# 論文 塩害により腐食劣化した鉄筋コンクリート橋梁桁の構造性能に関す る解析的検討

田中 泰司<sup>\*1</sup>·山口 貴幸<sup>\*2</sup>·下村 匠<sup>\*3</sup>

要旨:腐食劣化した鉄筋コンクリート部材の構造性能の評価に対する有限要素解析の有用性を検討するため に、腐食劣化した実橋梁桁の載荷実験を対象として、実験値と解析値の比較を行った。引張側に重ね継ぎ手 を有する部材であっても、定着が確保されている場合には、腐食分布を適切に考慮することで、耐力評価が 可能であることが示された。また、継ぎ手部の腐食が進行している場合には、継ぎ手が有効に機能するか否 かを適切に判断し、解析に反映することが、残存強度の正確な予測に不可欠であることが示された。 キーワード:塩害、鉄筋腐食、重ね継ぎ手、腐食分布、有限要素解析

#### 1. はじめに

塩害によって腐食劣化したコンクリート構造物の維 持管理では、現有性能を的確に把握することが最も重要 な課題のひとつである。当面の構造安全性の確認におい ても、劣化予測や維持管理対策の決定においても、現有 性能は必要不可欠な情報である。一方、目視観察や非破 壊検査によって得られた腐食劣化情報を構造性能の照 査に直接反映させる方法として、有限要素解析を利用す ることが考えられる。しかし、有限要素解析による腐食 劣化した鉄筋コンクリート部材の構造性能評価につい ては、特に実構造物レベルでの照査例が乏しく<sup>1)</sup>、腐食 や付着劣化の取り扱いなど、乗り越えるべき課題も多い。 そこで本研究では、腐食劣化した実橋梁桁を対象として、 有限要素解析による構造性能評価を行うこととした。解 析対象には、筆者らがこれまでに行った実橋梁桁の載荷 試験<sup>2)</sup>を用いた。

本稿では,まず解析対象とした載荷実験の方法と結果 を概説する。次に腐食劣化した鉄筋コンクリート部材の 有限要素解析の方法と,解析モデルについて議論する。 最後に,解析結果と実験結果の比較を通して,解析的評 価の妥当性や適用性を検証し,課題の整理を行う。

#### 2. 載荷実験の概要

#### 2.1 能生川橋の概要

塩害により腐食劣化した実橋梁から試験体を切り出 し、載荷試験と腐食量調査を実施した。対象橋梁は、糸 魚川市能生で供用されていた能生川橋である。能生川橋 は3径間連続鉄筋コンクリート4主桁橋であり、昭和5 年に竣工された旧国道橋である。海岸線から約100mの 距離にあり、塩害劣化が進行していたために、2009年2 月に解体・撤去された。

\*1 長岡技術科学大学 環境・建設系助教 博(工) (正会員)
\*2 長岡技術科学大学 環境・建設系技術職員 修(工) (正会員)
\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系准教授 博(工) (正会員)

#### 2.2 試験体

試験体は長さ約8900mmのT型桁2体であり、海側の 外桁と隣接した中桁からそれぞれ切り出した。図-1に 試験体の断面図を示す。主鉄筋には # 25.4 mm の丸鋼が 8 本使用されていた。また T 型桁の上には、舗装面の勾配 を調整するために、増し厚コンクリートが打設されてい た。表-1に実験により求めたコンクリートと鉄筋の材 料特性を示す。T型桁躯体のコンクリートに比べ,増し 厚部のコンクリートは脆弱であることがわかる。鉄筋の 腐食量測定結果を図-2に示す。腐食量は載荷試験後に 鉄筋を斫り出し、測定した。本研究では、直交する2方 向のノギス径の平均値から, 真円を仮定して求めた断面 積と,元の鉄筋の断面積の比から腐食量を求めた。元の 鉄筋の直径は 25.4mm (1 inch)と仮定した。外桁のほうが 中桁に比べて腐食量の平均値、最大値がともに大きいこ とがわかる。腐食劣化状況の違いは概観にもあらわれて いた。外桁では、-4~0mの位置にわたってかぶりが剥 落していたが、中桁では目立った腐食ひび割れは確認さ れなかった。このようにかぶりコンクリートの剥落や腐 食ひび割れによる付着劣化によって定着が確保できな い恐れがあったので、主鉄筋端部を鋼板に溶接すること で定着補強した。図-3に重ね継ぎ手の位置を示す。本 試験体では、主鉄筋8本のうち、6本で半円フック型の 重ね継ぎ手が配置されていた。建設当時の基準に従って 再現設計を行なったところ、図-3の-4~+3.2mの範囲で 正曲げ力が作用すること,最大曲げモーメントの作用位 置は-0.7m であることがわかった。最大曲げモーメント の作用位置が若干異なるものの、試験体に正曲げ力を加 えて破壊させることは現有性能評価の点ではおおむね 妥当である。スターラップには \$ 9.5mm (3/8 inch)の丸鋼 が使用されていた。配筋間隔は支間中央で約480mm,支



