

論文 PC 鋼材の付着およびプレキャスト部材接合部が PC 柱部材の力学性能に与える影響に関する解析的検討

武田 健太*1・川村 駿*2・梅原 秀哲*3

要旨: 本研究では、PC 鋼材の付着状態やプレキャスト部材数をパラメータとして行われた、プレキャスト PC 柱部材の静的交番載荷試験結果を対象として、有限要素解析による再現解析を試みた。その結果、解析上で PC 鋼材の付着の影響を 2 種の鋼材要素を用いて表現し、かつ適切な材料モデルを適用すれば、PC 柱部材の力学性能を有限要素解析により概ね表現できることが示された。また、解析によるプレキャスト PC 柱部材の性能評価に際しては、プレキャスト部材の接合部付近の剛性を適切に設定することが、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, プレキャスト部材, PC 鋼材の付着状態, 界面要素

1. はじめに

近年、工期短縮や省力化等を図るため、プレキャスト部材を用いたプレキャスト工法やグラウト充填作業の必要のないアンボンド工法により、構造物が建設される例が増加している。プレキャスト部材により構成される柱部材の場合、曲げモーメントが大きくなる箇所で回転変形が生じるため、部材の接合部での挙動を適切に考慮したうえで性能評価を行う必要がある。高橋らは、プレキャスト PC 柱部材に対して、プレキャストブロックの分割数、PC 鋼材の付着状態、プレストレス量をパラメータとして、静的正負交番載荷実験を実施している。その結果、プレストレス量が同一であれば、ブロック分割数に比べ鋼材の付着状態の方が力学性能に影響を及ぼしやすいことを指摘している¹⁾。このような力学性能を定量的に把握する手段として、有限要素解析等を用いた数値解析が挙げられる。ところが、RC 構造を対象とした解析的研究²⁾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³⁾であるのが現状である。そこで本研究では、上述の載荷試験結果を対象とし、プレキャスト部材の分割数および鋼材付着の影響を考慮した有限要素解析による再現解析を行った。

2. 解析対象部材の載荷試験結果

表-1 に実験ケース、図-1 に対象部材の諸元および載荷状況を示す。図中には、変位の測定箇所も併せて示している。対象部材は、柱部とフーチング部より構成され、両者はφ17 の PC 鋼棒 2 本に導入されたプレストレスにより圧着接合されている。実験パラメータは、柱部におけるプレキャストブロックの分割数、PC 鋼材の付着

表-1 実験ケース

| Case No. | 柱部の分割数 | PC鋼材の付着状況 |
|----------|--------|---------------|
| Case A | A-1 | 1 |
| | A-2 | (1200 mm × 1) |
| Case B | B-1 | 2 |
| | B-2 | (600 mm × 2) |
| Case C | C-1 | 3 |
| | C-2 | (400 mm × 3) |
| | | ボンド |
| | | アンボンド |

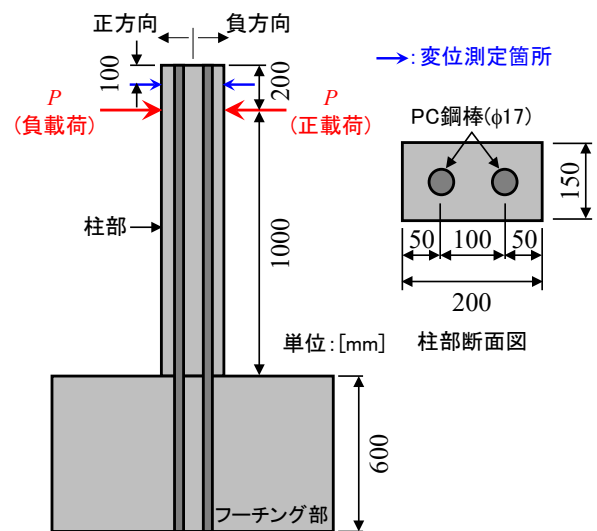


図-1 対象部材の諸元および載荷状況

状態、プレストレス量である。プレキャストブロックの分割数は 1 分割(分割なし)~3 分割、PC 鋼材の付着は、その全長にわたり付着あり (以下、ボンド) あるいは付着なし (以下、アンボンド)、柱部に導入されたプレストレスは 0.98~9.80 N/mm² として、静的正負交番載荷実験

