

断面解析モデルを用いたアンボンド PCaPC 部材の耐力評価に関する研究

北海道大学大学院工学院 修士 (工学)

○松茂良 諒

北海道大学大学院工学研究院助教 博士 (工学) 正会員

越川 武晃

雇用・能力開発機構 秋田センター 講師 修士 (工学)

山下 仁

Abstract : This paper presents a strength evaluation of the unbonded post-tensioned precast concrete member using section analysis model. The section analysis model applied to unbonded PCaPC members is the numerical model to estimate the relation between bending moment and rotation at beam ends of the member. The parametric studies using section analysis model carry out to evaluate the influence of the length of compression area, compressive fracture energy, combined reinforcement index(q), compressive strength, depth of beam and shear span ratio. The numerical formula to estimate the ultimate strength of the member is proposed by results of parametric studies. The formula evaluates the ultimate strength of experiments accurately.

Key words : Prestressed concrete, Precast, Unbonded tendons, Section analysis

1. はじめに

アンボンド PCaPC 圧着接合構造は工場生産された高品質のプレキャスト柱・梁部材をアンボンド PC 鋼材の緊張力により一体化する構造形式であり、工期短縮、解体の容易さ、部材のリユースなど通常の PC 構造に比べて生産性や運用面において様々なメリットを有していることから今後一層の利用が見込まれている。

本研究ではアンボンド PCaPC 部材の履歴挙動を詳細に追跡することのできる解析法の開発および同解析法を用いたアンボンド PCaPC 部材の耐力評価を目的として、アンボンド PCaPC 部材を対象とした断面解析モデルを提案し、著者らの既往の実験結果¹⁾と断面解析結果の比較を通して解析モデルの適合性について検討した後、パラメトリック解析を用いてアンボンド PCaPC 部材の曲げ終局耐力式を提案する。

2. 断面解析モデル

断面解析法は、曲げ部材を対象として危険断面における曲率から変形量を求め、曲げモーメントを得る解析法である²⁾。しかしアンボンド PCaPC 部材の場合には、圧着接合面に目開きが生じ、また平面保持の仮定が成立しないことから、曲率による変形量の推定が困難となり、断面解析を単純に適用することができない。そこで圧着接合面における回転角から変形量を推定する方法を用いた断面解析を本部材に適用する。

図-1 に本研究において提案する断面解析モデルを示す。本断面解析モデルでは、与えられた回転角 θ から変形量、ひずみ、応力を順に求め、断面の力の釣り合いが取れるまで収束計算を行い、曲げモーメントを得るという手順で解析を行う。コンクリート断面要素の変形量は平面保持の仮定により回転角 θ と各要素の位置から断面要素変形量 δ_c を求め、またアンボンド PC 鋼材の伸び量を求める際には、柱の両側の接合面が逆対称に回転している状態を想定し、断面の PC 鋼材位置における両圧着接合面の目開き量の和を PC 鋼材の変形量 δ_{pc} とする。ひずみに関して

