

# 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

～ 活動報告会 ～

北海道土木技術会  
コンクリート研究委員会

1

## 委員会の概要

### 委員会の概要

#### ●委員会名称

劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会

※平成22年度より小委員会として活動

#### ●メンバー構成

委員長 : 佐藤 靖彦(北海道大学大学院)

副委員長: 渡辺 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)

計27名の委員より構成

2

## 委員会の概要

### 委員会の目的と活動状況

鉄筋コンクリートの本質的な挙動を知るとともに、材料劣化がコンクリート構造物の構造性能に及ぼす影響について、その評価を可能とする知識の習得と研究を通じて委員自身の技術力を向上させることを目的としている。

- 材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する議論  
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Ⅰ期・Ⅱ期活動成果をもとに構造性能評価技術の現状を把握
- 非線形構造解析技術の習得  
構造性能を直接的に評価可能な照査技術として非線形有限要素解析に着目
- 積雪寒冷地特有の「凍害」に着目。文献収集や現状の点検・調査方法を整理  
構造性能を定量的に評価するための真に必要な点検データや材料劣化モデル構築を最終目標



### 中間報告書

- 劣化したコンクリート構造物の構造性能評価の重要性の啓蒙活動

3

## 委員会の概要

### WG構成

- WG1(構造解析)  
材料劣化が生じたRC部材への非線形FEM解析の適用性を検討し、実構造物に適用するための方法や課題を整理
- WG2(凍害評価)  
「凍害」に着目して、凍害劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能を評価可能な技術を検討
- WG3(普及啓発)  
委員会の活動意義や活動内容を、実務者・管理者を対象として広く紹介するために、HPの更新などで情報発信

4

## 委員会の概要

### WGメンバー構成

#### ●WG1(構造解析)

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

#### ●WG3(普及啓発)

坂本 智明(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)  
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)

#### ●WG2(凍害評価)

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

5

## 委員会での議論

### 維持管理とは？

コンクリート構造物の供用期間において、構造物の性能を許容範囲内に保持するための行為。

### 構造性能とは？

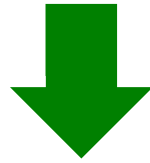
構造物に要求される性能。

一般に安全性，使用性，復旧性など。

耐久性は要求性能ではない？

6

材料劣化



維持管理

構造性能???

構造性能が???な理由

実態として材料の耐久性を確保  
するという補修行為が

= 維持管理

となっているから

## 材料劣化と構造性能を関係付ける意義

- 材料の耐久性を確保するだけで、構造物の安全性が確保される？
- 不必要な対策の回避？（合理化？）  
時間も費用も勿論有限であり、その効果は大きいはず。
- 逆に要対策が増える可能性も。

9

### そもそも凍害って構造性能に影響ある？

#### 凍害に対する認識

凍害で損傷しても構造物の端部が無くなるだけ？



#### 凍害が構造性能に影響

柱の鉄筋が露出する程の損傷



鉄筋腐食に比べて、コンクリート自体が劣化する凍害が構造性能に及ぼす影響に関する研究は少ない

北海道の委員会

最終目標として、積雪寒冷地特有の凍害で劣化したコンクリートの構造性能を定量的に評価する

10

### 目次

- 第1章 活動の背景と目的
- 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
- 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
- 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
- 第5章 今後の取り組みについて

## 中間報告書の概要

第1章 活動の背景と目的

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

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

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

第5章 今後の取り組みについて

# 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

### 【目的】

材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価の現状を把握する。

本委員会では、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)」の活動成果をもとに議論した。

- 用語の定義
- 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
- 材料劣化を考慮した非線形解析法の適用事例の整理

## 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

### (1) 鉄筋腐食

⇒鉄筋腐食の程度を表す指標(例えば, 質量減少率)と構造性能を関連付けた整理が行われている.

- ・鉄筋の付着特性
- ・曲げ耐力
- ・鉄筋の定着
- ・せん断耐力
- ・疲労耐力
- ・じん性能

### (2) アルカリシリカ反応(ASR)

⇒ASRの他, 凍害や化学的浸食などコンクリートの劣化に対しては, 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.

- ・鉄筋の付着特性
- ・曲げ耐力
- ・せん断耐力

15

## 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

### 既設構造物の性能評価の方法

(2013年制定 土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編])

#### ① 構造物の外観上のグレードによる方法

⇒外観上のグレードから間接的に性能を評価する方法. 半定量的な評価.

#### ② 設計での性能評価式による方法

⇒定量的な評価は可能であるが, 鉄筋コンクリート力学の仮定(平面保持, トラス理論等)が成立しない, 材料劣化による変状の程度が大きい場合に適用できない.

#### ③ 数値シミュレーション手法による方法

⇒材料特性の空間的なバラツキやひび割れの影響等を, 直接的に考慮して, 性能を定量的に評価することが可能となる.