*1 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)

*2 名古屋工業大学 工学部 都市社会工学科 環境都市系プログラム

*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)

を行っている。プレキャストブロックの接合部にはエポキシ樹脂が塗布されており、柱基部とブロックの接合部のみドライジョイントである。荷重サイクルは、荷重点付近で計測された変位が 5 mm の整数倍となるように設定している。ただし、Case A-1 のみ、1 回目の正方向の荷重の変位は 4 mm である。

図-2 に荷重-変位包絡線、図-3 に Case A の柱部における PC 鋼材のひずみ分布を示す。図-2 中の変位は前述のように荷重点付近で計測された変位である。図-3 中の凡例は、荷重サイクルの変位を表しており、PC 鋼材ひずみは荷重により引張側となる PC 鋼材 (図-1 中の右側) のものである。いずれの結果も、正方向の荷重により得られたものであり、柱部におけるプレストレスは 4.90 N/mm^2 (PC 鋼材 1 本あたりの緊張力: 73.5 kN) である。図-2 より、最大荷重に着目すると、Case A-2 を除き、アンボンドはボンドに比べ約 25%低下している。道路橋示方書によれば、PC 鋼材とコンクリートとの付着がない場合の破壊抵抗曲げモーメントは、付着がある場合の破壊抵抗曲げモーメントの 70%とすると記載されている⁴⁾ことから、荷重試験結果は妥当なものと考えられる。また、PC 鋼材の付着状態が同じ実験結果どうしを比較すると、Case A-2 を除き、柱部の分割数によらず、最大荷重は概ね同等となっていることがわかる。図-3 より、ボンドではモーメントが最大となる柱基部において PC 鋼材のひずみも最大となるのに対し、アンボンドでは柱基部でひずみが若干大きくなるものの、柱全長にわたり概ね様なひずみ分布となっている。これは、PC 鋼材の付着が存在しない区間では、ひずみが平均化され、圧縮側のコンクリートの曲率に比べ引張側の PC 鋼材の曲率の方が小さくなるため、すなわち平面保持の仮定が成立しないためと考えられる。これらより、対象部材の場合、プレキャストブロックの分割数よりも、PC 鋼材の付着の方が、部材の力学性能に影響を与えやすいことを明らかとしている。

3. 有限要素解析による再現解析

3.1 解析方法

(1) PC 鋼材のモデル化の方法

上述の荷重試験結果を対象として、有限要素解析による再現解析を行った。解析プログラムには、汎用有限要素解析ソフトウェア ATENA Ver. 4.3.1⁵⁾を用いた。コンクリートのメッシュには四面体を採用した。図-4 に、Case A における解析上の PC 鋼材の配置図を示す。ボンドでは離散鉄筋要素を用いて表現し、コンクリートと PC 鋼材は完全付着を仮定した。一方、アンボンドで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要素に固定され、他の箇所ではコンクリート

