

# 論文 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

上原子 晶久\*1・岩城 一郎\*2・鈴木 基行\*3

**要旨：** 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。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のかを推定した。

**キーワード：** 塩害, 劣化調査, PC橋梁, 鋼材腐食, 健全度, FEM解析

## 1. はじめに

塩害などにより鋼材腐食が生じた鉄筋コンクリート構造物においては、曲げ性状やせん断性状などの構造性能を精度良く予測するための試みが近年になり増加している。例えば、齊藤らは、剛体ばねモデルにより主鉄筋腐食後の曲げ性状を解析的に評価することを行っている<sup>1)</sup>。さらに、村上らは、主鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートはりにおいて、その曲げ残存耐荷性状を2次元非線形有限要素解析で評価する手法の提案を行っている<sup>2)</sup>。以上のみならず、鋼材腐食を適切に考慮しながら鉄筋コンクリート部材における力学性能の低下を予測する研究については、文献<sup>3)</sup>にまとめられているように、これまで数多く実施されている。しかしながら、以上で実施されている解析的、あるいは実験的検討では、そのほとんどが実験室内で載荷実験をできるような数メートルオーダーの部材を対象にしている。さらに、鋼材腐食は電食試験により促進的に与えたものが大半である。すなわち、数十メートルオーダーとなる実際の構造物を対象にし、さらには海洋からの飛来塩分がコンクリート内へ拡散浸透することによる鋼材腐食を考慮した研究事例が乏しいと著者らは考えている。

以上の背景の下、本論文では著しい塩害劣化を受けて解体されたプレストレストコンクリート(以下PCとする)製の道路橋上部工の調査研究結果に基づき、塩害により鋼材腐食が生じたPC上部工の残存性能を予測する一つの手法を提案することにした。提案手法の概要は以下の通りである。

- a) 健全度調査の結果、得られた健全度(0.5から5.5までの評点)とPC鋼材腐食量との関係を仮定する。
- b) 引張試験により得られたPC鋼材の機械的性質と鋼材腐食量との関係を定式化する。
- c) 以上a)とb)を用いて、健全度ごとにPC鋼材の応力-ひずみ関係を導出する。

- d) 以上c)で得られた応力-ひずみ関係を3次元非線形有限要素解析に適用する。解析で得られた結果より、残存性能を推定する。

## 2. 解体調査結果の概要

本章で記載した内容は、すでに著者らの既往の研究にて報告されている<sup>4)~6)</sup>。詳しい内容は、それらの文献に譲り本章では概要のみを述べる。

### 2.1 対象橋梁

対象となった橋梁は青森県日本海沿岸に立地していた宇名原橋である。1976年に供用が開始され、著しい塩害劣化が原因で2006年に解体された。上部工の断面図などを図-1と図-2に示す。これらの図に示すように、本橋の上部工は6つのPC主桁が連なっており、さらに主桁は4つのブロックが連結されている。一方、2006年の解体前に実施した健全度調査結果を図-3に示す。健全度は、表-1に示すように構造物外観の目視の状態により判断されるものである。具体的には0.5から5.5で点数化されており、劣化が進行するに従って5.5から点数が減じられるようになっている。以上は、青森県の橋梁点検マニュアルに従っている。図-3からわかるように、解体時の健全度が1.0となっているブロックがあることから内部鋼材の腐食がかなり進行している状況であることが外観からも確認することができた。

### 2.2 鋼材の腐食特性調査

解体ブロックから採取したPC鋼材について鋼材の質量減少率を測定した。さらに、質量減少率が概ね5%以上のPC鋼材を対象に引張試験を実施した。以上の結果を引張強度、0.2%降伏強度、破断伸び、並びにヤング係数の残存率と質量減少率との関係として図-4に示す。ここで、残存率とは健全鋼材に対する腐食鋼材の比である。この図より、本調査で採取されたPC鋼材は概ね20%程度の質量減少率の範囲にあることがわかる。同図に、

