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 29 年 12 月

北海道土木技術会

コンクリート研究委員会

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.この委員会報告書からは、そのようなレベルからスタートし たこと痕跡は見つけることは難しい.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.ここに、本報告書の執筆に携わった幹事と委員の全員に衷心より御礼申し上げる.

この報告書に示される情報や技術が,実務において活用される時代,すなわち,技術者が高度 な技術を武器として社会に貢献できる時代が近い将来到来することを切に願っている.

平成 29 年 11 月 20 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	岡山	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
		柴田	知子	株式会社ドーコン
		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	北武コンサルタント株式会社
		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
		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
		竹下考	全一郎	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
		山口	雅史	ショーボンド建設株式会社
		吉永	文彦	札幌市建設局
		吉田	安寿	株式会社ドーコン
		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	北武コンサルタント株式会社
		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	岡川	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
		柴田	知子	株式会社ドーコン
		関下	裕太	北武コンサルタント株式会社
		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	杳	坂本	智明	北武コンサルタント株式会社
副	查	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

	-
- 1	₹
1	-Ť-
•	

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	はし	こめに	2
2.2	用言	吾の定義	3
2.3	材料	斗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	斗劣化を考慮した非線形解析法の適用事例の整理	6
2.5	おオ	っりに	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	はし	こめに	12
3.2	用言	吾の定義	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	分散ひび割れー離散鉄筋モデルによる検討	42
3.	5.5	離散ひび割れー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	おれ	っりに	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技術… 83

4.1 (20)(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	
4.3 凍害による劣化現象の事例	
4.4 点検における調査の現状	
4.5 構造性能評価に関する検討事例	
4.6 今後の課題	
4.7 おわりに	

付録

付録-1:材料劣化を考	き慮した非線形構造解	析に関する文献調査シ	イート 付-1	-1
付録-2:投稿論文集				-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、先ず鋼材の腐食やコンクリートの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高度な構造解析技術が必要不可 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.

また、本委員会では、積雪寒冷地特有の環境作用である凍結融解作用に焦点を当てて、 凍害によって劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価法の構築に向けた基礎的な 検討を行った.

【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、せん断ひずみーせん断応力関係の変化
- ・付着パラメータによる制御(分散ひび割れー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.

整理番号	区分	文献題名	年次	出典先	種別
1		鉄筋筋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	響文
3		有限要素法による鉄筋の腐食したRC菜の耐力性能評価	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	識
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	響文
9	EN	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	圏内	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	響文
8	廢仓	鉄筋筋食を考慮したRCはり部材のせん断耐荷性能評価	2003	JCI	識
6	Ŕ	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	響文
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	響文
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	識 文
15	ł	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	足着	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	Ϋ́	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	П	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	71	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	1) =)	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	- 4	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	- 紀:	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	7	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		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へ設計と照査の現状と将来展望~	2005	JSCE	委員会報告書
27	Ч	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	名	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へ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 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

※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構造解析技術の確立に向けた検討が期待される.

なお、本委員会では凍害で劣化したコンクリート構造物の構造性能評価に焦点を当て、 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.

- 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.
- 31)前島拓,子田康弘,土屋智史,岩城一郎:塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労 性に及ぼす影響,土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.208-225, 2014.
- 32) 青木圭一,渡邉晋也,三加崇,宮永憲一,睦好宏史:供用後40年経過したPC桁の性状から推定されるPC桁の性能評価,土木学会論文集E2, Vol.71, No.3, pp.283-302, 2015.
- 33) 武田健太,田中泰司,下村匠,山口貴幸,陸 賢,井林康,村上祐貴:塩害劣化したプレ テンション式 PC 桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討,土木学会論文集 E2, Vol.71, No.4, pp.303-322, 2015.
- 34) 宮村正樹,内藤英樹,中野聡,門万寿男,岩城一郎,鈴木基行:厳しい塩害環境において 架替え後15年が経過したPC道路橋の構造性能評価に関する研究,土木学会論文集E2, Vol.72, No.2, pp.41-55, 2016.
- 35) 既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014, 公益社団法人日本コンクリート工学協会 2014.
- 36) 土木学会:材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342 委員会)委員会報告書およびシンポジウム講演概要集,コンクリート技術シリーズ, No.98, 2012.
- 37) 土木学会:材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342 委員会(第2期))委員会報告書,コンクリート技術シリーズ,No.110, 2015.

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評価法の 構築を目指し、その1つの手段として、非線形有限要素解析による構造解析技術の活用を 想定している.

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--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--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--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-すべり関係が導入される.なお,付着応力-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

応カ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

応カ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-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--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) 荷重增分法

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) 変位增分法

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3.3.3 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.

20.5.1 コンソリードの権	1 4 1 1 1 工
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	23.1
せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体	35.7

表 3.3.1 コンクリートの材料特性

鉄筋	ヤング係数	降伏強度	
径	(kN/mm^2)	(N/mm^2)	加方
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

表 3.3.2 鉄筋の材料特性

(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 3.3.7 支承

写真 3.3.6 載荷試験機

写真3.3.8 二点集中荷重の載荷方法



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100kN: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110kN : 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.



(3) 載荷点荷重ー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) 鉄筋ひずみースパン中央変位関係

軸方向鉄筋の鉄筋ひずみー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 ずみー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一変位関係において、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.



図 3.3.12 軸方向鉄筋のひずみースパン中央変位関係



図 3.3.13 せん断補強鉄筋のひずみー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.






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.

(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.

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	コンクリート:平面応力要素	平面応力要素		
	鉄筋:埋め込み鉄筋要素	鉄筋:トラス要素	(鉄筋コンクリート(RC)要素)		
培思冬州	対称軸:水平方向変位成分拘束	対称軸:水平方向変位成分拘束	対称軸:水平方向変位成分拘束		
現外禾件	支点部:鉛直方向変位成分拘束	支点部:鉛直方向変位成分拘束	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	分散ひび割れモデル	分散ひび割れモデル	分散ひび割れモデル		
モデル	(固定ひび割れモデル)	(固定ひび割れモデル)	(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		

表 3.4.1 各解析者が適用した解析手法の仕様一覧

(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 - 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.



図 3.4.6 コンクリートの応カーひずみ関係(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



(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



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、分散ひび割れー分散鉄筋、分散ひび割れー離散鉄筋、離散ひび 割れー離散鉄筋の 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分散ひび割れー分散鉄筋モデル、②分散ひび割れー離散鉄筋モデル、③離散ひび割れー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.





表 3.5.1 コンクリートおよび鉄筋の力字的特性値(左表:コンク	ノート.	右表:鉄筋)
------------------------------------	------	--------

圧縮強度	引張強度	弾性係数	オマリント	みたちない文	降伏強度	弾性係数	ポマリント	
(MPa)	(MPa)	(GPa)	ホノノンに	<u></u>	(MPa)	(GPa)	ホノノン比	
45.0	2.9	30.0	0.2	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、分散ひび割れー分散鉄筋モデルには WCOMD を、分 散ひび割れー離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れー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、分散ひび割れー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 割れー離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れー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) 分散ひび割れー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。



(2) 分散ひび割れー離散鉄筋の解析モデル

図3.5.5には、分散ひび割れー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, *t-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 分散ひび割れー離散鉄筋モデルの要素分割図

$$\tau = \frac{0.73 f'_{c} (\ln(1+5\cdot1000s))^{3}}{(1+\varepsilon\times10^{5})}$$
(\$\pi\$ 3.5.1)
$$\tau = \alpha \cdot 0.9 f'_{c}^{\frac{2}{3}} (1-e^{-40s^{0.6}})$$
(\$\pi\$ 3.5.2)

 τ : 付着応力(N/mm²) f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²) 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) 離散ひび割れー離散鉄筋の解析モデル

図3.5.7には、離散ひび割れー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/mm²(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、 分散ひび割れー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.







2.5D 2.5D

離散鉄筋要素

3.5.3 分散ひび割れー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、分散ひび割れー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。



図 3.5.10 分散ひび割れー分散鉄筋モデルにおける荷重ー変位関係の比較

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.



(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 *a*=0.8 の場合では 10 箇所,*a*=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 離散ひび割れー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、分散ひび割れー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, *c*-*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 *c*-*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 ε -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 a=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 a=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 a=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 *z*-*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.

