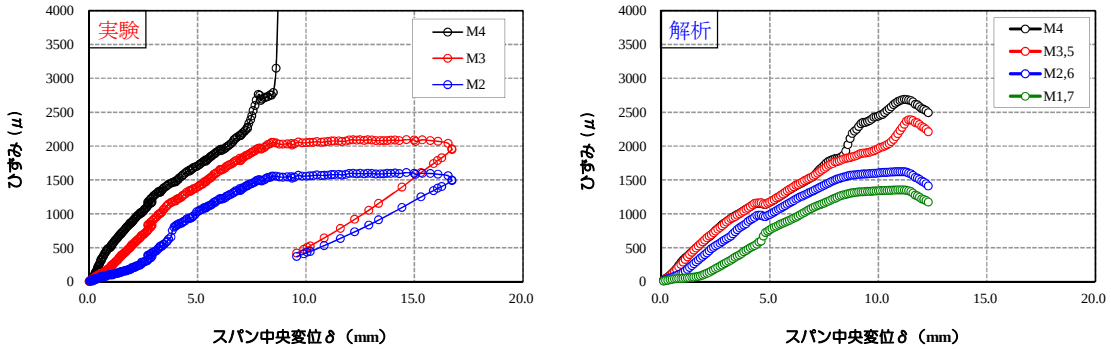


図 3.6.42　軸方向鉄筋のひずみ－スパン中央変位関係

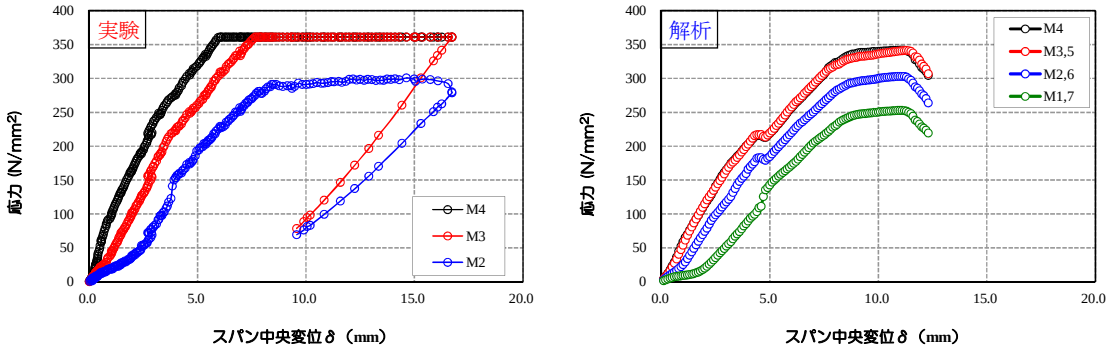


図 3.6.43　軸方向鉄筋の応力－スパン中央変位関係

(2) せん断補強鉄筋のモデル化による影響

1) 検討内容

3.6.5 (1) より，せん断補強鉄筋の応力に違いが見られた．せん断補強鉄筋のモデル化の相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的に，以下の 3 項目を変数として，表 3.6.8 に示す 4 ケースについて解析を実施した．

①せん断補強鉄筋の配置領域

②せん断補強鉄筋降伏後の硬化係数

③コンクリートの引張側構成則

表 3.6.8　検討ケース

	①せん断補強鉄筋の配置領域		②せん断補強鉄筋降伏後の硬化係数		③コンクリートの引張側構成則	
	ゾーニング	一様	$0.01\times E_s$	$0.07\times E_s$	引張剛性	引張軟化
Case1	●		●		RC 部	無筋部
Case2	●			●	RC 部	無筋部
Case3		●	●		軸方向鉄筋	軸方向鉄筋以外
Case4		●		●	軸方向鉄筋	軸方向鉄筋以外

変数とした 3 項目の詳細を以下に示す．

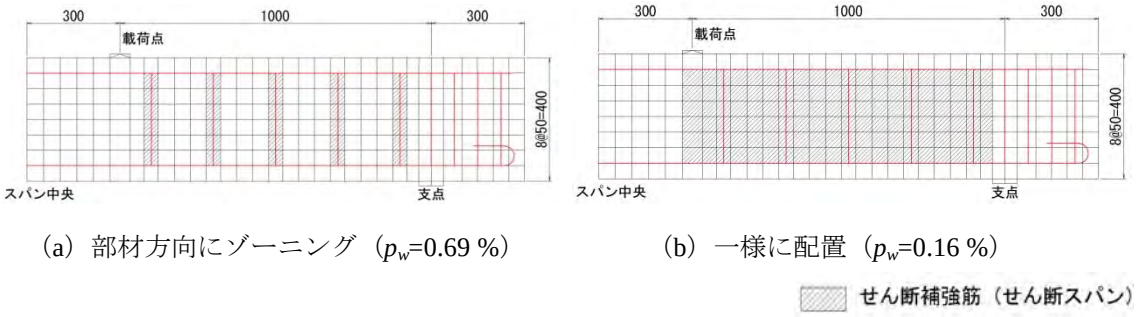
①せん断補強鉄筋の配置領域

・部材方向にゾーニング：

付着効果が作用するコンクリート面積に対応する幅として算出された 45.8 mm の範囲にせん断補強鉄筋を配置する（図 3.6.44(a)）．

・一様に配置：

せん断スパンの範囲に分散させてせん断補強鉄筋を配置する（図 3.6.44(b)）．



(a) 部材方向にゾーニング（p_w=0.69 %）　　(b) 一様に配置（p_w=0.16 %）

図 3.6.44　せん断補強鉄筋の配置領域

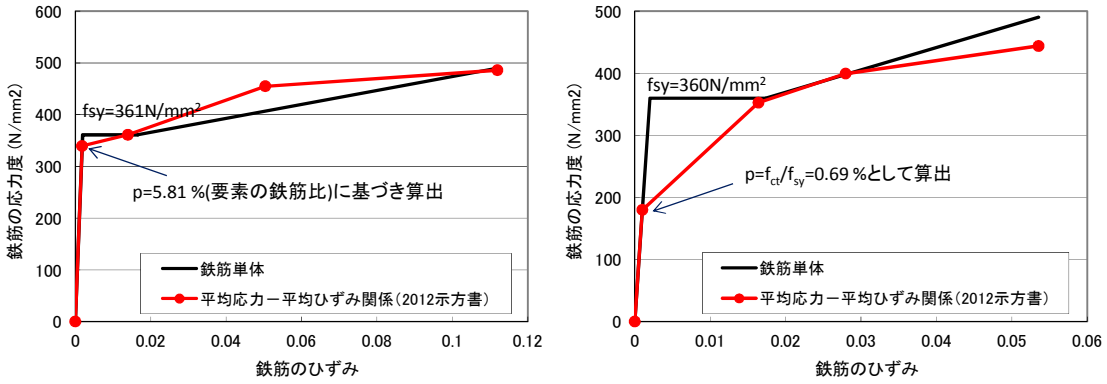
②せん断補強鉄筋降伏後の硬化係数

図 3.6.45 に，せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の，鉄筋単体の応力－ひずみ関係と示方書 [1)]に記載されたコンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係の比較を示す．**図 3.6.46** に，上述の示方書式と解析モデルの鉄筋の応力－ひずみ関係を示す．

・鉄筋単体（図中の黒線）：降伏強度とヤング係数に基づき描画した．ただし，ひずみ硬化開始以降は，引張強度を 490 N/mm^2 に仮定し，ひずみ硬化開始ひずみと破断ひずみを推定値により描いた参考値である．

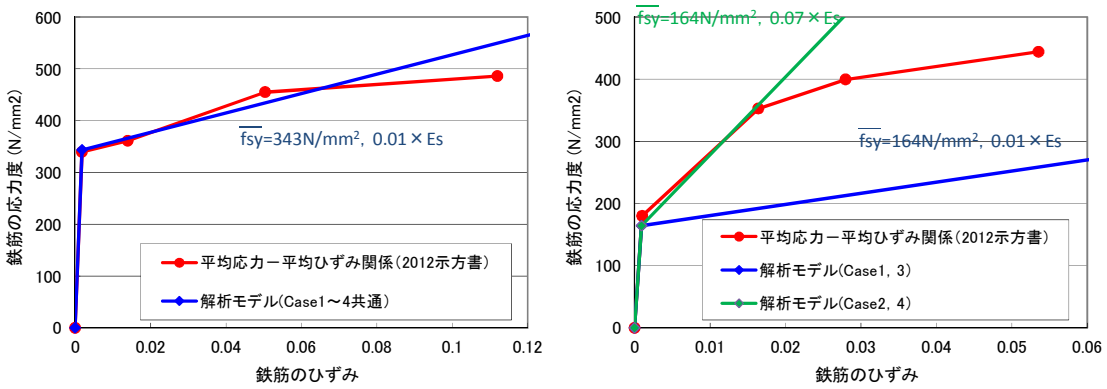
・平均応力－平均ひずみ関係（図中の赤線）：コンクリート標準示方書のひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係である．

・解析モデルの材料構成則（図中の青線および緑線）：解析モデルに用いているバイリニア型の鉄筋の材料構成則である．



(a) 軸方向鉄筋　　(b) せん断補強鉄筋

図 3.6.45　鉄筋単体の応力-ひずみ関係と 2012 年示方書による平均応力－平均ひずみ関係



(a) 軸方向鉄筋　　(b) せん断補強鉄筋

図 3.6.46　示方書による平均応力－平均ひずみ関係と解析モデルの平均応力－平均ひずみ関係

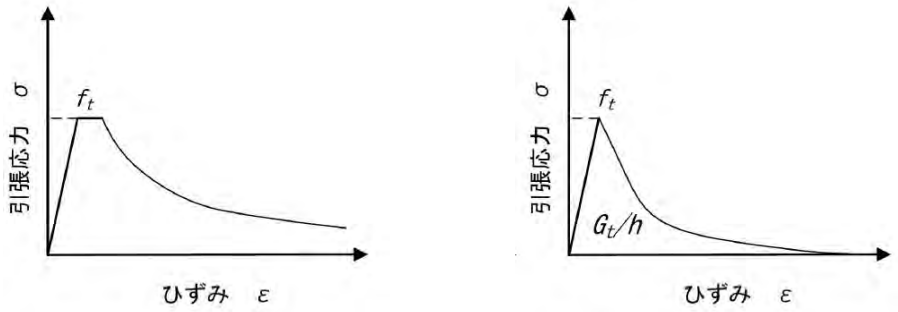
③コンクリートの引張側構成則

・引張剛性：

鉄筋－コンクリート間の付着による，コンクリートの引張力の負担を考慮するモデルである（図 3.6.47(a)）.

・引張軟化：

鉄筋－コンクリート間の付着による，コンクリートの引張力の負担を無視するモデルである．ただし，コンクリート中のひび割れ進展による軟化を考慮（図 3.6.47(b)）.



（a）引張剛性　　（b）引張軟化

図 3.6.47　コンクリート引張側の構成則

2）荷重－変位関係

載荷点荷重－載荷点変位関係を図 3.6.48 に示す．荷重－変位関係の解析結果から，本検討の範囲内では，せん断補強鉄筋のモデル化の違いにより，最大荷重に違いは見られない．

各解析ケースの最大荷重と耐力の関係を表 3.6.9 に示す．耐力の計算値との比較から，いずれのケースも，部材の曲げ耐力に達して最大荷重が決定していることが確認された．

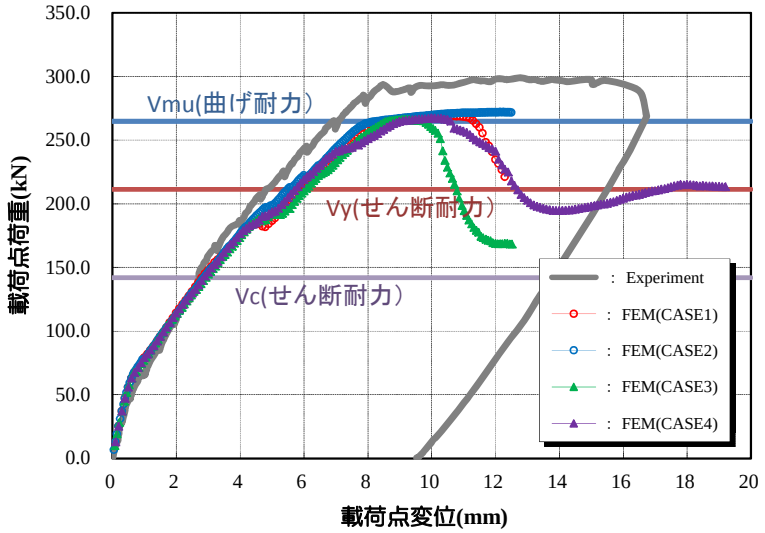


図 3.6.48　荷重－変位関係

表 3.6.9　最大荷重と耐力の計算値

		最大耐力および耐力の計算値との比較				耐力の計算値
		Case1	Case2	Case3	Case4	(kN)
最大荷重の解析結果 (kN)		268.6	272.0	266.4	267.4	－
耐力の計算値に対する比率	曲げ耐力 V_{mu}	1.01	1.03	1.01	1.01	264.8
	せん断耐力 V_y	1.27	1.29	1.26	1.27	211.4
	せん断耐力 V_c	1.89	1.92	1.88	1.88	141.9

3）最大主ひずみベクトル図

載荷点変位 9.0 mm 時の最大主ひずみベクトル図を**図 3.6.49** に示す.

最大主ひずみベクトル図より，いずれのケースも支点から載荷点に向けて斜め方向に最大主ひずみの増加が見られ，その領域にせん断補強鉄筋のモデル化の違いは見られなかった．実験供試体は，充分に密な間隔でせん断補強鉄筋が配置されているため，せん断補強鉄筋の配置領域（ゾーニング／一様配置）のモデル化は，損傷位置に影響しないものと推察される.

4）鉄筋の塑性ひずみコンター図

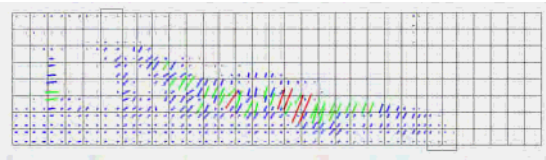
載荷点変位 9.0 mm 時の鉄筋の塑性ひずみコンター図を**図 3.6.50** に示す. 鉄筋の塑性ひずみコンターから，いずれのケースも載荷荷重がせん断耐力 V_y を越えた δ=9 mm で，せん断補強鉄筋が広い範囲で塑性化していることが確認された.

5）せん断補強鉄筋の応力

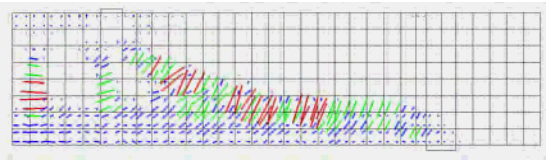
図 3.6.51 に示す領域に基づき，実験結果と解析結果のせん断補強鉄筋の応力を比較する. 実験結果については, ひずみゲージ位置計 10 点の各領域に対して縦方向の 2 点を平均した. 一方，解析結果については，**図 3.6.51** の青線の領域に含まれる鉄筋要素の応力度の平均値または最大値を比較の対象とする.

せん断補強鉄筋の応力－変位の関係を，実験結果について**図 3.6.52** に示す．実験結果の鉄筋応力度は, 鉄筋ひずみの計測値より, 鉄筋の引張試験から得られたヤング係数に基づき応力度に換算しており，降伏応力度を超えた場合は降伏応力度として描いた.

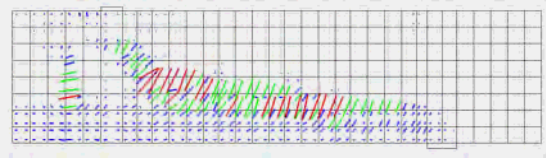
解析結果について, 領域内鉄筋要素全積分点の鉛直方向応力度の平均値と変位の関係を**図 3.6.53** に，領域内の鉛直方向応力度の領域内鉄筋要素鉛直方向応力度の全積分点の最大値に基づく応力と変位の関係を**図 3.6.54** に示す.



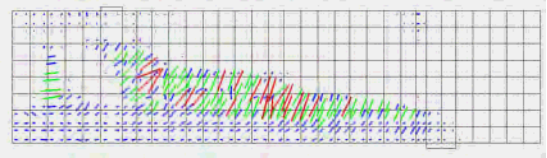
（a） Case1



（b） Case2

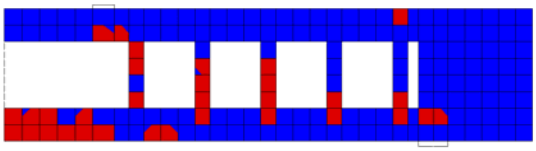


（c） Case3

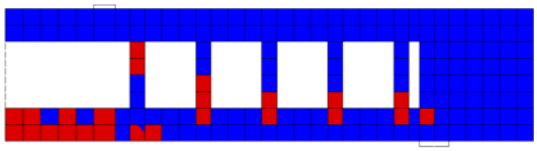


（d） Case4

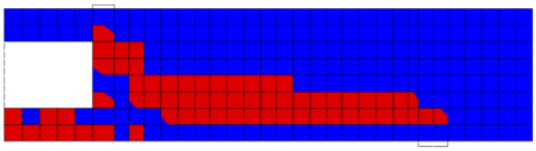
図 3.6.49　最大主ひずみベクトル図（載荷点変位 9.0mm 時）



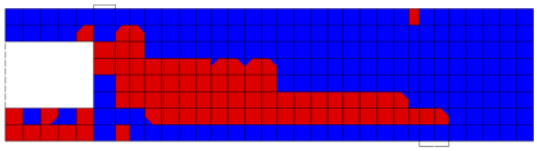
（a） Case1



（b） Case2



（c） Case3



（d） Case4

図 3.6.50　鉄筋の塑性ひずみコンター図（載荷点変位 9.0mm 時）

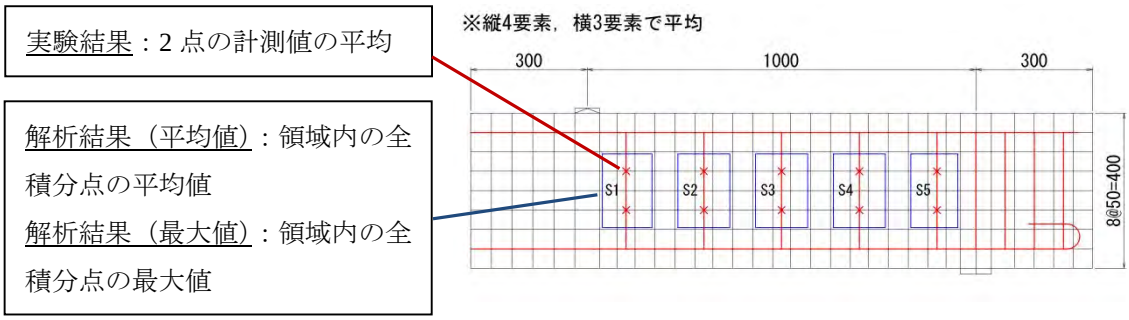


図 3.6.51　平均化（最大値抽出）の領域

せん断補強鉄筋の応力について実験結果と解析結果を比較すると，**図 3.6.53** に示した比較対象のスターラップ周辺領域内の解析結果の平均値と比較した場合，いずれものケースも実験結果に比べて小さい傾向にあった．この要因として，解析結果においては，ひび割れが発生している領域と発生していない領域を平均化したため過少評価された可能性がある．したがって，ここでのせん断補強鉄筋の応力が小さいという認識は間違いであり，解析結果を誤って評価しないように注意が必要である．なお，比較対象の実験結果は，スターラップ 1 箇所あたり 2 点の計測結果を平均した値である．

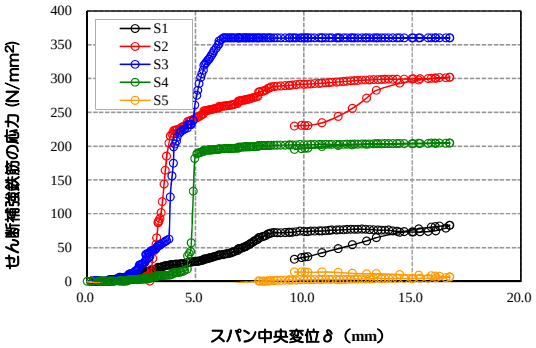
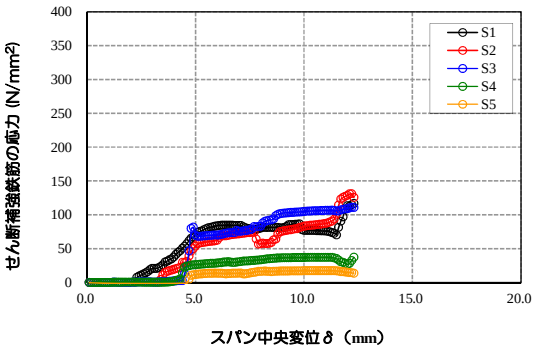
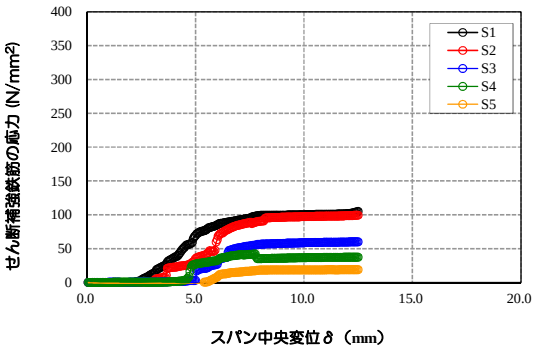


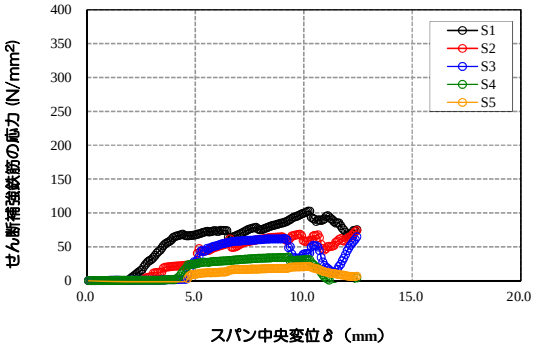
図 3.6.52　せん断補強鉄筋の応力－変位の関係（実験結果）



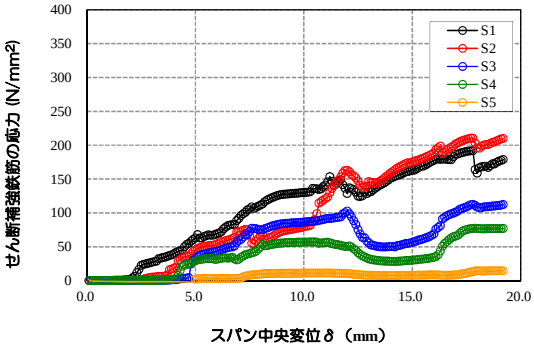
（a）Case1



（b）Case2

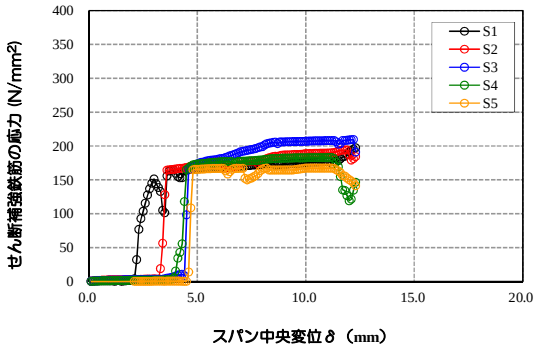


（c）Case3

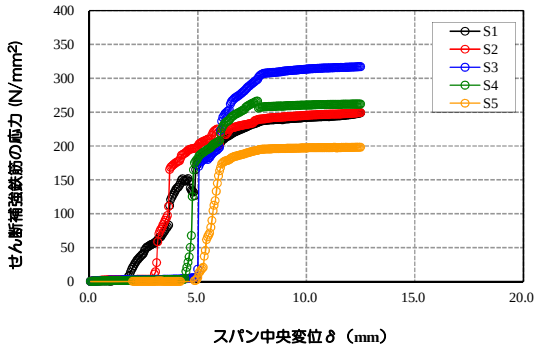


（d）Case4

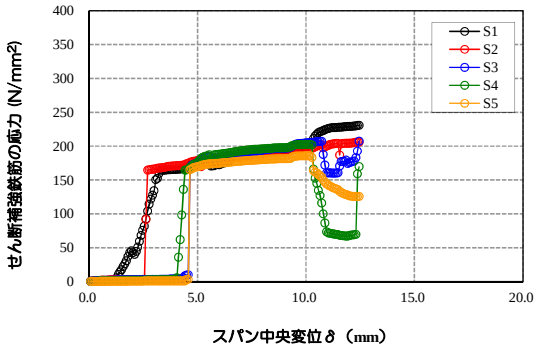
図 3.6.53　せん断補強鉄筋の応力の平均値－変位の関係（解析結果）



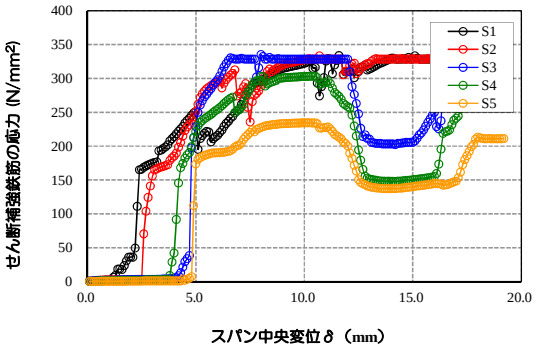
（a） Case1



（b） Case2



（c） Case3



（d） Case4

図 3.6.54　せん断補強鉄筋の応力の最大値－変位の関係（解析結果）

せん断補強鉄筋の応力について，**図 3.6.54** に示したスターラップ周辺領域内の解析結果の最大値と実験結果を比較すると，せん断補強鉄筋の降伏強度として平均降伏強度を用いた場合でも，降伏後の硬化係数を高めに設定することで，実験結果と同程度の応力度の解析結果が得られる（Case2，Case4）.

6）軸方向鉄筋（引張鉄筋）の降伏強度を変えた解析

せん断補強鉄筋のモデル化の相違がせん断耐力に及ぼす影響をより明確にするために，軸方向鉄筋の降伏前にせん断破壊に至るよう，軸方向鉄筋の降伏強度を 1,000 N/mm^2 とした場合の解析を実施した．その結果得られた荷重－変位関係を**図 3.6.55** に示す．

図から，降伏後の硬化係数を高めに設定したケース（Case2，Case4）の耐力に比べて，降伏後の硬化係数を低めに設定したケース（Case1，Case3）は，やや耐力が小さい傾向にあった．この原因は，せん断補強鉄筋の応力度が小さく，せん断補強鉄筋が負担する耐力が小さいためと考えられる．このように，破壊形態によっては，せん断補強鉄筋のモデル化が，最大耐力に影響を及ぼす．

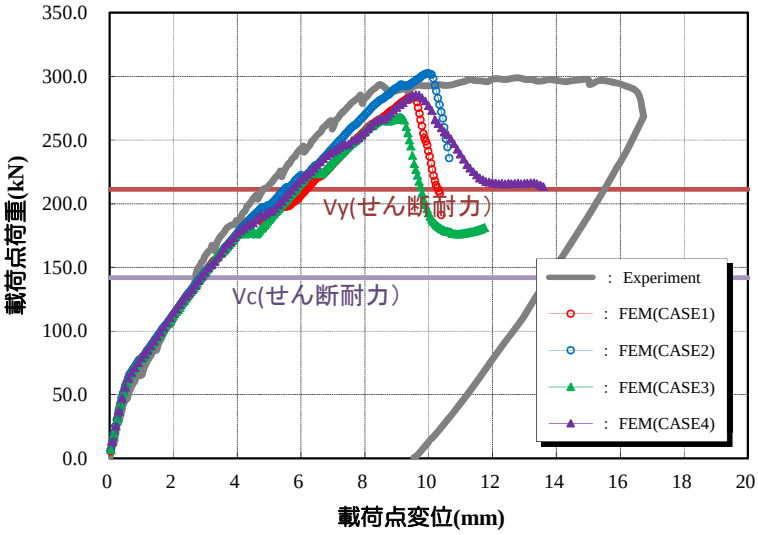


図 3.6.55　軸方向鉄筋の降伏強度を f_{sy}=1,000 N/mm^2 とした場合の荷重－変位関係

3.6.6　まとめ

本節では，3.3 節に示した健全な RC 梁の載荷実験を対象に非線形有限要素解析を実施して，実験結果と解析結果を比較した．比較においては，荷重－変位関係，ひび割れの進展，せん断補強鉄筋および軸方向鉄筋のひずみ挙動に着目することで，どのような指標で整理すると RC 梁の損傷の進展を解析により把握できるかを検討した．本検討で得られた知見をまとめると，以下に示すとおりである．

・荷重－変位関係に着目して実験結果と解析結果を比較した結果，曲げ破壊型の RC 梁に対しては，ひび割れの進展や軸方向鉄筋の降伏による荷重－変位関係の挙動を，解析により再現できることが確認された．一方，せん断破壊型の RC 梁については，最大荷重や破壊後の荷重について，実験結果と解析結果に差異が見られたものの，ひび割れの進展による荷重－変位関係への影響を再現できることが確認された．

・ひび割れの進展に着目して，実験で得られたひび割れ図と解析で得られた最大主ひずみの分布を比較した結果，曲げ破壊型とせん断破壊型のいずれにおいても，引張縁からのひび割れの進展や斜めひび割れの開口等の損傷の進展を再現できることが確認された．

・せん断補強鉄筋と軸方向鉄筋について，ひずみと応力に着目して実験結果と解析結果を比較した．本検討で用いた分散ひび割れモデルは，複数のひび割れ挙動を要素内で平均化して取り扱うものであり，鉄筋やコンクリートの材料構成則として空間的に平均化された平均応力－平均ひずみ関係が用いられる．一方で，実験によって計測されるひずみは，計測点における局所的な値であるため，実験による計測値と解析による積分点の解析値を比較するのは誤りである．

・本検討では，せん断補強鉄筋のひずみと応力について，実験において，近接する複数の計測値を平均化することで比較した．その結果，実験結果に比べて，解析結果で鉄筋のひずみ（応力）が小さい場合があった．この要因として，解析結果においては，ひび割れが発生している領域と発生していない領域を平均化したため過少評価されたものと考えられる．したがって，平均化して比較する際には，その平均化する領域の設定方法に留意する必要がある．

・せん断補強鉄筋のモデル化について異なるケースによって検討した結果，荷重－変位関係に明瞭な差異は見られないものの，せん断補強鉄筋の応力の解析結果に違いが見られた．

・以上のことから，荷重－変位関係について同様な解析結果が得られる場合でも，鉄筋のモデル化により，ひずみ（応力）の解析結果が異なる場合があるため，モデル化方法には留意する必要がある．

3.7　おわりに

本委員会では，凍結融解作用によって劣化したコンクリート構造物の定量的な構造性能評価を将来的に行うために，非線形有限要素解析の適切な利用方法の習得を目指し，まずは健全な鉄筋コンクリート部材を対象として，設計実務者の視点から数値解析的検討を実施した．これらの検討では，実験結果との比較や，また，モデル化やパラメータの違いが解析結果に及ぼす影響を整理することで，解析手法や解析結果の妥当性の確認を行った．

数値解析の実施においては，解析者によって，モデル化やパラメータの設定などの様々な因子に対する判断が異なるため，対象とする構造物が同じ場合であっても，必ずしも同一の解析結果が得られるものではない．すなわち，同じ手法の非線形有限要素解析を用いても，解析者によって構造性能の定量的な評価が大きく異なる可能性がある．したがって，解析者自身が，コンクリートのひび割れや鉄筋のモデル化，材料構成モデルの組み合わせ，材料パラメータなど，各種条件が解析結果に及ぼす影響を把握し，選定した解析手法の適用範囲と妥当性を検証した結果を理解することが，解析結果の合理的な評価や判断において重要であるものと考えられる．

2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書［設計編］[1)]では，「非線形有限要素解析による照査」がその技術の発展や実用化を考慮して［標準］に収録された．また，2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書［維持管理編］[7)]では，非線形有限要素解析が，位置による材料特性の違いやひび割れの影響を直接的に考慮でき，大きなばらつきを示す変状が生じた既設構造物の性能を精度よく評価するのに適していることが示された．このような背景からも，今後，非線形有限要素解析は多くの技術者により多方面で益々活用されるものと考えられる．

今後に向けて，本委員会では，凍結融解作用によって劣化したコンクリート構造物を対象とした検討を行い，定量的に構造性能を評価するための適切な解析手法の提案を行いたいと考えている．この解析手法を実構造物に適用すれば，劣化状況に応じた詳細な構造性能評価が可能となる．また，この解析手法の利用によって，鉄筋コンクリート部材の種々の限界状態に対して劣化が及ぼす影響を整理することができることから，この結果を設計に用いられている従来の照査手法に反映させることで，簡易的な構造性能の評価手法が確立できるものと考えられる．

【参考文献】

1）土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2013.3.

2）岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.

3）田所敏弥，佐藤靖彦，上田多門：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1239-1248，2002.3.

4）玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号／V-6，pp.239-247，1987.2.

5）島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号／V-6，pp.165-174，1987.2.

6）澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強鉄筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.444-461，2006.

7）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］，2013.10.

8）日本コンクリート工学協会：構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例，非線形有限要素解析の利用に関する研究委員会報告書，2008.9.

9）土木学会：構造工学における有限要素法の基礎と応用，構造工学委員会継続教育小委員会，構造工学技術シリーズ No.44，2007.10.

10）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン，鉄筋コンクリート構造の有限要素解析と設計法研究委員会，1989.3.

11）土木学会：材料特性の数理モデル入門～構成則主要用語解説集～，土木学会構造工学委員会構造力学小委員会，構造工学シリーズ 4，1989.

12）岸正彦：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック，森北出版株式会社，2006.5.

第 4 章　凍害で劣化したコンクリートおよび構造物の構造性能評価に関する現状

4.1　はじめに

本委員会では，**第 2 章**および**第 3 章**で検討した事項を踏まえて，積雪寒冷地特有の環境作用に起因した変状，すなわち凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価することを最終目標とし，実務者にとって参考となる実用的な技術資料を作成する予定である．

検討作業を進めるにあたり，凍害評価ワーキンググループ（以降，凍害評価 WG（WG2））を設置し，その中に更に 3 つのサブワーキンググループ（以降，SWG）を設置して具体的な検討を行うこととした．3 つの SWG とは，それぞれ 1）材料特性 SWG，2）点検・調査 SWG，3）性能照査 SWG とし，メンバー構成などは本報告書の冒頭にある委員構成を参照されたい．なお，凍害評価 WG では，技術資料の作成に向けて現在検討作業中であるため，本章で取りまとめた内容は中間報告としての内容となっていることをご理解頂きたい．

次に，凍害評価 WG において現段階における整理検討した内容および本章の概要について述べる．

1）材料特性 SWG では，凍害による劣化を先ずは「材料」の観点から整理すべく，凍害で劣化したコンクリートおよび構造物の構造性能評価に関係する文献を収集整理し，「4.2 凍害によるコンクリートの劣化メカニズムと構造性能」で取りまとめた．また，実構造物（道路橋を対象）における凍害による劣化現象の実態を把握すべく「4.3 凍害による劣化現象の事例」で部位毎に取りまとめた．

2）点検・調査 SWG では，凍害で劣化したコンクリート構造物に対する現状行われている点検や調査について整理し，構造性能を評価するための真に必要とされる点検や調査手法を提案するために，先ずは「4.4 点検における調査の現状」として取りまとめた．

3）性能照査 SWG では，凍害による劣化が構造物の構造性能に及ぼす影響の把握や，非線形解析法を適用して構造性能評価を行う場合の留意点や適用限界等を明らかにすることを目的として，先ずはこれまでの検討事例を整理・分析して「4.5 構造性能評価に関する検討事例」として取りまとめた．

4.2　凍害によるコンクリートの劣化メカニズムと構造性能

(1) 凍害による劣化メカニズム

凍害をコンクリート材料の観点で見た場合，コンクリート中の水分が 0℃以下になった時の凍結膨張によって発生するもので，長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリート組織が徐々に劣化する現象である．

凍害を受けたコンクリートでは，一般にコンクリート表面にスケーリング，微細ひび割れ，ポップアウトなどの形態で劣化が顕在化する．その後，スケーリング等の劣化の進行に伴い，美観の低下，変位・変形，はく離・はく落，コンクリート断面の減少，鋼材腐食の進行へと進展し，その結果として構造性能が低下することになる．

本報告書で課題としているのは，「コンクリートの劣化」によって生じる「コンクリート構造物の劣化」であり，外観上の特徴的な変状や凍害に関する試験から凍害の劣化過程を判定し，構造物の構造性能に与える影響を適切に評価した上で，補修補強など適切な対策を施す必要がある．

凍害によりコンクリート組織が破壊に至る機構は，現在のところ水圧説や浸透圧説で説明されている．劣化のメカニズムについては，参考文献 [1] に詳しく記載されており，一部抜粋編集してまとめたものを**表 4.2.1** に示す．また，そのメカニズムは**図 4.2.1** に示すとおりである．

表 4.2.1　凍害によるコンクリートの劣化メカニズム

		説　明
①水圧説		コンクリートの細孔中の水が凍結し，その膨張分の水の移動圧による
浸透圧説	②膨張	粗大径側の毛細管中の水が先に凍結，微小な細孔にある未凍結水のアルカリ濃度が増加，周囲のゲル水が未凍結水中に拡散，凍結，氷の成長による膨張圧
	③収縮	空気泡に拡散された水は直ちに凍結，毛細管中の氷晶とともに周囲の水を吸収し，吸収された分だけ収縮

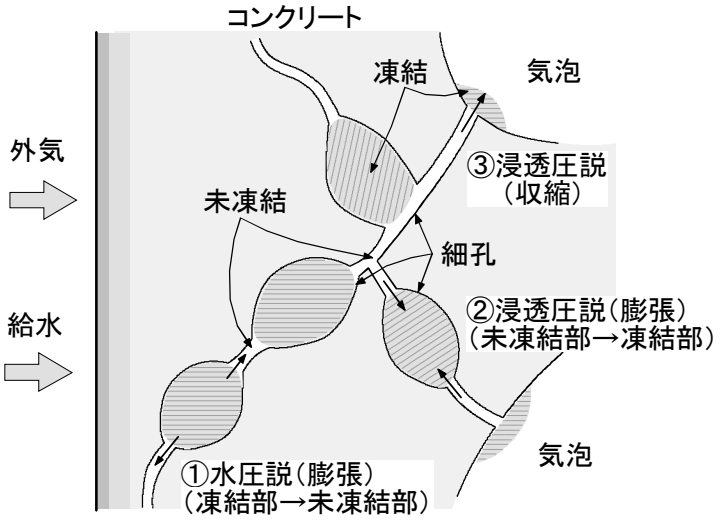
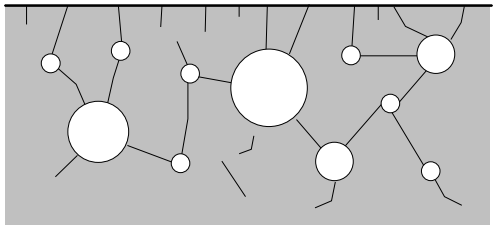
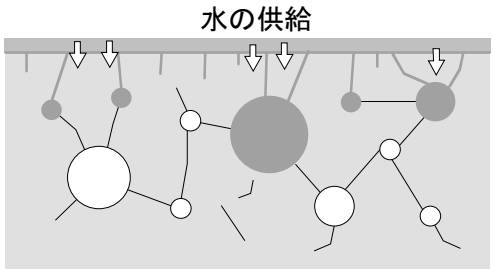
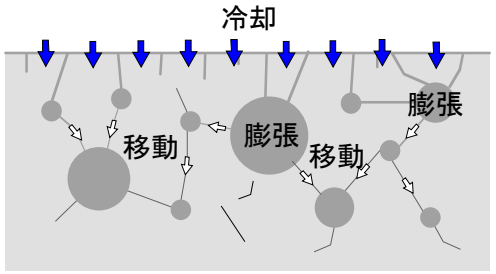
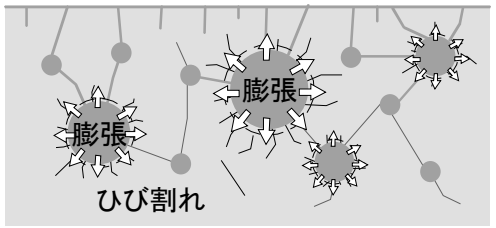
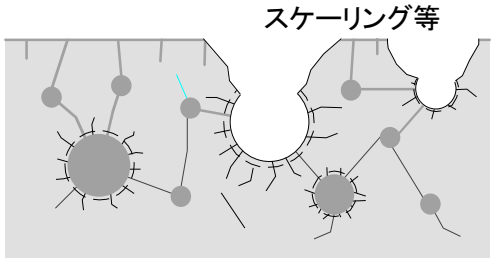


図 4.2.1　水圧説と浸透圧説 [1)]

スケーリングを例に，凍害による劣化の進行過程と各過程における現象を表 4.2.2 に示す．

表 4.2.2　スケーリングの進行過程

外部の環境	説明図	コンクリートの状態
		空隙の状況
水の供給		空隙が充水
冷却		膨張 水の移動
凍結		飽和状態 膨張 ひび割れ
凍結・融解 の繰り返し		水の浸透 ひび割れ進展 スケーリング

※参考文献[1)] を元に抜粋編集したものである.

(2) 凍害の劣化過程

凍害は，セメント硬化体中の水分が凍結と融解を繰り返し，主に凍結時の膨張圧と水分の浸入が要因となり，部材表面のスケーリングや微細ひび割れ，ポップアウト等が生じる現象である．凍害を受けた構造物では，コンクリート表面に微細ひび割れ，スケーリング，ポップアウト等の形で顕在化するのが一般的である．

また，凍害による劣化の程度は，コンクリートの配合（単位水量，水セメント比，空気量等）や骨材の品質（吸水率等）等のコンクリートに関する要因，部材の断面形状やかぶり等の構造体に関する要因，および水の供給程度，日射の影響，外気温（最低気温），凍結融解回数等の構造物が置かれる環境に関する要因等によって決定される．さらに，凍結防止剤の散布や海水飛沫により，コンクリート中に塩化物イオンが供給される場合等には，凍害によるスケーリングが促進されることが知られている．

凍害による劣化過程の定義を**表 4.2.3** に示す．凍害による劣化は，塩害や中性化のように塩化物イオンや二酸化炭素の作用により鋼材の腐食が開始されるまでの潜伏期を経て劣化が開始する劣化形態とは異なり，コンクリート表面から劣化が進行するため，一般には潜伏期は短いと考えられている．

表 4.2.3　凍害の各劣化過程の定義 [2)]

劣化過程	定　　義
潜伏期	凍結融解作用を受けスケーリング，微細ひび割れ，ポップアウトが発生するまでの期間
進展期	スケーリング，微細ひび割れ，ポップアウトが発生し，骨材が露出するまでの期間
加速期	スケーリング，微細ひび割れ，ポップアウトが進展し，骨材の露出や剥落が発生する期間
劣化期	かぶりコンクリートが剥離し，鋼材の露出や腐食が発生する期間

(3) 複合劣化

凍害とともに，凍害以外の劣化因子の作用が懸念される場合には，複合劣化の可能性が考えられる．複合劣化とは，複数の劣化が複合して生じる劣化であり，実在する構造物においては複合劣化を受けている場合が多い．

同時に複数の劣化が生じる場合や，一つの劣化が先行して生じた後に時間をおいて他の劣化が生じる場合等が想定される．

さらに，劣化の進行速度についても，単独劣化と同じ劣化速度で進行する複合劣化もあれば，単独劣化よりも早い速度で進行する複合劣化もある．

「北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案)[1)]」では，凍害を中心とした複合劣化の相関関係が**図 4.2.2** のように記載されている．

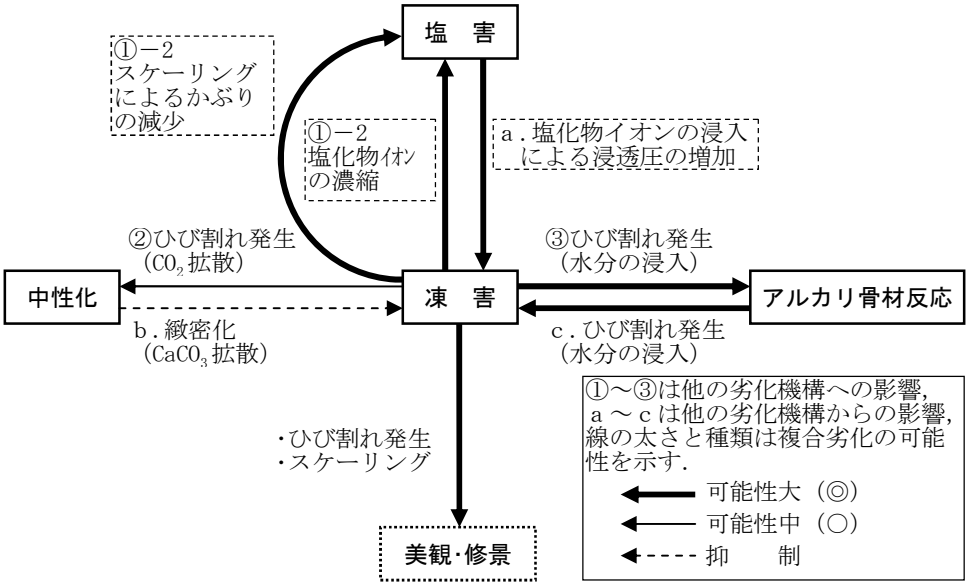


図 4.2.2　複合劣化の相関図 [1)]

また，上記の中には記述されていないが，乾湿繰り返しが耐凍害性に与える影響について各種の研究がされており，その一例を以下に紹介する．

a）千歩修，濱田英介，友澤史紀：乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2003

b）青野義道，松下文明，柴田純夫，濱幸雄：乾燥および乾湿繰返しによる降下セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2008

(4) コンクリート構造物の構造性能

凍害では，ひび割れやスケーリングによる断面欠損，これらに起因するコンクリートの強度低下が構造物の構造性能に与える影響として考えられる．現状は，凍害による劣化の程度によっては鋼材腐食が発生する場合も想定されるため，スケーリング深さやひび割れの発生状況を指標として構造物の性能低下を予測する方法がとられている．

構造物の構造性能を精度良く評価するには，凍害によるコンクリートの劣化とそれに伴う鋼材との付着力の低下，鉄筋腐食の程度から性能低下の影響を定量的に評価する手法が必要となる．しかしながら，現状の技術レベルでは，スケーリング深さやひび割れの発生状況から性能低下を予測することは難しい場合が多く，現実的には構造物の外観上のグレードに対応した評価を行い，対策の要否を判定する方法がとられている．

1）コンクリートの劣化が初期の段階

劣化した部分がコンクリート表面だけで鉄筋位置まで達していない段階で，コンクリートそのものが剥がれ落ちて断面欠損となっている場合や微細なひび割れによって弾性係数が低下している場合が考えられる．概念図を**図 4.2.3** に示す．

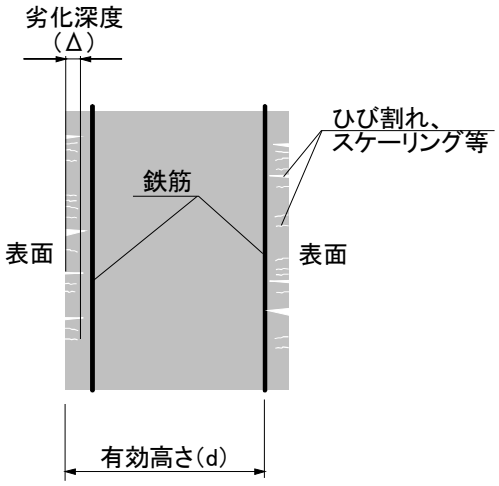


図 4.2.3　コンクリート表面の劣化の概念図

鉄筋コンクリート構造では，有効高さ（d）として劣化深度（Δ）を差し引いて d－Δ と考えるという簡易的な評価方法もある．また，有限要素解析等によって，コンクリート表面近傍の圧縮強度や弾性係数を，超音波試験等の結果を用いて相対的な比率だけ低下させて評価するという方法もある．ただし，BOX 構造等で，コンクリート表面の劣化が片面だけで有効高さに影響を与えない場合には実質的な構造性能は変化しないものと考えられる．

2）コンクリートの劣化が鉄筋まで進行した段階

鉄筋の発錆，腐食により性能を十分に発揮していない場合は，コンクリート断面の欠損に加えて鉄筋量および鉄筋とコンクリートの付着の低減を考慮して評価する必要がある．

橋梁構造では，軸力部材，水平部材，地覆，壁高欄等の部位の中でも上記劣化現象が構造性能に最も大きく影響を及ぼす部位として，コンクリート床版やコンクリート梁が挙げられる．凍害による劣化が構造性能に与える影響の具体的な検討事例として，凍害深さや位置を変数とした RC はりの載荷実験がある．これによると，凍害による劣化領域の位置や範囲（深さ）の違いがはり部材の耐力や変形性状，破壊形式に大きな影響を及ぼすことが明らかとなっている．[3] その詳細については，**第 4 章**の **4.5 節**に記載する．

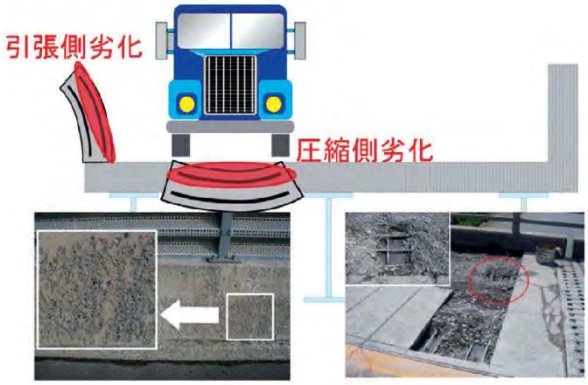


図 4.2.4　壁高欄および道路橋床版の凍害による劣化状況 [3)]

凍害によって劣化した鉄筋コンクリート床版は，コンクリート内部に侵入した水分の凍結融解の繰り返し作用により，床版表面にスケーリングが発生した後に砂利化へと進展し，最終的に押し抜きせん断破壊によって床版が陥落するといった事例も報告されている [4)]．また，床版の上面が凍害で 1cm 程度劣化するだけで，床版の疲労破壊が数十倍の速さで進行することが実験的に示されている [5)]．

したがって，橋梁の中でも輪荷重を常に受け持つ床版や桁については，凍害によるコンクリートの劣化は構造性能に大きな影響を及ぼす可能性がある．

4.3　凍害による劣化現象の事例

(1) 実構造物における凍害による劣化事例の収集

凍害により劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価を行うにあたり，先ずは実際の構造物に生じている凍害による劣化現象の事例を収集することとした.

劣化事例の収集は供用中の実構造物を対象として，表 4.3.1 に示すフォーマットにより事例を収集整理した.

表 4.3.1　事例収集のフォーマット

No.	構造物名	○×橋	構 造 物:	道路橋
収集方法:	橋梁補修設計業務における現地調査時に撮影		提供者:	□△
路 線 名:	一般国道***号	架橋位置 ○○郡□□町	管 理 者:	○×開建
対象部位:	上部工　地覆		供用年次:	昭和45年
特記事項:	路面水による塩害を誘発主因とする複合劣化			
損傷写真:	撮影: H23.10	損傷進行の経時変化が分かる過去写真があれば添付。 撮影:		

(2) 道路橋における凍害を受けやすい部位

実構造物における代表例として，道路橋のコンクリート部材における凍害を受けやすい部位と凍害発生の主な要因について，既往の文献[6)]を参考として整理したものを**表 4.3.2** に示す.

道路橋においては，凍結融解回数が他の部位と比較して多い箇所や，雨掛かりや桁端部からの漏水や排水の流末処理不良等により水分供給のある箇所が，凍害を受けやすいことが分かる.

また，収集した凍害による劣化事例写真を道路橋の部位毎にまとめたものを**図 4.3.1～図 4.3.8** に示す.

表 4.3.2　道路橋における凍害を受けやすい部位

凍害を受けやすい部位			凍害発生の主な要因	事例写真の図番号
上部工	橋面工	地覆・縁石	・日射や風を直接受ける部位であり，凍結融解回数が多い ・温度変化を受けやすい部材形状（部材断面が小，隅角部） ・凍結防止剤の影響を直接受ける部位	図 4.3.1
		地覆支柱部	・防護柵支柱内や支柱後埋め部への滞水と凍結膨張	
	橋体工	張出床版端部	・日射や風を直接受ける部位であり，凍結融解回数が多い	図 4.3.2
		床版上面	・舗装下の RC 床版上は排水勾配が不足し滞水しやすい ・凍結防止剤からの漏水の影響を受ける部位	図 4.3.3
		桁下面，端部	・桁下は結露水の凍結 ・温度変化を受けやすい耳桁隅角部 ・遊間からの漏水の影響を受ける部位	図 4.3.4
下部工	橋台・橋脚	沓座隅角部 躯体側面隅角部	・上部工幅員の外側に面した部位は雨掛りによる水分供給 ・上部工幅員の外側に面した部位は日射を受け，凍結融解回数が多い	図 4.3.5 図 4.3.6
		沓座漏水部 躯体側面漏水部	・桁掛違い部伸縮装置の排水機能不良や排水管の損傷など，漏水による水分供給	図 4.3.7
		躯体側面水際部	・河川水等の界面付近の水分供給と凍結融解	
	支承アンカー部		・支承アンカーボルト箱抜内への滞水と凍結膨張	図 4.3.8

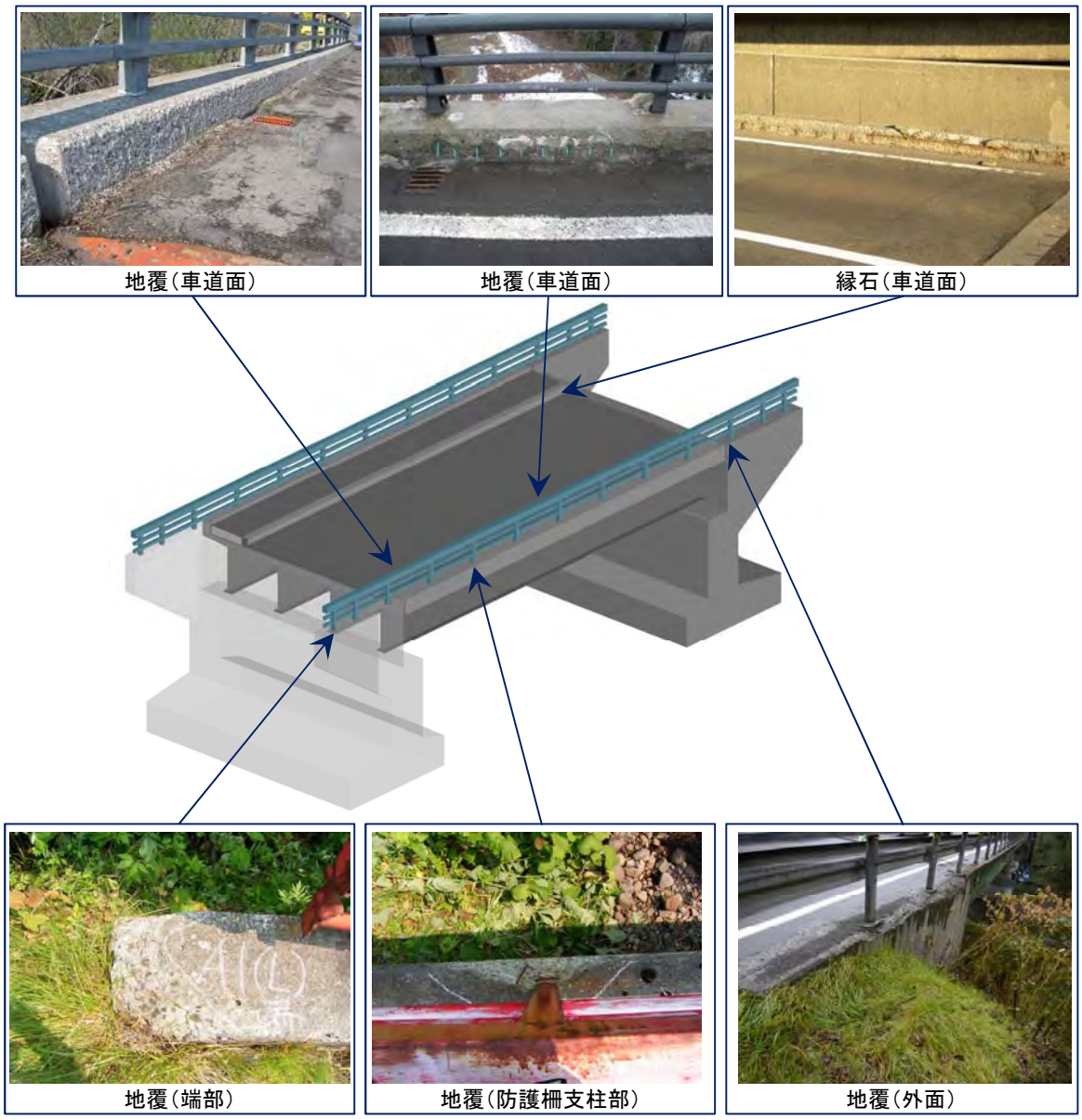


図 4.3.1　道路橋の凍害による劣化事例(1/8)　橋面工

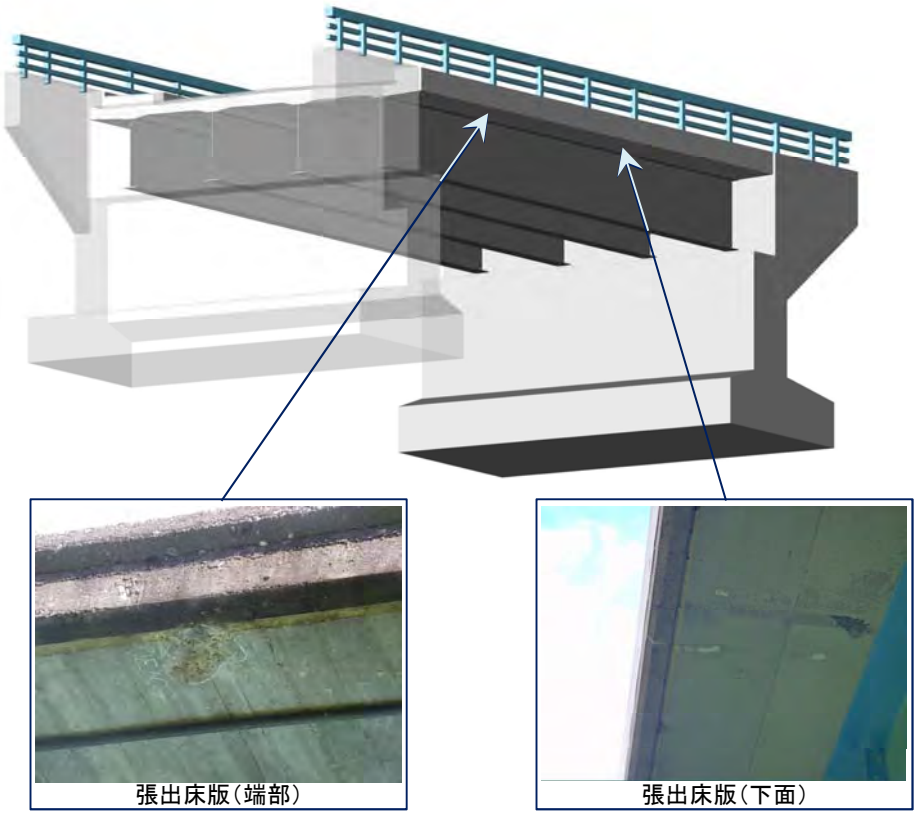


図 4.3.2　道路橋の凍害による劣化事例(2/8)　橋体工[鋼橋床版①]

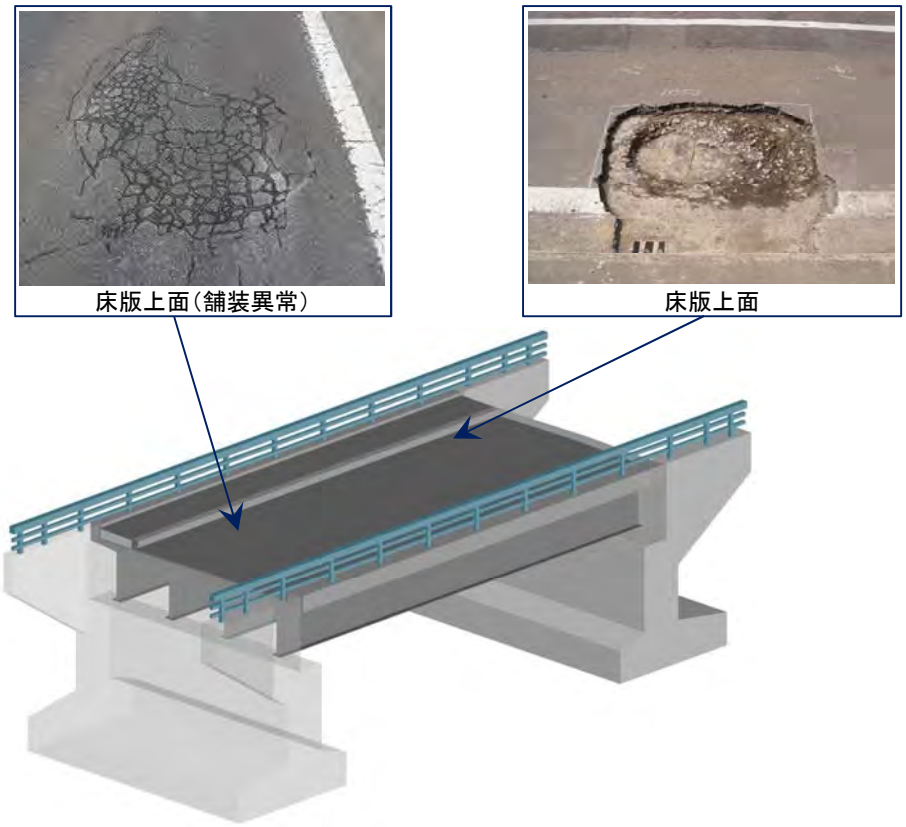


図 4.3.3　道路橋の凍害による劣化事例(3/8)　　橋体工[鋼橋床版②]

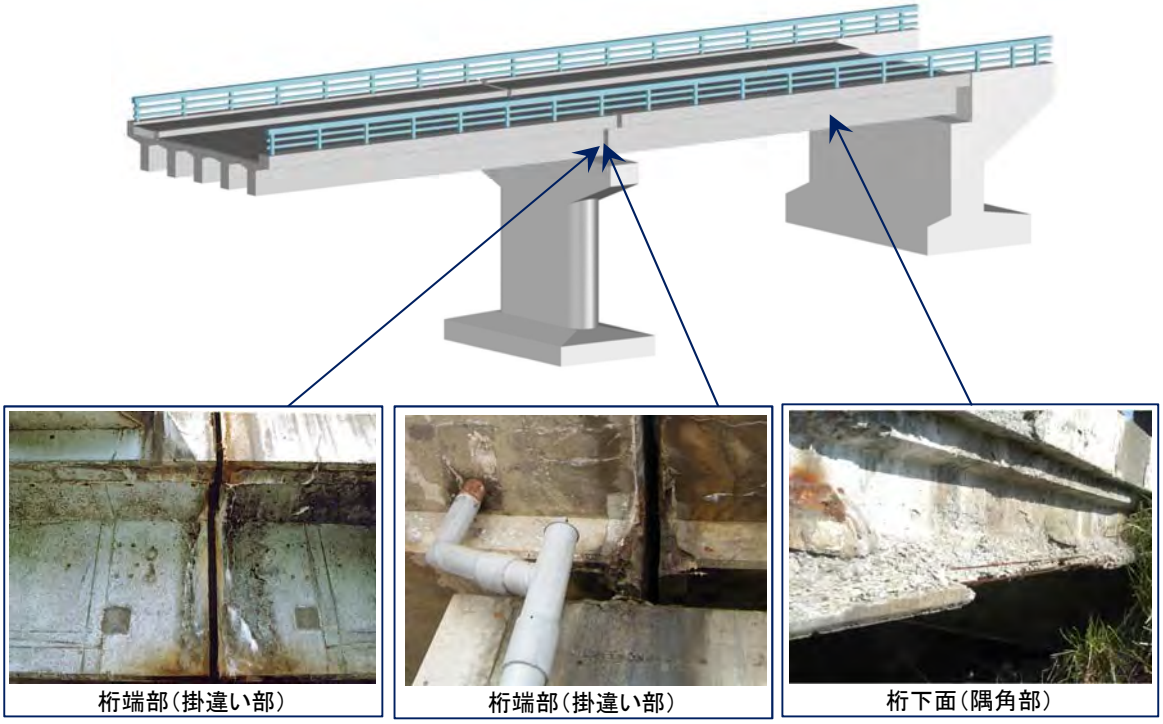


図 4.3.4　道路橋の凍害による劣化事例(4/8)　橋体工[コンクリート橋主桁]

図 4.3.5　道路橋の凍害による劣化事例(5/8)　橋台

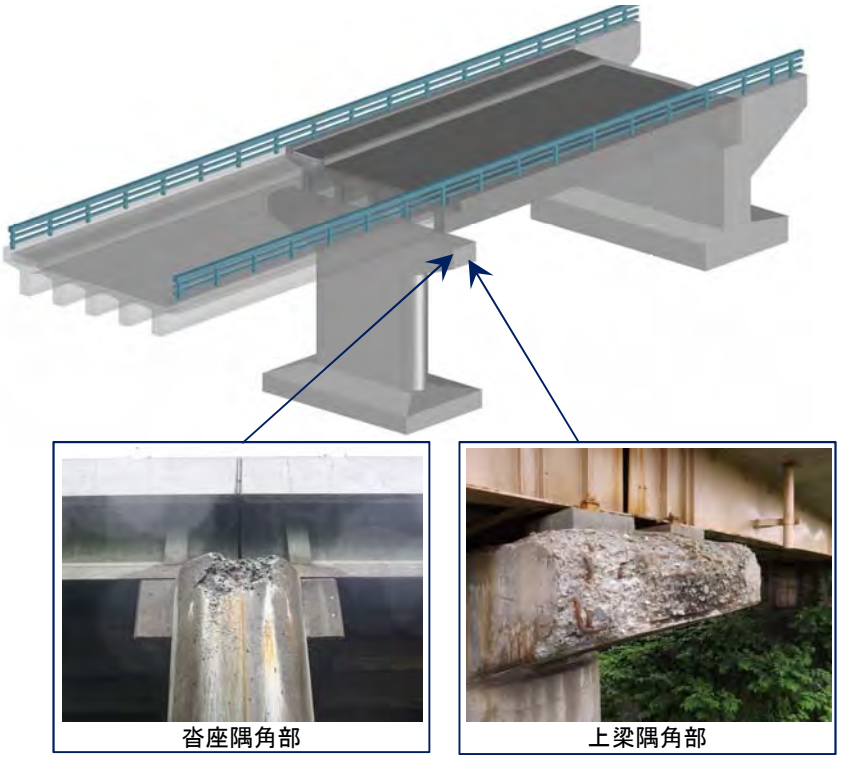


図 4.3.6　道路橋の凍害による劣化事例(6/8)　橋脚①

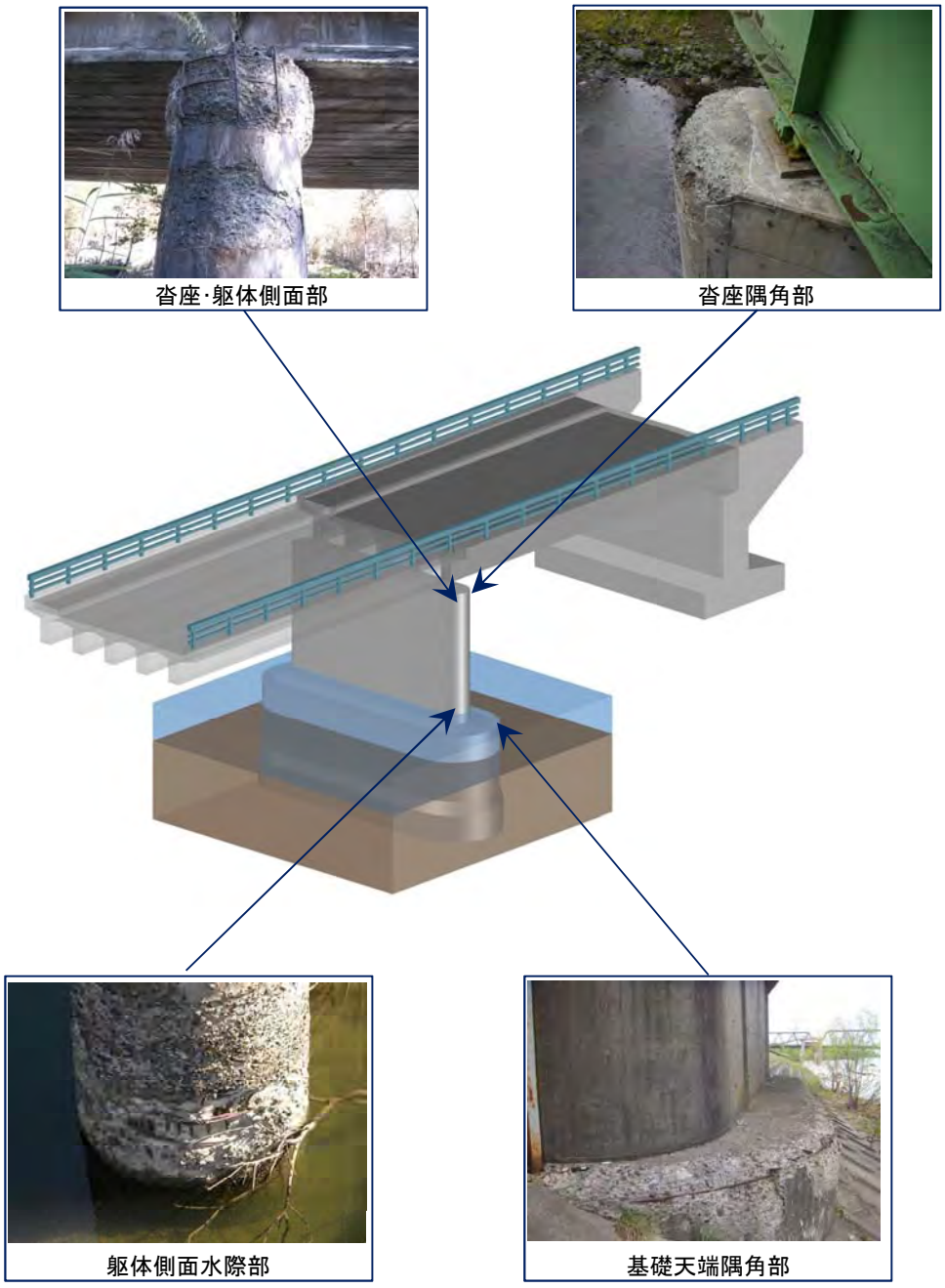


図 4.3.7　道路橋の凍害による劣化事例(7/8)　橋脚②

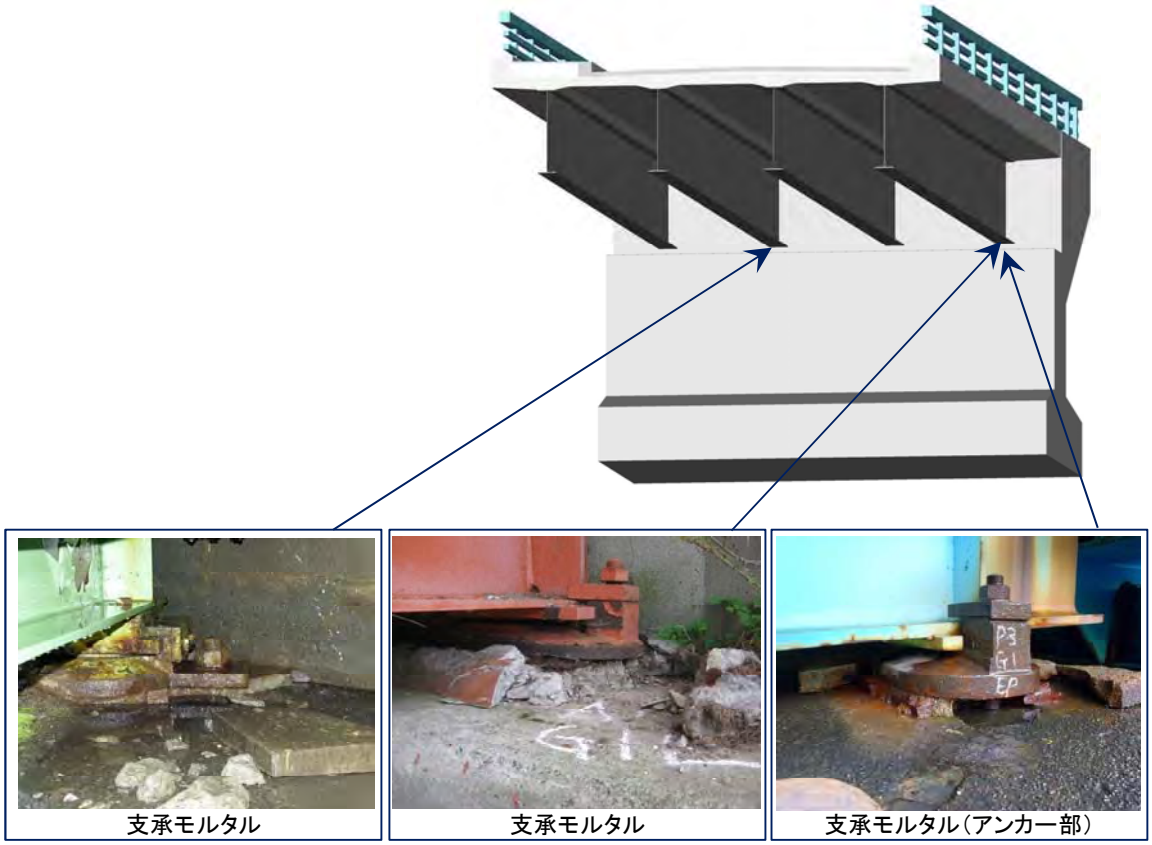


図 4.3.8　道路橋の凍害による劣化事例(8/8)　支承モルタル

4.4　点検における調査の現状

コンクリート構造物の維持管理は，構造物の供用期間を通じて構造物が保有するべき性能（構造性能）を，所要の水準以上に保持するために点検や劣化予測を行い，その結果を評価・判定し，対策を講じる一連の行為とされている．その中で，点検は構造物の変状やその可能性を早期に発見し，構造物の性能を的確に把握するために実施する行為であり，維持管理において極めて重要な行為である．

前項までに示したとおり，凍害による劣化は凍結融解作用の繰り返しが多いコンクリート部材表面から劣化が進行していく，積雪寒冷地特有の環境作用に起因した変状である．このことから，凍害で劣化したコンクリート構造物を点検する上では，コンクリート構造物の劣化した領域または部位を把握することは勿論のこと，劣化した範囲（深さ）も把握することが重要となる．また，劣化領域と範囲（深さ）を把握することは，劣化したコンクリート構造物の構造性能を評価するために必要不可欠であり，特に意識する必要がある．

以上のことを踏まえて，本節では凍害で劣化したコンクリート構造物の点検における調査の現状について整理した．

(1) 点検における調査の現状

点検は，一般に標準調査と詳細調査の 2 つに大別される．標準調査は，構造物を管理する上で一定の頻度で行われる日常点検や定期点検等の総称とされており，調査方法はスケーリング，微細ひび割れ，ポップアウト等のコンクリート表面の変状や水の供給状況等，外観上の変化の確認等を基本としている．一方，詳細調査は，標準調査では構造物の評価および判定が困難な場合や劣化予測が必要な場合に，構造物のより詳細な情報を得るために行われる調査とされており，調査方法にはコンクリートコアの採取や非破壊検査，はつり法等が挙げられる．なお，詳細調査における項目，方法および箇所は，調査の目的，得られる結果の精度等を考慮して適切に選定しなければならないとされている[7)]．

表 4.4.1 には，凍害に着目した詳細調査の項目とその結果から得られる情報の一例を示している．本表は，凍害で劣化した構造物で調査すべき項目と，その結果から判断される点検時および将来の構造物の状態について得られる情報についてまとめたものである．ここでは，本表をもとに，現状における凍害で劣化した領域や範囲（深さ）を把握するための調査項目とその内容について整理した．

現在，実務において一般に行われている凍害で劣化した構造物の詳細調査には，1）目視およびたたき調査，2）スケーリング深さの計測，3）コンクリート強度特性，4）蛍光エポキシ樹脂含浸法，5）超音波法等が挙げられる．以下に，これら詳細調査手法の概要について整理する．

表 4.4.1　詳細調査の目的，項目と得られる情報の例[8)]

調査目的	調査項目	得られる情報
凍害の程度の確認	スケーリング（剥離度）	美観，断面減少量
	微細ひび割れ（相対動弾性係数）	美観，幅・深さ・密度，凍害の進展範囲
	ポップアウト	美観，骨材の品質
	コンクリート強度，弾性係数	コンクリート強度，部材の剛性，耐力
	鋼材の位置（かぶり）と腐食状況	腐食量（劣化グレード），耐力
	たわみ，変形	部材の剛性
凍害の進行の予測	空隙構造（空気量，気泡間隔係数）	コンクリート品質，凍害進行速度
	温度，日射，水の供給	温度，湿度，含水率，凍害進行速度
	凍結防止剤	凍結防止剤の散布量，凍害進行速度

1）目視およびたたき調査

詳細調査における目視は，変状等を直接目で見て行うことを基本とし，必要に応じてハンマーによる打音法を併用し，変状の原因の推定，変状の予測，評価・判定に資することを目的として実施する調査とされている．本調査により劣化程度を把握する方法としては，打音法による変状領域の特定（**写真 4.4.1**），クラックスケールによるひび割れ幅の測定，メジャーによるひび割れ延長やスケーリング面積等の測定，ひび割れ解析ソフトを利用したデジタルカメラによる測定（**写真 4.4.2**）等が挙げられる．また，スケーリングについては，**写真 4.4.3** に示す ASTM-C-672 に準じた目視評価基準[9)]により判定している．

写真 4.4.1　打音法によるたたき調査状況

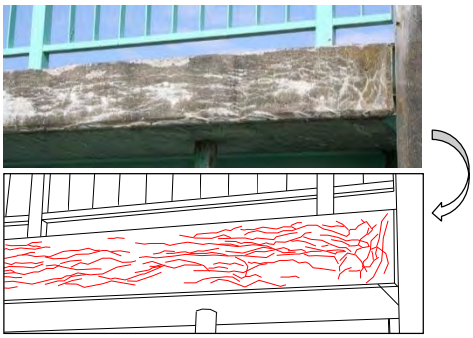
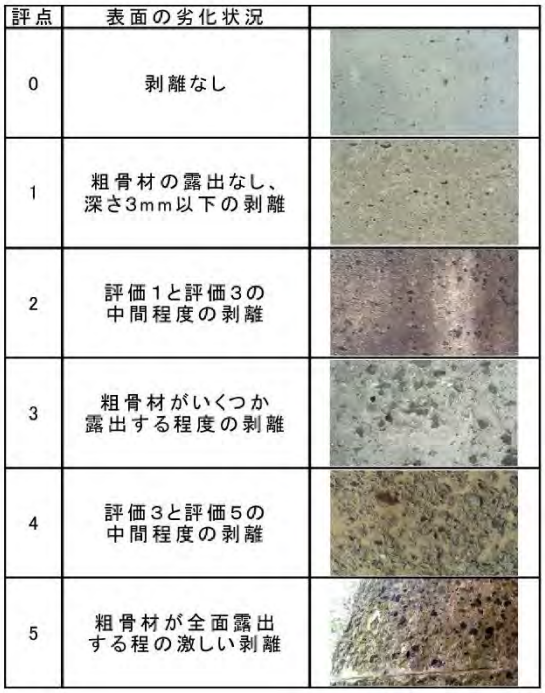


写真 4.4.2　ひび割れ解析ソフトによる図化



評点	表面の劣化状況	
0	剥離なし	
1	粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離	
2	評価1と評価3の中間程度の剥離	
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離	
4	評価3と評価5の中間程度の剥離	
5	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離	

写真 4.4.3　ASTM-C-672 に準じた目視評価基準

2）スケーリング深さの計測

凍害による劣化範囲（深さ）には，スケーリング深さと微細ひび割れ深さがあり，詳細調査ではこれらを定量的に測定する必要がある．ここでは，スケーリング深さの計測について整理するものとし，微細ひび割れの深さ測定については蛍光エポキシ樹脂含浸法や超音波法等を適用されることが多く，これらについては次項にて整理している．

