

逆対称曲げを受けるアンボンドPC 圧着柱部材に関する解析的研究

京都大学大学院 正会員 ○谷 昌典
正会員 西山 峰広

1. はじめに

プレストレストコンクリート部材の曲げ耐力算定には、PC 鋼材張力の正確な評価が必要である。著者らは、文献[1]において片持ち形式のアンボンド PC 圧着柱部材を対象とした解析的研究を發表したが、アンボンド PC 部材に全長にわたる逆対称曲げを作用させた場合、鋼材が直線配置されていると鋼材ひずみが両材端で相殺され、その挙動は片持ち形式のものとは全く異なった傾向を示す。そこで、本論文では、文献[1]と同様に文献[2]で發表された解析方法を用いて、軸力比、プレストレス比及びコンクリート強度をパラメータとして、逆対称曲げを受けるアンボンド PCaPC 部材に対する数値解析を行い、これらのパラメータが最大耐力時の鋼材張力及び変形性状に及ぼす影響について検討を行う。

2. 解析概要

本論文では、図1のように部材を部材せい方向及び材軸方向にそれぞれ分割して剛性マトリックスを誘導する要素分割法に基づいて解析を行う。文献[2]では部材を片持ち形式でモデル化していたが、本論文では実部材を想定した逆対称曲げを受ける部材とする。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、その包絡線を NewRC 式^[3]によって定め、繰返し履歴は Watanabe らによって提案されたモデル^[4]を用いた。普通鉄筋は Ramberg-Osgood 式に基づきパウジンガー効果を考慮した履歴モデル^[5]を、PC 鋼材は Menegotto-Pinto 式に基づく履歴モデル^[6]を、付着-すべり関係には、森田・角モデル^[7]を用いた。

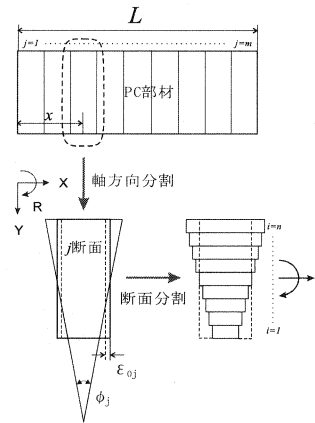


図1 要素分割方法

3. 過去の実験結果との比較

本解析の妥当性を検証するため、過去に行われたアンボンド PC 不静定梁の実験結果^[8]との比較を行う。

3.1 解析モデル

文献[8]の実験で使用されたアンボンド PC 不静定梁試験体を図2に示す。梁部断面は 160×210mm で、試験区間は 3000mm である。普通強度鉄筋として、上端・下端に異形鉄筋 D10 が各 2本ずつ、また PC 鋼材として C 種 1号 13mm アンボンド PC 鋼棒が上端・下端それぞれ梁断面核半径位置に配置されている。せん断補強筋はφ6 矩形フープ (150mm 間隔) である。コンクリート、鉄筋及び PC 鋼材の力学特性を表1及び表2に示す。梁断面に対するプレストレスの大きさを表現するプレストレス比は $\eta_f = P/(A_c \cdot f'_c) = 0.107$ である。解析モデルにおける要素分割の概要を図3に示す。試験区間を材軸方向及び断面せい方向にそれぞれ 15 分割及び 100 分割した。梁部材の両端には長さ 300mm のスタブが接続している。このスタブでのコンクリートは剛として扱っている。載荷方法については、試験体の一端を固定し、他端に曲げモーメントとせん断力を与え、両端部柱型の平行度を保ちながら (反曲点位置が梁中央部となる) 部材角を与えるものとする。

3.2 解析結果

材端モーメント-部材回転角関係及び PC 鋼材張力-部材回転角関係の実験結果と解析結果を図4に示す。図4の通り、部材全体及び PC 鋼材の挙動を精度よく予測できている。