\*1 弘前大学大学院 理工学研究科助教 工博 (正会員)

\*2 日本大学 工学部土木工学科准教授 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

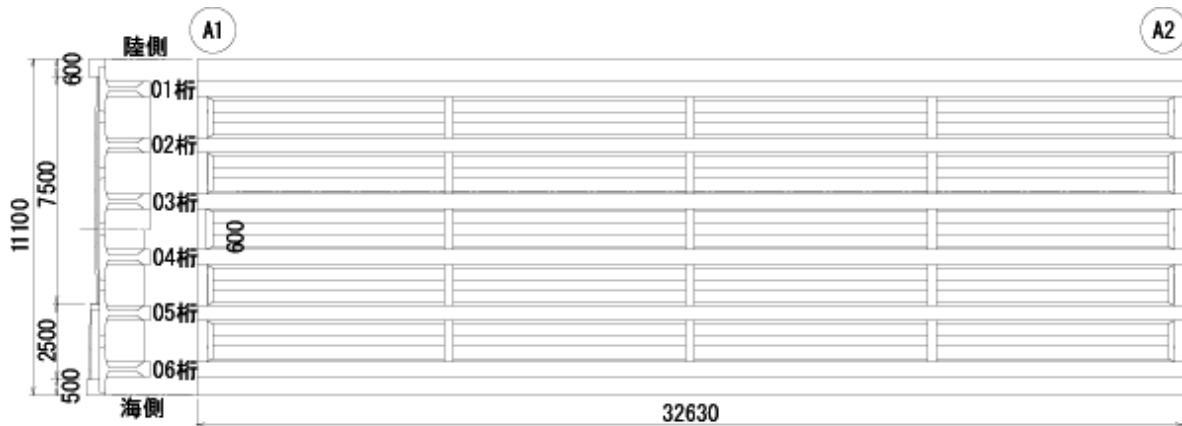


図-1 上部工の断面図と展開図(単位:mm)

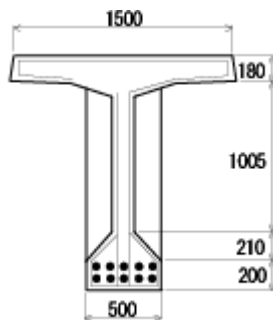


図-2 主桁中央の断面図(単位:mm)

同様の調査研究の先行事例である、暮坪陸橋(山形県)における PC 鋼材の試験結果<sup>7)</sup>を併せてプロットした。この図より、宇名原橋の調査結果は暮坪陸橋のそれとほぼ同様の傾向を有していることが確認された。

### 3. 残存性能予測のための定式化

#### 3.1 健全度と鋼材腐食量との関係

以上のデータをもとに、図-5に PC 鋼材の質量減少率の頻度分布を健全度ごとに示す。この図より、健全度が 2.0 と評価される場合には、鋼材の平均質量減少率は 0% から約 20% までに広く分布していることがわかる。一方で健全度が 3.0 以上となれば、平均質量減少率は概ね 0% となることが同図より明らかである。すなわち、健全度が 3.0 以上であれば、上部工内部で PC 鋼材が腐食している頻度が低いことが類推される。以上を考慮して、本研究で仮定した健全度と PC 鋼材の質量減少率との関係を表-2 に示す。本調査結果では、解体時の都合により、健全度が 1.5 以下の PC 鋼材の腐食特性データが得られていない。従って、本調査で得られた健全度が 2.0 までは、質量減少率が 0% を超えかつ 20% 未満に対応し、それ以上については健全度が 1.5 以下の場合に対応するものとした。健全度が 1.5 以下の場合、図-4 に示す暮坪陸橋における試験データを参考にして各健全度における境界値を仮定した。