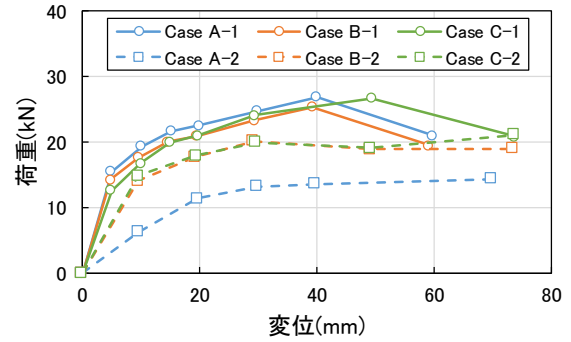
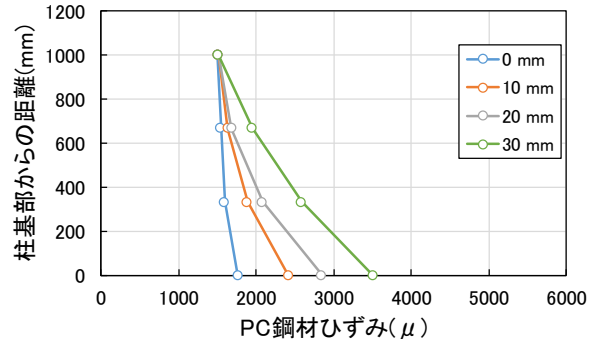
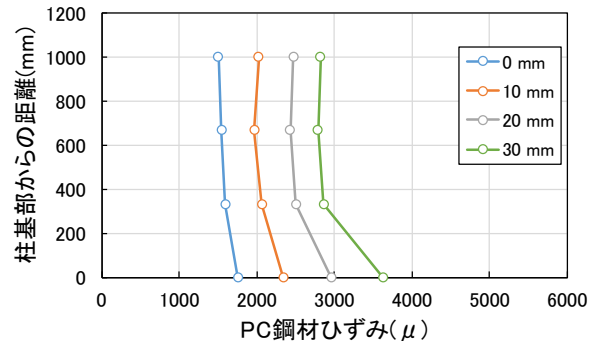


図-2 荷重-変位包絡線

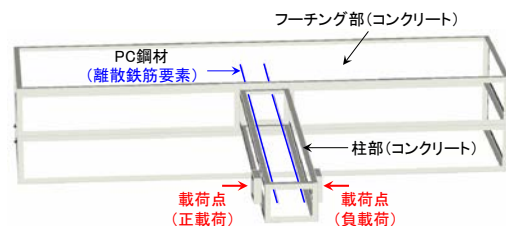


(a) Case A-1 (ボンド)

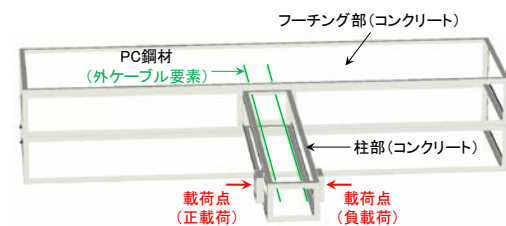


(b) Case A-2 (アンボンド)

図-3 柱部における PC 鋼材のひずみ分布 (Case A)



(a) Case A-1 (ボンド)



(b) Case A-2 (アンボンド)

図-4 解析上の PC 鋼材の配置例 (Case A)

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。

(2) コンクリートの材料モデル

解析で用いた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、上昇曲線は CEB-FIP Model code 1990⁶⁾に準拠し、軟化は直線形状とした。定式化すると式(1)~(3)のようになる。

$$\sigma'_c = f'_c \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x} \quad (1)$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon_p, \quad k = E_c / E_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_d = \varepsilon_p + \frac{w_d}{L} \quad (3)$$

ここに、 σ'_c は圧縮応力、 ε はひずみ、 f'_c は圧縮強度、 k は形状パラメータ (=2.0)、 x は正規化されたひずみ、 ε_p は f'_c 時のひずみ (= $2f'_c/E_c$)、 E_c は初期弾性係数、 E_0 は割線弾性係数 (= f'_c/ε_p)、 ε_d は限界圧縮ひずみ、 w_d は限界圧縮変位 (0.5 mm)、 L は要素長さ (30 mm) である。一方、引張側の軟化曲線には、式(4)~(5)に示す Hordijk のモデルを採用した⁷⁾。

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

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

ここに、 σ は引張応力、 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)参照)、 c_1, c_2 は係数 (それぞれ 3, 6.93)、 G_F は破壊エネルギーである。表-2 に、解析におけるコンクリートの物性値一覧を示す。圧縮強度には実測値を用い、弾性係数、引張強度、破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書⁸⁾に準拠し、それぞれ次式により算出した。

$$E_c = \begin{cases} \left(2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right) \times 10^4 & (30 \leq f'_c < 40 \text{ N/mm}^2) \\ \left(3.1 + \frac{f'_c - 40}{50} \right) \times 10^4 & (40 \leq f'_c < 70 \text{ N/mm}^2) \end{cases} \quad (6)$$