- ・分散ひび割れー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。
- ・分散ひび割れー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.
- ・離散ひび割れー離散鉄筋モデルに関しては、付着モデルに *c*-*s*-*e* 関係と *c*-*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 *c*-*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 3.6.3 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、分散ひび割れー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.

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 3.6.1 形状のモデル化

表 3.6.2 材料のモデル化

材 料	項目	概要	
	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	
		【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	
1999-r	引張軟化曲線	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	
	降伏条件	Von Mises 基準	
<i>ጽ</i> ₩- <u>/</u>	雄代エジル	降伏棚を無視したバイリニアモデル (コンクリート中	
<u> </u>	伸成モノル	の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係)	
	硬化係数	$0.01 \times E_{\rm s}$	
載荷板・支点板	構成モデル	線形弾性モデル ($E = 2.0 \times 10^5$ N/mm ² , $\nu = 0.30$)	

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		
不可能 もの 持ち 北口	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		
小平側刀の村ら越し	次ステップに持ち越して計算を継続		

表 3.6.3 応答解析の設定

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.



図 3.6.4 コンクリートの応力--ひずみ関係



図 3.6.5 鉄筋の応カーひずみ関係

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.

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するのに対して、回転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 カー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3.6.7 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

△ 支持位置



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

衣5.5.4 コンノリードの材料付任					
項目	材料 A	材料 B	備考		
压縮強度f _c (N/mm ²)	25.7	35.7	圧縮試験結果		
ヤング係数 $E_{\rm c}$ (kN/mm ²)	25.9	29.7	示方書 1)		
引張強度 ft (N/mm ²)	2.0	2.49	示方書式 1)から算定		
ポアソン比 v	0.2	0.2	示方書 1)		
引張破壊エネルギー $G_{\rm F}$ (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		

表 3.6.4 コンクリートの材料特性

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

			ヤング	降伏強度	平均降伏
供試体	鉄筋	径	係数 Es	$f_{ m sy}$	強度 <i>f</i> sy
			(kN/mm ²)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
	引張側軸方向鉄筋	D16	177	356.0	331.25
曲げ破壊型	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	236.10
供試体	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	引張側軸方向鉄筋	D22	187	361.0	348.28
の無いせん断	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	236.10
破壞型供試体	せん断補強鉄筋(支点外側)	D10	179	355.0	255.67
	引張側軸方向鉄筋	D22	187	361.0	343.33
せん断補強鉄筋	圧縮側軸方向鉄筋	D10	179	355.0	166.02
を有す る せん 断	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

表 3.6.5 鉄筋の材料特性

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-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.











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 3.6.13 せん断補強鉄筋の応カー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







(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.

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		圧縮強度からの推定値の70%
CASE1-04	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80%
CASE1-05		圧縮強度からの推定値の90%
CASE1-06		$\beta = 0.001$
CASE1-07	H / 断開時代は反称 Q の影響	$\beta = 0.010$
CASE1-08	しん町町住仏成示数 p の影音	$\beta = 0.050$
CASE1-09		$\beta = 0.100$
CASE1-10		2 次勾配 E'=0.001 Es
CASE1-11	鉄筋の2次勾配の影響	2 次勾配 E'=0.050 Es
CASE1-12		2 次勾配 E'=0.100 Es
CASE1-13	西来の竿価長さの影響	等価長さ=要素面積の平方根 1/2 倍
CASE1-14	安糸の寺恤長さの影音	等価長さ=要素面積の平方根の2倍
CASE1-15		0.01mm / Step
CASE1-16	変位増分量の影響	0.10mm / Step
CASE1-17		0.50mm / Step

表 3.6.6 検討ケース一覧

- ・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3.6.21 より,鉄筋の2次勾配は,軸方向鉄筋が降伏する載荷荷重140kN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.





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5mm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 3.6.28 軸方向鉄筋の応カー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.

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		圧縮強度からの推定値の70%		
CASE2-04	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80%		
CASE2-05		圧縮強度からの推定値の90%		
CASE2-06		$\beta = 0.001$		
CASE2-07	いより唯国山外に対応来りの思潮	$\beta = 0.010$		
CASE2-08	でんめ剛性仏滅休数 5 の影響	$\beta = 0.050$		
CASE2-09		$\beta = 0.100$		
CASE2-10		2 次勾配 E'=0.001 Es		
CASE2-11	鉄筋の2次勾配の影響	2 次勾配 E'=0.050 Es		
CASE2-12		2 次勾配 E'=0.100 Es		
CASE2-13	亜圭の筮江目さの影響	等価長さ=要素面積の平方根 1/2 倍		
CASE2-14	安糸の寺恤文さの影音	等価長さ=要素面積の平方根の2倍		
CASE2-15		0.01mm / Step		
CASE2-16	変位増分量の影響	0.10mm / Step		
CASE2-17		0.50mm / Step		

表 3.6.7 検討ケース一覧
- ・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3.6.33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5mm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 3.6.40 せん断補強鉄筋の応カー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.













- (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

	①せん断補強鉄筋		②せん断補強鉄筋		③コンクリート		
	の配置領域		降伏後の硬化係数		の引張側構成則		
	ゾーニング	一様	$0.01 \times E_{\rm s}$	$0.07 \times E_{\rm s}$	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	

表 3.6.8 検討ケース

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)).



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.

- ・<u>鉄筋単体(図中の黒線)</u>: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/mm²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.
- ・<u>平均応力-平均ひずみ関係(図中の赤線)</u>: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。
- ・<u>解析モデルの材料構成則(図中の青線および緑線)</u>: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.



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カー平均ひずみ関係



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

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)).



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 荷重一変位関係

	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	曲げ耐力 V _{mu}	1.01	1.03	1.01	1.01	264.8
	せん断耐力 <i>V</i> y	1.27	1.29	1.26	1.27	211.4
(スツック比平	せん断耐力 V _c	1.89	1.92	1.88	1.88	141.9

表 3.6.9 最大荷重と耐力の計算値

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)



(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)



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カー変位の関係(実験結果)



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)



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/mm²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_{sv}=1,000 N/mm²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、荷重一変位関係、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 均化された平均応カー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、先ず 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 ー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.

今後は、凍結融解作用によって劣化したコンクリート部材を対象とした具体的な検討を 行い、構造性能を定量的に評価可能な数値解析手法の確立が必要不可欠である.その上で、 実構造物への適用性も詳細に検討し、劣化の状況に応じた構造性能の評価法を見出す必要 もある.また、この数値解析技術の活用によって、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.
- 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技術

4.1 はじめに

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 目指した検討を実施した.

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, 1)材 料特性 SWG, 2) 点検・調査 SWG, 3) 性能照査 SWG に分かれて具体的な検討を行った.

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.

- 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.

		説 明		
	=×	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		
①水注說		圧による		
		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		
	②膨張	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		
浸透圧説		散,凍結,氷の成長による膨張圧		
	②匝嫔	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		
	③4又前	に周囲の水を吸収し、吸収された分だけ収縮		

表 4.2.1 凍害によるコンクリートの劣化メカニズム



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.

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	水の供給	空隙が充水
冷却	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	スケーリング等	水の浸透 ひび割れ進展 スケーリング

表 4.2.2 スケーリングの進行過程

※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.

劣化過程	定義
港伊田	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
偕八朔	が発生するまでの期間
准屈期	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
進展朔	出するまでの期間
hu/车相	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
加速旁	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

表 4.2.3 凍害の各劣化過程の定義²⁾

(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.

No.		構造物名	O×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				提供者:		
路線名: 一般国道***号		架橋位置	00郡口口町		管理者:	O×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:	最影:	H23.10			撮影:	損傷進行 過去写	の経時変化	よが分かる 【添付。

表 4.3.1 事例収集のフォーマット

(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.

凍害を受けやすい部位		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 地覆支柱部	 ・日射や風を直接受ける部位であり、凍結融解回数が多い ・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 ・防護柵支柱内や支柱後埋め部への滞水と凍結膨張 	図 4.3.1
	橋	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
	体工	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 躯体側面水際部	 ・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 ・河川水等の界面付近の水分供給と凍結融解 	図 4.3.7
支承アンカー部		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 	🗵 4. 3. 8

表 4.3.2 道路橋における凍害を受けやすい部位



図 4.3.1 道路橋の凍害による劣化事例(1/8) 橋面エ



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) 橋体エ[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.