スケーリング深さは，**写真 4.4.4** に示すように，一般的にはコンクリート構造物表面で鋼尺やノギス等を使用して表面からの剥離深さを測定し，その最大値と最小値を求めて定量化している．また，最近ではスケーリング範囲が広い実構造物においては測定が困難であるため，スケーリング量を剥離度[10)]で表すことを標準としている．**図 4.4.1** に，剥離度の測定要領を示す．測定方法は，**写真 4.4.5** に示すようにコンクリート表面に設置した枠内において，スケーリングが発生している範囲の面積および剥離深さを測定する．算出する剥離度（D_m）は（式 4.4.1）より求められ，式中の剥離深さ（D）は枠内で測定した 10 点の平均値としている．なお，全面的にスケーリングが生じている場合は剥離深さが剥離度となる．

写真 4.4.4　スケーリング深さ測定状況

写真 4.4.5　剥離度算出のための剥離深さ測定状況

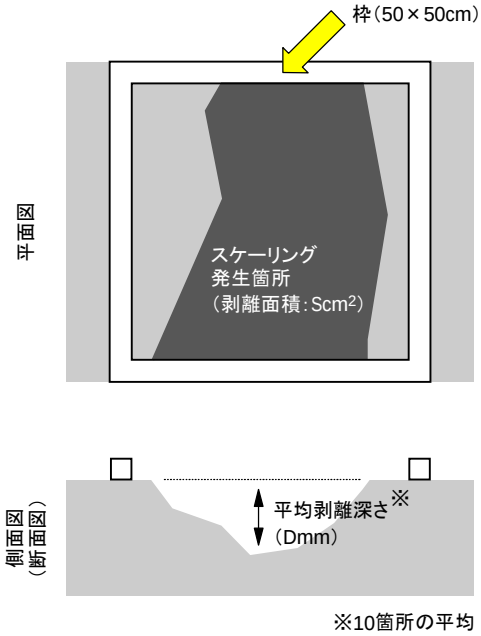


図 4.4.1　剥離度の測定要領

$$D_m = D \times A_s = D \times \frac{S}{50 \times 50} \qquad \text{（式 4.4.1）}$$

ここに，D_m：剥離度(mm)　　D：剥離深さ(mm)

A_s：枠内におけるスケーリング面積の割合

S：枠内におけるスケーリング面積(cm^2)

上記に加えて，最近ではスケーリング深さを定量的に把握する方法に，3D スキャナーを用いる方法[11]やデジタルカメラ写真と 3 次元画像処理ソフトを用いる方法[12]も適用されている．前者の 3D スキャナーを用いる方法では，現場において機器の据え付けが生じ，計測時間が長い等の特徴を有している．一方，後者の 3 次元画像処理ソフトを用いる方法では，画像処理ソフトの準備は必要となるが，現場で使用する機器はデジタルカメラのみであり，簡易的な調査方法の一つとされている．なお本手法は，デジタルカメラでスケーリング面の画像を撮影し，画像処理ソフトを利用して撮影した画像を 3 次元データに変換し，それを解析することでスケーリング深さを求めるものである（**図 4.4.2**）．

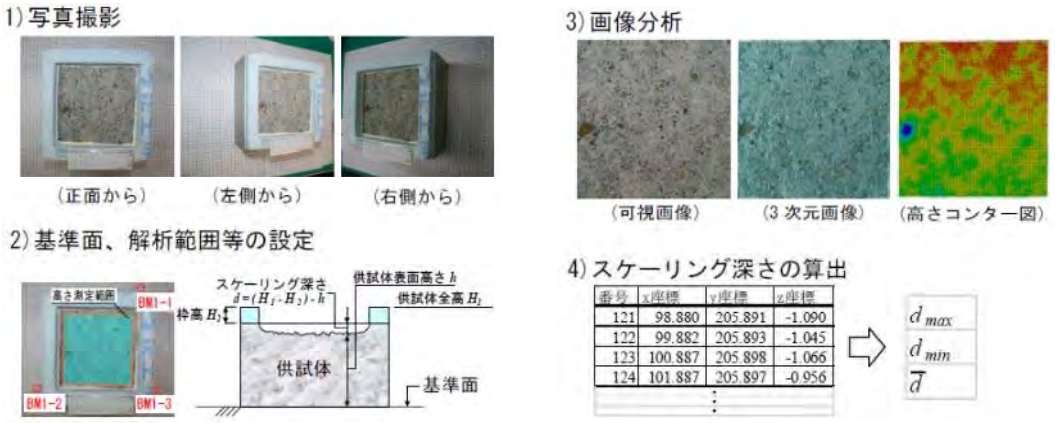


図 4.4.2　3 次元画像処理ソフトによるスケーリング深さの算出方法

3）コンクリート強度特性

凍害で劣化したコンクリート構造物の場合，健全なコンクリート構造物より採取した同一圧縮強度を有するコアの静弾性係数に比べて，著しく低い値を示すという特徴がある[13]．このため，凍害によるコンクリートの劣化程度を材料物性値の把握から判断するために，コンクリートコア採取による圧縮強度および静弾性係数試験が実施されている．ここで，圧縮強度試験については JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」，静弾性係数試験については JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して行われている．

一方，コンクリートコアを採取して試験を行う方法は，構造物に局部的な損傷を与えることから多用することは好ましくないとされており，コンクリート表層の反発度を測定した結果からコンクリート強度を推定する非破壊による反発硬度法が広く用いられている．本手法は，コンクリート強度や表層部の劣化領域，品質を推定する場合に選定され，JSCE-G 504-1999「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準拠して行われている．なお，実構造物におけるコンクリート表層部の反発度は，コンクリートの強度や含水状態等の影響を受けるため，コア採取による圧縮強度試験と併用するのがよいとされている[13]．

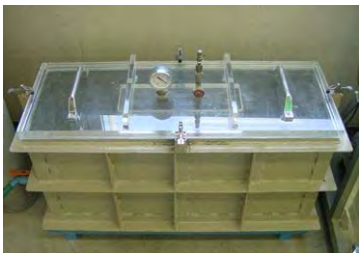
4）蛍光エポキシ樹脂含浸法

凍害による劣化範囲（深さ）の把握として，肉眼で観察可能なコンクリート表面のひび割れのみならず，コンクリート内部の組織の弛緩による微細ひび割れを含めた劣化深さを把握する必要がある．この微細ひび割れを含む劣化深さを把握する方法として，コンクリートコアを用いた蛍光エポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察[14)]が実施されている．

写真 4.4.6 には蛍光エポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察の要領を，**写真 4.4.7** には凍害で劣化したコンクリートの微細ひび割れ観察事例を示している．

本手法は，採取したコア試料に，蛍光染料を添加した超低粘度形注入用エポキシ樹脂を 1/100 気圧の低真空状態で注入および硬化させた後，コアを深さ方向に 2 分割に切断し，切断面に紫外線を照射して肉眼観察するとともに可視画像として写真撮影するものであり，微細ひび割れとして 12μm までのひび割れ幅が観察できる．また，本手法は劣化原因の推定にも有効であることが報告されている[15)]．なお，本手法以外に，コンクリートコアを採取できないような部位に有効な微破壊調査手法として，42μm までのひび割れ幅が観察可能な棒形スキャナによる方法[16)]も適用されている．

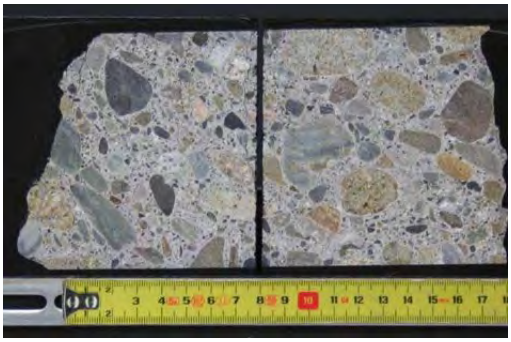
【蛍光染料・エポキシ樹脂】



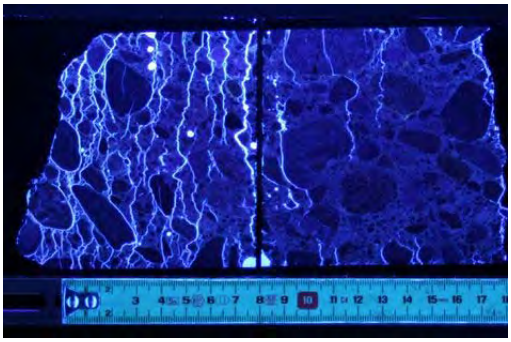
【真空脱泡装置】

【紫外線照射による観察】

写真 4.4.6　蛍光エポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察要領



【可視光】



【紫外線照射】

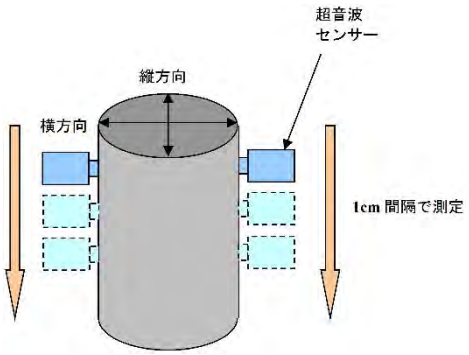
写真 4.4.7　凍害で劣化したコンクリートの微細ひび割れ観察事例

5）超音波法

凍害による劣化範囲（深さ）の把握手法の一つとして，上記の蛍光エポキシ樹脂含浸法のほかに超音波法が実施されている．一般的な超音波法として，実構造物ではコンクリートコアを採取して，**図 4.4.3** に示すように超音波伝播速度を深さごとに測定し，その値から相対動弾性係数を求める透過法を標準としている[8]．なお，各々の深さにおける相対動弾性係数は（式 4.4.2）により求められる[17]．

ここで，超音波伝播速度はひび割れ等の損傷が大きいほど伝播速度が遅くなる傾向にあり，超音波法はこの原理を応用してコンクリート表面から深さ方向に超音波伝播速度の分布を測定している．なお，通常のコンクリート中の超音波伝播速度は文献[例えば18]によって異なり，3,500～4,000m/sec 程度とされている文献[19]もあるが，一般的には超音波伝播速度 4,000m/sec 以上で健全と評価されている．**図 4.4.4** には，透過法によって超音波伝播速度を深さ方向に測定した結果の一例を示している．

また，最近では，**図 4.4.5** に示す超音波トモグラフィー法を活用して，劣化が発生している範囲を非破壊により広角的に把握する試みもなされている[20]．



【測定要領】

【測定状況】

図 4.4.3　透過法による超音波伝播速度の測定

$$\begin{cases} E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \\ RE_d = \dfrac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \end{cases} \qquad \text{（式 4.4.2）}$$

ここに，E_d：動弾性係数(GPa)（適用対象は7.0～41.5GPa）

V：超音波伝播速度(km/sec)

RE_d：相対動弾性係数(%)

E_{dn}：各深さにおける動弾性係数(GPa)

E_{d0}：部材供用前の動弾性係数(GPa)（なければ，健全とみなせる箇所の動弾性係数．一般にコアの最深部の値が使われることが多い）

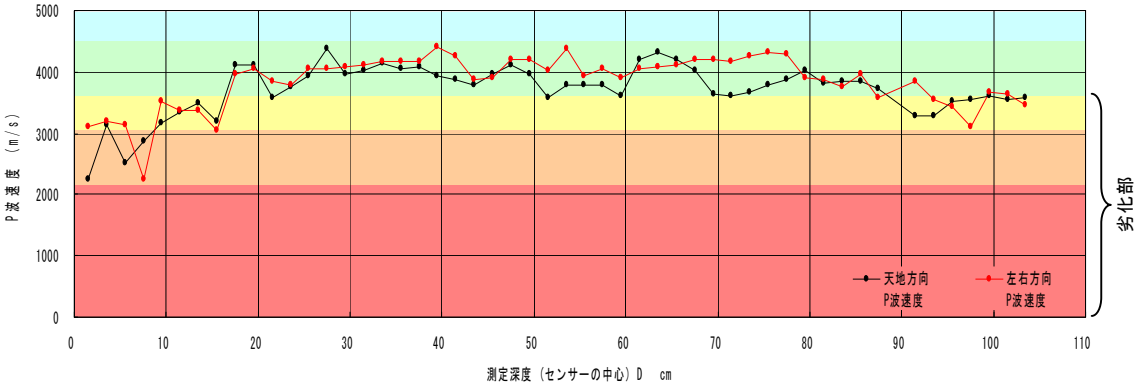


図 4.4.4　透過法による超音波伝播速度の測定結果の一例

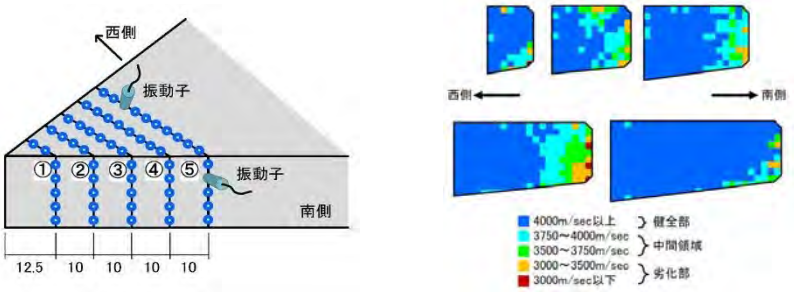


図 4.4.5　超音波トモグラフィー法による診断の一例（河川樋門）

(2) 現状の調査の課題

1) 目視およびたたき調査は，外観における表面的な劣化の範囲を簡易に把握することが可能であるが，劣化の程度も含め，調査員による個人差が生じてしまう．

2) のスケーリング深さの計測は，外観における表面的な劣化の領域や深さ（断面減少量）を簡易かつ定量的に把握することが可能であるが，真の劣化深さ，すなわち組織が緩で微細ひび割れを生じている範囲は把握できない．

3) ～5) の調査は基本的にコアを採取して調査するため，局所的な情報であることに留意しなければならない．

(3) 構造性能評価のための調査の課題

実構造物（道路橋）における凍害劣化事例の収集結果からも，凍結融解回数が他の部位と比べて多い箇所，日射や雨掛り・桁遊間からの漏水・排水流末処理不良等による水分供給条件がある箇所が，凍害を受けやすい事が分かり，劣化の範囲や深さの空間的分布は一様ではない．その空間的な情報を精度よく把握することが課題であり，劣化したコンクリート構造物の構造性能を評価するために重要である．

劣化の空間的な，ばらつきの情報を得るための一つの解決方法として，表面走査法があり，コンクリート表面近傍に存在する劣化層の厚さを超音波により非破壊で推定する方法である[21) 22)]．**図 4.4.6** に示すように，表面に超音波の発信子と受信子を配置し，受信子を一定の間隔で発信子から遠ざけていき，最短時間で受信子に到達する特徴より低品質層（A 層）の厚さを求めるものである[8)]．このとき，A 層の厚さ t は式 4.4.3 より求められる．

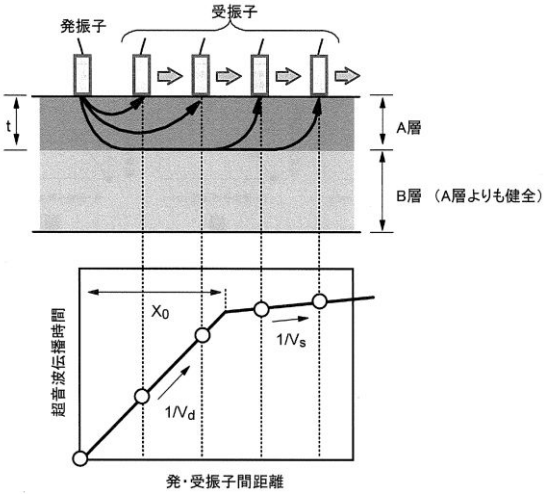


図 4.4.6　表面走査法の概念[8)]

$$t=\frac{X_0}{2}\sqrt{\frac{V_s-V_d}{V_s+V_d}} \qquad \text{（式 4.4.3）}$$

ここに，X_0：原点から直線の傾斜が変わる変曲点までの距離

V_d：A層の超音波伝播速度

V_s：B層縁端面の超音波伝播速度

（V_d，V_s はともにグラフの傾きの逆数）

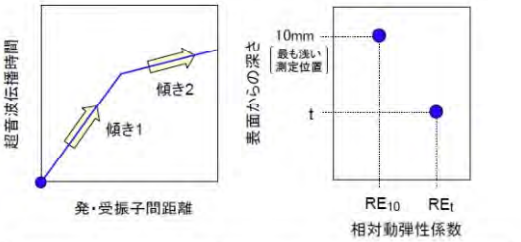
コンクリート表面の水分率の測定，超音波伝播速度の補正後，発・受信子間の距離と超音波伝播時間 Tr の関係をグラフ化し，原点通過を前提条件に 2 本の直線による折れ線回帰を行う．折れ線が出現した場合は t の算出を行う（**図 4.4.7**）．そして折れ線の傾きから**図 4.4.8** に示すように，相対動弾性係数の測定が可能な最も浅い深さ（A 層）および深さ t（B 層）の相対動弾性係数を（式 4.4.4）により求める．

$$RE_d = 21.7x^{-0.81} \qquad \text{（式 4.4.4）}$$

ここに，RE_d：相対動弾性係数（%）

x：グラフの傾き

一般に凍害の程度は表面が最も大きく，深くなるほど小さくなる傾向にある．そのため相対動弾性係数の真値は，**図 4.4.8** に示す塗りつぶした範囲にプロットされると予測される．表面走査法は真値が存在すると思われる範囲の推定が目的で，真値の特定が目的ではないことに注意が必要である [8]．よって劣化の空間的なばらつきの情報を定量的に把握することは可能であるが，精度が必要となる場合はコア採取を伴う調査を省略することはできない．



条件	整理する関係
tの算出不可 (折れ線なし)	傾き1とRE_{10} (品質は全体的に均質)
t>10mmの場合	傾き1とRE_{10}、傾き2とRE_t
t≦10mmの場合	傾き2とRE_{10}

図 4.4.7　直線の傾きと相対動弾性係数の整理の考え方 [22]

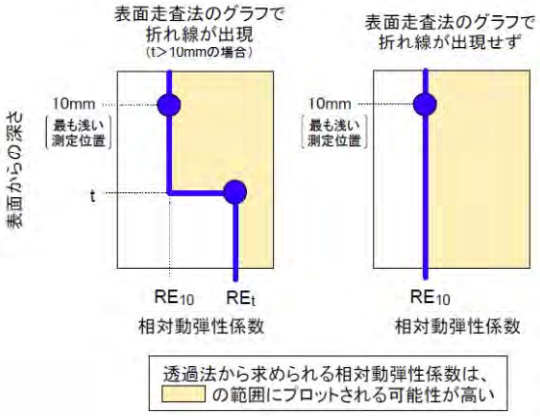


図 4.4.8　表面走査から推定される透過法から求められる相対動弾性係数の予測範囲 [22]

以上のことから，劣化の空間的なバラツキの情報を定量的に把握するため，表面走査法の実構造物への適用から，データの蓄積，適用性の検討が課題である．また，より精度良く把握するための，調査手法の検討も今後の課題である．

4.5　構造性能評価に関する検討事例

本節では，凍害で劣化したコンクリート部材の構造性能評価に着目した2つの検討事例について紹介する．

検討事例その1は，凍害による劣化を模擬したはり部材を対象として，圧縮領域のコンクリートの劣化が曲げ耐力や疲労寿命に及ぼす影響を把握することを目的として，土木学会コンクリート標準示方書［設計編］の耐力算定式に基づいて検討したものである．

検討事例その2は，凍害で劣化したRCはり部材の構造性能評価に対する非線形有限要素解析の適用性や適用限界を明らかにすることを目的として，汎用の有限要素解析プログラムを用いた解析を実施して，凍害で劣化した範囲（深さ）と位置を変数としたRCはり部材の載荷実験結果[23)]と比較する形で種々の検討を行ったものである．

(1) 凍害による劣化を模擬したはり部材を対象とした検討事例

1）検討概要

圧縮領域のコンクリートの特性値を低減させた，凍害による劣化を模擬した梁部材の解析を行い，部材の曲げ耐力と疲労寿命に着目して構造性能の低下の影響を検討した．

a）解析モデルの概要

図4.5.1に本検討で対象とした梁部材の形状寸法を示す．**表4.5.1**，**表4.5.2**には，それぞれコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を，**表4.5.3**には部材高，材料特性値および劣化範囲の組合せによる検討ケースを示している．

部材高はH=1.00m，0.50m，0.25mの3パターンである．コンクリートの圧縮強度$f'c$は30N/mm^{2}を標準値とし，劣化の影響はコンクリートの圧縮強度$f'c$とヤング係数Ecを低減させることで模擬している．鉄筋は引張鉄筋のみとし，引張鉄筋比ptは1.0%である．コンクリートの疲労寿命については，鉄筋の応力振幅を100～180N/mm^{2}の範囲として，それに対応するコンクリートの応力振幅として（式 4.5.1）より算出している．

なお，曲げ耐力，たわみ，疲労寿命については，土木学会コンクリート標準示方書［設計編］[24)] に準拠して算出している．

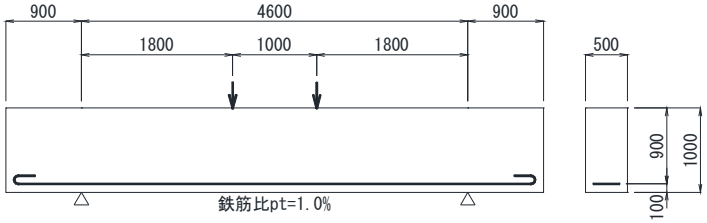
表 4.5.1 コンクリートの材料特性値

圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	粗骨材最大寸法 (mm)
30.0	28.0	25

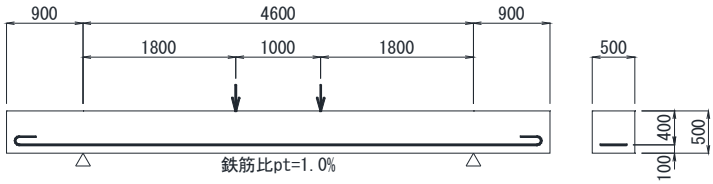
表 4.5.2 鉄筋の材料特性値

降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
345	200

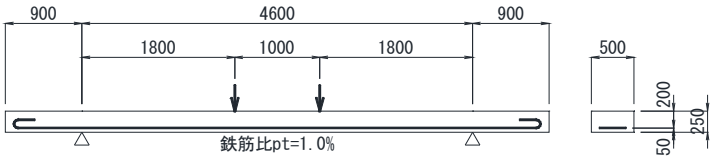
$$f_{rd} = k_{1f} f_d \left(1 - \sigma_p / f_d\right)\left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \qquad \text{（式 4.5.1）}$$



（a） case1：部材高 H=1.00mの梁部材



（b） case2：部材高 H=0.50mの梁部材



（c） case3：部材高 H=0.25mの梁部材

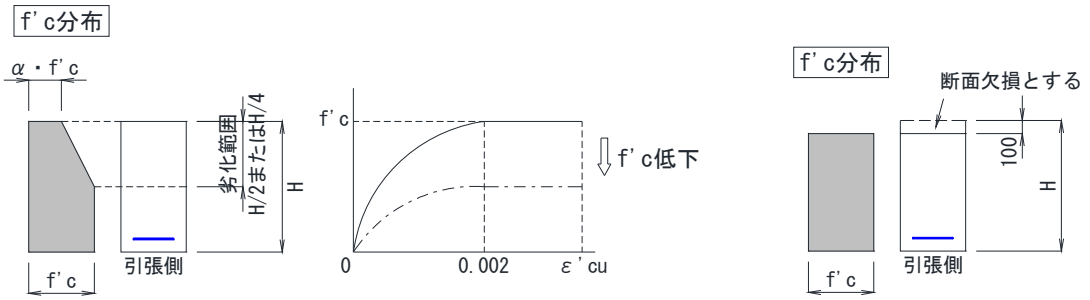
図 4.5.1　梁部材の形状寸法

表 4.5.3　検討ケース一覧

	部材高H	α （$f'c$の低下割合）	圧縮縁からの 劣化範囲	備考
case1-1	1.00m	1	なし	健全ケース
case1-2		2/3	*H/4*	劣化モデル1
case1-3			*H/2*	
case1-4		1/3	*H/4*	
case1-5			*H/2*	
case1-6		-	0.1m(断面欠損)	劣化モデル2
case2-1	0.50m	1	なし	健全ケース
case2-2		2/3	*H/4*	劣化モデル1
case2-3			*H/2*	
case2-4		1/3	*H/4*	
case2-5			*H/2*	
case2-6		-	0.1m(断面欠損)	劣化モデル2
case3-1	0.25m	1	なし	健全ケース
case3-2		2/3	*H/4*	劣化モデル1
case3-3			*H/2*	
case3-4		1/3	*H/4*	
case3-5			*H/2*	
case3-6		-	0.1m(断面欠損)	劣化モデル2

b）劣化モデル

図4.5.2には部材高方向のコンクリート特性値の低減方法を示している．圧縮縁での低減量は圧縮強度の標準値に対して2/3*f'c*，1/3*f'c*とした．凍害を受けたコンクリートの相対動弾性係数は，深さ方向におおむね線形に増加していくことが知られていることから[22)]，本解析では圧縮縁から部材高の*H/4*，*H/2*までの範囲を直線勾配で標準値まで変化させている．なお，低減した圧縮強度に対するヤング係数*Ec*は（式 4.5.2）により求めた．



（a）劣化モデル 1　　（b）劣化モデル 2

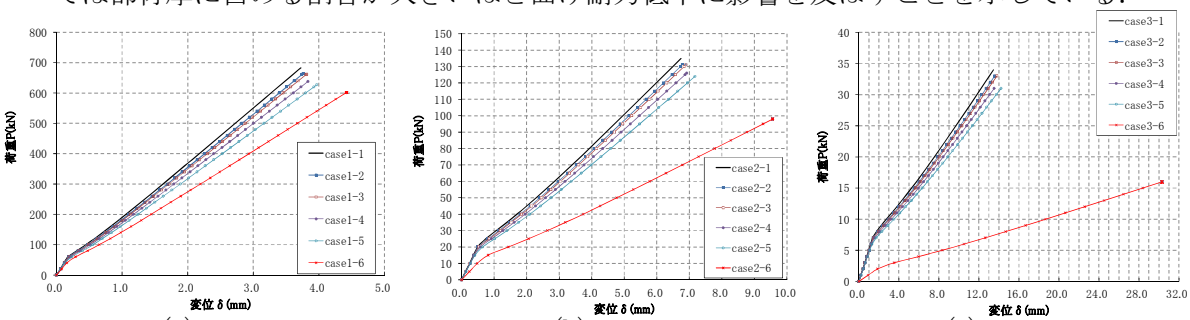
図4.5.2 *f'c*の分布と応力-ひずみ曲線

$$Ec = \left(2.2 + \frac{f'c - 18}{20}\right) \times 10^4 \qquad \text{（式 4.5.2）}$$

2）解析結果および考察

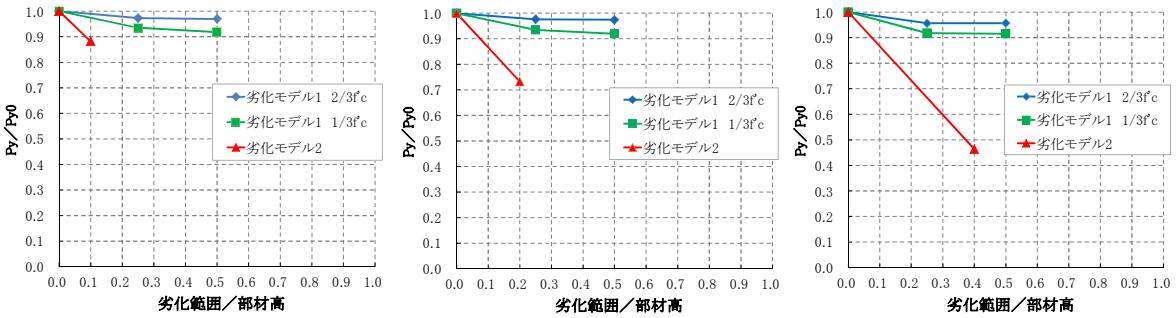
a）曲げ耐力

図4.5.3には載荷点位置における降伏までの荷重－変位関係を，**図4.5.4**には健全ケースと劣化モデルの降伏耐力比と劣化範囲の関係を示している．材料特性値の低下により劣化をモデル化した劣化モデル1では，曲げ耐力の低下は3～8%程度と影響は少ない．一方，断面欠損により劣化をモデル化した劣化モデル2では12%～53%と曲げ耐力低下の度合いが大きくなる．これは，コンクリートの圧縮強度やヤング係数が低下する程度の劣化では曲げ耐力にほとんど影響を及ぼさないが，砂利化などの圧縮応力を伝達できないほどの劣化では部材厚に占める割合が大きいほど曲げ耐力低下に影響を及ぼすことを示している．



（a） case1　　（b） case2　　（c） case3

図 4.5.3　載荷点における荷重－変位関係の比較



（a） case1　　（b） case2　　（c） case3

図 4.5.4　降伏耐力比－劣化範囲の関係

b）疲労寿命

図 4.5.5 には疲労寿命と劣化範囲の関係を示している．これより，疲労寿命は圧縮強度低下の影響を顕著に受けることがわかる．また，部材高が異なる場合でもコンクリートの圧縮強度の低減が同じであれば疲労寿命に相違がないこともわかる．

以上より，疲労寿命では圧縮強度と劣化範囲の部材高に占める割合が極めて重要であることが明らかとなり，コンクリート床版のような疲労が問題となるような部材では，特に注意する必要がある．

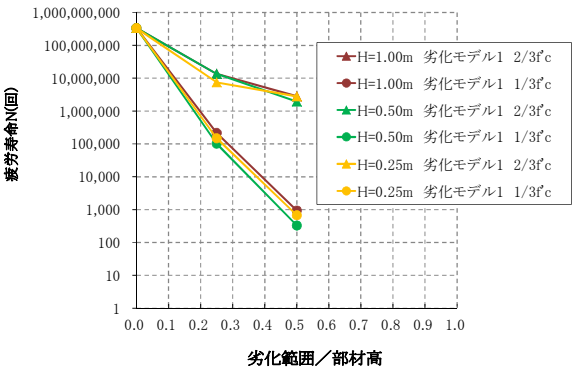


図 4.5.5　疲労寿命と劣化範囲の関係の比較

(2) 凍害で劣化した範囲と位置を変数とした RC はり部材の載荷実験を対象とした非線形有限要素解析による検討事例

1) 解析対象とした実験供試体の概要

供試体は，断面寸法が 200×200mm，スパン長が 1,200mm であり，主鉄筋に D13 を 2 本配置した曲げ破壊型 RC はり部材である（**図 4.5.6**）．凍害で劣化した範囲を圧縮側と引張側の 2 つに区分し，はり高 200mm に対して圧縮縁または引張縁から 50，100，150mm の 3 水準の劣化深さが設定されている．**表 4.5.4** に供試体の実験変数と実験結果を示す．

2) 有限要素解析の概要

a) 解析モデル

本解析では，汎用の 2 次元有限要素解析プログラム WCOMD が適用されている．**図 4.5.7** に有限要素モデルを示すが，凍結融解作用により供試体内の強度は一様には変化しないため，圧縮強度のばらつきを考慮するために，はりの全スパンがモデル化されている．適用した有限要素タイプは 9 つのガウス積分点を有する 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素であり，載荷荷重はスパン中央部を鉛直下方向に強制変位させる漸増載荷である．

b) コンクリートのひび割れと鉄筋のモデル化

コンクリートおよび鉄筋は，分散ひび割れおよび分散鉄筋モデルに基づく鉄筋コンクリート(RC)要素によってモデル化されている．よって，鉄筋の有無の違いは鉄筋との付着によってひび割れの分散が期待できる領域（RC ゾーン：**図 4.5.7** の水色の領域）と，ひび割れの分散が期待できない領域（無筋ゾーン：**図 4.5.7** の灰色の領域）として区分される．ここで，ひび割れモデルには，多方向非直交固定ひび割れモデル[25),26)]が採用されている．

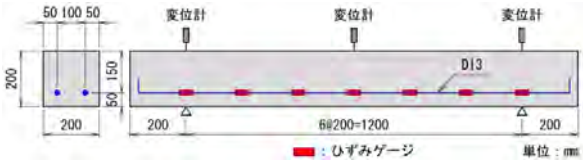


図 4.5.6　供試体の形状寸法および配筋状況

表 4.5.4　供試体名称，実験・解析結果等一覧

供試体概要			実験		解析		荷重比	
名称	劣化面	劣化深 (mm)	(a) P_y (kN)	(b) P_u (kN)	(c) P_y (kN)	(d) P_u (kN)	c/a	d/b
N	－	－	43.7	68.9	43.6	48.8	100%	71%
C5	圧縮側	50	44.4	68.1	41.9	44.3	94%	65%
C10	圧縮側	100	43.0	46.4	40.3	41.6	94%	90%
C15	圧縮側	150	-	32.6	36.6	38.3	-	117%
T10	引張側	100	49.7	68.9	43.2	48.0	87%	70%
T15	引張側	150	41.3	43.0	42.0	44.2	102%	103%

※P_yは降伏荷重，P_uは最大荷重

c）材料構成モデル

鉄筋コンクリートの材料構成則には，岡村・前川らによって開発された載荷経路依存性を考慮した非線形構成則が導入されており，コンクリートと鉄筋間の付着作用に伴う Tension Stiffening 効果やひび割れ面におけるせん断伝達モデル，ひび割れ直交方向における圧縮剛性低下の影響が考慮されている[26]．

なお，本解析プログラムでは Tension Stiffening 効果を考慮するために付着パラメータ C を与える必要があるが，本解析では全ての RC 要素において鉄筋が配置されている方向に対してはデフォルト値である C=0.4 が設定されている．鉄筋が配置されていない方向にはプログラム内部で自動計算される破壊エネルギーと要素寸法に対応した付着パラメータ C を設定している．

d）コンクリートおよび鉄筋の材料物性値

本検討では，凍害による劣化領域の材料物性値のばらつきを適切に考慮するため，コンクリートの圧縮強度を低下させることで材料物性値の空間的なばらつきを考慮する方法[27]が採用されている. 具体的な方法は, 劣化させた供試体の超音波伝播速度の測定を行い, 予め求めておいた超音波伝播速度と圧縮強度の関係から供試体各位置の圧縮強度を推定し，各位置の圧縮強度から要素毎に圧縮強度を設定するというものである．なお，本解析におけるコンクリートの引張強度と圧縮ピークひずみは，圧縮強度からプログラム内部で自動に設定する方法によっている．

よって，本解析では凍害で劣化したコンクリート特有の下に凸となる応力－ひずみ関係は考慮されておらず，圧縮強度の低下とそれに伴う弾性係数の低下によってのみ劣化を再現している．

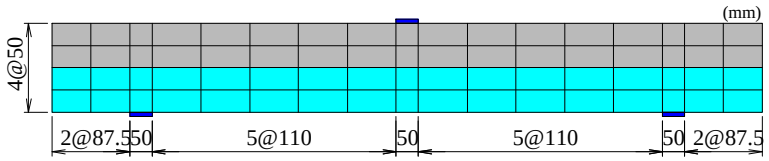


図 4.5.7 有限要素モデル（要素分割図）

3）解析結果および考察

①破壊形式に関する比較

解析では全ての供試体において載荷点近傍の要素が圧縮破壊することにより荷重が低下して終局に至っている．しかし，実験による破壊形式と比較すると，供試体 N，C5，T10 では実験の破壊形式と概ね一致しているが，供試体 C10，C15 では劣化域の腹部コンクリートが圧壊した斜め圧縮破壊，供試体 T15 では載荷点と支点を結ぶようなせん断ひび割れが大きく開口して破壊に至った斜め引張破壊であり，解析結果における破壊形式とは異なる結果が得られている．

②変形性能に関する比較

図 4.5.8 に示すように，降伏点に至るまでの剛性は供試体 N，C5，T10 では解析結果は実験結果と概ね一致しているが，供試体 C10，C15，T15 では解析結果の傾きが実験結果よりも大きくなっている．また，圧縮側を劣化させたシリーズの供試体 C5，C10，C15 の剛性差に着目すると，凍害深さが大きくなるほど両者の剛性差が大きくなることがわかる．

降伏点以降の挙動では，実験結果では降伏棚が見られる供試体 N，C5，T10 と，降伏棚が見られない供試体 C10，C15，T15 に大別される．解析結果では，降伏棚の有無という観点では供試体 N，T10 に関しては実験結果と解析結果は一致しているが，その他の供試体に関しては一致しておらず，この傾向は前述した部材降伏点までの剛性と同様である．なお，最大荷重時の変位に着目すると，全ての供試体において解析結果が実験結果より大幅に小さくなっている．

③耐荷性能に関する比較

図 4.5.8 に示すように，供試体 N の荷重－変位関係について実験と解析を比較すると，実験結果の部材降伏点以降の荷重が解析結果と比較して大きくなっている．これは，実験では両支点にピン支承を用いており，鉛直変位が大きい領域において横方向に拘束力が発生し，見かけ上，剛性が増加したものと考えられる．以降の実験と解析との比較にあたっては，実験と解析との荷重比で比較を行うこととする．

先ずは，降伏荷重に着目して比較を行う．**表 4.5.4** に示すとおり，劣化供試体の荷重比は 87～102%であり，概ね供試体 N と同程度の値となっている．

次に，最大荷重に着目すると，供試体 C5，T10 の荷重比に関しては供試体 N と同程度の値となっているが，供試体 C10，C15，T15 の荷重比に関しては供試体 N よりも大きく評価されている．

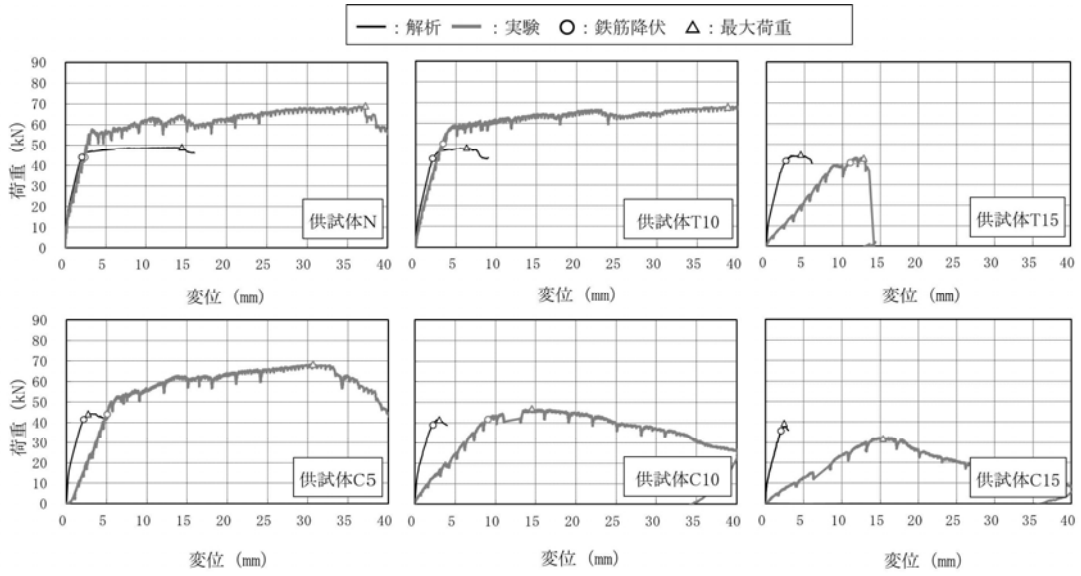


図 4.5.8　各供試体の荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果の比較

④実験結果と解析結果の差異に関する考察

供試体 C10 の実験と解析で見られた剛性差は，せん断ひび割れが卓越することによるせん断剛性の低下が要因の一つであると推察される．供試体 T15 では，付着特性の低下のため，実験は解析と異なる挙動となり，降伏に至るまでの剛性や破壊形式および最大荷重などに差異を生じたものと考えられる．また，供試体 C15 については，前述のせん断剛性の低下に加えて，付着特性の低下も付与されたことで，供試体 C10 よりも降伏に至るまでの剛性や最大荷重などがより顕著に低下し，実験結果と解析結果との差異が更に大きくなったものと推察される．

一方，供試体 C5，T10 のように，圧縮領域のせん断剛性の低下や引張領域の付着特性の低下が軽微な場合の RC はりに対しては，非線形有限要素解析に当たり，コンクリートの圧縮強度を低下させることで材料物性値の空間的なばらつきを考慮する方法を適用することによって，降伏に至るまでの剛性や破壊形式，最大荷重などを比較的精度良く評価できる可能性があるものと考えられる．

(3) 課　題

凍害による劣化により圧縮領域のコンクリートが著しい損傷を受け，せん断剛性が低下している RC はりや，鉄筋とコンクリートの付着特性が低下している RC はりでは，実験結果を精度良く再現することは困難である．これは，既存の汎用プログラムでは健全なコンクリートを前提とした材料構成則を用いているためであり，上記の課題を解決するためには凍害劣化を受けたコンクリートの材料構成則を構築する必要がある．

また，コンクリートの圧縮領域の劣化状態によって曲げ耐力や疲労寿命に与える影響が大きく異なることが想定されるが，コンクリートの劣化状態と構造性能の相関については未だ研究段階であるため，現時点では精度良く解析することは困難である．今後は，劣化を考慮した材料構成則を用いた数値解析との関連性を研究することで，精度良く評価することが可能になるものと考えられる．

4.6　今後の課題

凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能評価手法の確立に向けて，現段階において得られた知見や議論した内容等を踏まえ，今後の課題等について以下に示す.

(1) 構造性能を評価するための点検（調査）手法の提案

凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能を評価するための真に必要とされる情報を明らかにした上で，点検（調査）手法を提案する必要がある．そのためには，どういう点検（調査）で何が把握でき，その情報が何に適用できるのかを明確にする必要がある.

また，凍害による劣化が構造物のどの部位で生じているかによって構造性能に与える影響は大きく異なると考えられ，更に劣化の領域や範囲（深さ）によっても影響度が異なる．よって，劣化の空間的な分布は極めて重要な情報となるため，そうしたバラツキを含めた空間的な情報を精度良く把握するための点検（調査）手法も検討しなければならない.

(2) 点検結果に基づいた構造性能評価

1)将来予測と評価

「凍害によるコンクリートの劣化」だけではなく，「凍害によるコンクリート構造物の劣化」であることに留意した，将来予測と評価の方法について検討する必要がある.
また，将来予測を行うためには，環境条件（降雨量，積雪量，日射量，外気温，外気湿度等）や部材内部の温度や水分の分布といった情報を把握することも必要となる． つまり，構造性能評価といえば「抵抗」の評価というイメージが強いが，構造物の構造性能を評価するためには，「入力(Load)」と「応答(Response)」と「抵抗(Resistance)」のそれぞれに着目した検討を行い，それらの相互関係を明らかにする必要がある.

2)構造性能の評価方法

構造性能を評価する場合は，劣化の程度に応じて評価方法（構造物の外観上のグレードによる方法，設計での性能評価式による方法，非線形有限要素法に代表される数値シミュレーション手法による方法）を選択できるようにするために，各々の評価方法の適用範囲を設定しておく必要がある．また，適用する評価方法によって必要となる点検データの情報が異なることから，評価方法を判断・選択するための点検（調査）も必要となる.

3)凍害で劣化したコンクリートの材料構成モデルの構築

非線形有限要素解析による構造性能評価を念頭に置いた場合，凍害で劣化したコンクリートの材料構成則（圧縮構成則，引張構成則，せん断モデル，引張剛性モデル）を提案し，性能評価を可能とする数値解析ツールを構築する必要がある．また，実構造物への適用を想定した場合には，凍結融解作用を受ける領域（深さ）を特定する必要があるため，コンクリート内部の温度分布を把握するための温度解析も視野に入れて検討する必要がある.

さらに，凍害で劣化したコンクリート材料の力学特性（圧縮強度，弾性係数，引張強度，付着強度等）を表現可能な劣化指標を見出すことも重要であり，劣化指標と力学特性の関係を明らかにする必要がある．

(3) 構造性能評価に基づいた対策の要否判定

土木学会コンクリート標準示方書［維持管理編］では，対策の要否判定は「点検結果に基づく点検時の性能評価および将来の性能の予測結果が維持管理限界に達するか，あるいはこれを超えているかどうかの評価結果に加えて，維持管理計画の内容，構造物の重要度，残存予定供用期間，経済性などを考慮して判定することを原則とする」[29]とされている．

よって，上記の課題事項である性能の評価や将来予測等がクリアできれば，構造性能の評価に基づいた合理的な対策の要否判定が行えることになる．ただし，点検時における材料劣化を考慮した構造性能評価も，将来の劣化の進行状態や性能の低下を予測することは現状の技術レベルでは容易ではないため，取り組むべき課題のハードルは高い．

(4) 構造性能の評価に基づいた対策の選定と補修

土木学会コンクリート標準示方書［維持管理編］では，「対策が必要とされた場合には，点検強化，補修，供用制限，解体・撤去，のいずれかを選定する必要がある」[2]とされており，現状は構造物の外観上のグレードに応じた標準的な対策方法の提示にとどまっている．しかし，構造性能の定量的な評価に基づけば，対策の目的が明確になるとともに真に必要な対策を選定することが可能となる．よって，構造性能の観点からは対策を必要としない判定も含め，既設構造物の維持管理を効率的かつ効果的に実施していけるものと考える．

また，補修では所定の効果が得られるように構造物の性能低下やライフサイクルコストを考慮して工法や材料を選択しなければならない．凍害に対する補修の目的は，劣化した部分の除去と性能の回復であるが，必要とされる性能を確保するには劣化の領域と範囲（深さ）を見極めた上で適切な補修を行う必要である．さらに，補修材料の品質によって補修後の凍害の進行速度が異なるものと考えられるため，補修材料の耐凍害性を考慮した性能評価や将来予測の手法についても検討する必要があると考えられる．

4.7 おわりに

本章では，積雪寒冷地特有の劣化原因である凍結融解作用の繰り返しに起因する「凍害」に着目し，構造性能評価手法の提案を目的として，先ずは既往の文献調査や実構造物における劣化現象の事例を収集した．また，凍害で劣化したコンクリート構造物に対して現在実務で行われている点検（調査）方法と構造性能評価に着目した検討事例について調査・分析を行い，当面の課題の抽出を行った．

現状では解決すべき課題が山積みではあるが，現実に凍害で劣化したコンクリート構造物は数多く存在しているため，構造性能評価手法の確立は急務であるものと考えられる．

【参考文献】

1）北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会：北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案），pp.2-9～2-12，2006.3.

2）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］，p p.185-193，2013.10.

3）林田宏，佐藤靖彦，上田多門：圧縮側と引張側の凍害深さを変化させた曲げ破壊型 RC はり部材の構造性能に関する研究，寒地土木研究所月報 No.715，2012.12.

4）三田村浩，佐藤京，本田幸一，松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1420-1431，2009.3.

5）三田村浩，佐藤京，西弘明，渡辺忠朋：積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命化手法について，構造工学論文集，Vol.56A，pp1239-1248，2010.3.

6）社団法人日本コンクリート工学協会北海道支部：積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会報告書，p.18，2010.3.

7）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］，p p.41-58，2013.10.

8）北海道土木技術会コンクリート研究委員会：北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針，劣化機構編 pp.10-18，2013.12.

9）American Society for Testing and Materials : Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals（ASTM-C-672）

10）北海道開発局港湾部港湾建設課，寒地港湾技術研究センター：海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書，資 1-10，2000.3.

11）内藤勲，田口史雄，林田宏：コンクリート構造物のスケーリングにおける劣化度評価について－コンクリート壁式防護柵のスケーリング調査－，第 52 回北海道開発技術研究発表会，技-42(道)，2009.2.

12）林田宏，内藤勲，遠藤裕丈：デジタルカメラ写真と画像処理ソフトを用いたスケーリング深さの定量化に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-438, pp.875-876, 2010.9.

13）（独）土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，pp.114-117，2003.10.

14）手塚喜勝，中村眞一，佐々木元茂，朝倉啓仁：蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法，平成 16 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 61 号，2005.2.

15）近藤悦郎，関下裕太，朝倉啓仁，手塚喜勝：蛍光エポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察の適用事例，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-367，pp.733-734，2010.9.

16）梅本秀二，宮本則幸，濱田弘志，藤井真人，伊藤幸広：棒形スキャナによるコンクリート内部微破壊調査事例，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-154，pp.307-308，2010.9.

17）緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，2002.6.

18）（社）日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術’13［基礎編］，p.111，2013.2.

19）魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 5，コンクリート構造物の非破壊検査，p.37，1990.5.
20）土木研究所：平成 22 年度重点プロジェクト研究報告書，11.3 土木施設の寒地耐久性に関する研究, 11.2 コンクリートの凍害, 塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究, 2011.3.
21）柏忠二，明石外世樹，小阪義夫：コンクリートの非破壊試験法－日欧米の論文・規格・文献－，p.42，1980.
22）遠藤裕丈，田口史雄，林田宏：コンクリート部材の凍害診断への表面走査法の適用に関する研究，第 55 回（平成 23 年度）北海道開発技術研究発表会発表概要集，2012.2.
23）林田宏，佐藤靖彦：凍害劣化域の大きさと位置に着目した RC はり部材の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.922-927，2012.
24）土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2012.
25）前川宏一, 福浦尚之:多方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材･構造挙動からの検証，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.209-225，1999.
26）岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.
27）橋本航，森川英典，佐伯慶悟，小林秀惠：コンクリート強度分布を有する RC はり部材のせん断耐荷機構，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.925-930，2002.
28）社団法人日本コンクリート工学協会北海道支部：凍害の予測と耐久性設計の現状－凍害と耐久性設計研究委員会報告書－，p.27，2006.
29）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］，p p.72-73，2013.10.

第５章　今後の取り組みについて

第 1 期活動では，材料劣化がコンクリート構造物の構造性能に及ぼす影響に関する現状技術を調査するとともに，構造性能を定量的に評価するための有効な手段であると考えられる非線形有限要素解析について，その適用性や留意事項を把握するべく種々の検討を行った．また，積雪寒冷地特有の劣化原因である凍結融解作用の繰り返しに起因する「凍害」に着目し，先ずは既往の文献調査や劣化事例を収集した上で，点検や調査の現状と課題および構造性能の評価事例等について整理した．

次期活動では，第 1 期活動で得られた知見や課題等を踏まえ，より具体的な検討作業に着手し，凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価可能な手法を提案したいと考えている．また，実構造物を想定した構造性能評価のケーススタディーを行い，実務者にとって参考となる実用的な技術資料を作成する予定である．

また，本委員会の活動を実務者や事業体の管理者等に広く紹介するための普及・啓発活動も推進していきたいと考えている．その具体的な施策の 1 つとして，平成 26 年 2 月に委員会のホームページを開設した．現時点では閲覧可能なコンテンツは少ないが，随時更新しながら充実化を図る予定である．また，地方自治体の管理者や実務者を対象とした出前講座等も企画し，社会に向けて積極的な情報発信をしていきたいと考えている．

・委員会ホームページの運営・管理
・講習会および出前講座の企画
・関連する分野の講習会情報等の発信

図 5.1 委員会 HP のトップページ（http://concom-h.com/main/subcommittee/rekka/）

付　　録

付録１　材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	区 分	文献題名	年 次	出典先	種 別
1	鋼材腐食	鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察	1989	JSCE	論　文
2		鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析	1997	JCI	論　文
3		有限要素法による鉄筋の腐食したRC梁の耐力性能評価	1997	JCI	論　文
4		引張主筋の腐食したRC梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究	1998	AIJ	論　文
5		強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験シミュレーション	2002	JCI	論　文
6		鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響	2002	PARI	報　告
7		鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究	2003	JSCE	論　文
8		鉄筋腐食を考慮したRCはり部材のせん断耐荷性能評価	2003	JCI	論　文
9		鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響	2006	JSCE	論　文
10		鉄筋の腐食分布がRCはり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響	2008	JSCE	論　文
11		塩害による鋼材腐食を考慮した実PC上部工の構造性能評価	2009	JCI	論　文
12		塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価	2010	JSCE	論　文
13		引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化	2011	JCI	論　文
14		著しい塩害を受けて劣化した道路橋PC上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析	2011	JSCE	論　文
15	定着不良	せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響	2004	JCI	論　文
16		鉄筋の定着不良を有するRC梁のせん断破壊性状の評価	2005	JCI	論　文
17		せん断補強筋に定着不良が生じたRCはりのせん断破壊挙動解析	2006	JSCE	論　文
18		主鉄筋に定着不良を有するディープビームの耐荷性状	2007	JCI	論　文
19	コンクリート劣化	ASRで劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究	2007	JCI	論　文
20		アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張予測解析	2007	JSCE	論　文
21		ASRを生じたPCはりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価	2009	JCI	論　文
22		コンクリート構造物におけるASR損傷と損傷後の構造性能の評価	2011	JSCE	論　文
23		ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討	2012	JCI	論　文
24		凍結融解作用により劣化したRCはり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価	2013	JCI	論　文
25	その他	コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム	2004	JCI	委員会報告書
26		地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計～設計と照査の現状と将来展望～	2005	JSCE	委員会報告書
27		材料劣化を考慮した既設RC橋脚の耐震性能に関する一検討	2006	JSCE	論　文
28		材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2006	JSCE	委員会報告書
29		コンクリート構造物の耐震設計～時空間における設計の課題と近未来像～	2008	JSCE	委員会報告書
30		続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2009	JSCE	委員会報告書

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.1
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する考察
著者名	橘 吉宏，梶川 康男，川村 満紀
ジャーナル名	土木学会報告集，第 402 号／V-10，pp.105-114
発行年	1989 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋が全体的に腐食した RC ばりを対象として，単鉄筋ばり供試体の載荷試験を実施し，腐食した RC ばりは非腐食 RC ばりに比べて耐力と剛性が低下することが明らかにされている．また，このような劣化原因の推定を非線形有限要素解析によって行った結果，鉄筋とコンクリート間の付着せん断応力の伝達の欠如をモデル化することで腐食 RC ばりの挙動を表現でき，この応力伝達の欠如が劣化挙動に大きな影響を及ぼす要因の 1 つであることが明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋腐食に起因する鉄筋とコンクリート間の付着劣化および縦ひび割れの発生による鉄筋への応力伝達の欠如を接合要素によって表現した．また，鉄筋における腐食（錆）の膨張圧による内部応力を別途初期応力として考慮した．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	

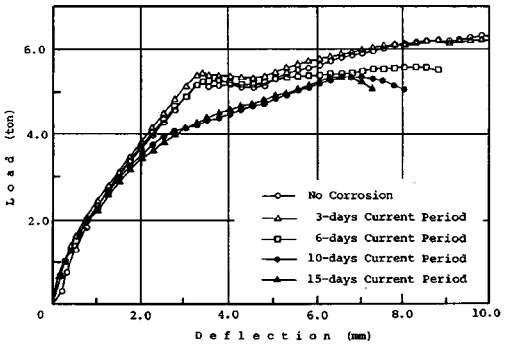
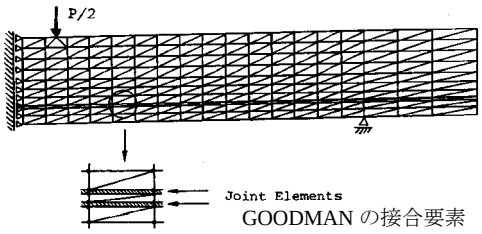


Fig. 9 Load-Deflection Relation.
載荷実験で得られた荷重－変位関係



GOODMAN の接合要素
（仮想要素厚 t=2mm）

Fig. 14 Finite Elements for the RC Beam Specimen.

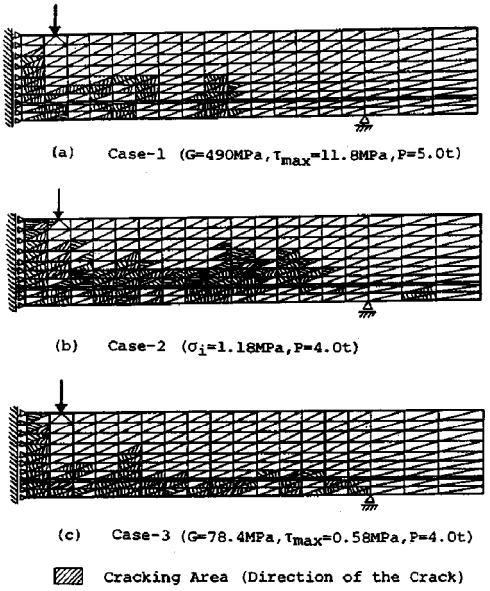


Fig. 23 Failure Pattern.

・(b)では鉄筋軸に沿ったひび割れが発生し，鉄筋とコンクリート間のせん断伝達が阻害されている．
・(c)では曲げひび割れの進展が鉄筋軸付近で止まっており，この傾向は実験結果と一致．

付着劣化の影響は小さい

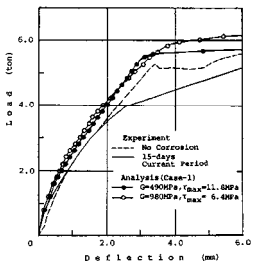


Fig. 21 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-1).

内部応力の影響は大きい

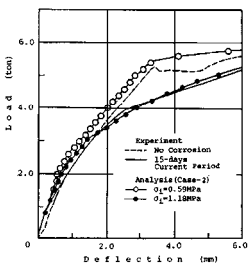


Fig. 22 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-2).

縦ひび割れの影響は大きい

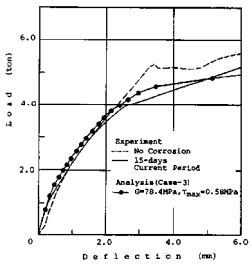
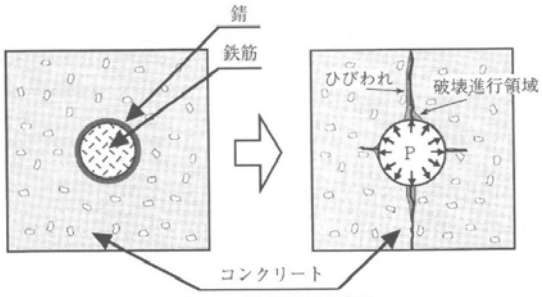
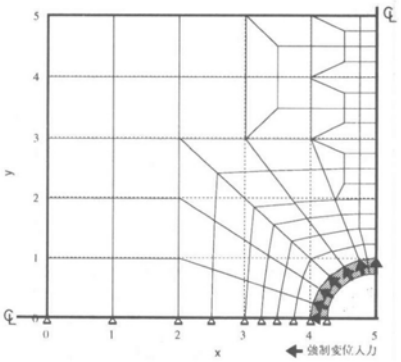
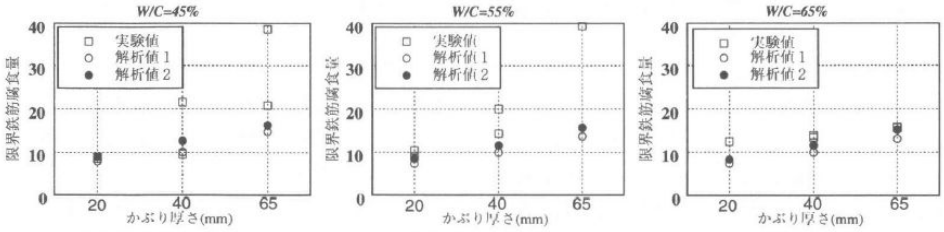
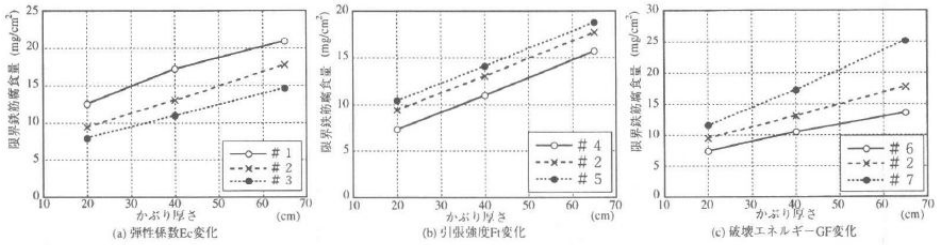
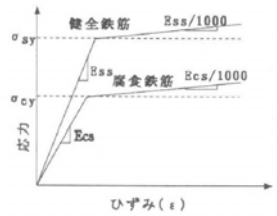
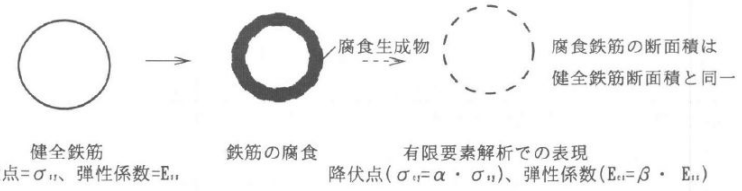
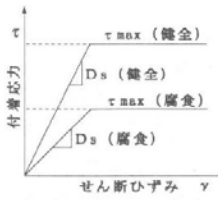
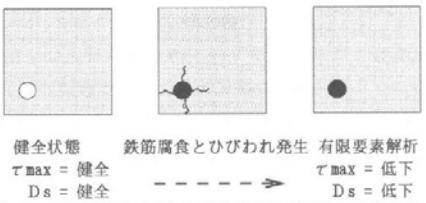
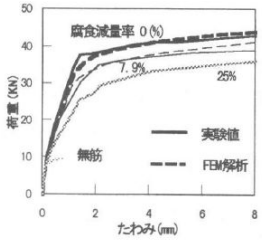
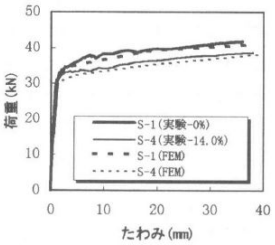
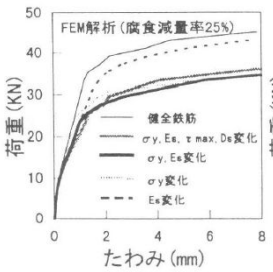
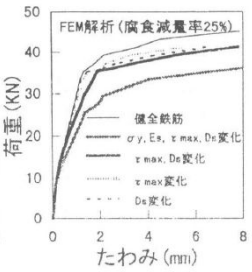
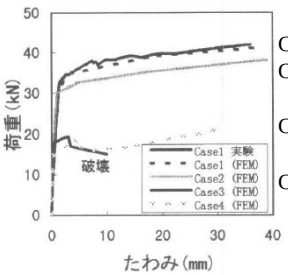


Fig. 24 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-3).

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.2
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析
著者名	松尾 豊史，西内 達雄，松村 卓郎
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.99-104
発行年	1997 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋の腐食膨張に伴って発生するコンクリートのひび割れに着目し，鉄筋の腐食量とコンクリートのひび割れ進展の関係について実験と解析を実施したものである．実験では水セメント比とかぶり厚さをパラメータとして電食実験を実施し，解析では破壊エネルギーや引張軟化を考慮したコンクリートの破壊力学的な手法によって検討を行っている．その結果，実験との比較で良好な結果が得られ，限界鉄筋腐食量等を解析によって評価できることが明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（離散（仮想）ひび割れモデル）
劣化のモデル化	鉄筋の腐食膨張のモデル化を，鉄筋要素の円周の放線方向に一様な強制変位を与える形で解析を実施．（材料構成則自体には劣化を考慮していない）
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図－４　ひびわれ進展模式図 ひび割れ面間に非線形ロッド要素を配置し，引張軟化曲線から求まる引張応力を等価節点力として作用．  図－７　解析の要素分割図  (a)Ｗ／Ｃ＝４５％　(b)Ｗ／Ｃ＝５５％　(c)Ｗ／Ｃ＝６５％ 図－１０　解析値と実験値の比較 かぶり厚さが 65mm の場合を除き実験と解析は概ね良く一致する．全体的に解析結果は小さめに評価されているが，これは解析では腐食は均等に生じると仮定しているためである．（実際は不均等である）  図－１１　限界鉄筋腐食量に与える各種パラメータの影響 弾性係数が低いほど，引張強度が高いほど，破壊エネルギーが大きいほど，鉄筋の限界鉄筋腐食量が増加する．また，破壊エネルギーはかぶり厚さが大きくなるほど有効に作用する．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.3
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	有限要素法による鉄筋の腐食した RC 梁の耐力性能評価
著者名	李 翰承，友澤 史紀，野口 貴文，鹿毛 忠継
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1147-1152
発行年	1997 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	腐食鉄筋および付着要素の材料物性を，腐食重量減少率を変数とする算定式から求め，鉄筋の腐食した RC 梁の有限要素解析を行った結果，解析結果は鉄筋の腐食した載荷実験結果と良く一致し，得られた材料物性の算定式の妥当性が検証されている．また，鉄筋の腐食した RC 梁の耐力低下の支配的な原因は，見かけ上の鉄筋の降伏点の低下であることと，鉄筋の局部的な腐食がモーメントの大きい部分で発生する場合には，その耐力低下が最も顕著であることが明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋の腐食形態（均一・局部）に応じて，鉄筋の力学特性（弾性係数・降伏強度）を低下．また，鉄筋とコンクリート間の付着特性（付着剛性・付着強度）を低下．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図-1　腐食鉄筋の構成則  図-4　有限要素解析における腐食した鉄筋の表現方法  図-8　付着要素の構成則  図-9　FEM解析における腐食鉄筋の付着の表現方法 腐食ひび割れは無視  図-18荷重-たわみ関係(単筋梁)  図-19　荷重-たわみ関係(複筋梁) 単鉄筋梁は均一腐食 複鉄筋梁は局部腐食（孔食） いずれも実験結果と解析結果は良い一致を示す. ・耐力低下は鉄筋降伏強度の低下に起因 ・剛性低下は付着特性の低下に起因 ・局部腐食は耐力や靭性を著しく低下させる  図-21　鉄筋要素の影響  図-22　付着要素の影響  図-23　局部腐食の影響 CASE1：健全 CASE2：全体で 14% 腐食 CASE3：等曲げ区間で局部腐食 CASE4：せん断区間で局部腐食

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.4
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	引張主筋の腐食した RC 梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究
著者名	李 翰承，友澤 史紀，野口 貴文，友澤 史紀
ジャーナル名	日本建築学会構造系報告集，第 506 号，pp.43-50
発行年	1998 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋の腐食程度が RC 梁の耐力性能に及ぼす影響を解析的に把握するため，鉄筋の腐食程度を変数として取り込んだ鉄筋及び付着要素の構成則を腐食鉄筋の引張試験や引抜き付着試験から導出し，鉄筋が腐食した RC 梁の有限要素解析を行った． その結果，鉄筋の腐食程度と位置が分かれば解析によって耐力が評価できることや，耐力低下の支配的な原因は見かけ上の鉄筋降伏点の低下であり，剛性の低下は鉄筋の見かけ上の弾性係数及び付着強度・剛性の低下であること等が明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋の腐食形態（均一・局部）に応じて，鉄筋の力学特性（弾性係数・降伏強度）を低下．また，鉄筋とコンクリート間の付着特性（付着剛性・付着強度）を低下．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	鉄筋の腐食位置が耐力性能に及ぼす影響に関する考察部のみを示す． ※材料構成則の考え方やその他の解析結果等については資料 No.3 を参照のこと．

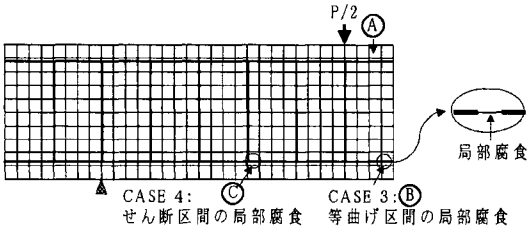


図 32　鉄筋の局部腐食位置

表3　各ケースにおける腐食状態及び鉄筋の力学的性質

種類	腐食状態	降伏点	弾性係数	ΔW
Case1	健全梁	343 N/mm²	197 GPa	0(%)
Case2	全体区間（14%腐食）	248 N/mm²	166 GPa	14(%)
Case3	等曲げ区間(局部腐食)	34 N/mm²	97 GPa	45(%)
Case4	せん断区間(局部腐食)	34 N/mm²	97 GPa	45(%)

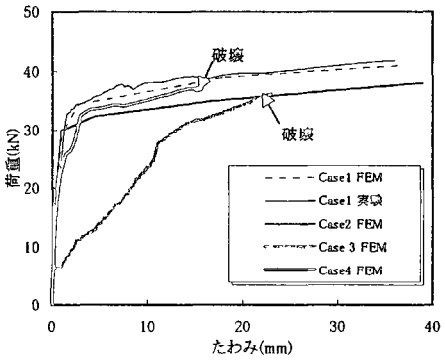


図 34　荷重－たわみ曲線（局部腐食の影響）

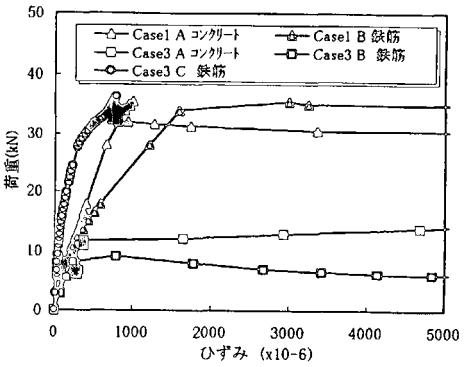
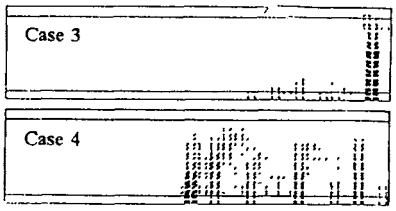
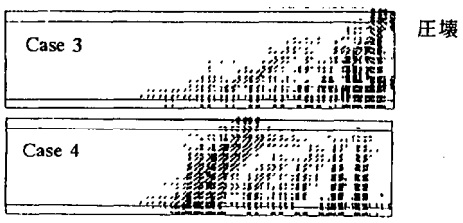


図 35　荷重－鉄筋・コンクリートのひずみ曲線

等曲げ区間で局部腐食が生じた場合（CASE3）には，せん断区間で局部腐食が生じた場合（CASE4）よりも降伏耐力の低下度合いが大きい．



（a）ひびわれ発生時点



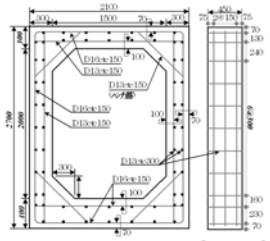
（b）　終局時点

CASE3 は，ひび割れは等曲げ区間で発生し，終局時は局部腐食位置の上側コンクリートで圧壊．
CASE4 は，ひび割れはせん断区間で発生し，終局時はせん断区間の局部腐食位置の上側コンクリートで圧壊．

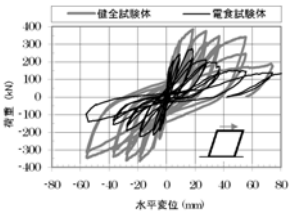
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.5
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	強制的に腐食させた RC ボックスカルバートの載荷実験シミュレーション
著者名	松尾　豊史，松村　卓郎，遠藤　達巳，橘　泰久
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1297-1302
発行年	2002 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	FEM 解析における鉄筋腐食の考慮方法について検討し，電食により鉄筋を強制的に腐食させた RC ボックスカルバートの載荷実験のシミュレーション解析を行ったものである．その結果，腐食による鉄筋の断面減少およびコンクリートと鉄筋界面の付着力の低下を適切に考慮すれば，全体的な荷重－変位関係が概ね良好にシミュレートできることが確認されている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れモデル）「WCOMD-SJ（ver.7.2）」
劣化のモデル化	鉄筋の腐食程度（断面減少量）に応じて鉄筋量を低減しつつ，鉄筋とコンクリートの付着パラメータ C を調整している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	

●載荷実験



図－１　試験体の形状と寸法［単位：mm］



図－７　荷重-変位関係比較

・材料試験値

a)コンクリート(f'_{ck}=24)：f'_c =31.5 N/mm^2

E_c=3.29×10^4 N/mm^2，f_t =2.68 N/mm^2

b)鉄筋(SD345)：f_y =381 N/mm^2

E_s=1.68×10^5 N/mm^2，ε_y =2273×10^6

・健全試験体に比べ，電食試験体では，

→耐力が 30%程度低下

→最大荷重以降の耐力低下度合いも大きい

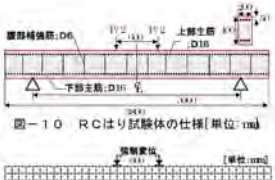
→履歴形状は逆 S 字型（エネルギー吸収小）

・付着パラメータ C を変化させた解析的検討

→概ね荷重-変位関係をシミュレート可能

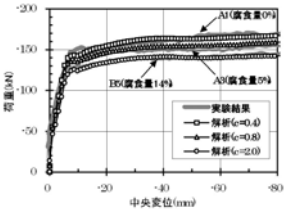
↓ 付着パラメータ C を決定

●有限要素法解析



図－１０　ＲＣはり試験体の仕様［単位：mm］

図－１１　要素分割図（ＲＣはり）



図－１２　解析結果（ＲＣはり）

表－３　鉄筋腐食量と付着パラメータの関係

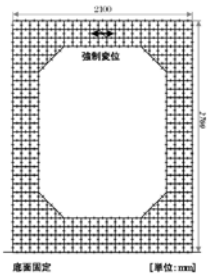
鉄筋腐食量	付着パラメータ c
δW≦2(%)	0.4
2(%)＜δW≦5(%)	0.6
5(%)＜δW≦8(%)	0.8
8(%)＜δW≦10(%)	1.0
10(%)＜δW	2.0

電食試験体に対して C＝0.8

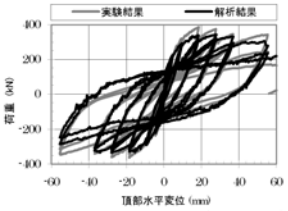
・解析用入力物性値

→コンクリートの引張強度のみ 50%低減

その他は同様（微細ひび割れ発生を考慮）



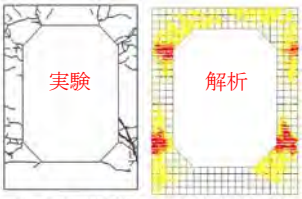
図－１３　要素分割図（ＲＣボックスカルバート）



図－１４　実験シミュレーション（健全試験体）

・健全試験体の解析結果

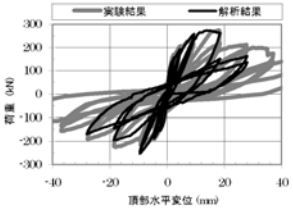
→荷重-変位関係・ひび割れ発生状況ともに良好な一致



図－１５　ひび割れ図比較（健全試験体）

→除荷勾配には差が見られる

→全体的な荷重-変位は概ね再現

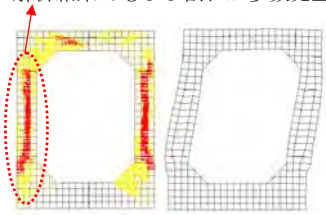


図－１６　実験シミュレーション（電食試験体）

写真－１　電食試験体終局状況

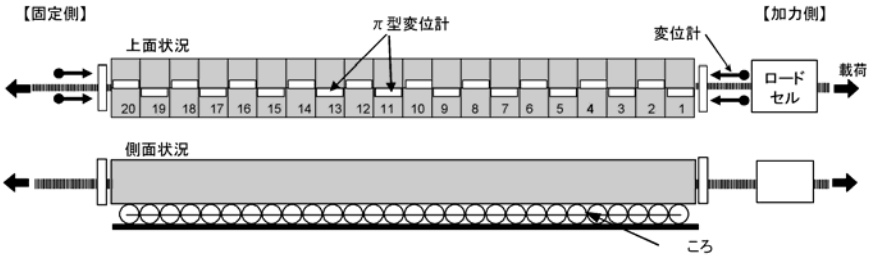
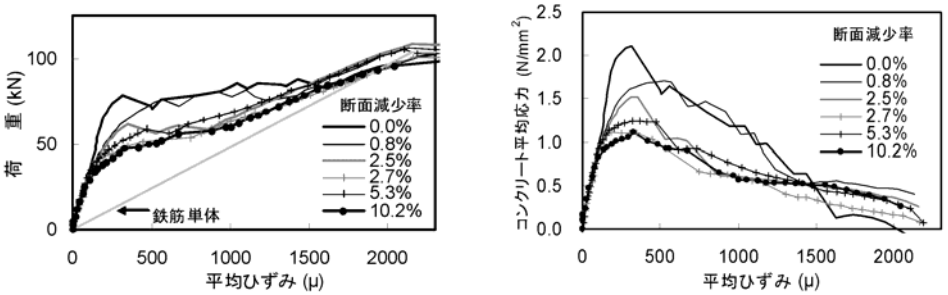
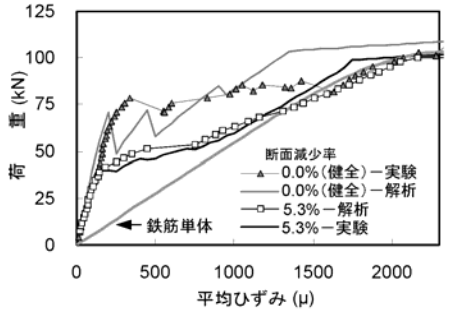
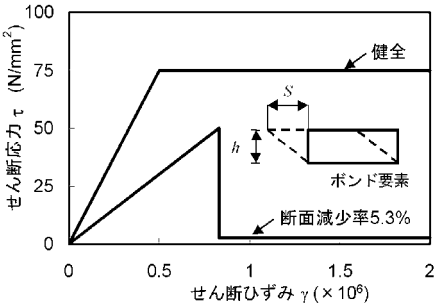
側壁中央部のひび割れの開き

→解析結果でもひび割れが多数発生



図－１７　ひび割れ図及び変形図（電食試験体）

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.6
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響
著者名	加藤 絵万，岩波 光保，横田 弘，伊藤 始，佐藤 文則
ジャーナル名	港湾空港技術研究所 資料 1044
発行年	2003 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋の腐食程度と単純引張応力下における鉄筋とコンクリート間の付着劣化の関係について実験的検討を実施し，腐食による鉄筋の断面減少率と平均ひび割れ幅には相関関係があること，鉄筋腐食によりテンションスティフニング効果が失われることでひび割れ分散性が低下することを示している．更に，実験結果を基に，鉄筋要素の断面積および付着要素のせん断ひずみ－せん断応力関係を変化させた非線形有限要素解析を実施し，鉄筋とコンクリート間の付着性能の定量的表現方法を提案している．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋腐食を，鉄筋要素の断面積と鉄筋とコンクリートの付着性能を表現するボンド要素のせん断ひずみ－せん断応力関係によって表現している．本研究では，実験結果と解析値の一致を重視しており，せん断ひずみ－せん断応力関係の設定方法については言及していないが，せん断弾性係数および最大せん断応力以後のせん断応力を低減させることで劣化を評価している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図-1　載荷試験概要  図-2　実験結果  図-3　実験結果と解析結果の比較  図-4　ボンド要素の構成則

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.7
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究
著者名	佐藤　文則，岩波　光保，横田　弘
ジャーナル名	土木学会論文集，No.732/V-59，pp.63-76
発行年	2003 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	本研究では応力状態が厳しい鉄筋コンクリート接合部に着目し，内部鉄筋が腐食した場合の構造性能を評価することを目的としている．実験は，接合部を模擬した T 型試験体を対象に，電食により内部鉄筋の腐食度を変化させ，載荷試験により耐荷性や変形性に与える影響を調査している． その結果，鉄筋の腐食が耐荷力および変形に及ぼす影響は，鉄筋の断面欠損率と付着性能の低下を考慮して解析的に評価可能なことが示されている．また，劣化に伴う構造性能の変化を非破壊試験により評価することを目的として，アコースティック・エミッション計測と電気化学的計測を適用し，接合部内部の劣化情報を検討している．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	腐食による鉄筋の断面欠損の影響と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を，鉄筋要素の断面減少およびボンド要素のせん断弾性係数の低下として考慮している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	●載荷実験 a)コンクリート(f'_{ck}=30)：f'_c =31.2 N/mm^2，E_c=2.65×10^4 N/mm^2 b)鉄筋(SD345)：主筋 f_y =413 N/mm^2，せん断補強筋 f_y =391 N/mm^2 ・電食による通電期間→劣化度Ⅰ：16 日，劣化度Ⅱ：41 日，劣化度Ⅲ：55 日 ・劣化度の相違が耐荷力に与える影響（劣化度 0→Ⅲ） →鉄筋の断面欠損率増加 →降伏荷重・最大荷重は低下 →最大荷重の低下割合が大 ・載荷点変位と AE 発生数（劣化度 0→Ⅲ） →AE 発生数減少 →縦ひび割れ発生し拡大すると，腐食鉄筋近傍のコンクリートに応力伝達しない． ●有限要素解析 ・コンクリート→4 節点アイソパラメトリック要素 鉄筋→トラス要素（弾塑性材料） ・腐食程度評価→せん断弾性係数 G_s(N/mm^2)を低減 ・解析パラメータ CASE1：劣化度 0，G_s=6 CASE2：劣化度Ⅲ，G_s=6 CASE3：劣化度Ⅲ，G_s=3 CASE4：劣化度Ⅲ，G_s=2 CASE5：劣化度Ⅲ，G_s=1 ・荷重-変位関係（実験との比較） →（劣化度 0）若干部材剛性が高めに評価だが，概ね良好な一致 →（劣化度Ⅲ）G_s =1 で良好な一致，接合部近傍の変形も良好な一致 ・ひび割れ状況（実験との比較） →（劣化度 0→Ⅲ）ひび割れ本数減少．ひび割れ分散性の低下減少を再現．良好な一致． ・実構造物への適用にあたって →目視調査や非破壊試験結果を基に，ボンド要素の特性評価． →今後，多数の実験および解析を重ね，腐食量や表面ひび割れ幅とせん断弾性係数の低下関係を定量化する必要有り．

