

論文 PC 鋼材の付着特性を考慮した鋼材破断に伴うプレストレスの伝達領域に関する解析的検討

三木 朋広*1・橋詰 彩人*2

要旨：撤去された実 PC 桁を対象として、12φ7 の PC 鋼線の腐食を仮定し、付着劣化および鋼材破断を考慮した非線形解析を行った。解析における付着劣化は、PC 鋼線の付着強度の低減係数を変化させることで模擬した。対象とした実験では、桁スパン中央においてコア削孔して鋼材破断を再現したが、解析における鋼材破断は支間中央 100mm の PC 鋼材の要素を取り除くことで模擬した。解析によって得られた荷重-変位関係と付着応力-変位関係について各要因の影響を比較した結果、鋼材破断はひび割れ発生荷重ならびに付着伝達長に大きく影響を与えることがわかった。また、付着劣化は鋼材破断後の付着伝達長に影響を与えることがわかった。

キーワード：PC 鋼材，付着劣化，鋼材破断，付着伝達長，非線形解析

1. はじめに

プレストレスコンクリート (PC) 橋の劣化要因の一つに塩害がある。従来、高強度コンクリートを使用する PC 橋は高耐久な構造形式であるが、ポストテンション方式 PC 部材において、PC 鋼材のグラウト充填不良箇所により鋼材の定着部等から雨水や海水が侵入し、PC 鋼材が腐食、破断して、プレストレスが低下して落橋に至った事例が報告されている。国内では落橋にまでは至っていないが、PC 鋼材が腐食、破断した例として、暮坪陸橋、須井川橋、新赤石橋、妙高大橋における事例が挙げられる。

国内の高速道路の調査¹⁾では、ポストテンション PC 橋において、調査箇所数の約 25% の割合で PC グラウトの充填が十分でないことが報告されており、PC 鋼材の腐食・破断が懸念される。このような課題に対して、損傷を伴う PC 桁では性能評価や非破壊試験を実施し、その性状を把握する試み²⁾がなされてきた。これらの PC 鋼材の腐食を伴う劣化した PC 橋に対応する体系的で精度の高い性能評価手法の構築は、PC 橋を合理的に維持管理していく上で必要不可欠である。PC 橋はプレストレスを導入することによって耐荷性能を向上させているため、鋼材腐食によるプレストレスや付着力の低下によって、耐荷性能が著しく低下する可能性がある。

PC 橋を健全に供用していくためには、設計で想定したプレストレスやコンクリートと PC 鋼材の間の付着が確保されていることが重要となる。しかし、PC 鋼材の付着劣化の度合いによって変化する PC 桁の力学特性や PC 鋼材の性能変化については十分に明らかにされているとは言い難く、研究事例も少ない。一例としては、グラウトと PC 鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレストレスを評価した研究³⁾がある。この既往研究では、鋼材の腐食による破断を模擬するため、端部を箱抜きし

た開口部を設けた試験体を用い、PC 鋼材破断後の残存プレストレスについて検討されている。その際、鋼材径、鋼材本数などをパラメータとして付着特性の変化を考慮した。実験の結果³⁾によって、鋼材径が大きく、鋼材本数が多いほど、PC 鋼材の破断位置から残存プレストレスが初期の有効プレストレスと一致する位置までの距離、つまりプレストレスが低下した領域である伝達長が長くなることがわかった。例えば、鋼材径 9.3mm の 1 本より線では伝達長は約 750mm であるのに対し、実際の PC 桁と同様に複数のより線を束ねた鋼材径 12.7mm の 12 本より線では約 2000mm となっており、付着特性が変化することがわかった。

本論文では、実 PC 桁に対して、PC 鋼材の腐食が生じた場合の付着劣化を考慮した非線形解析を行った。その際、PC 鋼材の破断の有無、および腐食損傷度によって変化する付着低減係数をパラメータとして、プレストレスの伝達領域ならびに鋼材破断の影響範囲について明らかにすることを目的とした。