16



## 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

### 文献調査

⇒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。

#### 材料劣化を考慮した非線形構造解析に関する文献調査リスト

整理番号	区分	文献題名	年次	出典先	種別
1	鋼材 腐食	鉄筋腐食によって損傷を受けたRCはり梁の挙動に関する研究	1989	JSCI	論文
2		鉄筋の腐食影響に伴うコンクリートのひびわれ進展解析	1997	JCI	論文
3		有限要素法による鉄筋の腐食したRC梁の耐力性能評価	1997	JCI	論文
4		引張主筋の腐食したRC梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究	1998	AIJ	論文
5		強制的に腐食させたRCボックスカルバートの縦荷重試験シミュレーション	2002	JCI	論文
6		鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響	2002	FAMI	報告
7		鉄筋腐食が鉄筋コンクリート複合部材の構造性能に及ぼす影響に関する研究	2003	JSCI	論文
8		鉄筋腐食を考慮したRCはり梁材のせん断耐力性能評価	2003	JCI	論文
9		鉄筋の腐食が鉄筋コンクリート部材の曲げ性能に及ぼす影響	2006	JSCI	論文
10		鉄筋の腐食分布がRCはり梁材の曲げ耐力性能に及ぼす影響	2008	JSCI	論文
11		腐食による鉄筋腐食を考慮したRC工の構造性能評価	2009	JCI	論文
12		腐食劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート部材の縦荷重試験と解析による評価	2010	JSCI	論文
13		引張力を受けて腐食したコンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化	2011	JCI	論文
14		新しい腐食劣化を考慮したRC工の鉄筋腐食を考慮した構造解析	2011	JSCI	論文
15	定着 不良	せん断鉄筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響	2004	JCI	論文
16		鉄筋の定着不良を有するRC梁のせん断耐力性能の評価	2005	JCI	論文
17		せん断鉄筋に定着不良を有するRCはりのせん断耐力性能解析	2006	JSCI	論文
18		主筋に定着不良を有するオープンフレームの耐力性能	2007	JCI	論文
19	コン クリ ート	ASRで劣化した梁部材の縦荷重試験に関する実験および解析的研究	2007	JCI	論文
20		アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張挙動解析	2007	JSCI	論文
21		ASRを生じたRCはりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価	2009	JCI	論文
22		コンクリート構造物におけるASR膨張と損傷後の構造性能の評価	2011	JSCI	論文
23	ASR劣化の非線形解析によるRCはり梁の耐力性能評価に関する基礎的研究	2012	JCI	論文	
24	凍結融解作用により劣化したRCはり部材の非線形有限要素法による構造性能評価	2013	JCI	論文	
25	コンクリート構造物の縦荷重試験と有限要素法によるシミュレーション	2004	JCI	委員会報告	
26	凍結融解作用に対するコンクリート構造物の性能解析型設計—設計と施工の現状と将来展望—	2005	JSCI	委員会報告	
27	材料劣化を考慮したRC梁の縦荷重試験に関する一検討	2006	JSCI	論文	
28	材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2006	JSCI	委員会報告	
29	コンクリート構造物の縦荷重試験—時空間における設計の課題と将来展望—	2008	JSCI	委員会報告	
30	鋼・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	2009	JSCI	委員会報告	

#### 文献調査シート(巻末の付属資料に掲載)

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法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、pp901-906
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、分散鉄筋一分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素法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、せん断耐力が低下している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、せん断耐力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されている。
解析手法の概要	2次元非線形有限要素法(分散ひび割れ一分散鉄筋モデル)
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。

図-1 供試体の形状寸法および配筋状況  
図-2 有限要素モデル(主要分割図)  
図-3 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

解説  
(主な成果に関する表や解説)

17

## 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

### (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の低下
- ・鉄筋の腐食形態に応じた弾性係数や降伏強度の低減
- ・付着剛性や付着強度の低下、せん断ひずみ-せん断応力関係の変化
- ・付着パラメータによる制御
- ・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:
- ・材料特性値(圧縮強度、弾性係数、引張強度)の低減
  - ・初期ひび割れの導入による考慮。
- 凍結融解作用によるコンクリートの劣化:
- ・材料特性値(圧縮強度、弾性係数、引張強度)の低減

18

# 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

### 【目的】

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手法として、非線形有限要素解析を適切に活用することを目指す。

本委員会では、基礎的な知識を習得するために、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。

- 用語の定義
- RC梁の載荷実験
- RC梁の載荷実験を対象としたブラインド解析
- RC部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討
- RC梁の載荷実験を対象とした数値解析的検討