調査目的	調査項目	得られる情報		
	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		
演客の知度の強認	ポップアウト	美観、骨材の品質		
保吉の住及り唯祕	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		
	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		
凍害の進行の予測	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		

表 4.4.1 詳細調査の目的,項目と得られる情報の例 ⁸⁾

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 % 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



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 4.4.2 ひび割れ解析ソフトによる図化 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







図 4.4.1 剥離度の測定要領

$$D_m = D \times A_s = D \times \frac{S}{50 \times 50}$$

(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(cm²)

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¹⁰も適用されている.



【蛍光染料・エポキシ樹脂】 写直 4 4 6 栄光

【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

【真空脱泡装置】





【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

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

ここに, Ed: 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)

- REd:相対動弹性係数(%)
- *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⁾

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

(式 4.4.3)

ここに、X₀:原点から直線の傾斜が変わる変曲点までの距離

Va:A層の超音波伝播速度

Vs: B層緑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.

$$RE_d = 21.7x^{-0.81} \tag{$\frac{1}{3}$} 4.4.4)$$

ここに、REd: 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.



<u>整理の考え方 ²²⁾</u>

4.4.8 衣面定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.

なお,参考文献 22)で示した「表面走査法によるコンクリートの凍害点検・診断マニュアル (案)」は、マニュアルやマニュアルの解説書、計算プログラムが国立研究開発法人土木研究 所 寒地土木研究所の HP から無償でダウンロードが可能である.

http://zairyo.ceri.go.jp/ceri_zairyo/topics5/sousa-dr.html

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4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検討したものである.

検討事例その2は、凍害で劣化した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ために、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.

検討事例その3は、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮応力下の応力--ひず みモデルの構築を目的として、相対動弾性係数の異なる円柱供試体の圧縮試験結果に基づ いて検討を行ったものである.

検討事例その4は、凍結融解作用による損傷の影響を材料構成則に組み込み、損傷の位置 や深さが異なるはり部材の耐力、変形性能、破壊形式の再現を三次元有要素解析によって 検討したものである.

(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/mm²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/mm²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 表 4.5.2 鉄筋の材料特性値

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

$$f_{rd} = k_{1f} f_d \left(1 - \sigma_p / f_d \right) \left(1 - \frac{\log N}{K} \right)$$
 (£ 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 圧縮縁からの (fcの低下割合) 劣化範囲		備考	
case1-1		1	なし	健全ケース	
case1-2		2/2 H/4	H/4		
case1-3	1.00m	2/3	H/2	少してデル1	
case1-4	1.0011	1/2	H/4	务化モアル1	
case1-5		1/5	H/2		
case1-6		-	0.1m(断面欠損)	劣化モデル2	
case2-1		1	なし	健全ケース	
case2-2		2/2	H/4		
case2-3	0.50	2/3	H/2	少してデル1	
case2-4	0.50m	1/2	H/4	务化モアル1	
case2-5		1/3	H/2		
case2-6		- 0.1m(断面)		劣化モデル2	
case3-1		1	なし	健全ケース	
case3-2		2/2	H/4		
case3-3	0.25m	2/3	H/2	少してデル1	
case3-4	0.25m	1/2	H/4	多化モフ ル1	
case3-5		1/3	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

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

- 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.



図 4.5.3 載荷点における荷重一変位関係の比較



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

供試体概要		実験		解析		荷重比		
			(a)	(b)	(c)	(d)		
名称	劣化面	劣化深	P_y	P_u	P_y	P_u	c/a	d/b
		(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
Ν	-	-	43.7	68.9	43.6	48.8	100%	71%

68.1

46.4

32.6

68.9

41.3 43.0 42.0 44.2

41.9

40.3

36.6

43.2

44.3

41.6

38.3

48.0

94%

94%

87%

102%

65%

90%

117%

70%

103%

表 4.5.4 供試体名称,実験·解析結果等一覧

50

100

150

100

44.4

43.0

-

49.7

C5 圧縮側

C10 圧縮側

C15 圧縮側

T10 引張側

T15 引張側

¹⁵⁰ ※P_v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) 凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮応力下の応力-ひずみモデルの構築 に向けた検討事例²⁸⁾
- 1) 検討概要

凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮応力下の応カーひずみモデルの構築を 目的として、相対動弾性係数の異なる円柱供試体の圧縮試験結果に基づいて検討を行った ものである.また、土木学会コンクリート標準示方書の圧縮応力下における応力-ひずみ 関係に、凍結融解作用によって生じる間隙が閉合することで生じるひずみを考慮する簡易 なモデルの構築を試みたものである.

- 2) 実験概要
- a)供試体

φ100×200mmの円柱供試体とし、水セメント比は 65%、セメントは普通ポルトランド セメント、粗骨材の最大寸法は 20mm, AE 剤は使用していない.

b) 凍結融解試験

コンクリート打設後,4週目まで水中養生を行った後,凍結融解試験を開始した.凍結 融解試験はJISA1148A法に準じて行った.実験変数は相対動弾性係数であり,相対動弾性 係数が概ね80%から20%まで20%間隔で,4水準の供試体を各水準3体ずつ作製し,圧縮試 験を行った.

c) 圧縮試験

圧縮試験は、JISA1108に準じて行った.コンプレッソメータにより、荷重の計測ととも に載荷中のひずみを計測した.なお、最大応力時の円柱供試体のひび割れ状態を観察する ため、圧縮試験は最大応力の95%まで応力が低下した時点で終了した.

d) 超音波伝播速度の測定

円柱供試体が凍結融解試験で所定の劣化水準に達した後,円柱供試体の上面と下面の中 心に発・受信子をあてて,円柱軸方向の超音波伝播速度を測定した.

- 3) 実験結果
- a) 圧縮試験結果

圧縮試験における各供試体の応力-ひずみ関係を図4.5.9に示す.既往の研究で指摘されているように、凍結融解作用によるコンクリートの強度低下、剛性低下、さらには、微細ひび割れの閉口に伴う剛性の回復などが見られた.

b)相対動弾性係数と超音波伝播速度との関係

図4.5.10は圧縮試験の供試体における相対動弾性係数の低下率と健全な状態を基準とした超音波速度比との関係を示している.これより,相対動弾性係数の低下に伴って超音波速度も低下しており,水セメント比を65%と大きめに設定した今回のコンクリートにおいても,相対動弾性係数と超音波速度は良好な相関を示している.



図 4.5.9 凍結融解作用により劣化したコンクリートの応カーひずみ関係



図 4.5.10 相対動弾性係数の低下率と超音波速度比, 圧縮強度比, 動弾性係数比, 圧縮ピークひずみ比の関係

c) 相対動弾性係数と力学特性の関係

図4.5.10は、相対動弾性係数の低下率と、健全な状態を基準とした圧縮強度比、静弾性 係数比、圧縮ピークひずみ比の関係を示している.これより、相対動弾性係数の低下に対 して、物性値は良好な相関を示している.圧縮強度は概ね直線的に低下し、相対動弾性係 数が10%低下すると圧縮強度は3%低下する.相対動弾性係数の低下率が80%の場合でも、 強度比は0.8程度までしか低下していない.一方、静弾性係数は指数関数的に低下し、相対 動弾性係数の低下率が20%の場合でも、静弾性係数比は0.6程度と大きく低下し、相対動弾 性係数の低下率が80%の場合では、静弾性係数比は0.2程度まで低下する.

以上より、凍結融解作用による力学特性の低下に関しては、既往の研究でも報告されて いるように圧縮強度よりも静弾性係数の方が低下程度は大きい.この要因は静弾性係数は 凍結融解作用によってコンクリート内部に生じた微細ひび割れにより空隙が生じるため、 材料の剛性が著しく低下するものと考えられる.

- 4) 凍結融解作用により劣化したコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化
- ① モデル化の仮定と提案式

本検討では、最終的に有限要素解析プログラムの材料構成則として反映することを目的 として、圧縮応力下における応力--ひずみ関係のモデル化について検討した.