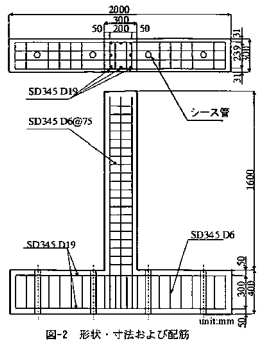
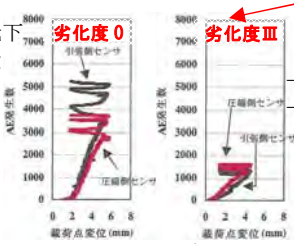


図-2　形状・寸法および配筋

表-4　劣化度の相違が耐荷性に与える影響

項目		劣化度 0	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
断面欠損率の最大値(%)	引張 1	0.00	2.31	7.65	8.05
	引張 2	0.00	1.80	4.25	6.77
	圧縮	0.00	1.70	6.65	8.45
降伏荷重の残存率(%)		100	97.1	96.5	95.5
最大荷重の残存率(%)		100	94.6	92.2	87.1



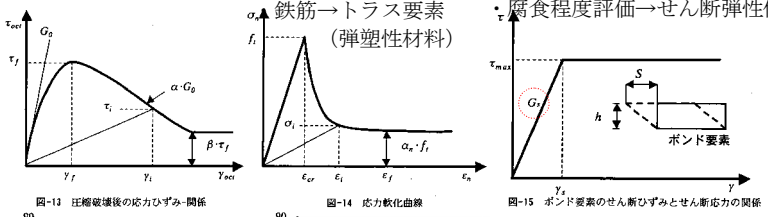
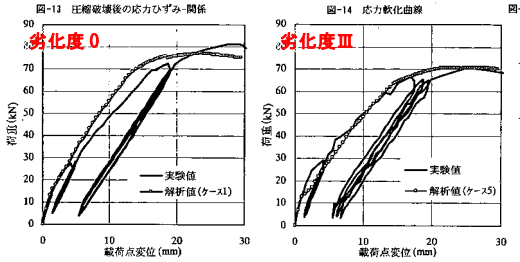
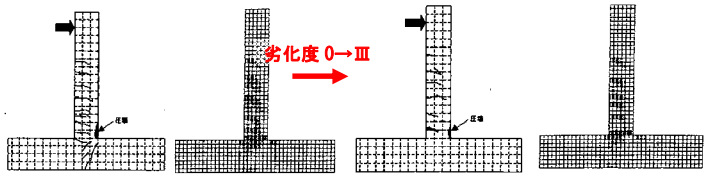


図-13　圧縮破壊後の応力ひずみ-関係　　図-14　応力軟化曲線　　図-15　ボンド要素のせん断ひずみとせん断応力の関係





(a)劣化度 0（実験）　(b)劣化度 0（解析）　(c)劣化度Ⅲ（実験）　(d)劣化度Ⅲ（解析）
図-18　ひび割れ発生状況

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.8
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん断耐荷性能評価
著者名	橋本 航，森川 英典，小林 秀惠
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1009-1014
発行年	2003 年
文献の要旨 （ポイント･結論）	塩害や中性化による鉄筋の腐食が，RC はり部材のせん断耐荷性能に及ぼす影響について評価するため，模擬腐食鉄筋を用いて RC はり部材を作製し，載荷試験を実施することで実験的検討を行っている．その結果，主鉄筋の腐食状況が部材のせん断耐荷性能および耐荷機構に影響を及ぼすことを明らかとしている．また，鉄筋腐食を導入した RC はり部材の有限要素法解析を行い，実験結果と比較することで，本解析手法の精度検証を行っている論文である．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋の腐食程度に応じて鉄筋の力学特性（弾性係数・降伏強度）を低下．また，鉄筋の線要素とコンクリート平面要素間の接触節点に付着バネを導入している．

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

●載荷実験

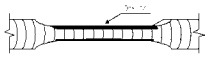


図-1　模擬腐食鉄筋の概要

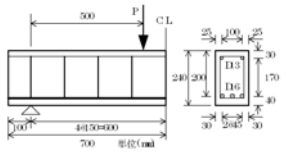


図-2　試験供試体(配筋 S の側面図と断面図

供試体名→S○-B○-●
S○→スターラップの腐食減少率○%
B○→主鉄筋の腐食減少○%
●→S はスターラップあり，T はスターラップなし

表-2　載荷試験結果と評価値との比較

供試体名	コンクリート強度 (N/mm²)	スターラップ 腐食 減量率(%)	スターラップ 腐食 減量率(%)	スターラップ 付着強度比 目標	スターラップ 付着強度比 実験値	主鉄筋 腐食 減量率(%)	主鉄筋 腐食 減量率(%)	主鉄筋 付着強度比 目標	主鉄筋 付着強度比 実験値	実験値 (kN) V_y	実験値 (kN) V_y'	実験値 (kN) V_y	実験値/示方書評価値 V_y/V_s	実験値/示方書評価値 V_y/V_s
S0-B0-S	16.9	0.0	0.0	1.00	1.00	0.0	0.0	1.00	1.00	29.4	—	52.8	1.02	1.00
S10-B0-S	16.9	10.0	19.2	0.53	0.31	0.0	0.0	1.00	1.00	35.5	—	50.9	1.23	1.06
S20-B0-S	16.9	20.0	38.5	0.28	0.15	0.0	0.0	1.00	1.00	33.1	—	48.0	1.14	1.11
S10-B5-S	16.9	10.0	19.2	0.53	0.31	5.0	15.5	0.73	0.52	28.2	9.3	56.6	1.03	1.22
S20-B10-S	16.9	20.0	38.5	0.28	0.15	10.0	24.7	0.53	0.33	25.7	13.7	53.8	0.98	1.32
S0-B0-T	16.5	0.0	—	—	—	0.0	0.0	1.00	1.00	31.9	4.7	—	1.10	—
S0-B5-T	16.5	0.0	—	—	—	5.0	15.5	0.73	0.06	28.2	16.3	—	1.03	—
S0-B10-T	16.5	0.0	—	—	—	10.0	24.7	0.53	0.44	27.0	8.5	—	1.02	—

実験値V_y'：斜めひび割れ発生荷重　　実験値V_y：スターラップ降伏荷重
実験値V_y'：耐力増分　　実験値V_s=評価値V_s（トラス理論）

・実験値 Vy と評価値 Vy(RC 標準)の整合
→主鉄筋腐食ケースで実験値 Vy が 1.2 倍程度(せん断抵抗機構が一部アーチへ移行し，せん断耐力が上昇)
・それ以外のケースでは概ね整合

●有限要素解析

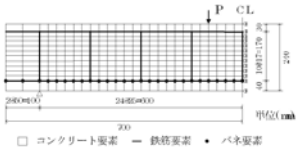


図-7　解析モデル

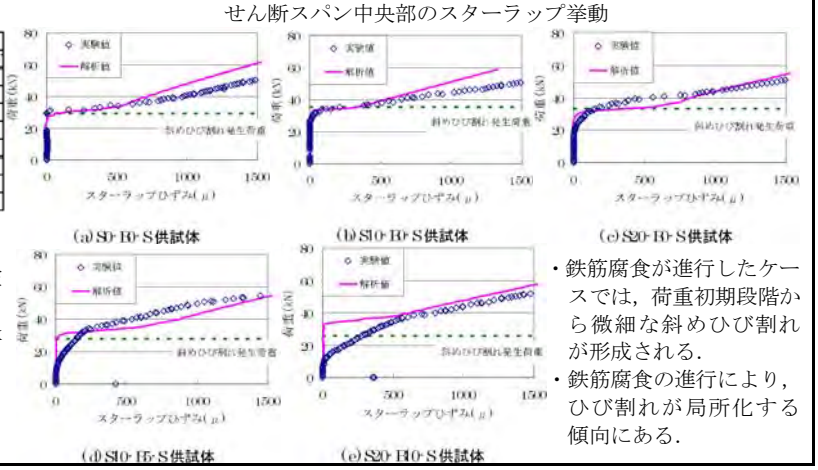
・コンクリート要素の応力-ひずみ関係
→(圧縮側)1,000μまで弾性，1,000～2,500μまで塑性，3,500μで圧縮破壊
→(引張側)引張限界ひずみまで弾性，ひび割れ発生後は引張軟化モデル
・鉄筋要素→完全弾塑性，腐食後の降伏強度，弾性係数使用
・バネ要素→垂直・水平方向を完全弾性型，バネ定数は付着強度試験値
・ひび割れ発生後のコンクリートのせん断弾性係数→健全時×0.3

表-3　解析結果と実験結果の比較(耐力)

供試体名	実験値(kN) V_y	実験値(kN) V(Mx)	解析値 V(kN)	(実験値)/(解析値) V_y/V	(実験値)/(解析値) V(Mx)/V
S0-B0-S	52.8	68.6	68.1	0.78	1.01
S10-B0-S	50.9	61.2	58.8	0.87	1.04
S20-B0-S	48.0	60.6	55.1	0.87	1.10
S10-B5-S	56.6	60.1	60.3	0.94	1.00
S20-B10-S	53.8	57.8	57.6	0.93	1.00
S0-B0-T	—	36.6	33.1	—	1.11
S0-B5-T	—	44.5	36.0	—	1.24
S0-B10-T	—	35.5	34.1	—	1.04

実験値V_y：スターラップ降伏荷重
実験値V(Mx)：最大荷重

せん断スパン中央部のスターラップ挙動

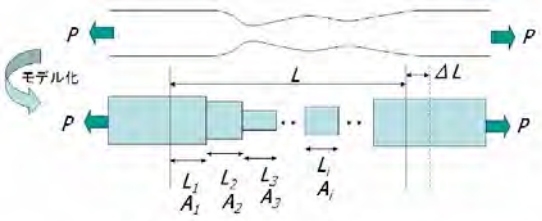
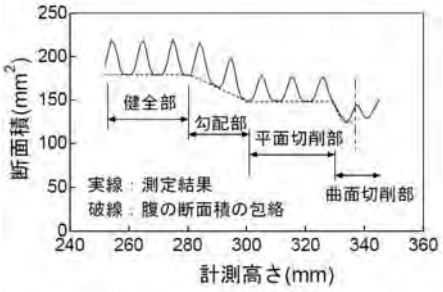
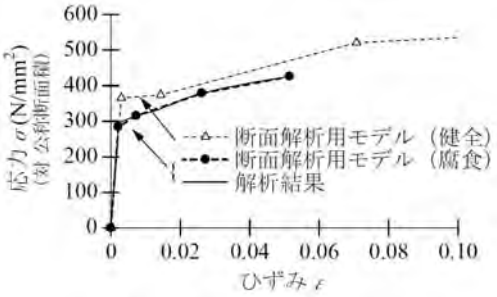
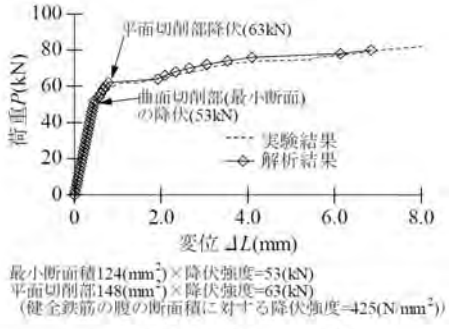
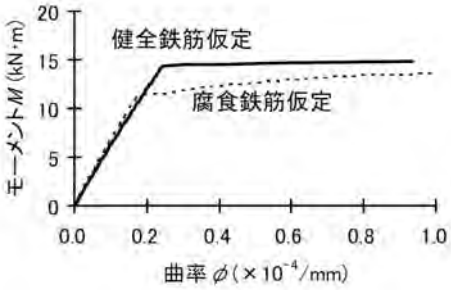
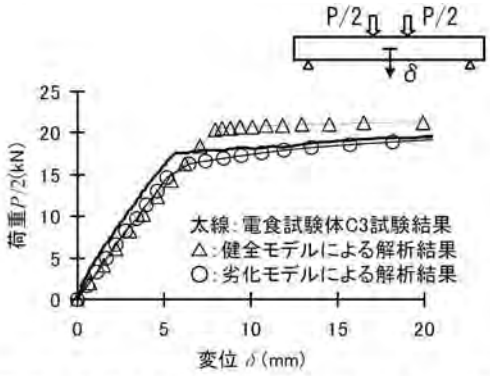


(a) S0-B0-S 供試体　(b) S10-B0-S 供試体　(c) S20-B0-S 供試体
(d) S10-B5-S 供試体　(e) S20-B10-S 供試体

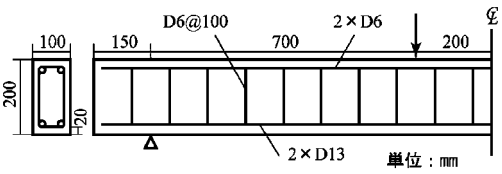
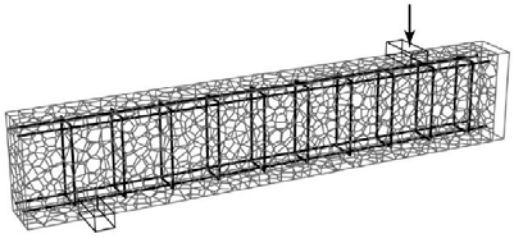
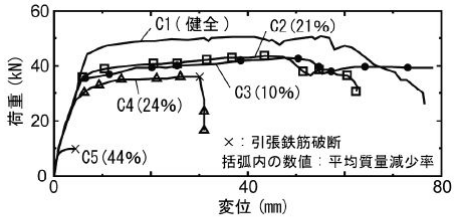
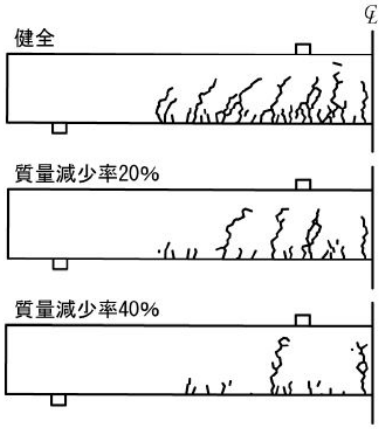
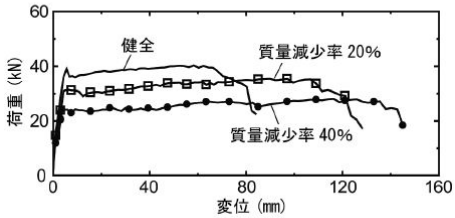
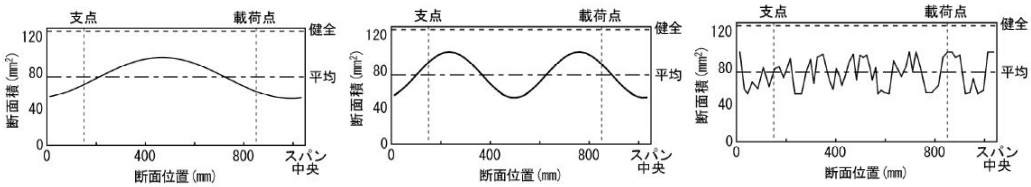
・実験同様，全ケース斜め引張破壊で終局に至る．
・解析値 Vy は実験値 Vy と Vmax (最大荷重)の間
→概ね実験値と整合
・アーチ作用の影響が大きい S0－B5－T の結果は整合取れず

・鉄筋腐食が進行したケースでは，荷重初期段階から微細な斜めひび割れが形成される．
・鉄筋腐食の進行により，ひび割れが局所化する傾向にある．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.9
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響
著者名	大屋戸 理明，金久保 利之，山本 泰彦，佐藤 勉
ジャーナル名	土木学会論文集 E，Vol.62，No.3，pp.542-554
発行年	2006 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	腐食に伴う鉄筋断面の減少と部材曲げ性状の関係について，部材試験と鉄筋の断面積分布の計測結果をもとに検討したものである．検討の結果，質量減少率以上に引張強度および終局耐力が低下する場合があり，より正確な推定のためには鉄筋の断面積分布を把握する必要があることを示している．また，3D スキャナによる断面積分布の計測し，その結果を反映させた鉄筋の一軸引張試験と解析の結果より，断面積分布の不均一性が降伏近傍の挙動に影響を与えることを明らかとしている．
解析手法の概要	平面保持を仮定した断面解析（ファイバー解析）
劣化のモデル化	コンクリートは一般の健全な場合の材料構成則を用い，鉄筋は 3D スキャナによる腐食鉄筋の断面積分布を仮定した材料構成則を用いている．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	■腐食した鉄筋の力学特性の推定  図-22　鉄筋力学性状の推定手法の概念  図-24　模擬腐食鉄筋の断面積分布測定結果 ■鉄筋の腐食による部材力学特性への影響  図-29　M-φ関係の解析に用いる鉄筋の応力-ひずみモデル  （断面積分布を補正した場合） 図-27　模擬腐食鉄筋の荷重-変位関係解析結果  図-30　鉄筋の力学性状による M-φ 関係への影響  図-31　鉄筋の力学性状を変化させた P-δ 関係

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.10
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響
著者名	斉藤 成彦，高橋 良輔，檜貝 勇
ジャーナル名	土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.601-611
発行年	2008 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋の腐食は構造物中で空間的なばらつきを有しているため，鉄筋の腐食程度と耐荷性能との関係は明確に評価されていない． 本研究では，鉄筋腐食の生じた RC はり部材を対象として，鉄筋の腐食分布が耐荷性状に与える影響について数値解析的に検討を行ったものである．検討の結果，RC はり部材の曲げ耐荷性状は，最小断面積と付着劣化状態に大きく依存し，付着分布特性が与えられれば構造解析によって耐荷力のばらつきの範囲を概ね評価できることを明らかにしている．
解析手法の概要	剛体バネモデル（RBSM）
劣化のモデル化	鉄筋の軸方向に沿った腐食のばらつきそのものをモデル化している．なお，腐食した鉄筋のモデル化は質量減少率に従って鉄筋要素の断面積を減少させ，腐食ひび割れの影響は付着強度を低下させることで考慮している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	■実験供試体および解析モデルの概要  図-6　解析対象供試体概要 [14]  図-7　解析モデル ■一様な腐食を仮定した場合の解析結果  図-8　荷重-変位関係（実験 [14]）   図-9　荷重-変位関係（解析：一様腐食） 図-10　降伏時のひび割れ性状（解析：一様腐食） 解析では，質量減少率の増加に伴って降伏荷重，最大荷重が低下し，低鉄筋比となるため変形性能が増大している．また，質量減少率の増加に伴って付着強度が低下するため，曲げひび割れの分散性が低下している． ■腐食のばらつきを考慮した場合の解析結果  (a) サイン波を仮定した分布（1周期）　(b) サイン波を仮定した分布（2周期）　(c) ランダムな分布 仮定した鉄筋の断面積分布（平均質量減少率 40%に着目）

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

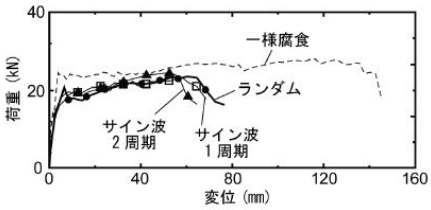
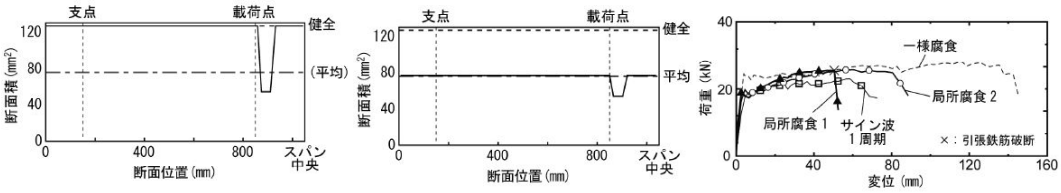


図-14　荷重-変位関係

一様腐食を仮定した場合と比較して，降伏荷重，最大荷重，変形性能が低下しており，部材の耐荷性状は平均質量減少率ではなく，鉄筋断面積の最小値に依存することが確認された．

また，鉄筋断面積をランダムな分布にしなくともサイン波を仮定した簡易な分布モデルでも評価可能であることが明らかとなった．

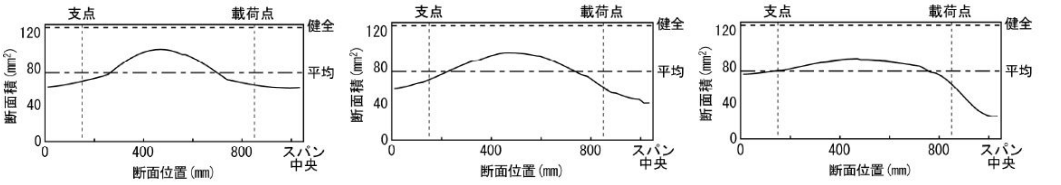


(a) 局所腐食 1　(b) 局所腐食 2　図-16　荷重-変位関係

局所的な腐食を考慮した分布

■最小断面積の大きさと位置が曲げ破壊性状に及ぼす影響

1）最小断面積の大きさの影響



(a) 最大腐食量σ　(b) 最大腐食量 2σ　(c) 最大腐食量 3σ

仮定した鉄筋の断面積分布（平均質量減少率 40%に着目）

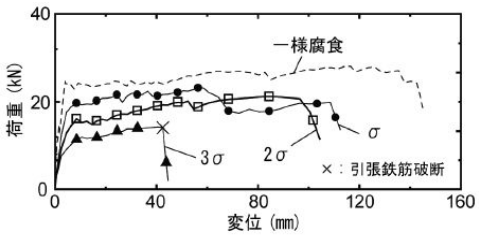


図-19　荷重-変位関係

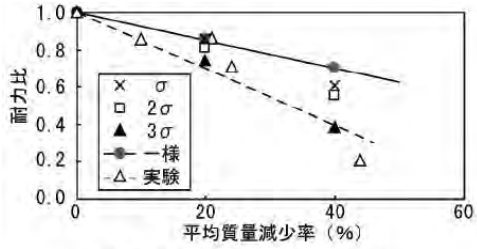
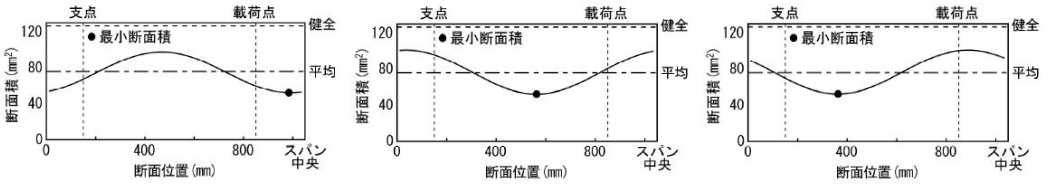


図-20　曲げ耐力比と平均質量減少率

2）最小断面積の位置の影響



(a) 最小断面積が等曲げモーメント区間内　(b) 最小断面積が等曲げモーメント区間外（載荷点寄り）　(c) 最小断面積が等曲げモーメント区間外（支点寄り）

仮定した鉄筋の断面積分布（平均質量減少率 40%に着目）

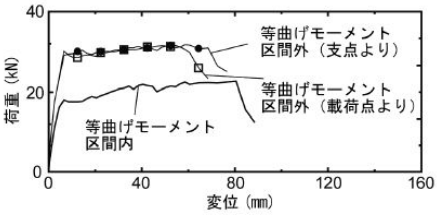
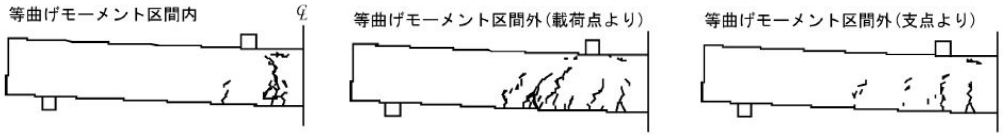


図-23　荷重-変位関係

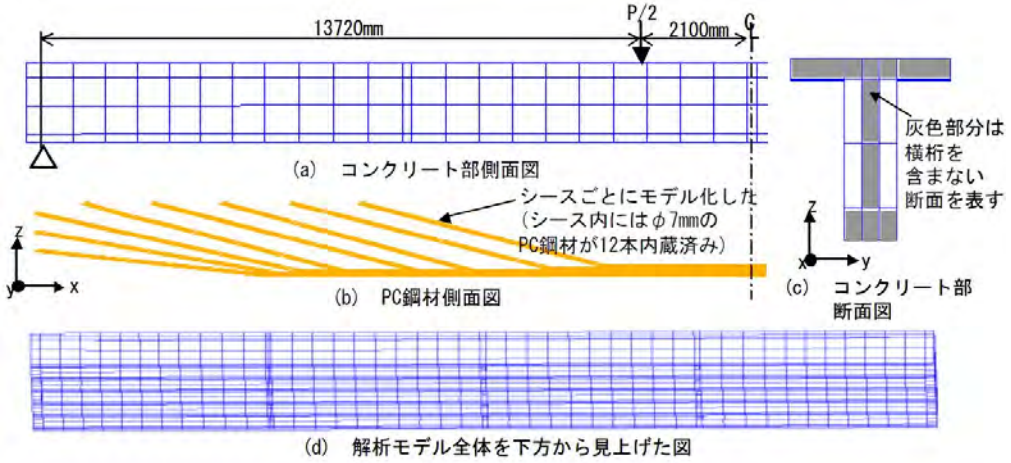
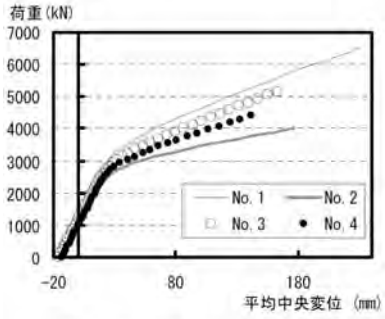
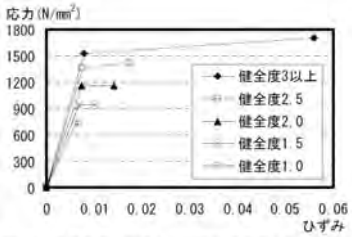
最小断面積の位置が等曲げモーメント区間内にある場合が降伏荷重および最大荷重が最も小さくなる．

最小断面積の位置が等曲げモーメント区間からある程度離れると，最大断面積の位置によらず等曲げモーメント区間で鉄筋が降伏し破壊に至る．

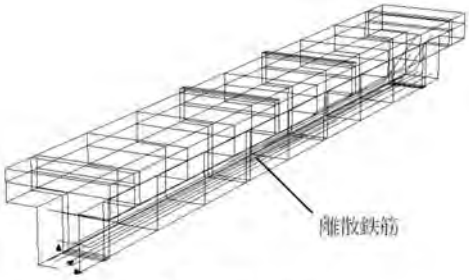
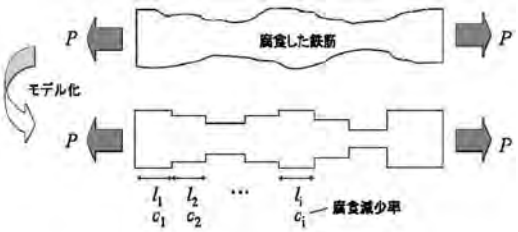
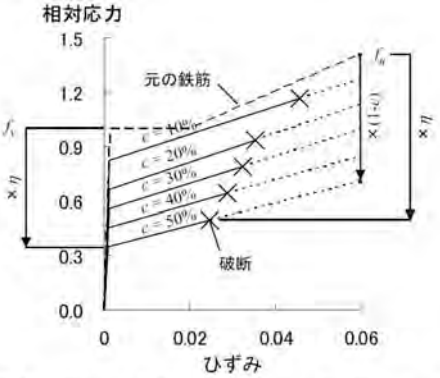
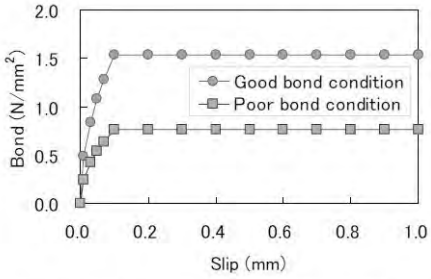
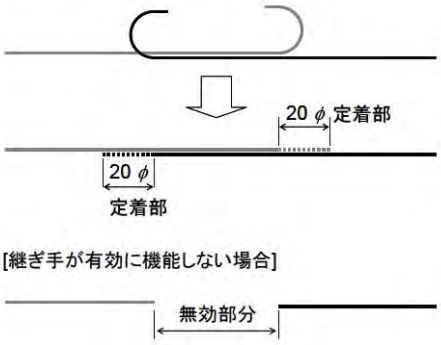


降伏時のひび割れ分布性状

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.11
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	塩害による鋼材腐食を考慮した実 PC 上部工の構造性能評価
著者名	上原子 晶久，岩城 一郎，鈴木 基行
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.2，pp.1525-1530
発行年	2009 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	解体された橋梁の PC 上部工の劣化度調査研究結果に基づいて，その構造性能を 3 次元有限要素解析により評価する方法を提案した．本手法は，PC 上部工の健全度と PC 鋼材の質量減少率，並びに同減少率と鋼材の機械的性質との関係をそれぞれ定式化し，それより得られた PC 鋼材の応力－ひずみ関係を解析に適用したものである．また，解析の結果より，当該構造物における力学性能が，健全時よりもどの程度低下しているかを推定したものである．
解析手法の概要	3 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	PC 鋼材の劣化のみを考慮し，質量減少率に応じた応力－ひずみ関係を設定し，かつ鋼材断面積の減少を考慮している．ただし，上部工ブロック内での鋼材断面積のばらつきは無視している．（ブロック内では一律の断面積を与えている）
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	**■解析モデルの概要**  ・上部工全体（6 連分）をモデル化　　図－7　解析モデルとメッシュ図 ・コンクリート：20 節点アイソパラメトリック 6 面体要素，15 節点アイソパラメトリック 5 面体要素を使用 ・PC 鋼材および鉄筋：埋め込み鉄筋要素（コンクリートと鋼材・鉄筋間は完全付着を仮定）を使用 **■解析結果の概要** 解析ケース No.1：健全な場合 No.2：健全度に応じて PC 鋼材の σ－ε 関係と断面積減少を考慮） No.3：塩害劣化部位を変化させた場合（01 桁のみを劣化） No.4：塩害劣化部位を変化させた場合（04 桁のみを劣化）  図－9　荷重と平均中央変位との関係 図－3　解体前に実施した健全度調査結果  図－6　各健全度に対応したPC鋼材の応力－ひずみ関係 ・No.2 の最大荷重は，No.1（健全な場合）のそれと比較して 40%程度低下し，かつ，じん性も低下する． ・No.3 と No.4 を比較すると，桁端部の 01 桁のみの劣化を考慮した No.3 よりも，上部工中央部に近い 04 桁のみの劣化を考慮した No.4 の方が，耐荷性能が低下する．この理由は断面性能を損失する桁の位置によって，応力の分担性状が異なるためである． ・見掛けのプレストレス量の減少が，上部工の全体挙動に影響を及ぼしている．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.12
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の載荷試験と数値解析による評価
著者名	田中 泰司，山口 貴幸，下村 匠
ジャーナル名	土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.466-482
発行年	2010 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	約 80 年間供用され，厳しい塩害環境に晒されて劣化した RC 桁を対象として，破壊試験を実施し，残存耐力を確認したものである．また，有限要素解析による性能評価についての検討を行った．検討の結果，継手が有効に機能した桁では，耐力低下は腐食率と同程度であったが，継手の定着性能が低下していた桁では，腐食量に比べて耐力低下が大きかった．また，解析的検討では，付着・定着が確保されている場合には，軸方向の平均的な腐食量を考慮することで構造性能を適切に評価できるが，付着・定着の性能低下が顕著な場合には構造性能が予測できないことが明らかにされている．
解析手法の概要	3 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	腐食による鉄筋の断面減少と軸方向のばらつきの影響は，鉄筋の応力－ひずみ関係に反映させ，腐食に伴う付着劣化の影響は鉄筋要素とコンクリート要素間にばね要素を設けることで考慮している．ここで，腐食した鉄筋の応力－ひずみ関係は，腐食分布の実測値を用いた数値実験から求めている．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	■解析モデルの概要  図-26　解析メッシュ  図-27　鉄筋の力学性状推定手法の概念図  図-31　腐食した鉄筋の相対応力－ひずみ関係のモデル  図-32　解析に使用した鉄筋とコンクリートの付着応力－すべり関係 ●腐食した鉄筋の応力－ひずみ関係 ・バイリニアモデルで表現． ・剛性は平均腐食量に依存し，降伏強度や破断強度は最大腐食量に依存するモデル． ●付着応力－すべり関係 ・鉄筋（丸鋼）とコンクリートの付着応力－ひずみ関係は CEB-FIP Model code に準拠． ・付着の良否の影響は付着強度で制御． ・かぶりが剥落し，鉄筋が露出している箇所は付着がないものと仮定． ・半円形フックの付着力の影響は右図のように考慮．  図-33　解析中での半円フックの表現方法

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

■解析結果（中桁に着目した場合）

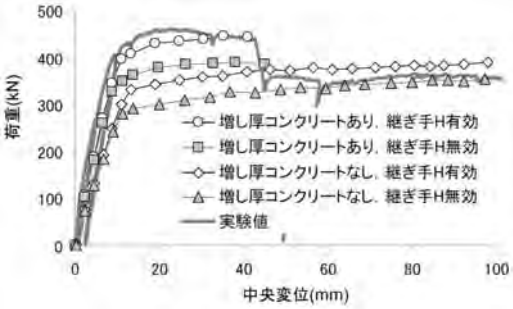


図-34　増し厚コンクリートの有無と鉄筋 H の重ね継ぎ手の有無が解析結果に及ぼす影響(中桁)

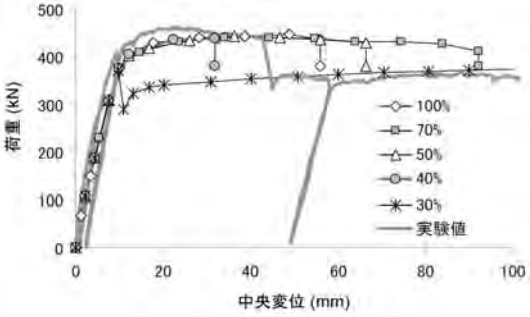


図-35　打ち継ぎ面のせん断付着強度が解析結果に及ぼす影響(中桁，式(10)のηを 100%とする)

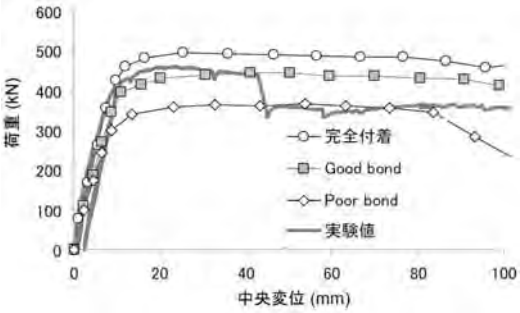


図-36　鉄筋の付着が解析結果に及ぼす影響(中桁)

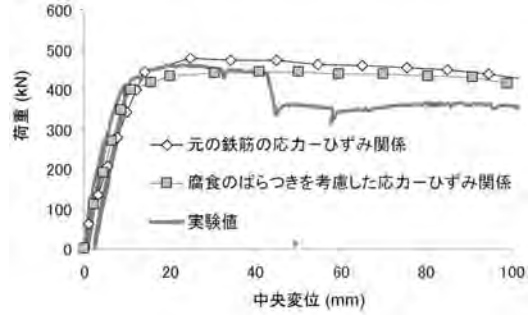


図-37　鉄筋の応力ーひずみ関係が解析結果に及ぼす影響(中桁)

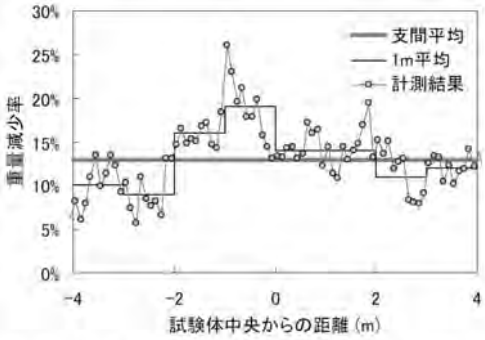


図-38　1m ごとの重量減少率の平均値と実測結果の関係(鉄筋 B)

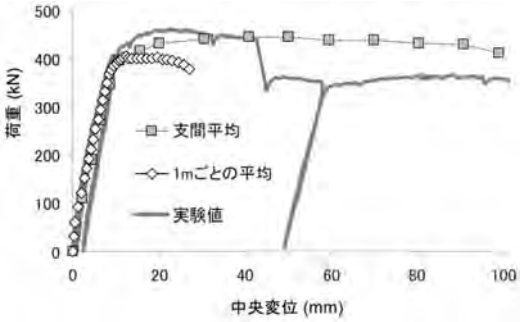


図-39　解析において腐食量に支間全長の平均値を用いた場合と 1m ごとの平均値を用いた場合の違い(中桁)

■解析結果（外桁に着目した場合）

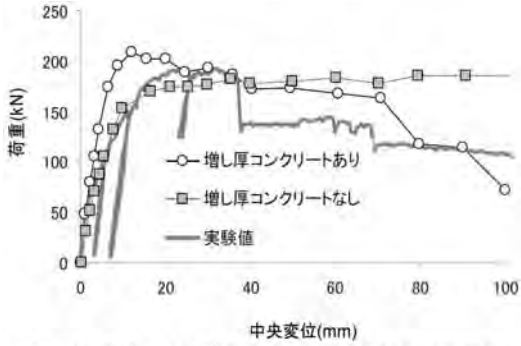


図-40　荷重ー中央変位関係による実験値と解析値の比較(外桁)

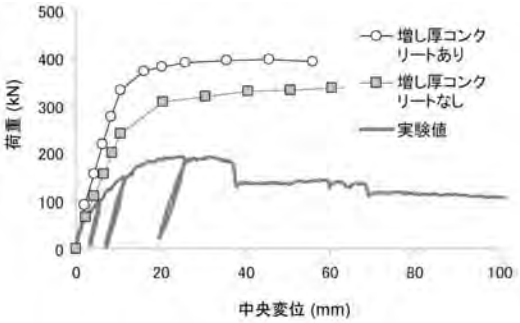
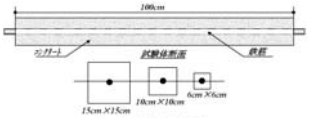
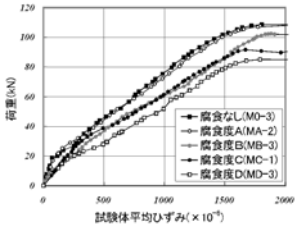
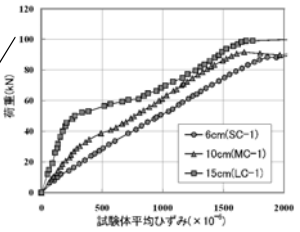
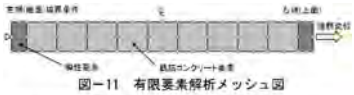
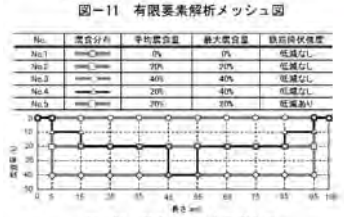
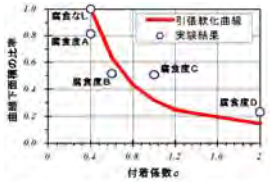
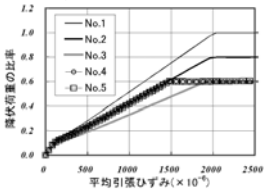
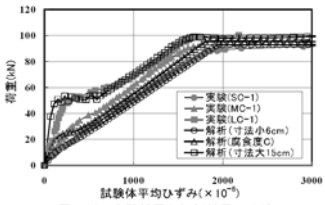


図-41　全ての重ね継ぎ手が有効に機能し，鉄筋の付着が良好である場合の解析結果（外桁）

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.13
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化
著者名	松尾 豊史，松村 卓郎，金津 努
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.33，No.1，pp.1121-1126
発行年	2011 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリートの両引き実験に基づき，腐食程度や腐食ひび割れが鉄筋とコンクリートの材料特性や付着特性に及ぼす影響を評価した上で，有限要素解析に用いる鉄筋腐食に伴う材料劣化のモデル化を行っている． 平均腐食量0～20%までの範囲における両引き実験結果に対して，シミュレーション解析を行った結果，本研究で提案されている材料劣化の力学モデルが，鉄筋コンクリートの荷重 - ひずみ関係に関する両引き実験の結果の剛性や鉄筋の降伏荷重などを概ね評価可能であることを明らかにしている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	鉄筋の腐食程度に応じて，鉄筋の力学特性（降伏強度・弾性係数）を低下させている． また，コンクリートの材料劣化として腐食ひび割れに伴う初期引張ひずみ，鉄筋とコンクリート間の付着劣化を腐食度に応じて付着パラメータにより考慮している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	**●載荷実験**  図－1　試験体の仕様 表－1　材料試験結果 (a) コンクリート 圧縮強度 (N/mm²) 32.5 ／ 割裂引張強度 (N/mm²) 3.15 ／ ヤング係数 (kN/mm²) 24.4 (b) 鉄筋 降伏強度 (N/mm²) 395 ／ 引張強度 (N/mm²) 584 ／ ヤング係数 (kN/mm²) 187 FEM 解析で使用した値 表－2　実験ケース 試験体寸法（かぶり）／ 通電時間（時間）／ 試験体名称 10cm×10cm (4cm)：0 MO-1～3；4 MA-1～3；8 MB-1～3；48 MC-1～3；96 MD-1～3 6cm×6cm (2cm)：48 SC-1～3 15cm×15cm (6.5cm)：48 LC-1～3 表－3　目視による鉄筋腐食度の区分 腐食度／腐食状態 腐食なし：腐食を認めず A：点錆び程度のお面的な腐食 B：全体に表面的な腐食 C：浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食 D：断面欠損の明らかな著しい腐食  (a) 腐食程度の影響(かぶり 4cm)  (b) 断面寸法の影響(腐食 48 時間) 図－4　荷重と試験体平均ひずみの関係の比較 ・腐食度 A から D へ進行すると， →テンション・スティフニング効果が小さくなる． ・断面寸法が大きくなると， →テンション・スティフニング効果が大きくなる． **●有限要素解析**  図－11　有限要素解析メッシュ図  図－12　解析ケースと腐食分布 ・載荷実験に基づく材料劣化の力学モデル →ヤング係数の低下は鉄筋断面積を平均腐食量に基づき低減で評価 →鉄筋の降伏強度は最大腐食量に基づき評価 →ひび割れ発生に伴うコンクリート強度低下を引張ひずみで考慮． →鉄筋-コンクリート間の付着劣化は付着パラメータ C で考慮．  図－10　付着係数と腐食度との対応関係  図－13　パラメータスタディの解析結果  図－14　実験結果と解析結果の比較 ●力学モデルの妥当性確認 ・図 13 より No.4 と No.5 の結果が概ね対応 →腐食分布一様でない場合には，剛性は平均腐食量 ●解析モデルの妥当性確認 ・大略的な傾向は捉えている． →テンション・スティフニング効果や降伏荷重等を本モデル化で評価可能．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.14
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	著しい塩害を受けて劣化した道路橋 PC 上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析
著者名	上原子 晶久，岩城 一郎，鈴木 基行
ジャーナル名	土木学会論文集 E2，Vol.67，No.3，pp.333-350
発行年	2011 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	汎用有限要素解析コードを用いて，塩害劣化の著しい実道路橋 PC 上部工の耐荷性状の評価を試みたものである．検討の結果，対象構造物は供用開始後約 32 年で約 24%程度の終局耐力の低下が生じることが確認され．更に，PC 鋼材の腐食が過度になると，終局破壊モードがコンクリートの圧壊から鋼材破断に変化することで変形性能が著しく低下する可能性が示されている．また，劣化した桁が上部工の片側に偏重すると構造性能上不利になることも明らかとされている．
解析手法の概要	3 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	腐食による PC 鋼材の影響は，平均質量減少率に基づいて断面減少と機械的性質の低下を考慮している．ただし，配力鉄筋やせん断補強鉄筋については腐食の影響を考慮していない．また，コンクリートの劣化は無視し，付着劣化の影響も無視している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	■解析モデルの概要

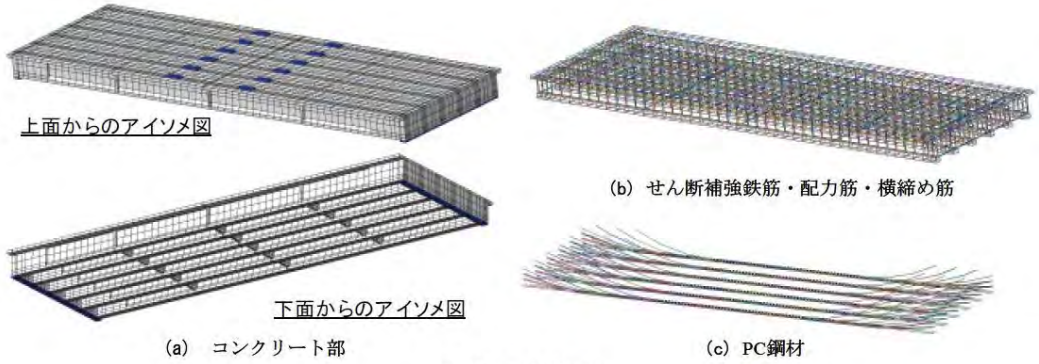


図-16　要素分割図

★適用した有限要素

コンクリート要素：8 節点アイソパラメトリック要素，鋼材要素：トラス要素（埋込鉄筋要素）

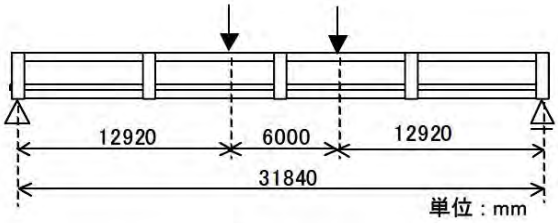


図-17　解析上の載荷方法

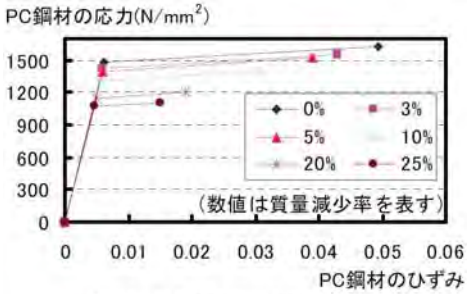
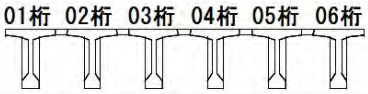


図-13　質量減少率ごとのPC鋼材の応力とひずみとの関係

表-5　解析ケース

解析ケース	内容
Case1	健全時
Case2	1994年の劣化をモデル化
Case3	2008年の劣化をモデル化
Case4	01桁と06桁が最劣化*，他桁は健全
Case5	03桁と04桁が最劣化，他桁は健全
Case6	01桁と02桁が最劣化，他桁は健全



*最劣化の桁には，Case3における05桁と同一のPC鋼材腐食性状を適用した

●腐食した PC 鋼材の応力－ひずみ関係

・バイリニアモデルで表現．降伏強度や破断強度等は質量減少率に依存するモデル．

・破断ひずみ到達後は応力ゼロまで漸減．

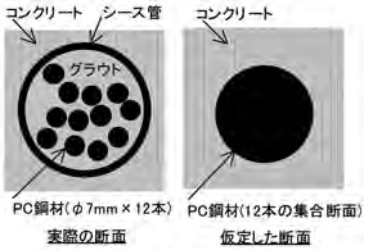


図-5　PC鋼材の集合断面としてのモデル化

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

■解析結果および考察（CASE1～CASE3）

表-6　解析結果の一覧

解析ケース	降伏荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	健全時(Case1)との比		破壊モード
			降伏	終局	
Case1	8196	8998	1.00	1.00	圧壊*
Case2	7944	8702	0.969	0.967	圧壊*
Case3	6414	6836	0.783	0.760	破断**
Case4	7041	7342	0.859	0.816	破断**
Case5	7021	7330	0.857	0.815	破断**
Case6	7013	7290	0.856	0.810	破断**

*圧壊：上フランジコンクリートの圧縮破壊
**破断：PC鋼材の破断

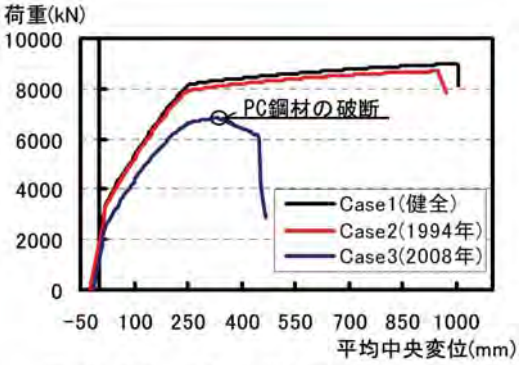


図-18　荷重－平均中央変位関係(Case1～Case3)

★CASE1 と CASE2 の比較

CASE2 は著しい鋼材腐食が 1 つの桁でしか生じていないため，CASE1(健全)とほぼ変わらない．各桁が橋軸直角方向に連結されている場合には，1 つの桁の性能が低下しても力学性能にはあまり影響を与えない．また，破壊モードにも影響を与えない．

★CASE1 と CASE3 の比較

力学性能が大きく低下し，CASE1(健全)と比較して終局荷重が 24%程度低下した．また，破壊形態がコンクリートの圧壊から PC 鋼材の破断に変化したため，変形性能も著しく損失した．

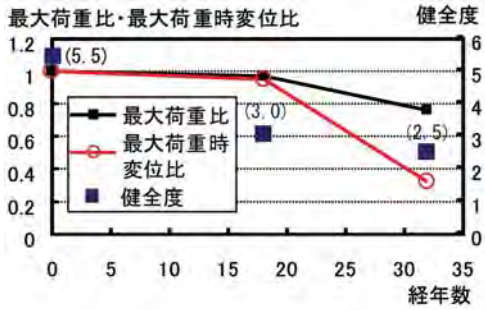


図-22　対象構造物の経年数と最大荷重比・最大荷重時変位比，並びに健全度との関係

・供用後 17 年で健全度 3.0，供用後 32 年で健全度 2.5 となった．

・劣化の状態が，健全度 3.0 程度の加速期前期であれば，最大荷重や終局変位は供用時とほとんど変わらない．

・劣化の状態が，健全度 2.5 程度の加速期後期になると，耐荷性状は塩害劣化により大きな影響を与える．

■劣化が集中する位置が構造性能に及ぼす影響（CASE4～CASE6）

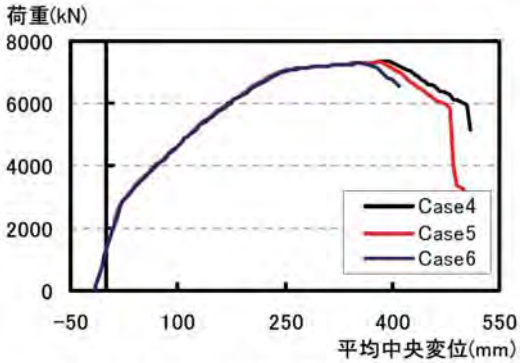


図-23　荷重－平均中央変位関係(Case4～Case6)

・劣化桁が上部工の両端に位置する CASE4，劣化桁が中央部に位置する CASE5，劣化桁が片側に位置する CASE6 の順に，最大荷重や終局変位が減少する傾向が確認された．

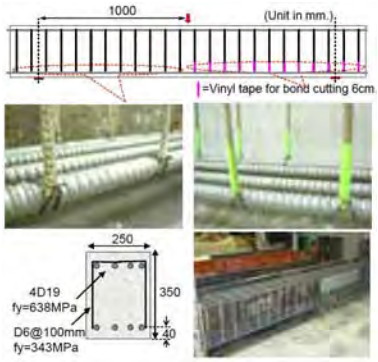
・劣化桁単体に隣接する桁の状態や劣化桁の位置によって，荷重の再配分の状況が変化するためと推定される．

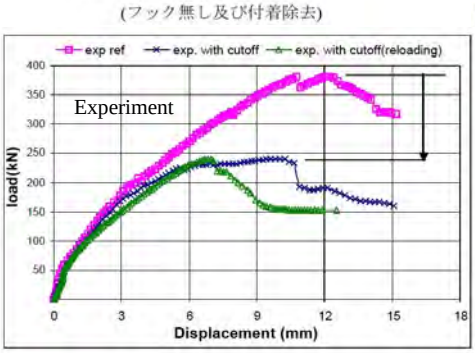
・劣化桁に隣接する桁が健全ではなく，かつ片側に集中した場合には，構造性能上，不利な方向に作用する．

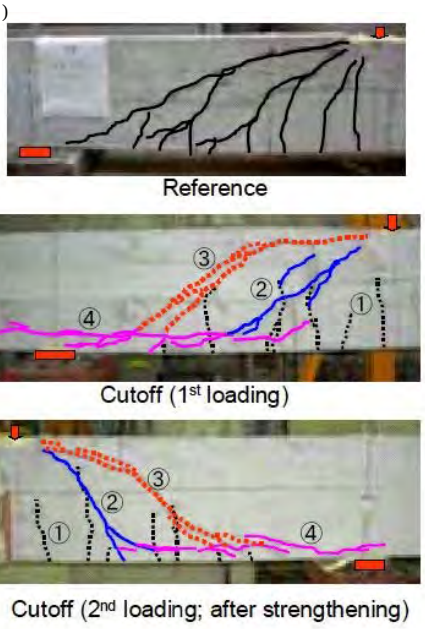
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

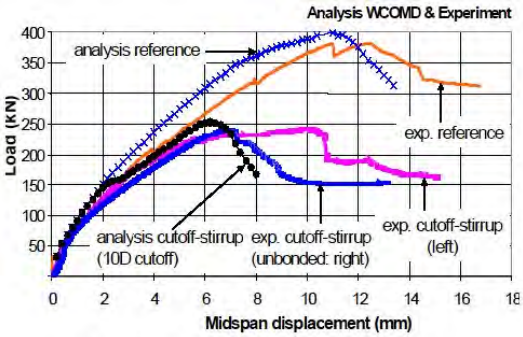
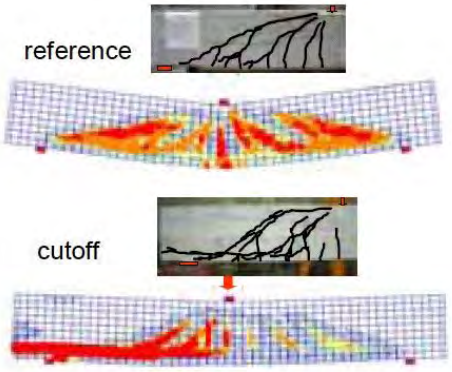
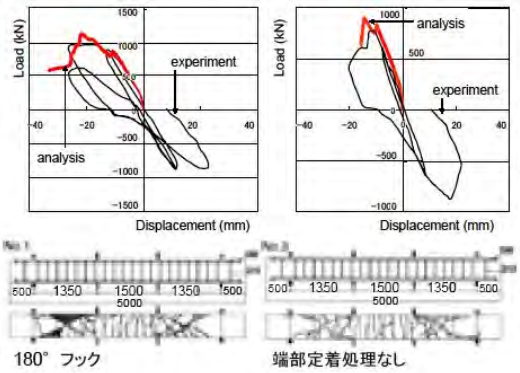
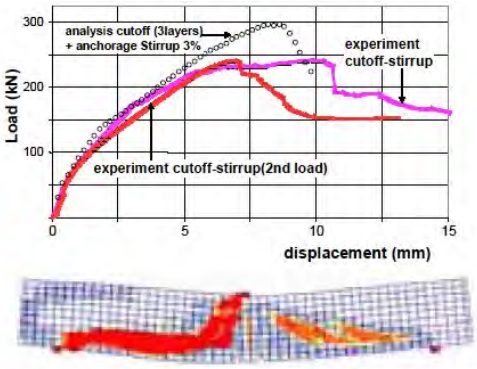
整理番号	No.15
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響
著者名	前川 宏一，中村 光，佐藤 靖彦，Kukrit Toongoenthong
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.973-978
発行年	2004 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張により鉄筋折曲げ部が破断する損傷形態に対する問題が出てきている中で、本稿ではせん断補強鉄筋の定着フックおよび端部近傍の付着を除去したはりを製作し、せん断耐力の低下と破壊モードを検証。その結果、a/d が大きく Vs 比重の高い諸元では、①鉄筋端部に定着フックなしの場合、Vs はトラス理論算定値を下回り、低下度合いは部材諸元で異なる。②定着不良部から 10D 程度を鋼材無効区間として要素鉄筋比を設定すれば、2D 非線形解析でせん断耐力を概ね評価可能。③定着不良は荷重伝達機構をトラスからアーチへ変え、主鉄筋の定着部補強も耐力に影響を及ぼす場合があることがわかった。
解析手法の概要	2 次元非線形 FEM 解析（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）(WCOMD) 検討対象：せん断補強筋端部を折り曲げた基準供試体、せん断補強筋を引張主鉄筋の重心位置まで配置したもの、さらにせん断補強筋の端部から 10D の区間にビニールテープを巻きつけ付着性能を低減させたもの、計 3 ケース。
劣化のモデル化	フックを有しないせん断補強筋の端部から鋼材径の 10 倍の区間に配置される要素内鉄筋比を 0 とする。ひび割れ発生してもせん断補強筋の応力は発生せずひび割れの進展を許容する。ひび割れを含む領域の空間平均化構成則の適用範囲を考慮し、いずれかの要素内平均ひずみの絶対値が 10%となるまで解析を実行。
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	はり供試体による実験 表－1　はり試験体諸元と基準となる耐力 (JSCE 示方書による) 図－2　せん断補強鉄筋の定着端部（フック無し及び付着除去） 図－3　実験供試体の荷重－変位関係 図－4　ひび割れの進行とせん断破壊形態 図－5　ＳＲＦ補強材による損傷せん断スパンのせん断補強（補強後の再載荷が終了） 実験は先行破壊させた側を SRF 補強材で補強し相対する側(ビニールで付着低減側)を次に破壊させた。

Properties	Values
Shear span to depth ratio (a/d)	3.2
Shear capacity of concrete (Vc)	90.7 kN
Shear capacity by stirrup (Vs)	60.2 kN
Yield moment capacity (My)	203 kN-m
Bending failure load (Py)	406 kN
Shear failure load - yield- (Pv)	302 kN







解　説 （主な成果に関する図表や解説）	数値解析評価  図－６　定着不良域を有するはりの荷重－変位関係の解析値  図－７　定着不良域を有するはりのひび割れ及び破壊状況の解析値（変位拡大率 50 倍）  図－８　塩屋らのせん断実験[4)]の数値解析 塩谷らの実験は、せん断補強鉄筋の折り曲げ部(180°フック加工または端部加工)を省き検討したものである。せん断補強鉄筋端部から 10D を定着不良領域としたが、実験・解析ともにせん断耐力の低下は小さく、トラス機構は保持されている。(解析は鉄筋個々をモデル化して行った。)  図－９　主鉄筋定着部を選択的に補強強化した場合の破壊モードと耐力

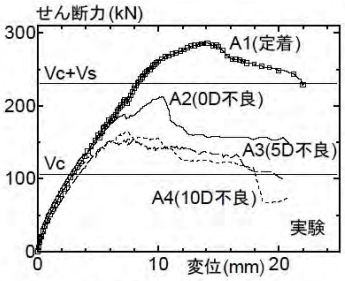
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

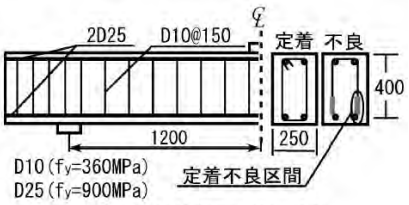
整理番号	No.16
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	鉄筋の定着不良を有する RC 梁のせん断破壊性状の評価
著者名	阿部 仁，斉藤 成彦，檜貝 勇
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.337-342
発行年	2005 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	アルカリ骨材反応によるせん断補強鉄筋の折り曲げ加工部の破断端部からの定着不良を想定した RC 梁に対して実験および解析的検討を行った結果，以下の知見を得た。(1) せん断補強鉄筋の定着不良はトラス機構の形成を妨げせん断耐力の低下をもたらす。せん断スパン比が大きいほど低下割合も大きくなる。(2) Regan らの簡易式は概ね妥当であるが、せん断スパン比の大きい場合には安全側とならない場合もある。(3) せん断補強鉄筋定着不良と主鉄筋に沿った付着低下を同時に考慮した場合，主鉄筋の定着部が健全であれば曲げ破壊に遷移する場合がある。
解析手法の概要	3 次元剛体－バネモデル(RBSM)による解析(詳細は資料 No.10 参照) 検討対象：せん断補強筋端部を折り曲げた供試体、せん断補強筋を引張主鉄筋の重心位置まで配置しせん断補強筋の端部から 0D，5D，10D の区間をビニールテープ巻き付けにより定着不良としたもの、計 4 ケース。
劣化のモデル化	離散型解析手法 剛体－バネモデル(詳細は資料 No.10 参照) 劣化モデルは定着不良区間の鉄筋を無視することにより模擬。
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	**・せん断補強鉄筋の定着不良がせん断耐力低下に及ぼす影響(表 1、図 1~図 4)** A シリーズ：鉄筋端部からの定着不良区間を変化, a/d=3

表－１　供試体諸元（A シリーズ）

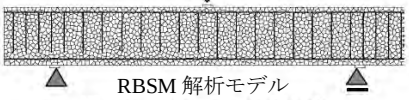
供試体	d (mm)	a/d	f'_c (N/mm^2)	定着不良区間	V_u(exp) (kN)
A1	400	3.0	27.9	定着	287
A2	400	3.0	28.7	0D	213
A3	400	3.0	28.6	5D	154
A4	400	3.0	26.2	10D	164

A1：$V_c = 105$ kN　$V_s = 119$ kN　$V_u = V_c + V_s = 224$ kN





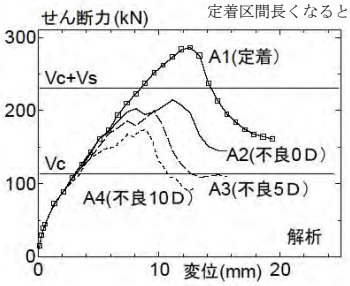
図－１　供試体概要（A1～A4）



RBSM 解析モデル

図－２　解析モデル例(A3)

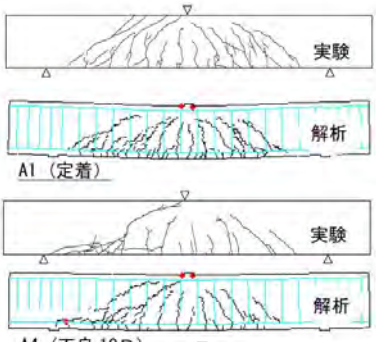
定着区間長くなると耐力低下する



定着不良を与えると Vc に近づく

図－３　せん断力－変位関係(A1～A4)

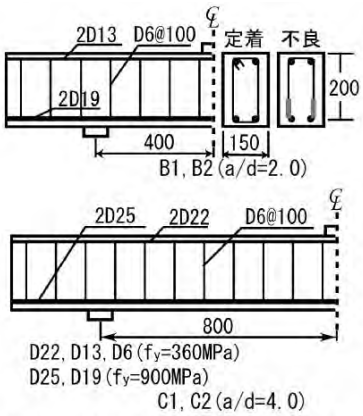
→本解析はせん断破壊性状の把握に有効である
しかし、ポストピークの荷重低下を表現できていない。



トラス機構保たれず
主鉄筋に沿った
定着破壊を伴っている。

Experiment

図－４　ひび割れ性状(A1, A4)



図－５　供試体概要(B, C シリーズ)

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

・せん断スパン比の異なる梁に対する検討(表 2、表 3、図 5~図 11)

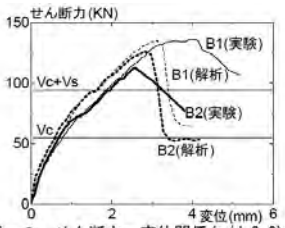
B,C シリーズ：定着不良区間 10D, a/d=2.0,4.0

表－２　供試体諸元（B，C シリーズ）

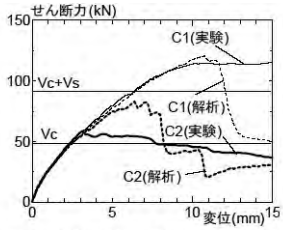
供試体	d (mm)	a/d	f'_c (N/mm^2)	定着不良区間	V_u (exp) (kN)
B1	200	2.0	37.8	定着	138
B2	200	2.0	38.3	10D	115
C1	200	4.0	35.5	定着	115
C2	200	4.0	38.4	10D	59

B1：$V_c = 54$ kN　$V_s = 40$ kN　$V_u = V_c + V_s = 93$ kN

C1：$V_c = 48$ kN　$V_s = 40$ kN　$V_u = V_c + V_s = 88$ kN



図－６　せん断力－変位関係(a/d=2.0)



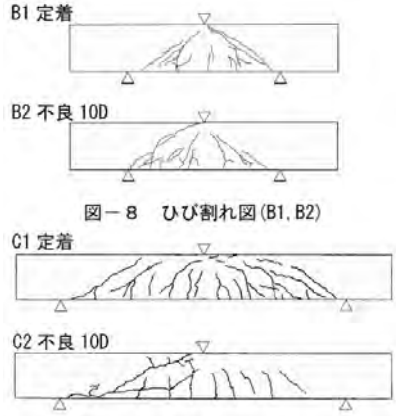
図－７　せん断力－変位関係(a/d=4.0)

せん断スパン比によらず定着不良により耐力は低下するが、低下の度合いは a/d＝4.0 の C シリーズの方が大きい。

定着不良を伴う耐力算定値は Regan らの評価式↓

表－３　耐力低下率

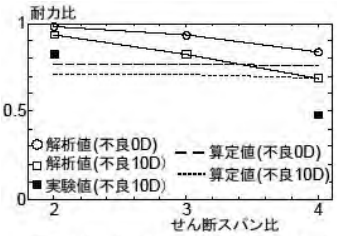
	実験値		算定値		
	V_u (exp) (kN)	耐力低下率	η	$V_c + \eta V_s$ (kN)	耐力低下率
A1(定着)	287	0.57	1.0	224	0.67
A4(10D)	164		0.38	151	
B1(定着)	139	0.83	1.0	93.3	0.71
B2(10D)	115		0.32	66.3	
C1(定着)	117	0.51	1.0	88.1	0.69
C2(10D)	59.9		0.32	61.1	



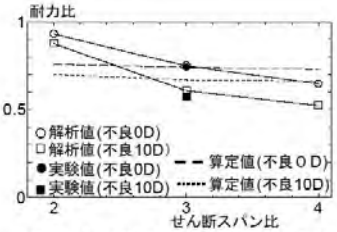
図－８　ひび割れ図(B1, B2)

図－９　ひび割れ図(C1, C2)

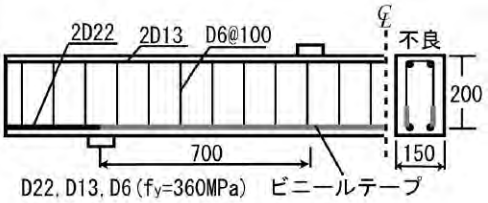
B シリーズでは斜めひび割れを横切る鉄筋が少なく、アーチ機構を形成することによりせん断補強効果が小さいため、定着不良の影響は C シリーズほどみられない。



図－10　耐力比の変化（d =200mm）



図－11　耐力比の変化（d =400mm）



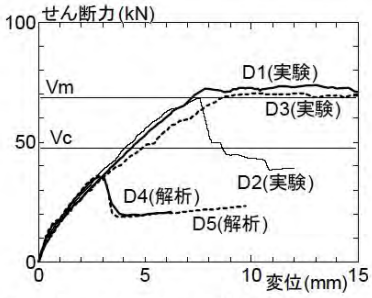
図－12　供試体概要(D3)

・主鉄筋の付着不良の影響(表 4、図 12~図 14)

D シリーズ：せん断補強鉄筋定着不良 0~10D，主鉄筋の定着は健全および不良(付着強度 30%を確認)

表－４　供試体諸元（D シリーズ）

供試体	d (mm)	a/d	f'_c (N/mm^2)	定着不良区間	主筋の付着	V_u (exp)(kN)
D1	200	3.5	35.8	定着	健全	75.2(曲げ)
D2	200	3.5	36.9	10D	健全	70.0(せん断)
D3	200	3.5	36.6	10D	不良	71.8(曲げ)

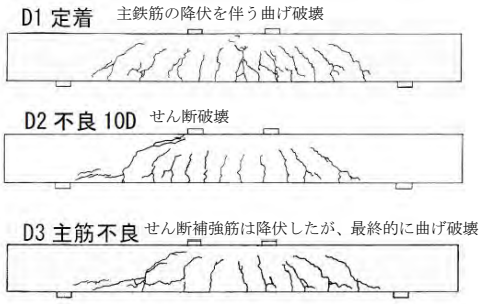


図－13　せん断力－変位関係(D シリーズ)

D4、D5 は主鉄筋の支点外の付着を低下させた。

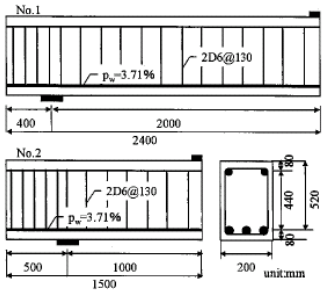
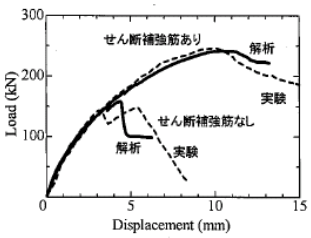
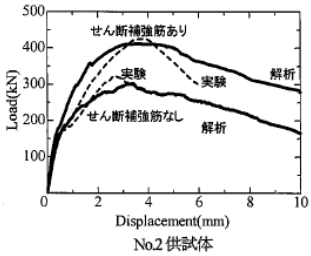
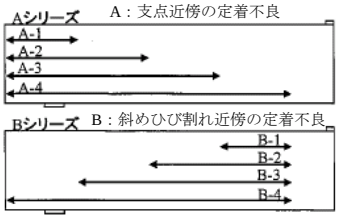
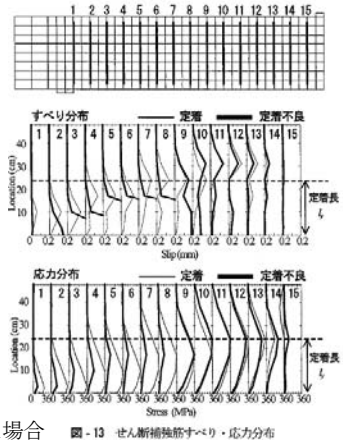
D4：せん断補強筋定着

D5：10D 区間の定着不良

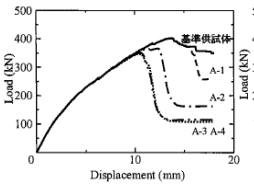


図－14　ひび割れ性状(D1～D3 実験)

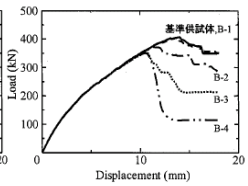
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.17
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	せん断補強筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析
著者名	澤部 純浩，上田 尚史，中村 光， 国枝 稔
ジャーナル名	土木学会論文集， Vol.62，No.2，pp.444-461
発行年	2006 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	アルカリ骨材反応に起因しせん断破壊するはりのせん断補強筋の曲げ加工部の定着不良、付着強度の相違の影響を解析的に検討した。評価式により斜め引張破壊するはり、せん断圧縮破壊するはりのいずれにおいても、定着不良を生じたせん断補強筋の効果を概ね評価できることを確認した。また、定着不良領域や付着強度、供試体寸法を解析パラメータとしてせん断破壊挙動を評価し、斜め引張破壊のはりでは引張側の支点近傍で、せん断圧縮破壊するはりでは引張側・圧縮側の載荷点近傍において生じたとき、定着不良の構造性能に及ぼす影響がみられた。
解析手法の概要	3 次元非線形 FEM 解析：離散鉄筋－分散ひび割れ－付着すべりモデル （格子等価連続体モデル：コンクリートと補強鉄筋の耐荷機構をモデル化する Main Lattice とひび割れ面におけるせん断伝達挙動 Shear Lattice を想定することにより RC 要素連続体構成式を構築、コンクリート要素内に鉄筋要素(トラス要素)を任意方向・任意本数配置できるよう定式化、鉄筋軸に沿ったすべり分布を仮定し付着特性を与える。付着強度までは島モデル式の付着強度を 0.4 倍し、その後付着応力軟化領域を仮定する)
劣化のモデル化	定着不良の場合は、離散化したトラス要素を結合せずに自由端としてモデル化。折り曲げ加工部の定着の場合は固定端とした。せん断補強筋の付着強度は最大付着応力を変化させた(定着不良の場合の拘束効果による軸方向鉄筋の付着低下は考慮せず)。
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	**・RC はり供試体** No.1：a/d＝3.85、No.2：a/d＝1.92 No.1,2：ｐ＝3.71%、せん断補強筋 D16@130mm(0.24%) No.1：斜め引張破壊,せん断補強筋の引張曲げ加工部の全数定着不良を想定 No.2：せん断圧縮破壊,せん断補強筋の引張曲げ加工部の全数定着不良を想定  図 - 10　基準供試体概要 (No.1、No.2 供試体) 表 - 4　コンクリート材料諸元および供試体耐荷力 f_c'(MPa) f_t(MPa) G_f(N/m) G_F(N/m) V_m(kN) V_c(kN) V_u(kN) No.1　22.7　2.27　41800　164　476　122　77.6 No.2　23.0　2.39　42000　165　960　197　496 V_m：曲げ耐力，V_c：斜め引張破壊耐力[9]，V_u：せん断圧縮破壊耐力[2] 表 - 5　鉄筋材料諸元 f_y(MPa) E_S(MPa) 主鉄筋　358　182000 せん断補強筋D6　356　179000 **・斜め引張破壊する RC はり供試体(実験・解析モデル)：No.1 供試体**  No.1 供試体 Regan の式における有効せん断補強筋効果割合γを用いた評価値↓ (定着不良割合β＝0.5 とした)→概ね合っている。 表 - 6　せん断耐力評価 基準供試体：JSCE式 V_c / V_c+V_s[1*]；解析値 V_c / V_c+V_s[2*] / V_c+V_s[1*]/[2*] 定着不良：評価式 l_y (mm) / γ / $V_c+\gamma V_s$[3*] (kN)；解析値 V_c+V_s[4*] (kN) / V_c+V_s[3*]/[4*] 供試体 / 有効高さ(mm) 520(全数破断)　243　389　260　400　0.97　237　0.73　350　350　1.00 520(交互破断)　243　389　260　400　0.97　237　0.86　369　374　0.99  No.2 供試体 図 - 11　荷重 - 変位関係  No.1 供試体 Case2、A,B シリーズ 図 - 14　定着不良領域  図 - 13　せん断補強筋すべり・応力分布 図 11：供試体 No1 と No.2 で実験と解析結果は概ね合っている。 図 13：基準供試体(a/d=3.8,d=520mm)の解析によるすべり-応力分布 図 14：供試体 No.1 の定着不良領域 Case1：せん断補強筋 1 本ずつ交互に全領域について定着不良を生じた場合 Case2：せん断補強筋曲げ加工部の定着不良を 1d ずつ増加させた場合

解　説
（主な成果に関する図表や解説）



Aシリーズ



Bシリーズ

図 - 15　荷重 - 変位関係

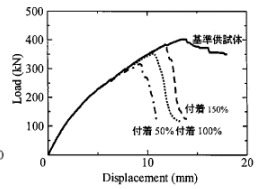


図 - 16　荷重 - 変位関係

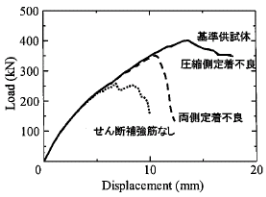


図 - 17　荷重 - 変位関係

図 15：Case2 の A シリーズ：支点近傍の影響、B シリーズ：斜めひび割れ近傍の影響(A-4 と B-4 は同じ)
図 16：全せん断補強筋の付着強度を 50%、150%とした解析との比較結果。付着強度が低くなるほど定着長は長くなり、せん断耐力は低下する考え方を支持する結果。
図 17：全せん断補強筋の圧縮側および両側曲げ加工部定着不良の影響を想定し比較。圧縮側に定着不良が生じたときは最大耐荷力、変形挙動ともに影響なし。また、両側で定着不良起こったとしても圧縮側の影響はない。

・せん断圧縮破壊する RC 供試体 No.2 の実験および解析結果では、Regan の評価式が定着不良に対し必ずしも安全側の評価を与えないことを示している(省略)。

・前段として Regan らによる定着不良の耐力評価法の検証も実施し本解析法が適用可能であることを示している(省略)。

・実構造物への適用

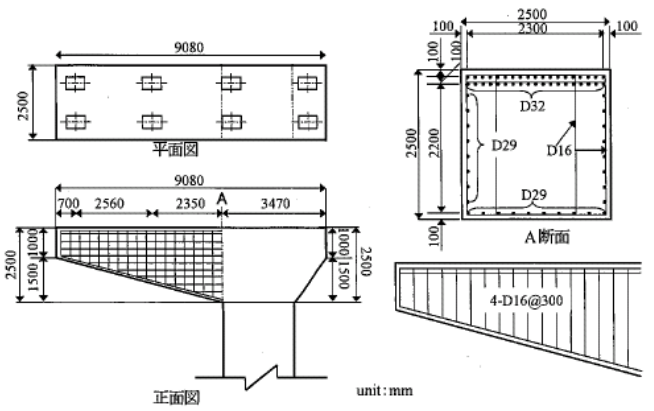


図 - 34　構造一般図および配筋図

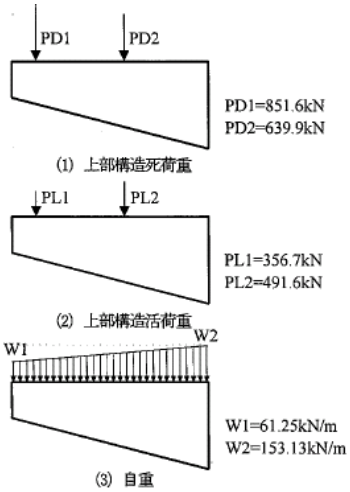


図 - 35　荷重条件

材料特性：
f'c：27.0MPa
Ec：2.65×10^4MPa
SD295 fsy：295MPa

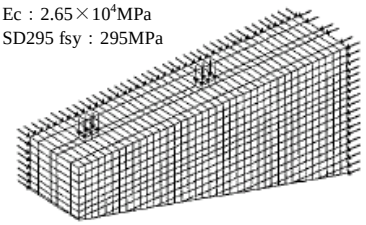


図 - 36　解析モデル

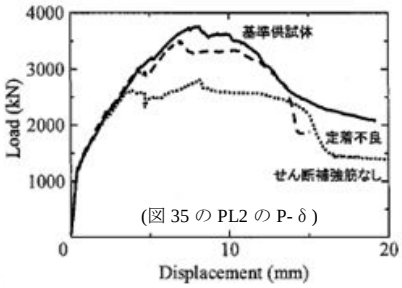


図 - 37　荷重 - 変位関係

図 34：ASR によりせん断補強筋定着不良が生じた 1972 年建設の T 型橋脚(図 35 は荷重条件)
図 36：解析モデル(張出部のみ)　ASR による先行ひび割れと荷重作用によるひび割れとの相互作用の影響、コンクリート強度の低下の影響については考慮していない(他の解析も含む)。破壊モードはせん断破壊であった。
↓
Regan らの評価式から求めたせん断補強効果割合γ＝0.86 で解析値はγ＝0.8 であったことから、実構造物の定着不良の影響評価にも適用可能である。