### 3.3 RC梁の載荷実験

#### 破壊形式の異なるRC梁3体の載荷実験

⇒鉄筋コンクリート部材の破壊に対する理解を深める。

載荷実験においては、以下の項目について、観察および計測を実施した。

- 1) 破壊状況
- 2) ひび割れの進展状況
- 3) 荷重-変位関係
- 4) 鉄筋のひずみ

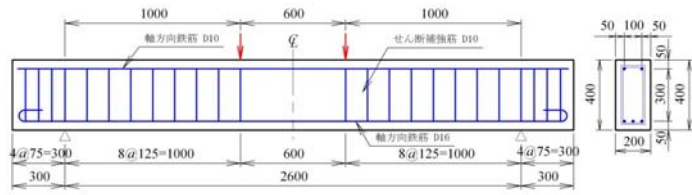


図3.3.1 曲げ破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

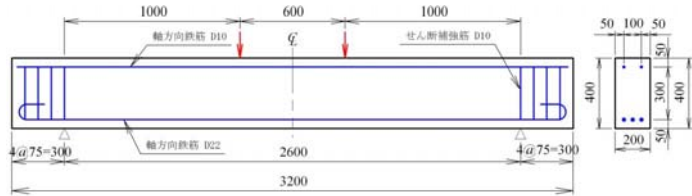


図3.3.2 せん断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況

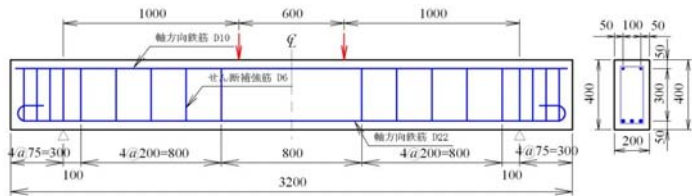


図3.3.3 せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の形状寸法および配筋状況 21

### 3.3 RC梁の載荷実験

#### RC部材が破壊に至るまでのプロセスを把握

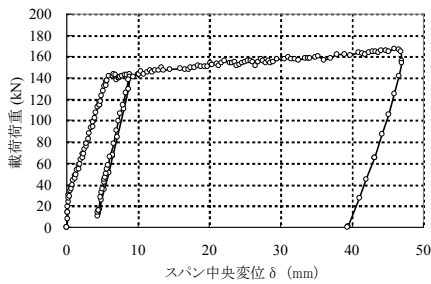


図3.3.10 曲げ破壊型供試体の載荷荷重-スパン中央変位関係

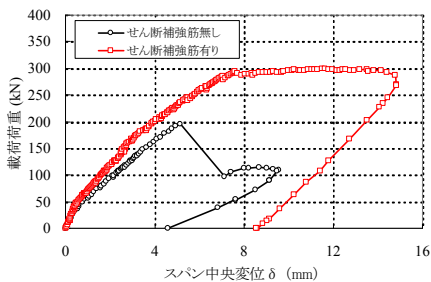


図3.3.11 せん断破壊型供試体の載荷荷重-スパン中央変位関係



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

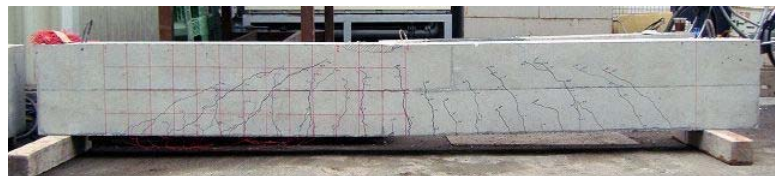


写真3.3.11 せん断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の実験終了後の損傷状況 22

## 3.4 RC梁の荷重実験を対象としたブラインド解析

### 本検討の概要

- ・荷重実験を対象に、複数の委員(設計実務者)が実験結果を見ずに解析を実施。
- ・市販されている3つの汎用構造解析プログラムを利用。

表 3.4.1 各解析者が適用した解析手法の仕様一覧

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

23

## 3.4 RC梁の荷重実験を対象としたブラインド解析

### 解析結果

⇒解析者によって、結果にばらつきが見られた。

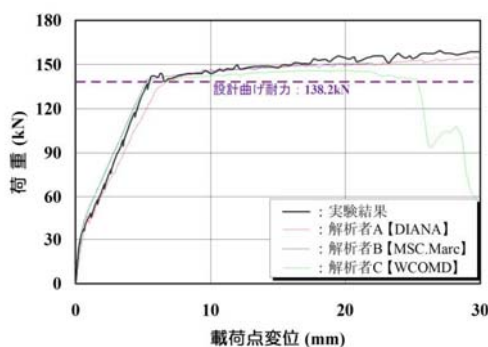


図 3.4.8 載荷点位置における荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果の比較

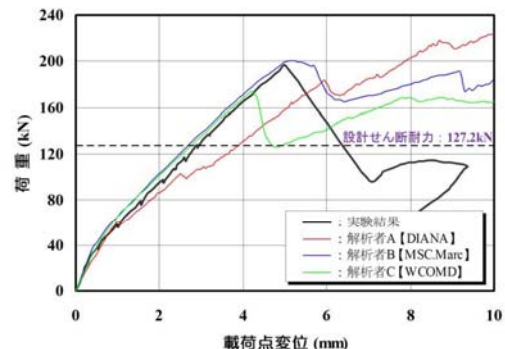
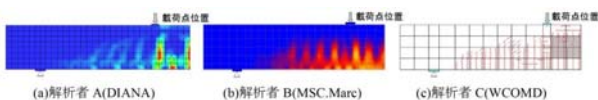
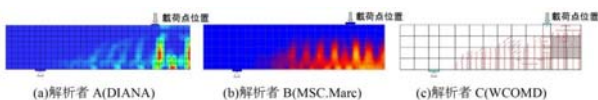


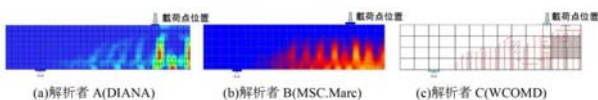
図 3.4.10 載荷点位置における荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果の比較



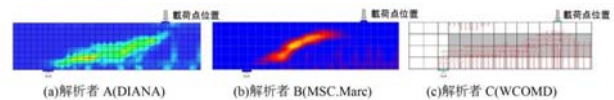
(a)解析者 A(DIANA)



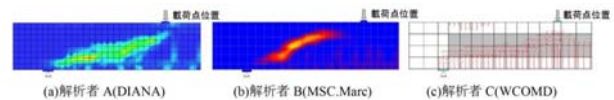
(b)解析者 B(MSC.Marc)



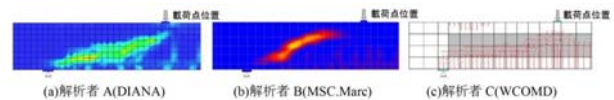
(c)解析者 C(WCOMD)



(a)解析者 A(DIANA)



(b)解析者 B(MSC.Marc)



(c)解析者 C(WCOMD)

- ・材料構成モデルやその組合せ、モデル化手法の差異が影響？
- ⇒鉄筋コンクリート部材として最も基礎的な、一軸引張を受けるRC部材を対象にモデル化が解析結果に及ぼす影響を検討することとした。

24



## 3.5 RC部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討

### 本検討の概要

鉄筋およびコンクリートについて、異なるモデル化手法を用いた場合の解析を実施し、その違いが解析結果に及ぼす影響を検討。

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

- ・離散的に表現する方法(離散型モデル)
- ・有限要素内に一様に分布させる方法(分散型モデル)

によるモデル化手法がある。

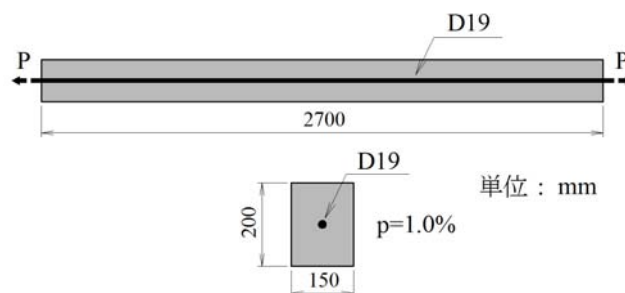


図 3.5.1 一軸引張供試体の形状寸法および配筋状況

25

## 3.5 RC部材の一軸引張挙動に着目した数値解析的検討

### (1) 分散ひび割れ-分散鉄筋の解析モデル

- ・要素分割数の影響
- ・付着パラメータの影響



図 3.5.2 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルの要素分割図の一例

### (2) 分散ひび割れ-離散鉄筋の解析モデル

- ・引張軟化特性の影響
- ・付着構成則の影響
- ・最大付着応力の影響
- ・付着軟化域の影響

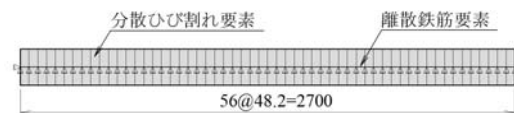


図 3.5.5 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルの要素分割図

### (3) 離散ひび割れ-離散鉄筋の解析モデル

- ・付着構成則の影響
- ・付着喪失区間の影響
- ・最大付着応力の影響
- ・付着軟化域の影響

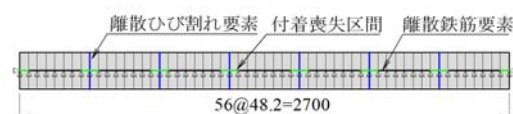


図 3.5.7 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルの要素分割図

⇒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を把握。  
ここで得られた知見を踏まえて、RC梁の載荷実験を再度検討することとした。

26

## 3.6 RC梁の荷重実験を対象とした数値解析的検討

### 本検討の概要

- RC梁の荷重実験で実施した3体のRC梁を対象にFEM解析を実施.