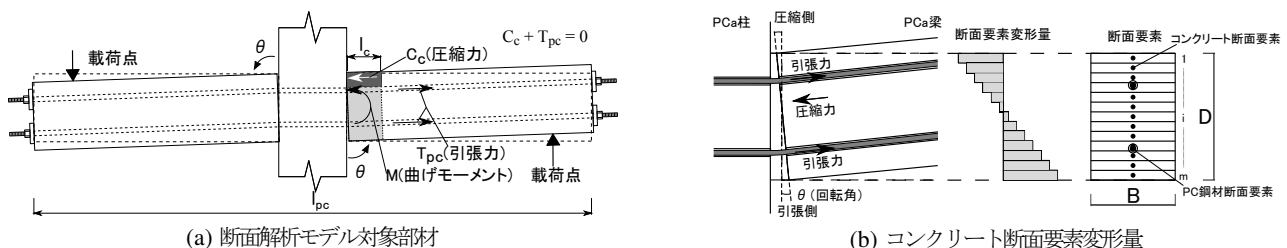


図-1 断面解析モデル

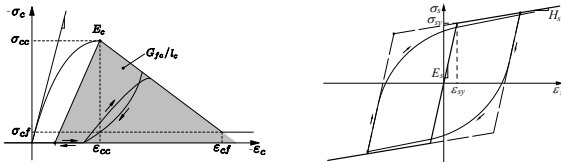


図-2 コンクリートの材料特性モデル

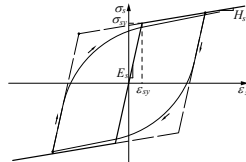


図-3 PC鋼材の材料特性モデル

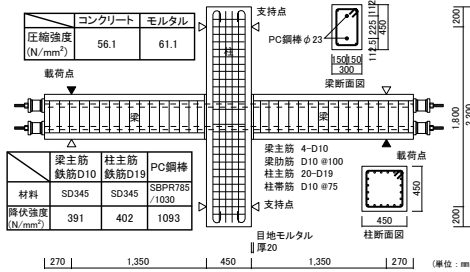


図-4 試験体詳細

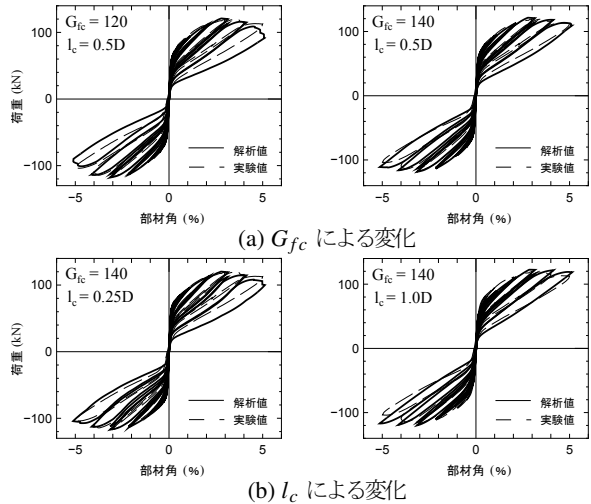


図-5 荷重一部材角関係の比較

は、コンクリート部分のひずみ ϵ_c は圧縮破壊領域長さ l_c (mm)³ を設定し、この領域にコンクリートのひずみが一様分布するものと仮定して、式(1)のようにコンクリート断面の変形量 δ_c を l_c で除して求める。また、PC鋼材のひずみ ϵ_{pc} はアンボンド状態であることを考慮して、式(2)のように変形量 δ_{pc} をPC鋼材の全長 l_{pc} で除して求める。

$$\epsilon_c = \delta_c / l_c \tag{1}$$

$$\epsilon_{pc} = \delta_{pc} / l_{pc} \tag{2}$$

図-2 および図-3 に本解析モデルで用いた材料モデルを示す。コンクリートの材料特性については、圧着接合面が滑り変形することから引張応力を考慮せず、また圧縮軟化経路は圧縮破壊エネルギー G_{fc} (N/mm) を用いて設定した⁴⁾。PC鋼材の材料特性については menegotto-pinto 式に基づいた履歴経路を持つモデルを設定した。

3. 実験結果への適用

3.1 実験概要

著者らの既往の十字型試験体を用いた正負交番載荷実験¹⁾を対象に断面解析を行い、本モデルの適合性について検討する。図-4 に試験体詳細と各材料の機械的性質を示す。試験体はプレキャスト梁部材をPC鋼材の緊張力により柱部材に圧着させたもので、梁部材と柱部材の間にはモルタル目地を介している。載荷は、柱部材の両端をピン支持し、梁部材の先端にそれぞれジャッキを接続して行われた。載荷サイクルは部材角で $\pm 0.1\%$, $\pm 0.2\%$ を1サイクルずつ, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$ をそれぞれ2サイクルずつ, $\pm 4.0\%$, $\pm 5.0\%$ を1サイクルずつである。

3.2 荷重一部材角関係の比較

本研究の断面解析モデルにおいて設定した圧縮破壊領域長さ l_c と圧縮破壊エネルギー G_{fc} は本解析結果の履歴性状に大きな影響を与えるものであるが、これらの値はどの程度が適切なのか明らかではない。そこで以下では l_c および G_{fc} をパラメータとして解析を行うことで、実験結果と適合する l_c および G_{fc} の値について検討する。図-5 に荷重一部材角関係における解析値と実験値の比較を示す。図-5(a) は l_c は同一で G_{fc} が 120N/mm と 140N/mm の解析値を実験値と比較したものであり、(b) は G_{fc} が同一で l_c が 0.25D(D:梁せい)と 1.0D の場合を比較したものである。いずれのケースにおいても、本解析によってアンボンド PCaPC 部材特有の原点指向性の高い荷重一部材角関係が得られているが、その履歴性状は各ケースで異なっている。 G_{fc} のみを変化させた場合、 $G_{fc} = 120$ (N/mm) の解析値は部材角 4%程度で耐力が減少し、履歴ループの面積が実験値に比べ大きくなるが、 $G_{fc} = 140$ (N/mm) の解析値は耐力が減少せず、実験値と同程度の履歴ループを描く。また l_c のみを変化させた場合、 $l_c = 0.25D$ の解析値は実験値に比べ各サイクルにおける履歴ループの面積が大きくなるが、 $l_c = 1.0D$ の解析値は各サイクルにおいて実験値とはほぼ同じ形の履歴ループを描く。荷重一部材角関係を比較した結果、 $G_{fc} = 140$ (N/mm), $l_c = 0.5D, 1.0D$