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.18
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	主鉄筋に定着不良を有するディープビームの耐荷性状
著者名	小倉 弘崇，細田 暁，奥野 圭一
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.655-660
発行年	2007 年
文献の要旨（ポイント・結論）	アルカリ骨材反応などから生じる主鉄筋の定着不良がディープビームの耐荷性状に与える影響を検討するため、主鉄筋の定着部における鉄筋の付着除去やフックの有無で定着不良を模擬し，せん断耐力や破壊形態を実験的に検討した。その結果，最大荷重は低下し破壊形態は変化することを確認した。最大荷重の低下度合いはフックを除去した場合よりも定着部の鉄筋付着が無い方が著しく，付着除去区間を支間内まで延長すると特に大きくなることを確認した。定着不良のモデル化を行い，FEM を用いてその影響を解析的に検討した。
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）(WCOMD)
劣化のモデル化	定着不良はオーバーラップ要素を適用し節点を接合要素で結合し付着特性を与えた。付着不良区間は鉄筋の片引き試験における端部付着劣化領域から求めた。

解　説
（主な成果に関する図表や解説）

実験(定着不良はフックの有無、鉄筋の付着除去によって模擬)

表－1　供試体諸元

供試体	付着除去 (mm)	フック	定着部補強	f'c(MPa)	斜めひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態
BH-1	0	あり	なし	28.5	159.4	381.4	せん断圧縮破壊
BH-2					166.5	397.6	せん断圧縮破壊
BN-1	0	なし	なし	28.5	159.4	331.4	主鉄筋の付着破壊
BN-2					154.0	348.8	せん断圧縮破壊
UH310-1	310	あり	なし	28.5	155.6	323.1	主鉄筋の付着破壊
UH310-2					154.6	309.5	梁端部破壊
BH-3	0	あり	なし	27.2	160.8	325.0	せん断圧縮破壊
BH-4					160.5	400.3	せん断圧縮破壊
UH460-1	460	あり	なし	27.2	70.3	205.2	せん断圧縮破壊
UH460-2					70.1	170.2	斜め引張破壊
UH310S-1	310	あり	あり	27.2	170.1	335.4	斜め引張破壊
UH310S-2					160.2	352.3	梁端部破壊

表－2　接合要素の特性値

完全付着区間

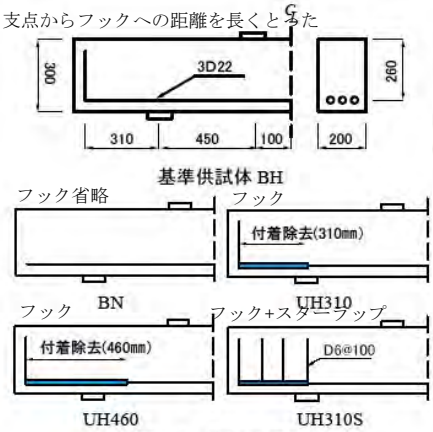
開口時		開口時	
せん断剛性	接触剛性	せん断剛性	接触剛性
N/mm²/mm	kN/mm²/mm	N/mm²/mm	kN/mm²/mm
100	100	100	100

付着除去区間

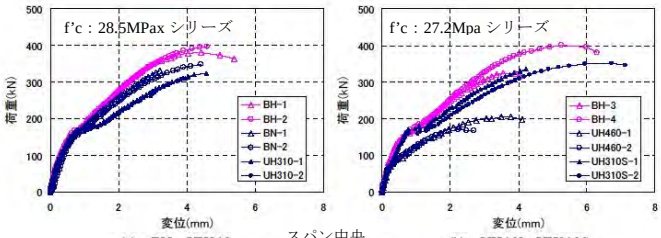
開口時		開口時	
せん断剛性	接触剛性	せん断剛性	接触剛性
N/mm²/mm	kN/mm²/mm	N/mm²/mm	kN/mm²/mm
30	60	0	0

せん断補強筋のない、主鉄筋の定着不良の条件を変化させた実験・解析による研究(梁機構よりもアーチ機構が卓越する a/d の小さいディープビーム)

支点からフックへの距離を長くとった



図－1　供試体概要

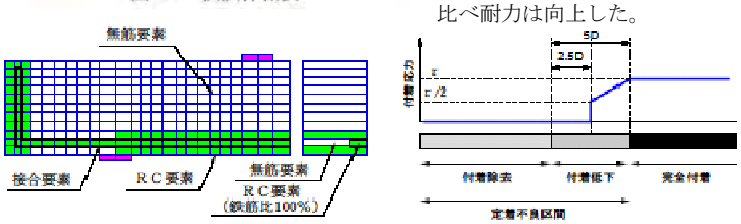


(a)　BN，UH310　　スパン中央　　(b)　UH460，UH310S

図－2　荷重変位関係

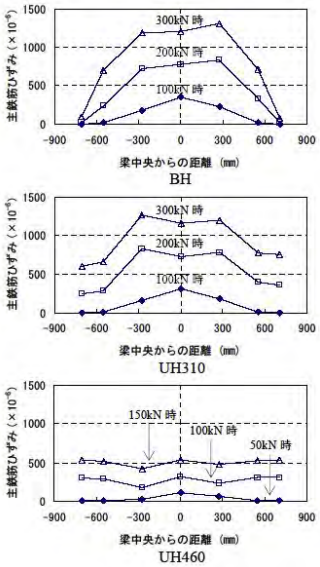
SD345　fy : 389MPa, fty : 570Mpa, E : 192GPa

図 2：定着不良では破壊荷重は低下する。フックがないことよりも鉄筋付着がない方が影響する。低下の度合いは UH460 で著しい。定着部補強をした UH310S は補強をしていない UH310 に比べ耐力は向上した。



(a)　メッシュ分割 (UH310)　　(b)　定着不良区間と付着性状

図－5　解析モデル

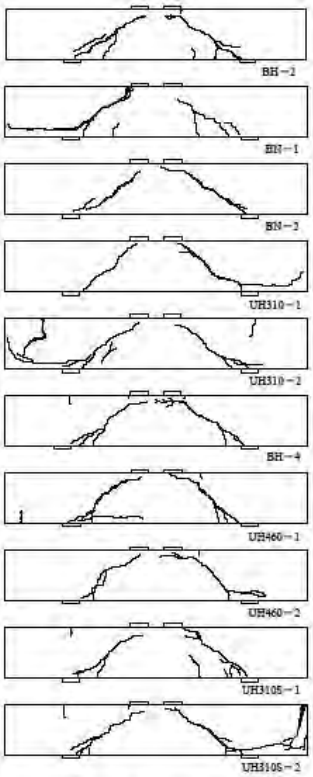


図－3　主鉄筋のひずみ分布

破壊荷重と剛性の低下

図 3：支点からフックまでに付着ある場合、折曲げ部に近づくにつれ鉄筋ひずみは小さくなる。付着ない場合、斜めひび割れ発生後、スパン外の鉄筋ひずみは上昇しほぼ一定となる。鉄筋付着を除去した UH310、UH460 のすべりは BH に比べて大きい。局所すべりに伴い載荷点から支点への圧縮力はフック折曲げ部に流れ斜めひび割れ発生以降の剛性は低下した。

解　説
（主な成果に関する図表や解説）



図−4　ひび割れ性状

主鉄筋の定着不良を有する梁の破壊形態

図 4：載荷後ひび割れ図(実験)

付着除去した場合、付着除去区間端部近傍から斜めひび割れが進展する。UH310-2 は梁端部上縁から縦にひび割れが進展：アーチ機構を保持する段階で主鉄筋端部の付着がないため、フックが引張られ端部上縁に作用する引張応力を増やした。UH310S-2 は斜めひび割れが載荷板下に潜り込み高いアーチ効果を発揮し主鉄筋に大きな引張力が作用し桁端部上面がひび割れた。BN－1 は斜めひび割れが主鉄筋に沿い桁端部にまで進展し，付着破壊によって脆性的に破壊した。BN－2 は斜めひび割れが定着部方向に進展しなかったために，タイドアーチ機構を保持し BN－1 よりも高い破壊荷重。

FEM 解析モデル(図 5)

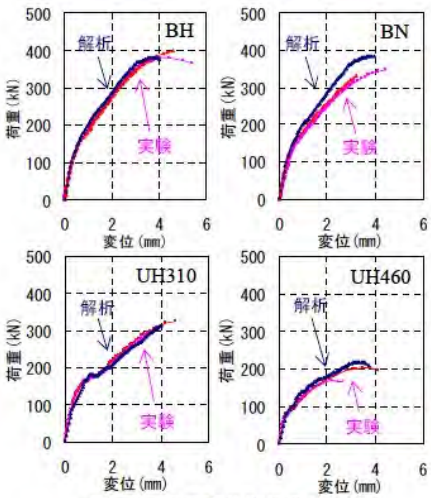
・粗い要素分割では斜めひび割れ発生以降の荷重増加を評価できなかったため、要素寸法を小さくした。これは圧縮ストラットの位置を明確化し無筋要素に生じるひずみを抑制し，本来は RC 板のひび割れ形状を考慮するための圧縮強度低下則の適用から免れるため。

・載荷板の拘束効果：載荷板直下の要素と両隣の要素の圧縮強度を他の要素の 2 倍とした。

・オーバーラップ要素：鉄筋位置の要素を奥行き方向に鉄筋比 100%の RC 要素で鉄筋を模擬した要素と無筋要素に二分し，この RC 要素に隣接する要素との境界には付着性状を制御するために接合要素を組み込んだ。

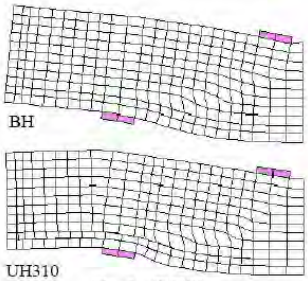
・引張軟化係数：付着のある RC 要素は 0.4。付着のない要素は破壊エネルギーより算出した値とした。

・定着不良の区間と付着性状：鉄筋の片引き試験における端部付着劣化領域から、付着除去区間および付着除去区間端部から 2.5D(D：鉄筋径)の区間は付着ゼロとし，2.5D から 5D までは付着応力が $\tau/2$ から τ に変化するような付着低下区間，5D 以降は完全付着状態とした。(表 2 参照)

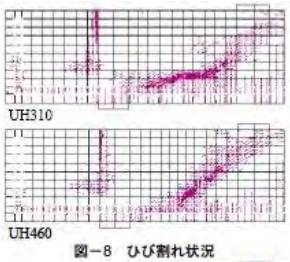


図−6　荷重変位関係の解析値

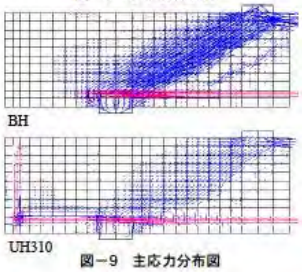
節点変位を拡大した変形図：
斜めひび割れ位置の要素が大きくせん断変形し，他の要素の変形は小さくなっており，最終的に梁中央上縁の要素が圧壊していることから，実験結果とほぼ一致している。



図−7　変形図



図−8　ひび割れ状況



図−9　主応力分布図

BH と UH310 の最大荷重の 90%における主応力の分布状態

解析結果

図 6、7、8：

・BH は斜めひび割れ発生以降のアーチ効果による荷重増加を表現。

・BN は実験値よりも高い破壊荷重。実験でのタイドアーチ的な耐荷機構になっている段階でフックが無いために主鉄筋が局所的にすべることによって剛性が低下した挙動を十分に評価できなかった。

・BN は主鉄筋端部から 5D を付着低下区間とした。この条件での付着低下区間はさらに大きく設定すべき。

・主鉄筋の付着除去の UH310 ,UH460 は斜めひび割れ発生荷重と以降の剛性低下，最大荷重は実験と符合。

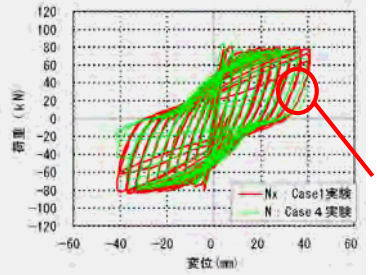
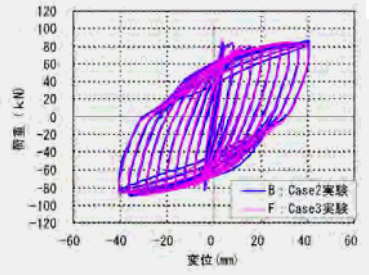
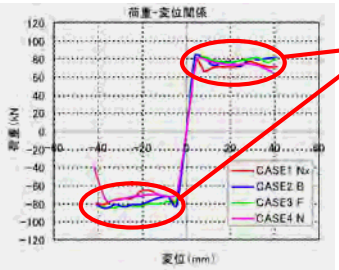
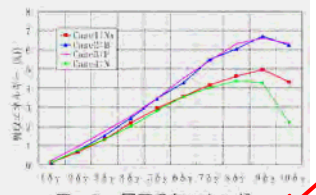
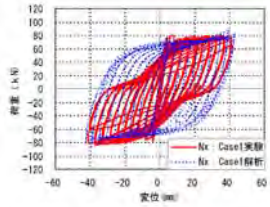
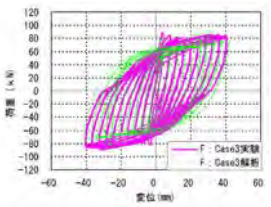
・鉄筋位置の要素が定着部から抜け出している状態が図-4 のひび割れ性状と一致，接合要素を用いた定着不良のモデル化の妥当性を示す。

・UH310 はスパン内で接合要素を介して接する要素間でずれが生じたため，耐荷機構上，荷重変位は妥当に評価できるが、斜めひび割れ発生位置は特定できなかった。

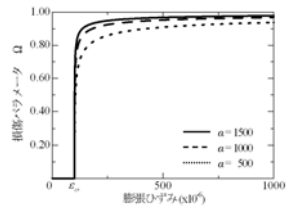
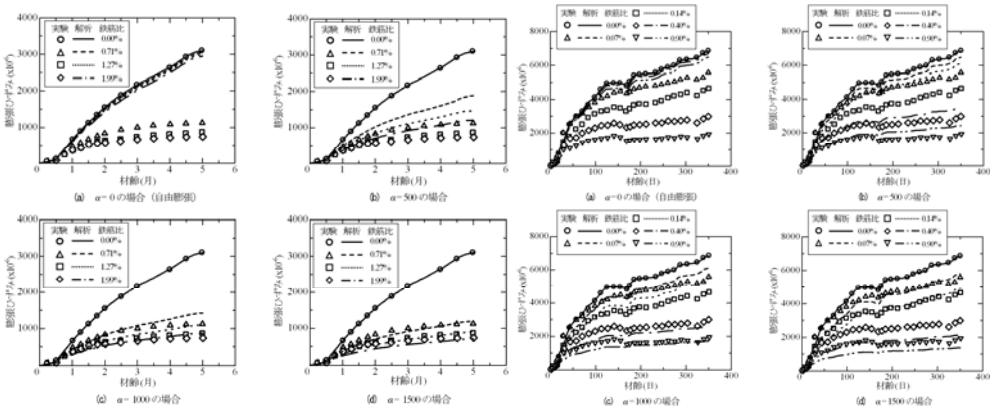
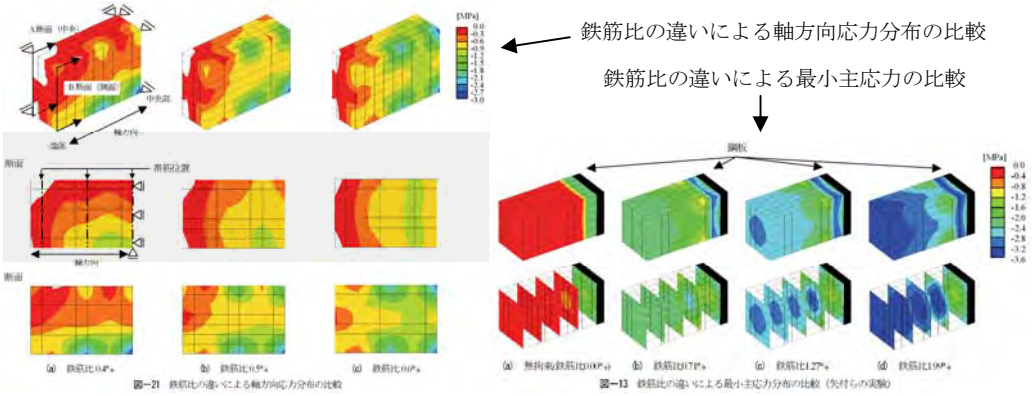
・UH460 では実験と同様、定着不良区間端部から載荷板方向に 45°に斜めひび割れが生じている。

・図 9：BH，UH310 ともに耐荷機構がタイドアーチ。BH では主圧縮応力が載荷点から支点に流れ、UH310 では主圧縮応力がフック折曲げ部側に流れている。これは，支点近傍で付着がないために，圧縮ストラットとタイである主鉄筋の結合点が支点上からフック折曲げ部に移ったからである。付着除去した UH310，UH460，UH310S で斜めひび割れ発生以降の剛性が低下しているのは，圧縮ストラットと主鉄筋の結合点がフック折曲部に移動し，圧縮ストラットの傾きが小さくなったため。

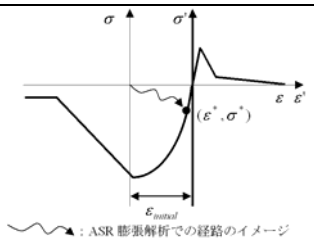
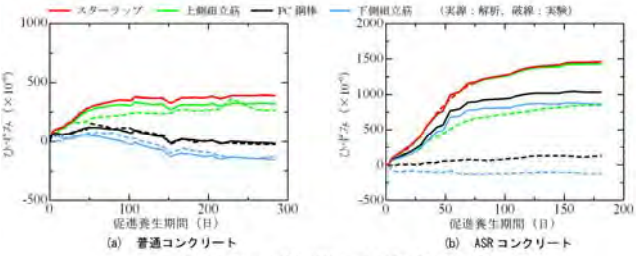
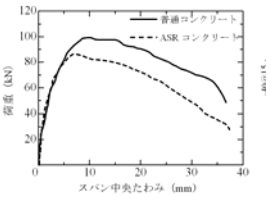
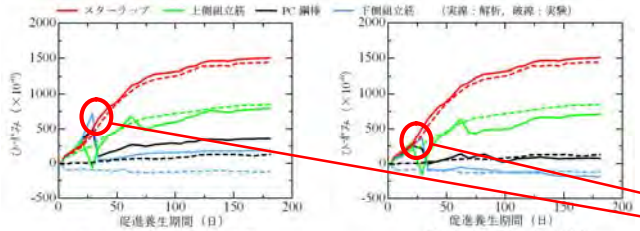
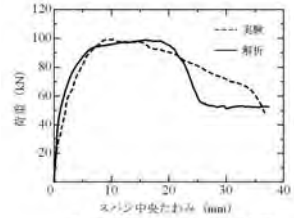
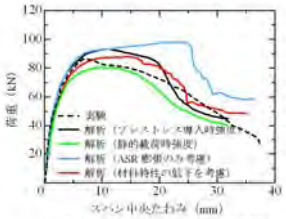
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.19
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	ASR で劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究
著者名	三浦 達夫，長田 光司，小野 聖久，池田 尚治
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.3，pp.9997-1002
発行年	2007 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	本研究は，ASR で膨張した梁試験体に対して、交番載荷試験により耐震性能の検証を行っている．その結果，ASR で劣化した部材の鉄筋ひずみは最大で 1000μ程度であり，この範囲内であれば鉄筋の破断が生じない限り，鉄筋コンクリート構造物では耐震性能の明確な低下が見られないことを示している．また，ファイバーモデルによる解析を行い，本解析法は曲げ破壊が支配的でせん断破壊が進行しない範囲において，ASR の進行した供試体に対して有効であることを明らかにした．
解析手法の概要	汎用解析コード ABAQUS （ファイバーモデル）
劣化のモデル化	コンクリート及び鉄筋の応力ーひずみ特性には、それぞれ修正 Kent&Park の構成則と Menegotto-Pinto 型（GMP モデル）の構成則を使用
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図－4 Case1, 4 実験結果 Case1～case3 供試体は±9δy でかぶりコンクリートが剥落しはじめ，±10δy まで変形しても，最大荷重の約 8 割の耐力を保持していた． Case4 においてせん断耐荷性能が低下した理由として，ASR による膨張により，初期段階から発生していたひび割れの影響により，コンクリートが負担するせん断耐力が低下していたためと考えられる． ただし，この供試体で明確なせん断破壊が進行したのは 9δy 以降であり，通常耐震設計で考慮する範囲では極めて高いじん性を確保していた．  図－5 Case2, 3 実験結果  図－6 包絡線 今回実験を行った鉄筋初期ひずみの範囲では曲げ耐力はほぼ同様となった．このことから，ASR が鉄筋の伸び性能，定着性能に与える影響はそれほど大きくなく，ASR の膨張が圧縮部のコンクリートの終局ひずみに与える影響は小さかったものと思われる．  図－7 履歴吸収エネルギー 図－8について，ファイバーモデルではせん断変形の影響を考慮していないため，Case1 においては 6δy 以降，実験結果は解析結果と異なり，逆 S 字カーブを描くようになり，せん断変形が顕著になっている． 図－9について，Case3 においては，実験結果とファイバーモデルによる解析結果との差は小さくなっていたことから，初期ひずみによるケミカルプレストレスが導入されたことによりせん断耐荷性能が Case1 と比較して向上していた．  図－8 実験－解析比較，Case1  図－9 実験－解析比較，Case3 本検討の範囲内で，ファイバーモデルによる解析結果は，ASR で劣化した鉄筋コンクリート部材について，曲げ破壊が支配的でせん断破壊が進行しない範囲では変形量及び耐力を比較的精度良く予測できることが示された．

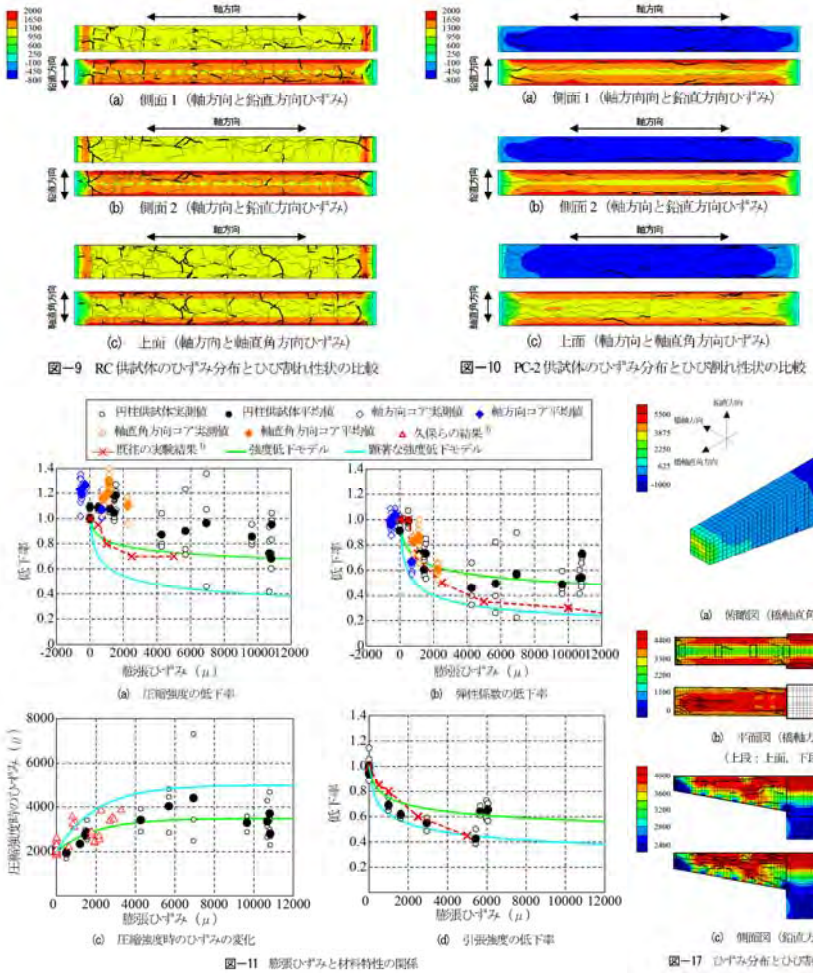
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.20
区　分	・鋼材腐食　・$\boxed{\text{コンクリート劣化}}$　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析
著者名	上田 尚史，澤部 純浩，中村 光，国枝 稔
ジャーナル名	土木学会論文集，Vol.63，No.4，pp.532-548
発行年	2007 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	ASR が生じた RC 部材の膨張予測を簡易に行うモデルを提案し， 3 次元有限要素解析に導入し，その適用性について検討している．一軸拘束供試体の解析において，鉄筋量が増えるほど ASR 膨張が抑制される挙動を精度よく評価できることを示した．多軸拘束供試体の解析においては，鉄筋曲げ加工部において，ひずみが局所化する挙動を解析的に明らかにした．提案したモデルを用いることで，ASR による膨張挙動予測と損傷評価を行うことができる可能性を示した．
解析手法の概要	3 次元有限要素解析
劣化のモデル化	ASR 膨張予測モデルとして，膨張に伴いコンクリートに損傷が蓄積されると仮定し，損傷理論に基づいた割線タイプの構成モデルを提案
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 式中の α は損傷が蓄積する度合いを決定するパラメータ 無損傷→ α =0 α が大きくなるほど，より急激に損傷が蓄積されるモデル $\Omega = \begin{cases} 0 & \varepsilon_c(t) \le \varepsilon_{cr} \\ 1-\left(\dfrac{1}{1+\alpha\sqrt{\varepsilon_c(t)-\varepsilon_{cr}}}\right) & \varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} \end{cases}$ (3) 実験結果と提案モデルを用いた解析との比較により α =500～1500 程度に設定することで ASR 膨張挙動を妥当に評価できる可能性が示された   鉄筋比の違いによる軸方向応力分布の比較 鉄筋比の違いによる最小主応力の比較

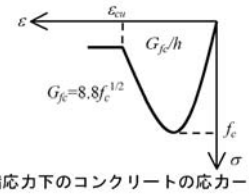
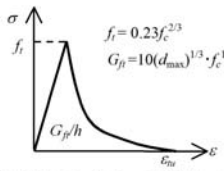
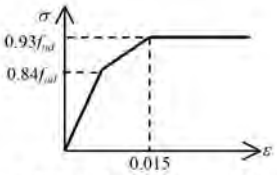
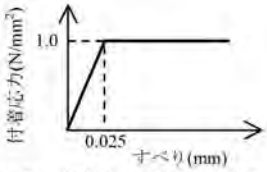
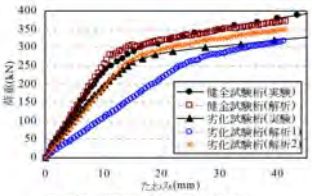
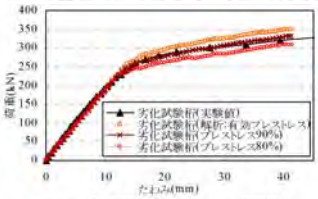
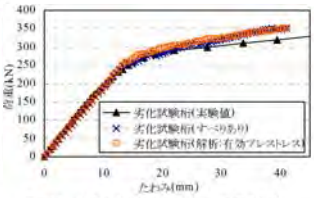
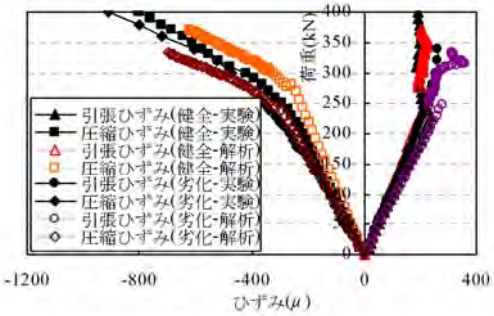
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.21
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価
著者名	上田 尚史，澤部 純浩，中村 光，国枝 稔
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1261-1266
発行年	2009 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	ASR が生じた PC 部材の構造性能評価を目的として，プレストレスによるクリープの影響を考慮した ASR 膨張モデルと，ASR によりコンクリートに生じる損傷の異方性を考慮した統合解析手法を開発し，PC はりの ASR 膨張挙動と ASR 損傷後の構造性能の評価の解析的な検討を試みた．その結果，提案した手法を用いることで，ASR 損傷を生じた PC はりの挙動を概ね妥当に評価可能となることを示した．
解析手法の概要	―
劣化のモデル化	損傷理論に基づいた割線剛性型の構成式による鉄筋拘束化の膨張予測モデル，クリープ変形を考慮，格子等価連続体モデル，ひび割れたコンクリートの引張破壊エネルギーを考慮，付着応力ーすべり関係を適用した付着要素を考慮
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 σ－ε 座標系での ASR 膨張解析の結果から得られたひずみ，応力が，新たな座標系 σ'－ε'を設けることで，荷重作用解析で用いる応力－ひずみ関係上にあるものと仮定． 図－1　ASR 膨張解析と荷重作用解析の統合時に設ける応力－ひずみ関係の仮定 普通コンクリートを対象とした結果は，PC 鋼棒ならびに上下組立筋のひずみの経時変化を精度良く捉えている．これに対して，ASR コンクリート供試体を対象とした結果からは，PC 鋼棒および下側組立筋のひずみの経時変化を過大に評価する結果となった． →クリープ変形を考慮するだけでは ASR を生じた PC はりの膨張挙動を評価することができない．  (a)　普通コンクリート　(b)　ASR コンクリート 図－3　クリープ変形解析による膨張ひずみの経時変化  図－4　荷重－スパン中央たわみ関係（実験結果） 最大荷重は 10%程度低いが，初期剛性，ポストピーク時の変形性能はほとんど低下しない  (a)　クリープを考慮しない解析　(b)　クリープを考慮した解析 図－6　ASR 膨張モデルによる膨張ひずみの経時変化 促進養生 25 日前後において，PC 鋼棒ならびに下側組立筋のひずみを過大評価しているため，さらなる検討が必要．  図－7　荷重－スパン中央たわみ関係（普通コンクリート）  図－8　荷重－スパン中央たわみ関係（ASR コンクリート）

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.22
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価
著者名	上田 尚史，中村 光，国枝 稔，前野 裕文，森下 宣明，浅井 洋
ジャーナル名	土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.67，No.1，pp.28-47
発行年	2011 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	ASR が生じた構造物の膨張挙動と損傷が構造性能に及ぼす影響を明らかにするため，実験と解析による検討を行なっている． ASR 膨張は構造物の配筋状態等の影響により方向性を持つことを示した．はり供試体から採取したコア供試体の材料特性は膨張の程度に従った異方性に影響を受けるため，コアの採取位置や方向に注意する必要が有る．ASR 膨張解析と荷重作用解析を行い，はり供試体から実構造物に至るまで ASR 損傷状況を概ね評価できることを示した．
解析手法の概要	3 次元ソリッド要素でモデル化，鉄筋，PC 鋼材は離散的にモデル化し，コンクリートとの付着を考慮
劣化のモデル化	損傷理論に基づいた割線剛性型の構成式による鉄筋拘束化の膨張予測モデル，クリープ変形を考慮，格子等価連続体モデル，ひび割れたコンクリートの引張破壊エネルギーを考慮，付着応力ーすべり関係を適用した付着要素を考慮
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 供試体に生じた ASR 損傷を概ね評価することが可能 T 型 PC 橋脚を対象とした ASR 膨張解析を行い，はり側面や上面において損傷が集中する傾向を解析的に評価可能であることを示した．ASR を生じる領域は，構造物の配筋状態などの構造的な要因により影響を受け，温度や湿度，水分供給等の環境条件によりその影響が顕在化すると考えられる．また，本研究の結果，RC 構造は ASR 膨張が比較的小さい場合においても構造性能が低下するのに対して，PC 構造は ASR 膨張に対する抑制の効果が大きく，構造性能への影響は少ないことを示した．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.23
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討
著者名	金城 和久，富山 潤，金田 一男，車谷 麻緒
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.970-975
発行年	2012 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	ASR 劣化したプレテンション方式の PC 構造物に関して，耐荷性能評価に数値解析を適用する検討は十分でない．このため，本研究では ASR 劣化したプレテンション方式 PC 桁の耐荷性能評価に関する既往の実験結果に対して，非線形有限要素解析の適用性を検討し，弾性係数及びプレストレスの低下を考慮することで，数値解析的な評価が可能であることを示した．
解析手法の概要	非線形有限要素法解析，収束計算はニュートンラプソン法
劣化のモデル化	ASR 劣化によるひび割れを考慮したコンクリートの弾性係数を求めるため，均質化法を利用した方法を提案．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図－7　圧縮応力下のコンクリートの応力－ひずみ関係  図－8　引張応力下のコンクリートの応力－ひずみ関係  図－9　PC 鋼材の応力－ひずみ関係  図－10　付着応力－すべりモデル  図－12　荷重－たわみ曲線（中央）  図－13　劣化試験桁での荷重－たわみ曲線  図－14　すべりを考慮した荷重－たわみ曲線  図－15　荷重－ひずみ曲線（中央） ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価を数値解析的に行う際，コンクリートコアの材料試験から得られる弾性係数を用いて解析を行うと，実験結果を再現できないため，弾性係数に関しては何らかの処置・工夫が必要である．本研究では ASR 劣化した弾性係数の低下を均質化法を用いて求め，線形領域では実験結果を再現することができた．しかし，非線形領域では実験値より同一たわみ時の荷重が高めの値を示したため，ASR 劣化に起因したひび割れによるプレストレス低下を併せて考慮する必要があった．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.24
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	凍結融解作用により劣化したRCはり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価
著者名	林田 宏，佐藤 靖彦，小林 竜太，吉田 安寿
ジャーナル名	コンクリート工学年次論文報告集，Vol35，No.1，pp.901-906
発行年	2013 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	凍結融解作用により劣化した RC はり部材を対象に，分散鉄筋－分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素解析による構造性能評価を行い，実験結果との比較を行ったものである． 検討の結果，圧縮領域に著しい凍害劣化を受け，せん断剛性が低下している RC はりや，引張領域に凍害劣化を受け，鉄筋とコンクリートとの付着特性が低下している RC はりでは，実験結果と解析結果に差異が生じるが，せん断剛性や付着特性の低下が軽微な RC はりでは，降伏に至るまでの剛性や破壊形式，最大荷重の評価が可能であること等が明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	劣化はコンクリートの圧縮強度を低減し，かつバラツキを考慮することで表現している．ここで，圧縮強度は，供試体の超音波伝播速度の測定を行い，別途検討した超音波伝播速度と圧縮強度の相関関係から設定している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	

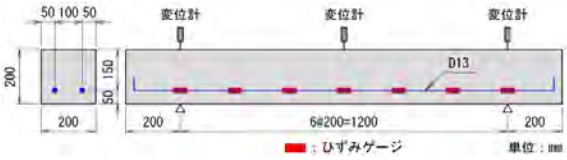


図-1　供試体の形状寸法および配筋状況

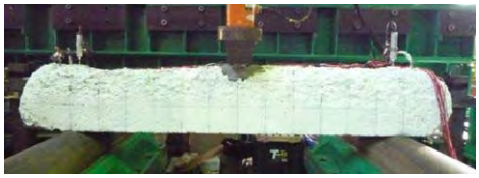


写真-1　載荷試験状況

表-1　供試体名称，実験・解析結果等一覧

供試体概要			実験		解析		荷重比	
名称	劣化面	劣化深 (mm)	(a) P_y (kN)	(b) P_u (kN)	(c) P_y (kN)	(d) P_u (kN)	c/a	d/b
N	－	－	43.7	68.9	43.6	48.8	100%	71%
C5	圧縮側	50	44.4	68.1	41.9	44.3	94%	65%
C10	圧縮側	100	43.0	46.4	40.3	41.6	94%	90%
C15	圧縮側	150	-	32.6	36.6	38.3	-	117%
T10	引張側	100	49.7	68.9	43.2	48.0	87%	70%
T15	引張側	150	41.3	43.0	42.0	44.2	102%	103%

※P_yは降伏荷重，P_uは最大荷重

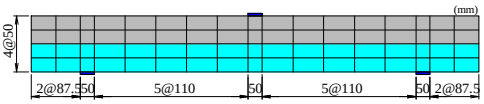


図-2　有限要素モデル（要素分割図）

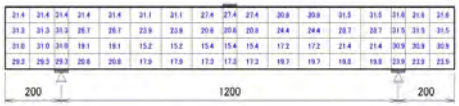


図-5　圧縮強度分布の一例（供試体 T10 の場合）

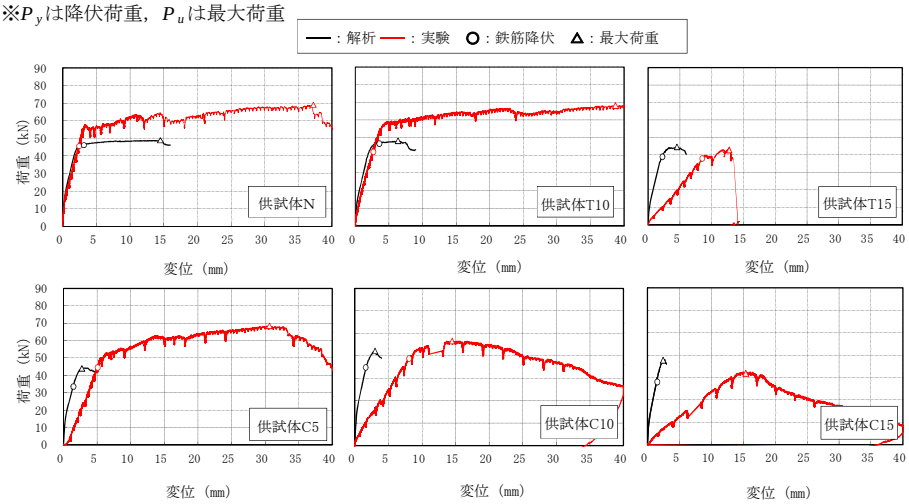


図-8　各供試体の荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果の比較

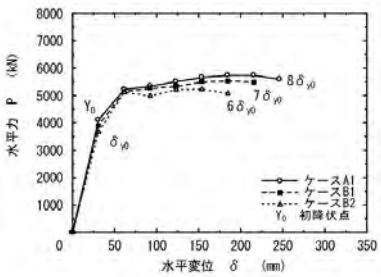
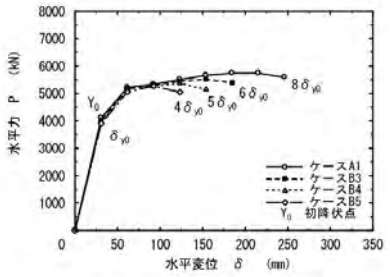
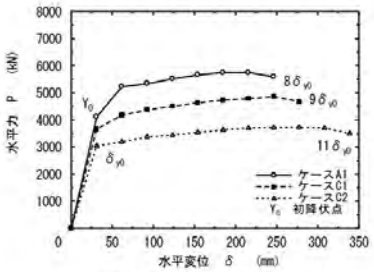
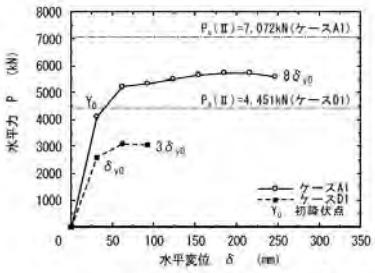
材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.25
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会報告書
著者名	日本コンクリート工学協会 コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会
ジャーナル名	―
発行年	2004 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	コンクリートと鋼材の劣化が構造物の力学性能に及ぼす影響，および，そのモデル化に関する調査研究結果が取りまとめられている．
解析手法の概要	非線形有限要素解析全般
劣化のモデル化	―
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	この委員会報告書では，性能照査型設計を支援するためのツールの 1 つとして構造物の長期性能を定量評価するための設計支援ソフトウェアを開発することを将来の目標として，そのために解決すべき問題点の抽出と，具体的な劣化機構を考慮した構造物の各種性能の経時変化シミュレーションモデルの枠組みを作るための調査研究が行われている． コンクリート内部の鋼材腐食とそれに伴ってコンクリートに発生する腐食ひび割れの関係を定量化するためのモデル化, 鉄筋腐食が RC 部材の力学特性に及ぼす影響を定量化するために必要となる腐食鉄筋の力学的性質，鉄筋腐食が生じたコンクリートの引張剛性などの解析モデルについて既往の研究成果を基に整理されている．また，鉄筋腐食や凍害によるコンクリートの劣化を考慮した RC 部材の構造特性の数値解析例や，建築物の耐震診断において，材料劣化が構造物の耐震性能に及ぼす影響を表す指標として導入されている「経年指標」について紹介されている． 以下，報告書（該当箇所）の目次を示す． 5.　材料劣化が生じた構造物の力学性能とそのモデル化 5.1　はじめに 5.1.1　構造物の長期性能予測における構造問題の位置づけ 5.1.2　材料劣化が生じた構造物の力学性能に関する研究の現状について 5.1.3　種々の材料劣化現象が構造物の力学性能に及ぼす影響 5.1.4　各種構造物解析法と各法において考慮される材料劣化 5.1.5　本章の内容 5.2　腐食ひび割れモデル 5.3　鉄筋腐食が RC 部材の力学性能に及ぼす影響 5.3.1　概要 5.3.2　腐食した鉄筋の力学特性 5.3.3　鉄筋腐食が生じた RC 中のコンクリートの引張剛性 5.3.4　腐食した鉄筋とコンクリートとの付着性状 5.3.5　鉄筋腐食が生じた RC 部材のひび割れ分散性状 5.4　材料劣化を考慮した RC 部材の構造性能評価 5.4.1　はじめに 5.4.2　有限要素解析におけるひび割れ及び鉄筋のモデル化 5.4.3　3 次元有限要素解析による損傷評価 5.5　材料の経年劣化が建築構造物の部材性能に及ぼす影響 5.5.1　経年劣化した部材および建築物の強度・変形性能に関する調査研究 5.5.2　耐震診断における経年劣化の評価法

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.26
区　分	・鋼材腐食　・コンクリート劣化　・定着不良　・その他（）
文献タイトル	地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計 ～設計と照査の現状と将来展望～
著者名	土木学会コンクリート委員会　耐震設計研究小委員会
ジャーナル名	土木学会コンクリート技術シリーズ No.67
発行年	2005 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	材料劣化は，部材の耐力や変形などの基本的力学性能を算定する上での前提条件として極めて重要な問題である．たとえば，鋼材腐食の影響はコンクリートと鉄筋の付着劣化を招き，平面保持などの照査の前提条件に影響を及ぼす． 材料劣化は少なからず部材の剛性，耐力，変形性能および破壊モードに影響を与えることが明らかになったとされている．また，地震作用による構造物の応答に大きく影響する可能性があるため，材料劣化等の影響を考慮した照査が望ましいと考えられている．
解析手法の概要	（詳細情報の記載なし）
劣化のモデル化	（解析例ごとに異なる）
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	本委員会では，設計 WG，照査技術 WG，時間軸 WG が設立され，特に時間軸 WG では，構造物の供用期間中に起こりうる，大小地震を含むあらゆる外的作用に対して構造物の性能を維持管理も含めて時間軸上で照査するための手法の確立に向けて，環境作用に伴う劣化が構造性能に及ぼす影響，補修・補強後の構造性能，照査用地震動の要件等の検討などが行われている． 経時変化として材料劣化に着目して，材料劣化が部材特性に与える影響について，解析的アプローチでの現状評価と検討について示されている．以下，報告書（該当箇所）の目次を示す． 4.2　経時劣化が部材性能へ及ぼす影響に関する検討 4.2.1　はじめに 4.2.2　材料劣化と部材性能 4.2.2.1　はじめに 4.2.2.2　各種構成材料の構成則の変化 4.2.2.3　鉄筋コンクリート梁の力学的特性の試算 4.2.2.4　まとめ 4.2.3　材料劣化による部材性能変化の評価 4.2.3.1　解析的アプローチ 4.2.3.2　実験的アプローチ 4.2.4　まとめ ■材料劣化と部材性能について せん断破壊先行型および曲げ破壊先行型の 2 シリーズの RC 梁部材を対象にして，材料劣化を考慮した各種構成則の変化が RC 構造物の耐力，変形および破壊形式に及ぼす影響に関してパラメトリック解析が行われた． (1)コンクリートの圧縮特性の劣化は部材剛性，最大耐力，破壊モードに影響する (2)ひび割れ面での応力伝達特性の劣化は，せん断耐力の低下をもたらす可能性がある (3)軸方向鉄筋の付着特性は，RC 梁の部材剛性や最大荷重に影響を与え，特に定着は破壊形式に影響を及ぼす ■材料劣化による部材性能変化の評価について より発展性・拡張性に富む材料の力学モデルに立脚した非線形解析を対象に，経時劣化や損傷を有するコンクリート構造物の構造応答評価に関する既往の研究成果について言及されている．材料劣化や損傷の解析的なモデル化方法や，実験挙動が良く再現できた解析事例（腐食鉄筋を有する RC 梁のせん断破壊解析，ASR に伴う帯筋の定着不良域を設定した RC 梁のせん断破壊解析）が紹介されている．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.27
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	材料劣化を考慮した既設 RC 橋脚の耐震性能に関する一検討
著者名	名古屋 和史，石川 義樹，前原 康夫
ジャーナル名	第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.69-76
発行年	2006 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	RC 橋脚の耐震性能の一つの指標となる曲げ変形性能に着目して，材料劣化に関する圧縮強度，付着強度，鉄筋有効断面積のパラメータの変化が与える影響を 2 次元非線形 FEM 解析により検討．付着強度の低下によりじん性が低下，主筋の断面欠損により最大水平耐力が大きく低下することがわかった．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）
劣化のモデル化	コンクリートの劣化を圧縮強度の低下で，付着強度の低下を引張軟化係数 c により考慮している．また，鉄筋腐食は有効断面の減少により考慮している．ただし，腐食領域は一様に発錆すると仮定し，腐食膨張による初期ひび割れが考慮できないため無視している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	 図-4　コンクリートの圧縮強度の低下による影響  図-5　付着強度の低下による影響  図-7　主鉄筋の断面欠損による影響  図-10　鉄筋とコンクリートの劣化による影響 **【圧縮強度の低下による影響（図-4）】** ・ f'c の低下とともに最大水平耐力およびじん性が低下 ・ 健全(A1)とじん性の比較をすると，f'c が 25%低下する(B1)と 87.5%，f'c が 50%低下する(B2)と 75%に低下．f'c と終局ひずみの減少が影響． **【付着強度の低下による影響（図-5）】** ・ f'c と比べてじん性が著しく低下 ・ 健全(A1)とじん性の比較をすると，引張軟化係数 c が 25%低下する(B3)と 75%, c が 50%低下する(B4)と 62.5%, c が 75%低下する(B5)と 50%に低下．ひび割れ発生後の引張応力の急激な低下が影響． **【主鉄筋の断面欠損による影響（図-7）】** ・ 大幅な最大水平耐力が低下を引き起こす．健全(A1)と比較をすると，断面欠損率 50%(c2)では，65%に耐力低下． ・ じん性は増加．主鉄筋比が帯鉄筋比と比べて相対的に減少したため． **【鉄筋およびコンクリートの劣化が与える耐震性能の変化（図-10）】** ・ f'c が 50%低下，付着強度 75%低下，主鉄筋および帯鉄筋の断面欠損率 50%にした場合，健全(A1)と最大水平耐力を比較すると 54%に低下．図-7 から主鉄筋の影響が 65%であることから残り 11%が f'c と付着強度の影響．じん性の低下の要因は付着強度の低下．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.28
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能
著者名	土木学会コンクリート委員会 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会
ジャーナル名	土木学会コンクリート技術シリーズ No.71
発行年	2006 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	本報告書では，コンクリート中の鉄筋腐食をはじめ，凍害，ASR などの材料の劣化を取り上げられており，それらの構造物の耐力や変形性能などの力学性状に及ぼす影響に焦点を当てていることに特徴がある． 材料の劣化した構造物の構造性能（力学性能）を評価しようする場合，ただ一つの解を見つけることにこだわらず，複数のシナリオを設定することが重要との結論に至っている．つまり，劣化の空間分布やばらつきなど，実際の劣化状況を正しくモデル化することは困難であることから，いくつかの解析モデルを設定し，その時点で考え得るシナリオを複数求め，その後の外観調査や点検結果との比較を通じてシナリオを特定し，かつ解析モデルをも絞り込むことにより，構造性能を正確に把握することができるということである．
解析手法の概要	非線形有限要素法解析，剛体バネモデル解析
劣化のモデル化	（解析例ごとに異なる）
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	本報告書の第Ⅲ章では，材料劣化が生じた構造物の構造解析において，材料劣化の影響を考慮するモデルおよび解析法について検討が行われ，その留意点について取りまとめられている．材料劣化と言っても劣化現象の種類，劣化の形態や程度によって構造性能への影響が異なるため，材料劣化の考慮方法は使い分けなければならない可能性がある．これらの問題について包括的に取り組み，現状技術により何がどの程度予測可能であるのか，今後の研究課題は何かを明らかにされている．また，環境作用が補修補強部材の力学特性に及ぼす影響の現状把握もされている．以下，報告書（該当箇所）の目次を示す． 第Ⅲ章　材料劣化を考慮した構造解析 1.　材料の劣化した構造物の性能評価における解析上の留意点 1.1　コンクリート構造物に対する非線形有限要素解析の基本的な取扱い 1.1.1　ひび割れの扱い 1.1.2　平均化構成則 1.1.3　鉄筋のモデル化 1.1.4　付着のモデル化 1.2　損傷を生じた構造物の非線形有限要素解析における留意点 1.2.1　材料のモデル化に関する留意点 1.2.2　付着作用のモデル化に関する留意点 1.2.3　劣化・損傷領域の設定に関する留意点 1.2.4　構造細目に関する留意点 2.　塩害による劣化が構造性能に及ぼす影響 2.1　鋼材腐食の生じた部材の構造性能に関する研究事例 2.1.1　鋼材腐食の生じた部材の構造性能に関する実験的研究事例 2.1.2　鋼材腐食の生じた部材の構造解析事例 2.2　数値解析による耐荷力評価 2.1.1　解析の概要 2.1.2　せん断破壊する RC はりの解析 2.1.3　曲げ破壊する RC はりの解析 3.　ASR による劣化が構造性能に及ぼす影響 3.1　数値解析上の留意点

	3.2　鉄筋破断がせん断破壊するはりの挙動に及ぼす影響解析 3.2.1　せん断補強筋曲げ加工部の破断を模擬した実験の解析 3.2.2　せん断補強筋曲げ加工部の破断の影響解析 3.3　鋼材で拘束された場合の ASR 膨張量予測解析 3.3.1　ASR 膨張予測モデル 3.3.2　コンクリートおよび鉄筋モデル 3.3.3　拘束コンクリートに対する ASR 膨張解析 4.　環境作用が RC 部材の補修・補強効果に及ぼす影響 4.1　はじめに 4.2　連続繊維シートの物質等価抵抗性 4.3　連続繊維シート補強 RC 部材の力学性能に及ぼす各種環境作用の影響 4.4　鉄筋腐食した RC 部材の連続繊維シートによる補強効果 4.4.1　Tension Stiffening 効果に関する検討 4.4.2　付着割裂性状に関する検討 4.5　温度が連続繊維シートの付着特性に及ぼす影響 4.6　アルカリ骨材反応作用が連続繊維シートの付着特性に及ぼす影響 4.7　まとめと今後の展望 4.7.1　4.1 節から 4.4 節に関すること 4.7.2　4.5 節から 4.6 節に関すること

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.29
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	コンクリート構造物の耐震設計～時空間における設計の課題と近未来像～
著者名	土木学会コンクリート委員会 329 委員会
ジャーナル名	土木学会コンクリート委員会，コンクリート技術シリーズ No.81
発行年	2008 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	鉄筋腐食を有する曲げ破壊先行型 RC 柱の正負交番載荷実験を対象として，2 次元の FEM 解析および RBSM 解析を用いて検討を行っている．検討の結果，本解析では腐食のばらつきを考慮していないが，①質量減少率が 10%程度までの範囲では耐荷性状はほとんど変化しないこと，②鉄筋腐食が生じた部材では鉄筋破断が早期に生じる可能性があること等，が明らかとされている．
解析手法の概要	2 次元非線形有限要素解析，2 次元剛体バネモデル解析（RBSM）
劣化のモデル化	FEM : 腐食ひび割れと鉄筋断面積の減少を平均腐食量から設定し，付着の低下をコンクリートの引張軟化曲線で考慮している． RBSM : 離散鉄筋でモデル化しており，腐食鉄筋の力学モデルは健全な場合と同じであるが，質量減少率に従って鉄筋断面積を減少させている．また，付着強度の低下を考慮している．
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	供用期間中の構造物は，荷重作用は常に複合して作用し，かつ環境作用による材料劣化も現実に生じている場合が多い．特に，材料劣化に関しては，部材の耐力や変形等の力学性能に大きな影響を与え，平面保持等の照査の前提条件が成立しなくなる．こうした観点から，環境作用による材料劣化の影響が RC 構造の力学性能に与える影響を解明するために，鉄筋腐食が生じた RC 部材の載荷実験と数値解析検討を行った． 以下，報告書（該当箇所）の目次を示す． 2. 材料劣化を考慮した性能照査に関する検討 2.1 概要 2.2 実験的検討 2.2.1 はじめに 2.2.2 はり部材を対象とした正負交番載荷実験 2.2.3 柱部材を対象とした正負交番載荷実験 2.2.4 既往の実験結果に関する考察 2.3 解析的検討 2.3.1 はじめに 2.3.2 鉄筋腐食柱部材の FEM 解析 2.3.3 鉄筋腐食柱部材の RBSM 解析 2.3.4 まとめ 2.4 まとめ 以下，まとめで述べられている事項を示す． (1) 鉄筋腐食を考慮したコンクリート構造物の耐震性能照査を行うにあたっては，腐食程度，腐食ひび割れ発生位置とその程度（ひび割れ幅）を考慮する必要がある． (2) 鉄筋の腐食程度は，例えば質量減少率等の指標により評価可能であるが，ある長さの範囲で平均した質量減少率では精度の高い性能評価は困難である． (3) 鉄筋腐食が生じたコンクリート構造物の耐震性能を検討する場合には，耐荷性やじん性といった保有性能に及ぼす鉄筋腐食の影響の他に，鉄筋腐食による構造物・部材の破壊モードの変化についても着目する必要がある． (4) FEM や RBSM を用いた数値解析により，材料劣化による影響を考慮した柱部材の耐荷性状を概ねシミュレート可能である．

材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート

整理番号	No.30
区　分	・鋼材腐食　　・コンクリート劣化　　・定着不良　　・その他（）
文献タイトル	続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能
著者名	土木学会コンクリート委員会 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会
ジャーナル名	土木学会コンクリート技術シリーズ No.85
発行年	2009 年
文献の要旨 （ポイント・結論）	本報告書は，材料劣化を生じたコンクリート構造物の構造性能に関する共通試験が実施されたことや，調査結果に基づいて実構造物の構造性能評価が行われていることに特徴がある． 検討対象には鉄筋腐食の生じた構造物に限定し，非線形解析による構造性能評価について詳細に検討が行われている．非線形解析の精度を向上させるためには，劣化のモデル化方法に関する検討を進めるだけではなく，モデル化に必要な情報の取得方法に関する検討も重要である．
解析手法の概要	非線形有限要素法解析，剛体バネモデル解析
劣化のモデル化	（解析例ごとに異なる）
解　説 （主な成果に関する図表や解説）	本報告書の第 V 章では，検討の対象を構造性能に最も大きな影響を及ぼすものと考えられる鉄筋腐食に限定して，平均化構成則における鉄筋腐食のモデル化方法や，材料の劣化した部材の挙動が構造系全体に及ぼす影響について等が検討されている．また，性能評価の流れや解析に必要な点検方法等を整理し，非線形解析を利用した構造物の構造性能評価方法についてとりまとめられている．以下，報告書（該当箇所）の目次を示す． 第Ｖ章　非線形解析による鉄筋腐食の生じた構造物の構造性能評価 1.　はじめに 2.　鉄筋腐食のモデル化 2.1　平均化構成モデルにおける鉄筋腐食の取り扱い 2.1.1　鉄筋腐食の平均化構成則の取り扱い 2.1.2　鉄筋腐食時のコンクリートの平均化構成則の取り扱い 2.1.3　部材断面内で鉄筋腐食量に偏りが生じている場合の断面減少のモデル化 2.1.4　まとめ 2.2　鉄筋の腐食分布の取り扱い 2.2.1　検討の概要 2.2.2　腐食分布のモデル化の影響 2.2.3　最小断面積の大きさと位置の影響 2.2.4　鉄筋の腐食分布を考慮した構造性能評価方法 3.　鉄筋腐食の生じた部材の解析 3.1　BM7 供試体の解析 3.2　RC スラブ供試体の解析 3.2.1　劣化 RC 床版概要 3.2.2　載荷試験概要 3.2.3　解析概要 3.2.4　解析結果 3.2.5　付着・定着の影響に関する検討 3.2.6　解析のまとめ 4.　鉄筋腐食の生じた構造系の解析 4.1　PC 上部工の解析 4.1.1　解析の概要 4.1.2　PC 上部工の健全度と鋼材腐食量・機械的性質との関係 4.1.3　解析方法

	4.1.4　計算結果と考察 4.1.5　本解析の課題や留意事項 4.2　RC ボックスカルバートの解析 4.2.1　検討内容の概要 4.2.2　解析の概要 4.2.3　実験の概要 4.2.4　シミュレーション解析 4.2.5　モデル化手法の適用性評価 5.　非線形解析を利用した鉄筋腐食の生じた構造物の構造性能評価方法 5.1　総則 5.1.1　適用の範囲 5.1.2　性能評価の原則 5.1.3　用語の定義 5.2　非線形解析を利用した構造性能評価の方法 5.2.1　一般 5.2.2　性能評価の手順 5.3　点検 5.3.1　一般 5.3.2　評価手法選定のための点検 5.3.3　非線形解析を実施するための点検 5.4　評価および判定 5.4.1　一般 5.4.2　鉄筋腐食の生じた構造物のモデル化 5.4.3　鉄筋腐食の生じた部材のモデル化 5.4.3.1　一般 5.4.3.2　有限要素によるコンクリートのモデル化 5.4.3.3　有限要素による鉄筋のモデル化 5.4.3.4　有限要素による付着のモデル化 5.4.3.5　形状のモデル化 5.4.4　非線形解析による性能評価および対策の要否の判定 5.5　記録 6.　まとめと今後の課題 以下，まとめで述べられている事項を示す. (1) 鉄筋腐食のモデル化方法 　鉄筋の定着が確保されていること，および破壊形態には大きな変化が見られないことを前提に，平均化構成モデルにおける鉄筋腐食の取り扱いについて検討を行った結果，最大腐食量に応じて鉄筋比を減少させることにより耐荷力を概ね評価できることが確認された．また，鉄筋腐食のばらつきに関する検討では，鉄筋の断面減少の分布を比較的簡易にモデル化することにより，耐荷力や変形性能を精度よく評価できることが確認できた. (2) 鉄筋腐食の生じた部材および構造系の解析 　劣化性状に関する情報が十分に得られ，劣化機構を適切にモデル化することができれば，非線形解析により耐荷性状を精度よく評価できるものと考えられる. (3) 非線形解析を利用した構造物の構造性能評価方法 　構造性能の評価にあたって，まず評価対象となる要求性能を明確に設定することにより，要求性能に応じた点検，および評価手法に応じた点検の実施が可能となる．また，点検結果に基づいて，対象となる要求性能の照査を確実に行うことのできる評価手法を選定することが重要である.

付録 2　投稿論文集

投稿論文集一覧

年　度	主催者	大会名	論文題目	頁番号
H20年度	土木学会北海道支部	年次技術研究発表会	有限要素法によるRC梁部材の静載荷実験に関するシミュレーション解析	付-2-3
H21年度	土木学会	全国大会	非線形有限要素法によるRC梁部材のシミュレーション解析（その１）	付-2-7
			非線形有限要素法によるRC梁部材のシミュレーション解析（その２）	付-2-9
	土木学会北海道支部	年次技術研究発表会	有限要素法によるRC部材の一軸引張挙動に関する各種モデル化の影響	付-2-11
H22年度	土木学会	全国大会	分散ひび割れ型FEMによるRC部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響	付-2-15
			離散ひび割れ型FEMによるRC部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響	付-2-17
	土木学会北海道支部	年次技術研究発表会	分散ひび割れ型FEMによるRC梁の非線形曲げ挙動に関する各種モデル化の影響	付-2-19
H23年度	ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ技術協会	ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄの発展に関するｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ	非線形有限要素法によるRC部材の変形・破壊シミュレーション解析	付-2-23
	日本ｺﾝｸｸﾘｰﾄ工学会	ｺﾝｸﾘｰﾄと補強材の付着挙動と付着構成則に関するｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ	RC部材の一軸引張有限要素解析における付着構成則の感度と妥当性評価	付-2-27
H25年度	日本ｺﾝｸｸﾘｰﾄ工学会	ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次大会	凍結融解作用により劣化したRCはり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価	付-2-37

有限要素法による RC 梁部材の静載荷実験に関するシミュレーション解析

Simulation Analysis on Static Loading Tests of Reinforced Concrete Beam Members by Finite Element Method

(株)ドーコン　○正会員　関下　裕太　(Yuta SEKISHITA)
(株)ドーコン　正会員　小林　竜太　(Ryuta KOBAYASHI)
北武コンサルタント(株)　正会員　宮本　真一　(Shinichi MIYAMOTO)
JIP テクノサイエンス(株)　正会員　星野　淳一　(Junichi HOSHINO)
(株)ファルコン　坂本　智明　(Tomoaki SAKAMOTO)
(株)メイセイ・エンジニアリング　吉永　文彦　(Fumihiko YOSHINAGA)

1. はじめに

近年，コンクリート構造物の非線形解析技術の進歩は目覚しく，それまで困難とされていたせん断破壊挙動やポストピーク挙動も解析的に評価可能になりつつある．また，汎用構造解析コードの普及や計算機性能の飛躍的な向上によって，実務レベルにおいても設計あるいは照査の際の実用的なツールとして利用されるケースも多くなり，今後は更にその利用が増えるものと考えられる．

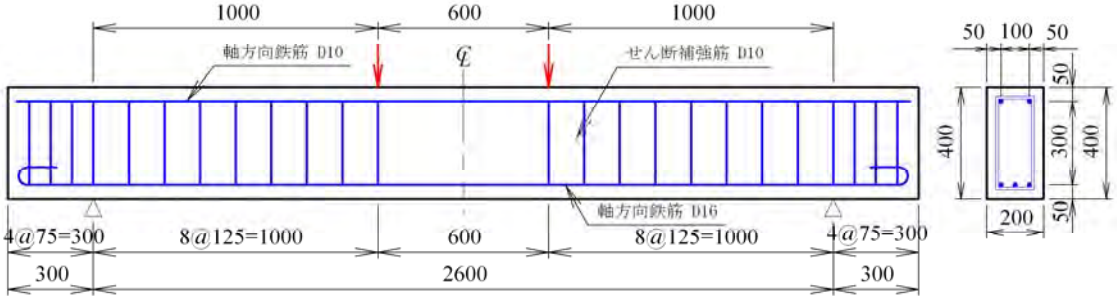
しかしながら，コンクリート構造物の非線形解析は，材料構成モデルやその組合せ，非線形解析特有の求解法や収束計算法等，数値解析結果が多くの因子に影響を受けるといった問題があり，現時点ではそれを一般化することが困難であることから，解析結果等の妥当性評価は個々の技術者の判断に委ねられているのが現状である．

このような背景より，本検討では，コンクリート構造物の非線形解析における数値解析精度の現状を把握することを目的として，設計実務者による RC 梁部材の静載荷実験を対象としたシミュレーション解析を実施した．なお，本検討では，市販されている代表的な 3 つの汎用構造解析コードを利用して，実験結果を事前に公開しないブラインド解析として実施することとした．

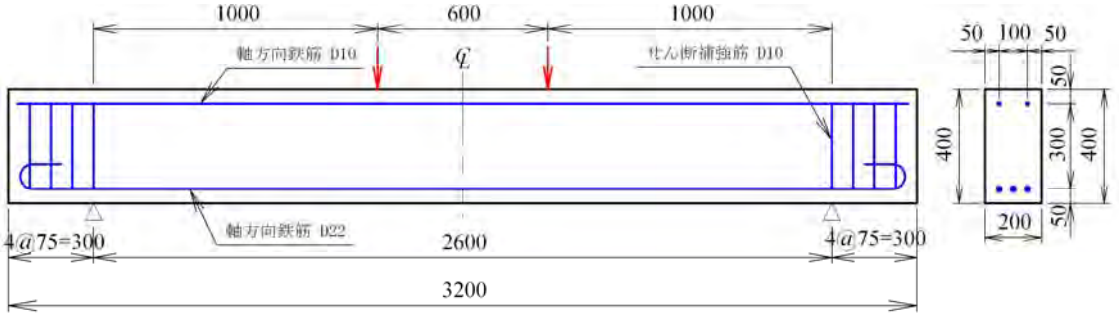
2. 実験概要

2. 1　供試体の概要

図－1 には，本解析で対象とした計 2 体の RC 梁供試体の形状寸法および配筋状況を示している．実験供試体は，断面寸法 200×400mm，スパン長 2600mm，せん断スパン比 2.86 とした複鉄筋の矩形断面 RC 梁である．No.1 供試体は曲げ引張破壊を想定して断面設計を行い，等曲げ区間にはせん断補強筋を配置しないものとした．一方，No.2 供試体は斜め引張破壊を想定して部材設計を行い，軸方向鉄筋の定着区間を除いてせん断補強筋は配置しないものとした．**表－1** には，供試体の基本諸元一覧を，**表－2** には，土木学会コンクリート標準示方書【設計編】に準拠して算定した設計曲げ耐力，設計せん断耐力およびせん断余裕度を一覧にして示している．



(a) No.1 供試体（曲げ破壊型）



(b) No.2 供試体（せん断破壊型）

図－1　RC 梁供試体の形状寸法および配筋状況

2．2　載荷実験の概要

写真－1 には，静的載荷実験の状況を示している．本実験では，最大載荷荷重 1,000kN のローゼン・ハウゼン型の載荷試験機を用いた対称 2 点集中荷重載荷とした．なお，荷重伝達の局所化を回避するために，載荷点およびローラー支点部には鋼製の載荷板および支持板を配置した．測定項目は，載荷点荷重，変位（載荷点変位，スパン中央部変位，支点部変位）およびひずみ（コンクリート，主鉄筋，せん断補強筋）とした．また，載荷実験時には目視によってひび割れの発生や進展状況を確認するとともに，梁側面に発生したひび割れをトレースした．**表－3**，**4** には，それぞれコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している．なお，本実験は 2008 年 5 月 26 日に北海道大学工学部において実施されている．

3．各解析者が適用した解析手法の概要

表－5 には，各解析者が適用した解析手法の仕様を一覧にして示している．表より，本検討で用いられた解析手法の構成は，いずれの解析者も非線形有限要素法による平面応力場問題とした取り扱った 2 次元解析である．使用した解析コードは，解析者 A は DIANA，解析者 B は MSC.Marc，解析者 C は WCOMD であり，解析対象はいずれの場合も構造および荷重条件の対称性を考慮したハーススパンモデルとしてモデル化を行っている．

適用した有限要素タイプは，解析者 A，B はコンクリート要素には 8 節点平面応力要素を，鉄筋要素には埋め込み鉄筋要素あるいはトラス要素を用いている．埋め込み鉄筋はコンクリート要素の節点位置を意識することなく配置できる特徴を有しているが，軸力にのみ抵抗するためトラス要素と等価な有限要素である．一方，解析者 C も 8 節点平面応力要素を用いているが，鉄筋とコンクリートの特性を重ね合わせた RC 要素を用いているため鉄筋は直接にモデル化していない．また，コンクリートのひび割れモデルは，いずれの解析者も分散ひび割れモデルに分類される固定ひび割れモデルを採用している．

なお，境界条件および荷重載荷法は同じであるが，収束計算法に関しては各解析者で相違が見られる．

表－1　供試体の基本諸元一覧

供試体	断面寸法 (mm)	せん断ｽﾊﾟﾝ比	主鉄筋比 (%)	せん断補強筋比(%)
No.1	200×400	2.86	0.85	0.55
No.2			1.66	－

表－2　供試体の設計耐力一覧

供試体	設計曲げ耐力 Pu(kN)	設計せん断耐力 Vu(kN)	せん断余裕度 α (=*Vu* / *Pu*)
No.1	138.2	348.4	2.52
No.2	253.2	127.2	0.50

写真－1　静的載荷実験の状況

表－3　コンクリートの力学的特性値

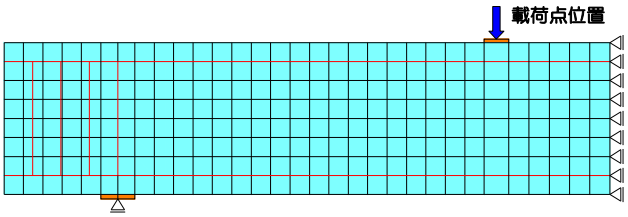
圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
25.7	2.0	25.9	0.2

表－4　鉄筋の力学的特性値

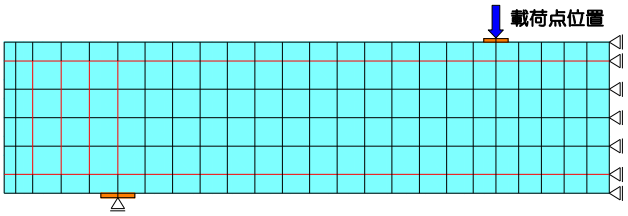
鉄筋径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D10	355.0	179.0	0.3
D16	356.0	177.0	
D22	361.0	187.0	

表－5　各解析者が適用した解析手法の仕様一覧

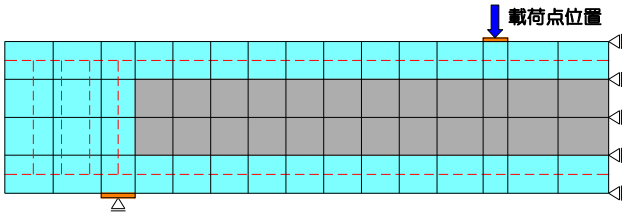
項　目	解析者 A	解析者 B	解析者 C
解析次元	2 次元	2 次元	2 次元
解析手法	非線形有限要素法	非線形有限要素法	非線形有限要素法
解析コード	DIANA	MSC. Marc	WCOMD
解析範囲	ハーフスパン	ハーフスパン	ハーフスパン
要素タイプ	コンクリート：平面応力要素 鉄筋：埋め込み鉄筋要素	コンクリート：平面応力要素 鉄筋：トラス要素	平面応力要素 （鉄筋コンクリート(RC)要素）
境界条件	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束
荷重載荷法	強制変位（変位増分法）	強制変位（変位増分法）	強制変位（変位増分法）
ひび割れモデル	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）
収束計算法	割線剛性法	Newton-Raphson 法	修正 Newton-Raphson 法



(a) 解析者 A の要素分割状況



(b) 解析者 B の要素分割状況



(c) 解析者 C の要素分割状況

図－2　有限要素モデルの一例（No.2 供試体）

3．1　解析者 A の解析モデル

図－2(a)には，解析者 A の要素分割状況を示している．本モデルの要素サイズは，かぶり厚に相当する 50mm を基準とし，要素形状は縦横比を極力 1.0 に近づけるように配慮した．また，載荷点および支点部には応力集中による局所的な破壊を防止するために実験時と同様に載荷板および支持板をモデル化している．但し，載荷板および支持板とコンクリート要素間は完全結合を仮定した．なお，これらの条件は他の解析モデルにも共通している．

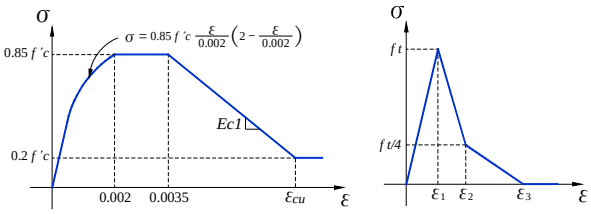
図－3 には，解析者 A が採用したコンクリート要素の応力－ひずみ関係を示している．圧縮応力下では，圧縮ひずみ 3,500μ までは土木学会コンクリート標準示方書【設計編】の耐力算定用の関係式を用い，それ以後は線形的に軟化するモデルを設定した．なお，降伏判定には Drucker-Prager の降伏基準を用いた．一方，引張応力下では，土木学会コンクリート標準示方書【設計編】における引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルの引張軟化特性を適用した．なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は初期せん断剛性の 1%に低減させるモデルとした．

図－5 には，鉄筋要素に用いた応力－ひずみ関係を示している．鉄筋には塑性硬化を考慮したバイリニアモデルを用い，降伏判定には von Mises の降伏基準を用いた．

3．2　解析者 B の解析モデル

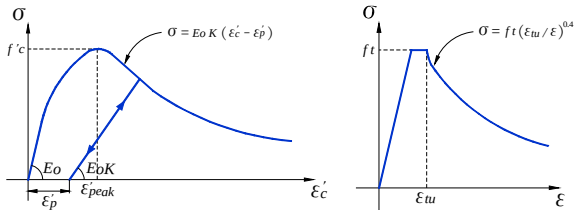
図－2(b)には，解析者 B の要素分割状況を示している．本モデルの要素サイズは，かぶり厚の 50mm を基準としているが，ウェブ領域では部材高さ方向に 4 分割と，解析者 A の分割と比較して若干粗めに設定されている．

図－4 には，解析者 B が採用したコンクリート要素の



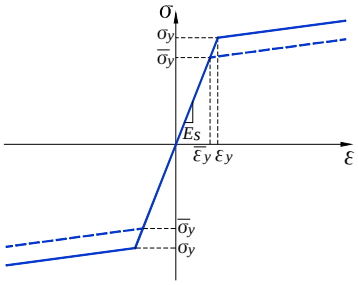
（圧縮側）　　（引張側）

図－3　解析者 A が採用したコンクリート要素の応力－ひずみ関係



（圧縮側）　　（引張側）

図－4　解析者 B，C が採用したコンクリート要素の応力－ひずみ関係



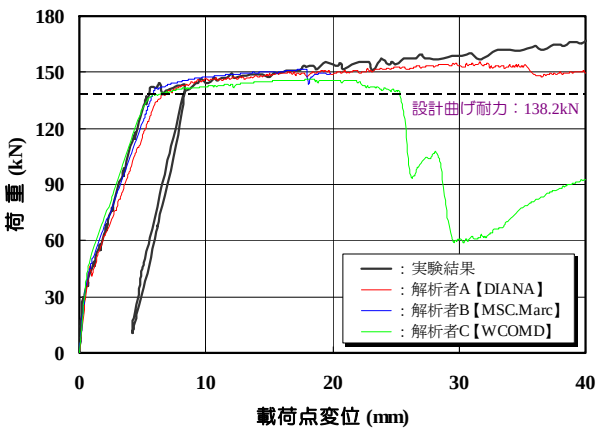
図－5　鉄筋要素の応力－ひずみ関係

応力－ひずみ関係を示している．圧縮応力下，引張応力下ともに土木学会コンクリート標準示方書【設計編】の最大応力点を越えた後の軟化領域を考慮した材料構成モデルを用いた．引張応力下ではコンクリートと鉄筋の付着効果に伴う Tension Stiffening が考慮されている．なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は，ひび割れひずみのレベルに応じて低減させた．鉄筋要素の応力－ひずみ関係は，解析者 A と同様にバイリニアモデルとしたが，コンクリートの引張応力－ひずみ関係において鉄筋との付着効果を考慮しているため，降伏強度を鉄筋単体の降伏強度よりも低減させた(図－5 点線)．なお，降伏判定にはコンクリート，鉄筋ともに von Mises の降伏基準を用いた．

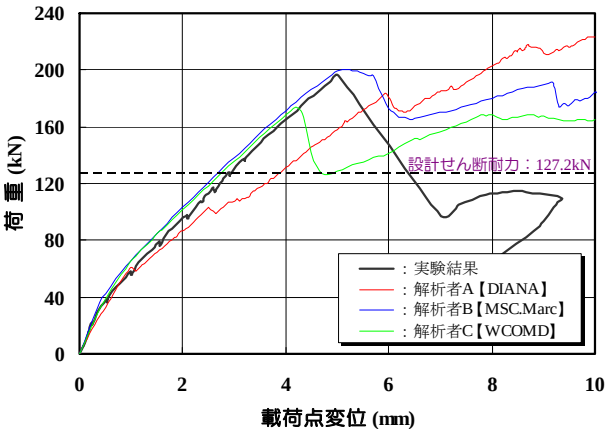
3．3　解析者 C の解析モデル

図－2(c)には，解析者 C の要素分割状況を示している．本モデルの要素サイズは，RC 要素の特性を考慮した上で，要素の重心位置が鉄筋の重心位置と概ね等しくなるように設定した．従って，他の解析モデルと比較して粗めの要素分割になっている．また，図中の水色の要素は鉄筋とコンクリートの付着作用が及ぶ領域，すなわち RC 要素としたが，灰色の領域は付着作用が及ばないものと判断してプレーン(無筋)コンクリート要素を用いた．

解析者 C が採用したコンクリート要素の応力－ひずみ関係は解析者 B と同様である．但し，付着－すべり，ひび割れ面におけるせん断伝達モデルやひび割れ直交方向における圧縮剛性低下等の影響が考慮されている．

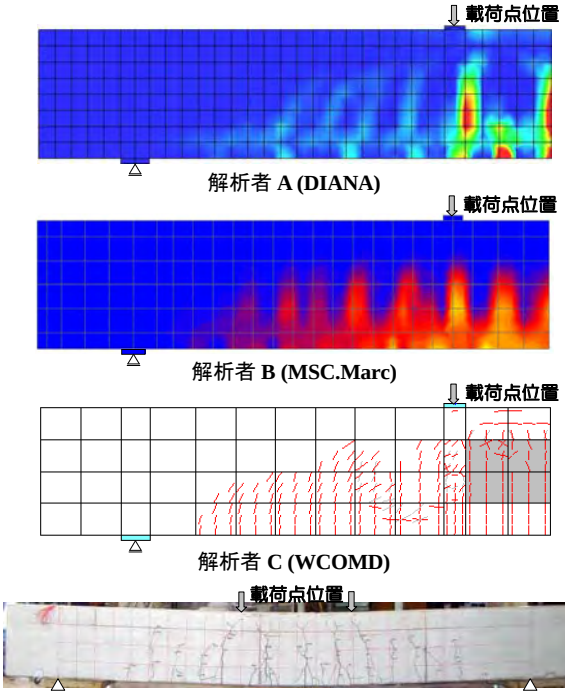


（No.1 供試体：曲げ破壊型）

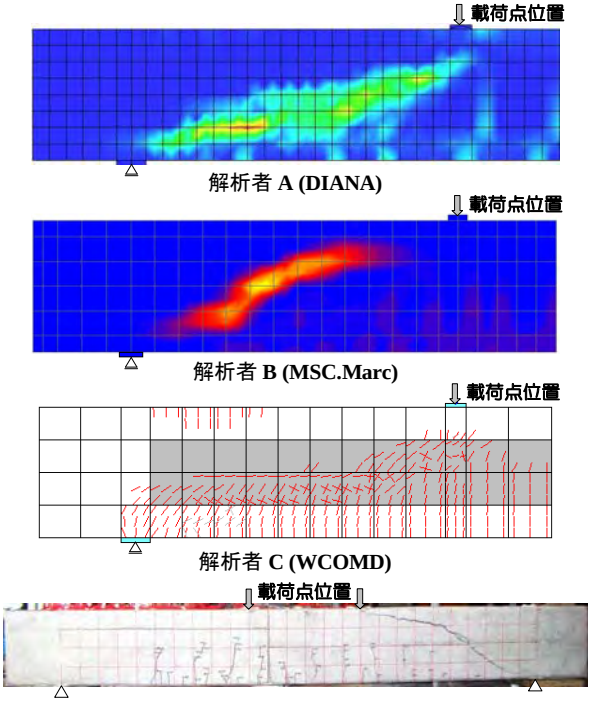


（No.2 供試体：せん断破壊型）

図－6　載荷点位置における荷重－変位関係に関する実験結果と解析結果の比較



（No.1 供試体：曲げ破壊型）



（No.2 供試体：せん断破壊型）

図－7　ひび割れ分布性状に関する実験結果と解析結果の比較

4. 解析結果および考察

図－6 には，載荷点位置における荷重－変位関係を実験と解析で比較している．図より，No.1 供試体に着目すると，いずれの解析結果も鉄筋降伏時までの挙動は実験結果と精度良く一致していることが分かる．しかしながら，鉄筋降伏以後の挙動では各モデルで差異が生じて，解析者 C の結果では変位 25mm 近傍で早期に荷重が低下している．一方，No.2 供試体に着目すると，解析者 B，C の結果は実験結果の荷重－変位関係を概ね再現できているが，解析者 A の結果は実験結果を過小に評価している．**図－7** には，ひび割れ分布性状を実験と解析で比較して示している．図より，No.1 供試体におけるスパン方向に分散した鉛直方向の曲げひび割れや No.2 供試体における斜め方向のひび割れは再現されており，ひび割れの定性的な特徴は捉えていることが確認できる．