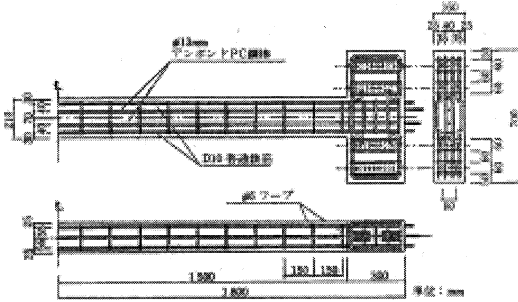


図2 アンボンドPC不静定梁試験体

表1 コンクリートの力学特性

f'_c (N/mm^2)	ϵ_{cm} (%)	E_c ($\times 10^4 N/mm^2$)
46.4	0.221	2.94

ϵ_{cm} : 圧縮強度時ひずみ, E_c : $1/3f'_c$ 割線弾性係数

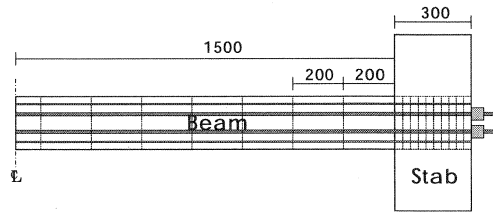


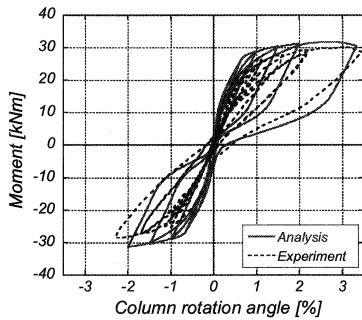
図3 モデル形状と要素分割の概要

表2 鉄筋とPC鋼材の力学特性

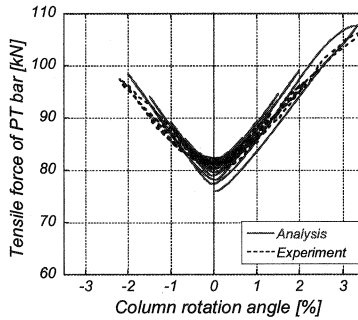
鋼材	f_y (N/mm^2)	ϵ_y (%)	E_s ($\times 10^5 N/mm^2$)
D10	386	0.207	1.86
φ6	350*	-	1.89
φ13PC鋼棒	1245*	-	1.96

f_y : 降伏強度, ϵ_y : 降伏ひずみ, E_s : 弾性係数,

*0.2%オフセット降伏応力



(a) 材端モーメント-材端回転角関係



(b) PC鋼材張力-材端回転角関係

図4 実験結果と解析結果の比較

4. 逆対称曲げを受ける PCaPC 柱部材に対するパラメトリックスタディ

逆対称曲げを受けるアンボンド PCaPC 柱部材に対し、コンクリート強度、部材断面に作用させる軸力比 $\eta_N (=N/A_c f'_c)$ 及びプレストレス比 $\eta_P (=P_i/A_c f'_c)$ をパラメータとし、要素分割法に基づいた解析を行い、それぞれのパラメータが PC 鋼材挙動に与える影響の検討を行う。また、部材のマクロモデルを用いて、最大耐力時の PC 鋼材張力、部材回転角及び最大耐力を算出し、要素分割解析の結果との比較検討を行う。

4.1 解析モデルとパラメータ

解析モデルを図5に示す。柱断面は $400 \times 400mm$ 、柱内法高さは $1200mm$ とし、柱部材の両端に長さ $800mm$ の剛なスタブを接続する。普通強度鉄筋として上端・下端に異形鉄筋 D10 が各2本ずつ、せん断補強筋として D10 矩形フープが $40mm$ 間隔で配置されている。PC 鋼材径は、図5(b)に示す通りである。また、要素分割の概要は図5(a)に示す通りで、柱部分を材軸方向及び断面せい方向にそれぞれ6分割及び100分割している。荷重方法については、前章と同様に両端部スタブの平行度を保ちながら部材角を与えた。