一方、表-1 より健全度が 3.0 の場合には、鋼材腐食



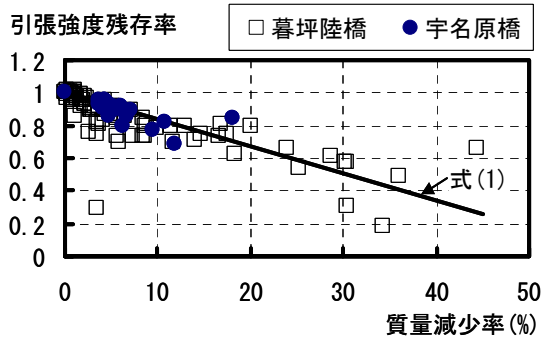
図-3 解体前に実施した健全度調査結果

表-1 健全度の判定基準<sup>4)</sup>

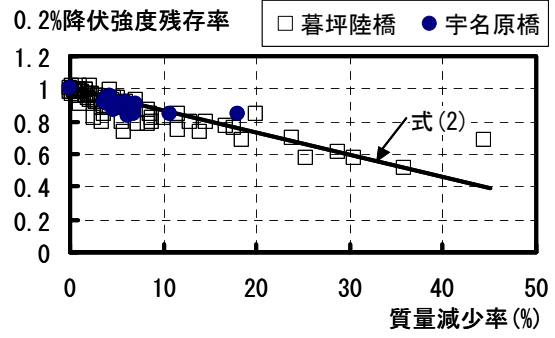
健全度	目視の状態
潜伏期	5.5-4.5
進展期	4.5-3.5
加速期前期	3.5-2.5
加速期後期	2.5-1.5
劣化期	1.5-0.5

外観変化はなし  
 少数の腐食ひび割れ、浮きが見られる。  
 多数の腐食ひび割れ、浮きが見られる。剥離なども見られる。  
 ひび割れが大きい、錆汁が顕著である。

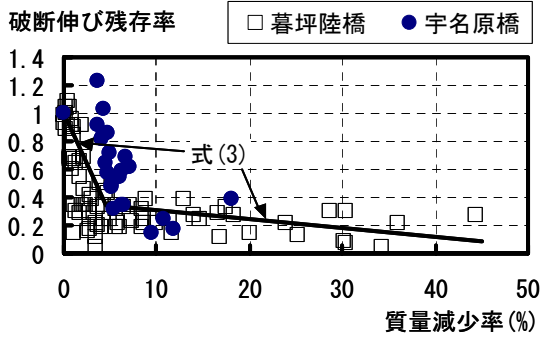
が生じていることになる。従って、表-2 に示すように、健全度 3.0 以上で PC 鋼材の平均質量減少率が 0% となるのは、健全度評価結果に即していないといえる。従って、以上については質量減少率の測定結果を考慮した便宜上の仮定である。さらに、表-1 に示す健全度の期と表-2 に示す質量減少率の境界値が一致していない。以上については、双方が一致するのが望ましいと考えられる。しかしながら、本論文ではそれを検討するのに必要な実測データが十分に得られなかった。以上の2点は今後の課題としたい。