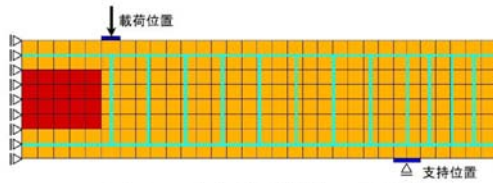


図 3.6.6 曲げ破壊型供試体の要素分割図

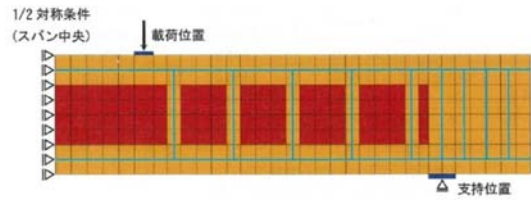


図 3.6.8 セン断補強鉄筋を有するせん断破壊型供試体の要素分割図

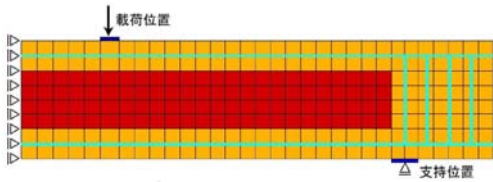


図 3.6.7 セン断補強鉄筋の無いせん断破壊型供試体の要素分割図



- 解析結果と実験結果を比較することで、損傷の進展に対する、解析による再現性を確認.

- 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

## 3.6 RC梁の荷重実験を対象とした数値解析的検討

### 実験結果と解析結果の比較

- 荷重-変位関係

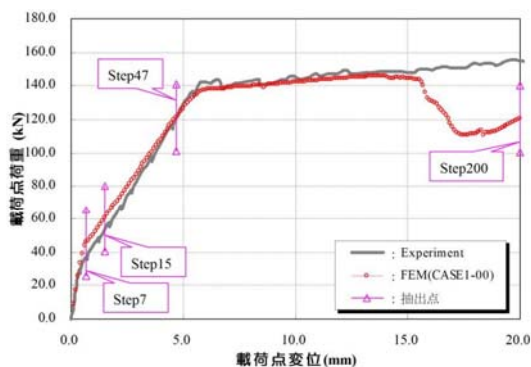


図 3.6.9 載荷点荷重-変位関係の比較および変化点の抽出

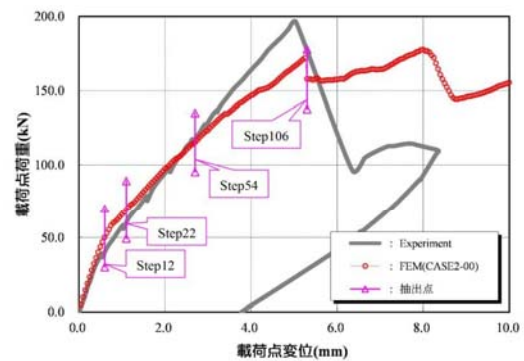


図 3.6.24 載荷点荷重-変位関係の比較および変化点の抽出

- ひび割れの進展(主ひずみコンター図・ベクトル図)

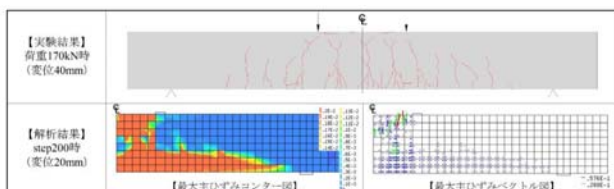


図 3.6.10 ひび割れ性状および進展の比較

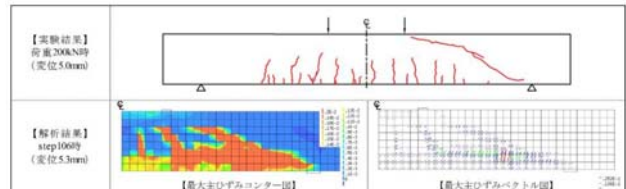


図 3.6.25 ひび割れ性状および進展の比較

## 3.6 RC梁の荷重実験を対象とした数値解析的検討

### 実験結果と解析結果の比較

#### ・軸方向鉄筋のひずみ

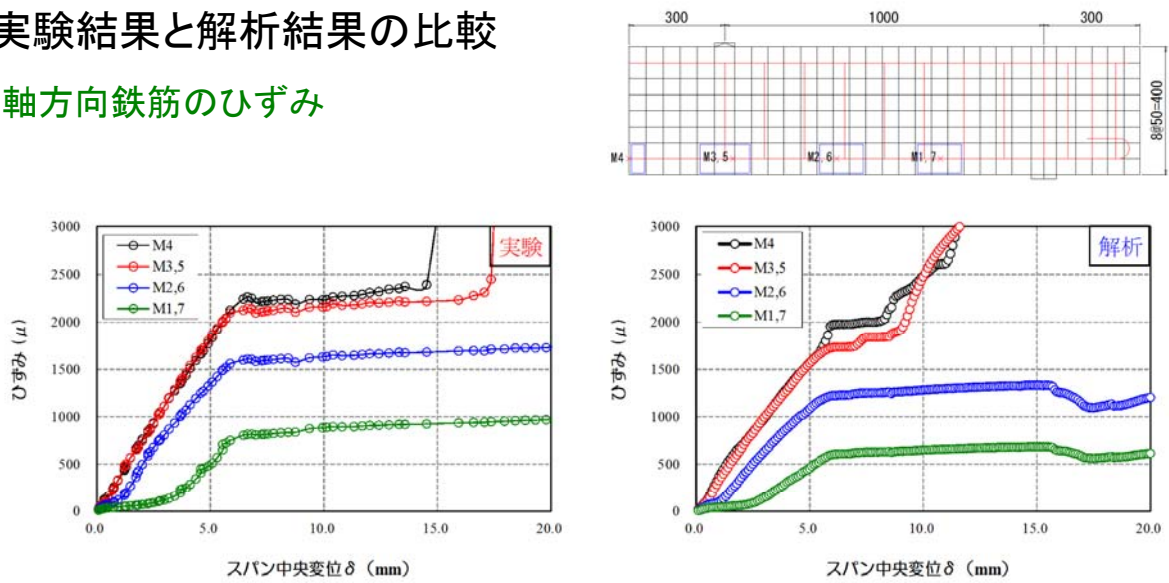


図 3.6.15 軸方向鉄筋のひずみ—スパン中央変位関係

⇒実験結果と解析結果の比較から、解析結果に対して、どのような指標で損傷の進展を把握できるのかを確認。

## 第4章

凍害で劣化したコンクリートおよび  
構造物の構造性能評価に関する現状

## 4.1 はじめに

### 【目的】

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に、真に必要な点検や調査手法を提案する

中間報告では、まず現状の把握として事例収集

- 凍害による劣化メカニズムと構造性能の整理
- 凍害による劣化現象の事例（異構造物における劣化現象の異態）
- 点検における調査の現状
- 構造性能評価に関する検討事例の紹介

