

PC鋼材の付着の影響を考慮したPCはり部材の耐力評価手法の検討

名古屋工業大学		○松原	左月
名古屋工業大学		修士(工学)	楠見 将司
名古屋工業大学	正会員	博士(工学)	武田 健太

Abstract : In this research, results of loading tests of post-tensioned PC beam with different bonding condition of PC tendons were selected as a research object. The load bearing capacity of PC beams were simulated with Finite Element (FE) analysis. Then, PC tendons were simply expressed by two kinds of line elements. As a result, numerical results were able to simulate the tendency of the load bearing capacity of PC beams by using adequate constitutive models.

Key words : Bonding condition of PC tendon, Finite Element analysis, External cable

1. はじめに

現在、わが国で供用され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橋梁は全体の約4割を占め、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実PC橋梁においては、グラウトの充填不良が確認されているものがある。この場合、PC鋼材がグラウトにより防錆されないため、将来的にPC鋼材の腐食や破断が生じる可能性が高く、実際に破断した例もある¹⁾。また、PC鋼材の付着が存在しない場合は、耐力低下や変形増加など、設計時に想定されていない挙動を示す可能性がある。そのため、PC橋梁の性能評価を行う際には、コンクリートとPC鋼材間の付着の影響を適切に考慮する必要がある。梅原らは、鋼材径やはり寸法、鋼材の付着状態を変化させたポストテンション式PCはり部材を対象として載荷試験を実施し、鋼材の付着状態がPCはり部材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、有限要素解析などを用いた数値解析が挙げられる。しかし、RC構造を対象とした解析的研究に比べ、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橋梁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、上述の載荷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耐力評価を行った。

2. 解析対象部材の載荷試験の概要

梅原らは、鋼材径、付着状態、支間長などをパラメータとしたポストテンション式PCはり部材を製作し、載荷試験を行っている²⁾。表-1、2に、PCはり部材の諸元と付着状態の概要、図-1にPC鋼材の付着状態のイメージ図を示す。載荷は、等曲げ区間200mmとした2点集中載荷である。なお、シリーズI~IVは鋼材径やはり断面形状、Case a~eはPC鋼材の付着状態で分類される。図-2は荷重-中央変位関係、図-3は荷重-PC鋼材ひずみ関係であり、いずれの図もシリーズIの実験結果である。図-3中のPC鋼材ひずみは、支間中央において計測されたものである。図-2より、Case a, bに着目すると、最大荷重には約25%の差が生じている。Case c, dはそれぞれ、Case a, bの中間を推移していることが分かる。また、図-3より、支間中央で付着があるCase a, dと比較して、付着がないCase b, cの方が、PC鋼材のひずみが小さくなっている。これは、鋼材の付着がない区間では、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り、平面保持の仮定が成立しないことが原因と考えられる。この傾