2. 解析方法

2.1 解析対象の PC 桁の概要

解析対象とした PC 桁の構造図²⁾を図-1 に示す。この PC 桁は北陸自動車道金沢西 IC～小松 IC 間に建設されたポストテンション方式 PC 単純 T 桁である。この桁を有する橋梁は、日本海汀線から 100m 程度の直近に位置し、飛来塩分による塩害が懸念されたことから、これらに伴う補強を検討した結果、1997 年に撤去された。

2.2 解析モデル

載荷点と支点の位置を示す載荷条件と解析モデルを図-2 に示す。支点は桁端から両側 200mm の位置である。図-1 の断面図に示す PC 鋼材において、鋼材腐食は

*1 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*2 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

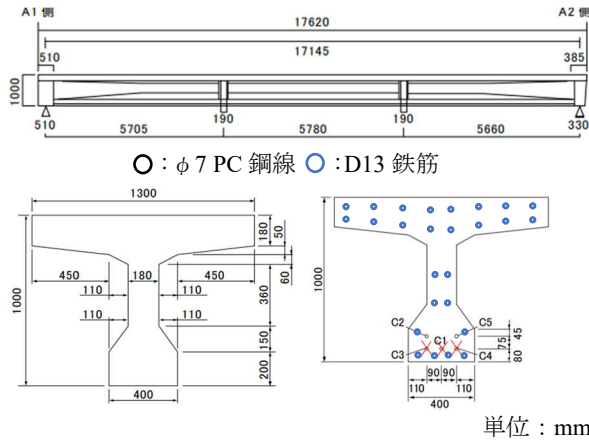


図-1 解析対象のPC桁の側面図と断面図²⁾

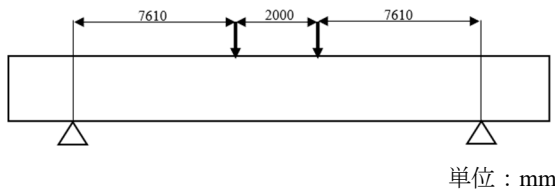
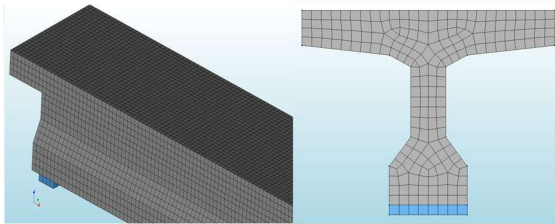


図-2 PC桁の荷条件



(a) 鳥瞰図(桁端部) (b) 断面図

図-3 PC桁の要素分割図

全域で生じたと仮定し、さらに支間中央 100mm で C1, C3, C4 が破断した場合と破断しなかった場合に分けて解析を行った。

プレストレスの導入について、解析ではプレストレス導入段階と、荷重段階に分けたフェーズ解析とした。まず、PC鋼材の破断が生じていない状態で鋼材の初期応力としてプレストレスを導入した。このとき、付着状態はアンボンドとした。鋼材破断については、プレストレスを導入した後、荷重直前に PC 鋼材の要素を取り除く処理を行うことで模擬した。荷重は 1 ステップあたり 1mm の変位が生じるように変位制御で荷重した。

なお、桁中央断面と桁端断面で断面が異なるが、本解析では桁中央部の破断を模擬したことから、簡単のため等断面のモデル化を行った。コンクリート要素は 8 節点の 3 次元ソリッド要素を用いており、要素長は 50mm とした。PC 桁の要素分割図を図-3 に示す。

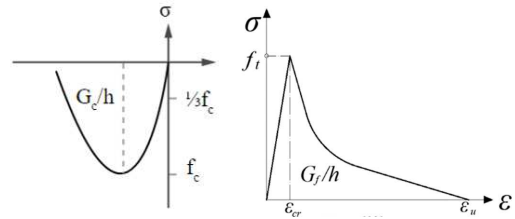
2.3 材料のモデル化

(1) コンクリートのモデル化

コンクリートの材料モデルは図-4 に示すように、コ

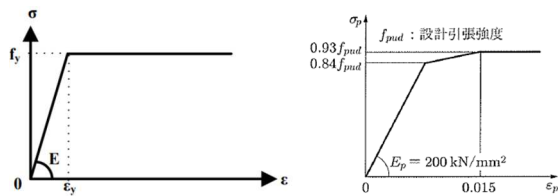
表-1 材料の力学特性値²⁾

材料	力学特性	試験値
コンクリート	圧縮強度	48.7 N/mm ²
	弾性係数	32.9 kN/mm ²
鉄筋 D13	降伏強度	354 N/mm ²
	引張強度	554 N/mm ²
	弾性係数	200 kN/mm ²
	破断伸び ³⁾	23.7%
PC 鋼線 12 φ 7	降伏強度	1504 N/mm ²
	引張強度	1686 N/mm ²
	弾性係数	200 kN/mm ²
	破断伸び ³⁾	4.6%