点付近では約 105mm であった。スターラップは主鉄筋 に比べて腐食劣化が激しく,外桁ではほとんどのスター ラップが腐食によって破断していた。一方,中桁ではス ターラップの破断は確認されなかった。

# 2.3 載荷方法

載荷方法の概要を図-4に示す。支持条件は単純支持 条件とし、加力分配梁による2点集中載荷を行うことと した。また、載荷スパンは8000mm、等曲げ区間は2000mm とした。載荷点、支点それぞれに幅100mmの載荷板を 設置して,載荷を行った。

## 2.4 試験結果

中桁,外桁の荷重-中央変位関係を図-5に示す。梁 理論による健全時の最大荷重は 485kN と推定されるが, 中桁の最大荷重は 457kN,外桁では 189kN であった。 載荷中,図中の記号で示した位置で,増し厚コンクリー トの剥離,重ね継ぎ手の露出による定着不良,鉄筋破断 が発生した。曲げひび割れについては,中桁では中心か ら左右 2mの範囲で 13本の曲げひび割れが発生したのに



対し,外桁では同区間で4本しか曲げひび割れが発生し なかった。

## 3. 解析方法

## 3.1 概要

上記の載荷実験結果を3次元有限要素解析により,再 現することとした。解析プログラムには,市販の有限要 素解析ソフトウェア ATENA Ver. 4.1.4<sup>3)</sup>を使用した。コン クリートの応力-ひずみ関係は,CEB-FIB Model code<sup>4)</sup> に従った。鉄筋の応力-ひずみ関係は,腐食量のばらつ きを考慮して,図-9(b)に示すようなバイリニア型の モデルを用いた。鉄筋は、図-6に示すように,直方体 のソリッド要素として表現した。腐食による断面減少を 表現する方法としては,腐食量にあわせて断面を調整す ることも考えられるが,メッシュ作成上の煩雑さを回避 するために,ここでは要素内の鉄筋量を増減させること で腐食の影響を考慮した。また,腐食にともなう付着劣 化については,要素の境界面に境界要素を設けることで, 表現することとした。

# 3.2 腐食分布の表現方法

図-7に鉄筋の腐食減少率の算定結果を示す。腐食減 少率は、ノギス径の計測結果より求めた。ノギス径の計 測は5cm間隔で行ったが、この計測結果を直接解析メッ シュに反映させるためには、要素寸法を測定間隔と同程



図-8 鉄筋の力学性状推定手法の概念図

度にまで小さくする必要がある。しかしそれでは解析コ ストとメッシュ作成作業の面から非効率である。そこで 解析では、鉄筋量の設定値に 1m 区間の平均腐食量を用 い、腐食量のばらつきは以下に示すように鉄筋の応力-ひずみ関係を調整することで考慮することにした。