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

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

ここに、 d_{\max} は粗骨材の最大寸法であり、本解析では 20 mm とした。

本解析では、プレキャストブロックの接合部に界面要素を設け、次式に示すせん断強度式を適用した⁹⁾。

$$\tau = \frac{f'_c - f_t}{2\sqrt{f'_c f_t}} \sigma + \frac{\sqrt{f'_c f_t}}{2} \quad (9)$$

ここに、 τ はせん断強度、 σ は直応力である。界面要素は、

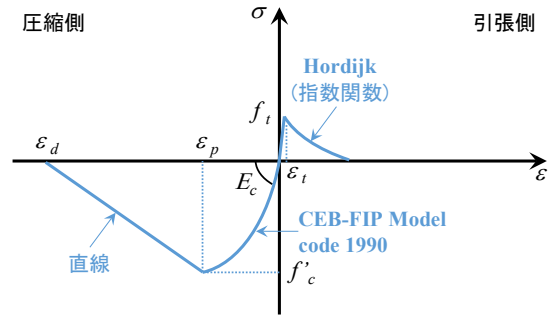


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

表-2 コンクリートの物性値

| Case No. | 圧縮強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (kN/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 破壊エネルギー (N/m) | |
|----------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|------|
| Case A | A-1 | 35.5 | 29.7 | 2.48 | 89.2 |
| | A-2 | 34.5 | 29.4 | 2.44 | 88.4 |
| Case B | B-1 | 39.4 | 30.8 | 2.66 | 92.4 |
| | B-2 | 37.9 | 30.4 | 2.60 | 91.2 |
| Case C | C-1 | 41.3 | 31.3 | 2.75 | 93.8 |
| | C-2 | 38.0 | 30.4 | 2.60 | 91.3 |

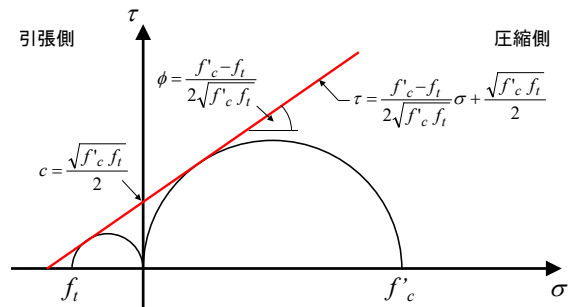
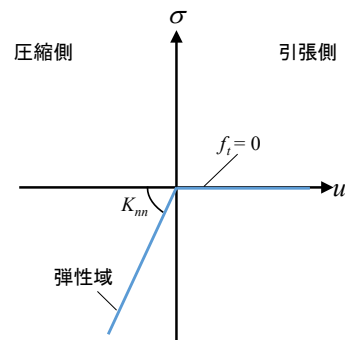
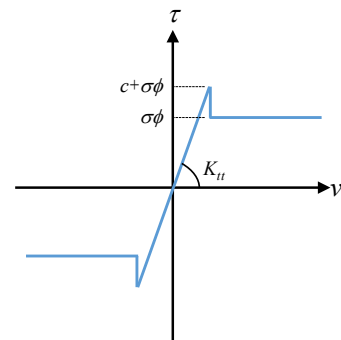


