

論文 鋼材の付着の有無がポストテンション式 PC はりの挙動に与える影響に関する解析的検討

楠見 将司*1・武田 健太*2・梅原 秀哲*3

要旨: 本研究では、付着状況を変化させたポストテンション式 PC はりを対象とした荷重試験結果を対象とし、鋼材の付着の影響を考慮した有限要素解析による性能評価を試みた。その結果、解析上で鋼材の付着の有無を、離散鉄筋要素と外ケーブル要素の 2 つの鋼材要素を用いて表現することで、鋼材の付着がその全長にわたりボンドあるいはアンボンドの場合は、解析によりひび割れ状況や最大荷重を概ね再現可能であることが示された。一方、ボンドとアンボンドが混在した PC はりの性能評価に際しては、鋼材要素の境界部におけるひずみの連続性を確保することが、評価精度向上に不可欠であることが示唆された。

キーワード: 有限要素解析, PC 鋼材の付着, 外ケーブル要素, PC 鋼材のひずみの連続性

1. はじめに

現在、我が国で供用されているコンクリート橋梁の多くは、高度経済成長期に建設されたものであり、老朽化が懸念されている。特に、PC 橋梁は全体の 4 割程度を占めており、今後の維持管理が重要視されている。また、ポストテンション式の PC 橋梁においては、グラウトの充填不足が確認されているものがあり¹⁾、コンクリートと PC 鋼材間の付着の影響を適切に考慮し、橋梁の性能評価を行う必要がある。梅原らは、グラウトの重要性に着目して、鋼材径および付着状況を変化させたポストテンション式 PC はりを対象として荷重試験を実施し、鋼材の付着状況が PC はりの曲げ挙動に影響を及ぼすことを指摘している²⁾。このような劣化構造物の性能を定量的に評価する方法として、有限要素解析を用いた数値解析が挙げられる。しかし、RC 構造を対象とした研究は多数存在するのに対し、PC 構造を対象としたものは少数であるのが現状である。そこで本研究では、グラウト不良が生じた実 PC 橋の適切な性能評価手法の提案を最終的な目標に据え、その前段として、上述の荷重試験結果を対象とし、鋼材の付着の影響を考慮した有限要素解析による再現解析を試みた。

2. 解析対象部材の荷重試験結果

ここでは、前述の PC はりの荷重試験結果について述べる。表-1、2 に、PC はりの諸元と付着状況の概要、図-1 に PC 鋼材の付着状況のイメージ図を示す。表-1、2 に示した鋼材径、付着状況、はり長さ等をパラメータとしたポストテンション式 PC はりを作製し、荷重試験を行った。荷重は、2 点集中荷重である。なお、シリーズ I ~ IV は鋼材径やはりの断面形状、i ~ v シリーズは PC 鋼

表-1 PC はりの諸元

シリーズ名	鋼材径	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	偏心距離 (mm)	はり長さ (mm)	支間 (mm)
I	φ11	150	200	30	2400	2200
II	φ11	150	200	30	1500	1300
III	φ17	200	250	40	1800	1600
IV	φ23	200	300	50	1800	1600

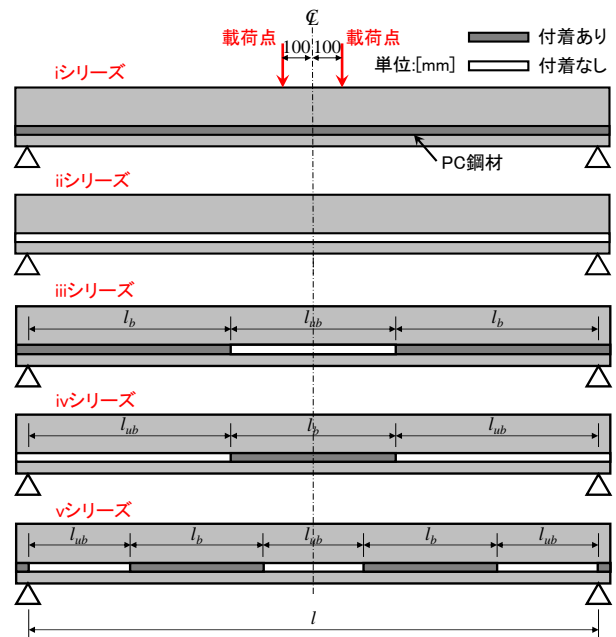


図-1 PC 鋼材の付着状況のイメージ図

表-2 PC 鋼材の付着状況の概要 (単位: mm)