腐食した鉄筋の応力-ひずみ関係は、健全な状態とは 異なり、降伏点が不明確になることが知られている。ま た、長さ1の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、図-8に示すように、微小区間のひずみの平均値を算出する ことで推定可能であることが既往の研究により示され ている<sup>5</sup>。

$$\varepsilon_m = \frac{1}{l} \int f^{-1}(\sigma_l) \, dl = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n f^{-1}(\sigma_i) \tag{1}$$

$$\sigma_l = \sigma_m / (1 - c) \tag{2}$$

ここで、 $\varepsilon_m$ は平均ひずみ、 $f^{-1}(\sigma)$ は健全な鉄筋の応力-ひずみ関係の逆関数、 $\sigma_l$ は局所の応力、 $\sigma_m$ は平均応力、cは腐食減少率である。

腐食減少率の測定結果を上式に当てはめることにより、長さ1m区間の平均応力-平均ひずみ関係を求めたものが図-9,10である。腐食した鉄筋の応力-ひずみ関係は、同じ試験体の中でも腐食分布によってある程度ばらつくことがわかる。図-9(b),10(b)に、相対応力 -相対ひずみ関係を示す。ここで、相対応力とは、応力 を平均腐食量と降伏強度で基準化した値であり、次式よ り求められる。

$$\sigma_{eq} = \sigma / (1 - c_m) / f_y \tag{3}$$

ここに $\sigma_{eq}$ は相対応力,  $c_m$ は長さ 1m 区間の平均断面減少率 ( $0 \le c_m \le 1$ ),  $f_v$ は鉄筋の降伏強度である。

相対応カーひずみ関係は、腐食量によらずおおむねー 様であることがわかる。また、中桁と外桁で大きな違い は見られなかった。そこで、鉄筋の相対応カーひずみ関 係を式(4)のようにバイリニアモデルで近似することに よって、腐食した鉄筋の応カーひずみ関係を表現するこ ととした。

$$\sigma_{eq} = E_s / f_y \times \varepsilon \qquad \sigma_{eq} \le 0.9$$
  
=  $E_{sh} / f_v \times (\varepsilon - 0.9 \varepsilon_v) + 0.9 \quad \sigma_{eq} > 0.9$  (4)

ここで、 $E_{sh}$ は降伏後のひずみ硬化の勾配、 $\varepsilon_y$ は鉄筋の降伏ひずみである。

3.3 付着応カーすべり関係

(1) 鉄筋とコンクリート

丸鋼とコンクリートの付着応力ーすべり関係は, CEB-FIP Model code に準じた (図-11)。ここでは,鉄筋 腐食による付着劣化の影響を検討するために,付着が比 較的良好な場合(good bond condition)と,そうでない場合 (poor bond condition)の解析をそれぞれ行った。載荷前か らかぶりが剥落し,鉄筋が露出していた個所は,鉄筋周 囲のコンクリート要素を削除することで表現した。

図-3に示すとおり,解析対象とした試験体は,正曲 げを受ける支間の中央付近に重ね継ぎ手が複数配置さ れており,継ぎ手の定着性状が部材全体の構造性能の支 配要因となっていた。丸鋼の重ね継ぎ手は半円フックに よる定着効果に大きく依存しているので,その効果を解 析に取り込む必要がある。半円フックによる定着力を簡 便に考慮するため,ここでは,半円フックを長さ10 ¢(¢ は鉄筋径)の直線形の鉄筋に置き換えて表現することと した(図-12 参照)。この部分の付着応力ーすべり関係は 以下の手順により求めた。

まず,半円フックの定着カーすべり関係を既往の研究 を参考<sup>6</sup>にして図-13のように仮定した。次に,この定 着力を定着区間(10 ¢)の断面積で除すことによって,平 均付着応力を求めた。フックの定着力は腐食の程度によ らず一定とした。

# (2) 増し厚コンクリートとT型桁の境界

増し厚コンクリートの剥離を解析上で表現できるように、増し厚コンクリートとT型桁の境界に境界要素を 設けた。垂直方向の接着強度は、既往の試験結果<sup>7)</sup>を参 考にして、増し厚コンクリートの引張強度の0.4 倍とし た。また、せん断付着強度は以下に示す槇谷らの実験式<sup>8)</sup>より求めた。