各パラメータの設定値を表3に示す。それぞれを組み合わせてモデルを作成した。 $\eta_N=0$ も加えることで軸力を受けない梁部材との連続性も考慮している。また、 η_N と η_P の合計の最大値は 0.6 としている。 $f'_c=40$, $\eta_P=0.1$ の試験体を「40-0.1Series」のように呼ぶものとする。普通鉄筋降伏強度は $325N/mm^2$ 、PC 鋼材降伏強度は $1135N/mm^2$ を用いた。

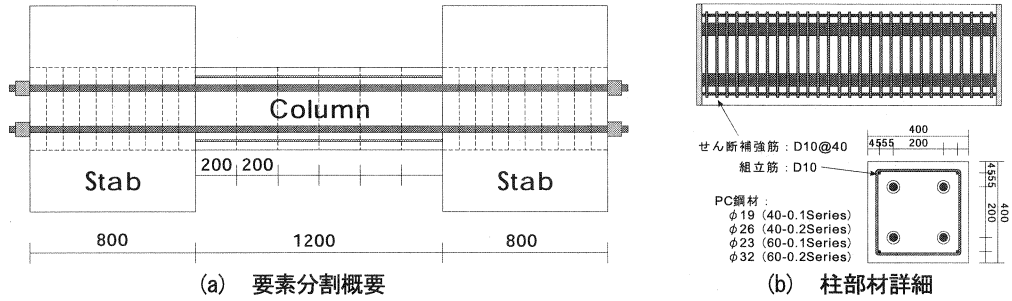


図5 解析モデル

表3 各パラメータの値

f_c (N/mm ²)	40, 60
η_N	0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
η_P	0.1, 0.2

4.2 解析結果

逆対称曲げを受ける部材では、反曲点で対称な変形状態にあるため、直線配置された PC 鋼材位置での部材全体にわたるコンクリートの軸変形は、鋼材の偏心距離に関係なく全く同じ値となる。また、アンボンド PC 鋼材の場合、部材全長にわたる PC 鋼材位置のコンクリート平均軸ひずみが PC 鋼材のひずみとなるため、PC 鋼材の配置位置がその張力変動に影響を及ぼすことはない。このため、鋼材が断面重心軸に対して対称配置された部材では、ボンド PC のように PC 鋼材張力の増大によってモーメントが変動することは無い。そこで、PC 鋼材張力を軸力と同様に扱い、PC 鋼材張力を軸力に付加して断面の応力状態を考えることができる。このことから、断面の応力状態を把握する上で軸圧縮力の影響は非常に大きなものと考えられるため、本論文では主に、断面に作用する軸圧縮力の大きさの指標である $\eta_{N+P} = \eta_N + \eta_P$ と部材挙動との関連について検討を行う。

図6に η_{N+P} と最大耐力時 PC 鋼材張力 P_u の関係を示す。 η_{N+P} が小さいモデルでは P_u は導入プレストレス力 P_i よりも増加し、コンクリート強度や軸力とプレストレス力の配分に関係無く η_{N+P} が 0.3 を超えると P_u は P_i より小さくなる。また、縦軸に軸力導入後の有効プレストレス力 P_e に対する P_u の比を、横軸に η_{N+P} をとったものを図7に示す。図7においても、 η_{N+P} が小さいモデルでは P_u は P_e よりも大きくなり、 η_{N+P} が 0.45 を超えると $P_u/P_e < 1.0$ となる。同じ η_{N+P} でも、プレストレス力の大きいモデルの方が、導入プレストレス力に対する張力変動が少なく、軸変形の進行が小さいことを示している。これは、導入されるプレストレス力が大きい方が PC 鋼材径も大きいため、断面の剛性が向上し、軸変形の進行が抑えられるためであると考えられる。