シリーズ名	i		ii		iii		iv		v	
	l_b	l_{ub}	l_b	l_{ub}	l_b	l_{ub}	l_b	l_{ub}	l_b	l_{ub}
I	2200	2200	750	700	400	900	—	—	—	—
II	1300	1300	450	400	—	—	275	250	—	—
III	1600	1600	550	500	500	550	—	—	—	—
IV	1600	1600	550	500	—	—	350	300	—	—

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 教授 Ph.D (フェロー)

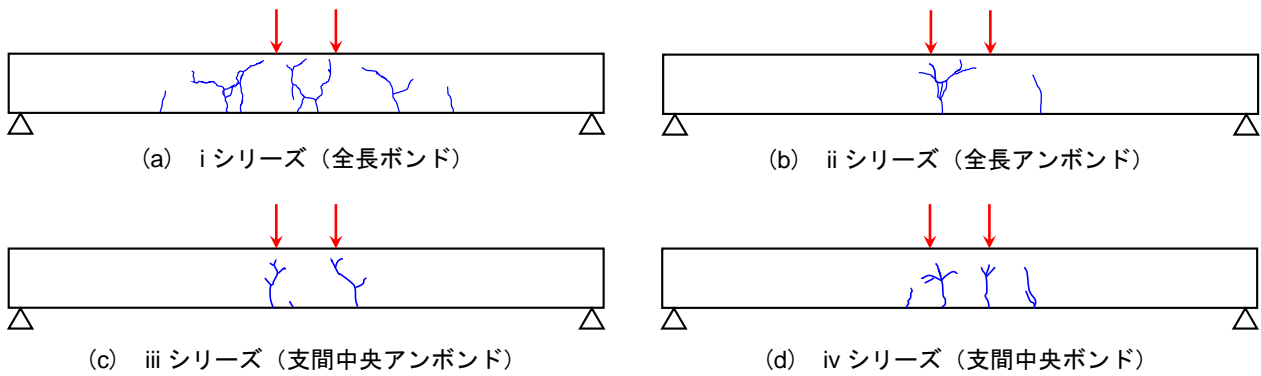


図-2 荷重試験における最大荷重時のひび割れ図 (シリーズ I)

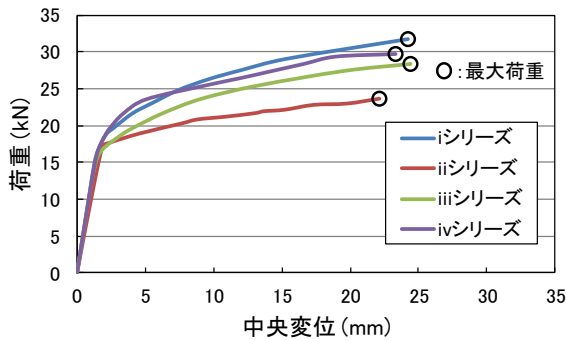


図-3 荷重-中央変位関係 (シリーズ I)

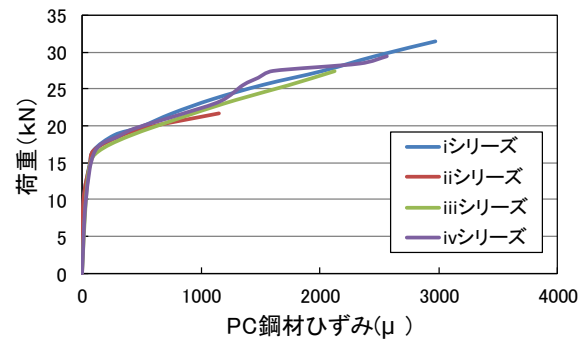


図-4 荷重-PC 鋼材ひずみ関係 (シリーズ I)

