

# 途中定着 PC 鋼材で圧着接合したアンボンド PCaPC 梁の構造性能評価

(その3 PC 鋼材を集約配筋した場合の最大耐力評価法の提案)

アンボンド PCaPC 部材	途中定着 PC 鋼材	正会員	○ 晋 沂雄*1	正会員	上野彩菜*1	非会員	馬場龍太郎*2
PC 鋼材長さ	集約配筋	正会員	井上大河*1	非会員	関口珠央*3	正会員	北山和宏*4
マクロモデル	最大耐力評価	正会員	崔 琥*5				

## 1. はじめに

引き続き本報(その3)では、以下に示すマクロモデルに基づき、PC 鋼材を集約かつ全通し配筋した場合(試験体 PCX04)の最大耐力の評価法を提案する。

## 2. PC 鋼材を集約配筋した場合の最大耐力評価

### 2.1 マクロモデルの概要

本研究の提案マクロモデルを図1示す。既往の研究及び実験結果に基づき、本マクロモデルでは文献4)と同様に次のことを仮定する。アンボンド PCaPC 梁にせん断力が作用すると梁圧着面で離間が生じ、剛体的に回転して変形する。この際、コンクリートの縮みによる梁材軸方向への軸変形( $\Delta_{c,ax}$ )は梁圧着面に集中し、PC 鋼材位置(即ち断面中央)に発生する離間距離( $\delta_{d,t}$ )は PC 鋼材の伸び量と等しい。また、PC 鋼材の引張力( $T_t$ )はコンクリートの圧縮合力( $C_c$ )と等しい。

### 2.2 コンクリート及び PC 鋼材の材料特性のモデル化

アンボンド PCaPC 部材では一般的に高強度コンクリートが使用され、高強度コンクリートでは圧縮強度( $\sigma_B$ )に至るまで圧縮応力度( $\sigma_c$ )がほぼ線形的に増加し、 $\sigma_B$ 以降は $\sigma_c$ が急激に低下する<sup>3)</sup>。そこで本研究では、上記の材料特性に基づき、かつ後述の評価式を容易に導くため、コンクリートの応力度-ひずみ関係を近似的に線形の形で仮定する(図2(a))。

一方、PC 鋼材の応力度( $\sigma_t$ )-ひずみ( $\varepsilon_t$ )関係は、図2(b)のように弾性限界以降の非線形区間が比較的適切に表現できるトリリニア形とする<sup>4)</sup>。よって、PC 鋼材の引張力( $T_t$ )は式(1)のように定義される。

$$T_t = \begin{cases} A_t \sigma_t = A_t E_{t1} \varepsilon_t & \varepsilon_t < \varepsilon_{te} \\ A_t \sigma_t = A_t (E_{t2} (\varepsilon_t - \varepsilon_{te}) + \sigma_{te}) & \varepsilon_{te} \leq \varepsilon_t < \varepsilon_{ty} \\ T_{ty} & \varepsilon_t \geq \varepsilon_{ty} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{te}$ 及び $\sigma_{te}$ : PC 鋼材弾性限界時のひずみ及び応力度(0.01%オフセット法)、 $\varepsilon_{ty}$ 及び $\sigma_{ty}$ : PC 鋼材降伏時のひずみ及び応力度(0.2%オフセット法)、 $E_{t1}$ : PC 鋼材のヤング係数、 $E_{t2}$ : PC 鋼材の2次接線剛性、 $E_{t3}$ : PC 鋼材の3次接線剛性、である。

アンボンド PCaPC 梁の主筋は主に肋筋を保持するための組立筋として存在し、梁圧着面を除き梁部材には曲げひび割れの発生が非常に少なく、梁危険断面近傍では組立筋が切断されているのでその影響は小さい<sup>4)</sup>。なお、その配筋量が比較的多い場合、特に圧縮鉄筋の圧縮力により部材耐力が若干向上する可能性が考えられるが<sup>5)</sup>、安全側の評価かつ推定式を容易に導くため、本論文では組立筋は考慮しないこととした。

