

論文 緊張鋼材の付着すべりを考慮した圧着型 PCaPC 梁 - 柱部材の履歴挙動解析

越川 武晃^{*1}・齊藤 隆典^{*2}・上田 正生^{*3}・菊地 優^{*4}

要旨：本論文は、部材全長にわたる PC 鋼材の付着すべり現象を考慮した、繰返し荷重を受ける圧着型プレキャスト・プレストレストコンクリート (PCaPC) 梁 - 柱部材の材料非線形解析法について報告するものである。本論においては更に、本解析結果と既往の実験結果との比較を通して、特に圧着接合面近傍における PC 鋼材の抜け出し現象が、この種の部材の変形挙動に及ぼす影響についても考察されている。

キーワード：付着すべり, PCaPC 梁 - 柱部材, 履歴挙動, 圧着接合, 材料非線形解析

1. はじめに

プレキャスト (PCa) 部材を PC 鋼材のプレストレス力によって接合するプレキャスト・プレストレストコンクリート (PCaPC) 圧着接合工法を用いたフレーム構造は、スパンの拡張や施工の省力化、更には近年注目されているアンボンド工法との併用により部材の再利用が可能となるなど、将来性の高い有用な構造形式の一つである。しかしながら、この種の構造では、PCa 部材内の普通鉄筋が部材端部でカットオフされ、PC 鋼材のみが接合部に貫通しているために、一体打ちされた従来のコンクリート梁 - 柱架構と比べて、圧着接合面近傍における引張亀裂の集中とそれに伴う接合部や PCa 部材からの PC 鋼材の抜け出し現象がより顕著に現れる。従って、この構造の終局耐力や変形性能評価を行うために、この現象を適切に評価し得る高精度で適用性の広い解析手法の確立が望まれている。

本研究は、著者等の既往の「部材全体にわたる補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート梁部材の材料非線形解析法」^{1),2)} に新たに変位増分法を導入し、繰返し荷重を受ける圧着型 PCaPC 梁 - 柱部材への適用を試みるもので

ある。本論文では更に、この種の部材の全体的な荷重 - 変形応答を精度良く表現するために採用した材料モデルならびに部材のモデル化の概要が示されており、あわせて若干の数値計算例により、既往の実験結果との比較・考察ならびに解析結果に及ぼす付着特性の影響について検証している。

2. 解析法の概要

圧着型 PCaPC 梁 - 柱部材の材料非線形解析を行うに当たって設定した基本仮定事項は以下のとおりである。

- 1) 梁 - 柱には軸力 (緊張荷重を含む) と曲げが作用するものとし、コンクリート断面には平面保持の仮定に基づく微小変形理論が成立する。
- 2) 解析には梁 - 柱要素を用いた有限要素法を適用する。また、図 - 1 に示すように、各要素の断面を部材丈方向に n 層に仮想分割して取り扱う積層要素 (ファイバーモデル) で表示する。
- 3) 梁 - 柱内に直線配筋されている個々の補強材層とコンクリートの間には、コンクリート断面からの相対変位で表示される材軸方向の付着すべりが生じ得るものとし、付着応力 τ_{bi} とすべ

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修士 (工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

*3 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教授 博士 (工学)

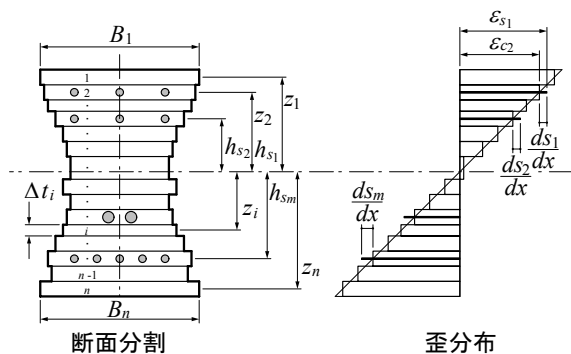


図 - 1 梁 - 柱断面の積層要素分割と歪分布

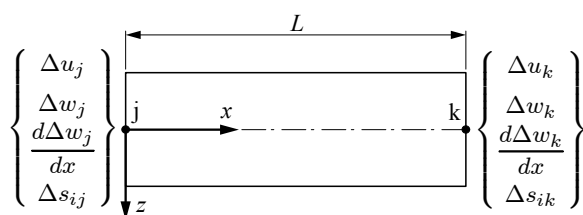


図 - 2 梁 - 柱要素

り変位 s_i の間には区間線形関係が成立する。

4) 非線形解析手法としては変位増分法を採用することにし、各増分ステップごとに繰り返し計算によって解を求める。

5) 任意の増分ステップにおける梁 - 柱要素内の個々のコンクリート層と補強材層の材料特性、ならびにこの両者間の付着特性は、その層内の中央位置で評価される一定値をとるものとする。