材の付着状況で分類される (i: 全長ボンド, ii: 全長アンボンド, iii: 支間中央アンボンド, iv: 支間中央ボンド, v: 支間中央・両端アンボンド)。図-2 は荷重試験における最大荷重時のひび割れ状況, 図-3 は荷重-中央変位関係, 図-4 は荷重-PC 鋼材ひずみ関係を示しており, いずれの図もシリーズ I の荷重試験結果である。図-4 で示す PC 鋼材のひずみは, 支間中央におけるものである。はりの破壊モードは付着の有無によらず, 等曲げ区間内におけるコンクリート上縁の圧縮破壊である。ひび割れ発生状況に着目すると, 支間中央におけるコンクリートと PC 鋼材の付着の有無で, ひび割れの分散性が変化する結果となった。図-3 より, i, ii シリーズに着目すると, 最大荷重 (図中の黒丸) には約 25% の差がみられた。i シリーズと iii, iv シリーズをそれぞれ比較すると, 最大荷重には 10%, 6% 程度の差がみられ, これらは i, ii シリーズの中間を推移していることがわかる。さらに, 図-4 より, 支間中央で付着が存在する i, iv シリーズに比べ, 付着が存在しない ii, iii シリーズの方が, PC 鋼材のひずみが小さくなっていることがわかる。これは, PC 鋼材の付着が存在しない場合は, 平面保持の法則が成立せず, 圧縮側のコンクリートの曲率に比べ PC 鋼材の曲率が小さくなるためと考えられる。これらの傾向は, 他のシリーズ (シリーズ II~IV) でも同様となった。このことから, 支間中央におけるコンクリートと PC 鋼材の付着状況が, はりの挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。本研究では, シリーズ I の荷重試験結果を対象

として, 有限要素解析による再現を試みた。

3. 有限要素解析による性能評価

3.1 解析方法

(1) 解析モデル

解析プログラムには, 市販の有限要素解析ソフトウェアである ATENA Ver. 4.3.1³⁾を用いた。図-5 に, 解析上の PC 鋼材の配置図を示す。コンクリートのメッシュには 1 辺 25mm の六面体を用いた。PC 鋼材の付着のある箇所は「離散鉄筋要素」を用いて表現し, コンクリートと PC 鋼材は完全付着とした。一方, 付着のない箇所は, コンクリート要素の変形に追従しない特徴を有する「外ケーブル要素」を用いて表現した。また本解析では, PC 鋼材の付着の影響を簡易的に表現するため, 定着部等のモデル化を行わず, PC 鋼材の長さを表-2 に示した付着領域と同様とした (2200mm)。さらに, 解析対象としたシリーズの PC はりでは, せん断スパン比が約 7.7 と, 曲げ破壊先行型に分類されるため, せん断補強筋は配筋せず PC 鋼材のみを配置し解析を行った。

(2) コンクリートの材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-6 に示す。圧縮側のモデルは斉藤ら, Nakamura らの研究を参考とした^{4), 5)}。このモデルは, コンクリートの圧縮応力が圧縮強度に到達するまで放物線で上昇し, その後, 一定の圧縮破壊エネルギーを消費しながら線形で軟化するものであり, 次式で表される。