31

## 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

⇒凍害の劣化メカニズム、劣化の進行過程と各過程における現象を整理

### (2) 凍害の劣化過程

⇒凍害による劣化過程の定義を整理

### (3) 複合劣化

⇒複合劣化の定義や相関図を整理

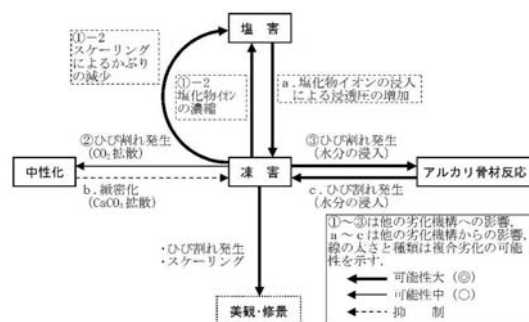


図 4.2.2 複合劣化の相関図<sup>1)</sup>

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

32



## 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) コンクリート構造物の構造性能

#### 凍害で劣化した構造物の構造性能評価の現状

- ・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
- ・スケーリング深さやひび割れ発生状況から性能低下を予測することは困難
- ・構造物の外観上のグレードに対応した評価を行い、対策の可否を判定

●コンクリートの劣化が初期の段階(鉄筋に達していない段階)  
⇒コンクリート表面近傍の圧縮強度や弾性係数を低下させて評価

●コンクリートの劣化が鉄筋まで進行した段階  
⇒コンクリート断面の欠損に加え、鉄筋量および付着の低減を考慮して評価

#### 【鉄筋コンクリート床版】

凍結融解作用により、砂利化へと進展し、押し抜きせん断破壊によって床版が陥落する事例が報告。床版上面が1cm程度劣化で、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。

⇒輪荷重を受け持つ床版や桁は、構造性能に大きな影響を及ぼす！

33

## 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

⇒供用中の実構造物を対象として整理

表 4.3.1 事例収集のフォーマット

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

34

## 4.3 凍害による劣化現象の事例

### (2) 道路橋における凍害を受けやすい部位

⇒劣化の領域と部位が重要であるため、3次的に事例を整理

表 4.3.2 道路橋における凍害を受けやすい部位

凍害を受けやすい部位		凍害発生の主な要因	事例写真の図番号	
上部工	橋面工	地覆・縁石	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日射や風を直接受ける部位であり、凍結融解回数が多い</li> <li>・温度変化を受けやすい部材形状（部材断面が小、隅角部）</li> <li>・凍結防止剤の影響を直接受ける部位</li> </ul>	図 4.3.1
		地覆支柱部	・防護柵支柱内や支柱後埋め部への滞水と凍結膨張	
	橋体工	張出床版端部	・日射や風を直接受ける部位であり、凍結融解回数が多い	図 4.3.2
		床版上面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・舗装下の RC 床版上は排水勾配が不足し滞水しやすい</li> <li>・凍結防止剤からの漏水の影響を受ける部位</li> </ul>	図 4.3.3
桁下面、端部		<ul style="list-style-type: none"> <li>・桁下は結露水の凍結</li> <li>・温度変化を受けやすい耳桁隅角部</li> <li>・遊間からの漏水の影響を受ける部位</li> </ul>	図 4.3.4	
下部工	橋台・橋脚	杏座隅角部	・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	図 4.3.5
		躯体側面隅角部	・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 4.3.6
	杏座漏水部	・桁掛違い部伸縮装置の排水機能不良や排水管の損傷など、漏水による水分供給	図 4.3.7	
	躯体側面漏水部			
	躯体側面水際部	・河川水等の界面付近の水分供給と凍結融解	図 4.3.8	
支承アンカー部	・支承アンカーボルト箱抜内への滞水と凍結膨張			

35

## 4.3 凍害による劣化現象の事例

### 劣化事例①: 橋体工 (鋼橋床版)

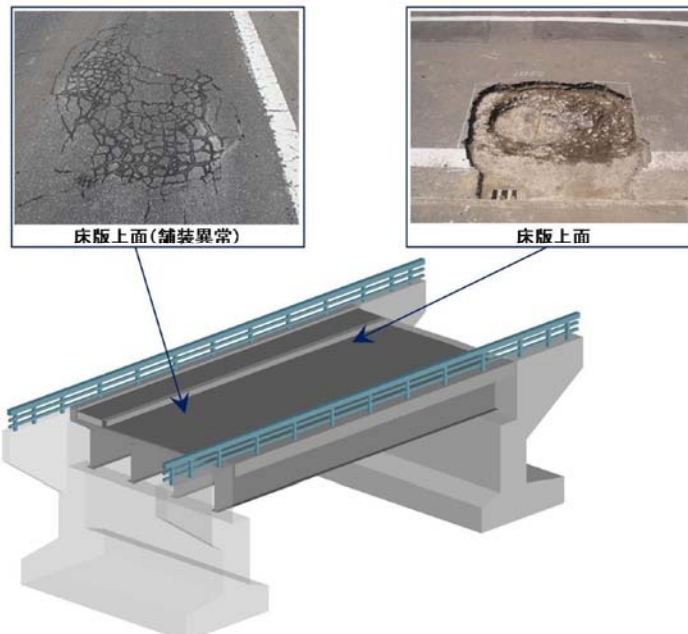


図 4.3.3 道路橋の凍害による劣化事例 (3/8) 橋体工 [鋼橋床版②]

