

アンボンド PC 鋼材で圧着接合した PCaPC 骨組の曲げ終局時における梁 PC 鋼材応力度の評価

PCaPC 圧着工法 アンボンド PC 鋼材 曲げ終局耐力  
十字形柱梁骨組 梁部材 竹本の評価式

正会員 ○YANG Dichen 1\*  
同 北山 和宏 2\*  
同 晋 沂雄 3\*

1. はじめに

アンボンド PC 鋼材を梁部材内に直線配置したプレキャスト・プレストレスト・コンクリート圧着工法 (PCaPC) で作られた骨組では, PC 鋼材の付着が無いためにそのひずみは均一になる。そのためアンボンド PCaPC 梁では, PC 鋼材が降伏せずに梁端部コンクリートの圧壊により最大耐力に到ることが多い。このとき, アンボンド PCaPC 梁の曲げ終局耐力を評価するためにはアンボンド PC 鋼材の引張り応力度を特定する必要があり, 竹本<sup>1)</sup>が提案した評価手法 (以下, 竹本式) を用いることが一般的である。

竹本式<sup>1)</sup>は, 一体打ちのプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 梁 8 体にアンボンド PC 鋼材を曲線配置して逆対称曲げ載荷した実験の結果に基づいて最大耐力時の PC 鋼材応力度を経験的に定め, 設計に用いるために安全側の配慮が為された。竹本の実験<sup>1)</sup>では長期荷重に対して PC 鋼材を曲線配置したため, 梁危険断面位置での PC 鋼材は梁断面の上部に偏在した。これらの点で, プレキャストの RC 柱・梁部材を直線配置のアンボンド PC 鋼材によって圧着接合して耐震骨組を創出する PCaPC 工法の梁に対して竹本式を適用するには, 検討の余地がある。

そこで本研究では, アンボンド PC 鋼材の降伏前に梁の曲げ圧縮破壊を生じた PCaPC 十字形柱梁部分架構の既往の実験結果を用いて竹本式の精度を再検討した。また PC 鋼材の初期導入張力から梁曲げ終局に至る引張り応力度の増分 $\Delta\sigma_p$ を評価する手法を再提案した。

2. 梁曲げ終局時における PC 鋼材応力度の増分

2.1 竹本の評価式

竹本<sup>1)</sup>は曲げ終局時 (最大耐力時と等価) の PC 鋼材応力度の初期導入張力からの増分 $\Delta\sigma_p$ を評価する手法を提案した。PC 性能評価指針<sup>2)</sup>ではその中で最も安全側の評価

表 1 試験体諸元

試験体	BNU	PCJ07	PCJ08	PCJ13	PCJ14
PC鋼材	D32	Φ23	Φ23	Φ17	Φ23
梁断面	250mm×400mm				
引張側PC鋼材有効せい(mm)	330	280	280	280	280
PC鋼材降伏応力度(N/mm <sup>2</sup> )	1014	1013	1013	1023	1016
有効プレストレス(N/mm <sup>2</sup> )	572.6	795.0	797.4	695.6	690.9
コンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	76.6	79.3	78.2	53.1	49.4
$p_{pt}(\times 10^{-3})$	9.6	5.9	5.9	3.2	5.9
$p_{pt}/\sigma_B(\times 10^{-5})$	12.6	7.5	7.6	6.1	12.0

を与える(1)式を使用した。文献<sup>1)</sup>では一定鉛直荷重の作用下の逆対称繰返し荷重を受ける 4 体の実験結果から得られた $\Delta\sigma_p$ を平均的に評価するために, PC 鋼材比 $p_{pt}$ を用いた回帰直線 ((2) 式) も示されたため, あわせて検証する。相互に比較できるように記号と単位を統一した。

$$\Delta\sigma_p = 98 - \frac{4.9 \times 10^5}{\sigma_B} p_{pt} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_p = 245 - 36260 p_{pt} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

ここで,  $p_{pt} = a_{pc}/(b \cdot d_p)$ ,  $a_{pc}$ : 引張側 PC 鋼材の断面積,  $b$ : 梁幅,  $d_p$ : コンクリート圧縮縁から引張側 PC 鋼材の重心までの距離, および $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮応力度である。

2.2 検証に使用するアンボンド PCaPC 十字形試験体

梁 PC 鋼材が降伏せずに梁付け根コンクリートの曲げ圧壊が先行して最大耐力に到達したアンボンド PCaPC 平面十字形柱梁部分架構試験体 5 体<sup>3)-5)</sup>を検証対象とした。全ての試験体の梁 PC 鋼材は上下等量, 対称配置であり, 梁全長に渡り直線配置した。試験体諸元を表 1 に示す。コンクリート圧縮強度は 49~79 N/mm<sup>2</sup>であった。

2.3 PC 鋼材の引張り応力度の増分

梁最大耐力時における PC 鋼材の応力度増分 $\Delta\sigma_p$ の実験値および竹本式による計算値 (実線) の比較を図 1 に示す。実験値は(1)式による計算値よりも 2.4~7.8 倍大きか