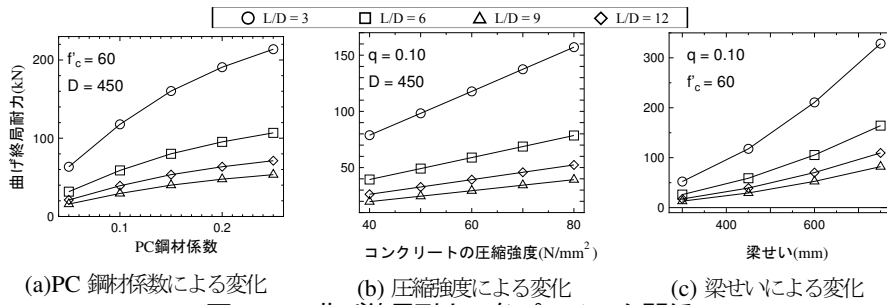


図-6 曲げ終局耐力-各パラメータ関係

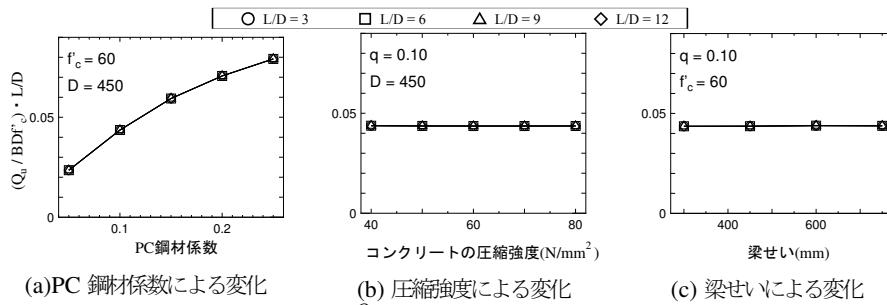


図-7 $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ -各パラメータ関係

表-1 設定パラメータ

| パラメータ | 水準 |
|---------------------------------|------------------------------|
| PC鋼材係数 | 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 |
| 梁せい(mm) | 300, 450, 600, 750 |
| コンクリートの圧縮強度(N/mm ²) | 40, 50, 60, 70, 80 |
| シアスパン比 | 3, 6, 9, 12 |

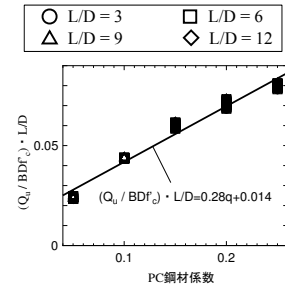


図-8 最小二乗法による直線近似

の解析結果は各ピーク時における最大荷重と原点指向性を持つ履歴性状を良好に追跡できている。これら解析の結果を踏まえて後述するパラメトリック解析では、履歴性状を良好に表現しつつも、サイクルごとの最大荷重を比較的良く評価している $l_c = 0.5D$, $G_{fc} = 140(N/mm)$ を用いることとした。