凍結融解作用により劣化したコンクリートはコンクリート内部に微細な間隙が生じる. そこで,圧縮力を受けた際に生じる,この微細な間隙の閉合をモデルに考慮することで, 凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮時の挙動を表現できるものと仮定した. これを,土木学会コンクリート標準示方書に記載された圧縮応力下におけるコンクリート の応力-ひずみ関係に,劣化によって生じる間隙が閉合することで生じるひずみ(間隙閉 合ひずみ)を考慮することで下記に示す簡易なモデルで表現した.

$$\sigma_{c}' = E_{0} \cdot K \cdot \left(\varepsilon_{c}' - \varepsilon_{e}' - \varepsilon_{p}'\right)$$
(2)
$$E_{0} = \frac{2 \cdot f_{c}'}{\varepsilon_{peak}'}$$
$$K = \exp\left\{-0.73 \frac{\varepsilon_{\max}' - \varepsilon_{e}'_{max}}{\varepsilon_{peak}'} \left(1 - \exp\left(-1.25 \frac{\varepsilon_{\max}' - \varepsilon_{e}'_{max}}{\varepsilon_{peak}'}\right)\right)\right\}$$
$$\varepsilon_{p}' = \varepsilon_{\max}' - \varepsilon_{e}'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon_{peak}' \left\{1 - \exp\left(-0.35 \frac{\varepsilon_{\max}' - \varepsilon_{e}'_{max}}{\varepsilon_{peak}'}\right)\right\}$$

間隙閉合ひずみょ、は、次式により表される.

$$\varepsilon_{e}' = \frac{\varepsilon_{c}'}{\alpha} \left(2 - \frac{\varepsilon_{c}'}{\alpha \cdot \varepsilon_{e0}'} \right) \qquad \left(0 \le \varepsilon_{c}' \le \alpha \cdot \varepsilon_{e0}' \right) \tag{3}$$

$$\varepsilon'_{e} = \varepsilon'_{e0} \qquad \qquad \left(\alpha \cdot \varepsilon'_{e0} < \varepsilon'_{c}\right) \qquad (4)$$

ここで,

 f_c , ϵ'_{e0} , α は,相対動弾性係数の低下率に対する関係式として一軸圧縮試験結果に 基づき以下に示す回帰式(5)~式(7)が得られる.

$$\frac{f'_{c}}{f'_{c0}} = 1 - 0.0031 \cdot \left(100 - \frac{E_{D}}{E_{D0}} \cdot 100\right)$$
(5)
$$\varepsilon_{e0} = 0.000019 \cdot \left(100 - \frac{E_{D}}{E_{D0}} \cdot 100\right)$$
(6)
$$\alpha = 6.4 - 0.059 \left(100 - \frac{E_{D}}{E_{D0}} \cdot 100\right)$$
 $\alpha \ge 2.0$ (7)

ここに,

f'c0:健全な状態のコンクリートの圧縮強度

*E*_D: 動弾性係数

*E*_{D0}:健全な状態の動弾性係数

② 提案式から得られる応力-ひずみ関係

式(2)から得られる応力-ひずみ関係を図4.5.11に示す.これより,相対動弾性係数の低下に応じて,圧縮強度の低下と剛性低下や相対動弾性係数の小さな場合に見られる剛性の回復が表現されていることが分かる.また,実験結果と比較したものを図4.5.12に示すが,実験における一軸の応力-ひずみ関係を概ね再現できていることが確認できる.



図 4.5.11 式 (2) から得られる応カーひずみ関係



図 4.5.12 凍結融解作用により劣化したコンクリートの応カーひずみ関係 の提案式と実験結果の比較

③ 実構造物への適用方法に関する考察

本検討では、劣化が一様な円柱供試体の実験データを用いているが、実構造物の凍害は、 劣化要因である水分供給や温度変化が大きい構造物表面から内部に向けて徐々に劣化が 進行するため、劣化程度は深さ方向で一様ではない.また、日射や水分供給が部位によっ て異なるため、劣化程度は平面的にも一様ではない.したがって、有限要素解析によって 凍害を受けた実構造物の構造性能の評価を行う場合には、構造物内部の劣化範囲・程度の 空間分布を有限要素解析の要素寸法レベルで適切に考慮する必要がある.

一方, 土木学会コンクリート標準示方書では, 凍結融解作用により劣化したコンクリートの劣化の進展範囲を把握する方法として超音波速度が示されており, 実構造物から採取したコアの超音波速度を測定する方法やトモグラフィー法を用いて実構造物の凍害劣化範囲や劣化程度を評価した事例が報告されている.よって, 有限要素解析によって実構造物の構造性能評価を行う場合には, 超音波速度を用いた以下の手順により, 構造物内部の劣化範囲・程度の空間分布を適切に考慮することが可能であると考えられる.

1) 超音波速度の測定により劣化範囲・程度を把握する.

2) 関係式を用いて超音波速度を相対動弾性係数に換算する.

3) 有限要素解析の各要素に相対動弾性係数を入力する.

4) 相対動弾性係数に対応した材料構成則が組み込んで部材の耐荷力等を算出する.

- (4) 凍結融解作用による損傷の影響を材料構成則に組み込んだ RC はり部材の非線形有限要素解析による検討事例²⁹⁾
- 1) 検討概要

非線形有限要素解析で用いられる種々の材料構成則に凍結融解作用による損傷を考慮し, 損傷域の位置や深さが異なる RC はり部材の耐力・変形性能・破壊形式の再現を試みたもの である.

2) 実現象の考察に基づいた損傷の導入

a) 膨張ひずみを考慮した初期ひび割れの導入

RC はりが凍結融解作用を受けると、主鉄筋方向に平行なひび割れが顕在化する.この 初期ひび割れがこのような方向性を持つのは膨張ひずみによるものと考えられ、無筋の円 柱供試体が凍結融解作用を受けると軸方向・軸直交方向に膨張ひずみが生じるが、主鉄筋 がある場合には、はり高さ方向に膨張が拘束されるためである.つまり、損傷域のコンク リートは、はり高さ方向に組織が弛緩(膨張)した状態にあったものと考えられる.

そこで、本検討では、載荷初期に損傷域のコンクリート要素に初期ひび割れを導入し、 ひび割れ直交方向に膨張ひずみを与えた後に、初期ひび割れ面に基づいた座標系において ひび割れ後のコンクリート構成則に損傷の影響を考慮するというものである.

b) コンクリート構成則および鉄筋とコンクリート間の付着構成則への損傷の考慮 ①圧縮構成則

膨張ひずみを,凍結と融解の繰返しによって微細なひび割れが進展したモルタルマトリ クスの平均的特性を代表する物理量(内部損傷の指標)と捉え,Collins らのモデルに取り 入れた.具体的には,ひび割れ直交方向ひずみ(ϵ_l)に膨張ひずみ(ϵ_p)を加えた係数 β に よってひび割れ平行方向の圧縮特性に損傷を考慮する.主圧縮応カーひずみ関係を式(1) に示す.ここで,膨張ひずみの感度を表す定数 α は Hasan らの実験結果を参考に定めた. 図 4.5.13 には式(1)から得られる損傷を考慮した主圧縮応カーひずみ関係を示す.





図 4.5.13 損傷を考慮した主圧縮応カーひずみ関係

ここで,

- $f'_{c\beta}, \epsilon'_{c\beta}$: ひび割れ直交方向ひずみと膨張ひずみによって低減された圧縮強度および 圧縮ピークひずみ
- ϵ'_{c0} :健全なコンクリートの圧縮ピークひずみ (0.002)
- f'_{cl} : 主圧縮応力 (N/mm²), ϵ'_{cl} : 主圧縮ひずみ, ϵ'_{cu} : 終局圧縮ひずみ (0.004)
- f_c : 健全なコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- f_{cD} : 凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

②せん断構成則

せん断構成則には簡略化した李・前川モデルを採用した.ただし,既往の研究が極めて 少なく,せん断伝達特性に損傷の影響を合理的に考慮することができないため,任意の応 力に対して大きなせん断ひずみが生じるようにせん断合成を低減させた.

すなわち,損傷域のコンクリート要素の平均せん断剛性(*G*)は,ひび割れ面のずれ剛性(*G*)とひび割れていない部分の弾性剛性(*G*)で表されると仮定し,それぞれに圧縮強度比を乗じた(式(2)).また,一軸圧縮強度によって決まるせん断伝達強度の最大値(f_{st})にも損傷の影響を考慮した.