(a) parabolic モデル (b) Hordijk モデル

図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル



(a) 鉄筋のモデル (b) PC 鋼材のモデル

図-5 鋼材の応力-ひずみ関係のモデル

ンクリートの圧縮応力-ひずみ関係として圧縮破壊エネルギーを考慮した parabolic モデルを用いた。また、引張応力-ひずみ関係として、最大引張応力に達するまでは線形弾性材料とし、その後は引張破壊エネルギーを考慮した Hordijk の指数関数型軟化モデルを用いた。コンクリートの材料試験値を表-1 に示す。解析には圧縮強度と弾性係数は材料試験から得られた値を用いた。一方、引張強度 f_t (N/mm²)、圧縮破壊エネルギー G_c (N/mm)、引張破壊エネルギー G_F (N/mm)は以下の式(1)から(3)によりそれぞれ求めた。

$$f_t = 0.23 f'_c \frac{2}{3} \quad (1)$$

$$G_c = 8.77 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

$$G_F = G_{max} \frac{1}{3} \cdot f'_c \frac{1}{3} \quad (3)$$

ここで、 f'_c は圧縮強度 (N/mm²)、 G_{max} は粗骨材の最大寸法(mm)である。本解析では G_{max} は 20mm と仮定した。

(2) 鉄筋

鉄筋の材料モデルは、図-5(a)に示すようにバイリニアによりモデル化を行った。解析では、離散鉄筋モデルの埋め込み鉄筋要素を用い、Von Mises の降伏基準を適用した。

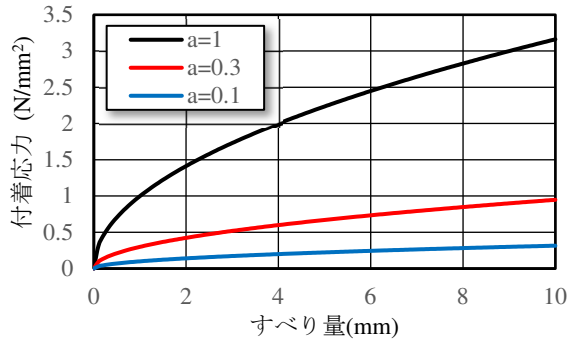


図-6 付着応力-すべり関係

(3) PC 鋼材

PC 鋼材の材料モデルは、図-5(b)に示すトリリニアによりモデル化を行った。鉄筋と同様に埋め込み鉄筋要素を用いて離散化した。

(4) PC 鋼材の付着特性

PC 鋼材とコンクリート間の付着挙動として、付着すべり埋込み鉄筋要素を用いて、島らによる付着すべり関数⁴⁾を基準とした。この関数は式(4)により定式化される。

$$t_t = a \times 0.9 f'_c \frac{2}{3} (1 - \exp \{-40(\frac{\Delta u_t}{D})^{0.6}\}) \quad (4)$$

ここで、 a は付着低減係数($0 \leq a \leq 1$)、 t_t は付着応力(N/mm^2)、 f'_c は付着を考慮する対象の圧縮強度(N/mm^2)、 Δu_t はすべり量(mm)、 D は PC 鋼材の直径(mm)である。なお、本検討で対象とした PC 桁では、 $\phi 7$ の PC 鋼線を 12 本使用していたが、本解析では 12 本分の断面積を持つ 1 本の PC 鋼線と仮定し、その断面積を有する円形断面の直径を D とした。