5. まとめ

本検討で得られた知見を要約すると以下の通りである．

1）曲げ破壊型 RC 梁に関しては，鉄筋降伏時まではいずれの解析も比較的精度良く一致したが，降伏以後の終局荷重および変位の予測は困難であった．但し，ひび割れ分布性状は定性的には再現可能である．

2）せん断破壊型 RC 梁に関しては，載荷初期の挙動は再現可能だが，最大荷重の予測は困難であった．但し，ひび割れの定性的な特徴は捉えることができた．

本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」における活動成果の一部である．北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授，北武コンサルタント(株)の渡辺忠朋専務取締役をはじめ，関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました．ここに記して謝意を表します．

非線形有限要素法による RC 梁部材のシミュレーション解析（その１）

株式会社ドーコン　正会員　○関下　裕太
株式会社ドーコン　正会員　小林　竜太
北武コンサルタント株式会社　正会員　宮本　真一
北武コンサルタント株式会社　正会員　渡辺　忠朋

1. はじめに

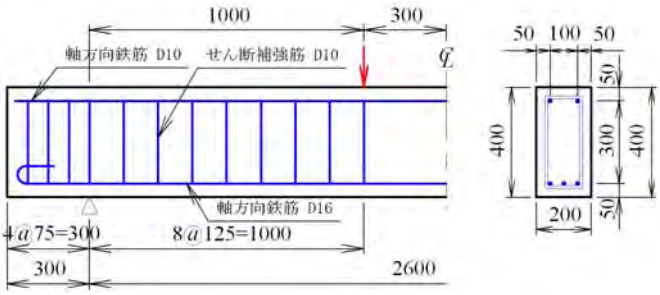
コンクリート構造物の非線形解析は，材料構成モデルやそれらの組合せ，非線形解析特有の求解法や収束計算法等，解析結果が多くの因子に影響を受ける。そのため，多くの解析コードが開発・普及される中で，解析結果の妥当性は未だ個々の技術者の判断に委ねられているのが実状である。

その一方で，近年では実務レベルにおいても非線形解析が適用されるケースが増加し，多数の技術者が扱うツールとなりつつある。そのため，解析ツールを有効かつ適正に使用することは勿論のこと，得られた解析結果の妥当性を評価するための十分な訓練を行う必要があると考えられる。

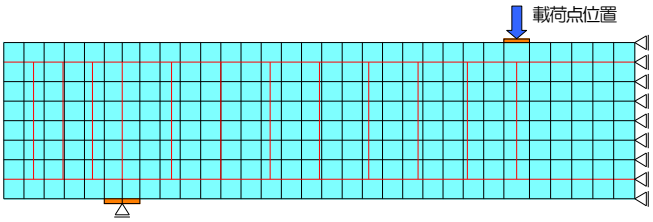
このような背景より，本検討ではコンクリート構造物を対象とした非線形解析の適正な使用方法を習得することを目的として，設計実務者 3 名がそれぞれ異なる汎用構造解析コードを利用して非線形解析を試みた。なお，本検討では別途実施した RC 梁部材の静載荷実験を解析対象とした。

2. 解析対象の概要

図－１には本解析で対象とした RC 梁部材の形状寸法および配筋状況を示している。断面寸法 200×400mm，純スパン長 2,600mm，せん断スパン比 2.86 の複鉄筋矩形 RC 梁であり，等曲げ区間にはせん断補強筋を配置していない。なお，梁部材は曲げ引張破壊によって終局に至るように断面設計を行い，設計耐力によるせん断余裕度は 2.52 である。



図－１　本解析で対象とした RC 梁部材の諸元



図－２　解析モデルの一例（解析者 A）

3. 数値解析の概要

3.1 各解析者が用いた解析手法の概要

表－１には各解析者が用いた解析手法の概要を一覧にして示している。本解析では，いずれの解析者も非線形有限要素法を採用し，解析対象を平面応力場問題として取り扱った 2 次元解析としている。使用した汎用の有限要素解析コードは，解析者 A は DIANA，解析者 B は MSC.Marc，解析者 C は WCOMD である。**図－２**には解析モデルの一例として，解析者 A が用いた有限要素モデルを示している。

表－１　各解析者が適用した解析手法の概要

項　目	解析者 A	解析者 B	解析者 C
解析次元	2 次元	2 次元	2 次元
解析手法	非線形有限要素法	非線形有限要素法	非線形有限要素法
解析プログラム	DIANA	MSC. Marc	WCOMD
解析対象範囲	ハーフスパン	ハーフスパン	ハーフスパン
要素タイプ	コンクリート：平面応力要素 鉄　筋：埋め込み鉄筋要素	コンクリート：平面応力要素 鉄　筋：トラス要素	平面応力要素 （鉄筋コンクリート(RC)要素）
境界条件	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束
荷重載荷法	強制変位	強制変位	強制変位
ひび割れモデル	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）
収束計算法	割線剛性法	Newton-Raphson 法	Newton-Raphson 法

キーワード　：有限要素法，非線形解析，RC 梁，曲げ引張破壊
連　絡　先　：〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央１条５丁目４番１号，株式会社ドーコン【構造部】，TEL：011-801-1540

3.2　材料構成モデルの概要

図－２に解析者 A が用いたコンクリートの応力－ひずみ関係を示す。圧縮応力下では圧縮ひずみ 3,500μ まではコンクリート標準示方書 [1]に基づいて定式化し，それ以後は線形的に軟化するモデルを採用している。引張応力下ではコンリート標準示方書 [1]の引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルの Tension Softening を用いている。

図－３に解析者 B および解析者 C が用いたコンクリートの応力－ひずみ関係を示す。圧縮応力下および引張応力下ともに，コンクリート標準示方書 [1]の最大応力点を超えた後の軟化領域が考慮されたモデルが採用されている。また，引張応力下ではコンクリートと鉄筋の付着効果に伴う Tension Stiffening が考慮されている。但し，解析者 C のモデルでは鉄筋の付着効果が及ばない領域は無筋コンクリート要素を用いてモデル化を行っているため，その領域では Tension Softening のみが考慮される。なお，解析者 A，B ではコンクリートと鉄筋は完全付着を仮定しているため，付着すべりの影響は考慮されていない。

一方，鉄筋要素には降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の応力－ひずみ関係が採用されている。

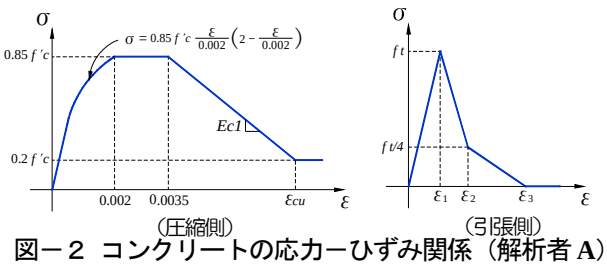
4.　解析結果および考察

図－４には載荷点位置における荷重－変位関係を実験結果と解析結果で比較して示している。図より，いずれの解析者も鉄筋降伏時までの挙動は実験結果を概ね再現できていることが分かる。しかしながら，解析者 A の結果ではひび割れ発生後の剛性が他の結果に比較して若干小さく評価されている。また，鉄筋降伏後は解析者 C の結果が変位 25mm 近傍で荷重が急激に低下しているが，他の解析者の結果ではこのような傾向は見られない。

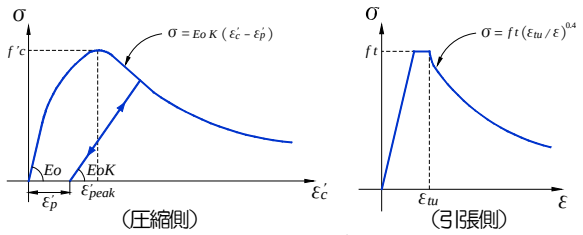
図－５にはひび割れ分布性状を実験と解析で比較して示している。図より，いずれの解析者もスパン方向に分散した曲げひび割れが再現されており，実験で確認されたひび割れの定性的な特徴は捉えていることが分かる。

5.　まとめ

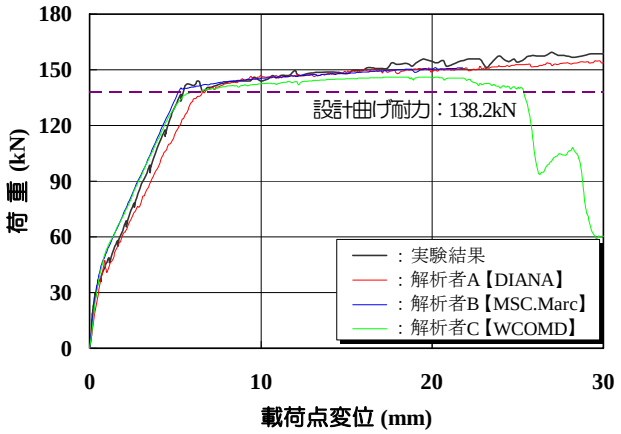
曲げ引張破壊型の梁部材に対しては，いずれの解析者も鉄筋降伏までの挙動は実用可能な精度で予測可能であると考えられるが，終局荷重や終局変位の予測は現段階では相当に困難な状況にある。今後は特に材料構成モデルに着目した検討を行い，継続的に取り組んでいきたいと考えている。なお，本検討結果は北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された研究会における活動成果の一部である。北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授



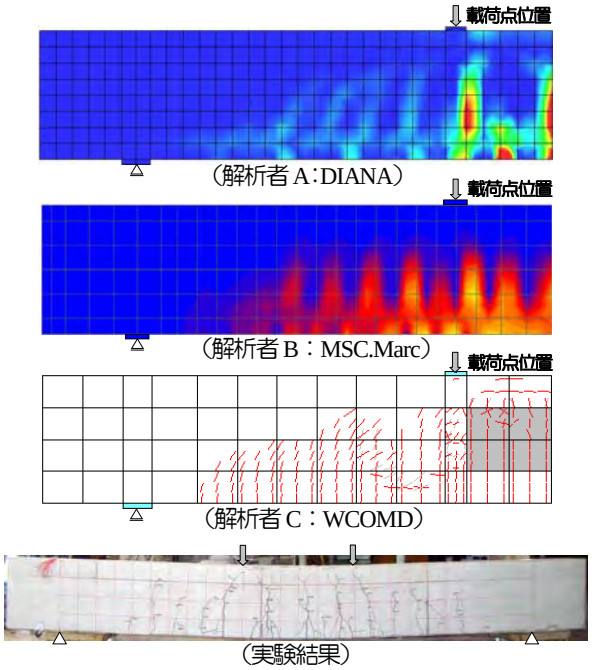
図－２　コンクリートの応力－ひずみ関係（解析者 A）



図－３　コンクリートの応力－ひずみ関係（解析者 B，C）



図－４　載荷点位置における荷重－変位関係の比較



図－５　ひび割れ分布性状に関する実験と解析の比較

をはじめ，関係各位からは多くの貴重なアドバイスを頂戴致しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1）2007 年制定：コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会

非線形有限要素法による RC 梁部材のシミュレーション解析（その２）

北武コンサルタント株式会社　正会員　○宮本　真一
株式会社ドーコン　正会員　小林　竜太
株式会社ドーコン　正会員　関下　裕太
北武コンサルタント株式会社　正会員　渡辺　忠朋

1. はじめに

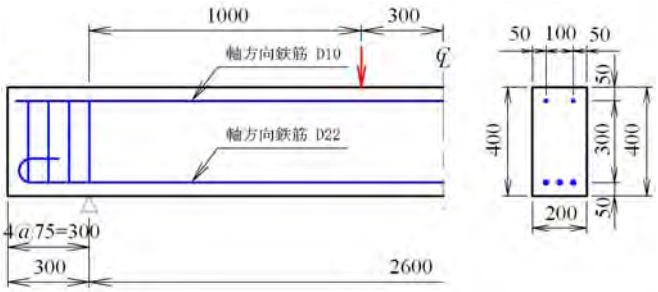
コンクリート構造物の実務設計レベルにおいて非線形有限要素法解析コードは多数の設計者が扱うツールとなりつつある。しかしながら，非線形有限要素法による解析結果は材料構成モデルやそれらの組合せ，求解法や収束計算法等，多くの因子に影響を受けるため，解析結果の妥当性評価にはある程度の経験を必要とするが，多くの設計実務者は非線形解析の経験が豊富とはいえないと考えられる。

したがって，解析ツールを有効かつ適正に使用し，解析結果を適切に評価できるようにするためには，必要な訓練を設計実務者に対して効果的に行うことが重要である。

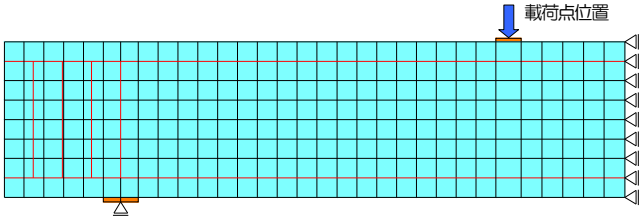
そこで，本検討ではコンクリート構造物を対象とした非線形解析の適切な使用方法を習得することを目的として，設計実務者 3 名がそれぞれ異なる汎用構造解析コードを使用して非線形解析を実施した。なお，解析対象は別途実施した RC 梁部材の静載荷実験供試体(せん断破壊型)とした。

2. 解析対象の概要

図－１には本解析で対象とした梁部材の形状寸法および配筋状況を示す。断面寸法 200×400mm，純スパン長 2,600mm, せん断スパン比 2.86 の複鉄筋矩形 RC 梁である。部材は斜め引張破壊によって終局に至るように断面設計を行い，主鉄筋の定着区間を除いてせん断補強筋は配置していない。なお, 設計耐力によるせん断余裕度は 0.50 である。



図－１　本解析で対象とした RC 梁部材の諸元



図－２　解析モデルの一例（解析者 A）

3. 数値解析の概要

3.1 各解析者が用いた解析手法の概要

表－１には各解析者が用いた解析手法の概要を一覧にして示している。本解析では，いずれの解析者も非線形有限要素法を採用し，解析対象を平面応力場問題として取り扱った 2 次元解析としている。使用した汎用の有限要素解析コードは，解析者 A は DIANA，解析者 B は MSC.Marc，解析者 C は WCOMD である。**図－２**には解析モデルの一例として，解析者 A のモデルの要素分割状況を示している。

表－１　各解析者が適用した解析手法の概要

項　目	解析者 A	解析者 B	解析者 C
解析次元	2 次元	2 次元	2 次元
解析手法	非線形有限要素法	非線形有限要素法	非線形有限要素法
解析プログラム	DIANA	MSC. Marc	WCOMD
解析対象範囲	ハーフスパン	ハーフスパン	ハーフスパン
要素タイプ	コンクリート：平面応力要素 鉄　筋：埋め込み鉄筋要素	コンクリート：平面応力要素 鉄　筋：トラス要素	平面応力要素 （鉄筋コンクリート(RC)要素）
境界条件	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束	対称軸：水平方向変位成分を拘束 支点部：鉛直方向変位成分を拘束
荷重載荷法	強制変位	強制変位	強制変位
ひび割れモデル	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）	分散ひび割れモデル （固定ひび割れモデル）
収束計算法	割線剛性法	Newton-Raphson 法	Newton-Raphson 法

キーワード　：有限要素法，非線形解析，RC 梁，斜め引張破壊
連　絡　先　：〒062-0020 札幌市豊平区月中央通 7 丁目北武第 2 ビル，北武コンサルタント（株），TEL：011-851-3181

3.2　材料構成モデルの概要

図－２に解析者 A が用いたコンクリートの応力－ひずみ関係を示す。圧縮応力下では圧縮ひずみ 3,500μ まではコンクリート標準示方書[1)]に基づいて定式化し，それ以後は線形的に軟化するモデルを採用している。引張応力下ではコンリート標準示方書[1)]の引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルの Tension Softening を用いている。なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は一律 1%に低減させた。

図－３に解析者 B および C が用いたコンクリートの応力－ひずみ関係を示す。圧縮応力下および引張応力下ともに，コンクリート標準示方書[1)]の最大応力点を超えた後の軟化領域が考慮されたモデルを採用している。また，引張応力下ではコンクリートと鉄筋の付着効果に伴う Tension Stiffening が考慮されている。但し，解析者 A，B ではコンクリートと鉄筋は完全付着を仮定しているため，付着すべりの影響は考慮されていない。なお，ひび割れ発生後のせん断剛性は，解析者 B の場合はひび割れひずみに応じて低減させており，解析者 C の場合には接触密度関数による独自のせん断伝達モデルで評価されている。

一方，鉄筋要素には降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の応力－ひずみ関係が採用されている。

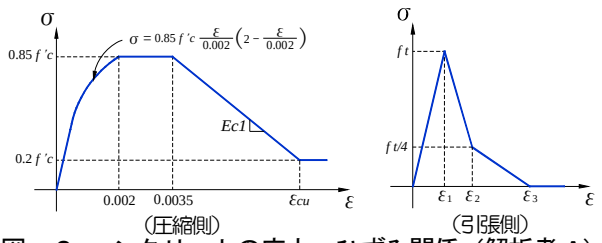
4.　解析結果および考察

図－４に載荷点位置における荷重－変位関係を実験結果と比較して示す。図より，解析者 B，C の結果は実験結果を比較的精度良く再現できていることが分かる。一方，解析者 A の結果は他と比較して実験結果の再現性が低く，載荷初期の段階から剛性が小さく評価されていることが分かる。これは，コンクリートの引張応力下のモデルやせん断剛性低減モデルの違いにより，ひび割れ発生後の剛性低下およびひび割れの進展過程が実験と異なっていることに起因しているものと推察される。

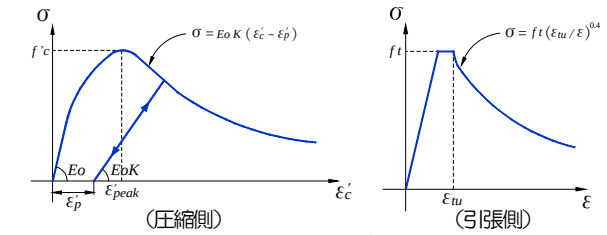
図－５にひび割れ分布性状を実験結果と比較して示す。いずれの解析者も梁下面の曲げひび割れやウェブにおける明瞭な斜めひび割れが再現されており，荷重－変位関係には相違が見られたが，ひび割れ性状は類似している。

5.　まとめ

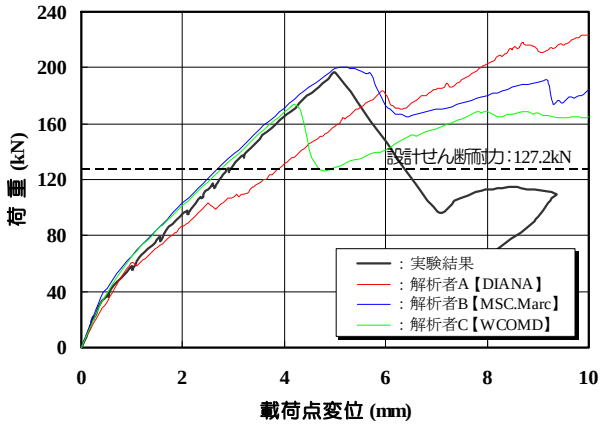
斜め引張破壊型の梁部材に対しては，解析者によって結果のバラツキが大きく，特に最大荷重の予測は困難であることが分かった。今後は既往の研究成果を調査した上でせん断破壊解析に対する知見を蓄積していきたいと考えている。なお，本検討結果は北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された研究会における活動成果の一部である。北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授をはじめ，関係各位からは多くの貴重なアドバイスを頂戴致しました。ここに記して感謝の意を表します。



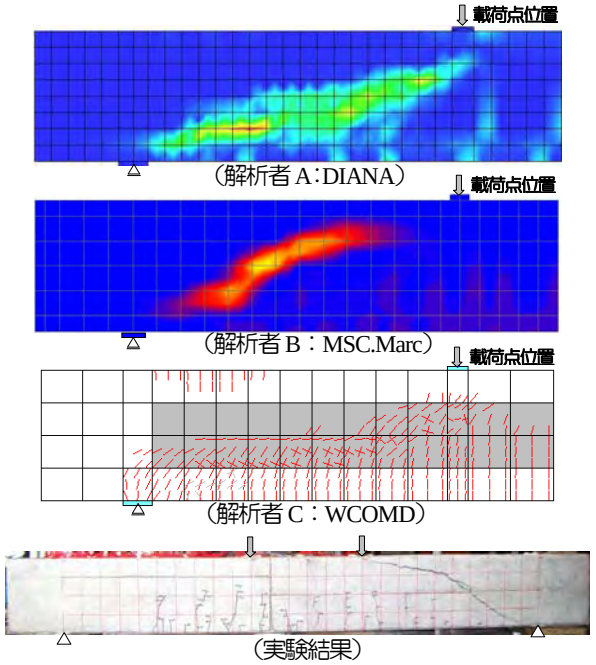
図－２　コンクリートの応力－ひずみ関係（解析者 A）



図－３　コンクリートの応力－ひずみ関係（解析者 B，C）



図－４　載荷点位置における荷重－変位関係の比較



図－５　ひび割れ分布性状に関する実験と解析の比較

参考文献

1）2007 年制定：コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会

有限要素法による RC 部材の一軸引張挙動に関する各種モデル化の影響

Influence of various modeling concerning uniaxial tensile behavior of RC member by finite element method

(株)リテック　○正会員　関下 裕太 (Yuta SEKISHITA)
JIP テクノサイエンス(株)　正会員　川口 和広 (Kazuhiro KAWAGUCHI)
(株)ドーコン　正会員　小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
北武コンサルタント(株)　正会員　宮本 真一 (Shinichi MIYAMOTO)

1. はじめに

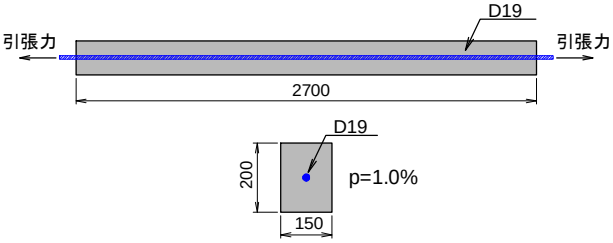
鉄筋コンクリート（以下，RC）部材の非線形挙動を有限要素解析によって再現する場合，ひび割れの発生や進展のモデル化および鉄筋のモデル化が数値解析結果に大きな影響を及ぼす [1]．コンクリートのひび割れや鉄筋を有限要素解析で取り扱う場合には，両者に対してそれぞれ離散的に表現する方法（離散型モデル）と有限要素内に一様に分布させる方法（分散型モデル）があり，その組み合わせとしては１）分散ひび割れ－分散鉄筋モデル，２）分散ひび割れ－離散鉄筋モデル，３）離散ひび割れ－離散鉄筋モデルの 3 つの方法に分類される．解析によって得られる応答値は，いずれのモデル，いずれの組み合わせに対しても同一の解が得られる必要があるが，各モデルの特性を十分に把握した上で適切な設定を行わなければ解析結果に大きな相違を生じる可能性がある．

このような観点から，本論文ではコンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とその組み合わせの相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的として，各モデルの特性を整理し，同一の解を得るための解析手法に関する各種検討を行った．なお，本検討では，一軸引張作用を受ける RC 部材の非線形挙動に着目して検討を行うこととした．

2. 解析対象および解析条件の概要

本検討では，玉井ら [2]が実施した RC 部材の鉄筋降伏後の引張剛性すなわちテンションスティフニングモデルを導いた一軸引張試験を解析対象とした．**図－1** に試験体の概要を示す．試験体は部材長 2,700mm，断面寸法 200mm×150mm の角柱断面であり，断面中心に異形鉄筋 D19 を 1 本埋込んだ鉄筋比 1.0%の試験体を選定した．

解析はいずれも平面応力場を仮定した 2 次元解析とし，汎用の有限要素解析プログラムを使用した．分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる解析には WCOMD(Ver.2)を，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる解析には DIANA(Ver.9.3)を使用した．境界条件および荷重条件は，モデル端部の一端を拘束して，他端に水平方向の強制変位による漸増載荷とした．なお，実験ではコンクリート端部から突出した鉄筋に引張力を与えているが，解析では解の安定性に配慮してモデル端部の全節点（コンクリートおよび鉄筋要素）に一様な引張力を与えている．使用した有限要素タイプは，コンクリート要素にはいずれのモデルに対しても 8 節点平面応力要素を用いた．鉄筋要素には分散ひび割れ－分散鉄筋モデルでは RC 要素に鉄筋比として与え，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは 3 節点梁要素を用いた．また，離散鉄筋モデルに対して付着－すべりの影響を考慮する場合および離散ひび割れ要素には DIANA に組み込まれている界面接合要素を用いている．なお，本解析における分散ひび割れモデルは，いずれも固定ひび割れモデルである．収束計算法には Newton-Raphson 法あるいは割線剛性法を採用した．**表－1**，**2** には，実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している．



図－1　解析で対象とした試験体の形状寸法

表－1　コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
45.0	2.9	30.0	0.2

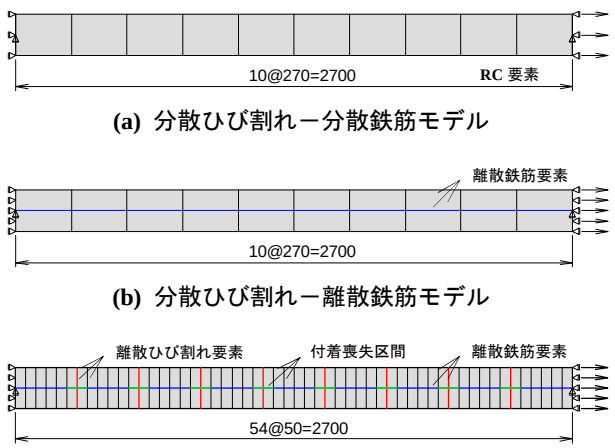
表－2　鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D19	610.0	190.0	0.3

3. 分散ひび割れ－分散鉄筋モデルに対する検討

3. 1　解析モデル

図－2 (a)に分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す．本モデルではコンクリートと鉄筋の特性を重ね合わせた RC 要素を用いるため，部材高さ方向には 1 分割，部材軸方向には 10 分割を基本とした．材料構成モデルは，コンクリートの引張応力下における平均応力－平均ひずみ関係には岡村ら [3]が提案した引張軟化特性である**図－3(a)**を用いた．ここで，付着パラメータ（引張硬化・軟化係数）は C =0.4 を標準値とし，このパラメータの影響については別途検討を行った．鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係は，**図－4** の点線で示した降伏棚を無視したバイリニアモデルとし，かつ降伏強度を鉄筋単体（同図実線）のそれよりも低下させている．



(a) 分散ひび割れ－分散鉄筋モデル

(b) 分散ひび割れ－離散鉄筋モデル

(c) 離散ひび割れ－離散鉄筋モデル

図－2　各モデルの要素分割図の一例

これは，コンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係は，ひび割れや付着の影響によって鉄筋単体の応力－ひずみ関係と異なるためである．すなわち，鉄筋単体においては存在する降伏棚もコンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係には現れないことと，ひび割れ発生後における鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係での降伏点はコンクリートとの付着によって鉄筋単体の降伏強度よりも低下するためである．

3．2　解析結果および考察

図－5 には，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルで得られた荷重－変位応答を示している．図中，○印は実験結果を示している．また，図中には鉄筋単体のみに引張力を作用させた場合の荷重－変位関係も合わせて示している．

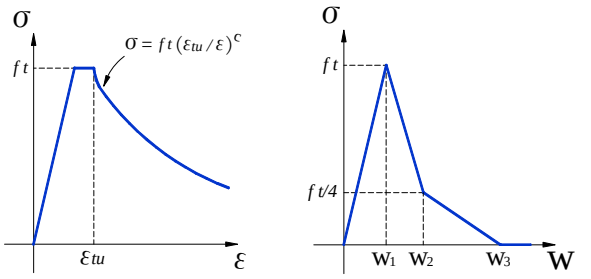
図より，実験結果に着目すると，変位 7.0mm 程度までは鉄筋とコンクリートの付着作用のために，ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートが引張力を負担するテンションスティフニング効果によって，引張剛性は鉄筋単体の引張剛性よりも大きく，その後は鉄筋単体の挙動に近づくことが分かる．一方，解析結果に着目すると，解析結果は実験結果と精度良く一致していることが分かる．また，要素寸法の影響を検討するために，部材軸方向の要素分割数を 3，5，15，30 分割とした場合の解析を実施したが，本モデルにおける平均応力－平均ひずみ関係が要素寸法にかかわらず等しいことから，要素分割の影響はなく解の唯一性が保証されていることが分かる．

図－6 には，付着パラメータ C が解析結果に及ぼす影響を検討するために，C=0.2，2.0 と設定した場合の荷重－変位応答を C=0.4 と設定した解析結果と比較して示している．図より，本解析では C=0.4 と設定した場合には実験結果と精度良く一致しているが，C=0.2 および 2.0 と設定した場合には，実験結果をそれぞれ過大あるいは過小に評価していることが分かる．

4．分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する検討

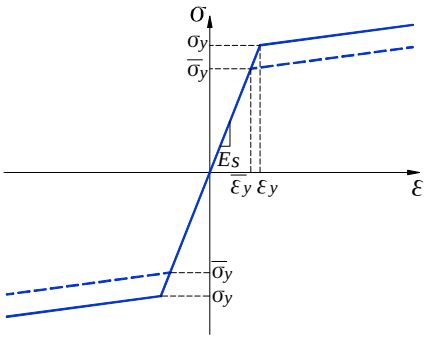
4．1　解析モデル

図－2 (b)に分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す．本モデルでは，鉄筋を梁要素を用

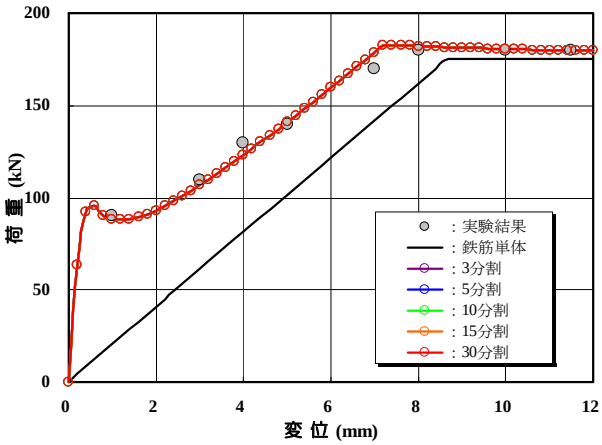


(a)テンションスティフニング　(b)テンションソフトニング

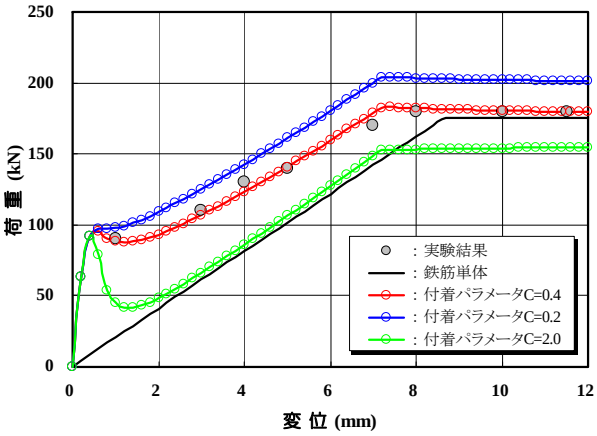
図－3　コンクリートの材料構成モデル（引張応力下）



図－4　鉄筋の材料構成モデル



図－5　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（要素分割数の影響）



図－6　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（付着パラメータ C の影響）

いて離散的にモデル化するため，部材高さ方向に 2 分割して鉄筋要素をコンクリート要素に貼り付けた．また，部材軸方向には分散ひび割れ－分散鉄筋モデルと同様に 10 分割とした．コンクリートの引張軟化特性には**図－3** に示すテンションスティフニングとテンションソフトニングモデルの両者を用いて検討を行った．ここで，テンションソフトニングモデルでは，土木学会コンクリート示方書【設計編】における引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルを用いて，要素の等価長さを要素面積の平方根と仮定してひび割れ幅をひずみに変換している．なお，引張破壊エネルギーは 0.1N/mm と仮定した．

鉄筋は，**図－4** の実線で示した鉄筋単体の応力－ひずみ関係を用いて，降伏後は弾性係数の 1/100 倍の勾配で硬化するバイリニアモデルとした．コンクリートと鉄筋の要素間には，界面接合要素を用いて両者間の相対変位（すべり）を考慮し，付着モデルにはマッシブなコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の引き抜き試験により得られた島ら[4]が提案した式(1)の付着モデルを用いた．なお，コンクリートの引張軟化特性にテンションスティフニングモデルを用いた場合には，マクロな付着挙動が応力－ひずみ関係に取り込まれていることから，コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着とした．但し，鉄筋の降伏強度は，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルと同様に鉄筋単体の降伏強度よりも低下させた．

$$\tau = 0.9\left(f'_c\right)^{2/3}\left[1-\exp\left\{-40\left(S/D\right)^{0.6}\right\}\right] \qquad (1)$$

τ：付着応力，f'_c：コンクリート強度
S：すべり量，D：鉄筋径

4. 2　解析結果および考察

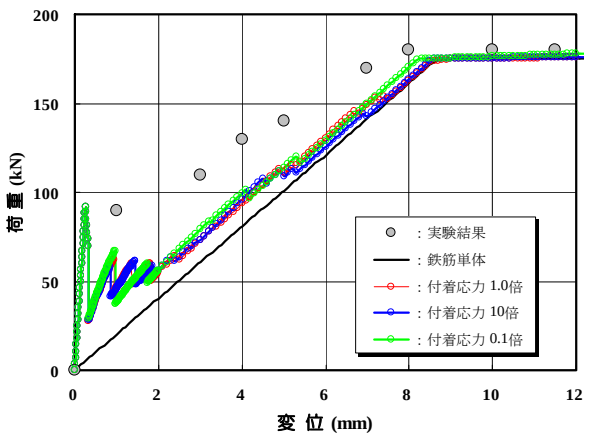
１）付着特性の影響

付着応力が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．**図－7** には式(1)の付着応力を 1.0 倍，0.1 倍，10 倍とした場合の荷重－変位応答を比較して示している．

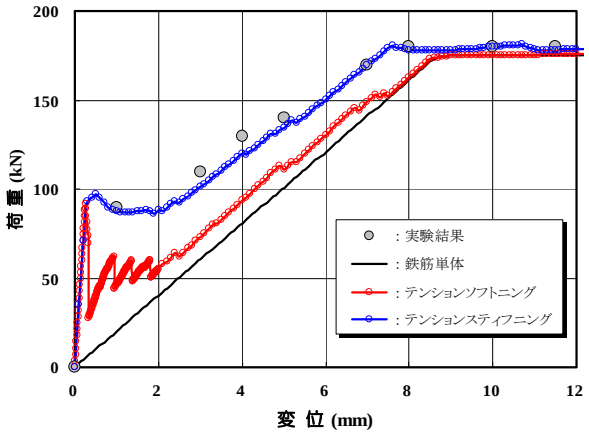
図より，いずれのケースにおいてもひび割れ発生後に急激に荷重が低下し，鉄筋単体と比較して引張剛性は若干大きいものの実験結果の再現性は低い．また，付着応力の影響は顕著ではないが，付着剛性を増加させる，すなわち完全付着に近づけるほどひび割れ発生後に早期に鉄筋単体の挙動に近づく傾向にあることが分かる．

２）引張軟化特性の影響

引張軟化特性が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．**図－8** にはコンクリートの引張軟化特性としてテンションソフトニングとテンションスティフニングを設定した場合の荷重－変位応答を比較して示している．図より，テンションソフトニング（付着モデルも設定）では実験結果の再現性は低いが，テンションスティフニング（完全付着）では良い一致を示していることが分かる．テンションソフトニングモデルでは，別途付着の影響を考慮することでテンションスティフニングと同等の効果が得られるものと考えられるが，コンクリート要素に分散ひび割れモデルを適用した場合には，コンクリート要素のひび割れが局所化せず分散されるため相対変位（すべり）が極大化する位置が表現できないため，結果として付着モデルが有効に機能しないためと考えられる．



図－7　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（付着応力の影響）



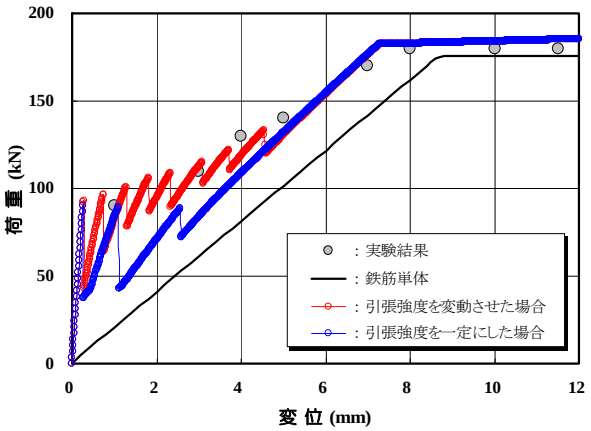
図－8　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（引張軟化特性の影響）

これより，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは，コンクリートの引張軟化特性にテンションソフトニングを適用した場合には実験結果を精度良く再現することができず，テンションスティフニングを用いた方が精度の良い解を与えることが明らかとなった．

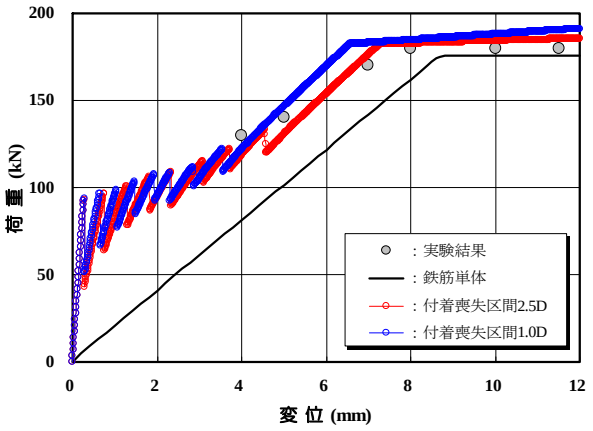
5. 離散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する検討

5. 1　解析モデル

図－2 (c)に離散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す．離散ひび割れは，実験で得られた平均ひび割れ間隔（約 300mm）を参考にして，部材軸方向に計 8 本のひび割れをモデル化した．コンクリートの引張応力－ひび割れ幅（変位）関係には，**図－3(b)**のテンションソフトニングモデルを用い，コンクリートと鉄筋の要素間には式(1)の付着モデルによる付着－すべり関係を設定した．離散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは，個々のひび割れ面や鉄筋，そして鉄筋とコンクリート間の付着界面を離散化してモデル化するため，RC 部材の全体挙動のみならず，ひび割れ幅や鉄筋ひずみ，付着応力等の個々の局所的な力学的挙動を結果として得ることが可能である．しかしながら，それらの正確な挙動を表現するためには，ひび割れ発生位置を予めモデル化する



図－9　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（引張強度設定の影響）



図－10　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較（付着喪失区間の影響）

必要があり，同時に付着特性の設定が重要となる．特に，ひび割れ近傍では鉄筋とコンクリート間の肌離れ，すなわち付着劣化が生じることから，鉄筋とコンクリートの界面には離散ひび割れ要素近傍に付着劣化域（ここでは，付着喪失区間という）を考慮する必要がある．そこで，本検討では，離散ひび割れ要素に対する引張強度の設定および付着喪失区間に関する検討を行った．

5．2　解析結果および考察

１）引張強度設定の影響

離散ひび割れモデルでは，コンクリートの引張強度を一定とすると，解析上複数本のひび割れが同時に発生し引張剛性が適切に評価できないことが指摘されている [1]．そこで，本検討では離散ひび割れ要素に対する引張強度を一定とした場合と，ひび割れが徐々に発生するように引張強度を変動させた場合で比較を行った．なお，引張強度の変動値は 2.90～3.95MPa（変動係数で約 10%）と仮定し，付着喪失区間は鉄筋径(D)の 2.5 倍と設定した．

図－9 に荷重－変位応答の比較を示す．図より，引張強度を一定にした場合には，複数本のひび割れが同時に発生するため引張剛性が過小評価され，実験結果の再現性も低いことが分かる．一方，引張強度を変動させた場合には，ひび割れが順次発生する現象を捉えており，実験結果とも良い一致を示している．また，ひび割れが順次発生して，ひび割れ間隔が小さくなる過程において部材の引張剛性が次第に低下する現象が再現されている．

２）付着喪失区間の影響

付着喪失区間が解析結果に及ぼす影響について検討を行った．**図－10** には付着喪失区間をそれぞれ 1.0D，2.5D とした場合の荷重－変位応答を比較して示している．図より，付着喪失区間を 1.0D とした場合には，ひび割れ後の引張剛性が若干高く評価されており，鉄筋降伏が早期に生じている．これは，付着劣化によって鉄筋のみで引張力を負担する付着喪失区間が小さい場合には鉄筋の応力やひずみが増大するためである．一方，2.5D と設定した場合には実験結果と良い一致を示している．

これより，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは付着喪失区間を適切に設定することが重要であり，RC 部材の非線形挙動に大きな影響を与えることが確認された．

6．まとめ

本検討では，コンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とその組み合わせの相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的として，一軸引張を受ける RC 部材の非線形挙動に着目した各種検討を行った．本検討の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである．

1) 分散ひび割れ－分散鉄筋モデルを採用する場合には，引張軟化特性にテンションスティフニングを用いて，付着パラメータおよび鉄筋の平均降伏強度を適切に設定することで実験結果を精度良く再現できる．
2) 分散ひび割れ－離散鉄筋モデルを採用する場合には，引張軟化特性にテンションソフトニングではなく，テンションスティフニングを用いた方が実験結果を精度良く再現できる．
3) 離散ひび割れ－離散鉄筋モデルを採用する場合には，ひび割れ部に鉄筋径の 2.5 倍程度の付着喪失区間を設定する必要がある．また，ひび割れを除々に発生・進展させるための解析上の工夫が必要である．

本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」における活動成果の一部である．北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授，北武コンサルタント(株)の渡辺忠朋副社長をはじめ，関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献：

1) 田所敏弥，佐藤靖彦，上田多門：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1239-1248，2002.
2) 玉井真一，島 弘，出雲淳一，岡村 甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.239-247，1987.
3) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.
4) 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集，No.378, pp.165-174，1987.

分散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響

(株)リテック　正会員 ○関下 裕太　(株)ドーコン　正会員　小林 竜太
JIP テクノサイエンス(株)　正会員　川口 和広　北武コンサルタント(株)　正会員　宮本 真一

1. はじめに

RC 部材の非線形有限要素解析では，ひび割れや鉄筋のモデル化が解析結果に大きな影響を及ぼす[1]．有限要素法によってひび割れや鉄筋をモデル化する場合には，それらを離散的に表現する方法と有限要素内に分布させる方法があり，その組合せとしては分散ひび割れ－分散鉄筋，分散ひび割れ－離散鉄筋，離散ひび割れ－離散鉄筋の 3 つに分類される．解析によって得られる応答値は，いずれのモデル，いずれの組合せに対しても同一の解が得られる必要があるが，各モデルの特性を十分に把握した上で，適切な設定を行わなければ，解析結果に大きな相違を生じる可能性がある．

そこで，本検討ではひび割れモデルと鉄筋モデルの組合せの違いが解析結果に及ぼす影響を把握することを目的として，分散ひび割れモデルに限定した形で，分散鉄筋とした場合および離散鉄筋とした場合における検討を実施した．

2. 解析概要および解析条件の概要

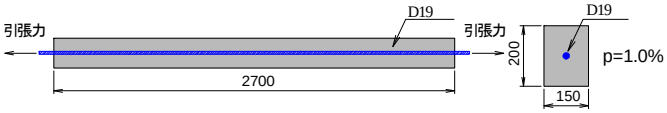
図－１には解析で対象とした試験体の概要を示している．解析対象は，玉井ら[2]が実施した一軸引張試験とした．試験体は，部材長 2,700mm，断面寸法 200mm×150mm の角柱断面で，断面中心位置に異形鉄筋 D19 が 1 本配置されている．

本解析は，平面応力場を仮定した 2 次元解析とし，解析コードは分散鉄筋モデルには WCOMD を，離散鉄筋モデルには DIANA を使用した．境界条件および荷重条件は，モデル端部を拘束して，他端に水平方向の引張力を強制変位として与えた．有限要素タイプは，コンクリート要素には 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素を，鉄筋要素には分散鉄筋モデルでは RC 要素に鉄筋比として与え，離散鉄筋モデルには 3 節点梁要素を用いた．なお，分散ひび割れモデルには多方向固定ひび割れモデルを適用し，離散鉄筋モデルには界面接合要素を用いて付着－すべりを考慮した．

3. 分散ひび割れ－分散鉄筋モデルに対する検討

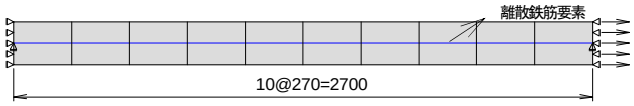
3.1 解析モデルの概要

図－２(a)に分散ひび割れ－分散鉄筋モデルの要素分割図を示す．要素分割は部材軸方向に 10 分割とし，コンクリートの引張応力下における平均応力－平均ひずみ関係には岡



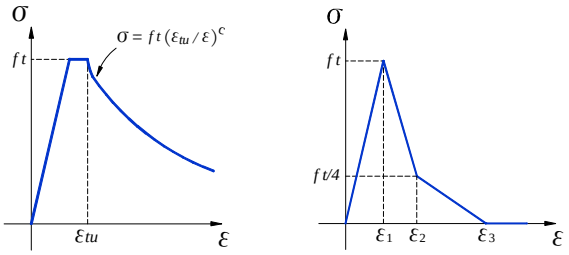
図－１　本解析で対象とした試験体の形状寸法

(a) 分散ひび割れ－分散鉄筋モデル



(b) 分散ひび割れ－離散鉄筋モデル

図－２　解析モデル（要素分割図）



(a) Tension Stiffening　(b) Tension Softening

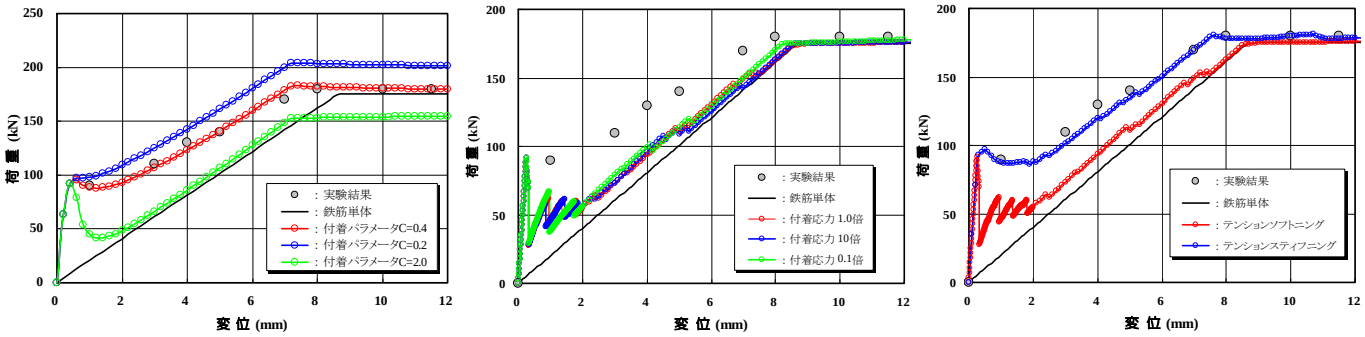
図－３　解析で用いたコンクリートの引張軟化特性

村ら[3]が提案した引張軟化特性である**図－３(a)**を採用した．ここで，付着パラメータ C は通常のコンクリートと異形鉄筋に対して与えられる 0.4 を標準値とした．なお，検討の一つとして本パラメータの影響を別途確認するものとした．一方，鉄筋の応力－ひずみ関係はバイリニア型の鉄筋コンクリート中の鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係を採用した．

3.2 解析結果および考察

図－４(a)には分散ひび割れ－分散鉄筋モデルで得られた荷重－変位応答を示している．図より，実験では変位 7.0mm 程度までは鉄筋とコンクリートの付着作用による Tension Stiffening 効果によって引張剛性が鉄筋単体のそれよりも大きく，その後は鉄筋単体の挙動に近づいている．一方，解析結果（図中赤線）は，実験結果と精度良く一致している．また，図中には付着パラメータ C が解析結果に及ぼす影響を確認するために，C = 0.2，2.0 とした場合の荷重－変位応答を C = 0.4 とした解析結果と比較して示している．これより，付着パラメータの影響は実験結果を過大あるいは過小

キーワード　：非線形有限要素法，一軸引張挙動，分散ひび割れモデル，鉄筋モデル
連　絡　先　：〒062-0054 札幌市豊平区月寒東 4 条 9 丁目 5 番 27 号，株式会社リテック，TEL：011-851-0100



(a) 付着パラメータ C の影響
【分散ひび割れ－分散鉄筋モデル】

(b) 付着応力の影響
【分散ひび割れ－離散鉄筋モデル】

(c) 引張軟化特性の影響
【分散ひび割れ－離散鉄筋モデル】

図－４　各検討ケースにおける荷重－変位応答の比較

に評価しており，解析結果に大きく影響していることがわかる．なお，部材軸方向の要素寸法の影響についても別途検討を行ったが，本解析では要素寸法に関わらず等しく，解の唯一性が保証されていることが確認された．

4. 分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する検討

4.1 解析モデルの概要

図－２(b)に分散ひび割れ－離散鉄筋モデルの要素分割図を示す．要素分割は部材軸方向に 10 分割とした．本検討ではコンクリートの引張応力下の構成則として**図－３**に示す Tension Stiffening と Tension Softening のそれぞれの引張軟化特性を用いた．ここで，Tension Softening モデルとした場合には，コンクリート標準示方書[4)]に準拠した引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルを用い，鉄筋要素には鉄筋単体のバイリニア型の応力－ひずみ関係を用いるとともに，鉄筋の付着－すべりの影響を島ら[5)]の提案式に基づいて考慮した．一方，Tension Stiffening モデルを用いた場合には，コンクリートと鉄筋間は完全付着を仮定し，鉄筋の平均降伏強度は分散ひび割れ－分散鉄筋モデルと同様に鉄筋単体の降伏強度よりも低下させた．

4.2 解析結果および考察

図－４(b)には付着応力が解析結果に及ぼす影響を検討するために，付着モデル式の付着応力を 1.0 倍，0.1 倍，10 倍とした場合の荷重－変位応答を比較して示している．図より，いずれのケースにおいてもひび割れ発生後に直ちに鉄筋単体の挙動に近づき，実験結果の再現性は低いことがわかる．**図－４(c)**には引張軟化特性が解析結果に及ぼす影響を検討するために，Tension Softening と Tension Stiffening を設定した場合の荷重－変位応答を比較して示している．図より，Tension Softening では実験結果の再現性は低いが，Tension Stiffening では実験結果と良く一致していることがわかる．Tension Softening を採用する場合には，別途付着モデルを考慮することで Tension Stiffening と同等の効果が得られるものと考えられるが，コンクリート要素に分散ひび割れモデルを適用した場合には，ひび割れが局所化せず分散されることから付着モデルが有効に機能しなかったものと考えられる．これより，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルでは，コンクリートの引張軟化特性に Tension Softening を適用した場合には実験結果を精度良く再現することはできず，Tension Stiffening を用いた方が精度の良い解を与えることが明らかとなった．

5. 結　論

本検討で得られた知見を要約すると，以下の通りである．

1）分散ひび割れ－分散鉄筋モデルを採用する場合には，コンクリートの引張軟化特性に Tension Stiffening モデルを用い，付着パラメータおよび鉄筋の平均降伏強度を適切に設定することで，実験結果を精度良く再現することが可能である．

2）分散ひび割れ－離散鉄筋モデルを採用する場合には，コンクリートの引張軟化特性に Tension Softening モデルではなく，Tension Stiffening モデルを用いた方が実験結果を精度良く再現することが可能である．

本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会の「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」での活動成果の一部である．関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）田所他：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1239-1248，2002.

2）玉井他：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.239-247，1987.

3）岡村他：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.

4）2007 年制定：コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会，2008.3.

5）島他：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.165-174，1987.

離散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響

JIP テクノサイエンス(株)　正会員 ○川口 和広　(株)ドーコン　正会員　小林 竜太
(株)リテック　正会員　関下 裕太　北武コンサルタント(株)　正会員　宮本 真一

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の非線形有限要素解析において，ひび割れや鉄筋をそれぞれ離散的にモデル化する手法がある．この手法では，ひび割れ面や鉄筋，そして鉄筋とコンクリート間の付着界面を個々の要素と材料特性により直接的にモデル化するため，RC 部材の全体挙動だけではなく，ひび割れ幅や鉄筋ひずみ，付着応力などの個々の局所的な力学挙動を解析結果として得ることができる．また，材料劣化が生じた RC 構造物を対象とした場合，鉄筋の断面減少や劣化した付着特性を直接的に考慮できるため，鉄筋腐食の影響を考慮した解析検討に活用が可能な有用な手法の一つである．しかし，得られる解析結果は個々のモデル化手法や特性値によって大きく影響するため，それらに対して適切な設定を行わなければならない[例えば1)]．

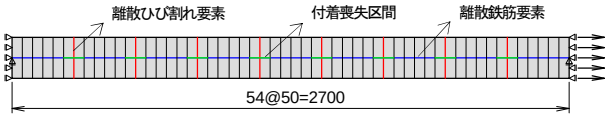
本検討では，一軸引張を受ける RC 部材を対象に分散ひび割れモデルで解析検討した文献 2)に引き続いて，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおけるモデル化手法の相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的とした．

2. 解析モデルの概要

文献 2)と同様に，玉井ら[3)]が実施した RC 部材の鉄筋降伏後の引張剛性を導いた一軸引張試験体（コンクリート圧縮強度 f'_c=45MPa，鉄筋比 ρ=1.0%，鉄筋種類 SD490）を解析対象とした．試験体の概要は文献 2)，3)を参照されたい．

解析モデルの概要を**図－１**に示す．コンクリートにはアイソパラメトリック 8 節点四角形平面応力要素を用いた．離散ひび割れモデルとして，コンクリート要素間に実験結果[3)]で得られた平均ひび割れ間隔（約 300mm）で合計 8 本の界面要素をモデル化した．離散ひび割れ要素に設定したコンクリートの引張応力－ひび割れ幅関係には土木学会コンクリート標準示方書[4)]による式を参照した．なお，ひび割れ発生は離散ひび割れ要素のみで表現することとし，ひび割れ間のコンクリート要素は弾性材料とした．

鉄筋は 3 節点梁要素でモデル化し，文献 2)と同様に鉄筋単体の応力－ひずみ関係を用いた．また，鉄筋の付着－すべりを表現するためコンクリートと鉄筋要素間に界面要素



図－１　解析モデル概要

$$\tau = 0.9\left(f'_c\right)^{2/3}\left[1-\exp\left\{-40\left(S/D\right)^{0.6}\right\}\right] \qquad (1)$$

τ：付着応力(MPa)，f'_c：コンクリート強度(MPa)
S：すべり量(mm)，D：鉄筋径(mm)

をモデル化し，付着モデルには島ら[5)]の提案式(1)を用いた．

境界条件および荷重条件は，モデル端部を拘束して，一端に水平方向の引張力を強制変位として与えた．なお，実験ではコンクリート端部から突出した鉄筋に引張力を与えているが，本検討では分散ひび割れモデルでの解析結果[2)]との比較のためモデル端部の全節点（コンクリートおよび鉄筋要素）に一様な引張力を与えている．解析には，汎用の有限要素解析プログラム DIANA(ver.9.3)を用いた．

3. 解析結果および考察

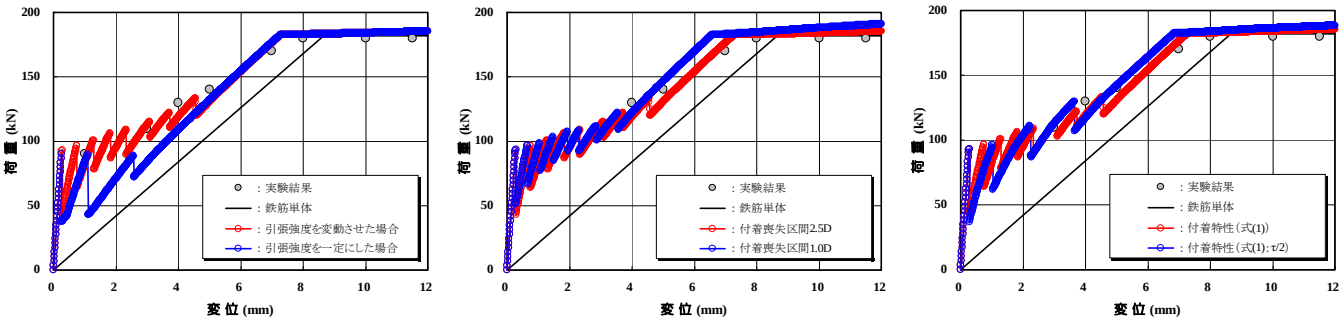
3.1　引張強度設定の影響

離散ひび割れ要素における引張強度を一定（f_t=2.90MPa）にした場合と，ひび割れが徐々に発生するように 8 本の離散ひび割れ要素で引張強度を変動（f_t=2.90～3.95MPa，変動係数約 10%）させた場合で比較を行った．引張強度を一定にした場合には複数本のひび割れが同時に発生してしまい，**図－２(a)**で見られるように，引張剛性が過小評価されて実験結果の再現性が低い結果となった．本解析モデルでは，部材全域で軸方向の応力勾配は小さく全離散ひび割れ要素の引張応力もほぼ同じとなるため，引張強度に達すると同時にひび割れが発生することとなる．一方の引張強度を変動させた場合には，1 本ずつ徐々に発生するひび割れを表現することができるため，ひび割れ発生とその進展に伴って付着応力伝達が適切に評価される．また，**図－２(a)**のとおりひび割れ間隔が小さくなるに従い部材の引張剛性が次第に低下し，実験結果との良い一致を示した．

3.2　付着喪失区間の影響

部材の貫通ひび割れ近傍では，鉄筋の抜け出しに伴って

キーワード　：非線形有限要素法，一軸引張挙動，離散ひび割れモデル，離散鉄筋モデル，付着喪失区間，付着特性
連　絡　先　：〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 1 丁目 2 番 5 号，JIP テクノサイエンス株式会社，TEL：03-5614-3204



(a)引張強度設定の影響　(b)付着喪失区間の影響　(c)付着特性の影響

図－２　荷重－変位応答の比較

鉄筋周辺からコーン状のひび割れが生じてコンクリートによる鉄筋の拘束力が弱まり，鉄筋とコンクリートの肌離れによって付着劣化が生じる．そのため解析モデルでは離散ひび割れ要素近傍に付着劣化域（ここでは付着喪失区間という）を考慮する必要がある．付着喪失区間については，ひび割れ面より 5D（D は鉄筋径）から 2.5D は付着応力がゼロに線形的に減少し，2.5D からひび割れ面までは付着応力がゼロになると提案されている[6]．そこで本検討では付着応力がゼロになる領域2.5D のみを付着喪失区間とした場合と，それよりも短い区間として 1.0D の場合を比較した．付着喪失区間の界面要素に対してはτ－S 関係の剛性をほぼゼロとして付着すべりに対して付着応力が発生しない特性とした．**図－２(b)**のとおり，付着喪失区間を 1.0D とした場合には，ひび割れ後の引張剛性が若干高く評価され，鉄筋降伏が早期に生じている．これは，鉄筋のみで引張力を負担する領域である付着喪失区間が短いと，当区間での鉄筋ひずみや応力が増大するためである．一方の 2.5D に設定した場合には実験結果と良い一致を示している．付着喪失区間はひび割れ幅の増大に伴って徐々にひび割れ面から深く進展するものと考えられるが，その区間の設定が RC 部材の挙動に影響することが確認でき，適切にモデル化することが重要であると考える．

3.3　付着特性の影響

解析対象とした一軸引張試験は，十分長い定着長を有する両引き試験であり，またかぶりも比較的大きいため割裂ひび割れの影響はないと考えて式(1)の付着モデルを用いた．ここで，感度解析として，式(1)において付着すべり S に対して付着応力τを 1/2 にした場合の結果を比較した．**図－２(c)**で示されるように，付着応力をτ/2 にした場合には，最終的に 4 本のひび割れが生じて鉄筋降伏に至った．付着強度や剛性を 1/2 に設定したため付着すべりがひび割れ面から奥まで進み，コンクリートに伝達される付着応力が小さくなることから 2 本目以降のひび割れ発生が遅れ，また，ひび割れ間隔が大きくなる結果となった．この結果は，鉄筋腐食などにより付着劣化が生じた場合にひび割れ間隔が大きくなる一般的な結果とも整合する．付着特性の設定においては，適切な付着モデルを適用することが重要である．

4. 結　論

一軸引張を受ける RC 部材を対象に離散ひび割れ－離散鉄筋モデルを用いた非線形 FEM 解析を実施した．その結果，ひび割れ発生と鉄筋の付着応力伝達を適切に表現し，ひび割れ後の部材の引張剛性を精度よく評価するためには，モデル化において以下を考慮する必要があることがわかった．

1）部材軸方向の応力勾配が小さいため，複数の離散ひび割れ要素が 1 本ずつ徐々にひび割れが発生するように各要素に設定する引張強度を変動させる必要がある．

2）鉄筋の抜け出しに伴って生じる付着劣化域を考慮するため，付着喪失区間を適切にモデル化する必要がある．

3）鉄筋とコンクリート間にモデル化する界面要素には，適切な付着特性（τ－S 関係）を適用する必要がある．

本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会の「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」での活動成果の一部である．関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）田所他：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1239-1248，2002.

2）関下他：分散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010.

3）玉井他：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.239-247，1987.

4）2007 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，土木学会，2008.3.

5）島他：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集，No.378, pp.165-174，1987.

6）K.MAEKAWA et al：Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete，Spon Press，2003.

分散ひび割れ型 FEM による RC 梁の非線形曲げ挙動に関する各種モデル化の影響

Influence on Various Modeling Concerning Nonlinear Bending Behavior of RC Beam Members by Smeared Crack Based FEM

(株)リテック　○正会員　関下 裕太 (Yuta SEKISHITA)
(株)ドーコン　正会員　小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
(株)ドーコン　正会員　吉田 安寿 (Yasukazu YOSHIDA)
JIP テクノサイエンス(株)　正会員　川口 和広 (Kazuhiro KAWAGUCHI)
北武コンサルタント(株)　正会員　宮本 真一 (Shinichi MIYAMOTO)

1. はじめに

著者らは，RC 部材を対象とした非線形有限要素解析に着目し，一軸引張力が作用する RC 部材を対象としてコンクリートのひび割れモデルと鉄筋のモデル化の組み合わせの違い等が解析結果に及ぼす影響について検討を行った [1)~3)]．その結果，分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる検討結果に限定すると，1)要素寸法（要素分割数）の影響は受けないこと，2)コンクリートの引張領域における引張応力－ひずみ関係の軟化勾配が解析結果に大きな影響を及ぼすこと，等を明らかにしている．しかしながら，これらの検討は断面内のひずみ分布がほぼ一様となる比較的単純な場合であり，曲げを受ける梁部材のようにひずみがある領域に局所化するような部材に対しても，それらの影響を十分に把握しておく必要がある．

このような観点から，本検討では曲げ破壊する RC 梁部材を対象として，要素分割，引張領域におけるコンクリートの引張応力－ひずみ関係の軟化勾配および圧縮領域のモデル化が荷重－変位応答に与える影響について検討を行った．なお，本検討では分散ひび割れ－分散鉄筋モデルに限定した形で各種検討を実施することとした．

2. 解析対象の概要

図－1 には，本検討で対象とした RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している．供試体は，断面寸法 200×400mm，スパン長 2,600mm，せん断スパン比 2.86 とした複鉄筋矩形 RC 梁である．設計上のせん断余裕度は 2.52 であり，静載荷時に曲げ引張破壊が生じるように断面設計を行った．表－1，2 には，それぞれコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している．

表－1　コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
25.7	2.0	25.9	0.2

表－2　鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D10	355.0	179.0	0.3
D16	356.0	177.0	

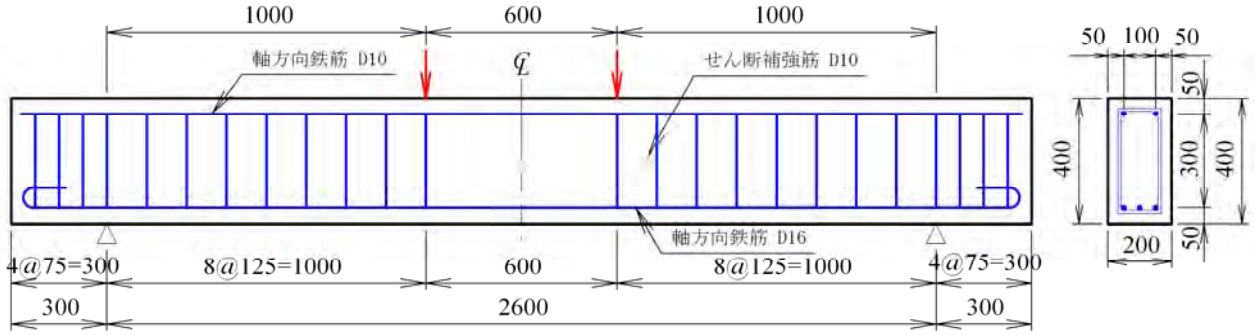
3. 数値解析の概要

3. 1　解析モデル

本解析では，2 次元非線形有限要素解析プログラム WCOMD を用いた．図－2 には要素分割の影響を調べるために設定した各ケースの要素分割図を示している．

解析モデルは，供試体と荷重条件の対称性を考慮してハーフスパンモデルとした．適用した有限要素は，計 9 つのガウス積分点を有する 8 節点平面応力要素であり，鉄筋はその剛性を要素中に平均化して取り扱う RC 要素によってモデル化した．ただし，比較的粗い要素分割に対しても解析精度を確保するために，鉄筋との付着によってひび割れの分散が期待できる領域（RC ゾーン：図中，水色の領域）と，ひび割れの分散が期待できない領域（無筋ゾーン：図中，灰色の領域）を区分している．

本解析では，軸方向鉄筋に対する RC ゾーンは梁高方向に縁からかぶりの 2 倍の 100mm とし，奥行き方向には梁の全幅である 200mm とした．一方，せん断補強筋



図－1　RC 梁の形状寸法および配筋状況

表－3　解析ケース一覧

解析ケース	要素分割のパターン	引張領域の付着パラメータ	圧縮領域の付着パラメータ	載荷点近傍要素の圧縮強度	備　考
CASE1	標準	0.4	0.4	1.0f'c	標準ケース
CASE2	細				要素分割の影響
CASE3	粗				
CASE4	標準	0.2			引張領域の引張軟化勾配(付着パラメータ)の影響
CASE5		1.0			
CASE6		2.0			
CASE7		0.4	無筋相当		圧縮領域(載荷点近傍)の引張軟化勾配(付着パラメータ)および圧縮強度の影響
CASE8			0.4	2.0f'c	
CASE9				3.0f'c	

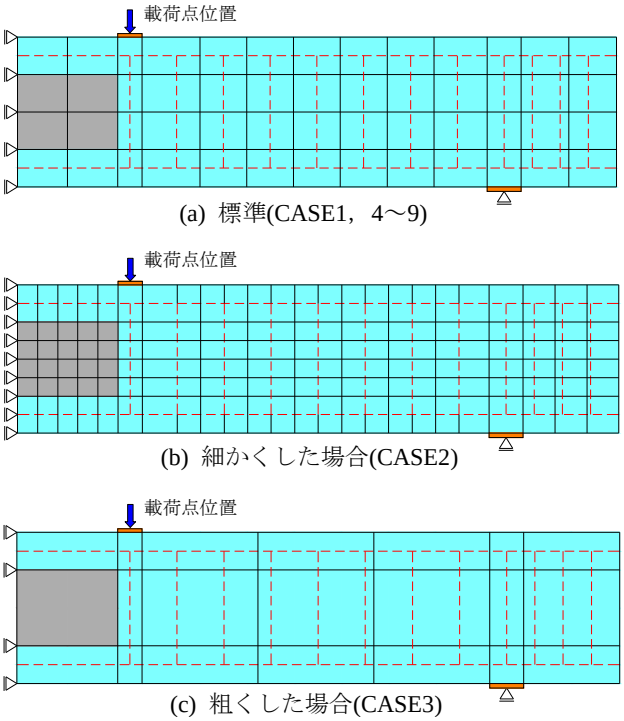
は梁軸方向に密に配置されていることから，せん断スパン内および支点から外側に至る領域を RC ゾーンとし，奥行き方向は梁の全幅とした．したがって，軸方向鉄筋による付着の効果が及ばず，かつ，せん断補強筋が配置されていないスパン中央部近傍の要素に関しては無筋ゾーンとしてモデル化した．なお，載荷板および支持板については簡略化して弾性要素でモデル化を行っている．

3．2　境界条件および荷重条件

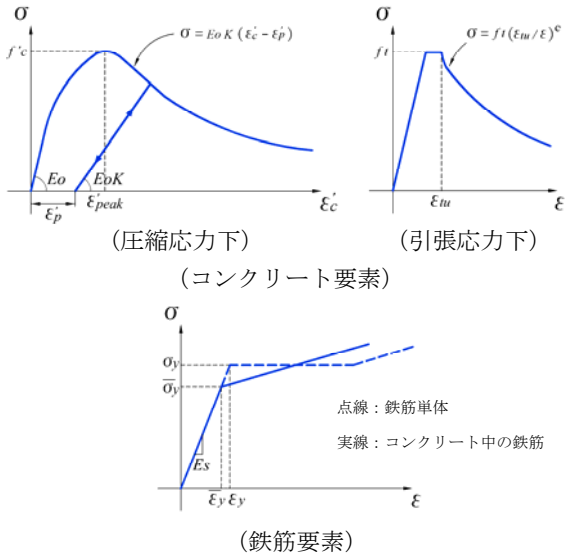
境界条件は，スパン中央部における対称切断面においてはその面に対する水平方向変位成分を，載荷板および支持板は要素中心節点位置の鉛直方向変位成分をそれぞれ拘束した．荷重条件は，載荷点位置を鉛直方向に強制変位させる 1STEP あたり 0.1mm 刻みの漸増載荷とした．なお，収束計算には Newton-Raphson 法と修正 Newton-Raphson 法を組み合わせた手法を用いており，収束判定基準は正規化された残差力ノルムとそれに対応する変位ノルムで許容値を 10^{-6} として，1STEP 当たりの反復回数は 12 回と設定している．

3．3　材料構成則

図－3 にはコンクリートおよび鉄筋の応力－ひずみ関係を示している．材料構成則には，岡村・前川らによって開発された履歴依存型の非線形材料構成則を適用した．本構成則は，分散ひび割れの仮定に基づく非直交多方向固定ひび割れモデルおよびコンクリートと鉄筋の非線形モデルで構成されており，RC の非線形領域における適用性が既に検証されているものである [4]．ひび割れ発生後の引張応力－引張ひずみ関係の軟化勾配は，前述のように RC ゾーンと無筋ゾーンを区分していることから，RC ゾーンに対しては tension-stiffening モデルを，無筋ゾーンに対しては要素寸法と破壊エネルギーから求まる軟化勾配を設定した．ここで，RC ゾーンの tension-stiffening モデルにおける付着パラメータ C は推奨値である 0.4 を標準とした．また，鉄筋にはひび割れた鉄筋コンクリート中のひび割れを複数含む領域内において空間平均化した平均応力－平均ひずみ関係を用いており，鉄筋単体で見られるような塑性棚がなく，かつ鉄筋とコンクリートの付着によって降伏強度が鉄筋単体の降伏強度よりも低下する現象（図中，実線）が考慮されている．なお，破壊基準は，最大引張ひずみ，最大圧縮ひずみ，および最大せん断ひずみをそれぞれ 10%と設定した．



図－2　各ケースの要素分割図



図－3　各材料の応力－ひずみ関係

3．4　解析ケース

表－3 には解析ケース一覧を示している．本検討では，要素分割の影響(CASE1，2～3)，引張領域の引張軟化勾配の影響(CASE1，4～6)，圧縮領域の引張軟化勾配(CASE1，7)の影響，載荷点近傍要素の強度設定の影響(CASE1，8～9)に着目した計 9 ケースを実施した．

4．解析結果および考察

4．1　要素分割の影響

図－4(a)には，要素分割の違いが解析結果に与える影響を把握するために，図－2 に示した 3 パターンの要素分割に対する荷重－変位関係を比較して示している．

図より，いずれのケースにおいても鉄筋降伏に至るまでの荷重および変位は実験結果と良く一致している．しかしながら，荷重が低下し始める変位レベルが各ケースで大きく異なっており，ポストピーク領域では要素分割の影響を受けていることが分かる．また，要素分割が細かい，すなわち要素寸法が小さい場合ほど早期に荷重が低下する傾向にある．これは，数値解析において荷重が低下する理由は，載荷点近傍の圧縮領域における要素が軟化域に達するためであるが，要素寸法が小さい場合ほど軟化域に達する要素が局所化するためである．

したがって，既報 [1)]の一軸引張力が作用する RC 部材の解析では要素寸法の影響は受けなかったが，曲げが作用する梁部材のようにひずみがある領域に局所化する部材では要素寸法の影響を受けることが明らかとなった．よって，非線形有限要素解析を用いてポストピーク領域まで予測する必要がある場合には，引張領域のみならず圧縮領域に対しても破壊エネルギーの概念を用いる等，要素寸法依存性を低減可能な構成則を適用する必要があるものと考えられる [5)]．

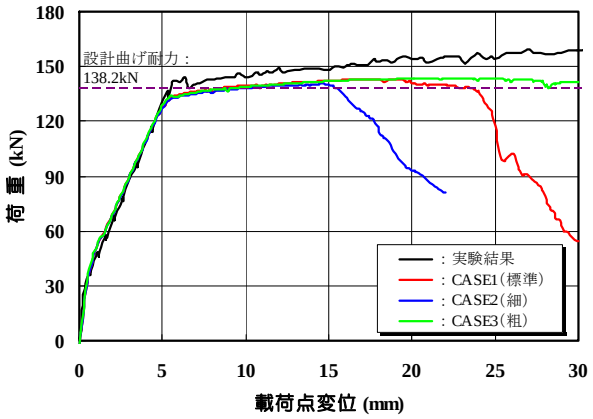
4．2　引張領域における付着パラメータの影響

ここでは，引張領域におけるコンクリートの引張応力－ひずみ関係の軟化勾配（tension-stiffening モデル）の違いが解析結果に与える影響を把握するために，引張鉄筋が配置されている RC ゾーンに対して軟化勾配を表す付着パラメータ C を種々に変化させた場合の検討を行うこととした．

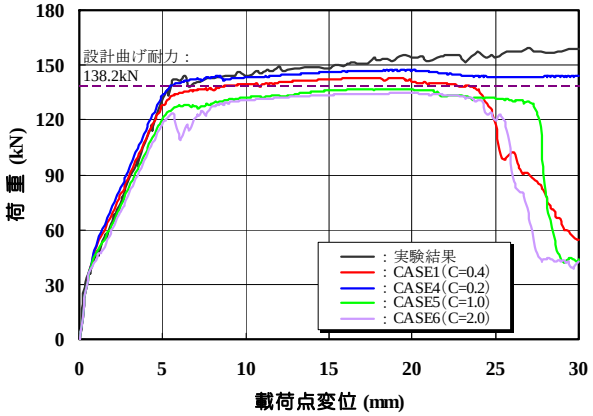
図－4(b)には，付着パラメータをそれぞれ C=0.2，0.4，1.0，2.0 とした場合の荷重－変位関係を比較して示している．図より，付着パラメータはひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの剛性のみならず，降伏荷重および降伏以後の挙動にも大きな影響を与えており，付着パラメータが大きいほど，すなわち鉄筋とコンクリートの付着性能が劣化するほど剛性，荷重ともに小さく評価される傾向にあることが分かる．なお，この傾向は，既報 [1), 2)]の一軸引張力が作用する RC 部材においても同様であった．したがって，引張領域における RC ゾーンの付着パラメータは解析結果に大きな影響を与えるため，付着パラメータの設定にあたっては十分に留意する必要がある．

4．3　圧縮領域における付着パラメータの影響

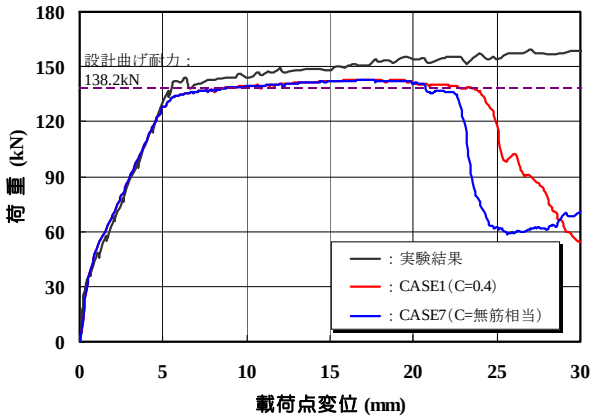
複鉄筋 RC 梁の場合には圧縮鉄筋が配置されるため，一般には圧縮領域も RC 要素によってモデル化し，かつこの領域では圧縮応力が卓越するものの，引張領域と同様に tension-stiffening モデルが適用されている．そこで，ここでは圧縮領域における RC ゾーンに適用する付着パラメータが解析結果に与える影響について検討を行うこととした．



(a) 要素分割の影響



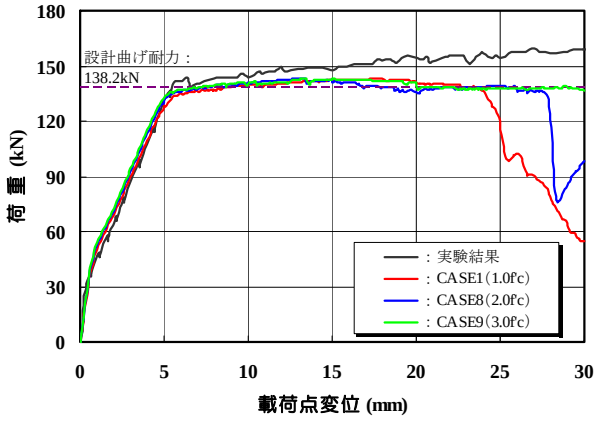
(b) 引張領域における付着パラメータの影響



(c) 圧縮領域における付着パラメータの影響

図－4　各ケースにおける荷重－変位関係の比較 (1)

図－4(c)には，付着パラメータを推奨値である C=0.4 として軟化勾配を設定した場合と，無筋コンクリート相当の付着パラメータとして軟化勾配を設定した場合の荷重－変位関係を比較して示している．図より，荷重が低下し始める変位レベルに若干の差異が見られるものの，鉄筋降伏以後の変位 20mm 程度まではほぼ一致しており，付着パラメータの影響は小さいことが分かる．



(d) 載荷点近傍の圧縮強度の影響

図－4　各ケースにおける荷重－変位関係の比較 (2)

4．4　載荷点近傍の圧縮強度の影響

4．1 で述べたように，解析結果が実験結果と比較して早期に荷重が低下するのは，載荷点近傍の圧縮領域における要素が局所的に軟化域に達するためである．一方で，載荷点近傍は載荷板を介して支圧による圧縮応力が作用し，同時に曲げによる圧縮応力が作用する 2 軸の圧縮応力状態となっているため，その拘束効果によってコンクリートの強度が増加するものと考えられる．したがって，その効果を表現することで早期の荷重低下を抑制できる可能性があるため，載荷点近傍要素の圧縮強度を実強度の 2 倍，3 倍と意図的に増加させて，それが荷重－変位関係に与える影響について検討を行うこととした．ここで，コンクリートの圧縮強度を増加させた要素は，載荷板の直下とその両隣の要素とした．なお，引張強度は，コンクリート標準示方書 [6]に準拠して圧縮強度から設定しているが，圧縮強度の増加に伴って引張強度も増加させると，圧縮鉄筋の平均降伏強度が大幅に低下して引張鉄筋に先行して圧縮鉄筋が降伏に至る結果が得られたため，ここでは圧縮強度のみを変化させることとした．すなわち，圧縮強度は増加させているが，引張強度は実圧縮強度に相当する引張強度(ft=2.0MPa)としている．

図－4(d)には，載荷点近傍要素の圧縮強度を変化させた各ケースの荷重－変位関係を比較して示している．図より，載荷点近傍要素の圧縮強度を変化させてもひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの挙動に対してはほとんど影響を与えないが，荷重が早期に低下する現象は改善されていることが分かる．実強度である 1.0f'c とした CASE1 では変位 24mm 程度で荷重が低下しているが，2.0f'c とした CASE8 では 28mm 程度，3.0f'c とした CASE9 では 30mm 時点においても荷重低下は生じていない．これより，本検討は圧縮領域における破壊の局所化に起因する早期の荷重低下を改善することを目的として試みたものであるが，載荷点近傍の拘束効果によるコンクリート強度の増加を意図的に考慮することである程度改善されることが明らかとなった．しかしながら，この手法はあくまでも数値解析上のテクニックの 1 つであり，本質的な対応策ではないことに留意する必要がある．前述のように，圧縮破壊エネルギーの概念を用いて要素寸法依存性を低減し，かつ載荷点近傍の拘束効果によるコンクリート強度の増加を適切に考慮可能な材料構成則を適用しなければならない．

5．まとめ

本検討では，分散ひび割れモデル－分散鉄筋モデルによる曲げ破壊型の RC 梁部材の非線形挙動解析に着目し，モデル化の違いが解析結果に及ぼす影響について検討を行った．具体的には，要素分割，引張領域におけるコンクリートの引張応力－ひずみ関係の軟化勾配（付着パラメータ）および圧縮領域のモデル化が荷重－変位応答に与える影響について検討を行った．本検討の範囲内で得られた知見を要約すると，以下の通りである．

1）要素分割の影響は鉄筋降伏に至るまでの領域では小さいが，ポストピーク領域では大きい．したがって，ポストピーク領域を含めて精度良く予測する必要がある場合には，引張領域のみならず圧縮領域に対しても破壊エネルギーの概念を用いる等，要素寸法依存性を低減可能な構成則を適用する必要がある．

2）引張領域における RC ゾーンの付着パラメータは解析結果に大きな影響を与えるため，その設定にあたっては十分に留意する必要がある．

3）圧縮領域における RC ゾーンの付着パラメータは解析結果にほとんど影響を与えない．

4）圧縮領域における破壊の局所化に起因する早期の荷重低下現象は，載荷点近傍の拘束効果によるコンクリート強度の増加を意図的に考慮することで，ある程度改善される．

本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」における活動成果の一部である．
北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授，北武コンサルタント(株)の渡辺忠朋副社長を始め，委員各位から貴重なご意見を頂戴しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献：

1）関下裕太，川口和広，小林竜太，宮本真一：有限要素法による RC 部材の一軸引張挙動に関する各種モデル化の影響，土木学会北海道支部論文報告集，第 66 号，E-20，2010.2.