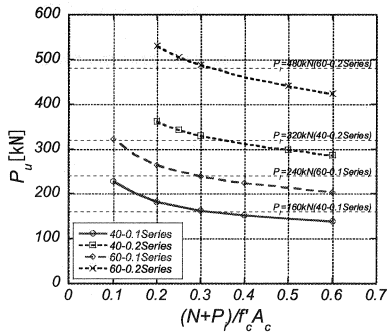


図6 最大耐力時 PC 鋼材張力の変化

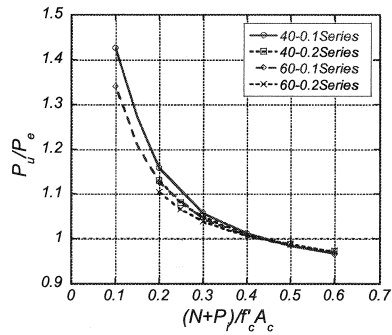


図7 最大耐力時 PC 鋼材張力と有効プレストレスの比

4.3 マクロモデルによる最大耐力時の各特性値の評価

ボンド PC 部材では、断面において平面保持を仮定して応力状態を算出することが可能である。一方、アンボンド PC 部材では、ひずみの適合係数 F 値を用いて平面保持仮定を利用する手法も提案されているが、部材をモデル化し、簡略に PC 鋼材張力を算出する方法も過去に提案されている。

本論文では、曲げ変形が部材端部に集中しているものとし、図8のように部材を曲げ変形部と剛体部に分割するマクロモデル化を行う。曲げ変形部には図9に示すような曲率が一樣に分布する曲げ変形が集中し、部材中央の剛体部では軸変形のみが発生すると仮定している。最大耐力時の PC 鋼材張力を P_u とし、曲げ変形部の断面内において ACI 応力ブロックを仮定すると、式(1)のように中立軸位置 x_n が P_u を含む形で表される。また、曲げ変形部及び剛体部における部材の伸び量 ΔL_1 , ΔL_2 (伸びを正) は、それぞれ式(2)及び式(3)で表され、式(1)を式(2)に代入して x_n を消去することにより、部材全体の伸び量も P_u を含む形で表すことが可能となる。ここで、この部材全体の伸び量が、張力増分($P_u - P_i$)による PC 鋼材の伸び量と一致しなければならないという適合条件より、式(4)が成り立つ。これらにより導かれる P_u の関係式は 2 次式であるため、簡単に P_u を算出することが可能である。また、この時の部材回転角 R_u は式(5)で与えることができる。

$$x_n = \frac{C_c}{0.85f'_c b} \dots(1)$$

$$= \frac{N + P_u + a_c \sigma_y - a_c \sigma_y}{0.85f'_c b}$$

$$\Delta L_1 = \left(\frac{D}{x_n} - 2\right) \varepsilon_{cu} L' \dots(2)$$

$$\Delta L_2 = -\frac{N + P_u}{E_c A_c + E_s a_s} (L - 2L') \dots(3)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{P_u - P_i}{E_p a_p} l_{pc} \dots(4)$$

$$R_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n} L' \dots(5)$$

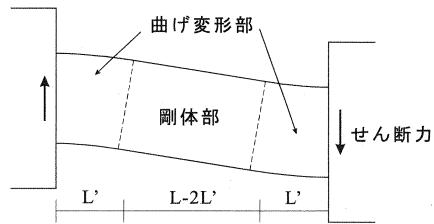


図8 曲げ変形部と剛体部の分割概要

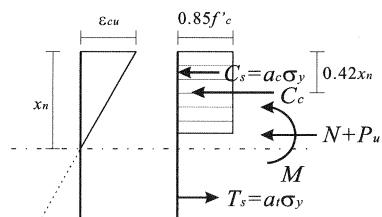


図9 曲げ変形部における最大耐力時の応力状態

N : 軸力, P_i : 導入プレストレス力, a_t, a_c : 引張側及び圧縮側鉄筋断面積, σ_y : 鉄筋降伏応力, f'_c : コンクリート圧縮強度, b : 断面幅, D : 断面せい, L' : 曲げ変形部長さ, ϵ_{cu} : 終局時圧縮縁コンクリートひずみ (=0.003), E_c, E_p, E_s : コンクリート, PC 鋼材及び鉄筋弾性係数, A_c, a_p, a_s : コンクリート, PC 鋼材及び鉄筋断面積, L : 部材全長, l_{pc} : PC 鋼材全長