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_{c}(f_{cD}^{'}/f_{c}^{'})} + \frac{1}{G_{cr}(f_{cD}^{'}/f_{c}^{'})}}} \right\}$$
(2)
$$f_{stD} = 3.8(f_{cD}^{'})^{1/3}$$

fstD:損傷を考慮した最大せん断伝達強度

③鉄筋とコンクリート間の付着損傷モデル

凍結融解作用による付着損傷は、かぶりコンクリートの劣化に加え、その劣化がない場合でも温度変化のみで付着応力が低下することが実験的に確認されている.そこで、この2つの付着損傷機構を付着応力ーすべり-鉄筋ひずみの関係に反映させた(式(3)).

かぶりコンクリートの劣化による損傷機構は圧縮強度とヤング係数比,温度変化による 損傷機構は鉄筋近傍のコンクリートの引張強度比として考慮されている.

$$\frac{\tau}{f_{cD}} = \frac{f_1(E_{cD}) \cdot \left\{ \ln(1 + 5 \cdot 1000 \, S/D) \right\}^3}{1 + f_2(f_{tD}) \cdot \varepsilon_s \cdot 10^5}$$

$$f_1(E_{cD}) = 0.73 \left(\frac{E_{cD}}{E_c} \right)^{0.56}$$

$$f_2(f_{tD}) = \left(\frac{f_{tD}}{f_t} \right)^{-1.3}$$
(3)

ここで,

S:すべり (mm)

D: 鉄筋径 (mm)

*ε*s:鉄筋ひずみ

f_l(E_{CD}):かぶりコンクリートの劣化による付着損傷機構を考慮する関数

E_C:健全なコンクリートのヤング係数 (N/mm²)

E_{CD}: 凍結融解作用を受けたコンクリートのヤング係数 (N/mm²)

f2(ftD):温度変化による付着損傷機構を考慮する関数

 $f_t: 健全なコンクリートの引張強度 (N/mm²)$

fu: 凍結融解作用を受けたコンクリートの引張強度 (N/mm²)

④有限要素解析の概要

解析対象は、本報告書の p.113 で示した図 4.5.6 と同じ曲げ破壊型の RC はりである. 図 4.5.14 に解析モデルを示す(対称性を考慮した 1/4 モデル).本解析は北海道大学で開 発された 3 次元非線形有限要素解析プログラム(3D CAMUI)が適用されている.有限要 素は全てアイソパラメトリック要素とし、コンクリート要素には 6 面体ソリッド要素、鉄 筋要素にはトラス要素が用いられている.また、コンクリートと鉄筋間には接合要素が用 いされている.ひび割れは非直交固定分散ひび割れモデルを用い、1 ガウス積分点あたり 2 方向までのひび割れが考慮されている.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.

コンクリートの圧縮強度比は林田らの研究成果を参考にして式(4)により推定した. ヤング係数比,引張強度比は,超音波伝播速度から算出した相対動弾性係数を用い,野口らが提案した式(5),式(6)により推定した.



図 4.5.14 解析モデル (要素分割図)

$$\frac{f_{cD}}{f_c} = \frac{6.064V_p + 6.88}{6.064V + 6.88} \tag{4}$$

$$\frac{E_{cD}}{E_c} = \exp\left\{-0.061 \left(100 - RDEM\right)^{0.835}\right\}$$
(5)

$$\frac{f_{tD}}{f_t} = \exp\left\{-0.141 \left(100 - RDEM\right)^{0.52}\right\}$$
(6)

3) 解析結果および考察

① 荷重-変位関係

図4.5.15には荷重-変位関係を実験結果および pp.113~116 で示した 2 次元解析結果と 比較して示している.

これより, 圧縮域に損傷のある C5, C10, C15 のケースに着目すると,本解析では損傷 深さによって最大荷重と最大荷重までの剛性が低下する傾向が再現されているのに対し て,2次元解析では明確な差異が見受けられない.

引張域に損傷のある T10 のケースに着目すると、主鉄筋降伏以降の靭性が再現されてい るが、2 次元解析ではそれが再現されていない.また、引張域に損傷のある T15 は実験で は唯一、斜め引張破壊が生じたケースであるが、このケースに対する再現性は低い.これ は、ひび割れ面での応力伝達特性を実現象に忠実に考慮する必要があるが、分散ひび割れ モデルによる解析ではそれが困難なためである.



図 4.5.15 荷重-変位関係の比較

2 破壊性状

図 4.5.16 には最大荷重直前の主圧縮ひずみコンターを実験時の破壊性状と比較して示している.

これより, 圧縮域に損傷のある C5, C10, C15 のケースに着目すると, 損傷深さが大き くなるに伴って圧壊域が載荷点近傍からせん断スパン内で拡がっている傾向が確認でき る.引張域に損傷のある T10 のケースに着目すると, 損傷域が支点付近まで圧壊している 傾向が見られ, これは実験では観察されていないことから, 耐力が過小評価された一因と 考えられる.



図 4.5.16 実験時の破壊性状(左図)と解析で得られた主圧縮ひずみコンター(右図)

(5)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、せん断剛性が大き く低下している RC はりや、鉄筋とコンクリートの付着特性が大きく低下している RC はり では、実験結果を精度良く再現することは現状では難しい.また、既存の汎用解析プログ 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、これらの課題を 解決するためには凍結融解作用を受けたコンクリートの材料構成則の構築が不可欠である.

本節では、凍結融解作用を受けたコンクリート構成則に関する最新の研究成果について 紹介したが、実験データも限られており、数値解析的にも引張、せん断、付着構成則につ いては検討の余地が残されている.

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、精度の高い評価が 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)手法を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は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,引張,せん断,付着構成モデル)を構築し,性能評価を可能とする構造解析ツールを作成する必要がある.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た検討が必要である.

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,相対動弾性係数等,劣化 指標と力学特性の関係を明らかにしていく必要がある.

(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」³⁰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多く残されているが,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と考えられる.

【参考文献】

- 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], pp.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], pp.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.
- 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) 表面走査法によるコンクリートの凍害点検・診断マニュアル(案),国立研究開発法人土 木研究所 寒地土木研究所,2016.10.
- 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)林田宏,坂口淳一:凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮応力下における応 カーひずみ関係のモデル化に関する研究,土木学会論文集 A2, Vol.71, No.2, pp.I411-I418, 2015.
- 29)金澤健,佐藤靖彦,高橋良輔,林田宏:凍結融解作用による損傷を考慮した RC はり部材の3次元有限要素解析、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、 Vol.15、pp.381-386、2016.
- 30) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], pp.72-73, 2013.10.

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

番号	因 公	文献題名	年次	出典先	種 別
		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	6861	JSCE	輩 扙
5		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	<i>L</i> 661	JCI	諭 文
З		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	識
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	識
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	諭 文
9	Vici	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	蠻大	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	識
8	廢令	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	識
6	Ŕ	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	識文
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
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	6002	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	-{	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	正着	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	Κ¤	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
8	4	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
61	П	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	71	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	6002	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	15	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		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へ設計と照査の現状と将来展望~	2005	JSCE	委員会報告書
27	ψE	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	名	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
62		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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)
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)	1 1
	Fig. 21 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-1). Fig. 22 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-2). 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

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)	<figure></figure>		

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)	$ \begin{array}{c} \hline \begin{tabular}{ c c c c c c } \hline \begin{tabular}{l c c c c c c c } \hline \begin{tabular}{l c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$

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 文献タイトル	No.4 ・ ・ ・ ・ 定着不良 ・ その他()
区 文献タイトル	・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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)
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. ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
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 ●「東京の「「「「「」」」」」「「」」」」」」」」」「」」」」」」」」「」」」」」」」」	

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

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ー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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)	
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ー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,せん断ひずみー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)	Image: construction of the second	

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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)
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 ●二丁二〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇一〇

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.	
	(法法体名→SO-BO- の一本ののののののののののののののののののののののののののののののののののの	
解 (主な成果に関す る図表や解説)	 ●有限要素解析 ●「中限要素解析	
	・アーチ作用の影響が大きいSO $x_{2\rho-\overline{2}\nu,\overline{\tau}}(\mu)$ $x_{2\rho-\overline{2}\nu,\overline{\tau}}(\mu)$ ひい割れか局所化する $-B5-T$ の結果は整合取れず () SO HO S # 54 (μ) () SO HO S # 54 (μ)	

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)	■ 腐食した鉄筋のカ学特性の推定
	变位 δ (mm)
	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

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)		
	(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)	



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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)	
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)	$\frac{13/20m}{(3 + 1)^{1/2}} + \frac{2}{100m} + \frac{2}{10m} + $	
	 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. 	