った。試験体 BNU と PCJ14 の $p_{pt}/\sigma_B$ はほぼ同じだが,  $\Delta\sigma_p$ の実験値は 2 倍程の大きな差を生じた。同様に(2)式の計算値と較べて実験値は 2.4~10.2 倍大きく, (2)式も実験値を著しく過小評価した。これらは曲げ終局耐力の算定では安全側の配慮であるが, 梁部材のせん断設計時には危険側の評価となり不適切である。

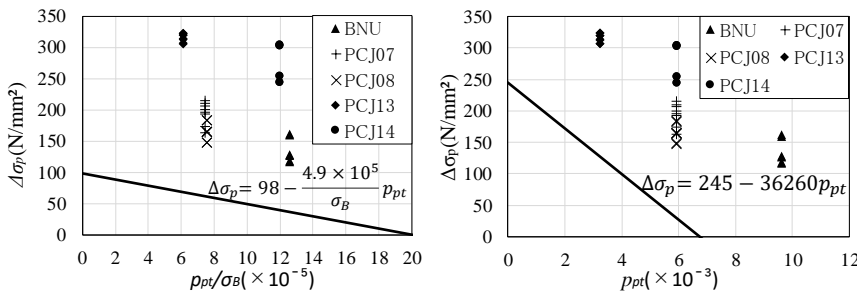


図 1  $\Delta\sigma_p$ の実験値と竹本式の計算値 (左: (1)式, 右: (2)式)

### 3. 評価式の新たな提案

#### 3.1 応力度増分 $\Delta\sigma_p$ の評価式の提案

PC 鋼材が降伏する前に梁圧着面近傍のコンクリート圧壊が先行するアンボンド PCaPC 梁部材を対象とする。このときコンクリートの終局ひずみが一定と仮定すると、PC 鋼材の有効プレストレス ( $\sigma_{pe}$ ) が大きいほど梁コンクリートの初期圧縮ひずみが大きくなり、小変形においてコンクリートの圧壊が発生し易くなって曲げ終局耐力に到達する。すなわち $\Delta\sigma_p$ が小さくなると考える。

そこで引張側 PC 鋼材の初期導入張力( $\sigma_{pe}a_{pc}$ )を梁有効断面積( $bd_p$ )で除して得られるコンクリートの平均圧縮応力度( $\sigma_{pe}a_{pc}/(bd_p)$ )を因子として、実験で得られた PC 鋼材応力度の増分 $\Delta\sigma_p$ との関係を図 2 に示す。平均圧縮応力度( $\sigma_{pe}a_{pc}/(bd_p)$ )の増大とともに増分 $\Delta\sigma_p$ は小さくなり、最小自乗近似で得られた回帰直線を図中に破線で示した。これより  $\Delta\sigma_p$ の評価式として(3)式を提案する。実験値に対する計算値の比の平均は 99%，相関係数は 0.78 である。

$$\Delta\sigma_p = 459 - \frac{56\sigma_{pe}a_{pc}}{bd_p} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

#### 3.2 提案式の検証

梁の PC 鋼材が上下等量かつ直線状に対称配置されたアンボンド PCaPC 十字形部分架構では、梁断面上下の PC 鋼材張力が同じになるため、PC 性能評価指針<sup>2)</sup>で規定した曲げ終局耐力 $M_u$ の略算式は(4)式のように表現できる。  
 $M_u = T_{pc} \cdot d_{pa} + T_{pc} \cdot d_p - 2T_{pc} \cdot k_2 \cdot x_n$  (4)  
 ここで、 $T_{pc}$  : PC 鋼材の引張力 ( $T_{pc} = (\sigma_{pe} + \Delta\sigma_p)a_{pc}$ ),  
 $d_{pa}$  : コンクリート圧縮縁から圧縮側 PC 鋼材の重心までの距離,  
 $x_n$  : コンクリート圧縮縁から中立軸までの距離 ( $x_n = q_{pr}/(k_1k_3) \cdot D$ ),  $q_{pr} = 2T_{pc}/(bD\sigma_B)$ ,  $k_1, k_2, k_3$  : コンクリートのストレスブロック係数, である。

提案した(3)式の妥当性を検証するため、上記の $M_u$ から求めた梁曲げ終局時の梁せん断力と既往の実験研究(上述の 5 体および他機関によって実施された 3 体<sup>6-8)</sup>)から得られた実験値との比較を表 2 および図 3 に示す。試験