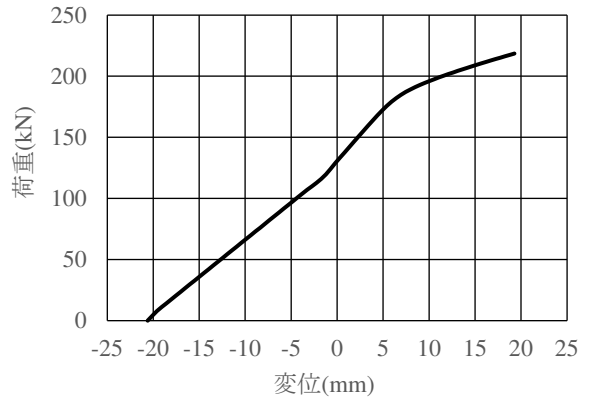
このとき、島らによる付着応力-すべり関係⁴⁾の概要を図-6に示す。この関係では、 $a = 1$ のとき、異形鉄筋の付着応力を表現するように定式化されている。ここで、最大付着応力-鋼材種別関係の既往研究⁵⁾より、PC 鋼材では最大付着応力が異形鉄筋の約 0.3 倍であったことを参考にして、このモデルにおいて $a = 0.3$ とした。また、鋼材の腐食の程度が大きくなると付着応力が低減すると仮定して、そのときの a の値を 0.1 と設定した。

なお、島らによる付着すべり関数における初期剛性は計算上無限大であるが、剛性を解析に導入するために原点と $\Delta u_t = 0.001 \text{mm}$ 間の勾配を仮定し、それをせん断方向の剛性とした。また、法線方向の剛性は剛であることを表現するためにせん断方向の 1000 倍を仮定した。

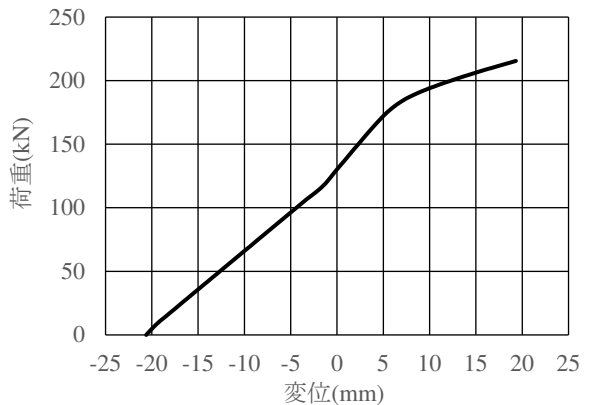
3. 解析結果

3.1 荷重-変位関係

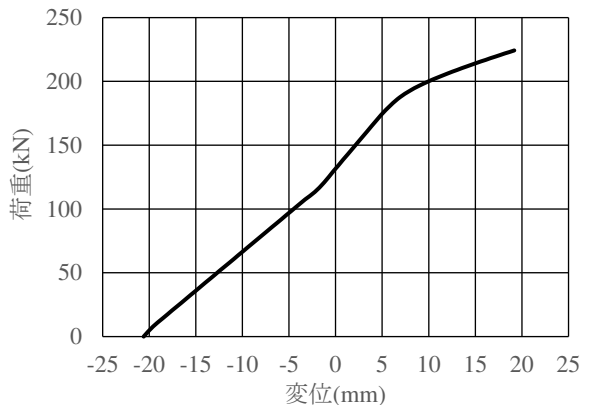
荷重-変位関係を図-7に示す。ここで、変位は支間中央のたわみ量である。荷重載荷前にプレストレスを導入しており、プレストレスの導入による支間中央のたわ