### 2.3 梁材軸に沿った任意断面での圧縮力と中立軸位置

図3のように梁断面に作用する曲げモーメント( $M$ )は梁

圧着面から梁材軸に沿って線形的に減少するため、コンクリート圧縮合力( $C_c$ )と PC 鋼材引張力( $T_t$ )間の応力中心間距離( $j_d$ )も線形的に減少し、反曲点では $C_c$ と $T_t$ の作用位置が等しくなる。従って、梁材軸に沿った任意断面での圧縮縁から圧縮合力( $C_c$ )までの距離( $C_{cx}$ )は、式(2)となる。また、前述した通りコンクリートの圧縮応力度分布を三角形とすれば任意断面での中立軸深さ $x_{nx}$ は $C_{cx}$ の3倍となり、式(3)を得る。更に、中立軸深さが梁せいと丁度等しくなる A 点までの距離( $L_1$ )は、式(3)の $x_{nx}$ に $D$ を代入し式(4)から算定される。

$$C_{cx} = \frac{D/2 - x_n/3}{l} X_1 + \frac{x_n}{3} \quad (2)$$

$$x_{nx} = \frac{3D - 2x_n}{2l} X_1 + x_n \quad (3)$$

$$L_1 = (D - x_n) / \left( \frac{3D - 2x_n}{2l} \right) \quad (4)$$

ここで、 $x_n$ : 梁圧着面での中立軸深さ、 $l$ : 梁圧着面から反曲点までの距離、である。

### 2.4 梁材軸に沿った任意断面に生じる圧縮縁ひずみ

まず、 $x_{nx}$ が梁面内に存在する区間(梁圧着面~A点までの距離 $L_1$ )の任意断面に生じる圧縮縁ひずみ( $\varepsilon_{nx1}$ )を考える。アンボンド PCaPC 梁では、 $C_c$ の大きさが部材全長に渡り一定であるため、梁圧着面に作用する圧縮力は $L_1$ 区間の任意断面に生じる圧縮力と同じになり(式(5))、これらの関係により $L_1$ 区間の任意断面での圧縮縁ひずみ( $\varepsilon_{nx1}$ )が式(6)のように導かれる。

$$\frac{1}{2} x_n \varepsilon_n E_c b = \frac{1}{2} \left( \frac{3D - 2x_n}{2l} X_1 + x_n \right) \varepsilon_{nx1} E_c b \quad (5)$$

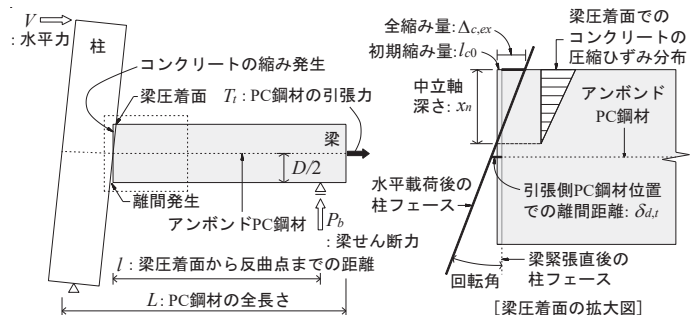


図1 アンボンド PCaPC 梁の変形状況

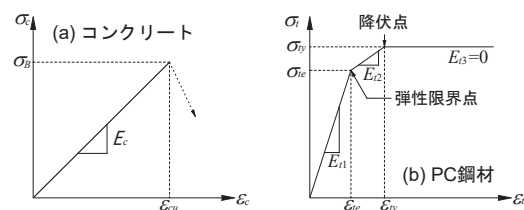


図2 応力度-ひずみ関係

$$\varepsilon_{nx1} = x_n \varepsilon_n / \left( \frac{3D - 2x_n}{2l} X_1 + x_n \right) \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon_n$  : 梁圧着面での圧縮縁ひずみ、 $E_c$  : コンクリートのヤング係数、 $b$  : 梁幅、である。