図-6 モール・クーロンの破壊規準



(a) 直応力方向



(b) せん断応力方向

図-7 界面要素における応力-変位関係

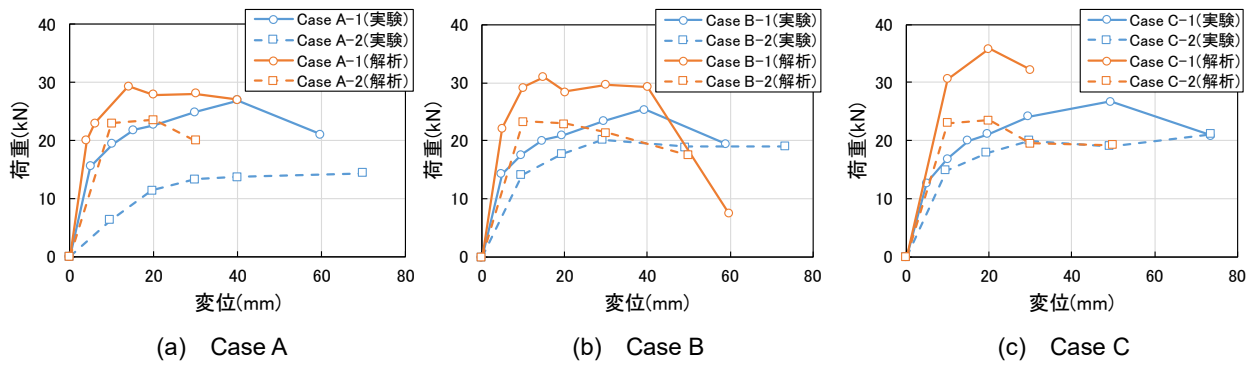


図-8 荷重-変位包絡線における実験値と解析値の比較（正載荷）

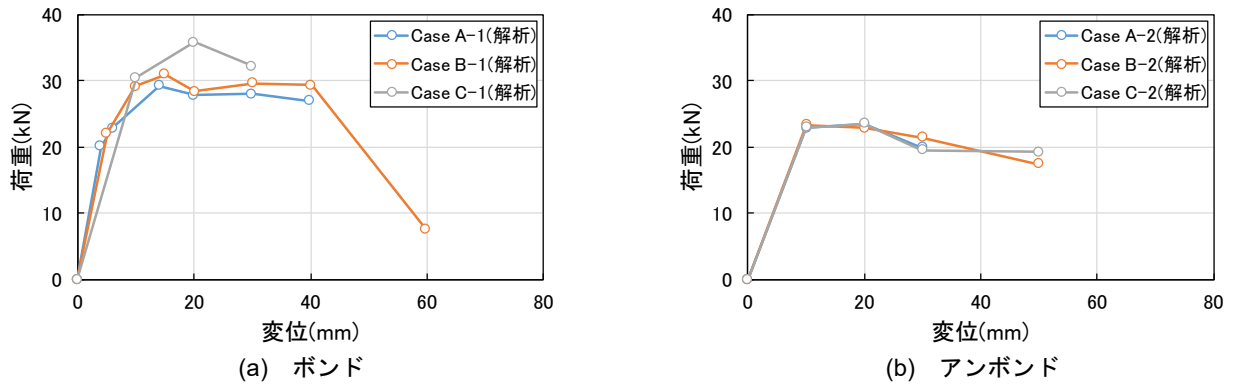


図-9 解析値における荷重-変位包絡線の比較（正載荷；鋼材の付着の影響）

図-6 に示すようにモール・クーロンの破壊規準にしたがうものとした。すなわち、式(9)の第1項の係数および第2項は、それぞれ摩擦係数 ϕ と粘性係数 c に相当する。図-7 に、界面要素における応力-変位関係を示す。直応力方向の引張強度をゼロとすることで、圧縮応力のみを伝達し、柱部の回転変形を考慮した。界面要素の剛性は、盛田らの研究¹⁰⁾より、直応力方向の剛性 K_m については、接合部の厚さを1mmと仮定し、コンクリートの弾性係数を厚さで除すことで算出した。一方、せん断応力方向の剛性 K_n は、ポアソン比を0.2と仮定しせん断弾性係数を求めた後、これを接合部の厚さで除して算出した。なお、実験では、プレキャストブロックの接合部にはエポキシ樹脂が塗布されており、柱基部とブロックの接合部はドライジョイントのため、接合条件が異なるが、本解析では同じ物性値を有する界面要素を適用した。