表-1 PCはり部材の諸元²⁾

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

※偏心距離: 断面中心から鋼材中心までの距離

表-2 PC鋼材の付着状態の概要²⁾

シリーズ名	a		c		d		e	
	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

※ l_b : ボンド区間, l_{ub} : アンボンド区間

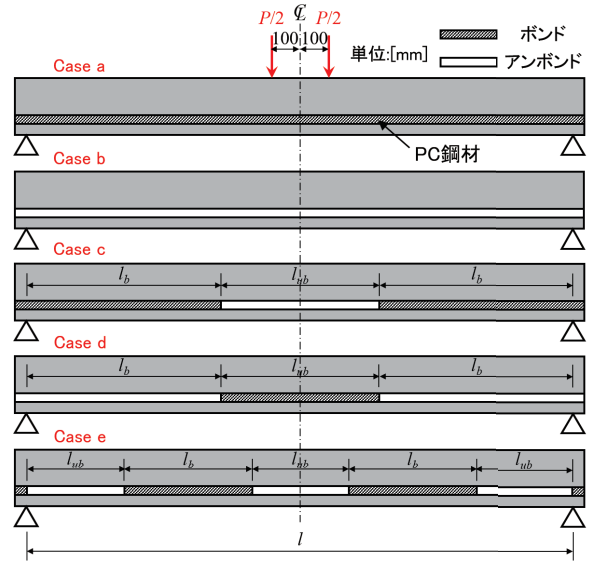


図-1 PC鋼材の付着状態のイメージ図²⁾

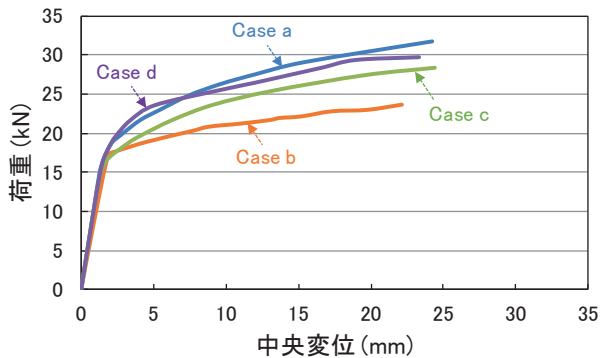


図-2 荷重-中央変位関係(シリーズ I)

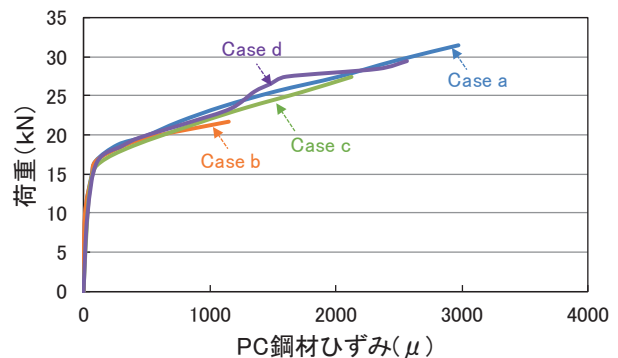


図-3 荷重-PC鋼材ひずみ関係(シリーズ I)

向は、他のシリーズでも同様となった。これらより、支間中央におけるPC鋼材の付着状態が、PCはり部材の挙動に影響を及ぼすことを明らかとしている。

3. 有限要素解析による耐力評価

3.1 解析方法

解析プログラムには、汎用有限要素解析ソフトウェアのATENA 3D³⁾を用いた。図-4に、解析におけるシリーズII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25 mmの六面体を用いた。ボンドの箇所は離散鉄筋要素を用い、コンクリートとPC鋼材は完全付着とした。その一方で、アンボンドの箇所は外ケーブル要素を用いた。外ケーブル要素は、その端部のみがコンクリート内の節点に結合され、その他の箇所ではコンクリート要素の変形に追随しない特徴を有するため、付着のない状態とみなせる。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-5に示す。圧縮側のモデルは斉藤ら、Nakamuraらの研究^{4),5)}を参考とした。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。定式化すると、式(1)~(3)のように表される。

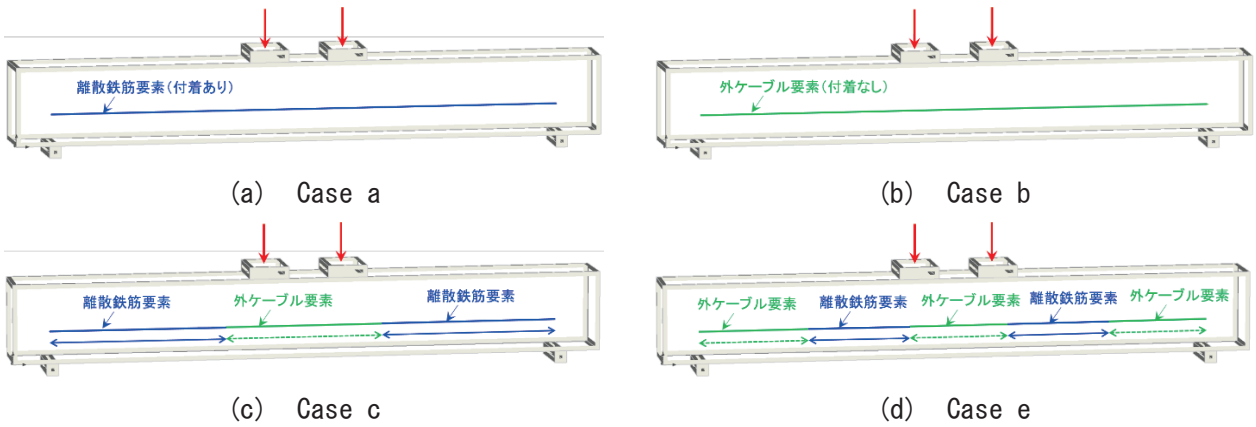


図-4 解析におけるPC鋼材の配置図 (シリーズ II)