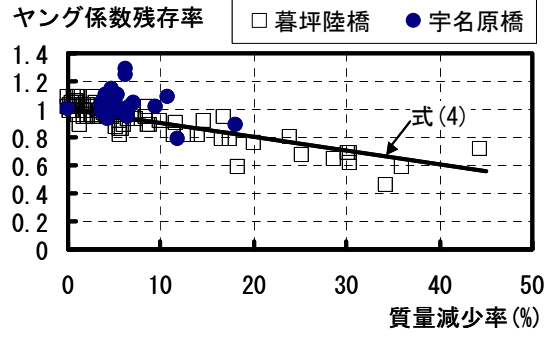
(a) 引張強度



(b) 0.2%降伏強度



(c) 破断伸び



(d) ヤング係数

図-4 PC鋼材の各機械的性質の残存率と質量減少率との関係

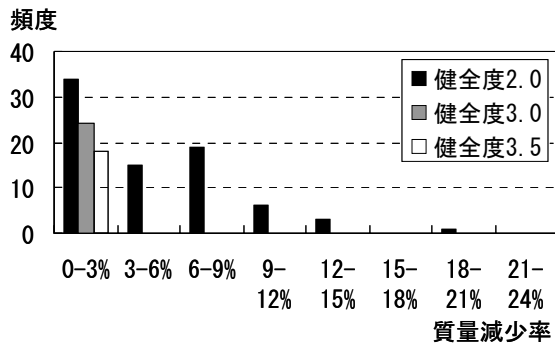


図-5 PC鋼材の質量減少率の頻度分布

表-2 仮定した健全度とPC鋼材の質量減少率との関係

健全度	質量減少率C[%]の範囲
3.0以上	C = 0
2.5	0 < C ≤ 10
2.0	10 < C ≤ 20
1.5	20 < C ≤ 35
1.0	C > 35

### 3.2 健全度ごとのPC鋼材の機械的性質

図-4に、PC鋼材鋼材の各機械的性質と質量減少率との関係について、それぞれの回帰式(1)~(4)を示す。

$$R_{fpu} = -0.0164C + 1.0 \quad (1)$$

$$R_{fpy} = -0.0135C + 1.0 \quad (2)$$

$$R_{epu} = \begin{cases} -0.0063C + 0.375 & (C \geq 4.5) \\ -0.145C + 1.0 & (0 \leq C < 4.5) \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{Ep} = -0.0099C + 1.0 \quad (4)$$

ここに、 $R_{fpu}$ は引張強度の残存率、 $R_{fpy}$ は0.2%降伏強度の残存率、 $R_{epu}$ は破断ひずみの残存率、 $R_{Ep}$ はヤング係数の残存率、そしてCは質量減少率[%]である。なお、式(3)の導出に当たっては、破断ひずみの残存率と質量減少率との関係形状を考慮して以下のようにした。まず、質量減少率を5%以上と以下で回帰分析を行い、2つの回帰