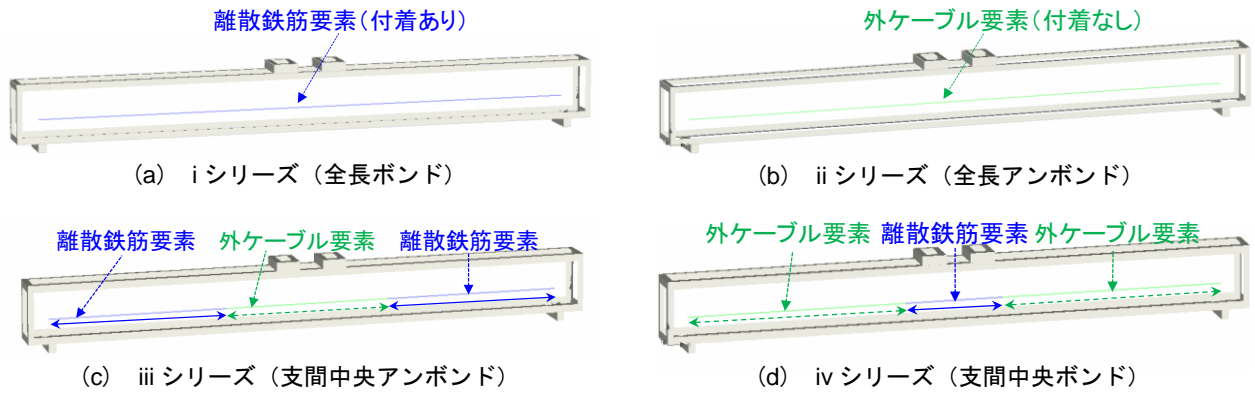


図-5 解析上のPC鋼材の配置図

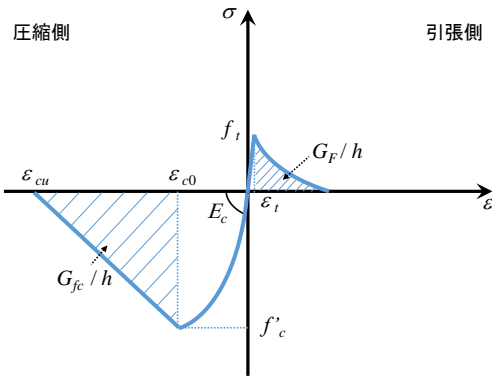


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係

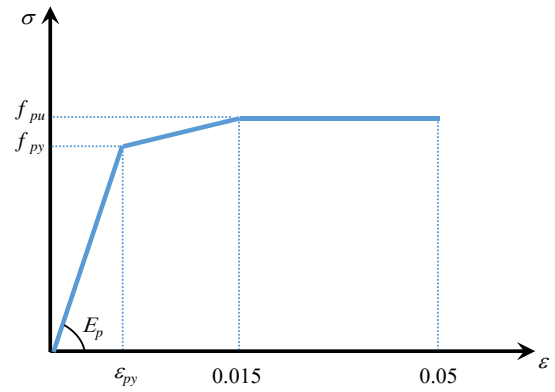


図-7 PC鋼材の応力-ひずみ関係

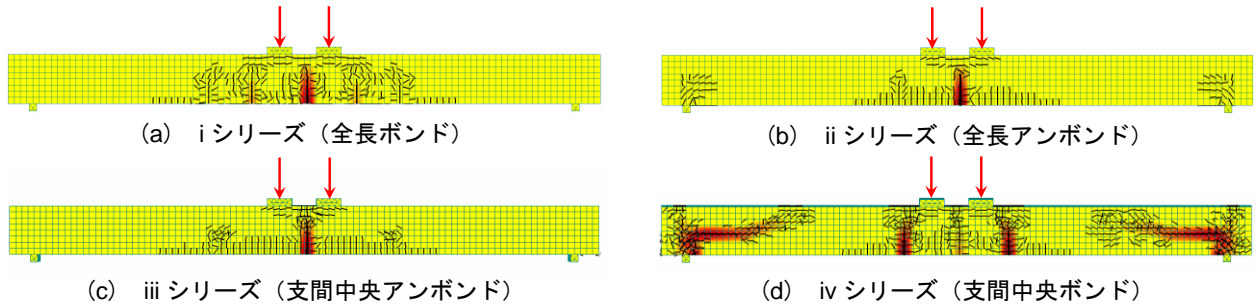


図-8 解析の最大荷重時におけるひび割れ分布図の比較

$$\sigma = \begin{cases} f'_c \left\{ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right\} & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{c0}) \\ f'_c \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c0}} & (\varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{2G_{fc}}{f'_c h} + \frac{\varepsilon_{c0}}{2} \quad (2)$$

$$G_{fc} = 8.8 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

ここに、 f'_c は圧縮強度、 ε_{c0} は f'_c 時のひずみ(= $2f'_c/E_c$)、 E_c は弾性係数、 ε_{cu} は圧縮終局ひずみ(式(2)参照)、 G_{fc} は圧縮破壊エネルギー(式(3)参照)である。また、 h は要素の等価長さであり、本解析では、ひとつのコンクリート要素の体積の3乗根に等しいと仮定した。一方、引張側の軟化曲線は指数関数とし、Hordijkのモデルを採用

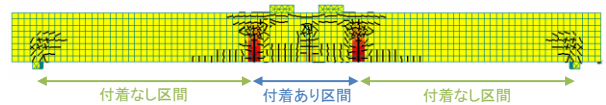


図-9 荷重 25kN 時のひび割れ発生状況 (iv シリーズ)

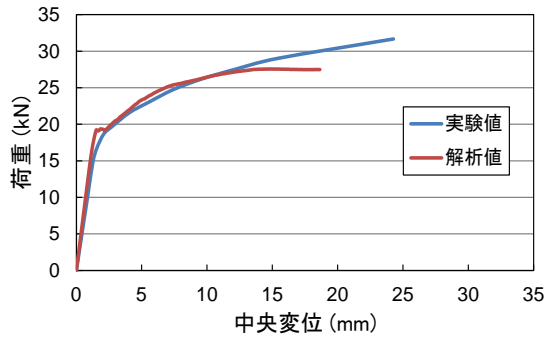
した⁶⁾。圧縮強度 f'_c には実測値を用い、弾性係数 E_c 、引張強度 f_t 、引張破壊エネルギー G_F は、コンクリート標準示方書⁷⁾に準拠し、次式に示す圧縮強度との関係式より算定した。

$$E_c = \left(2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right) \times 10^4 \quad (30 \leq f'_c < 40 \text{ N/mm}^2) \quad (4)$$