最大耐力時 PC 鋼材張力の要素分割解析より得られた値 (要素分割解析値を以下, 解析値と呼ぶ) 及びマクロモデルより得られた理論値と軸圧縮力の関係を図 10 に示す。図 10 及び後で示す図 11 において, 点のみプロットしたものが解析値, プレストレス比が同じシリーズを線で結んだものが理論値を示している。軸圧縮力が小さい範囲では, 理論値の方が小さくなる傾向が見られるが, 全体的には精度よく適合している。ただし, 上記の理論で P_i の関係式を 2 次方程式から導くことが可能ではあるが, 式自体が非常に複雑となる。設計実務に利用するには, 必要なパラメータの絞り込みを行い, 式を簡素化する必要がある。

最大耐力時部材回転角の解析値及び理論値と軸圧縮力の関係を図 11 に示す。これも軸圧縮力が小さい範囲では理論値の方が小さくなるが, 最大耐力時の部材回転角が軸圧縮力の増加に伴って小さくなる傾向については, 解析値と理論値はよく一致しており, 全体的には精度良く適合している。ただし, 本論文では曲げ変形部の長さ L' に, 要素分割解析での要素長さである 200mm (=0.5 D) を用いて計算を行った。式(5)が示す通り, 曲げ変形部長さの設定が部材回転角に比例するため, この値の設定に関して今後検討が必要である。

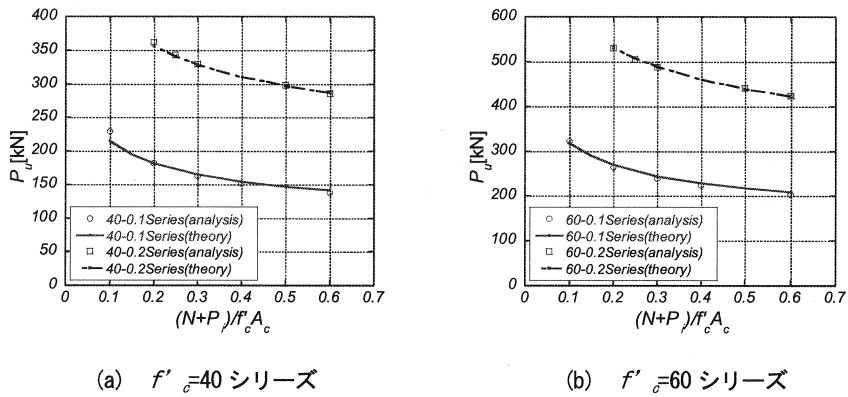


図 10 最大耐力時 PC 鋼材張力の解析値と理論値の比較

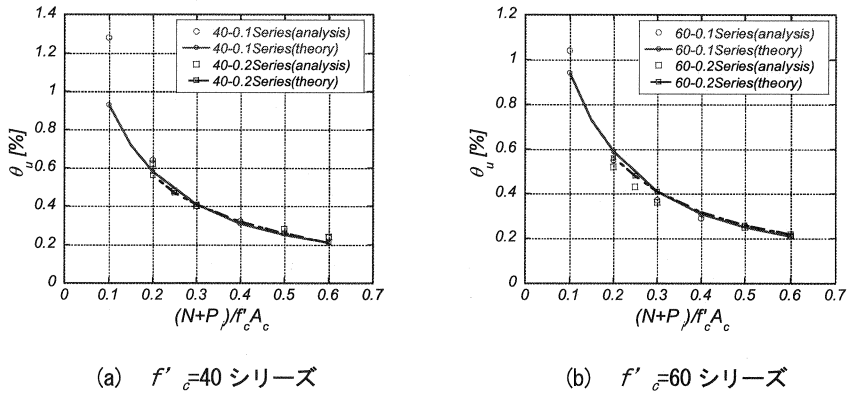


図 11 最大耐力時部材回転角の解析値と理論値の比較

最大耐力時の PC 鋼材張力が算出されれば、図 9 に示す断面内の応力状態が明らかになるので、PC 鋼材の偏心距離を d' として、式(6)によって断面に作用する曲げモーメントを求めることが可能となる。