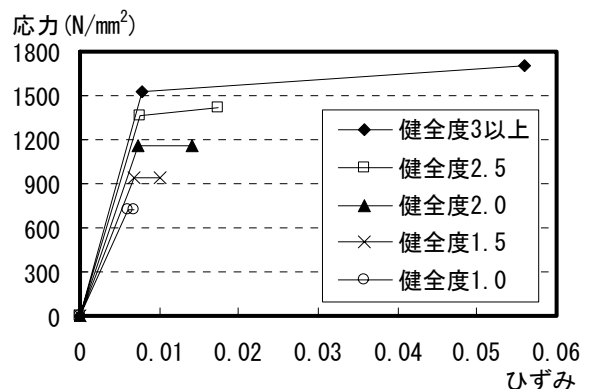


図-6 各健全度に対応したPC鋼材の応力-ひずみ関係

式を決定した。次にそれらの交点をもとめ、2つの式の境界値(C=4.5%)とした。

以上に示す表-2の関係と式(1)から式(4)の関係を相互に組み合わせれば、各健全度に対応したPC鋼材の応力-ひずみ関係を導出することができる。それらを図-6

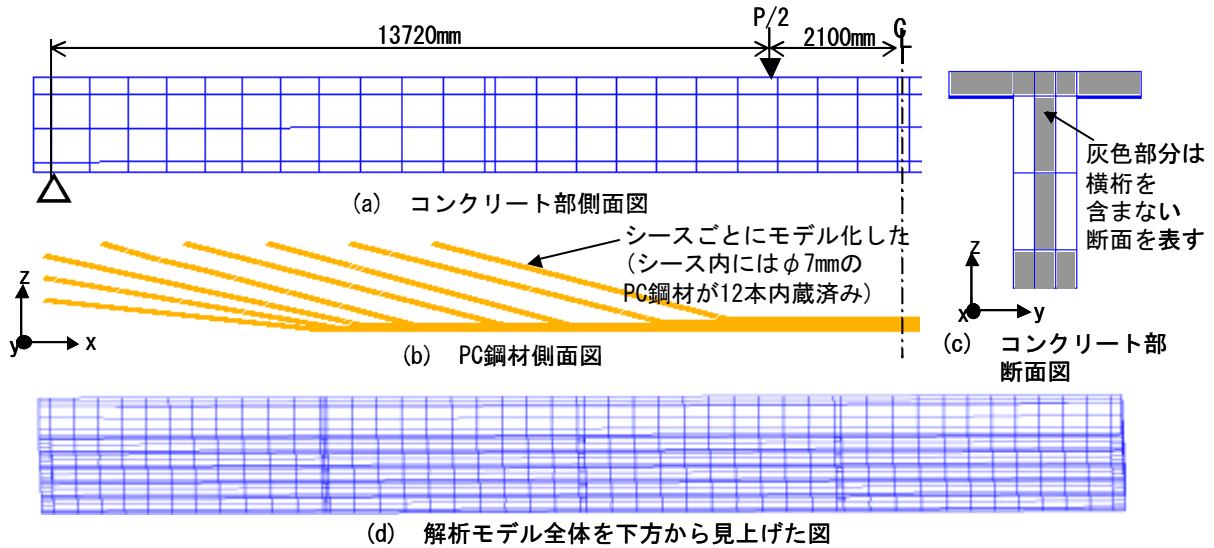


図-7 解析モデルとメッシュ図

に示す。なお、図-6 に示す応力-ひずみ関係については、引張強度、すなわち破断時の応力が 0.2%降伏強度を下回る場合がある。このような場合には、0.2%降伏強度と破断時の応力が等しいと仮定して適宜修正を行うものとした。図-6 に示す応力-ひずみ関係はそのような処理を行ったものである。

#### 4. 解析方法

##### 4.1 有限要素プログラムと解析モデル

図-7 に解析モデルを示す。本研究における解析には、汎用 3次元有限要素解析用ソフトウェアである DIANA (バージョン 9.2) を使用した<sup>8)</sup>。既存の設計図書を参考に、6連PC桁となっている上部工全体をモデル化した。なお、主桁と横桁を含むコンクリート部は、20 節点アイソパラメトリック 6 面体要素、および 15 節点アイソパラメトリック 5 面体要素とした。コンクリート部の要素寸法については、一つの要素の 1 辺が概ね 200mm 程度になるように設定した。スターラップや PC 鋼材などの内部鋼材は、埋め込み鉄筋要素<sup>8)</sup>でモデル化した。

なお、本解析ではモデル化の簡便などを優先して以下の仮定や簡略化を行った。

- 要素分割時の煩雑を避けるためウェブとフランジの付け根のハンチ部については、モデル化を省略して等面積となるような矩形断面に置き換えた。
- 橋面の歩道や舗装、床版などは配置を省略し、解析の対象を主桁のみに限定した。
- スターラップは適宜配置するが、配力鉄筋については配置を省略した。本有限要素プログラムは鋼材を分散配置することができないため、モデル化の煩雑さを避けることを優先した。曲げ耐力性状は主に PC 鋼材の機械的性質が支配的であるため、以上のように