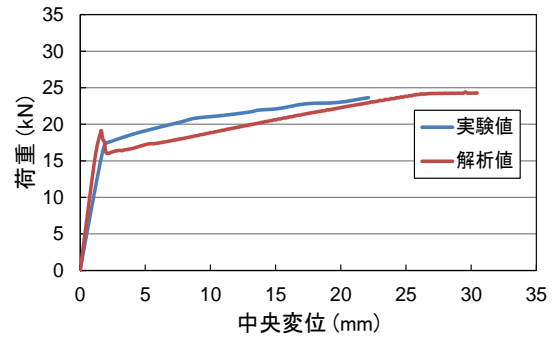
$$f_t = 0.23 \cdot f'_c{}^{2/3} \quad (5)$$

$$G_F = 10 \cdot d_{\max}{}^{1/3} \cdot f'_c{}^{1/3} \quad (6)$$

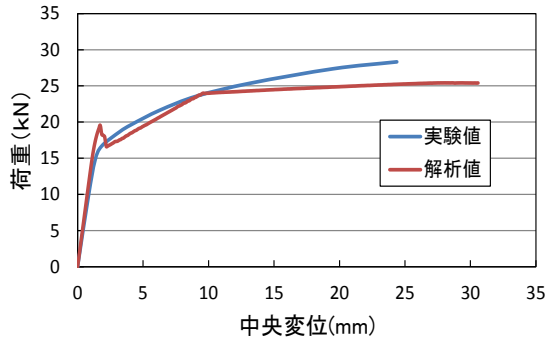
ここに、 d_{\max} は粗骨材の最大寸法であり、本解析では20mmとした。図中の G_{fc}/h 、 G_F/h はそれぞれ、圧縮・



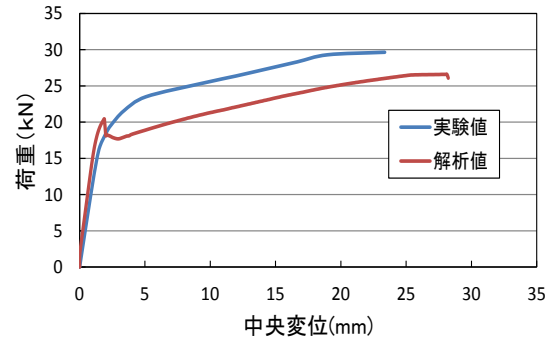
(a) i シリーズ (全長ボンド)



(b) ii シリーズ (全長アンボンド)



(c) iii シリーズ (支間中央アンボンド)



(d) iv シリーズ (支間中央ボンド)

図-10 荷重-中央変位関係における実験値と解析値の比較

引張軟化曲線および σ , ϵ 軸で囲まれた面積を示す。

(3) PC 鋼材の材料モデルとプレストレスの導入

PC 鋼材の応力-ひずみ関係には、図-7 に示すように、トリリニア型のモデルを採用した。図中の f_{py} , f_{pu} , E_p , ϵ_{py} はそれぞれ PC 鋼材の降伏強度、引張強度、弾性係数、降伏ひずみ ($=f_{py}/E_p$) である。実験では SBPR 1080/1230 の PC 鋼棒が用いられており、降伏強度、引張強度、弾性係数には道路橋示方書に記載される規格値 ($f_{py}=1080$ N/mm², $f_{pu}=1230$ N/mm², $E_p=200$ kN/mm²) を採用した⁸⁾。

解析上、PC 鋼材にプレストレスを導入する方法として、鋼材要素端部にプレストレス力を与える方法と、直接要素にひずみを導入する方法があるが、本解析では後者を選定し、鋼材要素にプレストレインを導入した。なお、プレストレインは約 3400 μ とした。