36

## 4.3 凍害による劣化現象の事例

### 劣化事例②: 橋体工(コンクリート橋主桁)

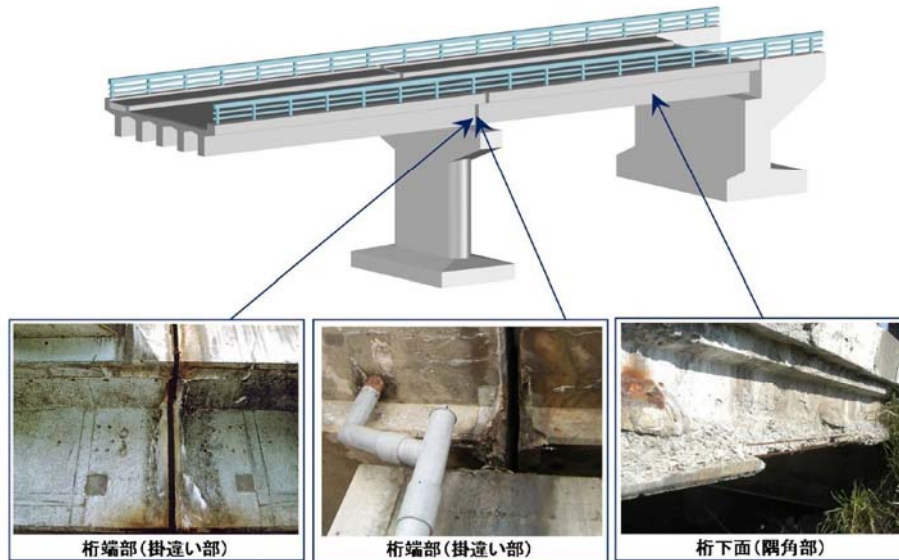


図 4.3.4 道路橋の凍害による劣化事例(4/8) 橋体工[コンクリート橋主桁]

## 4.3 凍害による劣化現象の事例

### 劣化事例③: 橋台



図 4.3.5 道路橋の凍害による劣化事例(5/8) 橋台

## 4.3 凍害による劣化現象の事例

### 劣化事例④: 橋脚



図 4.3.6 道路橋の凍害による劣化事例 (6/8) 橋脚①

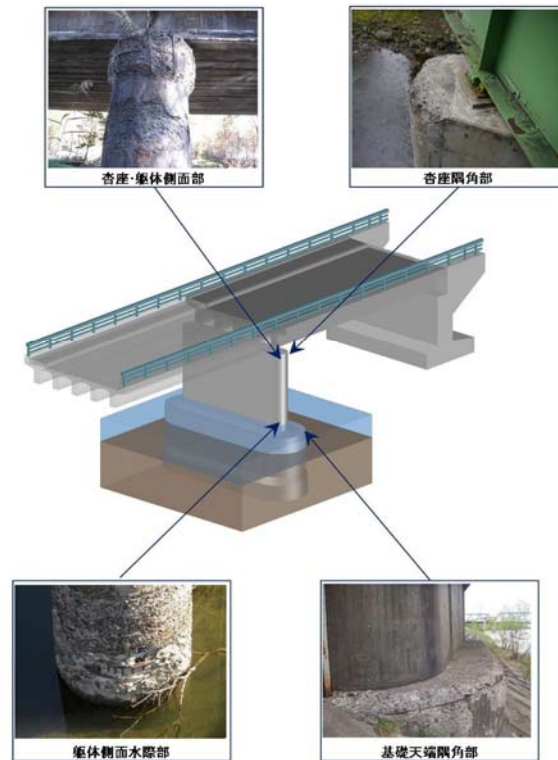


図 4.3.7 道路橋の凍害による劣化事例 (7/8) 橋脚②

## 4.4 点検における調査の現状

### (1) 点検における調査の現状

- ・凍害で劣化したコンクリート構造物を点検する上では、劣化した領域または部位を把握すること、劣化した範囲(深さ)を把握することが重要
- ・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
- ・現状の調査は、構造性能の評価に使用できるか否かは分からない

表 4.4.1 詳細調査の目的、項目と得られる情報の例<sup>8)</sup>

調査目的	調査項目	得られる情報
凍害の程度の確認	スケールリング (剥離度)	美観, 断面減少量
	微細ひび割れ (相対動弾性係数)	美観, 幅・深さ・密度, 凍害の進展範囲
	ポップアウト	美観, 骨材の品質
	コンクリート強度, 弾性係数	コンクリート強度, 部材の剛性, 耐力
	鋼材の位置 (かぶり) と腐食状況	腐食量 (劣化グレード), 耐力
凍害の進行の予測	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
	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

※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より

中間報告では、実務で一般に行われている詳細調査手法を整理

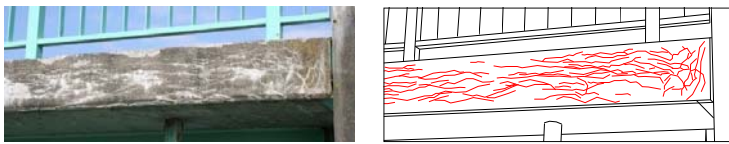
- 1) 目視およびたたき調査
- 2) スケールリング深さの計測
- 3) コンクリート強度特性
- 4) 蛍光エポキシ樹脂含浸法
- 5) 超音波法



## 4.4 点検における調査の現状

### 1) 目視およびたつき調査

- ・打音法による変状領域の特定
- ・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ル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
- ・スケールリング: ASTM-C-672 目視評価基準
- ・課題: 劣化の程度も含め、調査員による個人差が生じる



【ひび割れ解析ソフトによる図化】

【ASTM-C-672に準じた目視評価基準】

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	

41

## 4.4 点検における調査の現状

### 2) スケールリング深さの計測

- ・鋼尺やノギス等による深さ計測
- ・スケールリング量 = 剥離度

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

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ルリング面積の割合

$S$ : 枠内におけるスケールリング面積(cm<sup>2</sup>)

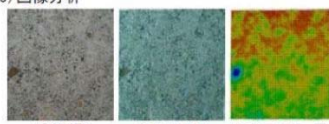
- ・デジタルカメラ写真 + 3次元画像処理ソフト
- ・課題: 真の劣化深さ(微細ひび割れ範囲)は把握不可

1) 写真撮影



(正面から) (左側から) (右側から)

3) 画像分析



(可視画像) (3次元画像) (高さコンター図)

【3次元画像処理ソフトによるスケールリング深さの算出】



枠(50×50cm)



平面図



断面図(断面)