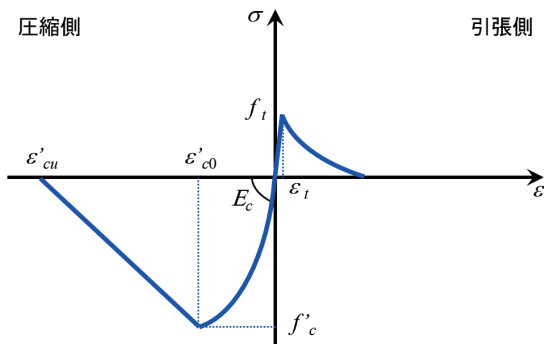


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

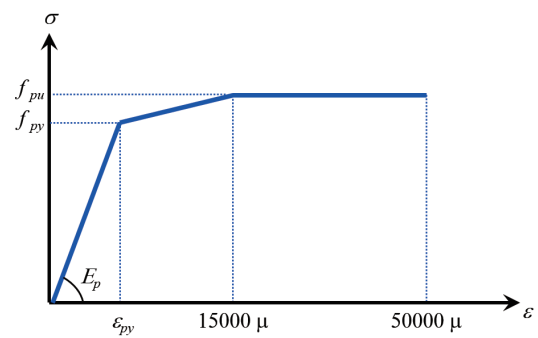


図-6 PC鋼材の応力-ひずみ関係

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

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

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

ここに、 f'_c は圧縮強度、 ε'_{c0} は f'_c 時のひずみ、 E_c は弾性係数、 ε'_{cu} は圧縮終局ひずみ(式(2)より算出)、 G_{fc} は圧縮破壊エネルギー(式(3)より算出)である。 h は要素の等価長さであり、本解析では、一つのコンクリート要素の体積の3乗根に等しいものとした。一方、引張側の軟化曲線には、式(4)~(5)で表されるHordijkのモデル⁶⁾を採用した。

$$\sigma = f_t \left[\left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_u} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_u} \right) - \frac{w}{w_u} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \right] \quad (4)$$

$$w_u = 5.136 \frac{G_F}{f_t} \quad (5)$$

ここに、 f_t は引張強度、 w はひび割れ幅、 w_u は限界ひび割れ幅(式(5)より算出)、 c_1, c_2 は係数(それぞれ3, 6.93)、 G_F は引張破壊エネルギーである。また、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⁾に記載される式(6)~(8)より算出した。

$$E_c = \begin{cases} \left(2.2 + \frac{f'_c - 18}{20}\right) \times 10^4 & (f'_c < 30 \text{ N/mm}^2) \\ \left(2.8 + \frac{f'_c - 30}{33}\right) \times 10^4 & (30 \leq f'_c < 40 \text{ N/mm}^2) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_t = 0.23 f'_c{}^{2/3} \quad (7)$$

$$G_F = 10 d_{\max}^{1/3} f'_c{}^{1/3} \quad (8)$$

PC鋼材の応力-ひずみ関係には、図-6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_{pu} , f_{py} , E_p , ϵ_{py} はそれぞれ引張強度, 降伏強度, 弾性係数, 降伏ひずみ ($=f_{py}/E_p$) である。載荷実験では, SBPR 1080/1230のPC鋼棒が用いられており, 引張強度, 降伏強度はそれぞれ1230 N/mm², 1080 N/mm²とし, 弾性係数は200 kN/mm²とした。

PC鋼材にプレストレスを導入する方法には, 鋼材要素端部にプレストレス力を与える方法と, 鋼材要素に直接初期ひずみを導入する方法があるが, 本解析では後者を選択し, 鋼材要素にプレストレインを導入した。なお, 導入したプレストレインはすべてのシリーズで統一し, 約3400 μ (導入応力680 N/mm²) とした。

3. 2 解析結果

(1) はりのひび割れ状況

図-7に, シリーズIIにおける最大荷重時の実験と解析のひび割れ図の比較を示す。解析結果のひび割れ図には最大主ひずみ分布も併せて示している。実験と解析ともに, すべてのケースで, 等曲げ区間におけるコンクリートの圧縮破壊で終局に至った。解析における最大主ひずみ発生箇所は, すべてのケースで同等となっている。実験と解析のひび割れ図を比較すると, PC鋼材の付着状態により異なるひび割れの分散性が, 解析でも概ね表現できていることが分かる。