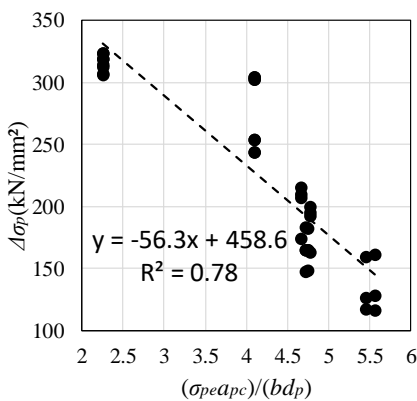


図 2  $\Delta\sigma_p$ と $(\sigma_{pe}a_{pc})/(bd_p)$ の関係

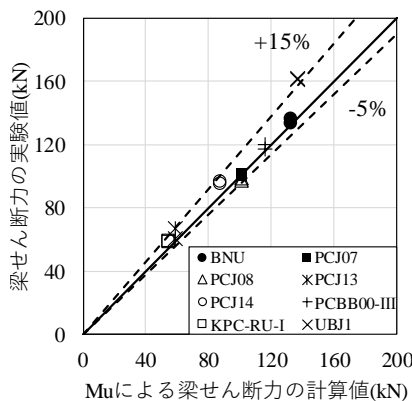


図 3  $M_u$ による計算値と実験値の比較

表 2 曲げ終局時のせん断力の計算値と実験値

試験体	BNU	PCJ07	PCJ08	PCJ13	PCJ14	PCBB00-III	KPC-RU-I	UBJ1
計算値(kN)	132.7	101.3	101.3	58.7	87.8	116.4	54.5	137.1
実験値(東梁)(kN)	133.6	99.3	96.9	60.3	96.2	119.7	59.2	134.0
実験値(西梁)(kN)	136.6	100.7	98.7	67.0	95.3	116.8	58.2	120.0
実験値/計算値(東梁)	101%	98%	96%	103%	110%	103%	108%	98%
実験値/計算値(西梁)	103%	99%	97%	114%	109%	100%	107%	88%

体 UBJ1<sup>7)</sup>では層せん断力のみが論文中に記載されたため、計算値を層せん断力に変換して比較した。

試験体 UBJ1 を除くと、梁曲げ終局時の実験値は計算値の 96%~114%となり、-5%と+15%の範囲内に収まった。またその平均値は 104%であり両者は概ね一致した。以上より PC 鋼材応力度の増分 $\Delta\sigma_p$ を評価する(3)式は、アンボンド PCaPC 十字形部分架構の梁曲げ終局時の耐力評価に使用できると判断する。

#### 4. まとめ

PC 鋼材が降伏せずに梁コンクリートの曲げ圧壊により最大耐力に至るアンボンド PCaPC 十字形柱梁部分架構を対象に、梁曲げ終局時の PC 鋼材の引張り応力度の増分 $\Delta\sigma_p$ を検討した。PC 鋼材が断面の上下等量かつ対称に配置され、部材全長に渡り直線配置される梁 ( $\sigma_B = 49 \sim 79 \text{ N/mm}^2$ )を対象とした。得られた知見を以下に示す。

- (1) 竹本式<sup>1)</sup>による二種の評価式で計算した $\Delta\sigma_p$ はいずれも実験値を著しく過小評価した。これは曲げ終局耐力の算定では安全側の配慮となるが、せん断設計での使用や実状を評価するためには不適切である。
- (2) 既往実験の結果から、PC 鋼材の応力度増分 $\Delta\sigma_p$ は梁断面の平均圧縮応力度( $\sigma_{pe}a_{pc}/(bd_p)$ )の増大とともに減少することを示し、 $\Delta\sigma_p$ を評価する経験式を新たに提案した。
- (3) ここで提案した $\Delta\sigma_p$ の評価式を用いて梁曲げ終局耐力を略算式で計算し、既往研究の実験結果と比較したところ、曲げ終局耐力の実験値は計算値の-5%と+15%の範囲内に収まり、両者は良好に対応することを確認した。

#### 参考文献

- 1) 竹本靖: アンボンド PRC 部材の曲げ終局時テンション応力について, 大林組技術研究所報, No.28, pp.49-54, 1984
- 2) 日本建築学会: プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説, 2015.
- 3) 岸田慎司, 北山和宏, 森山健作, 丸田誠: 圧着接合されたプレストレスト・コンクリート十字形部分架構の復元力特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24-2, 2002年6月, pp.421-426.
- 4) 鈴木大貴, 宋性勲, 晋沂雄, 北山和宏: アンボンド PC 鋼材で圧着接合したプレストレストコンクリート十字形部分架構の力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016年7月, pp.511-516.
- 5) 苗思雨, 北山和宏, 晋沂雄: アンボンド PCaPC 圧着接合骨組における梁部材の耐震性能と各種限界状態に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, 2017年7月, pp.361-366.
- 6) 山下仁, 溝口光男, 越川武晃, 菊地優: スティールバンドを有するアンボンド PCaPC 圧着接合による柱・梁ト型試験体及び十字型試験体の繰返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.865-866, 2009.8
- 7) キムキョンミン, 塩原等, 楠原文雄: 施工性と修復性の向上を目指したアンボンド PCaPC 十字型部分架構の耐震実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.343-348, 2008
- 8) 西村知明, 谷昌典, 西山峰広: プレストレストコンクリート圧着骨組の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008

1\* 首都大学東京大学院 博士前期課程  
 2\* 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工学  
 3\* 明治大学 理工学部建築学科 専任講師 博士(工学)

1\* Graduate Student, Tokyo Metropolitan Univ.  
 2\* Professor, Tokyo Metropolitan Univ., Dr.Eng.  
 3\* Senior Assistant Professor, Meiji Univ., Dr.Eng