一方、図3と図4のように、 $L_2$  区間ではコンクリートの圧縮ひずみと圧縮応力度の分布が三角形から台形に変化し、中立軸位置が梁断面の外側に存在する。 $L_2$  区間の任意断面においてもコンクリート圧縮合力 ( $C_c$ ) の大きさは一定であるため、各断面における圧縮ひずみ分布の面積は変わらずその形のみが変化することとなり、圧縮縁及び引張縁でのひずみの変化量 ( $\varepsilon_x$ ) は等しくなる (図4)。ここで、前述の式(4)の  $L_1$  を式(6)の  $X_1$  に代入すると、A 点における圧縮縁ひずみ ( $\varepsilon_{nL1}$ ) は ( $x_n \varepsilon_n / D$ ) となり、反曲点位置では圧縮縁と引張縁のひずみが等しくなるので、この位置での圧縮縁ひずみ ( $\varepsilon_{nL2}$ ) は ( $x_n \varepsilon_n / (2D)$ ) となる。また、 $L_2$  区間における縁ひずみは線形的に変化するため、 $L_2$  区間における  $\varepsilon_x$  及び圧縮縁ひずみ ( $\varepsilon_{nx2}$ ) はそれぞれ式(7)及び式(8)より算定できる。

$$\varepsilon_x = \frac{x_n \varepsilon_n}{2DL_2} X_2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{nx2} = \frac{x_n \varepsilon_n}{D} - \frac{x_n \varepsilon_n}{2DL_2} X_2 \quad (8)$$

## 2.5 梁圧着面における圧縮縁コンクリートの全縮み量

$L_1$  及び  $L_2$  区間における梁材軸方向の圧縮縁ひずみ (式(6)の  $\varepsilon_{nx1}$  と式(8)の  $\varepsilon_{nx2}$ ) を梁全長 ( $l=L_1+L_2$ ) に渡り積分すると、式(9)により梁圧着面における圧縮縁コンクリートの全縮み量 ( $\Delta_{c,ex}$ ) が求められる。

$$\begin{aligned} \Delta_{c,ex} &= \int_0^{L_1} (\varepsilon_{nx1}) dX_1 + \int_0^{L_2} (\varepsilon_{nx2}) dX_2 \\ &= \frac{2x_n \varepsilon_n l}{3D - 2x_n} \ln \left| \frac{D}{x_n} \right| + \frac{3x_n \varepsilon_n}{4d} \left( l - \frac{2(D - x_n)l}{3D - 2x_n} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.6 PC 鋼材位置での離間距離及び PC 鋼材のひずみ

文献 3)と同様、梁圧着面における平面保持の仮定に基づき、PC 鋼材位置での離間距離 ( $\delta_{d,t}$ ) を梁圧着面での中立軸深さ ( $x_n$ ) で表わすと、式(10)となる (図1参照)。

$$\delta_{d,t} = \frac{D - 2x_n}{2x_n} \Delta_{c,ex} + l_0 \quad (l_0 = \varepsilon_{c0} l) \quad (10)$$

ここで、 $l_0$  : 初期緊張力によるコンクリートの縮み量、 $\varepsilon_{c0}$  : 初期緊張力によるコンクリートの圧縮ひずみ、である。