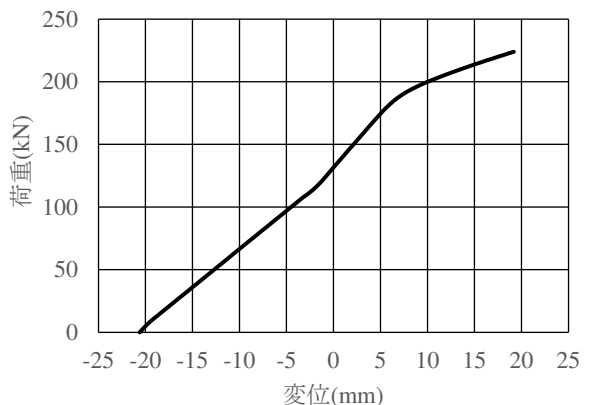
(a) 付着低減係数 $a = 0.3$ 鋼材破断有り



(b) 付着低減係数 $a = 0.1$ 鋼材破断有り



(c) 付着低減係数 $a = 0.3$ 鋼材破断無し



(d) 付着低減係数 $a = 0.1$ 鋼材破断無し

図-7 荷重-変位関係

みはおよそ-20 mm である。荷重は 1 ステップあたり 1 mm の変位が生じるように载荷しており、40 ステップまで行った。このことから、解析終了時の支間中央のたわみはおよそ 20 mm である。また、計算の簡略化のため、自重は無視した。

図-7(a)および図-7(b)では、変位 7 mm 付近で荷重-変位関係の傾きが変化しており、ひび割れ発生荷重はおよそ 175kN であった。付着低減係数の違いによって荷重-変位関係はほとんど変化がなかったことから、変位 20 mm までの耐荷性能は、腐食の程度による違いは小さいものといえる。

図-7(c)および図-7(d)では、変位 7mm 付近で荷重-変位関係の傾きが変化しており、ひび割れ発生荷重はおよそ 190 kN であった。ひび割れ発生時のたわみ量には違いが見られなかったが、ひび割れ発生荷重は高くなる結果が得られた。したがって、腐食の程度よりも鋼材破断の有無の方が PC 桁の変形挙動に影響を与えることがわかった。

3.2 付着応力-変位関係

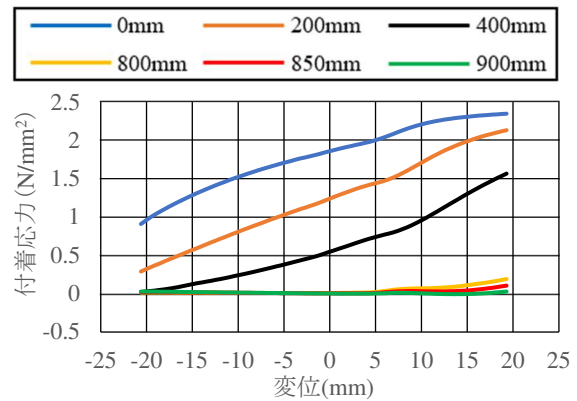
PC 鋼材の付着応力と桁の支間中央のたわみ量の関係を図-8 に示す。凡例の数值は鋼材破断有りの方は破断位置からの距離、鋼材破断無しの方は支間中央からの距離を表す。

図-8(a)では、破断位置から 900 mm 離れた位置で付着応力がほとんど生じていないことがわかる。したがって、破断位置から 900 mm 以上離れると腐食の影響を受けず、PC 鋼材とコンクリートの間の付着が十分確保されることがわかった。

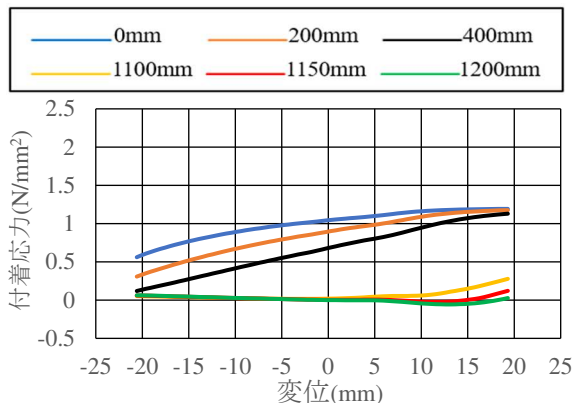
図-8(b)では、破断位置から 1150 mm 離れた位置で付着応力がほとんど生じていないことがわかる。したがって、破断位置から 1150 mm 以上離れると腐食の影響を受けず、PC 鋼材とコンクリートの間の付着が十分確保されることがわかった。また、破断位置から 0 mm, 200 mm, 400 mm の結果を見ると、変位 20 mm で最大付着応力が 1.2N/mm² 付近に収束した。