(3) PC 鋼材の材料モデルおよびプレストレスの導入

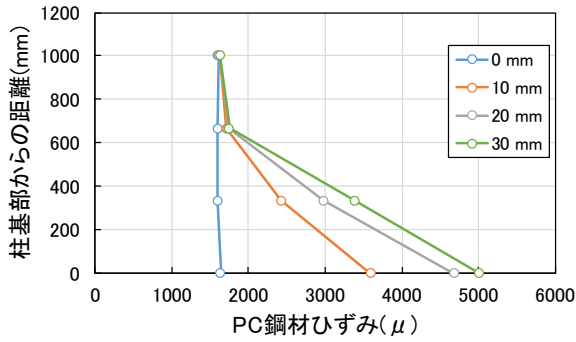
PC 鋼材の応力-ひずみ関係は、道路橋示方書⁴⁾に準拠して弾塑性モデルを採用し、降伏強度は引張強度の8割とした。解析上、降伏強度を1020 N/mm²、弾性係数を200 kN/mm²とした。PC 鋼材のプレストレスは、鋼材要素に初期ひずみを導入する方法を採用し、プレストレインを導入することで、その影響を考慮した。なお、初期ひずみは2.に記載した鋼材緊張力を、鋼材断面積および弾性

係数を用いて算出し、約1600 μ とした。

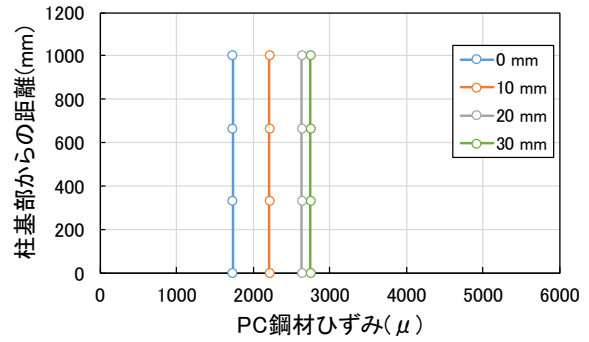
3.2 解析結果

図-8 に、荷重-変位包絡線における実験値と解析値の比較を示す。包絡線は正載荷により得られたものである。図より、初期剛性と最大荷重に着目すると、解析値は実験値を過大評価していることがわかる。しかし、実験でみられたボンドに比べてアンボンドの最大荷重が低下する傾向については、解析でも表現できた。界面要素における剛性が過大に設定されていることが、前述の過大評価につながっているものと考えられる。図-9 に、解析値における荷重-変位包絡線の比較を示す。柱部のプレキャストブロックの分割数によらず、PC 鋼材の付着状態が同じであれば、最大荷重は概ね同等となっている。実験でみられたように、PC 鋼材の付着状態がプレキャストブロックの分割数に比べ、柱部材の挙動に影響を与えやすい傾向は、解析でも再現できていることがわかる。これらより、対象部材の場合、最大荷重は最大モーメントが生じる柱基部において決定されると考えられる。

図-10 に、Case A における柱部の PC 鋼材ひずみ分布の解析値の比較を示す。図-3 と同様に、凡例は正載荷における荷重サイクルの変位を示している。ボンドの場合は、最大モーメントが生じる柱基部でひずみも最大となっている。一方、アンボンドの場合は、モーメントの大きさによらず、ひずみが全長にわたり一様となってい



(a) Case A-1 (ボンド)



(b) Case A-2 (アンボンド)

図-10 柱部のPC鋼材のひずみ分布における解析値の比較 (Case A)

表-3 感度解析ケースの一覧

| Case No. | 備考 |
|----------|------------------------------|
| Case 0 | 元の解析ケース |
| Case 1 | K_{nn} を1/1000倍 |
| Case 2 | K_{tt} を1/1000倍 |
| Case 3 | K_{nn} , K_{tt} を1/1000倍 |