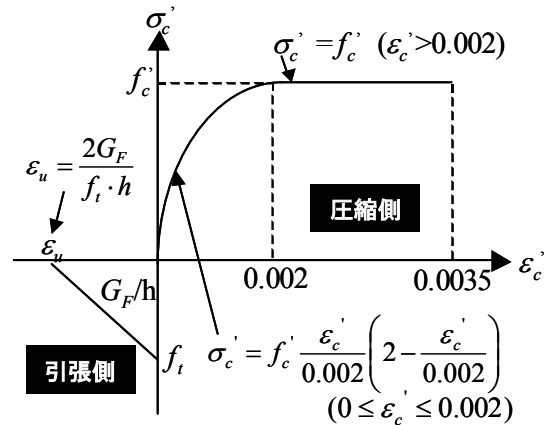


表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 $f_c'$	40N/mm <sup>2</sup>
引張強度 $f_t$	2.9N/mm <sup>2</sup>
破壊エネルギー $G_F$	0.092N/mm
弾性係数 $E_c$	29.0kN/mm <sup>2</sup>
等価長さ $h$	190mm

表-4 PC鋼材の集合断面積

健全度	質量減少率(%)	断面積(mm <sup>2</sup> )
3.0以上	0	461.8
2.5	5	438.7
2.0	15	392.5
1.5	22.5	357.9
1.0	42.5	265.5

な仮定を行っても計算結果に及ぼす影響は少ないと考えている。また、スターラップの腐食は考慮しないものとした。

- ・ 埋め込み鉄筋要素を用いるため、コンクリートと鉄筋との間の付着は完全と仮定した。
- ・ 健全度が1.0程度になるとPC鋼材が破断していることが想定される。しかし、本解析ではPC鋼材の破断は考慮しないものとした。

#### 4.2 材料特性と幾何学的特性

表-3 及び図-8 にコンクリートの材料特性を示す。圧縮強度については、既往の設計図書を参照し、設計基準強度である  $40\text{N/mm}^2$  とした。引張強度と破壊エネルギーについては、コンクリート標準示方書に従って算定した<sup>9)</sup>。圧縮側の破壊基準については、Drucker-Prager の降伏条件に従うものとした。一方、コンクリートのひび割れモデルは、分散ひび割れモデルとした。

PC鋼材の応力-ひずみ関係は図-6 に示す通りである。スターラップについては、設計図書を参考に、降伏強度を  $350\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数を  $200\text{kN/mm}^2$  とした。なお、スターラップの応力-ひずみ関係については、コンクリート標準示方書に従った<sup>9)</sup>。スターラップとPC鋼材の破壊基準については、Von Mises の降伏曲面に従うものとした。表-4 に示すように、ブロックごとに得られた健全度に応じて、PC鋼材の断面積を変化させた。なお、PC鋼材の断面積は、シースごとの集合断面積として扱った(図-7 参照)。また、ブロック内でのPC鋼材では、腐食による断面積のバラつきは考慮せず、一律の断面欠損を与えた。実際の鋼材腐食を考慮すると、断面欠損のバラつきを考慮すべきである。しかし、以上の解析への適用は今後の課題としたい。さらに、今回の解析では、PC鋼材に与えるプレストレスを埋め込み鉄筋要素に応力として与えている。そのため、PC鋼材の腐食により懸念されるプレストレスの低下は、断面積の減少により間接的に考慮されることになる。

#### 4.3 解析パターンと解析上の载荷方法

本解析では、以下の4通りの計算を行った。

- ・ No.1: 健全時で腐食による劣化を不考慮
- ・ No.2: 図-3 の健全度に応じて図-6 に示すPC鋼材の応力-ひずみ関係と表-4 に示す断面積の減少をそのまま適用した場合
- ・ No.3: 01 桁の全てを健全度 1.0, その他を健全度 3.0 以上と仮定した場合
- ・ No.4: 04 桁の全てを健全度 1.0, その他を健全度 3.0 以上と仮定した場合