(a) 平均応力-平均ひずみ (b) 相対応力-平均ひずみ関係

図-9 長さ 1m の鉄筋の平均応カー平均ひずみ関 係の算定値(中桁)



- (a) 平均応カー平均ひず(b) 相対応カー平均ひずみ
   み関係
   関係
- 図-10 長さ 1m の鉄筋の平均応カー平均ひずみ関 係の算定値(外桁)



図-11 解析に使用した鉄筋とコンクリートの 付着応カーすべり関係



図-12 解析中での半円フックの表現方法

 $\tau_1 = f'_c \cdot (0.004R_z + 0.0835)$  (5) ここで、 $\tau_1$ はせん断付着強度、 $R_z$ は十点粗さ評価値(mm) であり、こて仕上げ面の計測値を参考にして、 $R_z = 1$ mm とした。

### 4. 解析結果

# 4.1 中桁の解析結果

図-14 に中桁の荷重-中央変位関係における解析結 果と実験値の比較を示す。腐食量を解析で考慮すること によって、最大荷重に至るまでの挙動が適切に再現する ことができた。鉄筋降伏前は付着強度の影響がほとんど 見られなかったが、降伏以後の軟化性状は付着の影響を 受ける結果となった。また,解析における破壊モードは, 増し厚コンクリート上縁の圧壊であり、この際に実験で 観察されたような打ち継ぎ面で剥離は生じなかった。打 ち継ぎ目のせん断接着強度について感度解析を行った ところ、せん断接着強度を元のモデルの 50%まで低減さ せると、 圧縮縁の破壊の前に打ち継ぎ面ですべりが生じ る結果となった。打ち継ぎ面の強度は、処理状況によっ て大きく異なるので、特に今回のように無処理の場合に は、剥離荷重を正確に予測することは困難であるといえ よう。いずれにしても、増し厚コンクリートで圧壊が生 じ、荷重が低下する変形量と、実験において増し厚コン クリートが剥離した変位はおおむね一致することから, 今回対象とした試験体では、増し厚コンクリートの圧壊 と剥離がほぼ同時期に起こるような状況であったこと がわかる。解析では最大荷重以降に圧縮縁から圧縮軟化 が進行するので荷重が低下するが、実験では圧縮縁で破 壊が生じても荷重は低下しなかった。最大荷重以降の再 現性については今後も検討を要する。

## 4.2 外桁の解析結果

図-15 に外桁の荷重-中央変位関係における解析結 果と実験値の比較を示す。継ぎ手部の定着を有効とした 解析結果は、実験値と比較してかなり過大であることが わかる。これは、外側に配置されていた鉄筋の定着が低 下していたことが主要因であると考えられる。図-16に は等曲げ区間の断面修復範囲と載荷後に露出していた 重ね継ぎ手の位置を示した。中桁では下面のみ修復され ており.載荷によって山側の継ぎ手が一箇所露出しただ けであった。外桁では、山側の上段の鉄筋位置まで断面 修復が施されており,載荷によって完全に露出した重ね 継ぎ手は2箇所だった。海側下段の重ね継ぎ手も一部分 だけ露出していたが、載荷終了まで完全に露出すること はなかった。外桁のほうが断面修復範囲が広いので、鉄 筋の再劣化による膨張圧で、修復材の境界面が剥離しや すい状況にあったと推測される。そこで、載荷中に完全 に露出した重ね継ぎ手(図-16(a)のバツ印)は無効とし



て解析を行ったところ,最大荷重がおおむね一致した(図 -15)。このことから,重ね継ぎ手を有する部材の場合に は,継ぎ手部が有効に機能するか否かを適切に判断しな ければ,残存耐力を正確に予測することはできない,と いえる。しかし,継ぎ手が有効に機能するか否かを高精 度で診断することは困難であるので、腐食が進行してい ると判断される場合には、外側に配置された重ね継ぎ手 を無効とみなすなど,安全側の評価が行えるように工夫 する必要があるだろう。