※10箇所の平均

【剥離度の測定状況および測定要領】

42

## 4.4 点検における調査の現状

### 4) 蛍光エポキシ樹脂含浸法

- ・コンクリート内部の微細なひび割れを含めた劣化深さを把握する手法
- ・ひび割れ幅 $12\mu\text{m}$ ( $0.012\text{mm}$ )まで観察可能
- ・課題: コア採取による調査であるため、局所的な情報でしか得られない



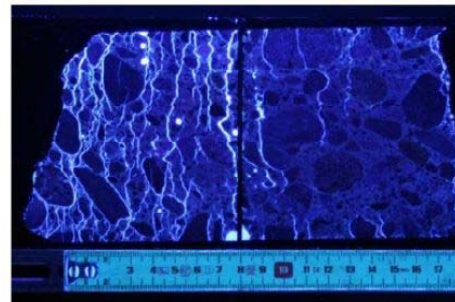
【蛍光染料・エポキシ樹脂】



【真空脱泡装置】



【可視光】



【紫外線照射】

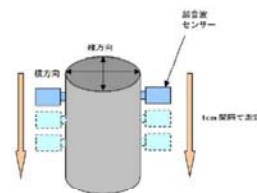
写真 4. 4. 7 凍害で劣化したコンクリートの微細ひび割れ観察事例

43

## 4.4 点検における調査の現状

### 5) 超音波法

- ・劣化深さを把握する手法
- ・透過法による超音波伝播速度の測定 (⇒ 相対動弾性係数の算出)
- ・超音波トモグラフィ法 (非破壊)
- ・課題: コア採取による調査であるため、局所的な情報でしか得られない



【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

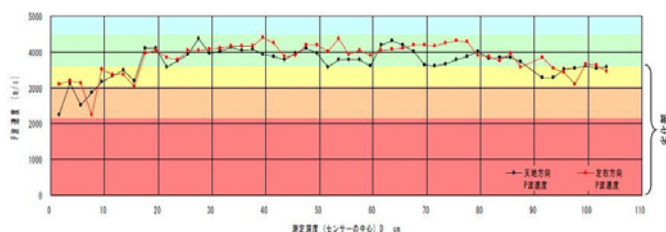


図 4. 4. 4 透過法による超音波伝播速度の測定結果の一例

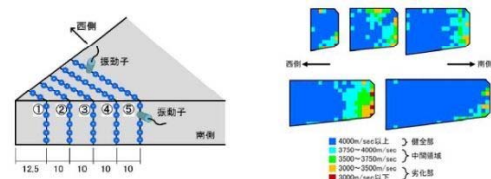


図 4. 4. 5 超音波トモグラフィ法による診断の一例 (河川樋門)

44

## 4.5 構造性能評価に関する検討事例

### 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 非線形有限要素法による検討事例の紹介

①RCはり部材を対象とした、圧縮領域のコンクリートの劣化が曲げ耐力や疲労寿命に及ぼす影響を把握した事例

②RCはり部材を対象とした、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した事例

45

## 4.5 構造性能評価に関する検討事例

### ① 検討事例(その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梁部材の解析を行い、**曲げ耐力・疲労寿命**に着目して構造性能の低下の影響を検討

【ポイント】 ・劣化の影響は、圧縮強度とヤング係数の低減や断面欠損で表現

【検討結果】 ・断面欠損が生じるほどの劣化では、曲げ耐力の低下は大きい  
・疲労寿命は圧縮強度の低下と劣化範囲の影響を大きく受ける  
⇒凍害による劣化は、床版等の薄板材料に与える影響は大きい

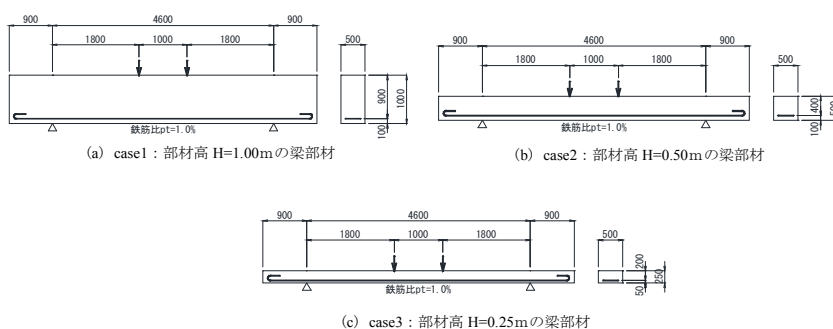


図 4.5.1 梁部材の形状寸法

表 4.5.3 検討ケース一覧

	部材高H	$\alpha$ ( $f_c$ の低下割合)	圧縮領域からの 劣化範囲	備考	
case 1-1	1.00m	1	なし	健全ケース	
case 1-2		2/3	H/4	劣化モデル1	
case 1-3		1/3	H/2		
case 1-4		1/3	H/4		
case 1-5		-	-	H/2	劣化モデル2
case 1-6		-	0.1m(断面欠損)		
case 2-1	0.50m	1	なし	健全ケース	
case 2-2		2/3	H/4	劣化モデル1	
case 2-3		1/3	H/2		
case 2-4		1/3	H/4		
case 2-5		-	-	H/2	劣化モデル2
case 2-6		-	0.1m(断面欠損)		
case 3-1	0.25m	1	なし	健全ケース	
case 3-2		2/3	H/4	劣化モデル1	
case 3-3		1/3	H/2		
case 3-4		1/3	H/4		
case 3-5		-	-	H/2	劣化モデル2
case 3-6		-	0.1m(断面欠損)		

46

## 4.5 構造性能評価に関する検討事例

### ② 検討事例(その2)

【検討概要】 凍害で劣化した範囲と位置を変数とした梁部材の解析を行い、荷重実験と比較して、非線形解析の適用性や適用限界について検討

【ポイント】 ・劣化の影響は、圧縮強度とヤング係数の低減で表現  
※超音波伝播速度から圧縮強度を推定し、空間的なばらつきを考慮

【検討結果】 ・劣化の程度により解析による再現性の程度が異なる  
・劣化の程度が軽微の場合は実験結果と概ね一致するが、劣化の程度が大きい場合は剛性や破壊形式、最大荷重等が解析とは異なる  
⇒劣化の程度が大きいと、実験結果を精度良く再現することは困難  
※解決方法:凍害で劣化したコンクリートの材料構成則の構築