No.3 と No.4 については、塩害による鋼材腐食が一部の桁に集中した場合を想定して、その影響を明らかにするために計算を行った。

解析上の载荷は、図-7 のように4点曲げ载荷とした。図中に示していないが、中央・橋軸直行方向に線载荷を行った。载荷方法は荷重制御とした。非線形解析に伴う

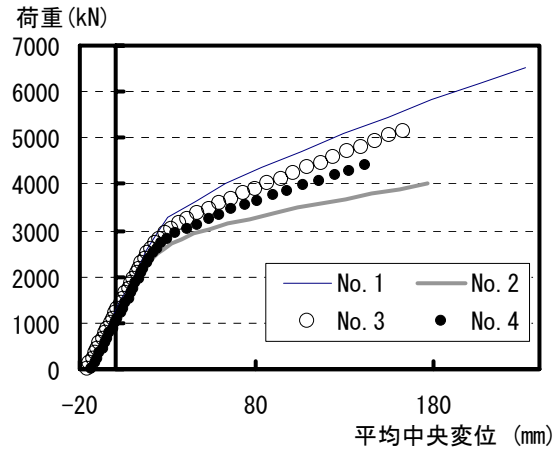


図-9 荷重と平均中央変位との関係

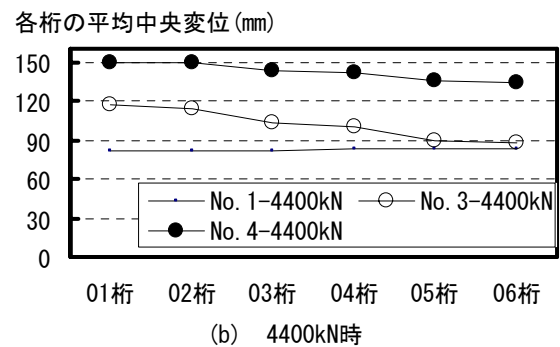
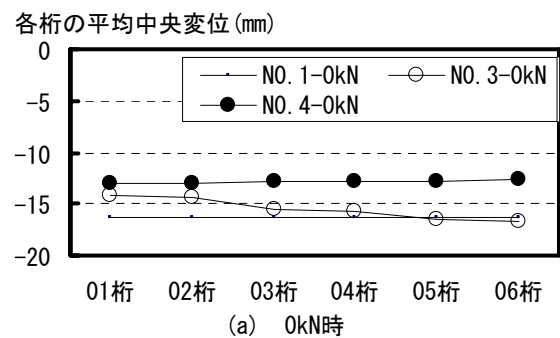


図-10 各桁の中央変位の分布

収束計算については、Newton-Raphson 法により行った。収束条件は不均衡エネルギーノルムが  $10^{-4}$  以下とし、収束計算の上限回数を 100 回とした。不均衡エネルギーが  $10^{-4}$  以下とならない場合には、残差エネルギーを次ステップに持ち越し、計算を継続させた。

#### 5. 計算結果と考察

図-9 に No.1 から No.4 の荷重と平均中央変位との関係を示す。ここで、荷重は支点反力の総和とし、平均中央変位は、各桁中央部の節点における変位の平均値である。また、荷重-平均中央変位曲線の始点が負値となっている。これは、プレストレス導入によるキャンパー量を表している。なお、すべての解析パターンにおいて解の発散により計算が終了した。従って、終局状態につい

ては計算で再現しきれない可能性があることを明記する。図-9より、健全度より劣化した状況を仮定したNo.2の最大荷重は、健全時を示すNo.1のそれよりも約4割低下する結果が得られた。さらには、PC鋼材の劣化を考慮することによりNo.2では、No.1よりもじん性能が大きく低下する結果が得られた。さらに、キャンパー量については、No.1は16.3mm、No.2は12.9mmとなっていた。このことからNo.2において01桁と06桁でPC鋼材の断面減少によるプレストレス損失の影響が現れている。PC桁では、PC鋼材の断面減少やかぶりコンクリートの剥落のみならず、プレストレスの損失に起因するキャンパー量の減少も、その使用性や安全性に大きな影響を与えると考えられる。本計算により以上を試算できたことは、例えば維持管理において構造物使用時の安全性の確認などに活用できるものと期待している。本論文で以上を示せたことは意義が深いと考えている。