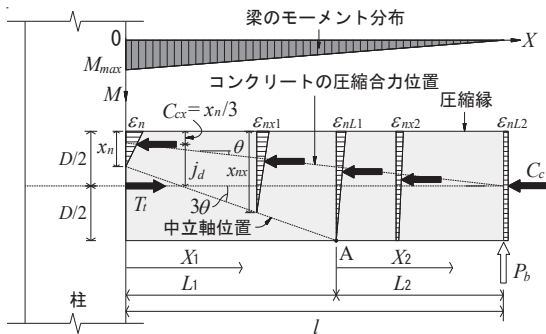


図3 梁材軸の任意断面での圧縮合力と中立軸位置

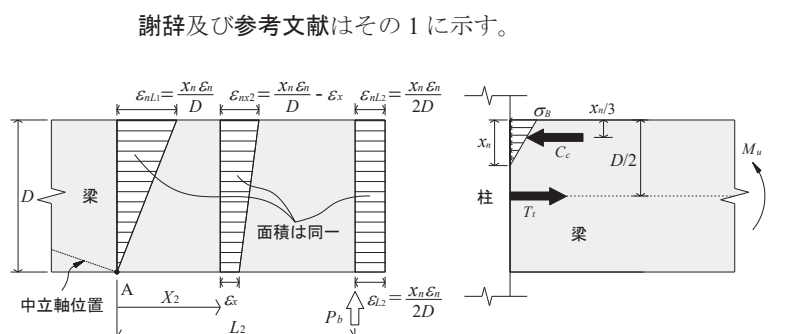


図4  $L_2$  区間任意断面でのひずみ分布

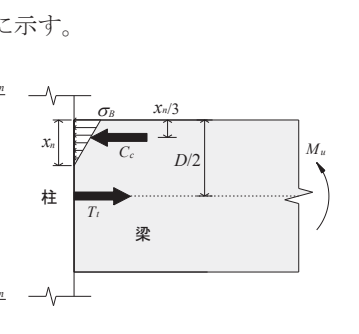


図5 圧着接合面での応力状態

次に、変形の適合条件により、PC 鋼材位置での離間距離 ( $\delta_{d,t}$ ) は PC 鋼材の全伸び量 ( $(\varepsilon_t - \varepsilon_{t0})L$ ) と等しいので式(11)が成り立ち、よって PC 鋼材のひずみ ( $\varepsilon_t$ ) は式(12)となる。

$$(\varepsilon_t - \varepsilon_{t0})L = \delta_{d,tp} = \frac{D - 2x_n}{2x_n} \Delta_{c,ex} + l_0 \quad (11)$$

$$\varepsilon_t = \frac{D - 2x_n}{2x_n L} \Delta_{c,ex} + \varepsilon_{c0} l / L + \varepsilon_{t0} \quad (12)$$

ここで、 $L$  : PC 鋼材の全長、 $\varepsilon_{t0}$  : 初期緊張力による PC 鋼材のひずみ、である。

## 2.7 PC 鋼材の引張力及び梁圧着面での中立軸深さ

本研究では梁圧着面での圧縮縁コンクリートひずみ ( $\varepsilon_n$ ) が終局ひずみ (0.003) に達する時を梁曲げ終局状態と定義し、この時梁圧着面での中立軸深さ ( $x_n$ ) 及び PC 鋼材の引張力 ( $T_t$ ) を、以下に示す繰返し計算を用いて算出する。

図5に示した応力状態において、先ず PC 鋼材の  $T_t$  を引張降伏力 ( $T_y$ ) と仮定し、梁圧着面における力の釣り合いを用いた式(13)より  $x_n$  の初期値を仮定する。

$$x_n = 2T_t / (b\sigma_B) \quad (13)$$

次に、この  $x_n$  を用いて式(9)の  $\Delta_{c,ex}$  を算出した後、式(12)と式(1)により PC 鋼材の  $T_t$  を計算し、初期に仮定した PC 鋼材の引張力 ( $T_y$ ) と比較する。ここで両者が異なる場合は、得られた PC 鋼材の  $T_t$  により新たな  $x_n$  を再計算し (式(13))、この  $x_n$  により式(9)の  $\Delta_{c,ex}$  を再算出した後、式(12)と式(1)から再計算される PC 鋼材の引張力が前ステップのそれと等しくなるまで繰返し計算を行う。

## 2.8 梁曲げ終局時の最大耐力

上記の通り PC 鋼材の  $T_t$  及び  $x_n$  の精解が定まると、式(14)により梁曲げ終局耐力 ( $P_{b,max}$ ) が計算できる。

$$M_u = (D/2 - x_n/3)T_t, \quad P_{b,max} = M_u / l \quad (14)$$

PCX04 の最大耐力計算値を (その2) の図1にあわせて示した。同図より計算値は最大耐力実験値の 0.97~1.0 倍となり、梁せい中央部に PC 鋼材を集約かつ全通し配筋した場合の最大耐力を精度良く評価した。PCX03 にも同計算値を適用したところ PC 鋼材長さが短くなった分耐力が上昇し、計算値は実験値の 0.89~0.93 倍となったが、両者は概ね対応した。

## 3. まとめ

PC 鋼材を梁せい中央部に集約配筋した場合の最大耐力評価式を提案し、実験結果が精度良く評価できることを示した。謝辞及び参考文献はその1に示す。

\*1 明治大学大学院 理工学研究科建築・都市学専攻  
\*2 積水ハウス (株) (元明治大学)  
\*3 (株) 長谷工コーポレーション (元明治大学)  
\*4 東京都立大学 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博  
\*5 静岡理工科大学 理工学部建築学科 准教授 博士 (工学)

\*1 Meiji University  
\*2 Sekisui House Corporation  
\*3 Haseko Corporation  
\*4 Professor, Tokyo Metropolitan University  
\*5 Associate Professor, Shizuoka Institute of Science and Technology