2）関下裕太，川口和広，小林竜太，宮本真一：分散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-572，2010.9.

3）川口和広，関下裕太，小林竜太，宮本真一：離散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-573，2010.9.

4）岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.

5）田所敏弥，佐藤靖彦，上田多門：鉄筋コンクリート部材の終局変形に及ぼす圧縮軟化の影響，構造工学論文集，Vol.47A，No.3，pp.1309-1314，2001.

6）2007 年制定：コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会，2008.3.

非線形有限要素法による RC 部材の変形・破壊シミュレーション解析

㈱北未来技研　○関下　裕太
北海道大学大学院　正会員　工博　佐藤　靖彦
㈱ドーコン　工修　小林　竜太
JIPテクノサイエンス㈱　工修　川口　和広

１．はじめに

土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】では，維持管理の対象となる要求性能に対して必要な点検方法は示されているものの，現有耐荷性能のような構造性能の評価は必ずしも定量的なものにはなっていない。そのため，点検により把握した外観変状をもとにグレーディングを行い，構造物の性能低下を半定量的に評価しているのが現状であるが，構造性能を定量的に把握できる手段が確立されれば，より合理的な維持管理が実施できるものと期待されている。一方，近年ではコンクリート構造物の性能を定量的に評価する手法として，非線形構造解析が多く利用され始めており，鉄筋腐食やコンクリートの劣化等，材料劣化が生じた構造物の構造性能評価への適用性も検討されている[1)]。

このような背景の下，北海道土木技術会コンクリート研究委員会では「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」を設置し，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価技術の現状を把握するとともに，非線形構造解析技術を利用するために必要な知識の習得を目指した活動を行っている。本稿では，本研究委員会における活動の一環として実施した，材料劣化が生じていない RC 部材を対象とした非線形有限要素法解析による基礎的な検討内容について紹介する。

２．検討概要

RC 部材の非線形挙動を有限要素解析によって再現する場合，ひび割れの発生や進展のモデル化および鉄筋のモデル化が解析結果に大きな影響を及ぼすことになる。ひび割れや鉄筋を有限要素解析で取り扱う方法としては，それぞれを離散的に表現する方法と要素内に一様に分散させる方法があり，その組み合わせとしては1)分散ひび割れ－分散鉄筋モデル，2)分散ひび割れ－離散鉄筋モデル，3)離散ひび割れ－離散鉄筋モデルの3つに分類される。解析によって得られる応答値は，いずれの解析モデルによっても同一の解が得られる必要があるが，各モデルの特性を把握した上で適切な設定を行わなければ解析結果に大きな相違が生じる可能性がある。

そこで，本検討では，最も基礎的な一軸引張応力状態の非線形挙動に着目し，コンクリートのひび割れモデルおよび鉄筋のモデル化とそれらの組み合わせの相違が解析結果に与える影響について種々の検討を実施することとした。

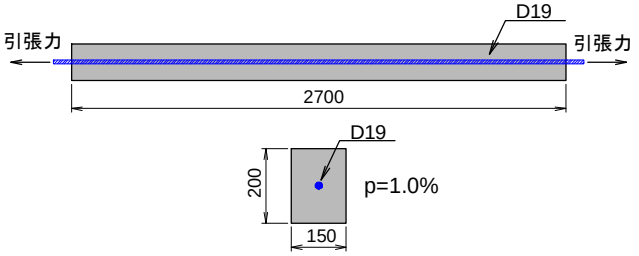
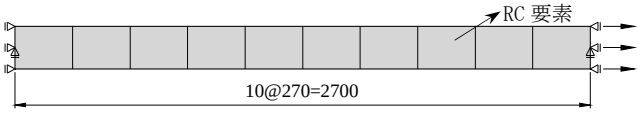
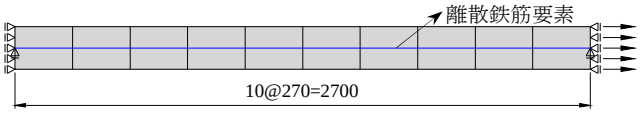


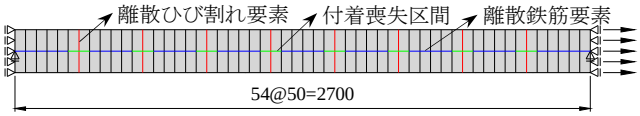
図-1　両引き試験体の形状寸法



(a) 分散ひび割れ－分散鉄筋モデル



(b) 分散ひび割れ－離散鉄筋モデル



(c) 離散ひび割れ－離散鉄筋モデル

図-2　解析モデル（要素分割）の一例

３．解析対象および解析条件の概要

本検討では，玉井ら[2] が実施した両引き試験を解析対象とした。**図-1**に試験体の形状寸法を示す。試験体は，部材長が2,700mm，断面寸法が200mm×150mmの矩形断面であり，断面中心位置にD19が1本配置された鉄筋比1%の試験体である。**表-1**，**2**には，コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示す。

解析はいずれも2次元解析とし，コンクリートは8節点平面応力要素，離散化した鉄筋は3節点梁要素でモデル化した。また，離散ひび割れは界面接合要素によってモデル化し，離散鉄筋モデルにおけるコンクリートと鉄筋の要素間は界面接合要素を用いて付着ーすべり挙動を表現することとした。

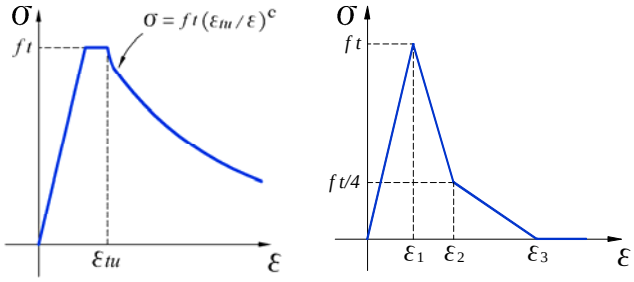
境界条件および荷重条件は，**図-2**に示すように解析モデル両端部の水平方向変位成分を拘束し，その一端に水平方向の引張力を強制変位として与えた。ただし，モデル端部の鉄筋位置のみ鉛直向変位成分も拘束している。ここで，ひび割れモデルには，任意方向の複数本のひび割れを考慮可能な多方向固定ひび割れモデルを採用している。

表-1　コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
45.0	2.9	30.0	0.2

表-2　鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
D19	610.0	190.0	0.3



(a)Tension Stiffening　(b)Tension Softening

図-3　コンクリートの引張軟化特性

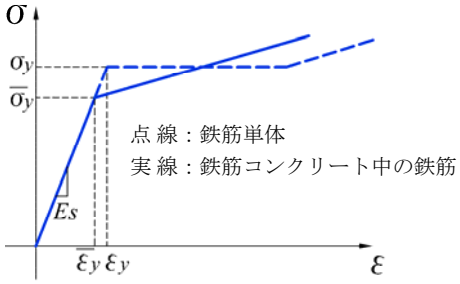


図-4　鉄筋の応力ーひずみ関係

４．分散ひび割れー分散鉄筋モデルに対する検討

４．１　解析モデルおよび検討内容

図-2(a)に，分散ひび割れー分散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。本モデルでは部材軸方向の要素分割は10分割を基本とした。コンクリートの引張軟化特性には岡村ら[3] が提案した**図-3(a)**に示すTension Stiffeningモデルを適用し，付着パラメータはC＝0.4を標準値とした。また，鉄筋の応力ーひずみ関係には**図-4**の実線で示した RC中の鉄筋の応力ーひずみ関係を用いた。ここで，本モデルにおいては，部材軸方向の要素分割数と付着パラメータCの影響に着目して検討を行うこととした。

$$\tau = 0.9\left(f'_c\right)^{2/3}\left[1-\exp\left\{-40\left(S/D\right)^{0.6}\right\}\right] \qquad (1)$$

τ：付着応力，f'_c：コンクリート強度
S：すべり量，D：鉄筋径

４．２　解析結果および考察

図-5には，分散ひび割れー分散鉄筋モデルで得られた荷重ー変位応答を実験結果と比較して示している。なお，図中には，鉄筋単体に引張力を作用させた場合の荷重ー変位応答も併せて示している。

図-5(a)は，部材軸方向の要素分割数を種々に変化させた場合の解析結果を比較したものである。図より，いずれの解析ケースも実験結果の荷重ー変位応答と良い一致を示しており，かつ要素分割数の影響は受けていないことが分かる。これは，本モデルにおけるコンクリート引張応力下の平均応力ー平均ひずみ関係は要素寸法にかかわらず等しいことから，解の唯一性が保証されているためである。

図-5(b)は，引張軟化勾配に影響を与える付着パラメータを変化させた場合の解析結果を比較したものである。図より，C＝0.4とした場合は実験結果と良い一致を示しているが，C＝0.2あるいは2.0とした場合には実験結果の荷重ー変位応答を過大あるいは過小に評価しており，ひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの挙動のみならず，鉄筋降伏以後の挙動にも大きな影響を与えていることが分かる。

５．分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する検討

５．１　解析モデルおよび検討内容

図-2(b)に，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。本モデルでは部材高さ方向および部材軸方向の要素分割をそれぞれ2分割，10分割と設定した。コンクリートの引張軟化特性には，図-3に示すTension StiffeningとTension Softeningの両者のモデルを適用した。ここで，Tension Softeningモデルには土木学会コンクリート標準示方書【設計編】に準拠した引張破壊エネルギーを考慮した2直線モデルを適用し，鉄筋には図-4の点線で示した鉄筋単体の応力－ひずみ関係を用いた。また，付着応力－すべり関係には式(1)に示す島ら[4]によるモデルを適用した。ここで，本モデルにおいては，コンクリートの引張軟化特性と付着応力－すべり関係における付着応力の影響に着目して検討を行うこととした。

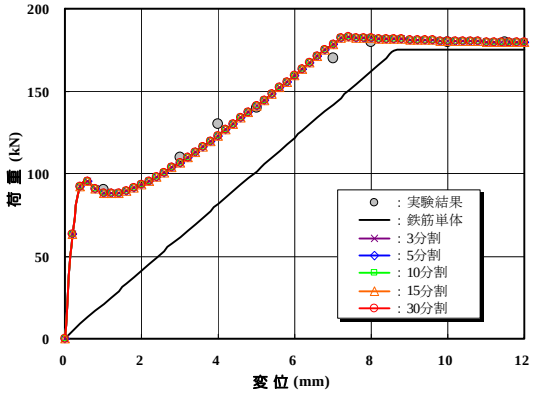
５．２　解析結果および考察

図-6には，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルで得られた荷重－変位応答を実験結果と比較して示している。

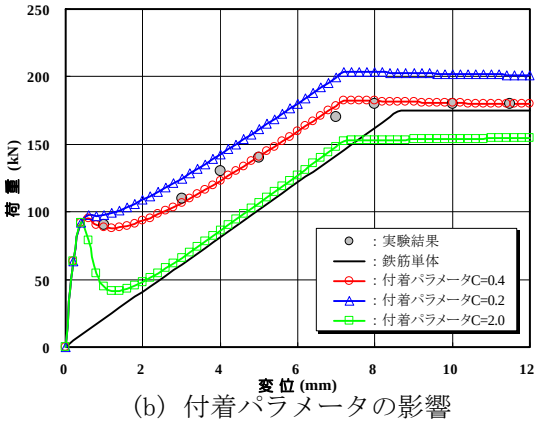
図-6(a)は，上述の2つの引張軟化特性モデルを用いた場合の解析結果を比較したものである。図より，Tension Softeningモデルを適用した場合には，ひび割れ発生後に荷重が急激に除荷され，実験で得られた荷重－変位応答の再現性は低いが，Tension Stiffeningモデルを適用した場合には良い一致を示していることが分かる。これは，Tension Softeningモデルを適用した場合にはひび割れが局所化せずに広範囲に分散されて，すべりが極大化する位置が限定されないため，その結果として付着応力－すべりモデルが有効に機能しなかったためと推察される。

図-6(b)は，式(1)で算定される付着応力を0.1倍あるいは10倍とした場合の解析結果を比較したものである。図より，いずれのケースにおいても実験で得られた荷重－変位応答の再現性は低いが，付着応力が大きい場合にはひび割れ発生後に早期に鉄筋単体の挙動に近づき，逆に付着応力が小さい場合には実験結果に近づく傾向にあることが分かる。よって，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおいてTension Softeningモデルを用いる場合には，ひび割れを局所化させるための工夫が必要であるものと考えられる。その方法としては付着特性や境界条件の他，コンクリートの引張強度にばらつきを付与すること等が考えられるが，これらについては今後の課題としたい。

６．離散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する検討

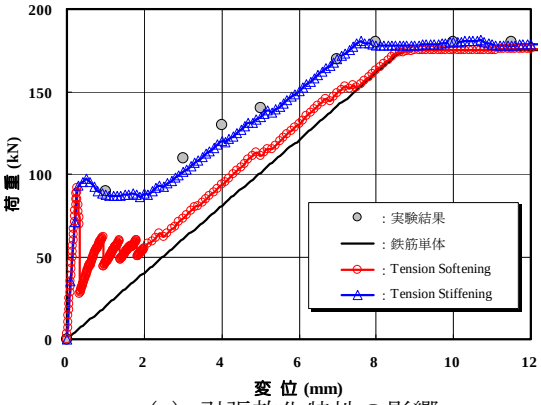


(a) 要素分割数の影響

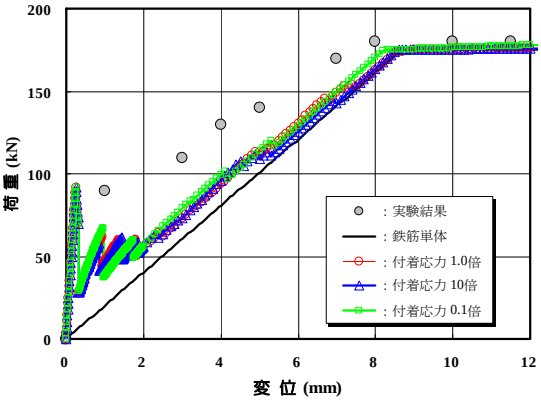


(b) 付着パラメータの影響

図-5　分散ひび割れ－分散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較



(a) 引張軟化特性の影響



(b) 付着応力の影響

図-6　分散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較

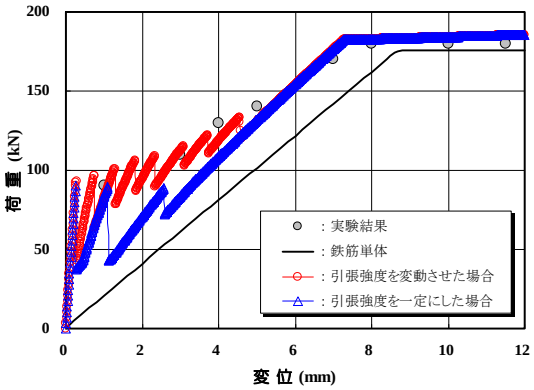
６．１　解析モデルおよび検討内容

図-2(c)に，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。離散ひび割れは実験[2]で得られた平均ひび割れ間隔（約300mm）を参考にして部材軸方向に計8本のひび割れをモデル化し，ひび割れ間のコンクリート要素は弾性要素とした。離散ひび割れ要素の引張応力－ひび割れ幅関係には，前述のTension Softeningモデルを適用し，鉄筋には図-4の点線で示した鉄筋単体の応力－ひずみ関係を，付着応力－すべり関係には前述の島ら[4]によるモデルを適用した。また，開口するひび割れの近傍では付着劣化が生じることから，付着喪失区間（鉄筋径Dの2.5倍の区間を標準とした）を考慮するために部材軸方向の要素分割数を54分割と細かく設定した。ここで，本モデルにおいては，離散ひび割れ要素の引張強度と付着喪失区間長の影響に着目して検討を行うこととした。

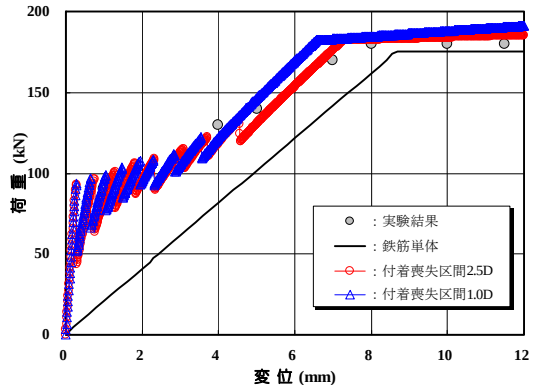
６．２　解析結果および考察

図-7には，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルで得られた荷重－変位応答を実験結果と比較して示している。

図-7(a)は，離散ひび割れ要素の引張強度を一定値とした場合と変動（f_t＝2.90～3.95MPa，変動係数で約10%）させた場合の解析結果を比較したものである。図より，引張強度を一定値とした場合には，複数本のひび割れが同時に発生するため引張剛性が過小に評価されていることが分かる。一方，引張強度を変動させた場合には，ひび割れが順次発生する過程が良好に再現されることから実験結果と良い一致を示している。



(a) 引張強度設定の影響



(b) 付着喪失区間の影響

図-7　離散ひび割れ－離散鉄筋モデルにおける荷重－変位応答の比較

図-7(b)は，離散ひび割れ要素近傍の付着喪失区間をそれぞれ1.0D，2.5Dと設定した場合の解析結果を比較したものである。図より，付着喪失区間を1.0Dとした場合にはひび割れ発生後の引張剛性が若干大きく評価され，かつ鉄筋降伏が早期に生じていることが分かる。一方，2.5Dとした場合には実験結果と良い一致を示しており，付着喪失区間は解析結果に大きな影響を与えることが確認された。

７．おわりに

本報告では，コンクリート構造物の構造性能を定量的に評価可能な手法の1つである非線形有限要素法解析に着目し，一軸引張作用を受ける RC 部材を対象としてコンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とそれらの組み合わせの相違が，解析結果に与える影響に関する基礎的な検討を行った。

今後は，本検討で得られた知見をもとに，梁・柱部材に対しても同様な検討を実施し，最終的には材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に応用していきたいと考えている。

参考文献：

１）土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ71，2006.

２）玉井真一，島 弘，出雲淳一，岡村 甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.239-247，1987.

３）岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.

４）島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.165-174，1987.

論文　RC 部材の一軸引張有限要素解析における付着構成則の感度と妥当性評価

川口　和広[*1]・佐藤　靖彦[*2]・小林　竜太[*3]・関下　裕太[*4]

要旨：一軸引張力を受ける RC 部材を対象に，離散型と分散型の 2 つのひび割れモデルに対する付着構成則の感度や妥当性について検討した。その結果，離散ひび割れモデルに対しては付着応力-すべり-ひずみ関係の適用性が高いこと，また，付着応力-すべり関係を適用する場合にはひび割れ近傍における付着劣化の影響を考慮するために最大付着応力の低減や軟化域を設ける必要があることを明らかにした。一方，分散ひび割れモデルに対する付着構成則の感度は離散ひび割れモデルの場合とは異なり，離散ひび割れモデルに適用できた付着構成則を用いると，引張剛性やコンクリートの貢献分が小さく評価されることが明らかとなった。

キーワード：非線形 FEM 解析，付着構成則，ひび割れモデル，一軸引張挙動

1.　はじめに

近年，鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の性能を定量的に評価する手法として，有限要素法（以下，FEM）に代表される非線形構造解析が積極的に利用されている[1)]。

FEM解析は，コンクリートのひび割れの発生や進展，鉄筋の降伏などといったRC構造物の非線形挙動を評価する手法として非常に有効な手段であるが，多くの場合はコンクリートと鉄筋は完全付着として取り扱い，付着特性に関してはTension Stiffening効果を考慮したコンクリートの引張応力ーひずみ関係によって間接的に考慮しているのが一般的である[2), 3)]。しかしながら，付着特性は鉄筋降伏以前の変形のみならず，ひび割れの発生や進展，あるいは破壊モードにも影響を及ぼす可能性があることから，RC構造物の非線形挙動をより正確に評価するためには適切な付着構成則を適用する必要がある。

コンクリートと鉄筋の付着特性を表わす付着応力ーすべり関係（以下，τ - s 関係）は，これまでいくつかのモデルが提案されているが，その中でも特に島ら[4)]による提案式が有名である。しかしながら，島らのモデルはマッシブなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の引抜き試験に基づいて導かれたものであり，付着特性が材料強度や鉄筋径のみならず，かぶり厚や定着長，境界条件等にも影響を受けることから，その適用範囲には十分に留意する必要がある。また，非線形 FEM 解析において付着特性を扱う場合には，付着挙動がコンクリートのひび割れモデルによっても異なると予想されることから，各種ひび割れモデルに対する付着構成則の影響についても把握しておく必要がある。

そこで，本研究では非線形 FEM 解析に導入する適切な付着構成則を提案することを最終的な目的として，本論文ではその第 1 段階として一軸引張力を受ける RC 部材を対象とした付着構成則の感度や妥当性について検討を行った。すなわち，鉄筋を離散化した上で，離散型と分散型の 2 つのひび割れモデルを用いた解析モデルに種々の付着構成則を適用した解析を実施し，荷重ー平均ひずみ関係の整合性のみならず，付着応力分布や鉄筋ひずみ分布，鉄筋やコンクリートの負担力にも着目した詳細な考察を行った。

*1 JIP テクノサイエンス(株)　東京テクノセンタ解析技術部　修(工)　(正会員)
*2 北海道大学大学院　工学研究院准教授　博(工)　(正会員)
*3 (株)ドーコン　交通事業本部構造部　修(工)　(正会員)
*4 (株)北未来技研　技術部維持保全課

2. 解析対象および解析概要

2.1 解析の対象とした供試体の概要

本検討では，玉井ら[5)]が実施した一軸引張試験を解析対象とした。玉井らは，RC の引張剛性に影響を及ぼすと考えられるコンクリート強度，鉄筋比，鉄筋の降伏強度，養生条件を条件とした一連の実験を行っている。本検討ではそのうちの乾燥収縮の影響が小さい水中養生された「供試体 No.1」にのみ着目することとした。

図－1 に実験供試体の形状寸法および配筋を示す。供試体は部材長 2,700mm，断面寸法 200mm×150mm であり，断面中心位置に D19 を 1 本埋め込んだ鉄筋比 1.0%の供試体である。

コンクリートの圧縮強度は 45.0MPa，引張強度は 2.89MPa であり，鉄筋は材質が SD50，弾性係数は 190GPa，降伏強度は 610MPa である。

2.2 解析モデルおよび材料構成則

(1) 解析モデル

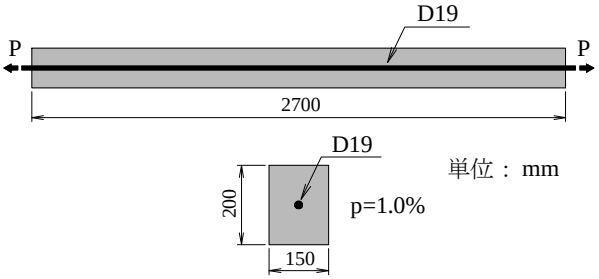
本解析では，汎用の有限要素解析プログラム DIANA(Ver.9.4.3)を使用し，いずれも平面応力場を仮定した 2 次元 FEM 解析とした。

図－2 に解析モデル（要素分割図）を示す。要素分割は断面高さ方向に 2 分割，軸方向に 56 分割（1 要素幅：約 48.2mm）とし，離散ひび割れモデルの場合には実験結果における平均ひび割れ間隔を参考にして 386mm 間隔で計 6 本のひび割れが発生するようにモデル化を行った。

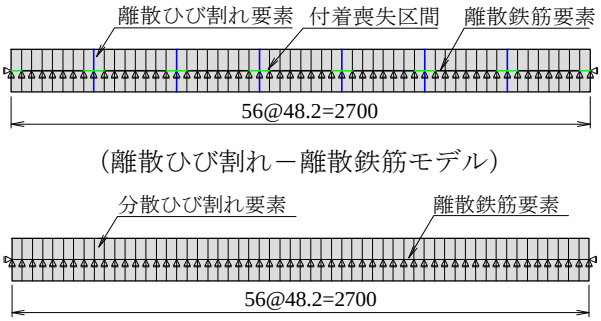
適用した有限要素タイプは，コンクリートは 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素，鉄筋は 3 節点梁要素である。離散ひび割れは 6 節点の界面接合要素を用いて表現し，鉄筋とコンクリートの要素間は 6 節点の界面接合要素を用いて両者を結合させた。なお，離散ひび割れモデルにおいては，ひび割れ発生は離散ひび割れ要素のみで表現することとし，ひび割れ間のコンクリートは全て弾性要素でモデル化した。

また，鉄筋軸を横切るひび割れ面の近傍では，鉄筋の抜け出しに伴って鉄筋周辺からコーン状のひび割れが生じてコンクリートによる鉄筋の拘束力が弱まり，鉄筋とコンクリートの肌離れによる付着劣化が生じる。そのため，本解析では**図－3** に示すように離散ひび割れ要素近傍に付着劣化域（付着喪失区間 L_b と呼ぶ）を考慮することとし，付着喪失区間 L_b は既往の論文[6)] を参考にして片側 2.5D(D：鉄筋径)とした。但し，分散ひび割れモデルにおいては，モデルの特性上ひび割れの発生位置を限定することができないため，付着喪失区間は考慮していない。

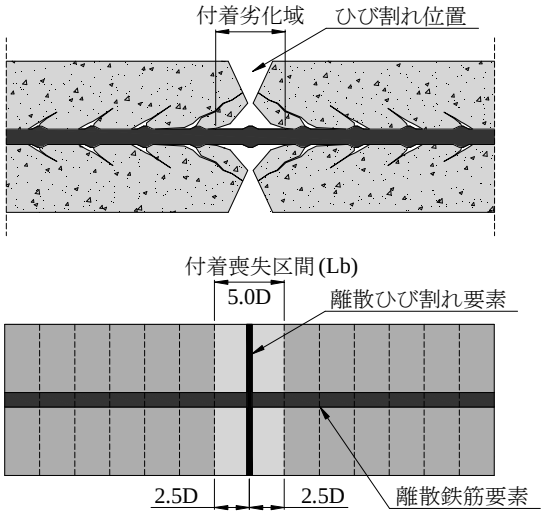
境界条件は，モデル両端部の水平方向変位成分を鉄筋位置で拘束し，加えて断面高さ中心位



図－1 実験供試体の形状寸法および配筋



図－2 解析モデル（要素分割図）



図－3 付着喪失区間のモデル化

置の全節点の鉛直方向変位成分を拘束させた。

解析手法は，変位制御方式による増分解析とし，実験条件と同様に鉄筋先端位置に水平方向の強制変位を与えた。1 ステップあたりの変位増分量は 0.01mm と設定し，Newton-Raphson 法に基づいて収束計算を行った。

(2) コンクリートの材料構成則

コンクリートの圧縮応力下における応力ーひずみ関係には，DIANA に組み込まれている Feenstra の放物線モデル[7]を用い, 圧縮破壊エネルギーは中村ら[8]の提案式をもとに算定した。引張軟化特性には，土木学会コンクリート標準示方書[9]に準拠した 1/4 モデル(**図ー4**)を用い，分散ひび割れモデルの場合には引張破壊エネルギーと等価長さからひび割れ幅をひずみに変換した。ここで，引張破壊エネルギーおよび等価長さは，それぞれ 0.1N/mm，48.2mm とした。

一軸引張を受ける RC 部材を離散ひび割れモデルによって解析する場合，コンクリートの引張強度を一定にすると，部材長手方向の応力勾配が小さいために複数本のひび割れが同時に発生して引張剛性を適切に評価できないことが指摘されている[6]。そこで，本解析では各離散ひび割れ要素に設定するコンクリートの引張強度の入力値を 2.89～3.65MPa（変動係数 8%）で変動させることとした。また，分散ひび割れモデルにおいても複数本のひび割れが同時に発生することから，本解析では部材中央面から左右非対称にひび割れが生じるように，簡易的に部材右半分の引張強度を 10%大きく設定した。

(3) 鉄筋の材料構成則

鉄筋の応力ーひずみ関係は降伏後のひずみ硬化を考慮したトリリニア型とし, von-Mises の降伏基準に従うものとした（**図ー5**）。なお，鉄筋のひずみ硬化開始ひずみおよび硬化率は，玉井らの論文[5]より, それぞれ 1.4%, 5.9GPa とした。

(4) 付着構成則

図ー6 には本解析で用いた付着構成則の一例を示している。本検討では島らの提案式[4]を基本として，鉄筋ひずみの影響を考慮した付着応力ーすべりーひずみ関係（以下，τ - s - ε 関係）の適用や，τ - s 関係における最大付着応力や軟化域の影響について検討を行った。ここで，本論文では，島らが提案した τ - s - ε 関係（式(1)）を「島モデルⅠ」，τ - s 関係（式(2)）を「島モデルⅡ」，τ - s 関係に対して最大付着応力の変化や軟化域を考慮したモデルを「修正島モデルⅡ」と表現することとする。なお，**図ー6** における島モデルⅠの付着応力ーすべり関係は，ひび割れ間隔を 386mm とした両引きの一軸引張解析から得られた結果である。

$$\tau = 0.73 f'_c \left(\ln\left(1+5\cdot 1000s\right)\right)^3 \Big/ \left(1+\varepsilon\times 10^5\right) \qquad (1)$$

$$\tau = 0.9 f'^{\,2/3}_c \left(1-e^{-40s^{0.6}}\right) \qquad (2)$$

ここで，

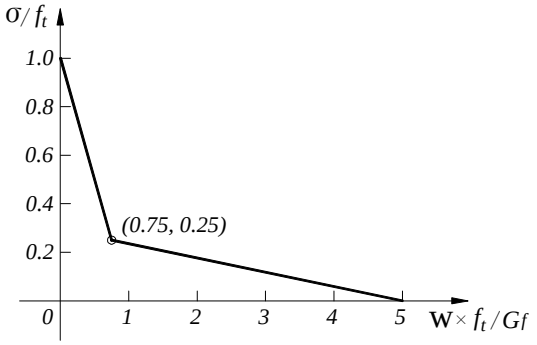
τ ：付着応力(MPa)

f'_c：コンクリートの圧縮強度強度(MPa)

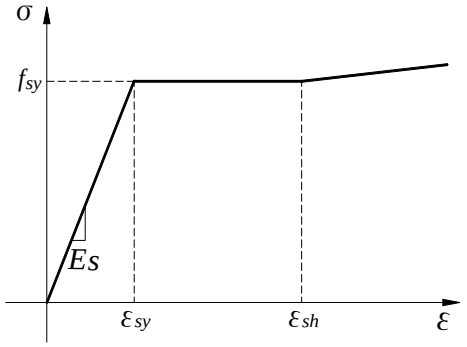
s：$s = S / D$

S：すべり量(mm)，　D：鉄筋径(mm)

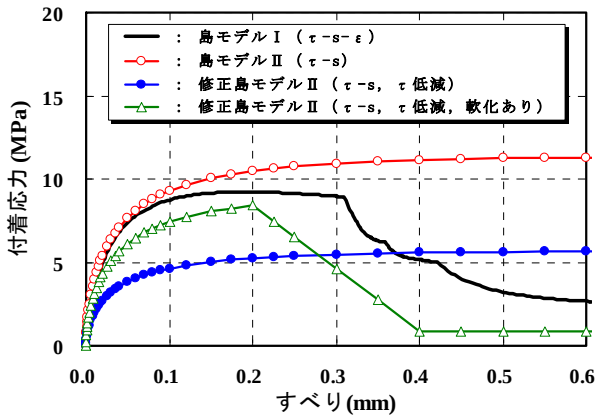
ε ：鉄筋ひずみ



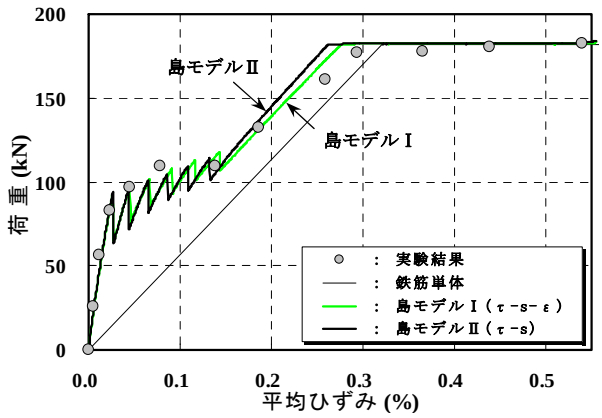
図ー4　コンクリートの引張軟化特性



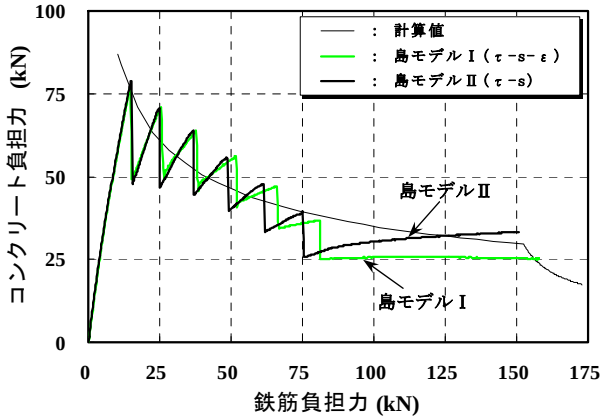
図ー5　鉄筋の応力ーひずみ関係



図－6　本解析で用いた付着構成則の一例



図－7　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－8　コンクリートと鉄筋の負担力の関係

また，離散ひび割れモデルにおける付着喪失区間では，τ-s 関係の剛性をほぼ零とし，すべりに対して付着応力が発生しないようにした。

3.　離散ひび割れモデルに対する検討結果

3.1　τ-s-ε 関係の適用性に関する検討

本節では，離散ひび割れモデルに対して，付着構成則に島モデルⅠ（τ-s-ε 関係）を適用した場合における解析結果について考察を行う。

図－7 に荷重－平均ひずみ関係を示す。横軸の平均ひずみは，コンクリート両端部に位置する鉄筋の相対変位量を供試体長さで除して算出した。また，図中には玉井らの論文 [5]から読み取った実験結果と，鉄筋単体の荷重－ひずみ関係も併せて示している。

図－8 はコンクリートおよび鉄筋の負担力の関係を示したものである。ここで，鉄筋の負担力は鉄筋の平均応力に鉄筋断面積を乗じて算出し，コンクリートの負担力は部材の全荷重から鉄筋負担力を差し引いて求めた。なお，図中には玉井らによる平均応力－平均ひずみの関係式をもとに算出した結果も併せて示しており，ここではそれを「計算値」と表記している。

図－7 より，ひび割れが 1 本ずつ順次発生することによって荷重低下と剛性低下を繰り返し，解析結果は実験結果と良い一致を示していることがわかる。また，**図－8** より，鉄筋およびコンクリートの負担力に関しても解析結果と計算値がほぼ一致していることが確認できる。また，コンクリートの平均応力－平均ひずみ関係も実験結果と一致することを別途確認している。

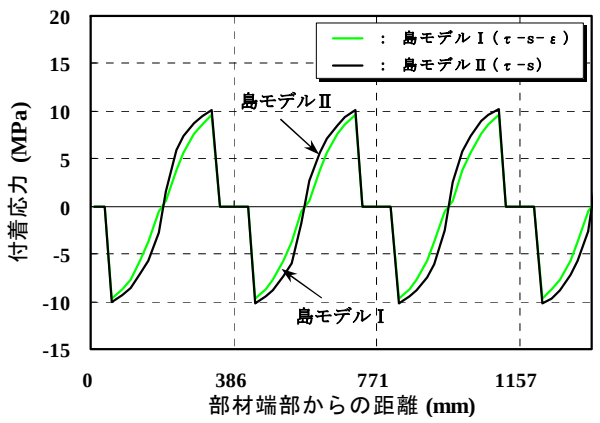
これらの結果より，離散ひび割れモデルにおいては，付着構成則に島モデルⅠ（τ-s-ε 関係）を適用し，かつコンクリートの引張強度のばらつきや付着喪失区間を考慮することで実験結果を適切に評価できることが確認された。

3.2　τ-s 関係の適用性に関する検討

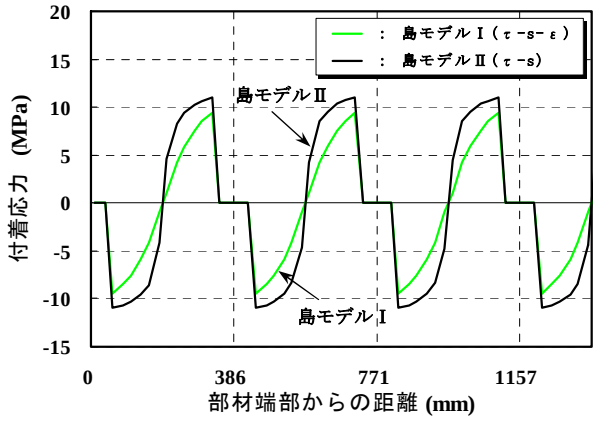
島モデルⅡ（τ-s 関係）は，定着長が十分に長く，境界条件として鉄筋ひずみが ε=0，かつすべり量が s=0 である場合を前提に，島モデルⅠ（τ-s-ε 関係）を簡略化したものである [4]。

本検討で対象とした両引き試験は ε=0 かつ s=0 となる領域は存在しないため，本来は島モデルⅡの適用範囲外である。しかし，FEM 解析で付着構成則を扱う場合は τ-s-ε 関係よりも τ-s 関係の方が便利であるため，ここでは島モデルⅡ（τ-s 関係）を適用した検討を行った。

前掲の**図－7** および**図－8** には，島モデルⅡを



（平均ひずみ 0.15%時）



（平均ひずみ 0.55%時）

図－9　各モデルにおける付着応力分布の比較

適用した場合の解析結果も示している。図より，付着構成則に島モデルⅡを適用した場合の解析結果は，島モデルⅠと同様に実験結果の荷重－平均ひずみ関係や，鉄筋およびコンクリートの負担力が計算値と良く一致していることがわかる。しかしながら，島モデルⅠと島モデルⅡの解析結果を比較すると，荷重や負担力に若干の差異が見受けられる。これは，島モデルⅡでは鉄筋ひずみの関数になっていないことから，島モデルⅠのように鉄筋ひずみの増大による付着応力の低下が表現できないためである。そこで，この違いの程度を比較するために，計 6 本のひび割れが全て発生した直後の平均ひずみ 0.15%時と，鉄筋降伏後の平均ひずみ 0.55%時における付着応力分布を**図－9** に示した。

図より，平均ひずみ 0.15%時では付着応力分布には大きな差は見られないが，0.55%時ではひび割れ近傍における最大付着応力が島モデルⅡの方が 15%程度大きく評価されている。

このように，ひずみレベルが大きい領域では両者で若干の差異が生じるが，本検討で対象とした一軸引張挙動においては，簡略化した島モデルⅡ（τ - s 関係）でも実験結果をある程度の精度で再現できることが確認された。

3.3　τ - s 関係を適用した場合の付着喪失区間および最大付着応力の影響

本解析では鉄筋軸を横切るひび割れ面の近傍にある一定の付着喪失区間を設定している（**図－3** 参照）。この付着喪失区間は，ひび割れ面における鉄筋の抜け出しに伴って徐々に進展していくと考えられるが，解析でその進展の過程や形成領域を正確に再現することは極めて困難である。そこで，本節では，付着喪失区間を考慮しない解析ケースを設定して，その場合に適用可能な付着構成則について検討を行う。

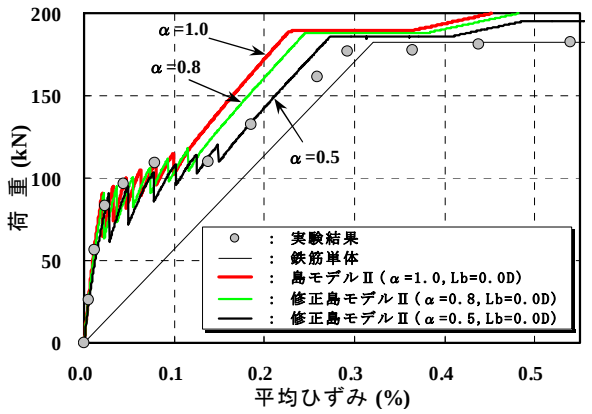
図－10 における島モデルⅡの解析結果は，付着構成則に τ - s 関係を適用し，かつ付着喪失区間を考慮しない場合（L_b＝0.0 D）の荷重－平均ひずみ関係である。図より，L_b＝0.0 D とした場合には，**図－7** の L_b＝2.5D とした場合と比較して引張剛性を過大に評価しており，また，鉄筋のひずみ硬化による荷重増加が早期に起きていることがわかる。これは，付着喪失区間を考慮しない場合には，鉄筋ひずみがごく狭い範囲で増大することによる。一方，**図－11** に示すように，コンクリートによる負担力が計算値よりも大きく評価されている。

そこで，コンクリートによる負担力を低減させるために，島モデルⅡ（式(2)）に対して，最大付着応力の低減係数 α を考慮した「修正島モデルⅡ（式(3)）」（**図－6** 参照）による検討を行った。

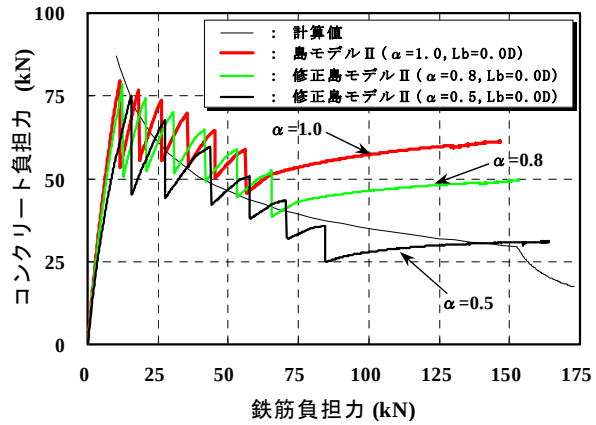
$$\tau = \alpha \cdot 0.9 f'_c{}^{2/3}\left(1 - e^{-40 s^{0.6}}\right) \tag{3}$$

ここで，

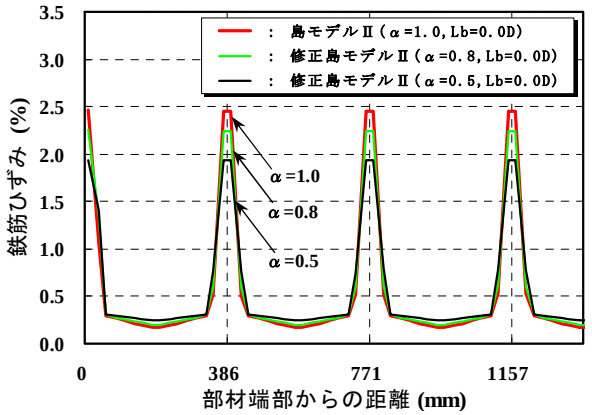
α ：付着応力の低減係数



図－10　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－11　コンクリートと鉄筋の負担力の関係



図－12　鉄筋ひずみ分布（平均ひずみ 0.55%時）

なお，ここでは，低減係数 α として α＝1.0，0.8，0.5 の 3 種類を設定することとした。

図-10 から図-12 は，付着喪失区間を考慮しない場合で，付着応力の低減を考慮した修正島モデルⅡによる解析結果を比較して示す。図より，付着応力を低減することでコンクリートによる負担力が減少し，それに応じて引張剛性も低下している。また，低減係数を小さくすることで鉄筋軸方向のひずみ勾配も小さくなるため，鉄筋の最大ひずみも減少している。

本検討の範囲内では，低減係数 α＝0.5 とした場合が最も実験結果に近い結果が得られた。このように，付着喪失区間を考慮しない場合には，付着劣化を間接的に考慮するために最大付着応力を低減する必要があると考えられる。但し，鉄筋降伏後の荷重増加が早期に生じる現象は付着応力を低減しても改善されていない。

3.4　τ - s 関係を適用した場合の付着応力の軟化域の影響

本節では，付着喪失区間を考慮しない場合の τ - s 関係における付着軟化域の影響について検討を行う。本検討では澤部らの論文[10]を参考にして，島モデルⅡ（式(2)）に対して付着軟化域を考慮した「修正島モデルⅡ（式(4)）」による検討を行った（図－6）。

$$\tau = \begin{cases} \alpha \cdot 0.9 f'^{\,2/3}_{c} \left(1 - e^{-40 s^{0.6}}\right) \\ \tau_{\max} - \left(\tau_{\max} - 0.1\tau_{\max}\right)\left(S - S_1\right)\left(S_2 - S_1\right) \\ 0.1\tau_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

ここで，

$\tau_{\max}$：最大付着応力(MPa)

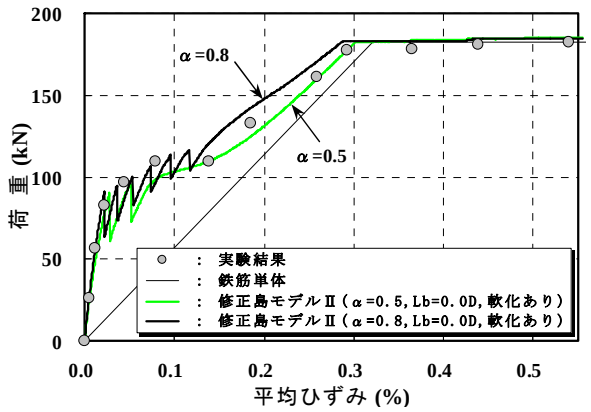
S_1：軟化開始時のすべり量 (S_1=0.2mm)

S_2：軟化終了時のすべり量 (S_2=0.4mm)

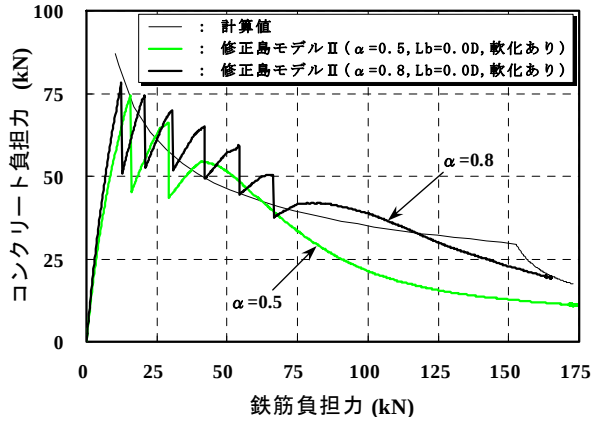
なお，ここでは，前節における最大付着応力の低減係数を α＝0.8，0.5 としたケースに着目して付着軟化域の影響を検討することとした。

図-13 と図-14 は，付着軟化域を考慮した修正島モデルⅡによる解析結果を示す。付着軟化域を考慮しない場合には α＝0.5 の場合が最も実験結果と整合していたが，図-13 のように，付着軟化域を考慮した場合には α＝0.8 とした方が実験結果と整合しており，鉄筋降伏後の荷重増加も生じていない。また，コンクリートおよび鉄筋の負担力に関しても α＝0.8 とした場合の方が計算値と一致している。

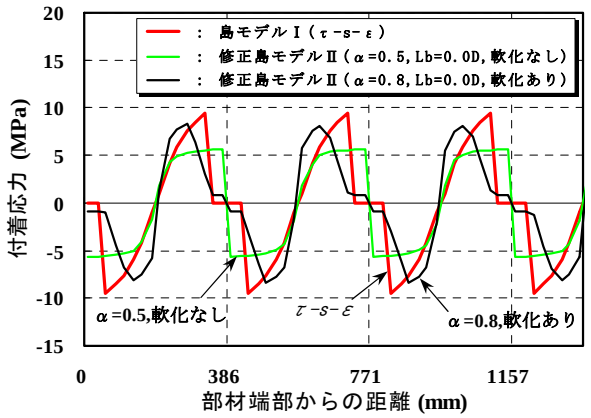
図－15 と図－16 は，低減係数を α=0.8 とした場合の平均ひずみ 0.55%時における付着応力



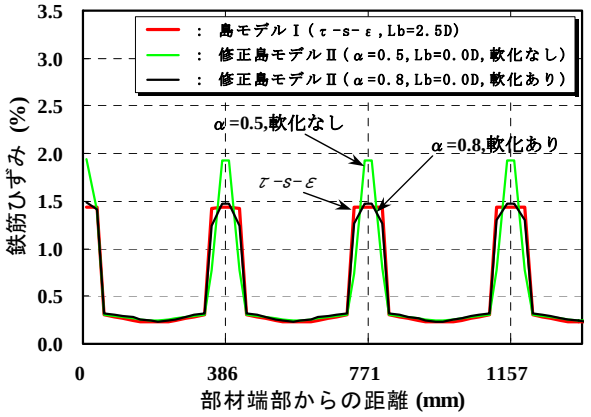
図－13　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－14 コンクリートと鉄筋の負担力の関係



図－15　付着応力分布（平均ひずみ 0.55%時）



図－16　鉄筋ひずみ分布（平均ひずみ 0.55%時）

分布および鉄筋ひずみ分布を示す。図中には，これまでの検討で実験結果との整合性が高かった島モデルⅠ（付着喪失区間あり）および修正島モデルⅡ（α＝0.5，付着喪失区間なし，軟化なし）による結果も示されている。なお，各図は部材中央部で分布が対称であったため，ここでは部材長の 1/2 の範囲だけが示されている。

図より，付着軟化域を考慮することによって，ひび割れ近傍における付着応力が低下していることがわかる。また，鉄筋ひずみが増大する領域が広がっており，付着喪失区間を考慮した場合と類似したひずみ分布が得られている。

以上より，離散ひび割れモデルに対して付着構成則に τ-s 関係を適用し，かつ付着喪失区間を考慮しない場合には，最大付着応力を低減するとともに付着軟化域を考慮する必要があることが明らかとなった。すなわち，最大付着応力を低減させることによって付着劣化を模擬し，付着軟化域を考慮することによって鉄筋ひずみの増大に伴う付着応力の低下を模擬する必要がある。

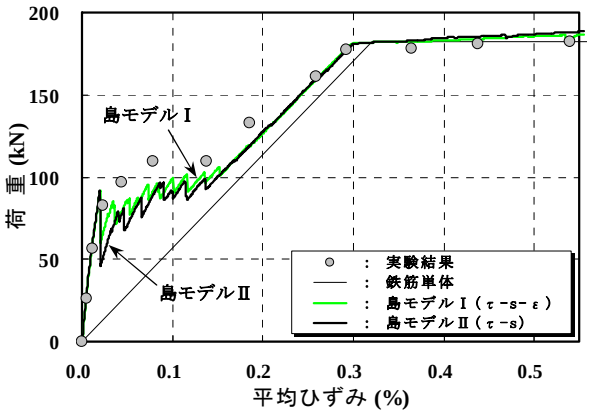
4.　分散ひび割れモデルに対する検討結果

4.1　τ-s-ε 関係および τ-s 関係の適用性に関する検討

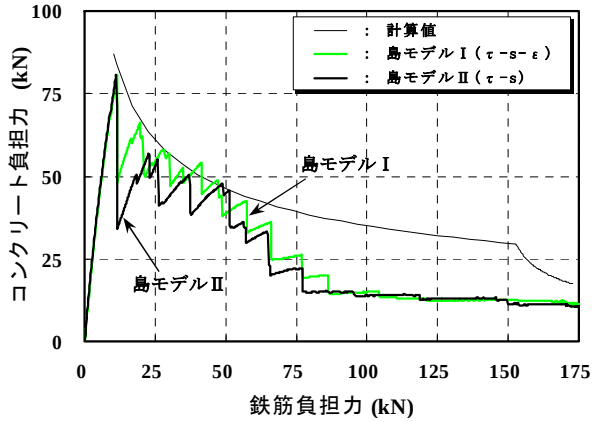
本節では，分散ひび割れモデルに対して，付着構成則に島モデルⅠ（τ-s-ε 関係）および島モデルⅡ（τ-s 関係）を適用した場合における解析結果について考察を行う。

図－17，図－18 には，それぞれ荷重－平均ひずみ関係とコンクリートおよび鉄筋の負担力を比較して示している。図より，各解析により得られた荷重－平均ひずみ関係は実験結果と概ね一致していることが分かる。しかし，離散ひび割れモデルの場合と比較すると実験結果よりも引張剛性が低く，また，コンクリートの負担力は計算値と比較して小さく評価されている。

離散ひび割れモデルで島モデルⅡを用いた場合には引張剛性やコンクリートの負担力が高く評価され，付着喪失区間を考慮しない場合には



図－17　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－18　コンクリートと鉄筋の負担力の関係

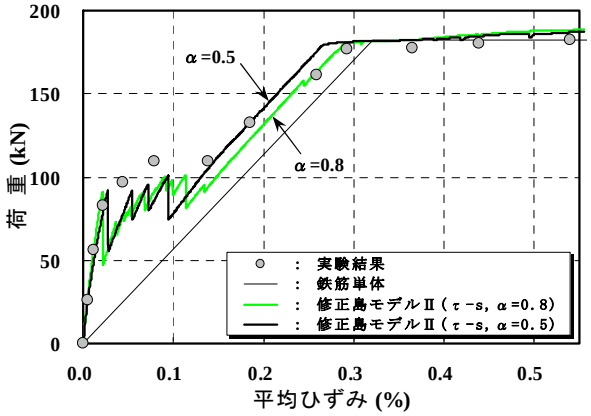
その傾向がより顕著であったが，分散ひび割れモデルでは付着喪失区間が考慮されていないにも関わらず小さく評価された。これは，分散ひび割れモデルではひび割れが局所化せず部材全体に分散して発生するため，鉄筋のひずみが鉄筋軸方向にならされ，すべりが極大化する位置が表現できないことによる。すなわち，付着構成則を求めた実験の状況と解析における状況に大きな隔たりがある。

したがって，分散ひび割れモデルにおいては，離散ひび割れモデルとは異なる付着構成則を適用する必要があると考えられる。

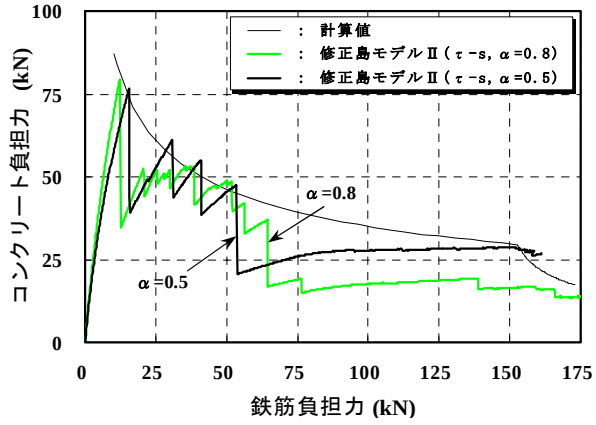
4.2　τ-s 関係を適用した場合の最大付着応力の影響

本節では，τ-s 関係に対して，最大付着応力の低減係数 α を考慮した修正島モデルⅡによる検討を行った。ここでは，低減係数として α＝0.8，0.5 の 2 種類を設定した。

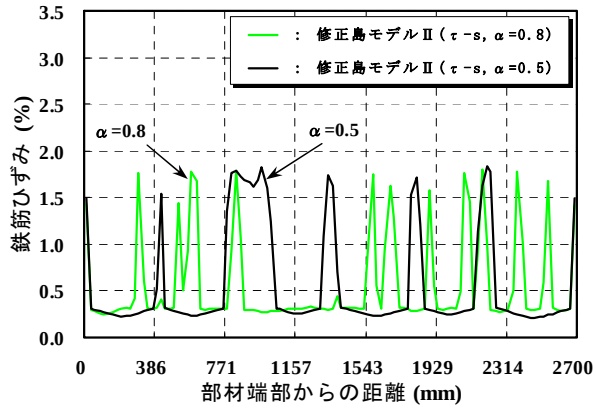
図－19 から図－21 には，修正島モデルⅡによ



図－19　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－20　コンクリートと鉄筋の負担力の関係



図－21　鉄筋ひずみ分布（平均ひずみ 0.55%時）

る解析結果を比較して示している。図より，付着応力を低減することで引張剛性やコンクリートの負担力が増加しており，実験結果や計算値に近づく傾向にあることがわかる。また，図－21 の鉄筋ひずみ分布に着目すると，ひずみが極大化する位置が低減係数 α＝0.8 の場合では 10 箇所，α＝0.5 の場合では 5 箇所となっており，付着応力が低下するに伴って少なくなっている。

したがって，分散ひび割れモデルに対して τ-

s 関係式を適用する場合には，最大付着応力を低減させることによって，分散ひび割れモデルであってもひび割れの離散的な発生を模擬できることが明らかとなった。

4.3　τ - s 関係を適用した場合の付着応力の軟化域の影響

本節では，τ - s 関係に対して，付着軟化域を考慮した修正島モデルⅡによる検討を行った。ここでは，低減係数を α＝0.8，0.5 としたケースに着目して付着軟化域の影響を検討した。**図－22** から**図－24** は，各解析結果を示す。

低減係数 α=0.8 の場合，ひび割れが分散してコンクリートの変形が平均化されて，ほとんどの領域で鉄筋のすべり量が本検討で設定した軟化開始時のすべり量 S_1＝0.2mm よりも小さくなっていたため，各解析結果に大きな差異はみられず，付着軟化域の影響は小さかった。

一方，低減係数 α=0.5 の場合，付着軟化域を考慮することにより平均ひずみ約 0.15%以降から引張剛性の低下がみられた。また，コンクリートの負担力は計算値よりも小さく評価され，付着軟化域の考慮によりその差異が大きくなる。

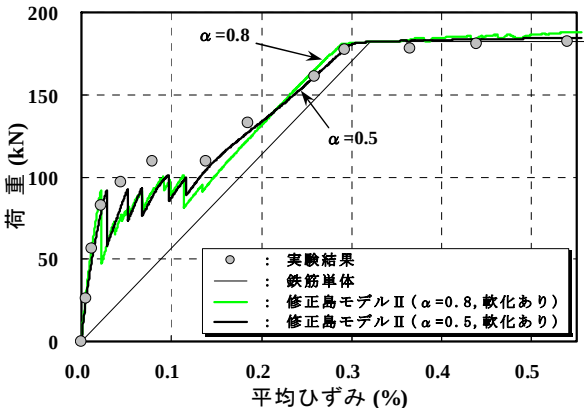
図－24 より，低減係数 α=0.5 の場合に鉄筋ひずみが極大化する位置は 5 箇所であり付着軟化域を考慮しない場合と変わらない。しかし，鉄筋ひずみの分布の差異と，極大化したひずみの減少がみられ，付着軟化域を考慮することによってひび割れの局所化の程度に差異が生じることが確認された。

4.4　分散ひび割れモデルにおける検討課題

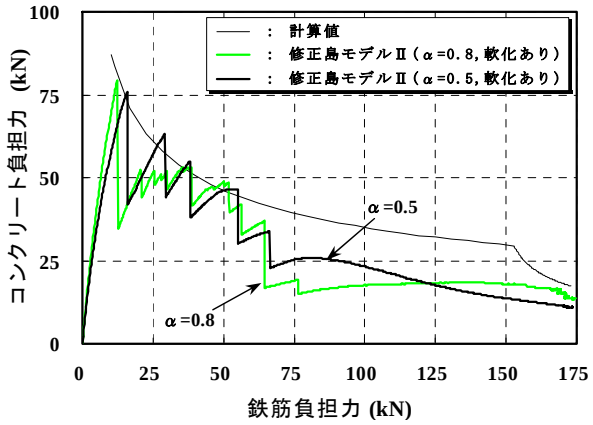
これまでの検討結果より，分散ひび割れモデルにおいては，本検討で用意したいずれの付着構成則によっても引張剛性やコンクリート負担力を小さめに評価することが明らかとなった。これは，分散ひび割れモデルでは，離散ひび割れモデルと比較して鉄筋ひずみが平均化されるため，すべりが極大化する位置が表現できないためであると考えられる。

このことは，田所ら [6]により既に指摘されている。具体的には，分散ひび割れモデルに対して付着構成則に τ - s 関係を適用した場合には，コンクリート引張軟化特性に Tension Stiffening モデルに近い軟化特性を与えた方が実験結果に近い結果が得られることが示されている。

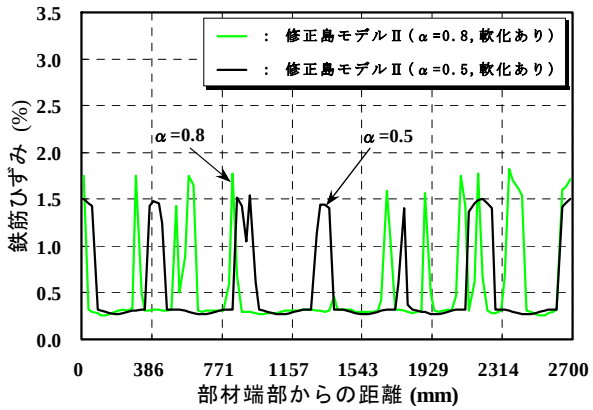
そのため，今後は付着構成則に着目した検討と併せて，分散ひび割れモデルと付着構成則の組み合わせに適用可能なコンクリートの引張構成則についても詳細に検討を行っていく必要があると考えられる。



図－22　荷重－平均ひずみ関係の比較



図－23　コンクリートと鉄筋の負担力の関係



図－24　鉄筋ひずみ分布（平均ひずみ 0.55%時）

5. まとめ

本研究では，一軸引張力を受ける RC 部材を対象として，非線形 FEM 解析に適用した付着構成則の感度や妥当性に関する基礎的な検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると，以下の通りである。

1) 離散ひび割れモデルでは，付着構成則に τ - s - ε 関係を適用し，かつコンクリートの引張強度のばらつきや付着喪失区間を考慮することで実験結果を良好に再現可能である。
2) 離散ひび割れモデルに対して付着構成則に τ - s 関係を適用し，かつ付着喪失区間を考慮しない場合には, 最大付着応力を低減するとともに付着軟化域を考慮する必要がある。これは, 最大付着応力を低減させることによって付着劣化を模擬し, 付着軟化域を考慮することによって鉄筋ひずみの増大に伴う付着応力の低下を模擬するためである。
3) 分散ひび割れモデルに τ - s - ε 関係や τ - s 関係を適用すると, 荷重－平均ひずみ関係は実験結果と概ね一致した。また， τ - s 関係に対して最大付着応力を低減させることでひび割れの離散的な発生を模擬できる。
4) 分散ひび割れモデルの場合, 離散ひび割れモデルの場合と比較して引張剛性が低く, また, コンクリート負担力が小さく評価される。これは, 分散ひび割れモデルでは離散ひび割れモデルのようにひび割れが局所化せず, すべりが極大化する位置が表現できないためである。よって，分散ひび割れモデルに適用する付着構成則はコンクリートの引張構成則とペアで検討する必要があると考えられる。

なお, 本検討で得られた τ - s 関係における最大付着応力の低減係数 α や軟化開始時のすべり量 S_1 等の値は, かぶり厚に依存するものと考えられる。これらについては今後の課題としたい。

謝辞：本検討は，北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」における活動成果の一部である。関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例，(社)日本コンクリート工学協会，2008.9
2) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990
3) K.Maekawa, A.Pimanmas and H.Okamura: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
4) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力ーすべりーひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号／V-6，pp.165-174，1987.2
5) 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集第 378 号／V-6，pp.239-247，1987.2
6) 田所敏弥，佐藤靖彦，上田多門：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1239-1248，2002.3
7) Feenstra, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
8) H. Nakamura and T. Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
9) 2007 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，土木学会
10) 澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集 E, Vol.62，No.2，pp.444-461，2006

論文　凍結融解作用により劣化した RC はり部材の非線形有限要素解析による構造性能評価

林田　宏[*1]・佐藤　靖彦[*2]・小林 竜太[*3]・吉田 安寿[*4]

要旨：凍結融解作用により劣化した RC はり部材の，分散鉄筋・分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素解析による構造性能評価を行い，実験結果との比較を行った。その結果，劣化の程度により解析による再現性の程度が異なることを明らかにした。具体的には，圧縮領域に著しい凍害劣化を受け，せん断剛性が低下している RC はりや，引張領域に凍害劣化を受け，鉄筋とコンクリートとの付着特性が低下している RC はりでは，実験結果と解析結果に差異が生じるが，せん断剛性や付着特性の低下が軽微な RC はりでは，降伏に至るまでの剛性や破壊形式，最大荷重の評価が可能であることが明らかとなった。

キーワード：凍結融解作用，RC はり部材，構造性能，非線形有限要素解析，せん断剛性，付着特性

1. はじめに

著者らは，凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能の予測手法の開発を最終的な目的として，現在精力的に検討を進めている。参考文献 1)では，凍害劣化域の大きさと位置をパラメータとした RC はり部材の静的載荷試験を実施し，凍害の劣化域が部材の圧縮側あるいは引張側のどちら側に存在するか，また，その大きさによっては最大荷重や変形性能，破壊形式に大きな影響を及ぼすことを実験的に明らかにしている。

本論文では，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価方法として，既往の研究[2)，3)]で多く用いられている非線形有限要素解析に着目し，凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の適用性や適用限界などを明らかにすることを目的として，上記の実験供試体を対象に汎用の非線形有限要素解析による構造性能の評価を試みた結果について報告する。

2. 解析対象とした実験供試体の概要

本研究では，参考文献 1)で検討を行った実験供試体を解析対象とした。**図-1** に供試体の形状寸法および配筋状況を示す。供試体は，断面寸法（はり幅×はり高）が 200×200mm，スパン長が 1200mm であり，主鉄筋に D13 を 2 本配置した曲げ破壊型の RC はり部材である。凍害劣化を与える領域を，圧縮側と引張側の 2 つに区分化し，はり高 200mm に対して圧縮縁または引張縁から 50, 100, 150mm の 3 水準の劣化深さを設定した。**表-1** に供試体の実験変数と実験結果を示す。供試体名称の C は圧縮側，T は引張側の劣化を意味する。なお，凍結融解を与えていない基準供試体を供試体 N と呼ぶ。また，本実験の支点条件は，**写真-1** に示すように両端がピンであり，載荷はスパン中央部への 1 点集中荷重により行っている。

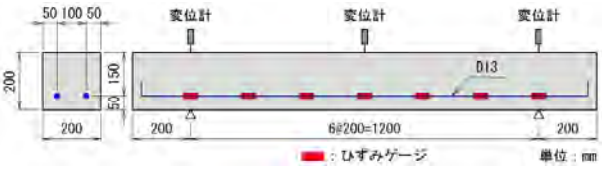


図-1　供試体の形状寸法および配筋状況

表-1　供試体名称，実験・解析結果等一覧

供試体概要			実験		解析		荷重比	
名称	劣化面	劣化深 (mm)	(a) P_y (kN)	(b) P_u (kN)	(c) P_y (kN)	(d) P_u (kN)	c/a	d/b
N	-	-	43.7	68.9	43.6	48.8	100%	71%
C5	圧縮側	50	44.4	68.1	41.9	44.3	94%	65%
C10	圧縮側	100	43.0	46.4	40.3	41.6	94%	90%
C15	圧縮側	150	-	32.6	36.6	38.3	-	117%
T10	引張側	100	49.7	68.9	43.2	48.0	87%	70%
T15	引張側	150	41.3	43.0	42.0	44.2	102%	103%

※P_yは降伏荷重，P_uは最大荷重

写真-1　載荷試験状況

*1　（独）土木研究所寒地土木研究所　寒地保全研究グループ　耐寒材料チーム　主任研究員（正会員）
*2　北海道大学大学院工学院　北方圏環境政策工学部門　准教授　博(工)　（正会員）
*3　（株）ドーコン　交通事業本部 構造部　主任技師　修(工)　（正会員）
*4　（株）ドーコン　交通事業本部 構造部　技師　修(工)

3. 有限要素解析の概要

3.1 解析モデル

本解析では，汎用 2 次元非線形有限要素解析プログラム WCOMD を適用した。**図-2** には有限要素モデル（要素分割図）を示している。凍結融解作用により供試体内の強度は一様には変化しない。それゆえ，圧縮強度のばらつきを考慮するために，はりの全スパンをモデル化した。適用した有限要素タイプは 9 つのガウス積分点を有する 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素であり，載荷荷重はスパン中央部を鉛直方向に強制変位（1 ステップあたり 0.1mm 刻み）させる漸増載荷とした。境界条件は，載荷点および支点部に対しては応力集中による局所的な要素の破壊を回避するために，実験時と同様に載荷板および支持板をモデル化して要素中心部節点の鉛直方向変位成分を拘束した。

3.2 ひび割れと鉄筋のモデル化

コンクリートおよび鉄筋は，分散ひび割れおよび分散鉄筋モデルに基づく鉄筋コンクリート(RC)要素によってモデル化した。したがって，鉄筋は各 RC 要素の要素断面積に対する鉄筋比として与えることになる。本解析対象ではせん断補強筋が配置されていないため，各要素の鉛直方向に対する鉄筋比はいずれも零である。モデル上，鉄筋の有無の違いは，鉄筋との付着によってひび割れの分散が期待できる領域（RC ゾーン：**図-2** の水色の領域）と，ひび割れの分散が期待できない領域（無筋ゾーン：**図-2** の灰色の領域）として区分される。本解析では，主鉄筋に対する RC ゾーンは，はり高方向に引張縁からかぶりの 2 倍に相当する 100mm と設定し，奥行き方向ははりの全幅である 200mm とした。ここで，ひび割れモデルには，分散ひび割れモデルに属する 4 方向のひび割れを考慮可能な多方向非直交固定ひび割れモデル [4]を採用している。

3.3 材料構成モデル

鉄筋コンクリートの材料構成則には，岡村・前川らによって開発された載荷経路依存性を考慮した非線形構成則が導入されており，コンクリートと鉄筋間の付着作用に伴う Tension Stiffening 効果やひび割れ面におけるせん断伝達モデル，ひび割れ直交方向における圧縮剛性低下の影響が考慮されている [5]。本解析プログラムでは Tension Stiffening 効果を考慮するために付着パラメータ C を与える必要があるが，本解析では全ての RC 要素において鉄筋が配置されている方向に対してはデフォルト値である C=0.4 と設定した。なお，RC 要素の鉄筋が配置されていない方向および圧縮領域の無筋コンクリート要素に対しては，プログラム内部で自動計算される破壊エネルギーG_F（式(1)）を算定し，この破壊エネルギーと要素寸法に対応した付着パラメータを設定した。

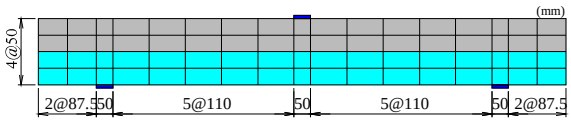


図-2　有限要素モデル（要素分割図）

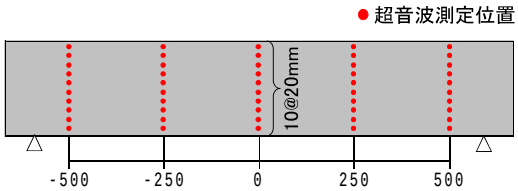


図-3　超音波伝播速度の測定位置

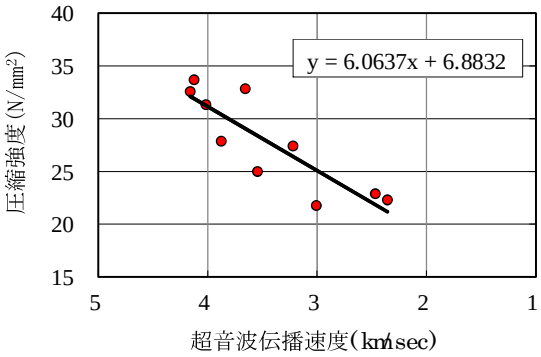


図-4　超音波伝播速度と圧縮強度の関係

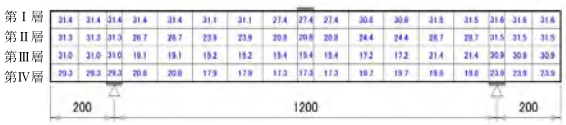


図-5　圧縮強度分布の一例（供試体 T10 の場合）

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_c{}^{1/3} \qquad (1)$$

ここに，d_{max}：粗骨材の最大寸法（今回は 20mm），f'_c：圧縮強度である。

せん断伝達係数は，普通コンクリートに適用されるデフォルト値の 1.0 を与えている。載荷板および支持板に関しては，実験時に塑性化を伴うような変形が確認されていないことから，いずれも弾性体要素を用いてモデル化を行った。

3.4 コンクリートおよび鉄筋の材料物性値

解析に用いるコンクリートの圧縮強度などの材料物性値については，各供試体において凍害劣化域の大きさと位置が異なり，また，供試体の各位置でも材料物性値のばらつきが生じているため，数値解析上もこれらを適切に考慮する必要がある。そこで，本解析では，コンクリートの圧縮強度を低下させることで材料物性値の空間的なばらつきを考慮する方法 [6]を採用することとした。本研究における具体的な方法は，**図-3** に示す位置におい

て劣化させた供試体の超音波伝播速度の測定を行い，RC はりと同じコンクリートで別途作製した円柱供試体を用いて予め求めておいた超音波伝播速度と圧縮強度の関係（図-4）から供試体各位置の圧縮強度を推定し，各位置の圧縮強度から要素毎に圧縮強度を設定するというものである。図-5 に設定した圧縮強度分布の一例を示す。なお，本研究では，コンクリートの引張強度と圧縮ピークひずみは，普通コンクリートに対する関係式（式(2), (3)）を用いて，圧縮強度からプログラム中で自動的に設定される方法によった。すなわち，凍害劣化を受けた場合のコンクリートの圧縮強度と引張強度と圧縮ピークひずみの関係が，劣化を受けない場合と同じであるかどうかの議論は別報に譲ることとし，ここでは，汎用の解析プログラムの適用性に関する検討を主目的とし，劣化を受けていない場合の力学特性間の関係式を用いることとした。

$$f_t = 0.23 \cdot f'_c{}^{2/3} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{peak} = 140 \cdot f'_c{}^{1/2} \times 10^{-6} \tag{3}$$

ここに，f_t：引張強度，ε_{peak}：圧縮ピークひずみ，f'_c：圧縮強度である。

劣化させていない供試体 N の圧縮強度は打設後 4 週目のコンクリートの圧縮強度 f'_c =30.4N/mm^2 とした。また，コンクリートの引張強度に関しては乾燥収縮等による初期応力の影響によって土木学会式で算定される引張強度よりも小さい可能性があるため [4]，土木学会コンクリート標準示方書 [7] に基づいて圧縮強度により推定した引張強度を 30%低減した値を用いた。

鉄筋の降伏強度 f_y は，ミルシートを参考にして 361 N/mm^2 を用いた。また，鉄筋の弾性係数 E_s には一般的な値である 2.0×10^5 N/mm^2 を用いた。

3.5 解析ケース

供試体 N を除くすべての供試体に対し，二つの解析ケースを用意した（表-2）。一つは，図-5 に示したごとく，超音波伝播速度に基づき，要素ごとに圧縮強度を設定したケース（CASE 1）であり，もう一つは，図-5 に示す I から IV の各層で，部材軸方向の圧縮強度を平均した値を設定したケース（CASE 2）である。例えば，供試体 T10 の場合，上面から 1 層目の圧縮強度は 30.2N/mm^2，2 層目は 24.5N/mm^2，3 層目は 17.5N/mm^2，4 層目は 18.9N/mm^2 となる。これは，図-5 に示すように要素毎に強度のばらつきを与えた場合，強度の小さい要素が周囲の要素に比べて早期に圧縮軟化し，ひずみの増加が局所化することで，早期に荷重低下が起こり，部材の最大荷重などが過小評価される可能性があるからである。しかし，実際の破壊現象は局所的に起こるのではなく，ある程度の広がりを持った領域で起こる。そこで，本検討では，要素の強度のばらつきが解析結果に与える影響について検討するため，上述の二つのケースを用意した。

表-2　解析ケース

CASE 1	超音波伝搬速度測定結果に基づき要素毎に強度のばらつきを持たせたケース
CASE 2	各層で部材軸方向の強度を平均化したケース

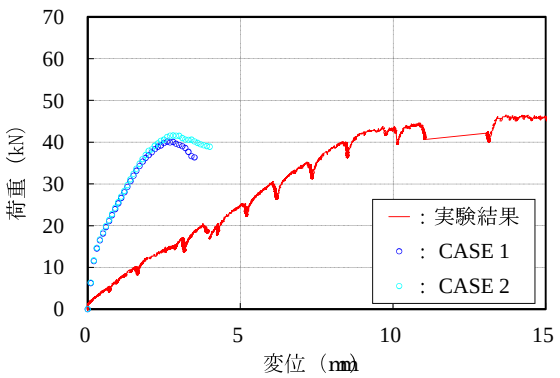


図-6　供試体 C10 に関する荷重ー変位関係の比較

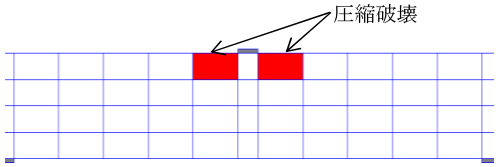


図-7　終局時の損傷状況

4. 解析結果および考察

4.1 圧縮強度の与え方の影響について

圧縮強度の与え方の影響を調べるために，各供試体で二つの解析ケースを設定し，その結果を比較したが，概ね同じ傾向にあった。そこで，ここでは供試体 C10 に限定して考察する。

図-6 には供試体 C10 の荷重ー変位関係を各ケースで比較して示している。コンクリートの圧縮強度を平均化した CASE 2 と超音波伝播速度測定結果から要素毎の圧縮強度にばらつきを付与した CASE 1 との荷重ー変位関係を比較すると，CASE 2 の方が，最大荷重やその時点の変位が大きくなっており，実験値に近づく傾向となっている。これは，載荷点近傍の要素が軟化域に達すると荷重が低下するが，圧縮強度を平均化したことによって軟化域に達する要素の圧縮強度が幾分大きくなったためと考えられる。しかし，その差は大きくはない。それゆえ，以降の考察では，圧縮強度を平均化した CASE 2 を用いて実験結果との比較を行う。