3.2 解析結果

(1) PC はりのひび割れ状況

図-8 に、解析の最大荷重時における i-iv シリーズのひび割れ分布図の比較を示す。図中には、最大主ひずみ分布も併せて示している。図-2 と比較すると、すべてのシリーズにおいて、ひび割れ状況は若干の相違はあるものの、鋼材の付着の有無で異なるひび割れの分散性の傾向は再現できていることがわかる。ただし、iv シリーズでは、支点からはり軸方向に進展するひび割れが発生した。図-9 に示す iv シリーズの解析における荷重 25kN 時のひび割れ発生状況を見ると、外ケーブル要素の端部の位置であるはりの支点上と載荷点付近の最大主ひずみ発生箇

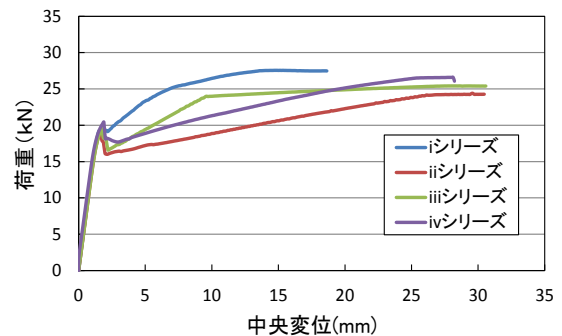


図-11 荷重-中央変位関係における解析値の比較

表-3 実験と解析における最大荷重比の比較

	最大荷重比			
	iシリーズ	iiシリーズ	iiiシリーズ	ivシリーズ
実験値	1.00	0.75	0.87	0.94
解析値	1.00	0.89	0.92	0.96

所にひび割れが発生していることが確認できる。これは、外ケーブル要素の端部において応力集中が生じ、ひび割れが集中したものと考えられる。さらに、前節で述べたように、本解析ではせん断補強筋を配筋しておらず、想定以上にせん断変形が生じ、実験と解析でひび割れ状況の相違がみられたと考えられる。したがって、鋼材の付着状況の異なる PC はりのひび割れ状況を解析により再現する際、鋼材の付着の有無を離散鉄筋要素と外ケーブル要素の 2 種類でモデル化しても基本的には差し支えないと考えられる。しかし、鋼材要素の組み合わせのパターンによっては、解析で想定外の破壊を呈する可能性も