※ K_{nn} :直応力方向の剛性
 K_{tt} :せん断応力方向の剛性

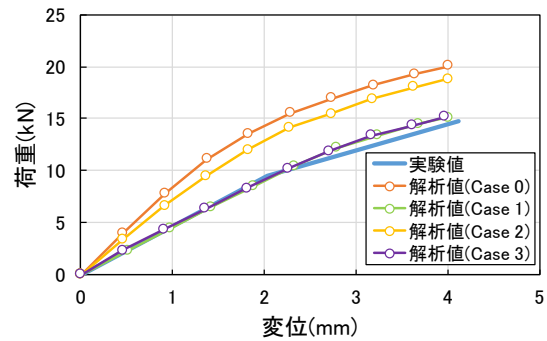
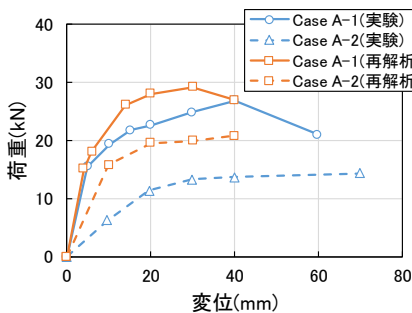
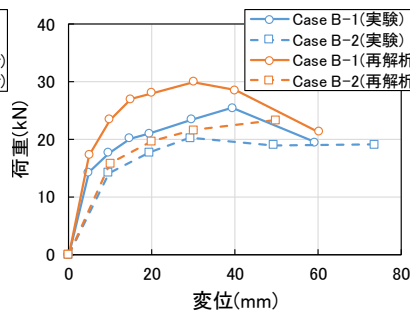


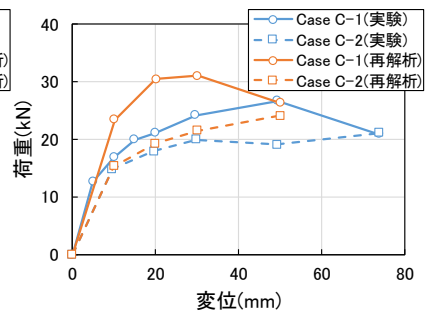
図-11 荷重-変位関係における実験値と各解析値の比較 (Case A-1; 正変位 4 mm まで)



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図-12 荷重-変位包絡線における実験値と再解析値の比較 (正載荷)

る。図-3 に示した実験値と比較すると、若干相違が認められるものの、PC鋼材の付着状態で異なるひずみ分布の傾向を概ね捉えられていることがわかる。したがって、解析上でPC鋼材の付着の有無を、2種類の鋼材要素を用いて表現することで、PC鋼材の付着状態で異なる部材の挙動に関しては、有限要素解析により概ね表現できることが示された。

4. 界面剛性がPC柱部材の挙動に与える影響

4.1 界面剛性をパラメータとした感度解析

3.2 で述べたように、解析値が実験値を過大評価する傾向がみられたため、界面要素の剛性に着目し、感度解析を行った。ここでは、Case A-1 の供試体を対象に、3.1 で算出した直応力方向の剛性 K_{nn} およびせん断応力方向

の剛性 K_{tt} を低減させ、PC柱部材の挙動に与える影響を確認した。表-3 に、感度解析ケースの一覧を示す。解析ケースは、 K_{nn} を 1/1000 倍した Case 1、 K_{tt} を 1/1000 倍した Case 2、 K_{nn} , K_{tt} 双方を 1/1000 倍した Case 3 の 3 ケースとした。図-11 に、Case A-1 における荷重-変位関係の実験値と各解析値の比較を示す。ここでは、初期剛性に着目するため、解析は、1 回目の正方向の载荷の変位である 4 mm に達した段階で止め、結果を比較することとした。図中の Case 0 とは、図-8 (a) で示した解析値である。Case 0 と他の各解析値を比較すると、Case 1, 3 は Case 0 に比べ、初期剛性が大幅に低下し、実験値と概ね整合した。また、Case 1, 3 と Case 0, 2 をそれぞれ比較すると、概ね同等な挙動を示した。このことから、対象部材の場合、 K_{tt} に比べ K_{nn} の方が解析値に大きく影響を