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(分散ひび割れー離散鉄筋モデル)
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)	 Physicie T ルンジベス B2-26 解析メッシュ B2-26 解析メッシュ B2-26 解析メッシュ B2-26 解析メッシュ B2-27 鉄筋の力学性状推定手法の概念図 Containing Containing



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(分散ひび割れー分散鉄筋モデル)	
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)	<section-header><complex-block></complex-block></section-header>	

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.333-3	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 の評価を試みたものである.検討の結果, 程度の終局耐力の低下が生じることが確認 と,終局破壊モードがコンクリートの圧壊 著しく低下する可能性が示されている.ま と構造性能上不利になることも明らかとさ	化の著しい実道路橋 PC 上部工の耐荷性状 対象構造物は供用開始後約 32 年で約 24% され.更に,PC 鋼材の腐食が過度になる から鋼材破断に変化することで変形性能が た,劣化した桁が上部工の片側に偏重する 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 下を考慮している.ただし,配力鉄筋やせん していない.また,コンクリートの劣化は	少率に基づいて断面減少と機械的性質の低 ん断補強鉄筋については腐食の影響を考慮 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	A series of the series of t



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(分散ひび割れー分散鉄筋モデル)(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)	14.9 CHraNuPice 4 @ Sagets B -1 1 cJ Steker Rape to depth ratio (a) 3.2 Shear capacity of concrete (Vo) 90.7 kN Shear capacity of concrete	



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) 劣化エデルは定差不良区間の鉄筋を無想することにより増超	
解 説 (主な成果に関する 図表や解説)	• $t = t$,	



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田端としてモテル化。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)	<complex-block> NC 12 9 (9 (5 (1) 10 (5 (1) 10 (1) 1</complex-block>



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)	<text></text>



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 1000 µ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-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)	$ \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \begin{array}{c} & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ & \end{array} \\ \\ \\ & \end{array} \\ \\ \\ & \end{array} \\ \\ \\ \\$

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

慗理悉号	No 20
区分	・鋼材 庭舎 ・マンクリート 定差 不良 ・ その他 ()
立献タイトル	「 $mn/m 個式 mn/m mn/m = 10000 mm m m m m m m m m m m m m m m m $
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)	<figure></figure>

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-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)	$\sigma - \epsilon$ [\mathbb{R}

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)	the second se

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)	$ \begin{array}{c} & & & & & & & & & & & & & & & & & & &$

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)	φφφφφφ000 <t< th=""></t<>

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
	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	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
(ポイント・結論)	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 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見て導入されている「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見ず影響 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 なじめに 5.2 腐食しび割れモデル 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 腐した鉄筋の力学特性 5.3.3 鉄筋腐食が RC部材の力学性能に及ぼす影響 5.3.1 概要 5.3.5 鉄筋腐食が生じた RC部材の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けるひび割れ及び鉄筋のモデル化 5.4 1 はじめに 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 経年劣化になる損傷評価 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

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 材料劣化と部材性能 4.2.2 材料劣化と部材性能 4.2.3 鉄筋コンクリート梁の力学的特性の試算 4.2.4 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 材料劣化による部材性能変化の評価 4.2.3 材料劣化による部材性能変化の評価 4.2.3 材料劣化による部材性能変化の評価 4.2.4 まとめ ■材料劣化とさる部材性能について 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築部材を対象にして、 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)ひび割れ面での店力伝達特性の劣化は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 再現でさた解析事例(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

敢 理 平 旦	No 27
	 ・ ・ ・ 「一 ・ ロンクリート ・ に ・ 定 市 ・ ・ ・
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)	$ \int_{W_{1}}^{00} \int_{W_{1}}^{00} \int_{W_{1}}^{0} \int_{W_{1}}^{$

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)	本報告書の新聞単では、初村为12かど時とのに特定時の特定排において後すが行われ、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 1.2 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 1.2.2 付着作用のモデル化に関する留意点 1.2.4 構造細目に関する留意点 1.2.4 構造細目に関する留意点 1.2.4 構造細目に関する留意点 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実験的研究事例 2.1.2 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 報析の概要 2.1.2 軒析の概要 2.1.2 年がの壊するRCはりの解析 3. ASRによる劣化が構造性能に及ぼす影響

3.2 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

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. れ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 はじめに 2.2 はじめに 2.2 はじめに 2.3 柱部材を対象とした正負交番載荷実験 2.4 既往の実験結果に関する考察 2.3 解析的検討 2.31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 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、腐食のび割れ発生位置をその程度(ひび割れ幅)を考慮する必要がある. (2)鉄筋腐腐食程度は、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

整理畨号	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
ジャーナルタ	材料务化が生しにコンクリート構造物の構造性能研先小安貝云 + オ学会コンクリート共振シリーブ№85
- ジャ ノル イ	11.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1
	2009 千 本却生まけ、 対約少化な生じたコンクリート 携生物の 携生性 能に 開ナス 北通封除が
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グリード構造物の構造性能に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 鉄筋腐食のモジル化 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 2.2.3 最小断面積の大きさと位置の影響 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 3.1 BM7 供試体の解析 3.1 BM7 供試体の解析 3.2 RC スラブ供試体の解析 3.2 RC スラブ供試体の解析 3.2 MF に部材の解析 3.2.3 解析概要 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 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
5.11 適甲の範囲
5.1.1 週月の範囲 5.1.2 歴史部価の 西町
5.1.2 ILIE11回り原則 5.1.2 田語の空差
5.2 非感形解析を利用した構造性能評価の方法
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
5435 形状のモデル化
544 非線形解析による性能評価および対策の要否の判定
6 まとめと今後の課題
0. よこのとう後の味趣
以下、まとめで述べられていろ事項を示す
(1) 鉄筋腐食のモデル化方法
(1) 500個人のモノルにの伝 鉄筋の完善が確保されていること お上び破壊形能にけ大きか亦化が目られた
いてとな前規に 亚均化構成エデルにおける鉄筋原合の取り扱いについて検討を
いことを削延に、十均に伸成てノルにおける妖肋腐良の取り扱いについて使うを 行ったは用「具土府食具に広じて鉄筋長な減小されてこしたとり副芸力な輝わず
1つに柏木,取入廣良里に心して妖肋比を減少させることにより順何力を燃み計 何でたてこしが変割といた。また、鉄体産金のぼとったに開去て検討では、鉄体
一個してることが確認された。また、 軟肋腐良のはりつさに関する使可じは、 軟肋の転子減小の八方を比較的第日にたごれたようとしたという提供したがです。
の町面減少の分布を比較的間易にモアル化することにより、耐何刀や変形性能を
有度よく評価できることか確認できた.
(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
+ ₹	中世	くだる	五段大唐	貝笛ク
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
	文 宗 十 十	◇ 十 国 ◇	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
H21年度	上小十五	王王王	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
	√ 治+⊥	今王十	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
H22年度	上小十五	五十	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
L 1 2 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	プレストレストコンクリート技術協会	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	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
员十C2H	日本コンクリート工学会	コン川ートと補強材の付着挙動と付着構成則 た関するシンポックム	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	(मु-2-27
H25年度	日本コリリリート工学会	コン別ート工学年次大会	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

投稿論文集一覧

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

(株)ドーコン ○正会
(株)ドーコン 正会
北武コンサルタント(株) 正会
JIP テクノサイエンス(株) 正会
(株)ファルコン
(株)メイセイ・エンジニアリング

○正会員 関下 裕太 (Yuta SEKISHITA)
 正会員 小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
 正会員 宮本 真一 (Shinichi MIYAMOTO)
 正会員 星野 淳一 (Junichi HOSHINO)
 坂本 智明 (Tomoaki SAKAMOTO)
 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.