4.2 凍害を受けた RC はり部材の実験と解析との比較

本節では実験結果と解析結果で一致する部分と一致しない部分などの事実関係を整理することを目的として，

破壊形式，変形性能，耐荷性能，鉄筋ひずみのひずみ分布の 4 つの項目について，両者の比較を行った。

（1）破壊形式

破壊形式に関しては，**図-7** に示すように，解析結果では全ての供試体において載荷点近傍の要素が圧縮破壊することにより荷重が低下して終局に至った。実験での破壊形式と比較すると，供試体 N，C5，T10 では実験の破壊形式と概ね一致したが，供試体 C10，C15 の実験の破壊形式は，**写真-2** に示すように，劣化域の腹部コンクリートが圧壊した「斜め圧縮破壊」，供試体 T15 は載荷点と支点を結ぶようなせん断ひび割れが大きく開口して，破壊に至った「斜め引張破壊」であり，解析結果における破壊形式とは異なる結果であった。

（2）変形性能

図-8 に示すように，部材降伏点に至るまでの剛性は供試体 N，T10 では解析結果が実験結果と概ね一致している。供試体 C5 の実験結果は載荷開始直後に凍害劣化特有の下に凸な曲線 [8]を呈し，解析結果はひび割れ発生前までは傾きが大きいため，両者に乖離があるように見える。しかし，ひび割れ発生後の解析結果の勾配は載荷開始直後を除いた実験結果の勾配よりも僅かに大きい程度である。一方，供試体 C10，C15，T15 に関しては，解析結果の傾きが実験結果よりも明らかに大きくなっている。また，圧縮側を劣化させたシリーズである供試体 C5，C10，C15 の剛性差に着目すると，凍害深さが大きくなるほど両者の剛性差が大きくなることが分かる。

次に，部材降伏点以降の挙動に着目すると，実験結果では「降伏棚あり」の供試体 N，C5，T10 と「降伏棚なし」の供試体 C10，C15，T15 に大別することができる。一方，解析結果では，降伏棚の有無という観点では供試体 N，T10 に関しては実験結果と解析結果は一致しているが，その他の供試体に関しては一致しておらず，この傾向は前述した部材降伏点までの剛性と同様である。また，供試体 N，T10 の降伏棚の長さ自体も実験結果よりも解析結果の方が大幅に短くなっていることが分かる。

さらに，最大荷重時の変位に着目すると，前述の剛性や降伏棚の長さなどの違いに起因して，全ての供試体において解析結果が実験結果より大幅に小さくなっている。

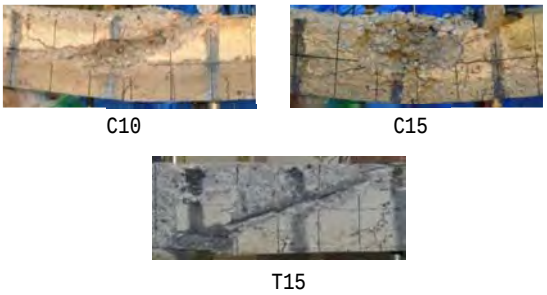


写真-2　供試体 C10，C15，T15 の終局時の状況

（3）耐荷性能

図-8 に示すように，供試体 N の荷重ー変位関係について実験と解析を比較すると，実験結果の部材降伏点以降の荷重が解析結果と比較して大きくなっている。これは，先に述べたように実験では両支点にピン支承を用いており（**写真-1** 参照），鉛直変位が大きい領域において，横方向に拘束力が発生し，見かけ上，剛性が増加したものと考えられる。以降の実験と解析との比較にあたっては，

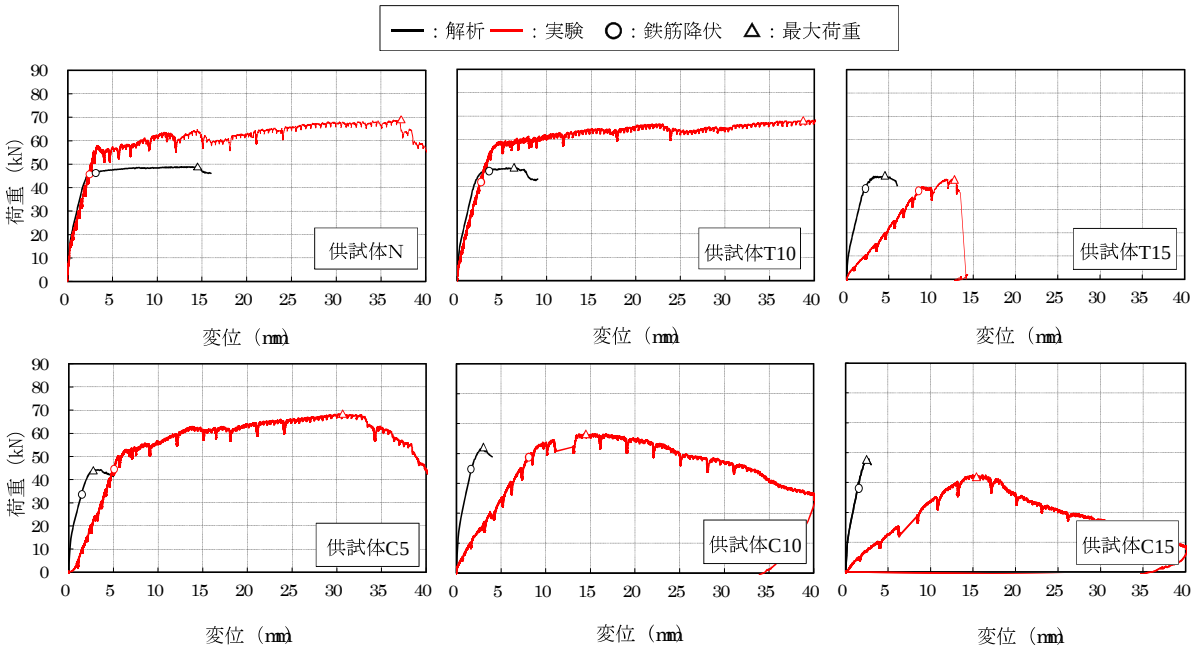


図-8　各供試体の荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果の比較

実験と解析との荷重比で比較を行うこととする。

先ずは，降伏荷重に着目して比較を行う。なお，実験結果の降伏荷重はスパン中央の鉄筋のひずみゲージが1800μに達した時点の荷重とし，解析結果の降伏荷重は，**図-9** の黒枠で示すように，スパン中央の引張縁から2つ目の要素の最下段のガウス積分点まで降伏に至った時点の荷重とした。**表-1** に示すとおり，劣化供試体の荷重比は87～102%であり，概ね供試体Nと同程度の値となっている。

次に，最大荷重に着目すると，実験で「降伏棚あり」となった供試体 C5，T10 の荷重比に関しては供試体 N と同程度の値となっているが，実験で「降伏棚なし」となった供試体C10，C15，T15の荷重比に関しては供試体Nよりも大きく評価されている。

（4）鉄筋のひずみ分布

図-10 には荷重 30kN 時点の鉄筋ひずみ分布を実験結果と解析結果で比較して示している。ここで，解析結果の鉄筋ひずみは最も引張縁側にある要素の最上段中央部のガウス積分点のひずみとし，それを部材軸方向にプロットし，直線で結んでいる。例えば，支間中央における鉄筋ひずみは**図-9** の緑丸で示すガウス積分点のひずみである。

a）圧縮側劣化シリーズ（C シリーズ）

図-10 の上段に示す圧縮側劣化シリーズの実験結果に着目すると，供試体 C5，C10 の鉄筋ひずみは供試体 N とほぼ類似した分布であり，付着特性は低下していないと考えられる。一方，供試体C15は供試体Nと比較してスパン中央部から離れた支点近傍位置にまで大きなひずみが生じており，これは鉄筋とコンクリート間の付着特性が大きく低下していることに起因している。

解析結果に着目すると，供試体 C5 の鉄筋ひずみは供試体Nとほぼ類似した分布を示している。一方，供試体C10，C15は，供試体Nと比較して鉄筋ひずみが増加しており，凍害深さが深くなるに伴って，その差も大きくなっていることが分かる。

次に，実験値と解析値を比較する。実験ではスパンの左右でばらつきがあるため，ここでは左側のスパンに着目する。供試体N，C10はスパン中央部付近では実験値と解析値に差異が見られるものの，その他の位置では概ね一致している。また，供試体C5に関しても，-200mm位置で若干差異が見られるが，全体的な分布は概ね一致していると言える。しかし，供試体C15に関しては全体的に実験のひずみが解析よりも大きくなっており，実験では，より付着特性が低下しているものと推察される。

b）引張側劣化シリーズ（T シリーズ）

図-10 の下段に示す引張側劣化シリーズの実験結果に着目すると，供試体T10の鉄筋ひずみは供試体Nと比較して，右側スパンの 400，600mm 位置ではひずみ値が増加しているものの，その程度はあまり大きくはない。また，左側スパンでは供試体Nと類似した分布となっており，荷重 30kN 時点での付着特性の低下はさほど大きくないものと考えられる。一方，供試体T15では，供試体Nと比較して，スパン中央部から離れた支点近傍位置にまで大きなひずみが生じており，付着特性が大きく低下している。

解析結果に着目すると，供試体 T10，T15 の鉄筋ひずみは供試体Nと比較して大きくなっており，圧縮側劣化シリーズと同様に凍害深さが深くなるほど，その差も大きくなっていることが分かる。

次に，実験値と解析値を比較する。供試体T10は右側スパンの400，600mm位置で実験値が解析値よりも若干大きくなっているが，その他の位置では実験値が完全付

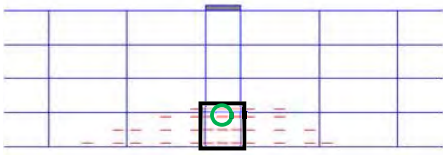
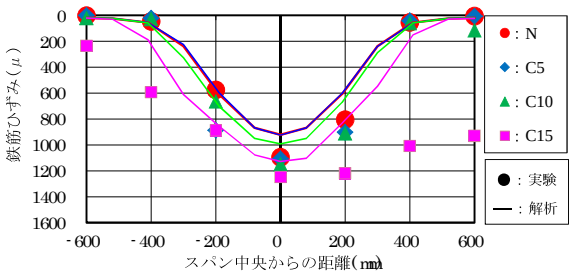
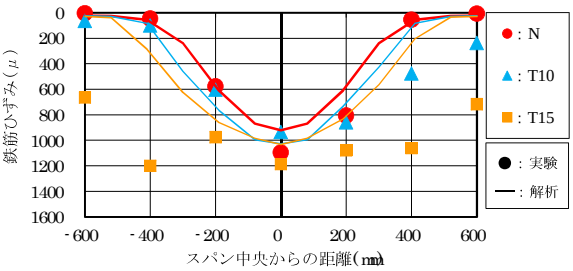


図-9　降伏荷重時の鉄筋降伏状況の一例（供試体 C10）



（圧縮側劣化シリーズ）



（引張側劣化シリーズ）

図-10　荷重 30 kN 時点の鉄筋ひずみ分布の比較

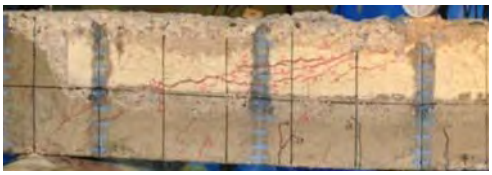


写真-3　最大荷重時の損傷状況（供試体 C10）

着を前提としている解析値と概ね同程度である。このことからも，T10 の付着特性の低下はさほど大きくないものと考えられる。なお，供試体 T15 については，全体的に実験のひずみが解析よりも大きくなっており，実験では，より付着特性が低下しているものと推察される。

（5）実験結果と解析結果の差異に関する考察

写真-3 に供試体 C10 の実験時の損傷状況を示す。供試体 C10 では，載荷とともに凍害劣化を受けている圧縮領域において，複数本のせん断ひび割れが発生し，さらに変位を増加させると劣化域のせん断ひび割れの進展や幅の拡大，本数の増加を伴いながら，このせん断ひび割れの領域を中心とした腹部コンクリートに圧壊が進み，緩やかに荷重が低下した。一方，解析では，このような現象は再現されなかった。このことから，供試体 C10 の実験と解析で見られた剛性差は，せん断ひび割れが卓越することによるせん断剛性の低下が要因の一つであると推察される。すなわち，圧縮領域のせん断剛性が著しく低下したため実験結果は解析結果と異なる挙動を呈し，降伏に至るまでの剛性や破壊形式および最大荷重などに差異が生じたものと考えられる。

供試体 C15，T15 に関しては，(4)で述べた鉄筋ひずみの結果から付着特性が低下していることが明らかである。供試体 T15 については，この付着特性の低下のため，実験は解析と異なる挙動となり，降伏に至るまでの剛性や破壊形式および最大荷重などに差異を生じたものと考えられる。また，供試体 C15 については，前述のせん断剛性の低下に加えて，付着特性の低下も付与されたことで，供試体 C10 よりも降伏に至るまでの剛性や最大荷重などがより顕著に低下し，実験結果と解析結果との差異が更に大きくなったものと推察される。

一方で，供試体 C5，T10 のように，圧縮領域のせん断剛性の低下や引張領域の付着特性の低下が軽微な場合の RC はりに対しては，非線形有限要素解析に当たり，コンクリートの圧縮強度を低下させることで材料物性値の空間的なばらつきを考慮する方法を適用することによって，降伏に至るまでの剛性や破壊形式，最大荷重などを比較的精度良く評価できる可能性があるものと考えられる。

5. まとめ

凍結融解作用により劣化した RC はり部材の構造性能評価に対する，分散鉄筋・分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素解析の適用性や適用限界を明らかにすることを目的として，汎用のプログラムを用いた解析を実施し，実験結果と比較する形で種々の検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると，以下のとおりである。

（1）凍害劣化により圧縮領域のコンクリートが著しい損傷を受け，せん断剛性が低下している RC はり部材や，鉄筋とコンクリートの付着特性が低下している RC はり部材については，実験結果を精度良く現することは困難である。

（2）圧縮領域のせん断剛性の低下や引張領域の付着特性の低下が軽微な RC はり部材に対しては，非線形有限要素解析によって降伏に至るまでの剛性や破壊形式，最大荷重などを比較的精度良く評価できる可能性がある。

なお，上記の知見は，凍害による劣化程度が比較的大きく，せん断補強筋を配置しない RC はりによる限られた検討によって得られたものである。また，実験結果と解析結果を詳細に比較する上で必要不可欠となるコンクリートひずみのデータがないなど，計測データも限られている。したがって，これらの事項を踏まえて追加実験を行うなどして，凍害による材料劣化を受けたコンクリート部材の構造性能の定量的評価方法の確立に向けて，更なる詳細な検討を継続して行っていく必要がある。

なお，本検討は北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」における活動成果の一部である。

参考文献

1) 林田宏，佐藤靖彦：凍害劣化域の大きさと位置に着目した RC はり部材の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.922-927，2012.
2) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006.
3) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85，2009.
4) 前川宏一，福浦尚之：多方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材・構造挙動からの検証，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.209-225，1999.
5) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990.
6) 橋本航，森川英典，佐伯慶悟，小林秀惠：コンクリート強度分布を有する RC はり部材のせん断耐荷機構，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.925-930，2002.
7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.
8) Muttaqin HASAN, Hidetoshi OKUYAMA, Yasuhiko SATO and, Tamon UEDA: Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.1, pp.89-99, 2003.

付録 3　委員会議事録集

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 22 年度第 1 回委員会　議事録

日　　時：	平成 22 年 7 月 2 日(金)　15:00～17:00
場　　所：	北海道大学工学部（A101 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事，花田委員，宮本委員，関下委員，~~藤田委員~~，星野委員，~~川口委員~~，吉永委員，中野委員，久保委員，~~和田委員~~，豊蔵委員，竹下委員，加藤委員，~~田口委員~~，林田委員　（敬称略，計 17 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料-1　平成 21 年度の活動報告について（総会資料） 資料-2　平成 22 年度の活動計画について 資料-3　土木学会全国大会（第 65 回年次学術講演会）への投稿論文 資料-4　委員名簿

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

・今年度より研究会活動から委員会活動に変更になったが，技術者（実務者）とともに勉強すること自体が大きな成果になると考えているため，これまでの研究会と同じスタンスでディスカッションを継続していきたい．よって，委員は勉強の場として本委員会を有効に活用してほしい.

２．平成 21 年度の活動報告について

・平成 21 年度に開催された計 6 回の研究会の内容および土木学会への投稿論文について説明があった

３．平成 22 年度の活動計画について

３．１　委員会執行体制

・本委員会の新しい執行体制について提案し，承諾が得られた.

委 員 長：佐藤 靖彦

副委員長：渡辺 忠朋

幹 事 長：小林 竜太

幹　　事：田中 雄太，坂本 智明，山口 雅史

３．２　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論および情報収集

・本委員会の主たるテーマである材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論に関しては，当面は土木学会 331 委員会の「材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会」の委員会報告書の内容に沿った形で進めていく.

・委員会報告書は完売の状態にあるが，土木学会で第 3 種委員会の絶版になった報告書を無償でダウンロードできる環境を整備しているため，現在確認中である．少なくても第 1 期活動報告書は入手できるはずである．
・具体的な進め方としては，毎回担当者を決め，その担当者が該当する内容について資料（パワーポイント）を作成し，プレゼンテーションするスタイルとする．（全員参加型の委員会を目指す）
・材料劣化が構造性能に及ぼす影響について議論するには，委員の立ち位置がばらばらだと委員会としては良くない．
・本委員会に参加している委員の大多数は道路橋を対象にして仕事をしている．
道路橋示方書に慣れ親しんでいるため，設計という行為はバーチャルであるが，さらに許容応力度法の体系のなかでバーチャルな世界をさらにバーチャルにしている現状がある．
・個々の設計値に意味があるのではなく，設計した結果が満足しているかどうかしか意味がない．許容応力度がいくらであるか，それを超過したという数字に意味があるのではなく，超過したかどうかが重要である．例えば，鉄筋の許容応力度そのものに基本的には何も意味がない．許容応力度の比率には意味がある．
・これまでの 2 年間の取り組みは，材料劣化が生じた状態で構造物がどうなるか？というテーマで，これは完全なリアリティー（真実）の世界である．
・設計で扱っているバーチャルな世界とリアリティーの世界の中間がないと，JSCE331 委員会の報告書の内容を理解するうえでギャップが生じる可能性がある．
・最終的に実務の観点で考えようとしたときに，この認識を共通に持っていないとこの結果を生かすときに大きな間違いをおこすか，そもそも理解できない可能性がある．よって，これから進めていくにあたって，この辺の仕組みに対して共通認識を持てるような勉強が必要であるように感じる．
・構造性能というキーワードで何が浮かんでくるか？
耐力という言葉は理解し易い．しかし，他にも色々な性能があり，材料劣化が起きるとそうした色々な性能に影響を与えていくということを最終的に知らなければならないが，構造性能という怪しい日本語の認識と現状それをどうやって評価しているというところからスタートすべきである．
・例えば，鉄筋の許容応力度は 180N/mm^2 であるが，材料劣化を考慮するのであれば実験結果等で 2 割程度危ないので 160N/mm^2 にしようとする手段（テクニック）は良いが，そもそもなぜ 180N/mm^2 なのかを知りましょうということである．
・これから学ぶ JSCE331 委員会の報告書は，道路橋示方書に記載されていない指標ばかりであるので，どうしてその指標を見ているのかというそもそもが理解できていなければならない．
・材料劣化しているから安易に数値だけ変えましょうということではなく，例えば強度が低下するということは付着が変わって抵抗の機構が変わるということを構造的に考えられるようになろうということである．
・日常行っている道路橋示方書による設計を全て忘れるのも 1 つの方法である．

・補修・補強設計の際に，道路橋示方書に記載されている許容応力度を満足しないから補修補強するという行為は本末転倒であるということは最低でも認識する必要がある．
・ただ単に報告書を読むのではなく，実務との関連性のなかで考察するのが良い．
・当面はスケジュール(案)に基づいて進めていくが，第 1 回～第 5 回までは鉄筋腐食に関する内容であるので，実際の設計との関係を考えたときに，どこに影響する・しない，あるいは考慮できないといった議論を第 5 回開催後に行うようにする．
・プレゼンテーションの担当について

第 01 回：小林幹事長，田中幹事
第 02 回：坂本幹事
第 03 回：山口幹事
第 04 回：吉永委員
第 05 回：加藤委員
第 06 回：豊蔵委員
第 12，13 回：秋山先生（講師として招聘予定）
第 14，15 回：関下委員
第 16 回：宮本委員

※未決定の回については，後日改めて希望を取るか幹事より指名することとする．
・報告書の内容を整理してプレゼンテーションを行うが，重要なのは「理解できないこと」を明確にすることである．

３．３　非線形有限要素解析の継続した検討の実施

・非線形有限要素解析の検討は，引き続き小林幹事長，宮本委員，川口委員，関下委員の４名を中心として行う．
・今年度は，昨年度に実施した一軸引張解析の検討で知り得た知見を，過年度に実施した梁部材解析に反映させて種々の検討を行うものとする．検討内容の詳細にはついては担当者間で打合せを行う．
・解析プログラムを所有していない委員も非線形解析が体験できるように，汎用プログラム DIANA のデモ版を利用した勉強会を開催する．
・プログラムの基本的な使用方法を理解するための説明会を一度行って，その後に決められた課題に対して各委員が解析を実施し，その結果を持ち寄って議論するのが効果的である．
・佐藤委員長が講義で利用している資料（川口委員が作成）を利用するのが良い．
・種々の感度解析（例えば，梁部材解析）を実施して，可能であればそれを土木学会北海道支部で発表できれば良い．

３．４　載荷実験の実施

・佐藤委員長の研究室で一軸引張試験を実施する予定であることから，これを有効に活用させて頂く．

・凍結融解させない供試体と凍結融解させた供試体に対して実施する予定である．
・佐藤委員長の研究室では，ひび割れた鉄筋コンクリートがどのように凍害でやられて付着劣化を起こすのかを解明したいと考えている．
・委員も供試体の製作段階から関われればベストである．

３．５　外部講師を招いた意見交換会の開催
・最新の技術開発の動向を調査することを目的として，先端研究を推進している研究者を招聘し，構造性能予測技術に関する意見交換を行なう．
・講師の選定については，佐藤委員長，渡辺副委員長の方で調整して頂く．

３．６　補修・補強工事を対象とした現場見学会の開催
・山口幹事を中心として調整して頂く．
・札幌近郊でなくても良い．泊りがけで委員会とセットで開催しても良い．

３．７　委員からの話題提供
・材料劣化に関する調査，試験，診断，設計に関連する話題提供を委員に依頼し，その内容について議論する．「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論および情報収集」の進捗に応じて適宜開催する．

３．８　検討成果の公開
・本委員会において検討したものは積極的にその成果を公開するよう心がける．

３．９　その他
・今後委員会として活動するため，議事録を作成することを原則とする．
・議事録作成は委員が持ち回りで担当することとする．

４．土木学会全国大会への投稿論文について
・平成 22 年 9 月に札幌（北海道大学）で開催される土木学会全国大会（第 65 回年次学術講演会）への投稿論文に関する概要説明を行った．
・関下委員と川口委員が発表する予定である．
●分散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響（発表者：関下委員）
●離散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響（発表者：川口委員）
・発表はＶ部門の数値解析のセッションで，9 月 3 日(金)の 10:25 から行われる．
・日本コンクリート工学協会の「コンクリートと補強材の付着定着挙動と構成則の利用研究委員会（委員長：高知工科大学，島弘先生）」でも一軸引張解析の検討を行っている．

５．佐藤委員長からの話題提供について

・佐藤委員長より，「コンクリート構造のせん断耐荷機構と有限要素解析」というテーマで話題提供を頂いた．

・せん断破壊を上手くシミュレーションできたということよりも，実際何が起こっているか（機構）に興味を持ち研究を行った．それに有限要素解析を利用した．

・コンクリート構造のせん断破壊には，斜め引張破壊，せん断圧縮破壊，斜め圧縮破壊の 3 つの破壊形式があり，1960 年代に kani 先生が基本的なことを明らかにしている．

・斜め引張破壊に着目して，ひび割れ面の挙動の測定から破壊機構や解析モデルの問題を明らかにした．

・李・前川モデルは，ひび割れ幅とせん断変位を使ってせん断伝達応力を計算できる．拘束応力が重要であり，拘束があるかないかが非常に重要になってくる．

・せん断圧縮破壊する場合はせん断変位もひび割れ幅も増加するが，斜め引張破壊する場合は，ひび割れ幅は増加するが，せん断変位はほとんど生じない．つまり斜め引張破壊では骨材のかみ合わせはないということである．

・ディープビームは，ひび割れ幅・せん断変位ともに増加し，つまりせん断伝達がある．スターラップの有無だけではなく，形状の影響もある．

・これらの原因を調べるために離散ひび割れモデルによる有限要素解析を行い，軸方向鉄筋に沿う水平ひび割れを考慮するかしないかで挙動が大きく変化することを明らかにした．一方で，分散ひび割れモデルでは実験を再現できないことを明らかにした．

・東京大学では分散ひび割れモデルでも計算できるが，それはせん断伝達モデルの中にせん断軟化という概念を強制的に取り入れているからである．しかし，実際にはせん断軟化という現象は起こっていない．

・T 型梁について．設計では上フランジの影響を無視して Vc＋Vs で計算している．スターラップがなければ上フランジの影響は小さいが，スターラップがあると影響が大きくせん断耐力が向上する．

・上フランジの下に水平ひび割れが発生することにより，支配機構がトラス機構からアーチ機構に変化する．

・実験結果の再現性は，丁寧かつ総合的に行うことが重要である．（平均値を利用しなければならない）

６．その他

・委員名簿を更新した．

花田委員の所属変更：ドーコン → 中大実業

吉永委員の所属変更：メイセイエンジニアリング → 札幌市建設局

・次回委員会は 8 月 27 日(金)15 時から北大で開催することとする．

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 22 年度第 2 回委員会　議事録

日　　時：平成 22 年 8 月 30 日(金)　15:00～18:00

場　　所：株式会社ドーコン（A 会議室）

出 席 者：~~佐藤委員長~~，渡辺副委員長，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事，~~花田委員~~，~~宮本委員~~，坂口委員，関下委員，藤田委員，吉田委員，星野委員，~~川口委員~~，~~吉永委員~~，~~中野委員~~，~~久保委員~~，和田委員，~~豊藏委員~~，橋本委員，竹下委員，加藤委員，佐藤委員，~~住吉委員~~，田口委員，林田委員

（敬称略，計 17 名，取り消し線は欠席者）

配布資料：資料-1　平成 22 年度第 1 回委員会　議事録（案）
資料-2　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 1 回）
資料-3　非線形解析 WG（平成 22 年度の検討計画について）
資料-4　分担およびスケジュール（案）
資料-5　委員名簿
資料-6　土木学会全国大会（第 65 回年次学術講演会）での発表資料

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長が欠席のため，渡辺副委員長より挨拶があった．

２．第 2 回委員会の議事録作成担当者について

・坂本幹事の担当とする．

３．新委員の紹介について

・坂口委員，吉田委員，佐藤委員より自己紹介があった．（住吉委員は欠席）

４．第 1 回委員会議事録の確認について

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた．

５．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その 1）について

５．１　JSCE-331 委員会の概要について（担当：小林幹事長）

・構造性能を時間の関数として精密に予測し，構造性能の低下を限界状態とした耐久性照査を行えるようになることが本研究の究極の目標である．

・331 委員会における研究は，構造性能が時間の経過に伴ってどのように変化するのかが何よりも重要であるというところからスタートしている．

・鉄筋腐食等の「材料劣化」という言葉を補修補強する時の単なる指標として考えて扱っているが，基本的には材料劣化を研究している訳ではなく，それによって

構造物がどうなるかを知るために研究している．同時に我々もそれを勉強していくのだということを強く認識しなければならない．

・材料劣化（例えばひび割れの発生や鉄筋腐食）が生じたところで，基本的には，ある構造性能を保持していればそれで構わないということが大前提にあるということを合意した上で進めていかなければならない．

・鉄筋が腐食して鉄筋断面積が減少することが非常に危険だという受け取り方ではなく，そうなった時に構造性能がどうなるかを知るための研究であるということを委員の共通認識としなければならない．

・材料や耐久性に関する研究分野と，力学や構造に関する研究分野の融合が重要である．今の維持管理では主に前者に着目しているが，劣化した時に構造性能がどのように変化するのかという見方が実務上では非常に少ないのが実状である．
ひび割れが生じたからひび割れ注入すれば良いということではなく，ひび割れ注入すると何がどうなるかを知らなければならないということである．

５．２　腐食鉄筋の機械的性質および腐食鉄筋とコンクリートの付着特性について
（担当：田中幹事）

(1)「はじめに」について

・土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】では，性能評価は定量的な方法で行うことが望ましいとしながらも，半定量的なグレーディングによる方法を用いている．本研究では，性能を直接定量的に評価することを目的としている．

・現実は，構造性能を全く評価せずに維持管理している．

・既設構造物の評価として，調査・点検結果の情報を用いたシミュレーション解析によって構造性能を評価するということが究極の目的である．それを現状ではできないので，外観だけで良いか悪いかを判断している．

・外観だけで構造性能を判断するのは難しく，非常に高度な技術が必要である．（全てを理解していなければ判断できない．）本来は，優秀なエンジニアがいなければできないが，そうではなく一つ一つ解明していこうということである．

・331 委員会の報告書は，我々がやっていることと基本的には違う判断基準を使って評価するための報告である．

(2)「腐食鉄筋の機械的性質」について

・腐食鉄筋の機械的性質の評価には，鉄筋の断面積や形状に関する値を指標とするのがよいが，それらを効率的に測る手法がないため，鉄筋全体に対する腐食部分の質量割合（質量減少率）により表現されている．

・腐食した鉄筋の降伏強度，引張強度，弾性係数，伸びは，いずれも低下する．

・これらの報告は，腐食した鉄筋単体の性質をまとめたものである．なお，腐食が平均的に生じているか局所的に生じているかは不明であるが，電食によって腐食させていることから，一様に腐食が生じているとは考えにくい．

・鉄筋が腐食している場合，鉄筋断面積のみを減少させて評価することは基本的には良くない．実務ではそうしているが，原理原則としては間違いである．鉄筋コ

ンクリートとして評価しなければならない.

(3)「腐食鉄筋とコンクリートの付着特性」について

・鉄筋表面に析出する腐食生成物の存在によって鉄筋の付着が損なわれる.

・腐食ひび割れの発生に伴い，コンクリートによる鉄筋の拘束効果が解放されることによって，コンクリートと鉄筋の付着が損なわれる.

・鉄筋とコンクリートの付着が損なわれることの RC 部材の力学性能に及ぼす影響は,

1) 鉄筋からコンクリートに伝達される引張力が付着劣化によって低下する.

2）鉄筋の抜け出し量，すべり量が増加する.

3）ひび割れの分散性が損なわれることにより，ひび割れの発生状況が変化する.

・横補強筋の有無で付着強度の低下率が変わるとあるが，軸方向鉄筋に沿って発生する腐食ひび割れを拘束した結果なのか，コンクリート標準示方書に記載されている横方向鉄筋の影響と同様の効果なのか，実験内容を確認する必要がある.

(4) その他

・今後，このような感じで進めていくことで良いか？（問題はないか？）

→「わからない点をはっきりさせる」ことも目的の 1 つである．よって，その疑問点に対して議論する今回のような進め方で良いものと思われる.

・331 委員会は第 3 種委員会であり，報告書に記載されている内容は土木学会で統一された見解ではないことに注意する必要がある．ただし，定性的な見解としては受け取っても良い.

・今回の報告で鉄筋が腐食するとコンクリートと鉄筋の付着特性が変わるということが明らかになったが，現在用いている照査式は使えないという判断で良いか？

→次回の曲げ耐力・せん断耐力において，その回答が得られるはずである．現段階では，鉄筋が腐食すると付着特性が変化するということを理解すれば良い.

６．非線形解析 WG の今年度の検討計画について

・資料その３をもとに，関下委員により今年度の検討計画について説明があった.

・一軸引張解析で得られたら知見をもとに，過年度に実施した RC 梁の載荷実験の非線形解析を行う．具体的には，コンクリートの引張軟化特性と鉄筋のモデル化の組み合わせの影響について検討を行うこととする.

７．土木学会全国大会での発表に向けて

・関下委員により，平成 22 年 9 月 3 日に札幌（北海道大学）で開催される土木学会全国大会（第 65 回年次学術講演会）のリハーサルを行った.

８．その他

・プレゼンテーションのスケジュール確認と委員名簿の更新について連絡があった.

・次回委員会は 10 月下旬から 11 月上旬の開催予定とする．佐藤委員長と調整し，詳細は後日連絡する.

－ 以 上 －

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 22 年度第 3 回委員会　議事録

日　　時：	平成 22 年 12 月 15 日(水)　15:00～18:00
場　　所：	北海道大学工学部（A101 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，~~渡辺副委員長~~，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事， ~~花田委員~~，宮本委員，坂口委員，~~関下委員~~，~~藤田(光則)委員~~，吉田委員， 星野委員，川口委員，吉永委員，~~中野委員~~，~~久保委員~~，和田委員，豊蔵委員， 橋本委員，~~竹下委員~~，~~加藤委員~~，佐藤委員，~~藤田(真吉)委員~~，~~田口委員~~， 林田委員　（敬称略，計 16 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料-1　平成 22 年度第 2 回委員会　議事録（案） 資料-2　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 2 回） 資料-3　非線形解析 WG の中間報告資料 資料-4　土木学会全国大会（第 65 回年次学術講演会）での発表報告資料 資料-5　DIANA（教育版）を用いた非線形解析の概要説明資料 資料-6　最新委員名簿

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

・前回からスタートした「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」では，発表するだけではなく，それ以上に活発な議論を行っていきたい。

２．第 3 回委員会の議事録担当者について

・山口幹事の担当とする。

３．第 2 回委員会議事録の確認について

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた。

４．非線形解析 WG の中間報告について

・吉田委員より，WCOMD（分散ひび割れ－分散鉄筋モデル）による RC 梁部材のシミュレーション解析に関する検討結果について説明を行った。

・検討結果を要約すると，以下の通りである。

(1) 要素分割の影響について

鉄筋降伏までの荷重－変位応答にはほとんど影響を及ぼさないが，荷重が低下し始める変位レベルは各ケースで異なり，ポストピーク領域では要素分割の影響を受けることが明らかとなった。特に，要素寸法が小さい場合ほど早期に荷重が低下する傾向にあることが確認された。

(2) 引張領域における付着パラメータの影響について

引張領域における付着パラメータは，ひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの剛性のみならず，降伏荷重および降伏以後の挙動にも大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

(3) 圧縮領域における付着パラメータの影響について

圧縮領域における付着パラメータは，荷重が低下し始める変位レベルに若干の差異が見られるものの，解析結果に大きな影響は及ぼさないことが明らかとなった。

(4) 載荷点近傍の強度設定の影響について

圧縮領域における破壊の局所化に起因する早期の荷重低下を改善することを目的として，載荷点近傍要素のコンクリート強度を意図的に増加させた。その結果，早期の荷重低下はある程度は改善されることが明らかとなった。

・ポストピークを越えると要素分割の影響を受けるということを認識したことは非常に重要である。同時に，なぜそのようになるのかということも知る必要がある。
破壊に達する要素はどこか 1 つの要素であると推測されるが，要素寸法が小さいと破壊する要素寸法が小さいために急激に破壊が起こる。一方，要素寸法が大きいと破壊がより後で起こるため，解析結果における応力等を詳細に分析した方が良い。
また，どこかの要素が破壊するということは，逆にどこかの要素が除荷されるということも知った方が良い。

・付着パラメータは解析結果に大きな影響を及ぼす。一方で，鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係も付着パラメータとペアであるということを認識しておく必要がある。
付着の程度によって鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係が変わるという事実は，材料劣化を扱う上で非常に重要な要素である。

・付着パラメータは引張領域に対するパラメータであることから，それを圧縮領域で制御しても意味がない。但し，圧縮領域に水平方向のひび割れが生じる場合には影響を受ける可能性がある。（圧縮の付着という意味では効かない。）

・WCOMD を適用する場合，要素寸法は実際にコンクリートが破壊する程度の要素寸法にするのがルールである。よって，要素寸法は 20cm～30cm に設定した上で，それでも早期に荷重が低下する場合には載荷点近傍の要素の強度を増加させるといった工夫は必要である。ただし，要素寸法を小さくしつつ，強度を増加させるのは議論としては難しい。実験結果と合わせるために強度を増加させるのは，感度解析として勉強するためには良いが，この先利用するための検討としては間違いである。

・古くは，東工大の二羽先生が COMM2 という WCOM の前身のプログラムを使用してディープビームの数値実験を行った。その時は，載荷点近傍の拘束効果の影響が大きいため，要素の強度を増加させて破壊させないように解析している。（1980 年代）

・拘束効果による影響は，ディープビームのみならず，スレンダービームにおいても圧壊する時にはあると思われるが，詳しくは不明である。

・拘束効果によるコンクリート強度の増加は，WCOM の材料構成則では考慮されていないはずである。

・今回の結果では，荷重－変位曲線の鉄筋降伏後の増加が実験結果の方が大きい。
鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係をどうすれば実験結果に合ってくるかを考察した方が良い。（鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係は，ひずみ硬化係数等，実際にはばらつきが大きい。）
・付着パラメータは鉄筋降伏以後の挙動にも影響を与えているが，これはテンションスティフニングによるコンクリートが負担する応力の差である。
・付着パラメータを変化させたら付着の程度を表現できるといった式の形にはなっているが，平均応力－平均ひずみ関係が付着パラメータを変えた範囲で本当に適用できるかどうかは検証されていないはずである。
・ひび割れがある程度生じることが前提で分散ひび割れモデルが適用できるが，付着パラメータを大きくする，すなわち付着が悪いと実際にはひび割れは数本しか生じないため，このような範囲で本モデルを適用しても良いかどうかに疑問がある。これは材料劣化を扱う上では重要な要素であるため，しっかりと認識すべきである。

５．土木学会全国大会での発表報告について

川口委員より，平成 22 年土木学会全国大会における論文発表の報告があった。発表当日は，名古屋大学の中村先生および横浜国立大学の椿先生より質問があった。
以下はそれに対する佐藤委員長のコメントである。

・中村先生は，コンクリートの引張強度を低減しつつ，さらに付着－すべりモデルに軟化を考慮している。
・島モデルに対して剛性や強度を落とすだけでひび割れが局所化するとは思えないが，例えば収束判定基準を緩めるとか，載荷ステップを大きくする等の工夫で，数値計算上局所化させる現象を引き出せるものと考えられる。よって，中村先生の検討では，モデルとともに少々ラフに解析していることが結果に影響を及ぼしている可能性がある。かつ，オリジナルの島モデルは軟化が考慮されていないため，それが局所化しにくいことの要因の 1 つであるかも知れない。
・一軸引張作用を受ける RC 部材で 1 本目のひび割れがどの位置から生じるかは，部材軸方向の応力分布だけではなく，断面内の応力分布にも関係しているものと考えられる。結論はよく分からないということであるが，これを連続体解析（FEM 解析）で表現するのは非常に難しいと考えられる。ただし，剛体バネモデル（RBSM）では表現できるかも知れない。
・付着－すべりモデルで軟化域を考慮する理由を説明できなければならない。そもそも現象として付着の軟化とは何を表しているのか？どうして軟化が起きるのか？を知らなければならない。
・抜け出しによる破壊がない場合や割裂破壊もない場合には軟化域を考慮する必要はない。つまり，軟化域を考慮することが正しいかどうかを議論する必要がある。
・鉄筋が降伏すると付着応力がなくなるため，降伏するために付着－すべり関係に軟化域を考慮することは理解できる。

６．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その２）について

坂本幹事より，鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ耐力およびせん断耐力について発表報告を行った。

６．１　鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ耐力について

・鉄筋腐食が生じた RC 部材の曲げ耐荷性状に関する研究は，促進劣化等の実施上の都合により，比較的小型の RC 供試体によって行われている。

・実構造部材を用いた研究では，コンクリートおよび鉄筋自体の劣化に関する調査例は多いが，鉄筋腐食と部材の耐荷性能について研究された例は少ない。

・鉄筋腐食と実構造部材の耐荷性能の関係についての研究では，鉄筋腐食の劣化指標として，目視により判定される指標（部材の劣化度，腐食ひび割れ，鉄筋の腐食程度）と鉄筋腐食を定量的に表す指標（断面減少率，質量減少率）が用いられている。

・曲げ耐力については鉄筋腐食がもたらす断面積の減少による影響に注意する必要があり，剛性や変位についてはひび割れや付着に着目して検討する必要がある。

・鉄筋の腐食による質量減少率や断面減少率は RC 部材の曲げ耐力を低下させるが，その程度は各研究者により見解が異なっている。これは，鉄筋腐食のばらつきがあるためと考えられる。

・せん断補強筋やフックによる定着のない RC 梁において，部材全長にわたって鉄筋腐食が生じた場合には鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが進展して，定着端部から鉄筋の抜け出しが生じて，破壊モードが変化する場合がある。

・実構造部材を対象とした載荷実験では，目視による劣化度が大きいほど部材剛性が低下する結果が得られている。

・鉄筋の質量減少率が最大値を示す箇所によって，曲げ耐力の低下の程度が異なる。よって，応力が大きい部位に位置する鉄筋の腐食性状を把握することが，部材の耐荷性を評価する上で必要不可欠である。

６．２　鉄筋が腐食した RC 部材のせん断耐力について

・鉄筋腐食が生じた RC 部材のせん断耐荷性状に関する研究は，曲げ耐荷性状に着目した研究と比較して極めて少ない。

・せん断補強筋のみを腐食させた場合には，斜めひび割れが載荷点寄りに生じる。これは，せん断補強筋の腐食と付着劣化によってせん断スパンウェブ域の応力状態が変化したためと推察される。（主応力の角度が変化する）

・せん断補強筋の腐食が大きくなると，断面減少によってせん断補強筋の負担せん断力が低下するため，せん断補強筋が十分に機能しないうちに斜めひび割れが拡大して終局に至る可能性がある。すなわち，せん断補強筋の降伏で終局とするせん断耐力評価式は適用できなくなることも起こり得る。

・主鉄筋のみを腐食させた場合には，主鉄筋に沿った軸方向ひび割れの発生によって付着性能が低下するため，腐食量が増大するに伴ってタイドアーチ的な耐荷機構を形成して最大荷重が増加するようである。

・主鉄筋の付着性能がせん断耐荷機構に影響しているのであれば，耐荷機構や破壊形態の推定にあたっては腐食ひび割れの状態を点検することが有効である。
・タイドアーチ的な耐荷機構を形成するためには，主鉄筋の定着部が腐食による損傷を受けずに十分に機能する必要がある。
・主鉄筋の腐食量が軸方向にばらついている場合には安定したアーチが形成されない場合も想定されるため，耐荷機構を検討するためには腐食ひび割れの幅や分布を調査する必要がある。
・主鉄筋とせん断補強筋がともに腐食している場合には，主鉄筋とせん断補強筋の腐食のバランスおよび腐食ひび割れの幅や分布性状から破壊形態の判別を行い，かつ腐食ひび割れという比較的点検し易い劣化諸量を用いて判別できるようになることが実務上有益であると考えられる。

・局所的な腐食を念頭においた検討が必要である。つまり，曲げモーメントが最大の位置で最も腐食が進行しているわけではなく，腐食の程度によって降伏強度にばらつきがあるため，必ずしも最大曲げモーメントの位置で破壊するわけではない。
・局所的な腐食量を用いると，平均腐食量を用いた場合と比較して耐力が低下する。つまり，平均化することの危険性が危惧される。そこを理解することが重要である。
・鉄筋とコンクリート間の完全付着と平面保持を仮定して，腐食による鉄筋の断面積減少のみを考慮して解析する手法は本質的ではない。よって，本来は違うアプローチが必要であることを認識しなければならない。ただし，全てにおいて精緻な数値解析を実施するのは困難であるため，健全な部材とは現象が異なるという事実を理解しつつ，例えば実務上では平面保持を仮定した計算値を 70%に低減させて評価する等のジャッジメントがあっても良い。
・定着部の重要性は強く認識する必要がある。

７．DIANA（教育版）を用いた非線形解析の概要説明について

川口委員より，DIANA（教育版）を利用した非線形解析に関する全体説明（基本的な操作方法等）があった。

・希望者にプログラム（CD-ROM）を無償で配布するので，先ずはマニュアルに従って操作して頂き，雰囲気を掴んで欲しい。また，先ずは基本データ説明書の 4 頁までに書かれている用語の内容を理解して欲しい。
・それを踏まえて，検討方針（感度解析するパラメータの設定）や分担を決定する。
・最終的には，結果が揃った段階で成果を持ち寄って考察を行い，委員会の中で全体のまとめを報告できれば良いと考えている。

８．その他

・次回委員会は，平成 23 年 2 月の中旬に開催予定とする。詳細は後日連絡する。

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 22 年度第 4 回委員会　議事録

日　　時：	平成 23 年 4 月 20 日(水)　14:00～18:00
場　　所：	北海道大学工学部（A101 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事，~~花田委員~~，宮本委員，坂口委員，関下委員，藤田委員，吉田委員，星野委員，川口委員，吉永委員，中野委員，久保委員，~~和田委員~~，豊蔵委員，~~橋本委員~~，青柳委員，加藤委員，佐藤委員，~~田口委員~~，林田委員 （敬称略，計 21 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料-1　平成 22 年度第 3 回委員会　議事録（案） 資料-2　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 3 回） 資料-3　土木学会北海道支部発表報告資料 資料-4　非線形解析 WG の検討結果報告資料（その 1） 資料-5　非線形解析 WG の検討結果報告資料（その 2） 資料-6　DIANA（教育版）を用いた検討内容および分担について 資料-7　平成 23 年度の活動方針について 資料-8　第 20 回_プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウムへの論文投稿（研究紹介）について 資料-9　最新委員名簿 その他　付着モデルを用いた曲げ解析結果

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

２．新委員の紹介

・（株）長大の青柳委員が本委員会に参加することになり，自己紹介があった。

３．第 4 回委員会の議事録担当者について

・田中幹事の担当とする。

４．第 3 回委員会議事録の確認

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた。

５．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その３）について

山口幹事より, 鉄筋が腐食した RC 部材の疲労耐力およびじん性能について発表報告を行った。

５．１　鉄筋が腐食した RC 部材の疲労耐力について

・疲労耐力に対する劣化指標としては，大きく「鉄筋の質量減少量」,「鉄筋の腐食ひび割れ」,「ひび割れ密度」がある。

・構造物の疲労耐力は，部材を構成する鋼材またはコンクリートの疲労強度によって定まる。既往の研究においても，腐食した鉄筋の疲労強度に関する検討が行われており，特に主鉄筋の腐食の影響を大きく受ける。

・鉄筋の腐食ひび割れは，構造物の点検において主要な項目の１つであるが，現状では疲労耐力を定量的に評価可能な指標にはなっていない。

・道路橋床版で見られるような押し抜きせん断破壊については，ひび割れ密度等が指標として用いられている。現状では，ひび割れ損傷と疲労劣化の観点からの評価は見られるものの，鉄筋腐食と関連付けた評価は見られない。ただし，実際には疲労損傷と材料劣化が同時に起こっている可能性が高いため，質量減少量やひび割れ密度等の影響を考慮した指標が必要である。

・疲労耐力に及ぼす主鉄筋腐食量の影響に関しては大屋戸らの研究があり，鉄筋を電食により促進劣化させた梁試験体を用いて疲労実験を行っている。これによると，鉄筋の疲労強度の低下は鉄筋腐食に概ね比例する結果が得られており，鉄筋の質量減少率を評価することによって鉄筋の疲労強度を推定できるとされている。また，その他の評価手法として，１）コンクリート標準示方書の疲労強度式に鉄筋の腐食を考慮した補正係数を乗じる方法，２）鉄筋の断面減少と応力集中を考慮した孔食をモデル化し，破壊力学を用いて詳細に推定する方法，３）実構造物から得られる指標を考慮して，より単純な補正係数を考慮する手法，が検討されている。

・疲労耐力に及ぼす腐食ひび割れの影響に関する研究例はほとんどないが，腐食ひび割れの存在は鉄筋の付着劣化を起こす要因であると考えられている。

・鉄筋の疲労強度に対する付着劣化は，鉄筋ひずみを平準化し，最大ひずみを低下させることに繋がり，見かけ上，疲労寿命を延伸させることになる。よって，腐食ひび割れによる付着劣化は破壊性状に影響を与える可能性があることから，破壊形態についても検討を行う必要がある。

・今後の課題としては，大きく以下の３つが挙げられる。

①既往の研究では，疲労耐力は質量減少率，鉄筋の孔食による断面の減少を考慮した疲労強度により評価可能とされているが，現状ではデータが十分であるとはいえない。また，実構造物の点検では，詳細な鉄筋断面の測定は困難であるため，精度の高いデータを得ることは難しいと考えられる。よって，今後は孔食径等の詳細なデータと質量減少率等の平均的な実験データの蓄積が必要である。

②腐食ひび割れについては現時点では定量的評価は困難である。しかし，材料劣化と疲労損傷を推し量る１つの指標になり得ると考えられることから，鉄筋の腐食量とひび割れ状況（ひび割れ密度，幅等）の両面から実験的な整理が必要である。

③実構造物においては，材料劣化と疲労劣化が同時に作用するものであるが，現状では材料劣化と繰り返し荷重を同時に受ける部材に関する研究はほとんどないことから，今後検討が必要である。

５．２　鉄筋が腐食した RC 部材のじん性能について

・ここでは，塩害劣化した RC 部材を対象とした正負交番載荷実験による耐荷性能，曲げ塑性変形および耐震性能に着目する。

・じん性能に対する劣化指標としては，主鉄筋の「質量減少量」，「引張強度」，「破断時の伸び」が用いられている。

・RC 橋脚等の柱部材のじん性能は，帯鉄筋に代表される横拘束筋の配筋，配筋量，機械的性質に影響を受けるため，横拘束筋の「質量減少量」，「引張強度」，「破断時の伸び」を劣化指標としている研究例もある。

・かぶりコンクリート部の腐食ひび割れ幅に着目した検討例もある。これは主鉄筋に沿った腐食ひび割れや剥離型の腐食ひび割れは鉄筋とコンクリートの付着特性に影響を与え，RC 部材の復元力の履歴形状に影響を与えることが予想され，履歴吸収エネルギー等のじん性能指標を用いる場合に有効な劣化指標となる得る可能性がある。

・腐食の程度が軽微（主鉄筋の質量減少率が 1%以下）な場合には，部材剛性やエネルギー吸収性能が健全供試体よりも向上した。この理由は，鉄筋の降伏強度や引張強度の低下が顕著でないのに対して，鉄筋表面の腐食生成物によってコンクリートと鉄筋の付着が向上するためや，帯鉄筋の腐食によってコアコンクリートに対する拘束圧が増加するためと考えられる。ただし，質量減少率が小さい場合でもかぶりコンクリートのひび割れ幅が大きくなった場合には拘束効果の向上が期待できず，耐荷性能の向上が見られない。

・腐食の程度が大きい場合には，主鉄筋や帯鉄筋の破断が生じるという研究報告が多い。これは，鉄筋腐食が進展した場合には，鉄筋の降伏強度や引張強度よりも伸び性能の低下が著しくなるためである。そのため，大変形領域では，主鉄筋の破断による耐荷力の急激な低下や帯鉄筋の破断によってせん断破壊が生じる可能性がある。

・鉄筋腐食が軽微な場合でも，腐食に伴う鉄筋の体積膨張によってかぶり部にひび割れが発生する場合には，かぶりコンクリートと鉄筋の付着が低下するため，かぶりコンクリートの剥離が誘発されて，吸収エネルギーが低下するという報告もある。よって，かぶりコンクリート部の腐食ひび割れ幅が耐震性能の低下を表す指標となる得ることが示されている。

・今後の課題としては，大きく以下の 4 つが挙げられる。

①鉄筋腐食が生じた RC 部材のじん性能の低下を定量的に判断できるほどのデータの蓄積がない。特に帯鉄筋の腐食量とじん性能の低下に関する実験データの蓄積が望まされる。

②腐食した鉄筋の大変形領域における座屈に着目した検討が必要である。

③実構造物では断面寸法に対する相対的なかぶりの大きさが小さくなるため，主鉄筋や帯鉄筋の鉄筋間隔も含めて，寸法効果を考慮してかぶりコンクリートの変状の影響を検討する必要がある。

④劣化が進展した場合には平面保持の仮定が成立せず，従来の構造解析とは異なる視点を加えた検討が必要である。よって，実験データを蓄積するとともに，同時に数値解析的な検討も実施する必要がある。

以下，議論に及んだ内容について整理する。

・鉄筋表面に腐食生成物がある場合には，付着試験を行うと付着力が向上する結果が得られる。ただし，劇的に向上するわけではない。
・丸鋼鉄筋は疲労しない。異形鉄筋故に疲労現象がある。
・例えば，道路橋の床版のように押し抜きせん断で破壊するのは，押し抜きせん断で破壊するように設計しているからである。押し抜きせん断破壊は実際は曲げ破壊である。曲げ損傷が蓄積させて，ある時点で押し抜かれるように破壊しているだけである。
・圧縮鉄筋を有する版で，圧縮鉄筋に沿って腐食ひび割れが発生したとすると，圧縮領域のコンクリートがひび割れが入って損傷している。その状態で繰り返し作用を受けた時にコンクリートの疲労寿命がどの程度なのかは誰も検証していない。
・必ず起きる破壊は疲労である。
・疲労限という現象は，材料劣化を受けると当てはまらなくなるものと考えられる。
・維持管理とはシステムであるため，定期的に点検してメンテナンスするのであれば，ある状態を保持するのが前提条件であり，ペアである。設計である仮定をしたならば，その条件を守るように維持管理するが，たとえば 200 年間メンテナンスしないとすれば，途端に疲労限を守るのであれば腐食ひび割れが生じないようなかぶり厚にしたり，かぶり厚をそのままにするのであればいつ破壊するのかを予測して，200 年後に破壊するという設定することになる。つまり，鉄筋コンクリートの寿命の話と，実際の構造物でどう設定してどう維持管理するのかは別の話である。
・鉄筋は平均的に腐食しないのに，ある測定した区間の平均質量減少率といった指標で評価しても良いのか？⇒構造性能は平均値では評価できない。最大値と最小値とその位置を押さえる必要がある。
・種々の論文では，質量減少率等を平均値で定義しているが，決してそれが正しいということではない。
・実際に構造物を維持管理する場合には，腐食程度が大きい位置と実際の構造上の断面力の特性をチェックするべきであると構造技術者が言えなければならない。
・厳密に空間的な劣化の分布を調べることはできないため，最大値と最小値のばらつきを感覚的に持てることが重要である。極端に考えても良い。
・付着があるところで局所的に孔食が生じていると厳しい。
・疲労の場合には，腐食があるのが弱いのか腐食がないのが弱いのか分からない。
・材料劣化を受けた場合，現実にはその程度にかかわらず修復している。しかし，材料劣化は修復後も続くため，途中で修復したどうなるかも勉強しなければならない。
・材料劣化とは何か？損傷とは何か？用語の定義を明確にするべきである。
・ある時点におけるひび割れ幅が 0.2mm であることで判断するのではなく，ある程度時間が経過した後のひび割れ幅を確認して，未だ動きのあるひび割れなのかそれとも定常状態にあるひび割れなのかといった視点で補修が考えられなければならない。
また，構造上生じたひび割れであれば，ひび割れ幅が 0.2mm や 0.3mm であれば，どの程度の応力状態であるのかを知らなければならない。それを踏まえて補修するか否かを判断すべきである。

６．土木学会北海道支部発表報告について

関下委員より，平成 23 年 2 月 5，6 日の 2 日間にわたって開催された土木学会北海道支部年次技術研究発表会での発表報告を行った。

・発表会場から圧縮強度を意図的に増加させた要素に載荷点近傍の 3 つの要素を選択しているが，この理由は？また，増加させた値はランダムか？という質問があった。

・実験結果は鉄筋降伏以後も荷重が増加しているが，解析結果ではほぼフラットになっているように見える。これはなぜか？

⇒鉄筋の 2 次勾配の影響と思われるが，WCOMD では 2 次勾配をユーザーが直接設定できないため，その影響を検証することができない。本解析では 2 次勾配を持っているが，ほぼフラットに近い状態になっているのかも知れない。

・圧縮領域における RC 要素で付着パラメータは関係するのか？

⇒RC 要素にひび割れが導入されていなければ影響を与えないものと考えられる。しかし，梁ではなく，柱の解析であれば影響が大きいものと予想される。なお，RC 要素の圧縮応力－圧縮ひずみ関係に関しては十分に議論されていないのが現状である。

７．非線形解析ＷＧの検討結果報告について

・川口委員より，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる一軸引張挙動解析の追加検討（境界条件および付着モデル）結果について説明があった。

・過去の検討では，付着－すべり関係として島先生らが提案しているモデルを用いていたが，昨年の土木学会全国大会における聴講者からの指摘を踏まえて，種々の付着モデルを適用して検討を行った。具体的には，名古屋大学の中村先生らが提案しているモデル，山梨大学の斉藤先生らが提案しているモデルを適用した。

・モデル端部の全節点（コンクリート要素および鉄筋要素）を拘束した場合には，いずれの付着モデルを用いてもテンションスティフニング効果を表現できない。

・鉄筋要素の節点のみを拘束した場合には，完全付着モデル，島モデル，山梨大学モデルを除き，テンションスティフニング効果をある程度表現できた。また，コンクリートの引張強度にばらつきを付与することで更に実験結果との整合性が向上した。

・付着強度が高いとひび割れが多く発生し，結果的に剛性が低下する。よって，ひび割れの発生を抑制させるためには付着強度を低下させなければならない。付着強度を 40%に低減させることによってコンクリートに作用する引張力が小さくなるため，発生するひび割れの本数が減少してテンションスティフニングの挙動が実験結果と合った。

・山梨大学モデルが実験と整合していないのは付着強度が未だ大きいためと推察される。

・分散ひび割れモデル－離散鉄筋モデルは何のために適用しているのか？

⇒材料劣化を扱う上で付着特性を直接に与えたいからである。また，将来的には付着特性を場所によって変えたいという思考もあり，その場合には分散鉄筋モデル（平均応力－平均ひずみ）で扱うよりも現実に近い形で評価できると思われるためである。

・一方，付着モデルとは何か？ということを勉強しているという側面もある。今回の結果は，実験から得られた付着応力－すべり関係は，分散ひび割れモデル－離散鉄筋モデルには適用できないということを示している。故に付着強度を 40%に低減している。

・付着特性を直接的に与えることができるのは，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルの場合のみである。
・実験から得られた付着応力－すべり関係を，なぜ分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに適用できないかを説明できなければならないが，誰も説明していないのが現状である。
・分散ひび割れモデルでも，付着強度を低下させることによって，ひび割れを局所化させることができるのは興味深い。

・宮本委員より，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる RC 板の曲げ解析結果の概要について説明があった。
・付着強度が低下するに伴って，最大荷重が低下することが明らかとなった。なお，詳細については次回委員会に改めて説明することとする。

・小林幹事長より，過年度に実施した曲げ破壊型 RC 梁の静的載荷実験を対象とした解析的検討結果の概要について説明があった。時間の都合により，詳細の説明は割愛するが，後日資料の内容を確認して頂き，質問等あればメールで対応することとした。

８．DIANA（教育版）を用いた検討内容および分担について

・検討内容と分担を決定した。なお，代表者は曲げ破壊型は関下委員，せん断破壊型は坂口委員とし，取りまとめやスケジュール管理等を担当して頂くこととする。
・基準となる解析ケースを明確にすること。⇒ 川口委員が作成したモデルを基準とする
・検討内容に対応した補足資料が必要と思われるので，後日配布したいと考えている。また，スケジュールについても後日メール等で連絡することとする。
・DIANA の日本語版マニュアルを配布できないか検討頂くこととする。（川口委員）

９．平成 23 年度の活動方針について

・補修・補強工事を対象とした現場見学会は，7 月頃に千歳近郊で計画している。（山口幹事が調整中）
・凍結融解作用を受けた RC 部材の一軸引張試験を 8～9 月頃に実施予定であるため，希望者は見学しても良い。（詳細は佐藤委員長より連絡を頂くこととする）
・10 月に函館で開催される「第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム」に論文（研究紹介）を投稿予定である。（発表は関下委員で，原稿は小林幹事長とともに現在執筆中である）

１０．その他

・次回委員会は，6 月下旬～7 月上旬に開催予定とする。詳細については後日連絡することとする。

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 23 年度第 1 回委員会　議事録

日　　時：	平成 23 年 7 月 19 日(火)　14:30～17:30
場　　所：	北海道大学工学部（A101 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，~~渡辺副委員長~~，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，~~田中幹事~~，~~花田委員~~，宮本委員，坂口委員，関下委員，藤田委員，~~吉田委員~~，星野委員，川口委員，吉永委員，中野委員，~~久保委員~~，和田委員，豊蔵委員，橋本委員，~~青柳委員~~，加藤(剛)委員，佐藤委員，加藤(貴)委員，~~田口委員~~，林田委員 （敬称略，計 19 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料-1　平成 22 年度第 4 回委員会　議事録（案） 資料-2　平成 23 年度コンクリート研究委員会総会報告 資料-3　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その 4，その 5） 資料-4　DIANA（教育版）を用いた FEM 解析の中間報告 資料-5　第 20 回_プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウムへの投稿論文 資料-6　「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」の分担変更 資料-7　最新委員名簿 その他　非線形解析 WG の検討結果報告 付着モデルを用いた曲げ解析結果

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった。

・先週末に海岸，水門，都市計画等を専門とする准教授と陸前高田市から南下して東北の被災地を視察してきた。復興が進んでいない状況の中，必ず起こり得る地震に対して，どのように食い止めることが出来るのか。冬期に北海道に同様な震災が起こった場合や塩害とともに凍害劣化している橋梁に与える影響など考えた場合，本委員会は非常に重要であるものと考えられる。今後，より一層，北海道に貢献できる内容を作り上げることが出来たら良いと思う。

２．新委員の紹介

・(株)ダイヤコンサルタントの加藤貴博委員が本委員会に参加することになり，自己紹介があった。

３．平成 23 年度第 1 回委員会の議事録担当者について

・和田委員の担当とする。

４．前回委員会（平成 22 年度第 4 回委員会）議事録の確認

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた。

・凍結融解作用を受けた RC 部材の一軸引張試験は，8 月から凍結融解試験を開始する予定である。一軸引張試験は 10 月頃の予定である。

・10 月に函館で開催される PC シンポジウムへの論文投稿が完了し，掲載も決定した。発表日時は 10 月 14 日の午前中である。

５．平成 23 年度コンクリート研究委員会総会報告

・小林幹事長より平成 23 年 5 月 27 日に行われた北海道土木技術会コンクリート研究委員会の総会報告があった。

６．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その４，その５）について

吉永委員および加藤（剛）委員より，材料劣化（鉄筋腐食）が生じた RC 部材の構造性能に関する共通試験について，発表報告を行った。

吉永委員：ベンチマークテストの概要，ベンチマークテストの腐食量調査結果及び考察

加藤委員：ベンチマークテストの載荷試験結果及び考察，ベンチマークテストの応用例

【概要】

・第 1 期では，実験結果に偶発的誤差や系統的誤差のバラツキがあり，信頼性が十分ではない。このため、実験結果をどこまで再現性のある実験事実とみなすことが出来るのか明らかになっていない。RC 構造の耐荷性能を予測する手段とした数値解析技術を有効に利用するため、系統的誤差を極力排除した実験データの蓄積が求められる。

　このため、実験データの信頼性、再現性を目的とした共通化した実験条件下で載荷実験を行う。統計的特徴を検証するため、研究機関ごと腐食レベルごとに実験結果を検証し、実験結果の整理をもとに、今回提案する共通試験条件の問題点あるいは改善点の収集を行う。

以下，議論に及んだ内容について記載する。

・ベンチマークテストの腐食量調査結果及び考察での結論としては，腐食ひび割れ幅と断面減少率の相関はあまりないということか？

⇒腐食ひび割れ幅と断面減少率は相関が見られないが,断面減少率と耐荷力は相関があると考えられる。

・鉄筋が腐食した RC 部材の耐力や破壊モード等の評価には，既往のマクロ式はやはり適用できないのか？

⇒鉄筋が腐食した場合には，鉄筋断面積が減少するだけではなく，それに伴って付着性能も変化するため，基本的には既往のマクロ式は適用できない。

しかしながら，腐食の程度によってはマクロ式によっても評価可能と考えられるが，そのためにはデータの蓄積と更なる詳細な考察が必要である。

・鉄筋の腐食状況等，実験と実構造物の乖離が大きい。これらの研究成果は実務ではなかなか適用できないのではないか？

⇒研究成果を実務で適用するための応用の議論が不足している。そこの議論をすることで，精度に余地はあっても評価式自体は作ることは可能である。
また，JSCE-331 委員会の報告書を調べることによって，鉄筋腐食が生じた場合の構造性能を評価しようとしたときに何が最も影響が大きいかが把握できる。それによって，実構造物の構造性能を評価しようとしたときに，どういう情報が必要なのか？どういう点検をすべきなのか？も分かるはずである。

・鉄筋の断面減少率を計測するためにノギスと 3D スキャンを使用しているが，具体的にどのように計測しているのか？

⇒ノギスは鉄筋を露出させた状態で，横節を避けた位置に対して直径を測定している。この直径を円断面と仮定して断面積を求め，それを腐食していない健全鉄筋の直径から求めた断面積で除すことによって断面減少率を求めている。また，3D スキャンは鉄筋を露出させた状態で，専用の測定装置によって直接的に得られる。

・鉄筋の腐食量を平均化した形で構造性能を評価することはできない。最も把握すべきなのは，ばらつきがある中での鉄筋腐食が最大となる腐食量とその位置である。
実構造物においては数箇所で鉄筋の腐食状況を調べることになるが，その中でいかにして最大腐食量を予測するかが重要である。それが分かれば，実構造物の構造性能は評価できるはずである。

・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能を評価あるいは予測する手法としては，2 次元あるいは 3 次元の有限要素解析しかないと思われる。それは実構造物では劣化の空間的な分布を考慮しなければならないからである。しかしながら，実務に配慮すると有限要素解析に代わる評価手法も考えていかなければならない。
現時点では，実構造物を対象としたときに実務で適用するための評価手法に関する議論が十分になされていないのが現状である。よって，このような観点での議論および掘り下げた考察が必要であると考えられる。

7．DIANA（教育版）を用いた FEM 解析の中間報告

関下委員および坂口委員より，DIANA による非線形 FEM 解析の中間報告を行った。2008 年に北海道大学で実施した静的載荷試験（曲げ破壊型，せん断破壊型）を対象として，それぞれに対して，①コンクリートのひび割れモデル，②コンクリートの圧縮構成モデル，③コンクリートの引張強度の影響，④せん断剛性低減係数，⑤鉄筋構成モデルの 2 次勾配，⑥要素の等価長さ，⑦変位増分量，に関する感度解析を実施した。

・今回はその中間報告として，各パラメータが荷重－変位応答に及ぼす影響に着目して報告を行った。

・非線形 FEM 解析に対する理解を深めるために，後日，佐藤委員長の方より各委員（各解析結果）に対する質問を送るので，その質問に対する回答を準備してほしい。

・各グループで別途課題を設定して考察を深めるのもよい。

・次回委員会までに，佐藤委員長からの質問に対する回答と，各種コンター図（ひずみ分布，ひび割れ分布，鉄筋降伏状況等）を整理して取りまとめることとする。

・最終的には，委員以外の他の技術者も参照できるような形で検討成果を整理できれば

よい。

・解析が途中でアボート（発散）する場合には，収束計算法や収束判定基準等の変更によって対応可能ではあるが，現段階では変更しないこととする。（解が収束していないということと，発散時点で得られた荷重が最大荷重ではないという認識を持っていればよい。）

・現在使用している DIANA（教育版）は 8 月末でライセンスが切れるが，その後も使用できるように星野委員および川口委員に交渉頂くこととする。

８．非線形構造解析 WG の検討結果報告

・川口委員より，これまで検討してきた一軸引張挙動解析の内容を取りまとめて，JCI の「コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム」に論文を投稿するとの報告があった。（シンポジウムの開催日は平成 23 年 9 月 16 日である）

・論文の内容は，離散ひび割れ－離散鉄筋モデルおよび分散ひび割れ－離散鉄筋モデルに対する付着構成則の感度や妥当性に関する検討とし，島モデルを標準として最大付着応力の低減や付着軟化域の影響について取りまとめる予定である。

・宮本委員より，前回委員会で概要を報告した DIANA（分散ひび割れ－離散鉄筋モデル）による RC 板の曲げ解析結果について補足説明があった。

・分散ひび割れモデルにおいても，鉄筋を離散化して付着応力を低下させることでひび割れが局所化していくのは非常に興味深い。

・材料劣化を受けて強度が低下する場合を想定して，耐力や破壊モードがどのように変化するのかを数値実験で示すことの意義は大きい。つまり，材料劣化が生じて圧縮強度が低下した場合には，付着応力や引張強度の低下も考慮した数値解析をしなければならないということを示すことが重要である。逆に，どの程度の劣化であれば，分散ひび割れ－分散鉄筋でも評価可能なのかを示すことも重要である。

９．「第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム」への投稿論文について

・論文の内容は，一軸引張力を受ける RC 部材を対象として，コンクリートのひび割れモデル，鉄筋のモデル化の組み合わせの相違が解析結果に与える影響について取りまとめたものである。また，本委員会における活動概要についても紹介する予定である。

・シンポジウムは，函館国際ホテルにて平成 23 年 10 月 13 日～14 日の 2 日間にわたって開催される。なお，シンポジウムには関下委員の他に，佐藤委員長，小林幹事長も参加する予定である。

１０．その他

・青柳委員と加藤(貴)委員が参画されたため，「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」の担当者を修正する。青柳委員には第 11 回（構造性能評価のための計測技術），加藤(貴)委員には第 9 回（性能評価を考慮した点検方法）を担当頂くこととする。

・次回委員会の「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」では，鉄筋腐食をテーマとして実務上の扱いや課題について一度議論することとする。具体的な内容について小林幹事長の方で調整することとする。
・外部講師として早稲田大学の秋山先生に講演を依頼する予定である。今年度の委員会開催は残り 2 回程度であるが，依頼する時期は幹事団で調整することとする。
・新委員の加入に伴い，委員名簿を更新した。
・次回委員会は，9 月下旬～10 月上旬頃の開催予定とする。詳細については後日連絡することとする。

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 23 年度第 2 回委員会　議事録

日　　時：平成 23 年 12 月 9 日(金)　14:30～17:30

場　　所：北海道大学工学部（A101 会議室）

出 席 者：佐藤委員長，~~渡辺副委員長~~，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事，~~花田委員~~，宮本委員，坂口委員，~~関下委員~~，~~藤田委員~~，吉田委員，星野委員，川口委員，吉永委員，~~中野委員~~，~~久保委員~~，和田(隆)委員，~~豊藏委員~~，~~橋本委員~~，和田(賢)委員，~~加藤(剛)委員~~，佐藤委員，加藤貴博委員，塩原委員，加藤貴久委員，~~田口委員~~，林田委員

（敬称略，計 18 名，取り消し線は欠席者）

配布資料：資料-1

・平成 23 年度第 1 回委員会の議事録（案）
・凍結融解作用を受けた RC 部材の一軸引張試験の見学会について
・プレゼンの分担およびスケジュール(案)の変更について
・コンクリート研究委員会の運営委員会への提出資料（活動中間報告）
・コンクリート研究委員会主催の講演会について
・最新委員名簿

資料-2　鉄筋腐食事例紹介（各種構造物の鉄筋腐食事例と補修・補強事例について）　・・・山口幹事作成

資料-3　鉄筋腐食による劣化事例　・・・加藤貴博委員作成

資料-4　業務事例（鉄筋腐食に関する実務上の扱い）～塩害地域の橋梁における診断事例～　・・・和田委員作成

資料-5　コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウムの発表報告資料　・・・川口委員作成

資料-6　第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウムの発表報告資料　・・・坂本幹事，関下委員作成

資料-7　付着モデルを用いた曲げ解析結果（その３）　・・・宮本委員作成

資料-8　建設対象物形状の 3 次元座標数値化技術の開発　・・・佐藤委員長

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった。
・昨年度から小委員会として活動を行っているが，来年度からは本委員会での活動成果を外部に発信することを意識した積極的な活動を目指していきたいと考えている。

２．新委員の紹介

・(株)開発工営社 塩原委員，三菱樹脂(株) 加藤貴久委員，(株)長大 和田賢治委員より自己紹介があった。

３．平成 23 年度第 2 回委員会の議事録担当者について

・坂本幹事の担当とする。

４．前回委員会（平成 23 年度第 1 回委員会）議事録の確認

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた。

５．凍結融解作用を受けた RC 部材の一軸引張試験の見学会について

・小林幹事長より，平成 23 年 11 月 8 日に北大で行われた一軸引張試験と，載荷試験後の供試体へのひび割れ注入について概要説明があった。

・ひび割れ注入後に供試体を部材軸方向に切断して鉄筋周辺のひび割れ発生状況の確認を試みたが，目視で確認することは困難であった．今後は，マイクロスコープを用いて検証する予定であり，その結果が整理できた段階で報告したいと考えている。

６．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（鉄筋腐食に関する実務上の扱いおよび課題に関する話題提供）

山口幹事，加藤貴博委員，和田(隆)委員より，鉄筋腐食による劣化事例について話題提供があった。

①山口幹事からの話題提供

・各種橋梁（主桁，床版，壁高欄），ボックスカルバートおよび擁壁に関する鉄筋腐食の事例と補修事例について説明があった。また，補修後の再劣化に関する事例についても紹介があった。

以下に質疑応答の内容について記す。

・事例 1 のように，外桁のみが大きく損傷している場合の補強方法はどのような判断に基づいて行っているのか？

⇒腐食による鉄筋の断面減少は考慮するが，許容応力度法による照査の結果に基づいて判断している。また，損傷した外桁にのみ着目し，橋全体としての照査は行っていない。

・全てにおいて照査（計算）を実施しているのか？（実施するか否かの判断は？）

⇒見た目の損傷程度が大きく，明らかに危険であると推察される場合には行うが，それ以外の場合には照査を行っていないのが実情である。

・事例 9 は補修後の再劣化の事例であるが，再劣化の場合は当初の補修業者が対応するのか？

⇒再劣化した構造物を必ずしも当初施工した業者が調査・対策を行うとは限らないため，状況や情報の連続性はないのが実態である。

・事例 5 のボックスカルバートは，目立った損傷もなく鉄筋腐食も生じていないようだが，なぜ対策（電気防食工法）を行ったのか？

⇒塩化物イオン含有量試験を行った結果，多量の塩化物イオンの存在が認められたからである。ただし，ご指摘のように現状では鋼材は腐食していない状況であった。

・今回紹介頂いた種々の劣化事例に対して，本委員会で勉強している内容を反映して評価できるならば，対策方針は変わるのか？
⇒対策は不要という選択肢が出てくるものと思われる。また，対策工法は変わらずとも，その規模を減少させることはできるものと考えられる。
・性能劣化曲線を概念図として用いることがあるが，現状ではどの位置にいるのかさえ評価できていない。また，維持管理には時間軸の要素が入ってくるものであるが，残存耐用期間を明確に設定していないのが実態である。
・劣化予測には 2 種類あり，現状の劣化予測は大枠を決定するためのマネジメントの視点からの劣化予測である。それは膨大にストックされている構造物の維持管理コストを算出するための劣化予測であり，これは実コンクリート構造物に対する劣化予測とは別である。つまりはこうした 2 つの劣化予測の考え方が現状では混在して認識・使用されている。本委員会で議論していることは，現時点で劣化している構造物の性能が以後どのように変化していくのかといった視点での劣化予測に関わる技術である。
・現状行われている維持管理は「現時点における損傷（今の状態）を解決しなさい」という命題のもとで行われている。時間軸上のもう 1 点の情報があれば，種々のことが対策として提案できるというのが本来あるべきスタイルであると考えられる。
・構造物の経時的な性能の情報は，本来は管理者が保管すべきものであり，実務者が各構造物の劣化曲線を作成することは困難である。また，初期値が判らないため劣化曲線の傾き程度の情報しか得ることができない。マネジメント的な劣化予測と個々の構造物の劣化予測は別であると認識する必要がある。

②加藤委員からの話題提供
・トンネルおよび海上橋脚の劣化事例について説明があった。

以下に質疑応答の内容について記す。
・損傷の根本的な原因は何か？
⇒埋設型枠の目地である。本構造物で採用されている目地は，本州での使用には問題ないが，積雪寒冷地での使用には問題があったとの見解が得られている。また，施工不良による豆板（ジャンカ）も問題である。コンクリートの配合は不明であるが，二段配筋など鉄筋のあきが密な場合は流動性を高めることで豆板発生は防げる。埋設型枠であり，コンクリート表面が見えないため施工が粗雑だった可能性がある。

③和田委員からの話題提供
・塩害地域における橋梁の診断事例について説明があった。

以下に質疑応答の内容について記す。
・補修補強工法は数多く存在するが，全てにおいて検証されているわけではないため，同一路線における同一工法の採用にはリスクが伴うものと考えられる。あえて別の材料を採用して検証するといった議論はないのか？

⇒例えば含浸材であれば，寒地土研において意図的に種々の材料による試験施工等を実施しているため，こうした結果を踏まえて材料を提案している。

・表面塩化物イオン量を地域毎に設定するといった動きはないのか？

⇒現状ではない。しかし，近傍の橋梁群でも調査しているため，それらのデータを蓄積することで表面塩化物イオン量をデータベース化でき，地域毎の数値設定も可能であると思われる。なお，調査位置や部位によってデータのばらつきは大きいが，データを蓄積することで重みが出てくるはずである。

・塩害補修では約 6 割が再劣化しているという実態があるため注意を要する。山口幹事の保護塗装の劣化も最たる例であるが，劣化因子を閉じこめることで内部の塩化物イオンが再拡散して再劣化を起こす。また，北海道では凍害の問題もあるため，内部の水分を閉じこめることで再劣化が生じるケースが多いことにも注意が必要である。

７．非線形構造解析 WG からの報告

７．１　プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウムの発表報告

・坂本幹事（発表者関下委員の代理として）より，平成 23 年 10 月 13，14 日の 2 日間にわたって開催された第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウムでの発表報告があった。論文の内容は，一軸引張力を受ける RC 部材を対象として、コンクリートのひび割れや鉄筋のモデル化の組み合わせの相違が解析結果に与える影響について取りまとめたものである。なお，発表当日は会場から 2 件ほど質問があった。

７．２　コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウムの発表報告

・川口委員より，平成 23 年 9 月 16 日に開催されたコンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウムでの発表報告があった。本論文は，一軸引張力を受ける RC 部材を対象とし付着構成則の感度や妥当性について検討を行ったものである。

以下，論文の要点を示す。

①離散ひび割れモデルについて

・付着構成則に τ - s - ε 関係を適用し，かつコンクリートの引張強度のばらつきや付着喪失区間を考慮することで，実験結果を良好に再現可能である。

・付着構成則に τ - s 関係を適用し，かつ付着喪失区間を考慮しない場合には，最大付着応力を低減するとともに付着軟化域を考慮する必要がある。これは，最大付着応力を低減させることで付着劣化を模擬し，付着軟化域を考慮することによって鉄筋ひずみの増大に伴う付着応力の低下を模擬するためである。

②分散ひび割れモデルについて

・付着構成則に τ - s 関係を適用し，最大付着応力を低減させることで分散ひび割れモデルにおいてもひび割れの離散的な発生を模擬することができる。

・分散ひび割れモデルではひび割れが局所化せず部材全体に分散して発生するため，すべりが極大化する位置が表現できない。よって，付着構成則の検討と併せて，付着構成則の組合せに適用可能なコンクリートの引張構成則も検討する必要がある。

・名古屋大学の中村先生をはじめ，付着構成則を FEM で用いる場合には最大付着応力を低減させ，かつ付着軟化域を考慮している。今回の論文は，なぜ最大付着応力を低減させる必要があるのか，なぜ付着軟化域を考慮する必要があるのかを説明したものである。

７．３　付着モデルを用いた曲げ解析結果（その３）について

・宮本委員より，分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる RC 板の曲げ解析結果の概要について説明があった。

・コンクリート強度と降伏荷重の関係について，強度が低いケースの方が降伏荷重が高く評価されているが，これはなぜか？
⇒ひび割れ図などを確認して，次回委員会で改めて説明することとする。