表-4 最大荷重における実験値、解析値、再解析値の比較

| Case No. | 最大荷重(kN) | | | 解析値／実験値 | 再解析値／実験値 | |
|----------|----------|-------|-------|---------|----------|------|
| | 実験値 | 解析値 | 再解析値 | | | |
| Case A | A-1 | 26.90 | 29.32 | 29.22 | 1.09 | 1.09 |
| | A-2 | 14.38 | 23.47 | 20.82 | 1.63 | 1.45 |
| Case B | B-1 | 25.40 | 31.02 | 29.95 | 1.22 | 1.18 |
| | B-2 | 20.20 | 23.34 | 23.26 | 1.16 | 1.15 |
| Case C | C-1 | 26.70 | 35.83 | 30.97 | 1.34 | 1.16 |
| | C-2 | 21.12 | 23.50 | 24.05 | 1.11 | 1.14 |

与えることが明らかとなった。

4.2 界面剛性を低下させた再解析

4.1 より、 K_m の低下に伴い初期剛性が大幅に低下することが示されたが、 K_u も若干解析値に影響を及ぼすため、 K_m 、 K_u 双方を 1/1000 倍した Case 3 の剛性を界面要素に適用し、再解析を行った。図-12 に、荷重-変位包絡線における実験値と再解析値の比較を示す。初期剛性に着目すると、Case A-2 を除き、実験値と再解析値は概ね一致していることがわかる。図-8 中の解析値と比較して再解析値は、変位が小さな範囲 (5~10 mm 程度) において荷重が大幅に低下し、特に Case B-2、C-2 では概ね一致した。しかし、すべてのケースで最大荷重は再解析値が実験値を過大評価する結果となった。表-4 に、最大荷重における実験値、解析値、再解析値の比較を示す。表中には、実験値に対する解析値および再解析値の比も併せて示している。表より、解析値に比べると再解析値は若干低下するが、Case A-2 を除き、実験値に比べて 10~20% 上回っている。このことから、界面要素の剛性を低下させるだけでは、モーメントの増大に伴う接合部付近の剛性低下を十分に表現できないと考えられる。プレキャスト PC 柱部材の耐力評価精度を向上させるためには、接合部のみならず、その周辺におけるコンクリートの剛性を低下させるなど、解析方法に工夫を施す必要がある。その方法の提案は、今後の課題とする。

5. まとめ

本研究では、プレキャスト部材接合部における挙動把握を目的に、PC 鋼材の付着状態やプレキャスト部材数をパラメータとして行われた、プレキャスト PC 柱部材の静的交番載荷試験結果を対象として、有限要素解析による再現解析を行った。その後、接合部における界面要素の剛性が解析値に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) PC 鋼材の付着の有無を、解析上で 2 種類の鋼材要素を用いて簡易的に表現することで、PC 鋼材の付着状態により異なる PC 柱部材の最大荷重の傾向に

ついては、有限要素解析により概ね捉えられることが示された。

- (2) 界面要素における剛性は、解析値に大きな影響を及ぼすことが感度解析の結果より明らかとなった。また、界面要素の剛性を低下させて再解析を行った結果、剛性を低下させるだけでは部材の最大荷重を十分に表現できないことが示された。

ただし、本解析で得られた知見は、対象部材に限定されると考えられる。一般性を持たせるためには、さらなる検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 高橋ら：プレキャスト部材の接合隅角部における力学的挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 15，No. 2，pp. 823-828，1993.
- 2) たとえば，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 71，2006.
- 3) たとえば，Kang, Y. J. et al.: Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Frames, A.S.C.E., S.T., Vol. 106, No. 2, pp. 445-462, 1980.
- 4) 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.
- 5) Cervenka, V. et al.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.
- 6) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Thomas Telford, 1993.
- 7) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 8) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.
- 9) 中條ら：コンクリート部材継目部の純せん断強度，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 41，pp. 251-252，1986.
- 10) 盛田ら：せん断キーを有する超高強度コンクリートプレキャスト部材のせん断伝達耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 2，pp. 763-768，2004.