(2) 荷重-中央変位関係

図-8に, シリーズIIにおける荷重-中央変位関係の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。初期剛性に着目すると, 解析値が実験値を若干上回った。これ

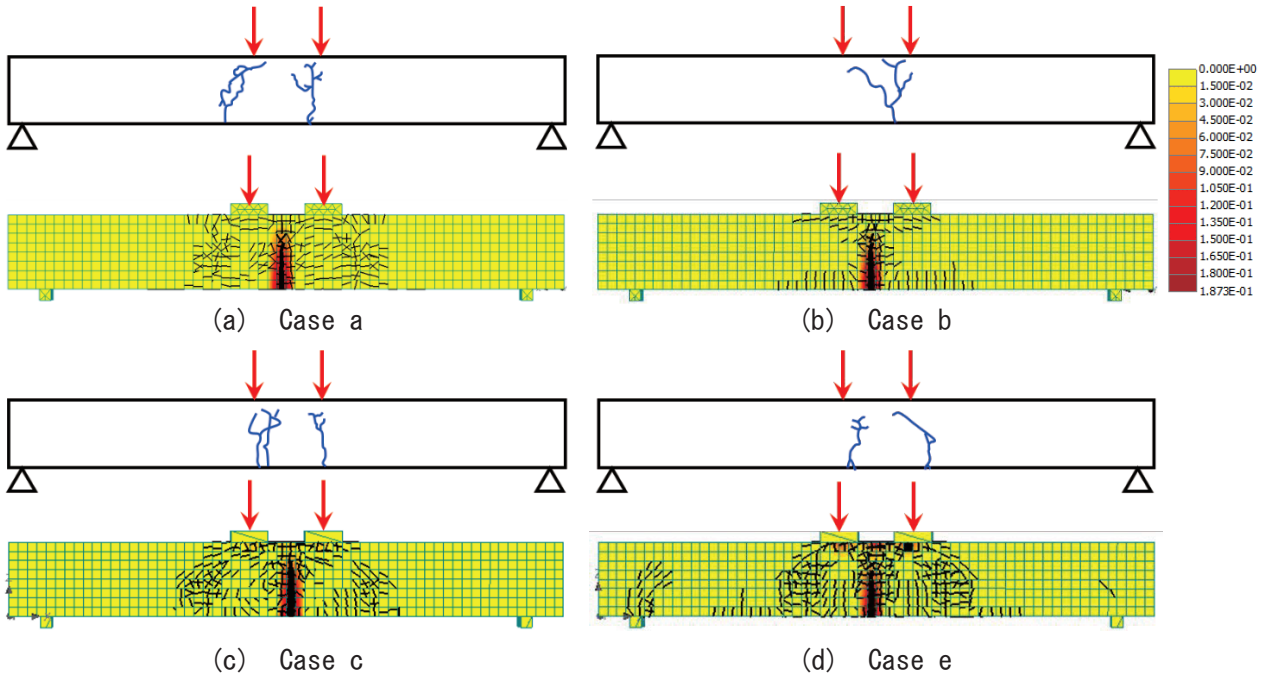


図-7 シリーズ II における最大荷重時の実験と解析のひび割れ図の比較 (上 : 実験, 下 : 解析)