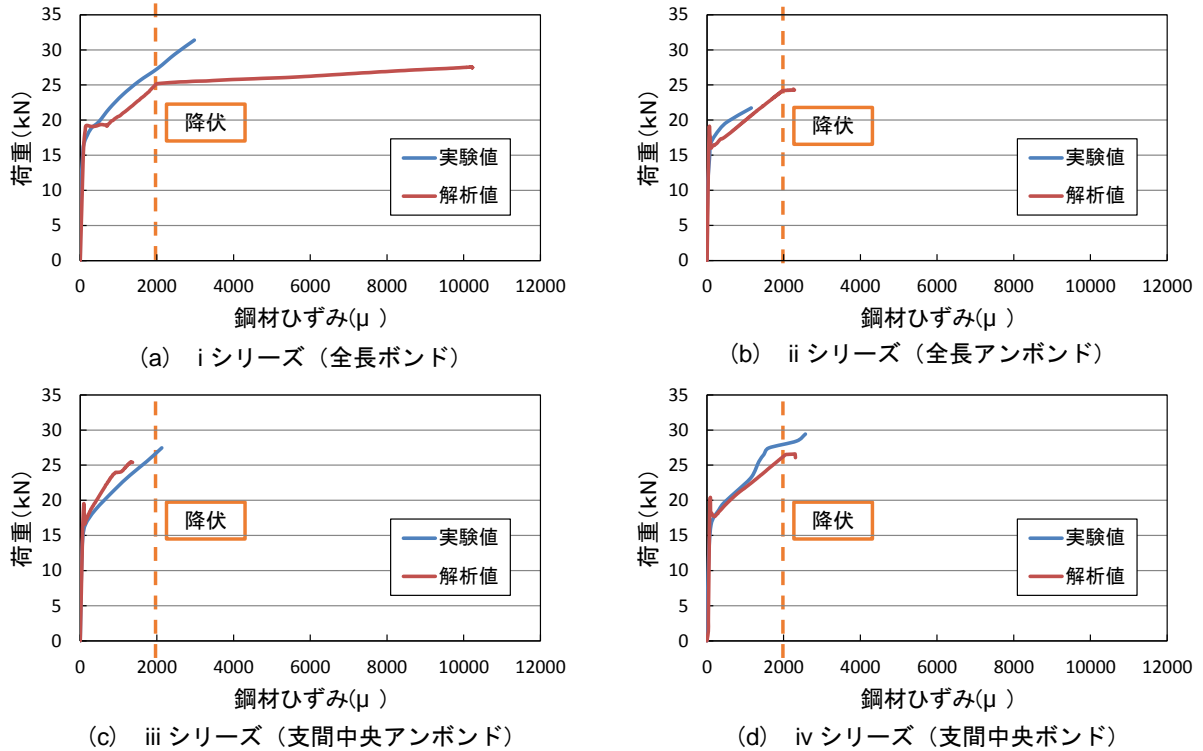


図-12 荷重-PC 鋼材ひずみ関係における実験値と解析値の比較

ある。

(2) 荷重-中央変位関係

図-10 に、荷重-中央変位関係における実験値と解析値の比較を示す。図は、プレストレス導入後を原点として示している。図より、主な傾向としては、i~iii シリーズでは実験値と解析値は概ね一致しているが、iv シリーズでは実験値と解析値には相違がみられた。これは、本節(1)で述べたように破壊モードが実験と解析で異なるためと考えられる。初期剛性に関しては、i, iii シリーズでは実験値と解析値は概ね一致しているが、ii, iv シリーズについては、解析値が実験値を上回った。これは、解析では付着が存在しない区間を外ケーブル要素にて表現しており、シースの空隙部分をコンクリートより控除しておらず、支間中央における断面の剛性が異なっていることが原因と考えられる。また、i シリーズ以外の解析値に着目すると、曲げひび割れ発生直後に荷重が低下した。これは、曲げひび割れ発生と同時に載荷点直下のコンクリートにもひび割れが生じたためと考えられる。

図-11 に、荷重-中央変位関係における各シリーズの解析値の比較を示す。図-3 と比較すると、ひび割れ後の挙動は、実験と同様に i, ii シリーズの中間を iii, iv シリーズが推移しており、解析により概ね再現できている。また、iii, iv シリーズでは、実験では iii シリーズに比べ、iv シリーズの方が荷重は大きく出る傾向にあったが、解析では曲げひび割れ後から中央変位 20mm 程度までは逆の傾向を示し、20mm 以降は実験と同様な傾向であった。

ここで、i シリーズに対する他のシリーズの最大荷重の比について考える。表-3 に、実験と解析における最大荷重比の一覧を示す。表に示すように、実験と解析で最大荷重比の値については最大で 14% の相違がみられるが、実験の最大荷重比の傾向については、解析でも再現できていることがわかる。

(3) 荷重-PC 鋼材ひずみ関係

図-12 に、荷重-PC 鋼材ひずみ関係における実験値と解析値の比較を示す。PC 鋼材のひずみは、支間中央に計測点を配置し、抽出したものである。図には、PC 鋼材降伏時のひずみも併せて示しており、そのひずみは 2000 μ を示しているが、プレストレイン分 (3400 μ) をシフトしているため、解析における実際の降伏ひずみは 5400 μ である。図より、i シリーズについては PC 鋼材降伏後のひずみが、実験値に比べ解析値の方が大きくなっているものの、PC 鋼材が降伏するまでは、すべてのシリーズにおいて解析値は実験値を概ね再現しているといえる。

(4) PC 鋼材ひずみの妥当性の検証

解析で 2 種類の鋼材要素を用いたことで、得られた PC 鋼材ひずみが妥当であるかを、はり軸方向の PC 鋼材ひずみ分布より検証することとした。図-13 に、解析における荷重 15kN 時のはり軸方向の PC 鋼材ひずみ分布の比較を示す。図には、PC 鋼材ひずみの計測点を赤丸で示しており、支間中央 1 点、載荷点直下 2 点、せん断スパン中央 2 点、支点直上 2 点の計 7 点とした。iii, iv シリーズについては、分散鉄筋要素と外ケーブル要素の境界部で