ここで、図-8(a)と図-8(b)を比較すると、PC 鋼材が腐食により破断した位置から離れるほど付着応力が低減することがわかる。また、支間中央のたわみが大きくなると、付着応力が增大することがわかる。また、両者の破断位置から 0 mm, 200 mm, 400 mm の結果を比較すると、最大付着応力は腐食の程度が大きい、つまり付着低減係数が 0.1 の結果は、腐食の程度が小さい結果の 0.5 ~0.7 倍となることがわかった。

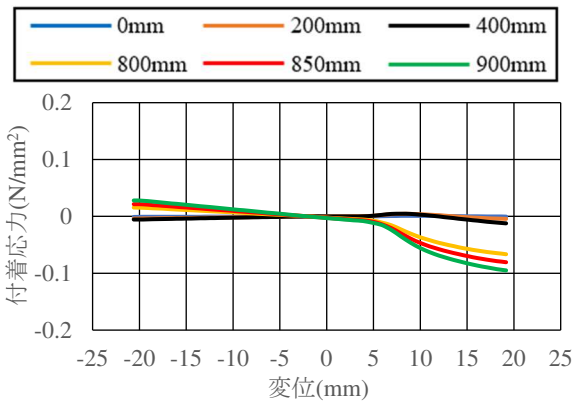
また、図-8(c)と図-8(d)を比較すると、付着応力はほとんど生じていないことがわかる。また、支間中央に近づくほど、付着応力の大きさはさらに小さくなることわかる。したがって、腐食の程度が軽微で鋼材破断が



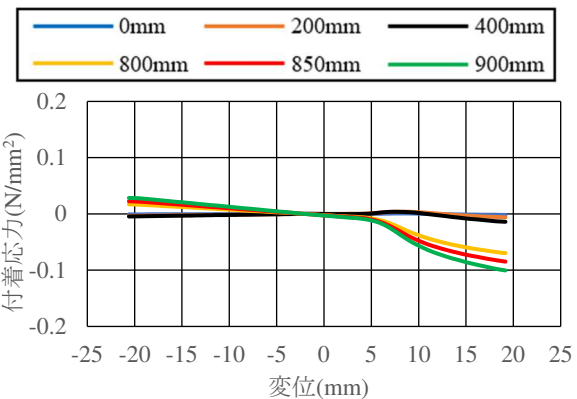
(a) 付着低減係数 $\alpha = 0.3$ 鋼材破断有り



(b) 付着低減係数 $\alpha = 0.1$ 鋼材破断有り



(c) 付着低減係数 $\alpha = 0.3$ 鋼材破断無し



(d) 付着低減係数 $\alpha = 0.1$ 鋼材破断無し

図-8 付着応力-変位関係

生じない場合は PC 鋼材とコンクリートの間の付着が十分確保されることがわかった。また、支間中央に近づくほど、完全付着に限りなく近づくことがわかった。ただし、図-8(d)では、図-8(c)と比較して腐食の程度が大きいことからわずかに付着応力が大きくなる結果が得られた。

4. 付着モデルによるプレストレスの伝達区間

道路橋示方書では、PC 鋼材の付着長を $65\phi^6$ と定めている。本検討で対象とした PC 桁では、 $\phi 7$ の PC 鋼線を 12 本使用されていたが、本解析では 12 本分の断面積を持つ 1 本の PC 鋼線と仮定した。このことから、道路橋示方書による付着長は、 $65\phi=1575\text{ mm}$ と算出される。以下では、この付着長について本解析によって比較検討する。図-8(a)より、付着低減係数 $a=0.3$ のときは、破断位置から 900 mm 離れた位置で付着応力がほとんど生じていないことがわかる。したがって、破断位置から 900 mm 以上離れると腐食の影響を受けず、PC 鋼材とコンクリートの間の付着が十分に確保されることがわかった。

一方、図-8(b)より、付着低減係数 $a=0.1$ のときは、破断位置から 1150 mm 離れた位置で付着応力がほとんど生じていないことがわかる。したがって、破断位置から 1150 mm 以上離れると腐食の影響を受けず、PC 鋼材とコンクリートの間の付着が十分に確保されることがわかった。

以上のことから、道路橋示方書で定められる付着長は、付着低減係数 $a=0.3$ のときは 1.75 倍、付着低減係数 $a=0.1$ のときは 1.26 倍、過大評価しており、安全側の評価を行っていることがわかる。