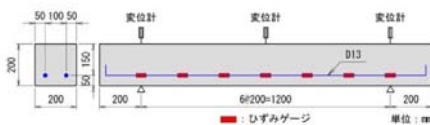


図 4.5.6 供試体の形状寸法および配筋状況

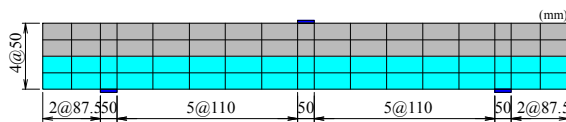


図 4.5.7 有限要素モデル (要素分割図)

表 4.5.4 供試体名称、実験・解析結果等一覧

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

※ $P_y$ は降伏荷重、 $P_u$ は最大荷重

47

## 今後の取り組み

### 第 1 期活動の総括

- 材料劣化 と 構造性能 をリンクさせる必要性
- 劣化要因には着目せず、劣化した結果として現れる現象がコンクリートのひび割れや摩耗、鋼材腐食のいずれかであるため、材料損傷が構造性能に及ぼす影響について調査・分析を実施
- 構造性能を定量的に評価するための方法として、非線形有限要素解析法に着目し、種々の検討を通じて正しい利用方法を習得

48



## 第 2 期活動の目標

### 「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

- ★凍害は積雪寒冷地特有の劣化要因
- ★凍害で劣化した構造物の構造性能を定量的に評価する手法が未確立
- ★実態として凍害で劣化した構造物が多数存在

## 解決すべき課題

### 構造性能を評価するための点検(調査) 手法の検討

- 構造性能を評価するために真に必要となる情報(指標)を明らかにする
- 劣化の空間的な分布を把握するための方法を検討
  - ・ 点の情報で構造物の構造性能を推定することは困難
  - ・ 劣化のばらつき
  - ・ 劣化した部位, 領域, 深さの情報が必要不可欠

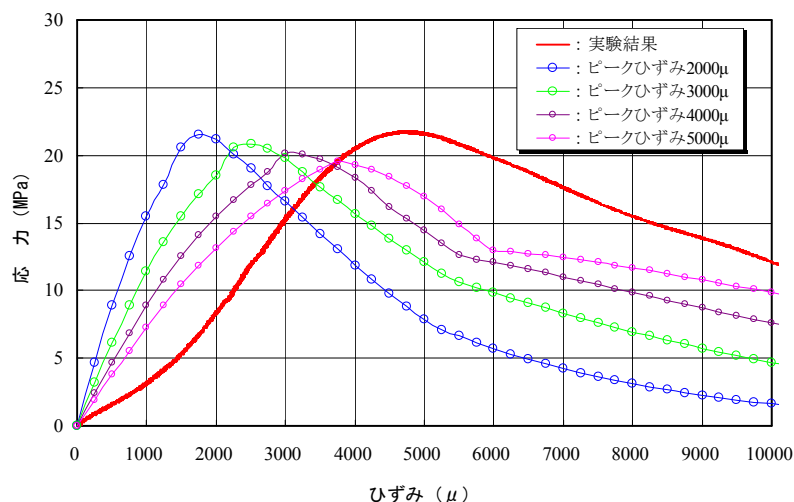
## 解決すべき課題

### 構造性能を定量的に評価するための方法

- 設計マクロ式による方法または非線形解析法による方法  
⇒各評価方法の適用範囲を設定
- 用いる評価方法によって必要な点検データが異なるため  
評価方法を判断・選択するための点検(調査)も必要
- 非線形解析法を念頭に置いた場合の凍害で劣化したコンクリートの材料構成モデルの構築

## 解決すべき課題

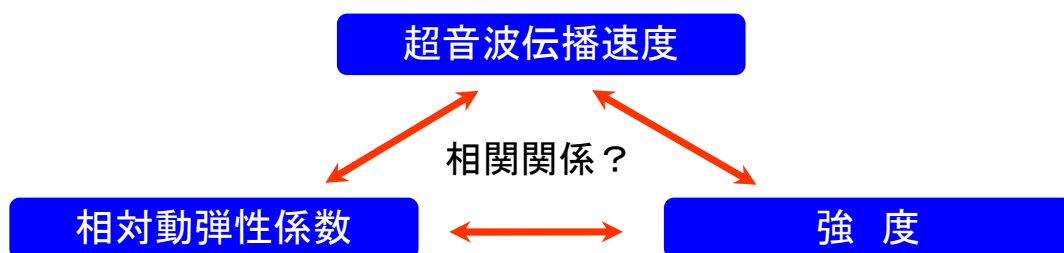
- 材料構成モデルを構築する必要性
  - ・ 圧縮構成モデル
  - ・ 引張構成モデル
  - ・ せん断モデル
  - ・ 引張剛性モデル



凍害で劣化したコンクリートの一軸圧縮応力-ひずみ関係

### 解決すべき課題

- ❑ 凍害で劣化したコンクリートの力学特性を表現可能な劣化指標を見出し、劣化指標と力学特性の関係を明確化
- ❑ 劣化指標を用いたコンクリート構造物の劣化領域と劣化度の表現方法



### 解決すべき課題

#### 将来の性能低下の予測の方法

- ❑ 環境条件(最低温度, 凍結融解回数, 降雨量, 積雪量等)や部材内部の温度や水分の分布といった情報が必要
- ❑ 構造性能評価は抵抗側の評価というイメージが強い. 構造物の構造性能を評価するためには, 入力(Load)・応答(Response)・抵抗(Resistance)の各々に着目した検討を行って, それらの相互関係を明らかにする必要がある.

## 今後の取り組み

### 具体的な取り組み

実務者向けの実践的な技術資料の作成



実構造物を想定した構造性能評価の  
ケーススタディーを実施

55

## 今後の取り組み

### 具体的な取り組み

普及活動および啓発活動(積極的な情報発信)

- 本委員会の活動を広く紹介するための普及・啓発活動を推進
  - ・ 委員会ホームページの運営・管理  
※中間報告書もPDF形式でアップする予定
  - ・ 講習会および出前講座の企画  
※実務者や地方自治体の管理者らを想定
  - ・ 関連する分野の講習会情報等の発信

56

# 今後の取り組み

## 委員会ホームページの紹介



<http://concom-h.com/main/subcommittee/rekka/>

## 関連する情報

書籍名: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

発行者:北海道土木技術会  
コンクリート研究委員会

発行日:平成25年12月

価格:3,000円(税込み)

構成:共通編, 構造物編, 劣化機構編  
材料・施工編, 耐震補強編

購入方法:ドーコン(構造部内)

TEL:011-801-1540