８．「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」の担当者修正について

・塩原委員は第 11 回目担当，和田賢治委員は第 14 回目担当，加藤貴久委員は第 16 回目の担当とする。

９．北海道土木技術会コンクリート研究委員会への活動中間報告について

・小林幹事長より，親委員会へ提出した活動中間報告について説明があった。

１０．北海道土木技術会コンクリート研究委員会の講演会の開催について

・平成 24 年 1 月 31 日に，コンクリート研究委員会が主催の「コンクリート構造物の材料劣化と構造性能に関するフォーラム（仮称）」を開催することになった。

・日本大学の岩城先生に講演頂き，その後に関連テーマに関するパネルディスカッションを行うことになっている。

・岩城先生には，「東北発コンクリート構造物の長寿命化を目指した取り組み」という演題で講演頂く予定である。

・申込み時にパネルディスカッションで議論して欲しいテーマを募集するため，積極的な提案をお願いしたい。

・フォーラムへの参加および積極的な質疑をお願いしたい。

１１．その他

・佐藤委員長より，3 次元座標数値化技術の紹介があった。
例えば，凍害劣化した橋脚上梁をこのシステムを利用して 3 次元データを FE メッシュに取り込むことができないかと考えている。本委員会でも WG を作って検討できればよいと考えている。（実構造物で検証したい）

・次回委員会は，総会前の来年 4 月の開催予定とする。詳細については後日連絡することとする。

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 23 年度第 3 回委員会　議事録

日　　時：	平成 24 年 4 月 24 日(火)　15:00～17:30
場　　所：	北海道大学工学部（A101 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，山口幹事，坂本幹事，田中幹事， 宮本委員，坂口委員，~~関下委員~~，藤田委員，吉田委員，星野委員， ~~川口委員~~，吉永委員，~~中野委員~~，~~久保委員~~，和田(隆)委員，~~豊藏委員~~， 橋本委員，和田(賢)委員，加藤(剛)委員，~~佐藤委員~~，加藤貴博委員，塩原委員， 加藤貴久委員，亀海委員、戸塚委員、~~田口委員~~，林田委員 （敬称略，計 22 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料-1 ・平成 23 年度第 2 回委員会の議事録（案） ・材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その 6，7，PPT） ・平成 23 年度の活動報告および平成 24 年度の活動計画について ・DIANA（教育版）による平成 24 年度の検討方針について ・「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」のプレゼン担当者の修正について ・最新委員名簿 資料-2　付着モデルを用いた曲げ解析結果（その 4）・・・宮本委員作成

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった。

・先週，欧州の橋梁を視察してきた。現地の実情は，劣化の激しい橋梁が多く，補修も行われていたが，適切な処理が施されてないため再劣化しているものも多数見受けられた。世界的にも維持管理は重要な課題となっている。

２．新委員の紹介

・(株)シー・イー・サービス亀海委員，北海道キング設計(株)戸塚委員より自己紹介があった。また，花田委員の退会について報告があった。

３．平成 23 年度第 3 回委員会の議事録担当者について

・坂本幹事の担当とする。

４．前回委員会（平成 23 年度第 2 回委員会）議事録の確認

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた。

５．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その６，７）

橋本委員より，アルカリ骨材反応が生じたコンクリートの力学特性，付着・定着特性に着目した耐荷性能の評価，曲げ耐力およびせん断耐力について，発表報告を行った。

5.1　概説

・ASR に対する劣化指標として，実験においては直接的な表現である膨張量を用いているが，実構造物における膨張量の定量的な推定および評価方法は確立されていない。

・ASR が生じた構造物の構造性能評価は，採取コアの圧縮強度，弾性係数，鉄筋破断状況およびひび割れ状況から，鉄筋との付着性能を評価・判断して照査しているのが実情である。

・実験等で得られた知見を，直接的に構造性能評価に適用することが困難な状況にあるため，実構造物における劣化の定量的な評価手法や合理的な構造性能評価手法の確立が急務とされている。

5.2　コンクリートの力学特性

・ASR が生じたコンクリートの圧縮強度は膨張量が大きくなる程低下する傾向にある。

・RC 柱をモデル化した供試体では，柱上部に比べて柱下部の強度低下割合は小さいことから，拘束の違いが影響しているものと考えられる。

・ASR 劣化した RC 円柱供試体に対しては鋼板巻立て補強した場合には，水平方向と鉛直方向でコアの圧縮強度に大きな相違はないが，未補強の場合には大きな膨張が発生した水平方向の圧縮強度は鉛直方向よりもかなり低下する。

・鋼繊維を混入したコンクリートでは，圧縮に伴い鋼繊維が膨張を拘束するため圧縮強度が増加したケースもある。

・実構造物においては，膨張が圧縮強度に与える影響は鉄筋拘束により無拘束条件とは異なるため複雑となる。拘束条件下におけるコンクリート強度の検討を行なって明らかにする必要がある。

・弾性係数は膨張量が大きくなるほど影響が大きく，約 1/3 程度まで低下した報告事例もある。膨張は圧縮強度よりも弾性係数に与える影響の方が大きいものと考えられる。

・膨張が引張強度に与える影響に関しては，報告事例は国内では少なく，海外での事例が多い。なお，試験方法により値が異なるが，割裂試験よりも直接引張試験の方が強度低下は大きい。これは膨張により生じるひび割れは必ずしも均一ではないため，直接引張試験の方が最も弱い箇所において測定されるためである。

・膨張が付着強度に与える影響に関しては検討事例が少ない。

・膨張量が 1000～2000μの段階では鉄筋拘束によってひび割れによる損傷は軽減され，ケミカルプレストレス効果により付着強度は若干増加する。ただし，膨張量が 2000μを超えると大きなひび割れが生じて付着強度が低下する。

・海外の事例では，拘束のある場合や鉄筋径の 4 倍以上のかぶりがある場合には付着強度は影響を受けないとされ，拘束がない場合や鉄筋径の 1.5 倍以下の場合には 50%程度まで低下して割裂強度に比例するとされている。

5.3　付着・定着特性に着目した耐荷性能の評価

・せん断補強筋の定着不良区間が大きいほど，また *a*/*d* が大きいほどせん断耐力の低下割合は大きくなる。

・実構造物の鉄筋との付着・定着性能の定量的な評価方法は確立されていない。今後は実構造物における合理的な評価方法の確立，適切な付着・定着性能低下を考慮した実験および検討を行う必要がある。

・付着・定着性能が低下することで耐荷機構が移行することは実験や解析で確認されているが，実構造物に対する詳細な検討が必要である。

5.4　曲げ耐力

・劣化指標として膨張量を用いた実験が一般的である。一方，鉄筋破断が生じた構造物を想定した場合には，圧縮強度および弾性係数の低下をパラメータとした実験もある。

・最小鉄筋比以上の RC はりでは，コンクリート強度が低下しても曲げ耐力はほとんど低下しないが，一方で撓みや剛性は低下する。

・せん断補強筋の配置間隔が大きい RC はり供試体は，健全な供試体の破壊形式がせん断破壊であったのに対して，ASR が生じると曲げ破壊型に移行した。

・PC はりでは，せん断補強筋の引張ひずみが 1500 μ で多数の軸方向ひび割れが生じても曲げ耐力の低下は 10%程度であった。

・最小鉄筋比以下の RC はりでは膨張により鉄筋降伏が生じ，健全な供試体より曲げ耐力が低下し，鉄筋の破断により塑性域の変形が小さい段階で破壊が生じた。

・過大膨張を想定し ASR による劣化を気泡コンクリートで模擬した検討結果では，曲げ耐力の低下が認められた。ただし，気泡コンクリートによる ASR 劣化の再現性について今後の更なる検討が必要である。

・RC 円柱供試体の正負交番繰り返し載荷試験では，最大荷重は健全なものと同程度であるが，塑性変形性能やエネルギー吸収能は低下する。

・RC はりの正負交番繰り返し載荷試験では，最大耐力は若干小さくなり，ASR が生じた部材のじん性は低下する傾向にある。

・一軸圧縮試験による柱部材の耐力では，鉄筋拘束が適切であれば耐荷力に大きな影響は与えないとの報告があるが，変形性能への影響やポストピーク後の挙動に与える影響も懸念されているため今後の検討が必要である。

5.5　せん断耐力

・RC はりの一方向載荷試験によるせん断耐力で，*a*/*d* が大きい（3 程度）場合には影響は小さいが，破壊形態がせん断破壊から曲げ破壊へ移行したものもある。一方，*a*/*d* ＝ 1.5 の場合には，健全な供試体と比較して 67%程度までせん断耐力が低下した。

・RC はりの正負交番繰り返し載荷試験では，ある回数以後に健全なものよりわずかに小さな変位で終局に至る傾向が認められた。

・せん断破壊型の部材が ASR によって曲げ破壊型へ移行するケースが多く認められ，破壊形式の移行あるいは耐荷機構についての今後の検討が望まれる。

以下，議論に及んだ内容について整理する。

・RC はりでせん断補強筋間隔の大きいものについて，破壊形式がせん断破壊から曲げ破壊に移行するというメカニズムが理解しがたい。

⇒ASR によるひび割れが生じることでせん断ひび割れが入らず，せん断破壊しずらくなったのではないか？ただし，曲げ耐力が低下しているかは不明である。

・ASR が生じてもせん断補強筋の破断がない場合には，耐力低下しないのであれば特に問題にならないのではないか？

⇒鉄筋破断がなければ問題ないというのは過去の誤った判断である。一方向載荷はりの耐力に対しては，せん断補強筋の破断よりも主鉄筋の定着性能が重要であるということは，実験や解析でも明らかとなっている。また，正負交番を受ける部材で鉄筋破断時の検討は行われていないはずである。

・ひび割れはあらゆる方向に生じるため膨張に方向性はない。それは強度が方向により違うことを意味しており，膨張量だけで評価できないことを認識する必要がある。

・自由膨張に伴う圧縮強度や弾性係数の低下と，拘束によるケミカルプレストレス効果をどう考慮するのか？

⇒解析における考慮の方法については名古屋大学中村先生の発表論文が参考になる。

⇒ASR が生じると部材の剛性は小さくなるが，破壊エネルギーは健全部材に比べて大きくなる場合もある。凍害もそうであるが解析ではそうした視点も必要である。

・報告書にある鉄筋量やひび割れ幅等の数値はあくまでも参考値として捉えなければならない。それらは，対象とする構造物の大きさが違うと変わるものであり，数値に意味はなく構造性能の挙動を定性的に示すための参考値である。

・現時点の膨張量を計測できれば蓄積された知見を用いて評価できるのではないか？

⇒将来的には，解析上で膨張させた結果と実構造物のひび割れ性状を相関させることで可能になるはずである。そうなると，膨張量は劣化指標としては不要である。

⇒実構造物では膨張量に意味はなく，ASR が構造物にどういう損傷を与えるかが重要である。例えば，膨張量は少なくても致命的な部位にひび割れが生じることの方が問題であり，構造性能としてはどの部位がどういう損傷を受けるかが重要である。

６．平成 23 年度の活動報告および平成 24 年度の活動計画について

山口幹事より、今年度の活動報告と来年度の活動計画について説明があった。

・北海道土木技術会における委員会であり，活動費用も頂いていることから，そろそろアウトプットを意識した活動に移行していきたい。

・積雪寒冷地特有の劣化現象である「凍害」に着目し，凍害劣化が生じた部材あるいは構造物の構造性能評価マニュアル（仮称）の作成を目指したい。331 委員会報告書にも凍害に関する記載がないこともあり，実務者向けのマニュアルを作成できれば我々にとっても必ずプラスとなる。また，佐藤委員長の研究室や林田委員の研究成果もあることから，これらの成果を参考にしながら本委員会のなかで肉付けしていければよい。

・コンクリート維持管理小委員会では現在指針の改定作業中であることから，マニュアル作成にあたっては大いに参考になる。

・本委員会の活動意義や内容を広く紹介することにも力を入れていきたい。広報担当 WG を新たに設置し，例えば委員会 HP の作成等を考えていきたい。
・次回委員会までに，幹事団の方でマニュアル（案）の骨子とワーキンググループの構成を考えたい。それを踏まえて，次回委員会で今後の進め方を議論する。

７．DIANA（教育版）による平成 24 年度の検討方針について

坂口委員より、次年度の検討内容とスケジュールについて説明があった。

・詳細については，グループ長の関下委員と坂口委員の方から各担当者に具体的な作業内容とスケジュールを連絡することとする。
・非線形有限要素解析における種々のパラメータに対する感度解析が検討目的である。
・検討結果を取りまとめて，次年度の土木学会北海道支部等に投稿したい。

８．付着モデルを用いた曲げ解析結果（その４）について

宮本委員より、分散ひび割れ－離散鉄筋モデルによる RC 板の曲げ解析結果の概要について説明があった。

・付着が低いということはコンクリートの引張応力が下がり，ひび割れが入りづらくなるため，ひび割れ発生荷重が上がる可能性はある。
・材料劣化の実験結果でも健全部材に比べてひび割れ発生荷重が上がるケースはあり，鉄筋とコンクリートの付着劣化だけであれば同様の結果になるが，コンクリート強度も低下していれば，ひび割れ発生限界値も低下しているため耐力は下がる。
・荷重－変位曲線を見ることで，付着劣化なのか強度低下も生じているか想定することができる。

９．「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」の担当者修正について

・亀海委員は久保委員と共同で第 10 回目担当（構造性能のための計測技術①）、戸塚委員は塩原委員と共同で第 11 回目担当（構造性能のための計測技術②）とする。
・次回は第 8 回目（化学的侵食，和田委員担当）であるが，非線形構造解析ＷＧも今後材料劣化を扱っていくことになるため，第 14 回目（材料劣化を考慮した構造解析）と第 15 回目（非線形解析による鉄筋腐食の生じた構造物の構造性能評価）を先行して行えるよう検討する。

１０．その他

・次回委員会は，7 月頃に開催予定とする。詳細については調整した上で後日連絡することとする。

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 24 年度第 1 回委員会　議事録

日　　時：	平成 24 年 8 月 29 日(水)　14:30～17:30
場　　所：	北海道大学工学部（A151 会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，~~山口幹事~~，坂本幹事，~~田中幹事~~， 宮本委員，坂口委員，関下委員，藤田委員，~~吉田委員~~，星野委員， 川口委員，吉永委員，中野委員，~~久保委員~~，和田(隆)委員，豊蔵委員， 橋本委員，和田(賢)委員，~~加藤(剛)委員~~，佐藤委員，加藤貴博委員，塩原委員， 加藤貴久委員，亀海委員、戸塚委員、~~田口委員~~，林田委員 （敬称略，計 23 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料その 1　平成 23 年度第 3 回委員会の議事録（案） 資料その 2　平成 24 年度コンクリート研究委員会総会資料 資料その 3　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 8 回） 資料その 4　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 6 回補足） 資料その 5　コンクリート工学年次大会（2012）発表論文（林田委員） 「凍害劣化域の大きさと位置に着目した RC はり部材の破壊性状」 資料その 6　DIANA（教育版）による検討結果の中間報告 資料その 7　今後の委員会の進め方および執行体制について（案） 資料その 8　プレゼンの分担およびスケジュール（案）

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

２．本日の議事録作成担当の決定

・坂口委員の担当とする.

３．平成 23 年度第 3 回委員会議事録の確認

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明が行われ，承諾が得られた.

４．平成 24 年度の総会報告

・小林幹事長より，5 月 25 日に開催されたコンクリート研究委員会総会における当委員会の活動報告および平成 24 年度の活動計画について報告があった.（資料その 2）

５－１．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その８）

材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論の第 8 回目として，和田(隆)委員より，化学的侵食について発表を行った.

・化学的侵食とは，外部環境から供給される化学物質とコンクリートが化学反応を起こすことによって生じる劣化現象のことを言う，腐食性物質によっては，劣化速度が極めて速く，構造性能に及ぼす影響も大きい．
・化学的侵食は下水道関連・化学工場・温泉地の構造物において見られ，特に，下水道関連の事例が多い．また，化学的侵食は，コンクリートの断面欠損･強度･弾性係数の低下と，腐食性物質が鉄筋を錆びさせる２つに大別される．
・化学的侵食によるコンクリートの圧縮強度・曲げ強度・静弾性係数等の力学特性を評価した報告はあるが，劣化因子の侵入深さと力学特性とを関連付けたものは少ない．
・硫酸侵食を受けた RC 部材の曲げ耐荷性能の検討例として，3 段階の劣化レベルの供試体を用いた載荷試験により，曲げ耐力評価を行った事例が紹介された．実験結果から，劣化により，ひび割れ分散性がやや低下する傾向が見られたものの，荷重やじん性の顕著な低下は確認されなかった．これは鉄筋腐食が顕著ではなかったためと推察され，鉄筋が腐食していれば結果に影響を及ぼしたものと考えられる．
・化学的侵食における構造性能評価に関する検討はほとんどない．今後は，化学的侵食による劣化域の厚さ，鉄筋の機械的性質の低下，コンクリートの付着強度の低下が，耐荷性能や耐荷機構，破壊形式に及ぼす影響について検討していく必要がある．

以下，議論に及んだ内容について示す．
・化学的侵食の分類として，コンクリートが水に接することが化学的侵食として挙げられているが，条件として水が接することだけで化学的侵食にあたるのか？（PPT-2）
⇒一般的には，資料中スライド 2 の（1），（2）の分類までが良く記載されているが，コンクリートが水に接することでカルシュウムが溶脱するという意味では，広義には化学的侵食と考えられる．
・種々の鉄錆に対する膨張率等が示されているが，これは一般的な錆に対してのものであり，化学的侵食を対象としたものではないのではないか？（PPT-6）
⇒化学的侵食に対するものではない．これらは 1992 年の論文（コンクリート工学：腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討）から抜粋されたものであり，海岸に暴露した鉄筋コンクリート供試体に対するものである．ここに載せたのは，錆の種類等によって膨張率が変わることを示すためと考えられる．
・下水道施設等，化学的侵食が予測される構造物を設計するときには，かぶりを厚くする等の何かしらの対応はされているのか？
⇒下水道施設に対しては，コンクリート表面を塗装する等，表面保護工に関する規定がある．
・腐食鉄筋の機械的性質が異なるとあるが，試験等によって確認されたものか？（PPT-6）
⇒試験が行われているのではなく，こういうことが起こるのではないかという意味である．従って，試験結果に基づき構造計算に反映させるといった段階ではない．
・ここでいうコンクリートの軟化とはどういう意味か？（どういう状態か？）
⇒骨材は残っているが，モルタル分が軟らかく，ボソボソになっている状態である．古い下水処理施設だと断面が細くなっている事例もある．

５－２．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その６の補足）

豊蔵委員より，材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論の第 6 回の補足として，ASR を受けた構造物の構造性能評価に関する論文「コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価（土木学会論文集 E2, Vol.67, No.1,2011）」の紹介があった．

以下，議論に及んだ内容について示す．

・橋脚の解析はどの程度の信頼性があるのか等，実際に ASR を見ている人からは疑問に思われる．1,000 日で 5,000μと仮定しているが，現実の時間との関係はどうなのか？一手法として提案されている段階なので，時間との関係はこれからの課題である．

・膨張ひずみとして 1,000 日で 5,000μと仮定しているが，劣化指標として膨張量を直接与えずに膨張解析をするという意味か？それよりは，採取したコアから残留膨張量を計測して直接与えた方が良いのではないか？時間軸での評価が目的であれば理解できるが，ある時点の耐力等を予測するために膨張解析を行う必要があるのか？

⇒ASR では，配筋量，プレストレスの方向や量，境界条件によって膨張の度合いが変化する．よって，膨張解析を行って内部の損傷状況を予測して耐力の評価を行うべきである．ASR は，材料の問題でなくて構造の問題である．

⇒内部の損傷状態が現実と合致しているかを調べなければいけない．解析上で，コアを採取して圧縮試験を行うようなシミュレーションを実施し，実際のコアによる試験結果と比較することで溝が埋まってくる．現実には，コアを採取した時点で応力が解放されるので，解析の中でコアを採取する状態を再現できれば比較できる．

・ASR 対策としてひび割れ注入や表面被覆を行っているが，膨張を止められずに再劣化しているケースが多い．実際の業務ではどういった補修方法を提案しているのか？

⇒実態としては表面被覆等をして水分供給を遮断することで終わりとしている．しかし，コンクリート内部には水分が残っているので膨張を完全に止められない．また，表面含侵材を用いて内部の水分を排出できると言われているが検証が不十分である．

⇒近畿地整では ASR 対策としての表面被覆材料の試験がされていて，外部からの水分の侵入を防ぎつつ，内部の水分を外へ排出する材料が実用化されているようである．

⇒土木学会の ASR 委員会で指針を作成したときには，①鉄筋破断が生じるケースが多々あること，②鉄筋が破断してなければコンクリートが劣化していても耐力は低下しないこと，③これまで表面からの水の供給により劣化が生じると考えられていたが，コンクリート内部の水和せずに残った水で劣化が生じていることが分かった．よって，表面からの水の侵入を止めることで劣化を抑制できるという考えを変えていかなければ，再劣化の問題は解決しないものと考えられる．

・再劣化事例を集めることはできないか？再劣化が起こる根本的な問題はなにか？

⇒仕様を決めている事業者の問題である．コンサルタントは仕様を決めていない．基準を変えていかなければ解決しないと考えられる．

・補修の基準を北海道や札幌市は持っているのか？それは誰が作っているのか？

⇒持っている．通常は上位体系に習って作成されており，コンクリート標準示方書に標準的な補修方法が例示されているので，それに準拠している場合が多い．

⇒現場では，考えることはせず，単にマニュアル的に例示された補修方法を適用しているケースが多い．現実には，標準的な補修方法を不適切に適用して再劣化が生じているため，それを正す作業を行うべきだという認識を持つことはよいことである．

⇒進展期，加速期といったグレーディングには注意が必要であり，時間軸を正しく認識すべきである．現状ではグレードをあたかも均等に区分されていることで大きな誤解を招いている．

・ASR によってひび割れが生じたら問題なのか？

⇒ひび割れが生じても圧縮強度には影響しない．コンクリートに強度があり，鋼材が定着されていれば，ASR によってコンクリートが膨張しても耐荷力を保持するのは当然である．よって，ASR によって材料が劣化しても構造性能が低下するとは限らない．ただし，ひび割れから劣化因子が侵入しやすくなるため，劣化因子の侵入を遮断するための対策は必要になる．

⇒ひび割れは全て補修すればよいということではない．外的要因の影響の大小と，構造安全性に影響を与えるまでの時間とのバランスで補修の判断をすべきである．

⇒ひび割れ注入や表面被覆を行う場合には，その理由を明確にすべきである．また，力学性能に影響を及ぼすひび割れもあるので，それは補修しなければいけない．

６．コンクリート工学年次大会（2012）での発表報告（話題提供）

林田委員より，今年度の JCI 年次大会で論文発表した内容について話題提供があった．

・本論文は，凍結融解作用を受けた RC 部材の構造性能評価を目的として，凍害劣化域の大きさ（凍害深さ）を変数とした RC 梁の載荷実験を行ったものである．

・実験結果より，凍害劣化領域の位置や大きさの違いは RC 部材の最大荷重や変形性状，破壊形式に影響を与えることが明らかとなった．

・圧縮側に凍害劣化を受けた場合には，凍害深さの増大に伴って剛性勾配や最大荷重時の変位が低下し，破壊形式は斜め圧縮破壊に移行しやすくなることを確認した．一方，引張側に凍害劣化を受けた場合には，凍害深さが小さければ付着強度の低下によりタイドアーチ機構に移行して変形性能は向上するが，凍害深さが大きければタイドアーチ機構が形成される前に斜め引張破壊を起こす可能性があることを確認した．

・今後は，実験から確認された傾向を非線形 FEM 解析によっても検証する予定である．

７．DIANA（教育版）による検討結果の中間報告

関下委員より，DIANA の解析検討の中間報告があった．

・最終的に，パラメータ毎に「解析ケース」，「解析パラメータの定義」，「解析結果」，「解析結果における各種影響の考察」の項目に沿って整理することとし，現在各担当委員の方で取りまとめている状況である．

・荷重－変位曲線の整合性のみならず，載荷実験で確認されたひび割れの発生・進展状況やひずみの計測データを用いて鉄筋降伏の範囲等を把握し，実際の現象を再現できているかどうかを多角的に検証するのがよい．

・別途ミーティングを開催し，今後の進め方等について議論することとする．（10 月頃）

８．今後の委員会の進め方および執行体制の提案について

坂本幹事より，今後の委員会の進め方と執行体制について提案があった．

・今後は，「構造解析 WG」，「凍害評価 WG」，「普及啓発 WG」の 3 つの WG を設置して活動していきたい．

・構造解析 WG は，材料劣化が生じた部材への非線形 FEM 解析の適用性を検討し，かつ凍害評価 WG で作成を目指す「凍害劣化が生じた構造物の構造性能評価に関する参考資料（仮称）」における「数値解析による構造性能評価」の部分を担当する．

・凍害評価 WG は，上記参考資料の作成を最終目標として活動を行い，平成 26 年度中の完成を目指す．今年度は参考資料（案）の目次とアウトラインを作成した上で，サブワーキンググループの設置も検討する．

・普及啓発 WG は，実務者・管理者を対象として本委員会の活動意義や活動内容を広く紹介することを主目的として設置する．具体的には，委員会 HP の作成・運営・管理，講習会や出前講座，意見交換会等の企画・運営を行うことを計画している．

・各 WG の主査は，構造解析 WG は小林幹事長，凍害評価 WG は山口幹事，普及啓発 WG は坂本幹事を主査とする．なお，副査は主査が決定することとする．

・普及啓発に関連して，コンクリート研究委員会の現状の HP では効果的な情報発信ができていないと思われる．

・「凍害劣化が生じた構造物の構造性能評価に関する参考資料（仮称）」の作成にあたっては，凍害劣化による影響を構造性能の視点で整理していくこととする．

・今後は各 WG に分かれて精力的に活動を行っていくこととし，全体委員会は年に 3 回程度の開催とする．なお，WG 毎に委員会予算を配分してもよいので，会議室等で費用が生じた場合には幹事長に申し出ること．

９．その他

・今回設置した WG は，全委員から希望をとって割り振ることとする（後日，小林幹事長からメールを配信する）．なお，複数の WG に所属してもよいので積極的に参加して頂きたい．

・次回全体委員会は 12 月中旬頃の開催予定する．なお，全体委員会開催前に WG を開催して，各 WG の当面の進め方について話し合ってほしい．

・次回の「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論」は，第 9 回「性能評価を考慮した点検方法」と第 14 回「材料劣化を考慮した構造解析」とする．担当は，前者は佐藤委員と加藤貴博委員，後者，関下委員，坂口委員，和田(賢)委員とする．

・当委員会の HP の作成にあたっては，親委員会やインターネット小委員会との調整が必要となるため，坂本主査および和田委員に対応頂くこととする．

・星野委員，川口委員より，現在使用している DIANA（教育版）のライセンス有効期限が切れるため，最新版のインストールディスクとインストールマニュアルが配布された．（有効期限は平成 24 年 9 月 1 日から 1 年間である）

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 24 年度第 2 回委員会　議事録

日　　時：	平成 24 年 12 月 14 日(金)　14:30～17:30
場　　所：	株式会社開発工営社（会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，~~山口幹事~~，坂本幹事，~~田中幹事~~，宮本委員，坂口委員，関下委員，藤田委員，吉田委員，星野委員，~~川口委員~~，吉永委員，~~久保委員~~，和田(隆)委員，豊蔵委員，橋本委員，~~和田(賢)委員~~，~~加藤(剛)委員~~，佐藤委員，加藤貴博委員，塩原委員，~~加藤貴久委員~~，亀海委員，戸塚委員，田口委員，林田委員　（敬称略，計 21 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料その 1　平成 24 年度第 1 回委員会の議事録（案），各 WG の議事録（案） 資料その 2　親委員会に提出した活動中間報告 資料その 3　各 WG のメンバー構成一覧 資料その 4　WG1（構造解析 WG）の活動方針および当面の活動目標 資料その 5　WG2（凍害評価 WG）の活動方針および当面の活動目標 資料その 6　WG3（普及啓発 WG）の活動方針および当面の活動目標 資料その 7　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 8 回） 資料その 8　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 14 回） 資料その 9　プレゼンの分担およびスケジュール（案）について 資料その 10 最新の委員名簿（2012 年 9 月 21 日時点）

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった．

２．議事録作成担当の決定

・小林幹事長の担当とする．

３．前回委員会（平成 24 年度第 1 回委員会）および各 WG 議事録の確認（資料その 1）

・小林幹事長より議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた．

４．親委員会に提出した活動中間報告について（資料その 2）

・活動目的を，以下のとおりシンプルかつ明確に設定し直した．

「本委員会は，鉄筋コンクリートの本質的な挙動を知るとともに，材料劣化がコンクリート構造物の構造性能に及ぼす影響について，その評価を可能とする知識の習得と研究を通じて委員自身の技術力を向上させることを目的とする．加えて，劣化したコンクリート構造物の構造性能評価の重要性に関する啓蒙活動を行うことを目的とする．」

・日付にタイプミスがあるので修正のこと．

５．各 WG の活動基本方針について（資料その 3～その 6）

5.1　各 WG の執行体制について（資料その 3）

・各 WG の執行体制は以下のとおりとする．

WG1（構造解析 WG）：計 7 名　（主査：小林幹事長，副査：川口委員）

WG2（凍害評価 WG）：計 18 名（主査：山口幹事，副査：林田，塩原，加藤貴博委員）

WG3（普及啓発 WG）：計 6 名　（主査：坂本幹事，副査：和田(隆)委員）

5.2　WG1（構造解析 WG）の活動方針および当面の活動目標について（資料その 4）

・活動の基本方針としては，材料劣化が生じた RC 部材への非線形 FEM 解析の適用性を検討し，更にそれを実構造物に適用するための方法や課題等を整理・公表することとする．また，これまで実施してきた DIANA による検討成果を取りまとめ公表する．

・具体的な活動目標と方針は，以下のとおりとする．

①材料劣化が生じた RC 部材の構造性能評価に非線形 FEM 解析を適用した事例や研究成果等を収集・整理する．

⇒JSCE，JCI 等，他の委員会成果や論文を広く収集・整理し，分析を行う．

②「凍害劣化が生じた構造物の構造性能評価に関する参考資料(案)」の非線形 FEM 解析による構造性能評価に関する検討部分を担当する．

⇒凍害劣化が生じたコンクリートの材料構成モデルを構築するための検討を行い，最終的には構造性能評価を可能とする解析ツールを提案したい．

③DIANA (Teacher Edition) によるこれまでの解析的検討成果を取りまとめ，公表する．

⇒実務者向けの手引きの作成を意識して，新たな検討や考察を行った上で取りまとめを行う．実験結果と解析結果を比較する正しい方法も検討する必要があるため，荷重－変位関係の比較のみならず，別の指標（ひずみ等）も加えて検討を行う．また，過年度に実施した「せん断補強筋を有するせん断破壊型の RC 梁供試体」の載荷実験も解析対象に加えて，同様の検討を行う．

・スケジュールとしては，今年度は①および③に重点をおいた活動を行い，②は H25 年度より着手する．

以下，議論に及んだ事項および意見について記載する．

・①は，収集・整理した後の，その発信（公表）方法を事前に考えておく必要がある．

⇒①の目的は，材料劣化と非線形 FEM 解析をキーワードとした中で委員自身が勉強して，②の検討に活かすことである．一方で，分析した結果を公表することも有意義であると考えられるため，例えば A4-1 頁で論文調査シートとして整理することも検討する．（土木学会 343 委員会（コンクリート構造物のせん断力に対する設計法研究小委員会）の報告書等が参考になる．）

・WG2 の内容とも関連するが，なぜ非線形 FEM 解析が必要なのかを説明しないと誤解が生じる可能性がある．材料劣化が生じたコンクリート構造物を対象とした場合，既往のマクロ式を無理矢理に適用しても構造性能を評価できないということを明確に示しておく必要がある．

5.3　WG2（凍害評価 WG）の活動方針および当面の活動目標について（資料その 5）

・活動の基本方針としては，「凍害」に着目して，凍害劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価を評価可能な技術を発信することとする．

・具体的な活動目標としては，「凍害劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に関する参考資料（仮称）」を作成することとする．

・参考資料の構成としては，以下を想定している．

●第 1 章：凍害のメカニズムと劣化の形態

●第 2 章：構造性能を評価するための点検および調査手法

●第 3 章：凍害劣化を受けたコンクリートの劣化指標と力学特性について

●第 4 章：非線形解析による凍害劣化を受けたコンクリート構造物の構造性能評価

●第 5 章：実構造物に対する構造性能評価例

・WG2 は SWG に分かれて活動を行っていくこととし，以下の 3 つの SWG を設置する．

材料特性 SWG：第 1 章担当，　　点検・調査 SWG：第 2 章担当

性能評価 SWG：第 3 章，第 4 章担当　　※第 5 章は各 SWG で連携して執筆

・全体スケジュールとしては，今年度は目次構成とアウトラインを作成して骨子を固め参考文献等の収集整理も並行して行っていく．執筆作業や各種の詳細検討は H25 年度より着手し，H26 年度中に取りまとめることとする．H27 年度には第 5 章にあたる実構造物への適用性検討を行う計画とする．

以下，議論に及んだ事項および意見について記載する．

・既往成果の寄せ集めでは意味がない．既往成果にないものは研究すればよいので，実務の視点で研究すべきテーマを見出すようなスタンスで活動するのがよい．

・「コンクリートの凍害劣化」と「コンクリート構造物の凍害劣化」を常に意識しなければならない．例えば，第 1 章もコンクリートの劣化としての整理とコンクリート構造物としての劣化の整理が考えられるが，コンクリートがなぜ凍害劣化するかといった化学的メカニズムの記載は不要である．凍結融解作用を受けると劣化するというところからスタートして，構造体としての劣化を対象に整理していくのがよい．

・典型的な凍害劣化の写真を掲載するよりは，構造物の種類毎に示していくのがよい．つまり，同じ大きさで凍害劣化が生じたとしても，それがどの部位で生じるかは構造物毎に影響の度合いが異なるはずである．よって，どの構造物でどの部位に凍害劣化が起こっているのかをユーザーが意識できるように整理するのがよい．

・第 3 章では材料特性を把握することになるが，材料特性を把握することの意味を明確に記載しなければならない．つまり，本章で材料特性を必要とする理由は構造解析に用いるためである．材料特性を把握することで凍害劣化が全て評価できるという誤解をユーザーに与える可能性があるため注意が必要である．

・第 4 章では非線形有限要素解析に限定されている．適用範囲が限られるがマクロ式も含めた二本立てで整理するのがよい．これに関連して，第 2 章の点検および調査方法においても，最終的にどういった手法やツールを用いて構造性能を評価するかによって必要な情報が異なる．よって，第 2 章と第 4 章は連携した整理が必要である．

・一方で，どういう手法を使えるかといった調査も必要である．つまり，マクロ式で評価できるのか，有限要素解析で評価しなければならないのかを判断するための点検や調査も必要である．よって，目的を仕分けた上で第 2 章を議論するのがよい．
・第 5 章の実構造物に対するケーススタディーは非常に有意義で重要である．この例を作りつつ，第 1 章～第 4 章までを作り上げていくのがよいと思われる．
・各章に，凍害，凍害劣化，構造性能，劣化指標，力学特性といった用語が乱雑しており，曖昧さがタイトルに現れている．重要なのは構造性能という切り口なのであれば，用語を正しく明確に定義して，全員で共通認識を図れるようにすべきである．
・スタート時点では，既往の成果に拘らずに独自に考えて進めるのがよい．
・評価手法（マクロ式，非線形有限要素解析）に関しても，なぜ非線形有限要素解析で評価するのかの整理が必要である．現時点である種々の評価方法が成立しないが故に非線形解析を提案するのだと思われるが，非線形解析も万能ではなく成立しない領域もある．そのあたりの筋道を議論してから始めていくのがよい．
・実構造物に対するケーススタディーに関しては，配布資料にあるような具体的な事例をターゲットとして，現在我々は何が出来るのかを把握することが重要である．それを WG3 で公表するといった取り組みも必要かつ重要であると感じる．
・用語の定義に関連するが，本資料では安全・不安全といった記述が出てくるものと思われる．健全等，類似した用語もあるが，新しい用語を独自に定義してもよい．JCI では「構造安心率」という用語定義を検討中である．

5.4 WG3（普及啓発 WG）の活動方針および当面の活動目標について（資料その 6）

・活動の基本方針としては，本委員会における活動意義や活動内容を実務者や事業体の管理者等に広く紹介することとする．
・具体的な活動目標は，「委員会 HP の制作・運営・管理」および「講習会，出前講座，意見交換会の企画・運営」とする．
・出前講座は，地方自治体や地方実務者を対象として，維持管理全般をテーマとした開催を計画したい．
・インターネット小委員会と協議し，委員会 HP に関しては独自にサーバーをレンタルするのではなく，現在あるコンクリート研究委員会の HP を変更する形で行うこととした．
・当面のスケジュールとしては，今年度は先ず委員会 HP を立ち上げることを優先する．なお，普及啓発の方法については今後も継続して議論していくこととする．

以下，議論に及んだ事項および意見について記載する．

・コンクリート研究委員会のサーバーを使用するが，具体的に HP を制作するのは誰か？
⇒インターネット小委員会では専門業者に外注委託しているため，本委員会の HP も外注することになる．なお，HP のデザインに関しては予算内の範疇で希望を聞き入れてくれるようである．ただし，更新は我々自身で行う必要がある．
・詳細については佐藤委員長の方から，インターネット小委員会の委員長である北大の志村先生に確認頂くこととする．

・HP に掲載するコンテンツは何を想定しているか？
⇒詳細については今後であるが，委員会の活動主旨やメンバー，議事録等を想定している．これに加えて，種々の講習会等の情報もアップしたいと考えている．
・コンクリート維持管理小委員会との出前講座は，開催場所も含めて早めに企画するのがよい．土木学会コンクリート標準示方書の改訂講習会が H25 年度に開催予定であるため，これと抱き合わせで開催するのもよい．（コンクリート維持管理小委員会の指針案の改定も予定されている）

６．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その８）　（資料その 7）

佐藤委員，加藤貴博委員より，性能評価を考慮した点検方法について発表報告を行った。
・従来の検査方法は，主にコンクリート構造物の局部的な情報（内部欠陥，鉄筋位置等）の取得することを目的としており，材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能を評価する上での有益な情報とはなっていない．
・非破壊検査の活用事例が増えているが，非破壊検査は物理的なエネルギーを介在した間接的な手法であるため検査結果に不確実さを含んでいることに留意する必要がある．
・構造物の性能と点検項目という観点で，安全性（耐荷性能），使用性，耐久性を評価する上で必要となる点検項目を整理した．
・安全性（耐荷性能）に関しては，耐力（曲げ耐力・せん断耐力）および作用外力を評価するための点検項目が整理されている．（材料強度，鋼材量，外観変状等）
・使用性に関しては，振動性状，変形，防水性を評価するための点検項目が整理されている．（振動特性，たわみ，ひずみ，漏水等）
・耐久性に関しては，劣化外力，外観変状，コンクリートの性状，鋼材腐食を評価するための点検項目が整理されている．（環境，ひび割れ，塩分量，かぶり等）

以下，議論に及んだ内容について整理する．
・性能を定量的に評価できないから外観上のグレードから半定量的に評価するとあるが，外観だけで評価できるということは，実は非常に高度な技術力を必要とすることに留意する必要がある．
・構造物の性能と構造性能の違い等，用語の定義を明確にする必要がある．熟語にするためにはきちんとした定義が必要である．用語集として整理するのがよい．

７．その他

・材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 14 回：材料劣化を考慮した構造解析）は，次回委員会で行うこととする．（担当：関下委員，坂口委員，和田(賢)委員）
・日東建設の中野委員が退会されたため，委員名簿を更新した．（2012.9.21 時点）
・次回委員会は総会前に開催することとし，4 月中旬頃を予定とする．
ただし，今回の委員会での議論を踏まえ，次回委員会では更に具体的な議論を行う必要があるため，委員会の前にワーキングを開催することとする．

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 24 年度第 3 回委員会　議事録

日　　時：平成 25 年 5 月 22 日(水)　14:30～17:30

場　　所：株式会社開発工営社（会議室）

出 席 者：佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，坂本幹事，加藤貴博幹事，
林田委員，塩原委員，和田(隆)委員，川口委員，~~山口委員~~，田中委員，
宮本委員，坂口委員，関下委員，藤田委員，吉田委員，星野委員，吉永委員，
~~久保委員~~，豊蔵委員，~~橋本委員~~，~~和田(賢)委員~~，~~加藤(剛)委員~~，佐藤委員，
~~加藤貴久委員~~，亀海委員，戸塚委員，~~田口委員~~
（敬称略，計 21 名，取り消し線は欠席者）

配布資料：資料その 1　平成 24 年度第 2 回委員会の議事録（案），平成 24 年度第 2 回 WG の議事録（案），用語の定義（案），最新委員名簿，他
資料その 2　DIANA による検討結果の中間報告（曲げ No.1 供試体）
資料その 3　DIANA による検討結果の中間報告（せん断 No.3 供試体）
資料その 4　DIANA によるシミュレーション解析（せん断 No.3 供試体）
資料その 5　各種実験供試体のひずみゲージ貼付け位置に関する資料
資料その 6　WG1（構造解析 WG）の既往文献の収集・整理（中間報告）
資料その 7　WG1（構造解析 WG）の活動報告：「凍害劣化が生じた実構造物を対象とした構造性能評価に関する基礎的検討」
資料その 8　WG2（凍害評価 WG）の活動報告：「材料特性 SWG，点検・調査 SWG，性能評価 SWG の現段階の進捗状況と今後の作業」
資料その 9　WG3（普及啓発 WG）の活動報告
追加資料 1　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 14 回）

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

２．幹事および WG2 主査交代について

・山口幹事が人事異動により東京転勤となったため，今後は加藤貴博委員が幹事および WG2 主査を担当する.

３．平成 24 年度第 2 回委員会および WG の議事録の確認（資料その 1）

・小林幹事長より，議事録の内容について概要説明を行い，承諾が得られた.

４．平成 25 年度総会提出資料（案）の確認（資料その 1）

・小林幹事長より，5 月 31 日に開催されるコンクリート研究委員会総会での本小委員会の平成 24 年度活動報告および平成 25 年度活動計画について概要説明があった.

５．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（その 14）

関下委員，坂口委員より「材料劣化を考慮した構造解析」について発表報告を行った．

5.1　材料劣化が生じた構造物の性能評価における解析上の留意点について

・腐食した鉄筋のモデル化に関する留意点について，腐食した鉄筋の力学特性は質量減少率の増加に伴って低下するが，その割合は測定領域の減少率の平均値と最大値とでは大きく異なるため，解析で平均値を用いると耐力を過大評価する恐れがある．また，腐食した鉄筋を解析で扱う際には，弾性係数と降伏強度の低下に加え，特に伸び能力が低下することに注意する必要がある．これは，鉄筋が破断することによって，構造物の耐荷力低下やせん断破壊の発生等に至るためである．

・劣化したコンクリートのモデル化に関する留意点について，解析では一般にコンクリートを等方性材料としてモデル化するが，劣化は等方的に起こるとは限らず，凍結融解や ASR による膨張量および方向は鉄筋量や鉄筋の方向による影響を受ける．

・付着作用のモデル化に関する留意点について，鉄筋が腐食すると腐食ひび割れ発生による拘束効果の低下およびリブやフシの消失による機械的摩擦力の低下が起こり，付着力が消失する．一方，凍結融解や ASR によってコンクリートが劣化すると，コンクリートの強度および弾性係数が低下し，付着特性が低下する．このように，付着力が低下するとコンクリートに発生する応力分布が変化し，ひび割れ間隔が増加することにつながるため，材料劣化を扱う上では付着のモデル化が重要になる．

・劣化・損傷領域の設定に関する留意点について，材料劣化した構造物を解析する場合には劣化度の空間的分布を把握する必要がある。しかし，点検結果から空間的な劣化領域を設定するのは困難であるため，構造解析の視点に基づく点検項目や点検箇所の構築や劣化領域の空間分布そのものを予測できる解析手法の開発が望まれている．

・構造細目に関する留意点について，これまでに開発された各種構成モデルは鉄筋が十分に定着されている条件下で導いているため，たとえば鉄筋が破断したケースでは適用不可となる．したがって，構成モデルの前提条件に基づいて，材料劣化した構造物への構成モデルの適用性を判断しなければならない．

5.2　塩害による劣化が構造性能に及ぼす影響について

・鋼材腐食が RC 部材の耐荷性能に及ぼす影響を数値解析により評価するためには，「腐食による鉄筋の断面積の減少」，「腐食による鉄筋の降伏点や伸び性能の低下」，「腐食膨張に伴うコンクリートの劣化」，「腐食膨張による鉄筋とコンクリートの付着特性の変化」を考慮する必要がある．

・鋼材の付着力が大幅に低下した部材の耐力を評価する場合，①最大耐力時まで端部が定着されているかどうか，②鋼材とコンクリートの付着喪失による鋼材のアンボンド化が問題となる．端部定着に着目した実験では，腐食減量が 10%の場合の耐力低下はフックがある場合には10%程度であるが，フックがない場合には60%程度も低下する．

・鋼材のアンボンド化に関する実験では，意図的にある区間を鉄筋露出させた曲げ破壊型とせん断破壊型の供試体を対象に行われ，曲げ破壊型においては鉄筋露出区間がスパンの 20%以下であれば耐力の低下が見られない．一方，せん断破壊型では全ての鉄筋露出供試体の耐力が増加する傾向にあり，最大で 58%程度である．

・例えば，李らの引張鉄筋を腐食させた RC 梁の解析事例では，鉄筋腐食の影響を降伏点や弾性係数を腐食形態によって低下させる形で考慮しており，鉄筋とコンクリート間の付着特性の影響は付着剛性と付着強度の低下で考慮している．
・実際に行った数値解析による耐荷力評価では，破壊形態の異なる 2 種類の RC 梁を対象として鋼材腐食量や付着強度の変化等が耐荷性状に及ぼす影響を検討しており，解析手法には離散ひび割れモデルに代表される剛体バネモデルを用いている．本解析では，鉄筋腐食を質量減少率にしたがって鉄筋要素の断面積を低減させており，付着強度も質量減少率にしたがって低減している．ただし，コンクリート損傷は考慮していない．
・せん断破壊型 RC 梁の引張鉄筋のみを腐食させた解析では，質量減少率が大きくなると引張鉄筋の降伏荷重は低下するが，斜めひび割れの発達が遅れるため耐力低下時の変位が増大する．また，付着強度についても小さくなると耐力低下時の変位が増大する．一方，スターラップのみを腐食させた解析では，質量減少率が大きくなるとスターラップの降伏が早まるため耐力低下時の変位が減少する．また，付着強度についても小さくなると耐力低下時の変位が減少する．
・曲げ破壊型 RC 梁の引張鉄筋のみを腐食させた解析では，質量減少率が大きいと降伏荷重は低下するが，引張鉄筋比が小さくなるため圧縮破壊が起こりにくくなり耐力低下時の変位が増大する．また，付着強度は圧縮鉄筋および圧縮縁コンクリートが健全であるため最大耐力や変位に差が見られない．一方，全ての鉄筋を腐食させた解析では，圧縮鉄筋の腐食によりコンクリートの圧壊が早まり，引張鉄筋のみ腐食した場合に比べて最大耐力および耐力低下時の変位が小さくなる．
・解析では腐食による鉄筋の断面積の減少を一様に与えているのに対し，実際には鉄筋に沿って腐食量は非一様性を示している．平均質量減少率約 40%の供試体において，局所的な腐食率は約 80%に達し，この局所的な腐食が耐荷性状に大きな影響を及ぼす．
・鉄筋腐食の非一様性に対する検討を行った結果，質量減少率の最小値を 60%とした解析 A では，降伏荷重および最大荷重ともに質量減少率 60%で一様に腐食させた解析結果とほぼ同様となる傾向にある．一方，質量減少率の最小値を 80%とした解析 B と解析 C では，最大耐力比がほぼ一致して実験結果に近くなる傾向にある．よって，鉄筋腐食が生じた RC 梁の最大耐力は，破壊形式が変化しない場合には最大曲げモーメント位置での引張鉄筋の最小断面積によって決定されると考察されている．

以下，議論に及んだ内容について整理する．
・質量減少率〇%はどういう状態か？現在維持管理している実構造物の質量減少率は何%程度なのか？を具体的にイメージできることが重要である．
・実際に多く見られる鉄筋の腐食は質量減少率が数%であり，港湾構造物等は除いて質量減少率が 40%や 60%というのは実構造物としては有り得ない．すなわち，多くの実構造物における鉄筋腐食は，構成則にほとんど影響を与えない範疇にある．
・道路橋の質量減少率 10%は相当高い腐食量である．よって，設計マクロ式が適用できる範囲と有限要素解析が適用できる範囲を明確に区分する必要がある．
・後日，渡辺副委員長より，質量減少率毎の鉄筋の腐食事例を提供して頂く．

６．各ワーキンググループの進捗状況報告および当面の活動目標について

6.1　WG1（構造解析 WG）の中間報告

●DIANA による検討結果報告：曲げ（資料その 2，その 5）

・関下委員より，曲げ破壊型 RC 梁(No.1 供試体)に対する検討結果の概要説明があった．

・実験結果と比較する指標としては，荷重－変位関係，ひび割れ性状と進展，せん断補強鉄筋のひずみ，引張側主鉄筋のひずみ，鉄筋降伏領域の拡がり長さの 5 項目とした．

・荷重－変位関係の比較では，解析では変位 15mm 以降で荷重が低下する傾向にあるものの，解析結果と実験結果は概ね一致している．

・ひび割れの性状や進展の比較では，等曲げ区間およびせん断スパン内のひび割れの発生や進展，載荷点近傍での圧縮破壊が再現されており，それらの性状は概ね一致することが確認された．但し，せん断スパン内のひび割れに着目すると進展領域が異なっており，解析では実験ほどひび割れが進展していないことが確認された．

・せん断補強筋のひずみの比較では，解析では上段側 5 点（奇数のゲージ番号）のひずみが 50μ以下と実験結果と比較して小さいことが確認された．また，高さ方向に平均化した場合には，解析では上段側のひずみが小さいために高さ方向に平均化してもひずみは実験よりも小さく，ばらつきも大きい．ただし，平均化領域を大きくすると解析結果は実験結果に近づく傾向にあり，ばらつきも小さいことが確認された．

・引張側主鉄筋のひずみの比較では，平均化領域を大きくすると変位 5mm 近傍までは良く一致するが，それ以降では大きく異なる．特に，等曲げ区間のひずみでは実験のようにフラットになることなく，早い段階でひずみが上昇する傾向にある．解析結果が実験結果よりも小さい傾向にあることやフラット領域がない理由は，実験はある点の局所的な結果であるが，解析はある空間で平均化された材料構成則を適用しているため，得られるひずみも平均化されて実験結果よりも小さくなるためと考えられる．

・鉄筋降伏領域の拡がりの比較は，ひずみゲージを貼り付けていないため比較できない．

●DIANA による検討結果報告：せん断（資料その 3～その 5）

・川口委員・坂口委員より，せん断補強筋を有するせん断破壊型 RC 梁(No.3 供試体)に対する検討結果の概要説明があった．

・せん断補強鉄筋を RC 要素でモデル化すると，鉄筋比が小さいため平均応力－平均ひずみ関係における鉄筋の平均降伏強度の設定が困難であった．これを満足するために，An らの式からせん断補強筋に対して付着効果が作用するコンクリートの等価幅を算出し，この幅をせん断補強筋の RC 要素幅と設定して平均降伏強度を算出し解析を行った．

・荷重－変位関係の比較では，最大荷重は実験結果に対して 90%程度という結果が得られたものの，解析結果と実験結果は概ね一致している．

・ひび割れの性状や進展の比較では，曲げひび割れや斜めひび割れ，載荷点近傍での圧縮破壊が再現されており，ひび割れの性状は概ね一致することが確認された．

・せん断補強筋のひずみの比較では，実験では曲げ破壊型 RC 梁(No.1 供試体)と異なり，せん断補強筋が降伏することが確認されており，解析でも降伏することが確認された．

・引張側主鉄筋のひずみおよび鉄筋降伏領域の拡がりの比較では，せん断補強筋の降伏のみならず，斜めひび割れ発生後の引張側主鉄筋の降伏も再現されている．

以下，議論に及んだ内容について整理する．

・非線形解析ではベンチマークが重要であり，何をもって合っているのか，合っていないのかを整理して発信する必要がある（荷重－変位関係だけでは不足）．

・平均化構成則を適用しているのであれば，平均化して比較する必要があり，同時に平均化する領域を定めなければならない．なお，平均化する場合は要素の高さ方向で平均しなければならない．整理する方法の一つとしては，せん断力の変化と平均化する領域を明確にして比較を試みるのがよい．

・比較にあたっては，平均ひずみではなく平均応力で比較した方がよい．ひずみで比較すると影響が大きく出やすい．したがって，比較指標を平均応力で再整理し，別途 WG を開催して改めて議論することとする（佐藤委員長にも同席頂く）．

・せん断破壊型供試体（No.3 供試体）のモデル化は，無筋要素を設けず（An らの式を使用せず）に全体的に RC 要素としてモデル化するべきである．現状では無筋要素も引張力を負担するため，せん断補強筋の応力（ひずみ）の比較が難しい．また，鉄筋の平均降伏強度の設定が困難ということだが，島らの式のオリジナルはもっと複雑である．

●既往文献の収集・整理に関する中間報告（資料その 6）

・宮本委員より，文献のリストと文献調査シートのフォーマットについて概要説明があった．なお，収集した論文は全 30 編であり，現在 8 割程度が完了している状況である．

●凍害劣化した実構造物を対象とした基礎的検討（資料その 7）

・小林幹事長より，凍害劣化した橋脚に対する基礎的検討について概要説明があった．

・橋脚内部の状態を確認するために，断面を貫通するコンクリートコアを採取し，各深度で強度試験や超音波伝播速度計測等を行った．その結果，躯体表面より 15cm～20cm 程度（かぶりの約 2 倍）の範囲においてコンクリートの劣化が著しい結果が得られた．

・以上の調査結果を踏まえて，凍害劣化した場合の耐荷性能を把握することを目的として，汎用プログラム WCOMD による非線形 FEM 解析（一方向載荷解析）を試みた．

・解析の結果，コンクリートの劣化を考慮した場合には剛性・荷重ともに低下し，ひび割れの分散性も低下する．また，設計マクロ式と比較すると，降伏耐力は設計耐力よりも低下した．なお，橋軸直角方向モデルにおいては，橋軸方向モデルと同様に剛性・荷重ともに低下するものの，終局時の変位が劣化すると増加する結果が得られた．

・今後の課題としては，劣化程度によってはコンクリートの応力－ひずみ関係が大きく変化するため，これを表現可能な構成モデルを構築する必要がある．また，劣化の空間的なばらつきを考慮するためには 2 次元解析では限界があるため，解析手法のみならず解析に必要な情報を実構造物から得る方法やパラメータの検討が必要である．

・次のステップとして，正負交番載荷で解析してみる予定である．

6.2　WG2（凍害評価 WG）の中間報告（資料その 8）

・加藤主査，塩原副査，林田副査より，材料特性 SWG，点検・調査 SWG，性能評価 SWG の進捗状況と今後の活動内容について概要説明があった．

●材料特性 SWG の活動中間報告

・実構造物の凍害劣化事例については，各 SWG で収集・整理するのではなく，WG2 全体として収集することとする．（フォーマットは塩原副査が作成済み）なお，事例は経時的な変化が把握できるように過去の点検調書等を参考にして作成するのがよい．事例収集後，考察や解説を加えて最終形の帳票を完成させる計画とする．

・凍害に関連した各種文献を収集して文献リストを作成したため，今後は SWG 内のメンバーで手分けして精査していく予定である．なお，主要な参考文献は以下とする．

①凍害と耐久性設計研究委員会報告書，2008.10

②積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因委員会研究委員会報告書，2010.3

③北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案），2006.3

④凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案），2005.3

●点検・調査 SWG の活動中間報告

・構造性能を評価する上で必要となる点検および調査という視点で整理する．実構造物における空間的なばらつきの把握，調査手法，得られた値の取り扱い等を検討する．（例えば，シュミットハンマー等を用いて等高線のように劣化範囲を示す等）

・現時点における構造性能を評価する場合と将来的な構造性能を評価する場合とに区分し，コンクリートコアを採取する場合と採取しない場合の調査手法を検討する（例えば，表面走査法の活用等）．また，超音波伝播速度や相対動弾性係数と強度の関係や相対動弾性係数の予測の方法についても整理する（例えば，LECCA Ⅱの活用等）．

・非破壊試験としては表面走査法が有効であると考えられることから，今後 WG において寒地土木研究所の遠藤研究員を招いてレクチャーを受けることを計画している．

●性能評価 SWG の活動中間報告

・構造性能に関連した各種文献を収集して文献リストを作成した．今後は SWG 内のメンバーで手分けして精査していく予定である．主要な文献は JCI と土木学会としている．

6.3　WG3（普及啓発 WG）の中間報告（資料その 9）

・坂本幹事より，WG3 の進捗状況と今後の活動内容について概要説明があった．

・HP の制作は専門業者に委託しており，更新作業は我々で行えるようにマニュアルの作成等も依頼している．今後は，WG 内でレイアウト等を詰めていく予定である．

・設立趣旨と活動目的において，“・・・選択的な対策を実施できる「ルール」，それを使いこなせる「技術者」，そして「技術」が必要です．”を“・・・選択的な対策を実施できる「技術者」，そして「技術」が必要です．”に修正する．

7．その他

・吉田委員より，用語の定義（案）について概要説明があった．（資料その 1 の p.13）

・プレゼンテーションの次回テーマは，第 10 回「構造性能評価のための計測技術」とする．担当委員は，久保委員，亀海委員である．

・次回の全体委員会は，WG の開催をみて調整する．

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 25 年度第 1 回委員会　議事録

日　　時：平成 26 年 1 月 23 日(木)　14:30～17:30

場　　所：株式会社開発工営社（会議室）

出 席 者：佐藤委員長，~~渡辺副委員長~~，小林幹事長，~~坂本幹事~~，~~加藤貴博幹事~~，
林田委員，塩原委員，~~和田委員~~，川口委員，~~山口委員~~，~~田中委員~~，
宮本委員，坂口委員，関下委員，~~藤田委員~~，~~吉田委員~~，星野委員，
~~久保委員~~，~~橋本委員~~，中田委員，坂田委員，~~加藤剛委員~~，~~佐藤委員~~，
加藤貴久委員，亀海委員，戸塚委員，~~島多委員~~
（敬称略，計 14 名，取り消し線は欠席者）

配布資料：資料 1-1　平成 24 年度第 3 回委員会の議事録（案），平成 25 年度第 1 回・第 2 回 WG の議事録（案），中間報告書目次案，委員会名簿，他
資料 1-2　材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 10 回）
資料 1-3　DIANA による数値解析的検討の報告（せん断 No.3 供試体）
資料 1-4　WG1（構造解析 WG）の既往文献の収集・整理
資料 1-5　参考論文：圧縮領域のコンクリートの劣化が RC 部材の曲げ特性に及ぼす影響（坂本幹事，坂口委員，渡辺副委員長）
資料 1-6　WG3（普及啓発 WG）の活動報告

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった．

２．委員交代のお知らせについて

・(株)開発調査研究所の中田委員，(株)長大の坂田委員が前任の委員と交代になり，自己紹介が行われた．

３．平成 24 年度第 3 回委員会の議事録確認（資料 1-1）

・関下委員より，議事録の内容について概要説明を行い承諾が得られた．

４．親委員会に提出した活動中間報告について（資料 1-1）

・小林幹事長より，親委員会に提出した活動中間報告について概要説明があった．

５．材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論（第 10 回）（資料 1-2）

・亀海委員より，構造性能評価のための計測技術（性能評価に必要な情報と計測手法の時間軸上での整理）について発表報告が行われた．本報告では，「塩害」・「アルカリシリカ反応」・「床版疲労」に着目した計測技術がキーワードとなっている．

●塩害に着目した性能評価に必要な情報と計測手法の時間軸上での整理

・潜伏期・進展期・加速期・劣化期の各期間における劣化現象が構造物の性能に及ぼす影響は異なるため，劣化過程ごとに点検項目を設定することが重要である．

・非破壊試験に関しては，鋼材の腐食傾向や腐食速度は自然電位法等によってある程度の精度で評価が可能であるが，鋼材の断面減少については非破壊試験での評価が困難な状況にある．なお，鋼材の断面減少の把握は，はつり作業によってノギス等を用いた測定や 3D スキャン装置を用いた測定方法で行われるのが実情である．

・自然電位法，超音波法，電磁パルス法等の試験方法の内容について概要説明があった．

・塩害における劣化進行過程と点検方法との関係について説明があった．

●アルカリシリカ反応に着目した性能評価に必要な情報と計測手法の時間軸上での整理

・ASR による膨張が鋼材等によって拘束される場合には構造性能の低下は大きくないが，ひび割れによる鉄筋腐食の加速，過度の膨張によるひび割れ幅や密度の増大，鉄筋の損傷，はく離・はく落の発生等により，構造性能が大きく低下する可能性が高いことから，劣化過程ごとの適切な点検や調査による評価が重要となる．

・電磁波による検知方法，過流探傷法，電磁誘導法と超音波法の併用等の試験方法の内容について概要説明があった．また，非破壊検査法の ASR によって劣化した構造物の調査への適用性を検討した研究事例（3 つの事例）について概要説明があった．

・ASR における劣化進行過程と点検方法との関係について説明があった．

●床版疲労に着目した性能評価に必要な情報と計測手法の時間軸上での整理

・鉄筋コンクリート床版の疲労の主な原因，設計面や材料面での原因等について説明があった．床版の疲労は，これらの原因が複合して劣化が急激に進行するものである．

・床版の調査方法は，目視による外観変状の観察が主体であり，定期点検レベルでは目視以外に打音法等の簡易な非破壊手法が用いられることに現状は留まっている．

・RC 床版の劣化度評価は，ひび割れの幅や間隔，その方向など，定性的な情報により損傷ランクを判定することに留まっており，定量的な評価による事例は極めて少ない．なお，定量的に評価する上で有効な劣化指標値としては，①ひび割れ密度，②ひび割れ段差量，③たわみ・変位，④固有振動数が挙げられ，これらの概要説明が行われた．

・疲労による RC 床版の構造性能評価では，現時点における劣化過程を把握し，適切な劣化指標値を選定することが重要である．

・疲労による RC 床版の劣化進行過程と劣化指標値との関係について説明があった．

以下，議論に及んだ内容について整理する．

・超音波法による鋼材とコンクリートの付着力低下の評価方法において，超音波伝播速度と最大付着力比は比例関係にある．また，積算電流量が大きくなると，超音波伝播速度および最大付着力比ともに低下する傾向にある．

・電磁波による鋼材損傷の判定において，現状では鉄筋破断の検知は可能であるが，局所的な破断の判別は困難な状況にある．

・本報告書は，各種計測における測定の間隔や範囲等は明記されておらず，あくまでも色々な計測技術がある中で，ある目的に応じた時間軸（劣化進行過程）での有効となる計測手法の紹介という形で取りまとめられている．
・本小委員会では「凍害」をターゲットとしており，本報告書と同様に計測技術について整理しなければならない．ここで重要なのは構造性能の評価であり，構造性能を評価するために必要な計測技術は何かを明確にする必要がある．
・橋梁の床版は面であり，径間数も多いため計測する範囲が広い．橋梁全体としてどう評価するかというところで，実務ではコア削孔等の点での評価が現状となっており，構造物として評価するためには点での情報ではなく，劣化の拡がりを把握する必要があることから，多角的な視点で考えなければならない．
・計測技術に色々な課題がある中で，実際に計測して劣化範囲が把握できたらどう評価するのか？これを明確に回答できる技術者が少ない，だから非破壊試験の技術が進歩しないのである．構造性能を評価する技術者が，非破壊試験の開発者に情報を提供したり共有したりしないため，新技術が生まれず精度も向上しないのである．評価する技術者が，構造性能を評価するために必要な情報を発信していくことが重要である．

６．各 WG の進捗状況報告について

6.1　WG1（構造解析 WG）の中間報告

●数値解析的検討結果の中間報告：せん断（資料 1-3）

・坂口委員より，せん断破壊型 RC 梁（No.3）を対象とした検討結果の説明があった．
・本検討はせん断補強筋のモデル化の相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的に行ったものであり，前回の委員会や WG で再検討となった検討結果の報告である．
・本検討は，①せん断補強筋の配置領域，②せん断補強筋の降伏強度，③せん断補強筋降伏後の硬化係数，④コンクリートの引張側構成則を変数とした全 6 ケースで行った．
・①せん断補強筋の配置領域は，付着効果が作用するコンクリート面積に対応する幅を RC 要素とした場合とせん断スパン全域を RC 要素とした場合で検討を行った．
・②せん断補強筋の降伏強度は，低減させた平均降伏強度（164.19 N/mm^2）とした場合と鉄筋単体の降伏強度（360N/mm^2）とした場合で検討を行った．
・③せん断補強筋降伏後の硬化係数は，0.01×Es とした場合と 0.07×Es とした場合で検討を行った．ここで，硬化係数 0.07×Es は，平均降伏強度に達した後に，コンクリート標準示方書【設計編】のひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係の勾配に沿うように設定したものである．
・④コンクリートの引張側構成則は，せん断補強筋領域（RC 要素）のコンクリートの引張力負担分を考慮した場合（引張剛性）と無視した場合（引張軟化）で検討を行った．
・荷重－変位関係に着目すると，いずれのケースも最大荷重は実験結果に対して若干小さい傾向にあることを示した．また，全ケースとも荷重－変位関係に明瞭な差異は認められないことから，せん断補強筋の各種モデル化が最大荷重に与える影響は小さいものと判断される．なお，解析結果の最大荷重はマクロ式で算出した曲げ耐力 Vmu と一致することから，本供試体は曲げ破壊型のモードになっているものと考えられる．

・最大主ひずみコンター図およびベクトル図に着目すると，荷重－変位関係と同様に全ケースで明瞭な差異は認められなかった．本供試体は，密な間隔でせん断補強筋が配置されていたことから，モデル化の相違が与える影響が少なかったものと考えられる．
・領域内を平均化させたせん断補強鉄筋の応力に着目すると，鉄筋単体の降伏強度を設定した場合（Case3,4）で高い応力値が得られたものの，いずれのケースも実験結果と比較すれば小さい傾向にある．この要因として，解析結果がコンクリート内の平均応力として算出され，これをさらに領域内で平均しているためであるものと考えられる．
・領域内の最大値によるせん断補強鉄筋の応力に着目すると，鉄筋の降伏強度に平均降伏強度を用いた場合でも，降伏後の硬化係数を 0.07×Es に設定することで実験結果に近い応力値が得られることが確認された（Case2,6）．
・追加検討として，本供試体の引張側主鉄筋の降伏強度を 1,000 N/mm^2 に設定した解析を同様の検討ケースで行った．検討の結果，鉄筋の降伏強度に鉄筋単体を設定した場合（Case3,4）と平均降伏強度を用いて降伏後の硬化係数を 0.07×Es とした場合（Case2,6）の最大荷重が概ね一致することが確認された．

以下，議論に及んだ内容について整理する．
・せん断補強筋の応力が平均応力で算出され，さらに領域で平均しているから過小評価されているわけではなく，「ひび割れが発生している領域と発生していない領域を平均するから過小評価される」という考察が正しく，平均化する際にどういう領域を平均化して比較するかが重要である．
・「平均化する領域」に着目した解析と実験の比較において，これまでの検討結果から解析上の留意点等が明確になったため，今回の報告で一通りの検討は完了としてよい．後は，これまで行ってきた検討結果を整理して形にする．（HP にて公開してもよい）
・今後の検討材料として新しい供試体があるため，これを次なる解析対象として本小委員会で議論することとしたい．一つ目の供試体は，ネクスコ東日本の北海道支社から提供された解体した既設 RC 床版であり，これから北大にて載荷実験を予定している．二つ目の供試体は，寒地土木研究所で所有している壁高欄である．これら供試体は，劣化した RC 部材として最適であるため，今後の検討として計画していくものとする．

●既往文献の収集・整理に関する報告（資料 1-4）
・宮本委員より，関連する文献の収集・整理結果について説明があった．
・収集した論文は全 30 編であり，調査シートの体裁も概ね完了している状況である．これらは，年度内に取りまとめる中間報告書に取り込む予定である．

6.2　WG2（凍害評価 WG）の中間報告（資料 1-1）
・塩原副査より，H25 第 1 回の WG 議事録の内容および中間報告書の作成に向けた今後の活動内容について，説明があった．
・WG2 では，凍害マニュアル（参考資料）の作成に向けて活動を行っていたが，今年度は中間報告書（3.3 節）の作成に比重を置いて，各 SWG で活動していく方針である．

6.3　WG3（普及啓発 WG）の中間報告（資料 1-6）

・小林幹事長より，WG3 の進捗状況について概要説明があった．

・HP について，1 月中にはアップできる予定となっている．また，HP の中で問い合わせの対応ができるように，メールアドレスを個別に用意してもらえることになっている．但し，メールアドレスについては 1 月中での対応は困難となっている．

７．小委員会報告書（活動成果報告）の目次案について（資料 1-1，1-5）

・小林幹事長より，小委員会報告書の目次案について説明があり，本目次案については以下のような議論が行われた．

・報告書のタイトルを考えるのがよい．「中間報告書」ではなく，別途タイトルがあってもよい．小林幹事長を中心として考案することとする．

・目次案の「1 章_はじめに」は「序」に変更し，「2 章_本研究の背景」を「1 章_本研究の背景と目的」に変更することとする．以降，章番号は繰り上げとする．

・目次案の「3.3.4_構造性能を評価するための調査手法案」に関しては，目的をはっきりさせる必要があり，調査手法の提案という観点だけであれば内容が足りない．よって，中間報告書には無理に掲載する必要はないが，「3.3.3_点検調査および評価の現状と課題」に入れ込み，調査手法の概要や問題点という形で簡単に取りまとめてもよい．場合によっては，「1 章_本研究の背景と目的」で記載してもよい．

・坂口委員より，坂本幹事が H25 土木学会北海道支部に投稿した論文について概要説明があった．本論文は，凍害劣化を想定した圧縮領域のコンクリート劣化が RC 梁部材の曲げ特性に及ぼす影響について検討したものである．

・坂本幹事の論文や別途検討している林田委員の論文は，凍害を意識した論文でもあることから，目次案の「3.3.5_構造性能の評価事例と課題」に入れ込む予定である．

・小委員会報告書は，印刷および製本にも配慮し，次回全体委員会までに 8 割程度の完成を目指すこととする．

８．その他

・次回の全体委員会は，4 月下旬を予定とする．

・プレゼンテーションの次回テーマは，第 11 回「構造性能評価のための計測技術～塩害劣化を対象とした構造性能評価のための計測技術～」とする．担当委員は，塩原委員，戸塚委員である．なお，プレゼンテーションは次々回の全体委員会で行う予定とする．

以　上

北海道土木技術会　コンクリート研究委員会 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会
平成 25 年度第 2 回委員会　議事録

日　　時：	平成 26 年 4 月 28 日(月)　14:00～17:00
場　　所：	株式会社開発工営社（会議室）
出 席 者：	佐藤委員長，渡辺副委員長，小林幹事長，坂本幹事，加藤貴博幹事， ~~林田委員~~，塩原委員，和田委員，川口委員，~~山口委員~~，~~田中委員~~，宮本委員， 坂口委員，関下委員，藤田委員，~~吉田委員~~，星野委員，~~久保委員~~，橋本委員， 中田委員，坂田委員，~~加藤剛委員~~，佐藤委員，加藤貴久委員，亀海委員， 戸塚委員，島多委員　（敬称略，計 21 名，取り消し線は欠席者）
配布資料：	資料 2-1　議事次第，平成 25 年度第 1 回委員会の議事録(案)，総会提出資料，中間報告書の公開方法および提出期限について，講習会の開催について，プレゼンの分担およびスケジュール(案) 資料 2-2　中間報告書ドラフト①（表紙，委員構成，目次，第 1 章，第 4 章） 資料 2-3　中間報告書ドラフト②（第 2 章） 資料 2-4　第 2 章の補足資料 資料 2-5　中間報告書ドラフト③（第 3 章） 資料 2-6　活動報告会の会告案

議事内容：

１．委員長挨拶

・佐藤委員長より挨拶があった.

２．委員交代のお知らせ

・寒地土木研究所の島多委員より，自己紹介が行われた.

３．平成 25 年度第 1 回委員会の議事録確認（資料 2-1）

・関下委員より議事録の内容について説明があり，承認された.

４．コンクリート研究委員会の総会提出資料（資料 2-1）

・小林幹事長より総会に提出する資料（昨年度の活動報告および今年度の活動計画）について説明があり，承認された.

・HP には過去に投稿した論文や写真等も今後アップしていければよい.

５．中間報告書のドラフトに関する審議

5-1　表紙，序，委員構成，目次（資料 2-2）

・表紙は，「中間報告書」ではなく，キャッチコピーを入れた方がよいので再考する.
たとえば，「凍害の構造性能評価に向けて」等.

・「序」は，佐藤委員長に執筆して頂くこととする．
・「委員構成」は，委員会全体の名簿の他に，WG 構成（主査・副査含む）も追加する．
・「2.3_凍害劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価の現状」は，新たに章（第 4 章）を設けて記述するのがよい．

5-2　第 1 章_本委員会の活動の背景と目的（資料 2-2）

・章のタイトルは，「活動の背景と目的」でよい．
・本委員会の全体イメージが分かるようなフローを追加するのがよい．
非線形解析法の学習 ⇒ 材料劣化の現状調査 ⇒ 凍害のマニュアル作成といった全体の活動のフローを示した上で，今回の報告書で整理した部分を明確にするのがよい．

5-3　第 2 章_材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に関する現状技術（資料 2-3，2-4）

・用語の定義を追加するのがよい．
・「2.1_実験的事実の整理」のタイトルは，「実験的検討の整理」の方がよい．
・2.1 で「凍害に対する材料劣化の研究はほとんど行われていない」との記述があるが，凍害の材料劣化に対する研究は，逆に ASR や化学的侵食よりも行われているため，「凍害が構造性能に及ぼす影響に関する研究はほとんど行われていない」に修正すること．
・2.1 の記述が，現状の文章では数値解析ありきの印象を受ける．数値解析が目的ではなく，あくまでも構造性能を評価することが目的であり，数値解析はそのための一つのツールでしかない．このことを踏まえて，文章や組み立てを再考するのがよい．
「2.1_はじめに」があった方がよい．
・2.2 で示している文献調査リストは，別途，参考文献としても整理する必要がある．
また，参考文献の番号は，文献調査リスト表の整理番号と対応させるのがよい．
・文献調査シートの各シートに「担当者氏名」を記載しているが，これは削除した方がよい．また，備考欄にある「調査担当者のコメント等」も削除した方がよい．
・2.2 にある「材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート」は，付録にするのがよい．ただし，その場合には文献調査で得られた知見（課題や凍害を評価する際に反映できる知見の有無等）をまとめたものを，本文のなかで示す必要がある．
・資料 2-4 の補足資料「事例収集シート」は，報告書には掲載しないこととする．
・「2.3.2_凍害劣化の事例」で掲載している写真の取扱いには十分注意する必要がある．
損傷が著しい写真は掲載しない方がよい．ただし，補修済みの写真であれば許容される可能性があるため，写真提供者にヒアリングすること．
・2.3.2 の執筆担当者氏名は，削除するか委員長名とした方がよい．
・「2.3.3_点検における調査の現状と課題」の本文で，「劣化した範囲」は「劣化した領域または部位」，「劣化した深さ」は「劣化した範囲（深さ）」にした方がよい．
・2.3.3 の「2）点検における調査の課題」では，現状で行われている調査自体の課題（点検者によってバラツキが多い等）と，構造性能評価の視点に立ったときの調査の課題を，明確に区分して整理するのがよい．

・「2.3.4_構造性能の評価事例と課題」は，論文そのものの記述になっているため，検討を試みた背景や結果等についてコンパクトにまとめるのがよい.
・2.3.4 では 2 つの事例を示しているが，後者は簡易な方法を用いてどういう構造性能に影響を与えているかを示すために検討したもので，前者は詳細な方法で検討した事例を示したものである．よって，この 2 つの事例を単に並列に整理するのではなく，検討の目的や思想等を明確に記述するのがよい.
・「2.3.4_構造性能の評価事例と課題」は「2.3.4_構造性能の検討事例」とした方がよい.
(1)と(2)のタイトルも「・・・を対象とした構造性能の検討事例」とした方がよい.
・「2.3.5_今後の課題」では，現状の記述は細部の課題になっている．①点検，②点検結果に基づいた性能評価，③対策（補修）の要否判定，④対策（補修）という大きな流れの中での課題を，構造性能評価の視点に立った課題として整理するのがよい.
・「2.3.5_今後の課題」は「第 4 章_本委員会の今後の取り組み」と対応させるのがよい.
・全体的に数値解析に偏り過ぎているという印象を受ける．また，凍害で劣化したコンクリートの材料構成モデルが本委員会で作れるのかという不安もある.
本来の目的は，劣化したコンクリート構造物の凍害を中心にした構造性能評価である．診断では雨天の回数や温度分布等といった「入力」を調べる方が将来予測では重要であるため，構造物を診断するのに必要な「入力」や「応答」についても今後検討していかなければならない．これも今後の課題として示さなければならない.
・数値解析や構造性能の評価は「抵抗」のイメージが強いが，構造物は「入力(Load)」，「応答(Response)」,「抵抗(Resistance)」であるため，「抵抗」だけ分かっても意味がないことに留意する必要がある.

5-4　第 3 章_非線形有限要素法による RC 部材の数値解析的検討（資料 2-5）

・「3.1_はじめに」では，どういう目的のもとでどういう検討を行ってきたかをフロー等で示すのがよい．これまで本委員会で行ってきた検討は，研究者の視点での非線形解析ではなく，基礎的な知識の習得と非線形解析を実施する際の問題や課題の抽出である．よって，RC 梁の載荷実験を行った目的も含めて，現在に至るまでの経緯を正直に書き示すのがよく，出来るだけ平易，かつシンプルに記述するのがよい.
・全体的なまとめの節を設けるのがよい．また，各項のまとめは箇条書きの方がよい.
・以前に整理した「用語の定義」を追加するのがよい.
・現状の「3.1_はじめに」に記述している内容は，全体的なまとめの節で示すのがよい.

5-5　第 4 章_本委員会の今後の取り組みについて（資料 2-2）

・タイトルは,「今後の取り組みについて」の方がよい.

5-6　付　録

・付録－1 の「材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論に用いた資料集」は，今回の報告書には含めないこととする．報告書とは別に，HP にアップしてダウンロードできるようにすればよい.

・2.2 の「材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査シート」は付録とする．

5-7　その他

・参考文献は，節毎ではなく「章毎」に整理するのがよい．
・他の文献等から文章をそのまま引用する場合は，カギ括弧（「○○○」）を使用する等の配慮が必要である．
・「凍害劣化」という表現は，「凍害で劣化した・・・」といった表現にした方がよい．
・「2.3.3_点検における調査の現状と課題」の「2）点検における調査の課題」の本文にある半角英数字のフォントは Times New Roman に修正すること．
・2.3.3 の p.58 の本文にある“　”は，「　」にした方がよい．
・2.3.3 の p.64 の図 2.3.17 を例として掲載するのであれば，劣化した深さとみなした範囲を示した方がよい．
・第 3 章の以下に示すページの文章は「両端揃え」に修正すること．また，表中の文字のフォントサイズは 10pt 以下にするのがよい．
　両端揃え：p.18，19，25～30，63

６．報告書の公開方法および提出期限について（資料 2-1）

・現在作成している報告書は，小委員会の HP に掲載することとする．
・5 月 30 日の総会の段階で，HP 上で閲覧できる状態としたい．よって，HP にアップする作業時間を考慮して，5 月 23 日までに最終原稿を仕上げることを目標とする．

７．土木学会北海道支部との合同講習会について（資料 2-1）

・コンクリート標準示方書［維持管理編］の発刊に伴う講習会が北見市と函館市で開催することになり，講習会の第 2 部で本小委員会の活動報告会を行うこととなった．
・プログラムおよび担当講師は，以下のとおりとする．（委員会の翌日に決定）

開会挨拶	（ 5 分）	佐藤委員長
委員会の活動概要	（25 分）	坂本幹事
中間報告書の概要	（40 分）	坂口委員（北見会場），関下委員（函館会場）
今後の取り組み	（20 分）	小林幹事長

８．その他（資料 2-1）

・次回の全体委員会は，総会後の 6 月頃の開催予定とする．
・プレゼンの次回テーマは第 11 回「構造性能評価のための計測技術～塩害劣化を対象とした構造性能評価のための計測技術～」とし，担当委員は塩原委員と戸塚委員とする．

以　上