5. 腐食量および破断の影響範囲

腐食量の違いと鋼材破断の有無による付着応力-変位関係と荷重-変位関係を比較し、腐食量および鋼材破断の影響範囲について考察する。

まず、鋼材破断を再現してない解析結果の図-8(c)と図-8(d)を比較すると、腐食量の違いを仮定した付着低減係数の違いが付着応力に与える影響は少なく、ほぼ同様の結果となっていることがわかる。ただし、支間中央でモーメントの勾配がなく、鋼材破断が生じた位置の付近では付着応力が生じていないことが考えられる。そのため、例えば桁定着部等、他の領域で鋼材破断が生じた場合について検討する必要がある。

一方、鋼材破断を再現した場合、図-8(a)と図-8(b)を比較すると、腐食量の違いを仮定した付着低減係数の違いの影響が顕著であることがわかる。また、図-8(a)と図-8(c)を比較すると、鋼材破断が生じた場合、腐食量が軽微とした付着低減係数 $a=0.3$ の場合でも付着長

は約 900 mm であり、鋼材破断の影響があり、鋼材破断が生じたときに付着長が大きくなったものとする。また、図-8(a)と図-8(b)の比較により、鋼材破断後は腐食の程度に伴い付着長が若干大きくなったと考える。

鋼材破断の有無で荷重-変位関係を比較すると、ひび割れ発生荷重に影響を与えていることがわかる。ただし、本解析では支間中央のたわみが小さい解析であり、終局時の耐力は比較できていないため、その検討は今後の課題と考える。また、腐食の進行に伴い付着長がどのように大きくなるかは把握できなかったため、これに関しても今後の課題と考える。

6. まとめ

本研究では、実 PC 桁に対して、PC 鋼材の腐食が生じた場合の付着劣化を考慮した非線形解析を行った。その際、鋼材破断の有無や腐食の程度をパラメータとして、プレストレスの伝達領域ならびに鋼材破断の影響範囲について明らかにした。本研究の範囲内から以下のことが言える。

- (1) 鋼材破断がある場合と無い場合において、荷重-変位関係を比較すると、腐食程度の違いによるひび割れ発生荷重の大きさの変化は見られなかった。また、コンクリートにひび割れが発生するときの変位はいずれも 7 mm 程度で、変化は見られなかった。
- (2) 鋼材破断が無い場合は、支間中央 100 mm の鋼材破断がある場合と比較して、ひび割れ発生荷重が約 15 kN 大きくなる結果が得られた。このことから、鋼材破断の有無が PC 桁の耐荷性能に大きく影響することが明らかとなった。
- (3) 付着応力-変位関係において、鋼材破断したと仮定した解析では、付着低減係数 $a=0.3$ のときは、道路橋示方書が定める付着長が解析結果の 1.75 倍、 $a=0.1$ のときは、1.26 倍、過大評価していることがわかった。
- (4) 鋼材破断が生じていないときは付着応力に対する腐食量の影響はほとんど見られなかった。しかし、鋼材破断が生じた場合は腐食量が軽微であったとしても付着長は 900mm を要しており、鋼材破断の影響は大きいことがわかった。鋼材破断後は腐食の程度に伴い付着長が緩やかに大きくなった。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省近畿地方整備局 新都市社会技術融合創造研究会におけるプロジェクトとして実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路:
高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する
技術検討委員会報告書, pp.47, 2014.1.22.
- 2) 青木圭一, 渡邊晋也, 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 橋の性能評価, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3,
pp.283-302, 2015.
- 3) 田所敏弥, 谷村幸裕, 渡辺健, 徳永光宏: グラウト
と PC 鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレ
ストレスの評価, プレストレストコンクリート技術
協会第 19 回シンポジウム論文集, pp.209-212,
2010.10.
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに
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/V-6, pp.165-174, 1987.2.
- 5) 徳永光宏, 前田友章, 田所敏弥, 谷村幸裕: PC 鋼材
の付着特性に及ぼす鋼材種別の影響, 土木学会第 63
回年次学術講演会, 5-593, pp.1185-1186, 2008.9.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリ
ート橋・コンクリート部材編, 2017.11.