# 4.3 腐食量と強度比

図-17に、平均腐食率と強度比の関係を示す。ここで 強度比とは、最大荷重時の作用モーメントの実験値(自重 による作用モーメントを含む)を腐食していない梁の最 大曲げモーメントで除した値である。腐食していない場 合の最大曲げモーメントは、有限要素解析により求めた。

小型の梁試験体による室内実験によれば、曲げ耐力は おおむね平均腐食率分だけ減少することが示されてい る<sup>9</sup>。中桁の耐力減少率は平均腐食率よりも若干小さい くらいで上記の知見と相違しなかったが、外桁の耐力減 少率は平均腐食率よりもかなり大きかった。これは、重 ね継ぎ手部の定着不良によるところが大きい。図-17に は,完全付着を仮定して,解析を行った結果も示した。 解析条件は、付着条件以外は図-15に示した解析と同様 である。この場合、外桁であっても耐力低下率はおおむ ね平均腐食率と同等になった。複数本の鉄筋が配筋され ている構造物では、局部的に腐食が進行しても、付着が 確保されていれば、他の鉄筋が負担を補ってくれるので、 耐力低下率はおおむね平均腐食率と同程度になると考 えられる。また、図-2に示したように断面平均の腐食 率の変動が小さかったことも耐力比と部材全体の平均 腐食率が同程度になった一因である。今回の検討では, 鉄筋破断が生じないものとして,解析モデルを構築した ので,局所の腐食量がかなり大きく,鉄筋破断が生じる可 能性がある場合には、鉄筋の構成則などに、別途の考慮 が必要だと考えられる。



図-17 腐食していない場合の解析結果を1とした 場合の強度比(自重によるモーメントも考慮)

## 5. 結論

塩害劣化した鉄筋コンクリート橋梁の主桁を対象と して,その残存耐力について実験値と解析値の比較を行 った。その結果、以下の知見を得た。

- ・塩害劣化した鉄筋コンクリート部材の残存耐力は、鉄筋の腐食率と継ぎ手の定着状況を解析中で適切に考慮することで、有限要素解析によって評価可能である。
- ・重ね継ぎ手を有する鉄筋コンクリート部材が腐食劣化した場合、腐食の進行度や配筋状況によっては、継ぎ手の定着不良が生じる恐れがある。その場合、構造性能を正確に評価するためには、定着が有効に機能するか否かを適切に判断する必要がある。
- ・実橋梁のように,鉄筋が複数本配筋されている部材では, 付着・定着が確保されていて,鉄筋破断が生じない限 りは,耐力低下率と平均腐食率はおおむね一致する。

謝辞:調査,実験にご協力をいただいた新潟県糸魚川市, 長岡工業高等専門学校,新潟県コンクリートメンテナン ス研究会に深甚な謝意を表する。なお,本研究の一部は, 科学研究費補助金(基盤研究(A),課題番号:21246072, 研究代表者:下村匠)によるものである。

## 参考文献

- 上原子昌久,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, 2009.7
- 下村匠,田中泰司,山口貴幸:塩害により劣化した 橋齢80年の実橋RC桁の載荷試験,コンクリート技 術シリーズ86,土木学会,pp.513-518,2009.10
- Cervenka, V., Jendele, L. and Cervenka, J.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.12
- 4) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Thomas Telford, 1993
- 5) 大屋戸理明:腐食した鉄筋コンクリート部材の力学 性能の評価,筑波大学博士論文,2007.3
- Saemann, J. C. and Washa, G. W.: Horizontal shear connections between precast beams and cast in place slabs, Journal of ACI, pp.1383-1409, Vol.61, 1964.11
- Kurihara, N., Kunieda, M., Uchida, Y. and Rokugo, K.: Bond properties of concrete joints and size effect, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.613/V-42, pp.309-318, 1999.2
- 4(谷貴光,香取慶一,林静雄:コンクリート打ち継ぎ面における表面粗さの評価とせん断伝達能力に関する実験研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No.2, pp.171-176, 1995
- 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,土木学会,2009.5