4. パラメトリック解析による曲げ終局耐力の検討

4.1 パラメータの設定

アンボンド PCaPC 圧着接合部材の履歴挙動は、PC 鋼材量やその配置位置、導入プレストレス力、使用材料の強度、部材の寸法等によって変化することが知られている。本研究では履歴挙動の特性点の一つである曲げ終局耐力についてパラメトリック解析を用いた検討を行う。PC 部材の曲げ終局耐力に関する代表的な指標には式 (3) であらわされる PC 鋼材係数 q^5 がある。PC 鋼材係数と終局耐力の関係は、圧着面における終局時の曲げモーメント M_u を式 (4) の形であらわすと、式 (3) および式 (5) の関係を用いることにより、式 (6) のようにあらわすことができるため、式 (6) の形で曲げ終局耐力 Q_u を評価できるものと考えられる。本節では式 (6) を踏まえ、PC 鋼材係数 q に加えて、梁せい D 、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、シアスパン比 $\frac{L}{D}$ をパラメータとして、試験体規模の部材を想定したパラメトリック解析を行った。パラメトリック解析に用いた各パラメータの水準は表-1 に示す通りである。また式 (6) に含まれない緒元は固定した値を用いるものとし、PC 鋼材位置は梁上端から梁せいの $\frac{1}{4}$ および $\frac{3}{4}$ の位置に配置したものを想定し、導入プレストレス力は標準的な値として PC 鋼材の降伏荷重の 7 割、PC 鋼材の降伏強度を $1000N/mm^2$ 、梁幅を梁せいの $\frac{2}{3}$ として解析を行った。

$$q = \frac{\sigma_{py} \cdot A_{pc}}{BDf'_c} \tag{3}$$

$$M_u = \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} k f'_c \cdot e D \cdot B dz + \sum_{i=1}^n k_i \sigma_{py} \cdot e_i D \cdot a_i A_{pc} \tag{4}$$

$$M_u = Q_u \cdot L, \quad \alpha = \sum_{i=1}^n k_i \cdot a_i \cdot e_i, \quad \beta = \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{k \cdot e}{D} dz \tag{5}$$

$$\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D} = \alpha \cdot q + \beta \tag{6}$$

ここで、 σ_{py} : PC 鋼材の降伏強度, A_{pc} : PC 鋼材断面積, B : 梁幅, D : 梁せい, f'_c : コンクリートの圧縮強度, k : 終局時のコンクリート微小断面の応力の圧縮強度に対する比, e : コンクリート微小断面積位置の梁せいに対する比, z : 梁せい方向の長さ, n : PC 鋼材の本数, k_i : PC 鋼材の終局時の応力の降伏強度に対する比, e_i : PC 鋼材配置位置の梁せいに対する比, a_i : PC 鋼材断面積の全断面積に対する比, L : 載荷点距離

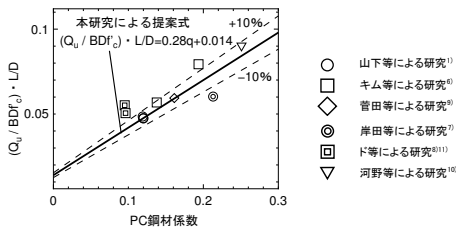
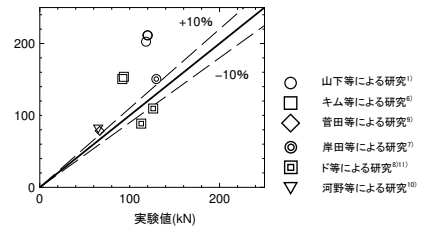
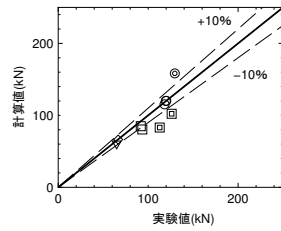


図-9 本研究による提案式と既往の実験結果の比較



(a) 本研究による提案式 (b) 最上・是永式
図-10 本研究による提案式と最上・是永式の比較

4.2 曲げ終局耐力式の提案

図-6 に曲げ終局耐力と各パラメータの関係を、図-7 に $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ と各パラメータの関係を示す。それぞれの図には4水準のシアスパン比の結果をまとめて示してある。まず曲げ終局耐力と各パラメータの関係では、PC鋼材係数 q およびコンクリートの圧縮強度 f'_c 、梁せい D はともに各パラメータの値が増加するに従って曲げ終局耐力も増加する傾向を示す。また曲げ終局耐力との関係では3つのパラメータともにシアスパン比 $\frac{L}{D}$ による曲げ終局耐力の値の変化が大きいことがわかる。一方、 $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ と各パラメータとの関係を見ると、PC鋼材係数 q のみが強い相関関係を示し、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、梁せい D とは相関関係が見られないことがわかる。また $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ との関係では、自明ではあるが、シアスパン比 $\frac{L}{D}$ による影響も見られないことが確認できる。式(6)およびこれら各パラメータによる傾向から、曲げ終局耐力を $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ と q の関係で評価することとした。