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	せん断	主鉄筋比	せん断補強
	(mm)	スパン比	(%)	筋比(%)
No.1	200×400	2.96	0.85	0.55
No.2	200 × 400	2.80	1.66	

表-2 供試体の設計耐力一覧

供試体	設計曲げ耐力	設計せん断耐	せん断余裕度
	Pu(kN)	力 Vu(kN)	$\alpha (=Vu / Pu)$
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	引張強度	弾性係数	ポアソンド
(MPa)	(MPa)	(GPa)	M) / / L
25.7	2.0	25.9	0.2

表-4 鉄筋の力学的特性値

AH-45-12	降伏強度	弾性係数	ポアソンド
<u></u>	(MPa)	(GPa)	ホテノンに
D10	355.0	179.0	
D16	356.0	177.0	0.3
D22	361.0	187.0	

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
西害なイプ	コンクリート:平面応力要素	コンクリート:平面応力要素	平面応力要素
安糸グイノ	鉄筋:埋め込み鉄筋要素	鉄筋:トラス要素	(鉄筋コンクリート(RC)要素)
运 田久/H	対称軸:水平方向変位成分を拘束	対称軸:水平方向変位成分を拘束	対称軸:水平方向変位成分を拘束
現外宋件	支点部:鉛直方向変位成分を拘束	支点部:鉛直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)
シンドキレシュージャ	分散ひび割れモデル	分散ひび割れモデル	分散ひび割れモデル
いい割れモテル	(固定ひび割れモデル)	(固定ひび割れモデル)	(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

表-5 各解析者が適用した解析手法の仕様一覧



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 3,500 μ 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



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カーひず み関係は解析者 B と同様である. 但し,付着ーすべり, 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.



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.

株式会社ドーコン

株式会社ドーコン

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。

▲ ④ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③ ③	_
図-1 本解析で対象とした RC 梁部材の諸元 ^{載荷点位置}	1

北武コンサルタント株式会社 正会員

北武コンサルタント株式会社 正会員

正会員 〇関下 裕太

正会員 小林 竜太

宮本 真一

渡辺 忠朋

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。

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

表-1 各解析者が適用した解析手法の概要

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 3,500 µ 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一変位関係を実験 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-5 ひひ割れ万和日代に関する実験と時初の比較 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

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。

北武コンサルタント株式会社 正会員 忠朋 渡辺 1000 300 50 100 50 軸方向鉄筋 D10 Ģ 50 軸方向鉄筋 D22 00t 300 400 200 4@75=300 300 2600

北武コンサルタント株式会社 正会員 〇宮本 真一

正会員

正会員

小林

関下

竜太

裕太





図-2 解析モデルの一例(解析者 A)

3. 数値解析の概要

株式会社ドーコン

株式会社ドーコン

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。

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	有が過用した解析子法の概要	
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

ミー1 各解析者が適用した解析手法の概要

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 3,500 μ 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 カーひずみ関係を示す。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

リニア型の応力ー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



図-5 ひび割れ分布性状に関する実験と解析の比較 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。

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)分散ひび割れー分散鉄筋モデ ル,2)分散ひび割れー離散鉄筋モデル,3)離散ひび 割れー離散鉄筋モデルの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 れー分散鉄筋モデルによる解析にはWCOMD(Ver.2)を, 分散ひび割れー離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れー離 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ー分 散鉄筋モデルではRC要素に鉄筋比として与え,分散ひ



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	引張強度	弾性係数	ポマソント
(MPa)	(MPa)	(GPa)	ホノノン比
45.0	2.9	30.0	0.2

表-2 鉄筋の力学的特性値				
建篮汉	降伏強度	弾性係数	ポアソント	
业人用刀1主	(MPa)	(GPa)	ネノノン比	
D19	610.0	190.0	0.3	

び割れー離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れー離散鉄筋 モデルでは3節点梁要素を用いた.また,離散鉄筋モデ ルに対して付着ー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.

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.



(c) 離散ひび割れー離散鉄筋モデル

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、〇印は実験結果 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. 分散ひび割れー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







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 分散ひび割れー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カーひず 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カー 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、分散ひび割れー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 1)付着特性の影響

1) 们有付住の影音

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 分散ひび割れー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 分散ひび割れー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. 離散ひび割れー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 離散ひび割れー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)

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.



図-10 離散ひび割れー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)

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.

- 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) 分散ひび割れー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) 離散ひび割れー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:

- 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.
- 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カー平均ひずみ 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一分散鉄筋、分散ひび割 れー離散鉄筋、離散ひび割れー離散鉄筋の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ーすべりを考慮した.

3. 分散ひび割れー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



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、鉄筋の応カー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カー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)には分散ひび割れー分散鉄筋モデルで得られた 荷重一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 とした場合の荷重一変位応 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



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. 分散ひび割れー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)に分散ひび割れー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ーひずみ関係を 用いるとともに、鉄筋の付着ー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ー分散鉄筋 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 ひび割れー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.

- 分散ひび割れー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)分散ひび割れー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
- 田所他:ひひ害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カー平均ひ 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 ーすべり-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 び割れー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



 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=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=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



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⁹. 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

ー軸引張を受ける RC 部材を対象に離散ひび割れー離散 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.

- 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

- 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:分散ひひ割い型 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.
- 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カーす ベリーひずみ関係,土木学会論文集,No.378,pp.165-174, 1987.
- 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 における引張応力ー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	引張強度	弾性係数	ポマソンド
(MPa)	(MPa)	(GPa)	ホアノン比
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)	弹性係数 (GPa)	ポアソン比
D10	355.0	179.0	0.2
D16	356.0	177.0	0.3

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

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				標準ケース	
CASE2	新田	0.4			西妻公割の影響	
CASE3	粗		0.4		安米刀司 切影音	
CASE4		0.2	0.4	1.0f°c	1.連續城の1.進動化力到(仕美い)	
CASE5		1.0			り 旅 頃 域 の り 旅 駅 11 勾 能(竹 有 ハ ラメータ)の 影響	
CASE6	逓 淮	2.0				
CASE7	惊华		無筋相当		圧縮領域(載荷点近傍)の引張軟	
CASE8		0.4	0.4	2.0f°c	化勾配(付着パラメータ)および	
CASE9			0.4 <u>3.0f</u> °c 月		圧縮強度の影響	

表-3 解析ケース一覧

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 当たりの反複回 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 後の引張応力ー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 tensionstiffening 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.



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.

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.



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 %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ー分散鉄筋モデルに 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 クリートの引張応カー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。
- E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:

- 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.

㈱北未来技研			〇関下	裕太
北海道大学大学院	正会員	工博	佐藤	靖彦
(株)ドーコン		工修	小林	竜太
JIPテクノサイエンス(株)		工修	비미	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 散ひび割れー分散鉄筋モデル,2)分散ひび割れ 一離散鉄筋モデル,3)離散ひび割れー離散鉄筋 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。



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。

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-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

表-1 コンクリートの力学的特性値

圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン
(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	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	弹性係数	ポアソン
	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	比
D19	610.0	190.0	0.3



(a) Tension Stiffening

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

$\tau = 0.9 (f'_c)^{2/3} \left[1 - \exp^{-2\pi i t} f'_{3} \right]$	$\left\{-40\left(S_{D}^{\circ,6}\right)\right\}$	(1)
τ :付着応力	, f ['] c:コンク	リート強度
S:すべり量	, <i>D</i> :鉄筋径	

カ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-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。

4.2 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-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-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-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-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. 分散ひび割れー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、分散ひび割れー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ーひずみ関係を用いた。ま た、付着応力ーすべり関係には式(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ーすべり関係におけ 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、分散ひび割れー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 ベ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、分散ひび割れー離散鉄筋モデル 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. 離散ひび割れー離散鉄筋モデルに対する検討



6.1 解析モデルおよび検討内容

図-2(c)に、離散ひび割れー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,離散ひび割れー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($f_t=2.90\sim3.95$ MPa,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。 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カー平均ひず 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-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-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)

- *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} 北海道大学大学院 工学研究院准教授 博(工) (正会員)

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







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-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-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-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-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-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 カ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-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。