$$M = C_c (D/2 - 0.42x_n) + (a_t \sigma_p + a_c \sigma_p) d' \quad \dots(6)$$

最大耐力の解析値に対する理論値の比を縦軸に、軸圧縮力比を横軸にとったものが図 12 である。図 12 より、全体的に理論値の方が解析値よりも 15~20%程度小さな評価となり、特に、軸圧縮力の低いモデルにおいてその傾向が強くなっている。図 10 で PC 鋼材張力が精度良く適合していたにも関わらず、全体的に耐力を過少評価した原因としては、コンクリート圧縮合力作用位置の評価などが考えられる。なお、アンボンド PC 柱に対して逆対称曲げを作用させた実験例が存在しないため、本論文では要素分割解析より求めた値との比較を行っている。今後、1/3 スケールのアンボンド PC 柱部材に逆対称曲げを作用させる実験を行い、改めて実験データとの検討を行う予定である。

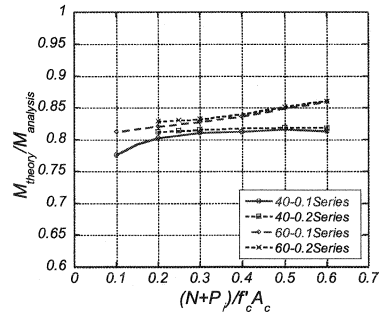


図 12 最大耐力の(理論値/解析値)と軸圧縮力比の関係

5. まとめ

- ・ 要素分割法に基づく解析によって、逆対称曲げを受けるアンボンド PC 梁部材の挙動を精度良く予測できることを示した。
- ・ 要素分割解析では、コンクリート強度、プレストレス力と軸力の配分に関わらず、 η_{N+P} が 0.3 を超えると、最大耐力時 PC 鋼材張力が導入プレストレス力を下回り、 η_{N+P} が 0.45 を超えると最大耐力時 PC 鋼材張力が有効プレストレス力を下回る。
- ・ 部材を曲げ変形部と剛体部に分割するマクロモデルを用い、最大耐力時の PC 鋼材張力、部材回転角及び最大耐力値を求める方法を示した。要素分割解析に対して、最大耐力時 PC 鋼材張力及び部材回転角は良好な一致を示したが、最大耐力値そのものについては約 15~20%程度小さく、軸圧縮力の低い範囲で差が大きくなる傾向にある。

6. 参考文献

[1]谷昌典, 西山峰広, 岸本一蔵:「繰返し载荷を受ける PCaPC 部材における圧着力減退の予測」, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.577-582, 2005

[2]前田博司, 西山峰広, 岸本一蔵:「PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法」, コンクリート工学年次論文集 Vol.26, No.2, pp.709-714, 2004

[3]崎野健治: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp.95-104, 1994.7

[4]F.Watanabe, J.Y.Lee, M.Nishiyama: Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars, ACI Structural Journal, vol.92, No.4, pp.412-418, 1995.7-8

[5]田川浩之, 西山峰広: PC 鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.885-886, 1997.9

[6]榎本秀文: PRC 梁の履歴性質に関する解析的性質, 大阪大学大学院修士論文, 1981

[7]森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 229 号, 1975.3

[8]六車照, 渡邊史夫, 西山峰広:「アンボンド PC 不静定梁の力学的性質に関する研究」, プレストレストコンクリート Vol.27, No.2, pp.66-73, 1985.3