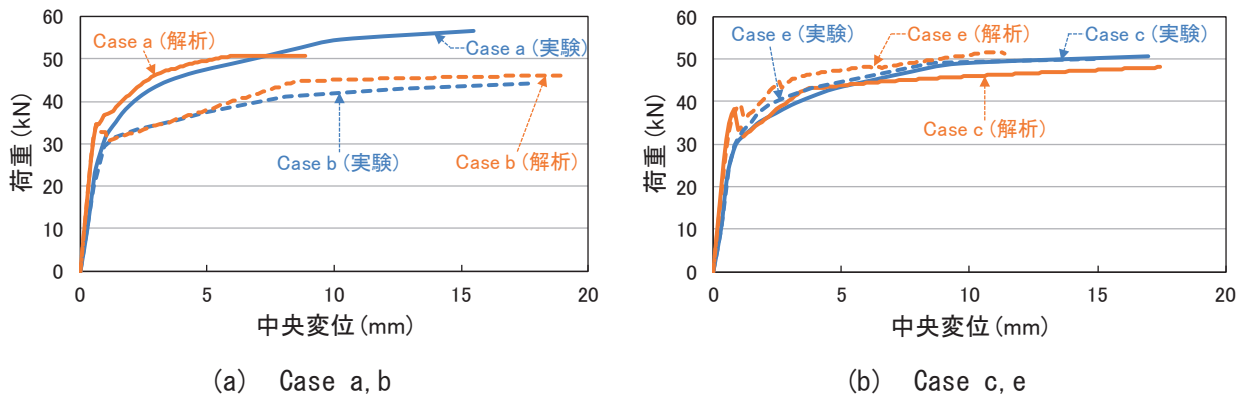


図-8 シリーズ II における荷重-中央変位関係の実験値と解析値の比較

は、コンクリートの弾性係数を圧縮強度より推定したことで、実験との差が生じたためと考えられる。最大荷重に関しては、実験値と解析値は概ね同等となった。また、Case aを除いた3ケースで、ひび割れ発生直後に荷重が低下していることが分かる。これは、ひび割れ発生と同時に載荷版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。

(3) 最大荷重の比較

本研究で得られた解析結果を、最大荷重で整理し実験結果と比較することとした。図-9は、縦軸に実験値、横軸に解析値の最大荷重をプロットしたものである。図中には比較として、実験値=解析値となる補助線を実線で示した。図のように、すべてのシリーズにおいて、実験値と解析値が概ね一致しており、鋼材の付着状態により異なる最大荷重の傾向を、解析により概ね捉えられていることが分かる。また、決定係数は $R^2=0.991$ と、実験値との相関性は高く、十分な精度で実験を再現できるといえる。

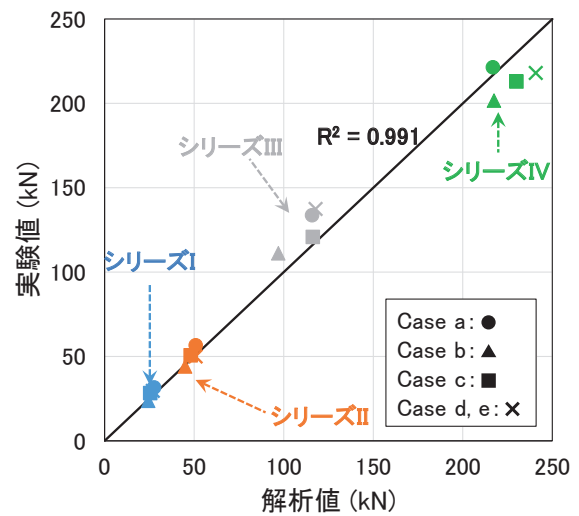


図-9 実験と解析における最大荷重の比較

(4) PC鋼材ひずみの妥当性の検討

解析により得られたPC鋼材ひずみが妥当であるか、部材軸方向のひずみ分布より検討することとした。図-10に、シリーズIIの部材軸方向のPC鋼材ひずみ分布における解析値の比較を示す。ここでは、ひび割れ発生前後のPC鋼材ひずみ分布の傾向を把握するため、荷重20kNおよび40kN時の結果を示す。PC鋼材ひずみは、Case a, bでは支点直上、せん断スパン中央、載荷点直下、支間中央の計7点で、Case c, eでは支点直上、支間中央、鋼材要素境界部の5点(Case c)あるいは7点(Case e)で計測した。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、Case a, bに着目すると、Case aではひずみが支間中央で最大となるのに対し、Case bでは部材全長にわたりひずみが一様となっている。このことから、PC鋼材の付着状態が部材全長にわたりボンドあるいはアンボンドの場合は、PC鋼材に生じるひずみの特徴を再現できている。一方、Case c, eでは、鋼材要素の境界部でひずみが一様となっており、特にひび割れ発生後はその影響が顕著となる。したがって、PC鋼材の付着の有無が混在する場合のPCはり部材の性能評価に際しては、鋼材要素の境界部のひずみの連続性を確保することが、解析評