一方で、塩害劣化の集中する部位を変化させたNo.3とNo.4を比較すると、桁端部の01桁のみの劣化を仮定したNo.3よりも、上部工中央に近い04桁のみの劣化を仮定したNo.4の方が、若干力学性能が低下する結果が得られた。これについては、劣化が集中する、換言すれば断面性能の損失する桁の位置によって、応力を負担する状況が異なるためと推定している。以上を明らかにするために、解析パターンNo.1、No.3、並びにNo.4それぞれについて、荷重がそれぞれ0kN時、および4400kN時における各桁の平均中央変位の分布を図-10に示す。なお、0kN時はプレストレス導入直後と同義である。図-10(a)に示した荷重が0kN時を見ると、No.3では劣化を仮定した01桁のキャンパー量が他の桁よりも相対的に低下している。しかし、No.4では、劣化を想定した04桁のみならず、各桁で平均的に健全時よりもキャンパー量が減少している。従って、上部工全体に挿入される見掛けのプレストレス量はNo.3よりもNo.4の方が小さいと考えられる。一方、図-10(b)に示すように、荷重が4400kNになると見掛けのプレストレス量が減少している影響がNo.4で顕著になっている。すなわち、健全時のNo.1、あるいは01桁のみが劣化しているNo.3と比較してNo.4では同一荷重において大きな変位を示している。従って、見掛けのプレストレス量の減少により、劣化が集中する部位によっては単独の桁の性能のみならず上部工の全体挙動に影響を及ぼすことに留意することが必要であると著者らは考えている。

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 解体されたPC上部工の調査研究結果に基づき、健全度調査の結果とPC鋼材の質量減少率、並びに機

械的性質の低下との関係を定式化した。

- ・ 以上で得られた健全度に応じたPC鋼材の応力-ひずみ関係を3次元非線形有限要素解析に適用する方法を提案した。
- ・ 解体時のPC上部工の劣化状況を想定して解析した結果、耐荷力は健全時よりも4割程度減少していた。
- ・ 同解析の結果、劣化が集中する部位によっては上部工の耐荷性能が異なる可能性を示した。

本手法は、健全度調査の結果を構造物の力学性能の評価に直接適用することに主眼を置いた。従って、解析手法や適用範囲など未熟な面が多数ある。今後は以上を順次解決しながら、維持管理の実務に適用可能である信頼性の高い手法を提案する予定である。

**謝辞：**本研究は(財)大阪地域計画研究所ブリッジマネジメント研究会における共同研究(委託者：青森県)の成果を利用して頂いたものである。また、本研究の内容については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小委員会(委員長：長岡技科大 下村 匠 准教授)にて助言を頂いた。さらに、3次元有限要素解析の実施に当っては、下村 匠先生のご協力を頂いた。ここに記して関係各位に深く感謝する。

## 参考文献

- 1) 斉藤 成彦, 高橋 良輔, 檜貝 勇: 鉄筋の腐食分布がRCはり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集E, Vol. 64, No. 4, pp.601-611, 2008.11
- 2) 村上 祐貴ほか: 鉄筋腐食を生じたRC梁の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, 第17巻 第1号, pp.61-74, 2006.1
- 3) 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, 2006.9
- 4) 岩城一郎ほか: 青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査, 橋梁と基礎, 第41巻 第10号, pp.33-37, 2007.10
- 5) 上原子品久: 北東北日本海沿岸で塩害を受けたPC桁の鋼材腐食量の調査, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.1009-1010, 2007.9
- 6) 上原子品久: 北東北日本海沿岸で塩害を受けたPC桁の鋼材の機械的性質, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.211-212, 2008.9
- 7) 土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(III)—塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質—, 土木研究所資料, No.3810, 2001.3
- 8) TNO DIANA BV.: DIANA User's Manual, Release 9.2, Sep 2007.
- 9) 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2008.3