図-8 に全396ケースのパラメトリック解析結果をプロットした $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ と PC鋼材係数 q の関係を示す。先の式(6)を踏まえて、これらの解析結果を最小二乗法を用いて直線近似により式(7)が得られた。したがってこの式に式(3)を代入し、曲げ終局耐力 Q_u について整理した式(8)が、本研究で提案する曲げ終局耐力式である。

$$\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D} = 0.28q + 0.014 \quad (7)$$

$$Q_u = (0.28\sigma_{py} \cdot A_{pc} + 0.014B \cdot D \cdot f'_c) \cdot \frac{D}{L} \quad (8)$$

本研究による提案式と既往の研究^{1),6)~11)}より抽出した十字型およびト型試験体による実験結果10ケースをプロットしたものを図-9に示す。図より既往の実験結果10ケース中6ケースの $\frac{Q_u}{BDf'_c} \cdot \frac{L}{D}$ が提案式の±10%程度に収まっており、本研究による提案式により既往の実験結果を比較的良好に評価できていることがわかる。また図-10に本研究による提案式と既往の研究¹²⁾により提案されている最上・是永式の比較を示す。図-10(a)(b)にそれぞれ提案式または最上・是永式を用いて計算した Q_u と実験値を用いて計算した Q_u の比較を示している。ここで示す最上・是永の提案式は通常アンボンドPC部材を対象としたものであるが、参考として比較対象に挙げることにした。本研究による提案式では図-9と同様に比較的良好に曲げ終局耐力とPC鋼材係数の関係を表現できていることがわかる。一方、最上・是永の提案式では実験結果と比べて Q_u の値を過大評価していることが確認できる。

5. まとめ

本研究ではアンボンドPCaPC圧着接合部材の断面解析モデルを提案し、実験結果との比較から、本解析が実験結果を良好に再現できることを示した。さらにパラメトリック解析からアンボンドPCaPC圧着接合部材に関する曲げ終局耐力式を提案し、提案式が既往の実験結果の曲げ終局耐力を比較的良好に評価できることを示した。

参考文献

- 1) 山下 仁, 和田 俊良, 越川 武晃, 溝口 光男, 上田 正生, 小松 憲一: アンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合によるスティールバンドを有する梁の繰返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演要旨集(中国), pp903-904, 2008.9
- 2) 岸本 一藏, 大野 義昭: 断面解析を用いたプレストレストコンクリート梁部材のエネルギー吸収能力に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.2, pp.643-648, 2002.1
- 3) 菅田 昌弘, 中塚 信: アンボンド PC 圧着エネルギー吸収型短接合部材の macroscale による荷重-変形関係の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.590, pp103-110, 2005.4
- 4) 越川 武晃, 藤澤 隆典, 上田 正生, 菊地 優: 緊締部材の考慮した圧着型 PCaPC 梁-柱接合部の震害実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp37-42, 2004
- 5) 日本建築学会 編: プレストレストコンクリート設計施工標準・同解説 第4版, 1998.11
- 6) キム ミョンミン, 塩原 等, 楠原 文雄: 施工性と傾斜性の向上を目指したアンボンド PCaPC 十字型部材の耐荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp343-348, 2008
- 7) 岸田 慎司, 北山 和宏, 森山 健吾, 丸田 誠: 圧着接合されたプレストレスト・コンクリート十字型部材の加工施工/復元/耐震性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp421-426, 2002
- 8) ド ティエン ティン, 楠 浩, 田才 晃: Experimental study on a new precast unbonded post-tensioned beam-column joint system with shear bracket, 日本建築学会構造系論文集, No.641, pp1249-1257, 2009.7
- 9) 菅田 昌弘, 中塚 信: アンボンド PC 圧着工法によるエネルギー吸収型短接合部材の荷重-変形関係に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, No.584, pp153-159, 2004.10
- 10) 河野 進, 三枝 祐輔, 田中 仁史: 繰返し荷重を受けるプレストレストコンクリート梁・柱圧着接合部の残余せん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp1185-1190, 1997
- 11) ティン ティエン ド, 楠 浩, 田才 晃: Experimental study on improved precast unbonded post-tensioned beam-column joint system with shear bracket, 日本建築学会構造系論文集, No.641, pp149-156, 2011.1
- 12) 最上 達雄, 是永 健好: 逆対称曲げを受けるアンボンド PC 梁のモーメント-変形関係に関するパラメトリック解析 アンボンド PC 部材の構造解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.428, pp79-88, 1991.10