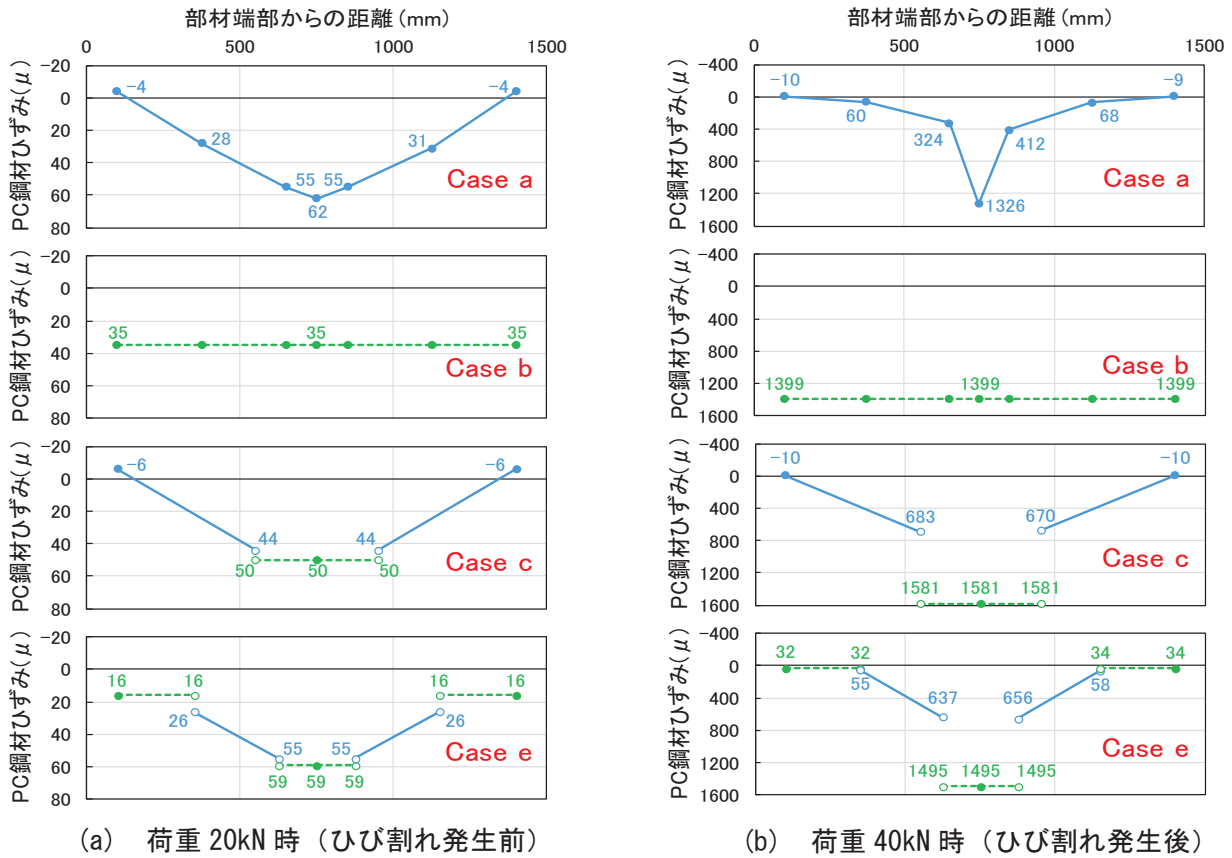


図-10 部材軸方向のPC鋼材ひずみ分布における解析値の比較 (シリーズII)

価精度の向上につながるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、鋼材径やはり寸法、鋼材の付着状態をパラメータとしたポストテンション式PCはり部材を対象として行われた載荷試験結果を対象として、有限要素解析による耐力評価を試みた。その結果、PC鋼材の付着の有無を、解析上で2種類の鋼材要素により表現することで、はり寸法や鋼材径によらず、解析により最大荷重の傾向を概ね捉えられることが示された。一方、解析によりPC鋼材の付着の影響を考慮したPCはり部材の性能評価を行う場合は、鋼材要素の境界部におけるPC鋼材ひずみの連続性を確保することが、高精度な解析評価には不可欠であることが示唆された。

参考文献

- 1) たとえば、小林ら：妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策，橋梁と基礎，Vol.45，No.9，2011.
- 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. et al.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.
- 4) 斉藤ら：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. et al.: 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：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.