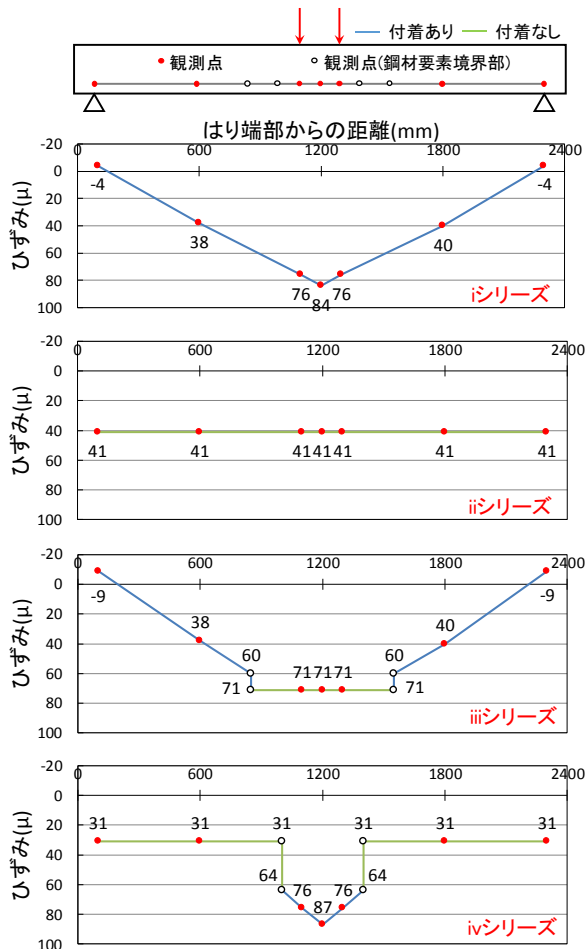


図-13 解析における荷重 15kN 時のはり軸方向の PC 鋼材ひずみ分布の比較

もひずみを計測した。また、図中のひずみは、プレストレス導入後からの増分である。図より、i シリーズでは支間中央においてひずみが最大となり、ii シリーズでは PC 鋼材全長にわたりひずみが一定となっていることから、全長ボンド、全長アンボンドの場合において PC 鋼材に生じるひずみの特徴を再現できているといえる。それに対し、iii、iv シリーズでは、外ケーブル要素を用いた箇所では、ii シリーズと同様に PC 鋼材ひずみが一定となっているが、離散鉄筋要素と外ケーブル要素の境界部のひずみに着目すると、ひずみが一時的に不連続となっていることがわかる。このことから、PC 鋼材の付着が全長にわたりボンド、アンボンドの PC はりの解析を行う場合、これらの鋼材要素を用いることで PC 鋼材ひずみの妥当性は確保できる。一方、付着の有無が混在する場合においては、鋼材要素の境界部におけるひずみの連続性を確保することが、評価精度の向上につながると考えられる。

4. まとめ

本研究では、PC 鋼材の付着状況を変化させたポストテ

ンション式 PC はりの荷重試験結果を対象とし、有限要素解析による再現解析を試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) PC 鋼材の付着の有無を、解析上で離散鉄筋要素と外ケーブル要素の 2 種類を用いて表現することで、鋼材が全長にわたりボンドあるいはアンボンドの場合は、解析によりひび割れ状況や最大荷重を比較的高精度で表現可能であることが示された。
- (2) PC 鋼材の付着の有無が混在する場合、2 種類の鋼材要素を組み合わせることで付着の影響を解析上で表現すると、鋼材要素の境界部における PC 鋼材ひずみ分布より明らかとなった。PC 鋼材の付着の有無が混在した PC はりの解析評価を行う際には、PC 鋼材ひずみ連続性を確保することが、高精度な解析評価を行うために不可欠であるといえる。

また本解析では、PC 鋼材の付着の影響のみを確認するため、PC 鋼材の定着部やせん断補強筋を省いてモデル化したが、将来的に実構造物の解析的性能評価を行うためにはこれらを精密にモデル化すべきである。これらが解析値に与える影響に関する検討、そして 3.2 節(2)で述べたように、曲げひび割れ発生後の挙動が実験と解析で相違がみられる点 (図-11 参照) の考察については今後の課題である。

参考文献

- 1) たとえば、三浦ら：暮坪陸橋の塩害による損傷と対策-(2)PC 鋼材の腐食とその補強対策、橋梁と基礎、pp. 37-40, 1993.
- 2) 梅原ら：PC はりの曲げ挙動に与える鋼材の付着状態の影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 13, No. 2, pp. 695-700, 1991.
- 3) Cervenka, V., Jendele, L. and Cervenka, J.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.
- 4) 齊藤ら：剛体バネモデルを用いた RC パネルのせん断二次破壊に関する解析的研究、土木学会論文集、No. 704, V-55, pp. 219-234, 2002.
- 5) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI, pp. 259-272, 1999.
- 6) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 7) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説/III コンクリート橋編, 2002