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

$$\tau = 0.9 f'_c^{2/3} \left(1 - e^{-40s^{0.6}} \right)$$
⁽²⁾

ここで、

$$\tau$$
: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
 O/f_t
 0.6
 0.4
 $0.75, 0.25)$
 0.2
 0
 1
 2
 3
 4
 5
 $W \times f_t/Gf$







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 ($\epsilon - s - \epsilon$ 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Ι(*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 *r*-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 $\epsilon = 0$ 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 $\tau - s - \epsilon$ 関係よりも $\tau - s$ 関係の方が便利であるため、ここでは島モ デル II ($\tau - s$ 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



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Π(*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。

$$\tau = \alpha \cdot 0.9 f'_{c}^{\frac{2}{3}} \left(1 - e^{-40s^{0.6}} \right)$$
(3)
ここで,
 $\alpha : 付着応力の低減係数$



なお,ここでは,低減係数*a*として*a*=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 *a* =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)。

$$\tau = \begin{cases} \alpha \cdot 0.9 f'_{c}^{\frac{2}{3}} \left(1 - e^{-40s^{0.6}} \right) \\ \tau_{\max} - (\tau_{\max} - 0.1\tau_{\max}) (S - S_{1}) (S_{2} - S_{1}) \\ 0.1\tau_{\max} \end{cases}$$
(4)

ここで,

 τ_{max} :最大付着応力(MPa) S_1 :軟化開始時のすべり量 (S_1 =0.2mm)

なお、ここでは、前節における最大付着応力 の低減係数を $\alpha = 0.8$ 、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a=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a=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a=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 *a*=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 (付着喪失区間あり)および修正 島モデル II (a = 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



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 カの影響

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-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,図ー 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 $\alpha = 0.8$ の場合では 10 箇所, $\alpha = 0.5$ 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 a=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 $S_1=0.2$ mm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 a=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



図-24 鉄筋ひずみ分布(平均ひずみ 0.55%時)

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。

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。

- 離散ひび割れモデルでは、付着構成則に *εs*-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 *c* - *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。
- 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,荷重一平均ひずみ関係は 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 a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

- 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
- 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
- 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-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 カー平均ひずみ関係, 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
- Feenstra, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 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
- 2007年制定コンクリート標準示方書[設計 編],土木学会
- 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



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

共試体概	要	実	験	解	析	荷	重比
劣化面	劣化深	(a) <i>P</i> _y	(b) <i>P</i> _u	(c) <i>P</i> _y	(d) <i>P</i> _u	c/a	d/b
	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
-	-	43.7	68.9	43.6	48.8	100%	71%
圧縮側	50	44.4	68.1	41.9	44.3	94%	65%
圧縮側	100	43.0	46.4	40.3	41.6	94%	90%
圧縮側	150	-	32.6	36.6	38.3	-	117%
引張側	100	49.7	68.9	43.2	48.0	87%	70%
引張側	150	41.3	43.0	42.0	44.2	102%	103%
Į ^ ~	 共試体概 正 正 雇 縮 備 側 側 側 側 側 側 側 側 側 ((<td> 共試体概要 劣化面 劣化深 (mm) 圧縮側 50 圧縮側 100 圧縮側 150 引張側 100 引張側 150 </td><td>共試体概要 実 劣化面 劣化深 Py (mm) (kN) - - 43.7 圧縮側 50 44.4 圧縮側 100 43.0 圧縮側 150 - 引張側 100 49.7 引張側 150 41.3</td><td>共試体概要 実験 劣化面 (a) (b) 劣化面 アy Pu (mm) (kN) (kN) - 43.7 68.9 圧縮側 50 44.4 68.1 圧縮側 100 43.0 46.4 圧縮側 150 - 32.6 引張側 150 41.3 43.0</td><td>共試体概要 実験 解 劣化面 劣化深 Py Pu Py (mm) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 圧縮側 150 - 32.6 36.6 引張側 100 49.7 68.9 43.2</td><td>共試体概要 実験 解析 劣化面 (a) (b) (c) (d) 劣化面 アy Pu Py Pu (mm) (kN) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 48.8 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 44.3 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 41.6 圧縮側 150 - 32.6 36.6 38.3 引張側 100 49.7 68.9 43.2 48.0 引張側 150 41.3 43.0 42.0 44.2</td><td>共試体概要 実験 解析 荷1 劣化面 (a) (b) (c) (d) 劣化面 劣化深 Py Pu Py Pu (kN) (mm) (kN) (kN) (kN) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 48.8 100% 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 44.3 94% 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 41.6 94% 圧縮側 150 - 32.6 36.6 38.3 - 引張側 100 49.7 68.9 43.2 48.0 87% 引張側 150 41.3 43.0 42.0 44.2 102%</td>	 共試体概要 劣化面 劣化深 (mm) 圧縮側 50 圧縮側 100 圧縮側 150 引張側 100 引張側 150 	共試体概要 実 劣化面 劣化深 Py (mm) (kN) - - 43.7 圧縮側 50 44.4 圧縮側 100 43.0 圧縮側 150 - 引張側 100 49.7 引張側 150 41.3	共試体概要 実験 劣化面 (a) (b) 劣化面 アy Pu (mm) (kN) (kN) - 43.7 68.9 圧縮側 50 44.4 68.1 圧縮側 100 43.0 46.4 圧縮側 150 - 32.6 引張側 150 41.3 43.0	共試体概要 実験 解 劣化面 劣化深 Py Pu Py (mm) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 圧縮側 150 - 32.6 36.6 引張側 100 49.7 68.9 43.2	共試体概要 実験 解析 劣化面 (a) (b) (c) (d) 劣化面 アy Pu Py Pu (mm) (kN) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 48.8 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 44.3 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 41.6 圧縮側 150 - 32.6 36.6 38.3 引張側 100 49.7 68.9 43.2 48.0 引張側 150 41.3 43.0 42.0 44.2	共試体概要 実験 解析 荷1 劣化面 (a) (b) (c) (d) 劣化面 劣化深 Py Pu Py Pu (kN) (mm) (kN) (kN) (kN) (kN) (kN) (kN) - - 43.7 68.9 43.6 48.8 100% 圧縮側 50 44.4 68.1 41.9 44.3 94% 圧縮側 100 43.0 46.4 40.3 41.6 94% 圧縮側 150 - 32.6 36.6 38.3 - 引張側 100 49.7 68.9 43.2 48.0 87% 引張側 150 41.3 43.0 42.0 44.2 102%

※Pyは降伏荷重, Puは最大荷重



写真-1 載荷試験状況

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。

*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。



									_								
第1層	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.1	31.1	27.4	27.4	27.4	30.8	30.8	31.5	31.5	31.6	31.6	31.6
第Ⅱ層	31.3	31.3	31.3	26.7	26.7	23.9	23.9	20.8	20.8	20.8	24.4	24.4	28.7	28.7	31.5	31.5	31.5
第Ⅲ層	31.0	31.0	31.0	19.1	19.1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.4	17.2	17.2	21.4	21.4	30.9	30.9	30.9
第IV層	29.3	29.3	29.3	20.8	20.8	17.9	17.9	17.3	17.3	17.3	19.7	19.7	19.8	19.8	23.9	23.9	23.9
			$\overline{\Lambda}$												$\overline{\Lambda}$		
	2	200	T		1200											200	
	-		-														

図-5 圧縮強度分布の一例(供試体 T10 の場合)

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_c^{1/3} \tag{1}$$

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^の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。

$$f_t = 0.23 \cdot f'_c \,^{2/3} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{neak} = 140 \cdot f'_{c} {}^{1/2} \times 10^{-6}$$
 (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'。=30.4N/mm² 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⁴⁰,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/mm²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/mm²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/mm², 2 層目は 24.5N/mm², 3 層目は 17.5N/mm², 4 層目は 18.9N/mm²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



図-7 終局時の損傷状況

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。

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 の荷重一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 との荷重一変位関 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



写真-2 供試体 C10, C15, T15 の終局時の状況

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。 (3) 耐荷性能

図-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, 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



図-9 降伏荷重時の鉄筋降伏状況の一例(供試体 c10)







写真-3 最大荷重時の損傷状況(供試体 C10)

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 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

- 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.
- 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.
- 1 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】,2008.
- 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.