以上の基本仮定に従い、全ポテンシャル・エネルギーの原理に基づいて行う有限要素法への定式化の基本手法は、著者等の既報告¹⁾と同一である。即ち、本解析で使用する梁 - 柱要素は、図 - 2 に示すように、一節点につき軸方向変位 Δu 、鉛直変位 Δw 、回転角 $\frac{d\Delta w}{dx}$ の 3 個の自由度を有する通常の梁 - 柱要素に、全 m 層の補強材のすべり変位 $\Delta s_1, \dots, \Delta s_i, \dots, \Delta s_m$ を自由度として付加したものである。従って、この梁 - 柱要素では、コンクリートの引張亀裂の発生によって生じる補強材のすべり方向の逆転も取り扱うことが可能であり、本解析手法は「圧着接合面近傍における柱梁接合部と PCa 梁 - 柱部材との両側からの PC 鋼材の抜け出し現象」が顕著に現れる圧着型の PCaPC 梁 - 柱部材にも矛盾無く適用できる解析モデルである。

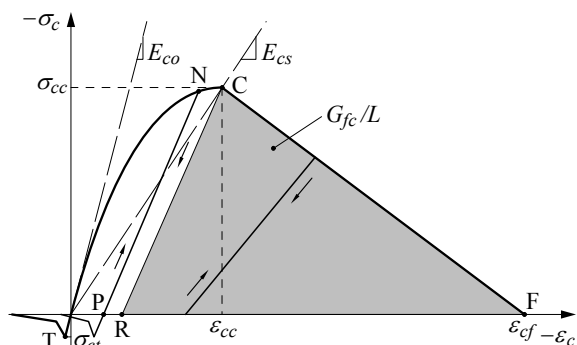


図 - 3 コンクリートの応力 - 歪関係

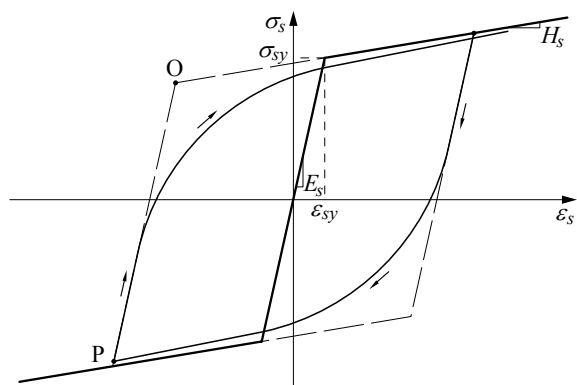


図 - 4 補強材の応力 - 歪関係

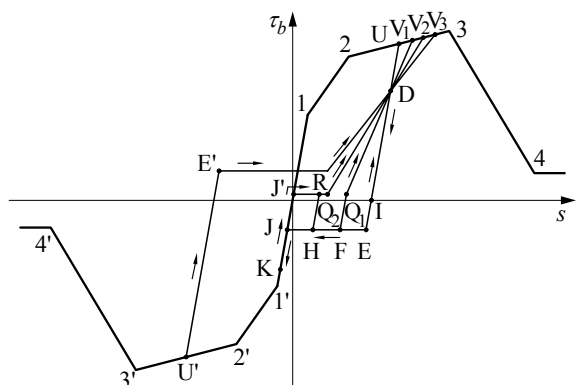


図 - 5 付着応力 - すべり関係

3. 材料特性の仮定と構成関係

3.1 コンクリートの応力 - 歪関係

単調載荷時のコンクリートは、図 - 3 に示すように、引張側では、引張強度 σ_{ct} (図中の点 T) に達するまでは線形弾性が成立し、以降は破壊力学に基づく引張軟化特性を考慮にいれ、応力を 2 段階に低減させる 1/4 モデルを採用することにする。

また、圧縮側では、圧縮強度 σ_{cc} (図中の点 C) に到達するまでは次に掲げる Saenz 式で表示できるものとする。

$$\sigma_c = \frac{E_{co}\varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_{co}}{E_{cs}} - 2\right)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \quad (1)$$

ここに、上式中の定数 E_{co} , E_{cs} , ε_{cc} は、それぞれ初期接線係数、圧縮強度時の割線係数、圧縮強度時の歪であり、本解析では、実験データが与えられている場合を除いて、 ε_{cc} には 0.2 % を、また E_{co} には E_{cs} の 2 倍の値を仮定する³⁾。

圧縮強度以降の応力逓減領域については、分担応力が 0 の圧縮終局状態（図中の点 F）に至るまでの直線経路を仮定する。圧縮終局歪 ε_{cf} の値は、要素寸法の依存性を解消するために、図中の灰色部分の面積に破壊エネルギーの概念を導入し⁴⁾、次式を用いて設定することにする。

$$\varepsilon_{cf} = \frac{2G_{fc}}{\sigma_{cc}L} + \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

但し、 G_{fc} ：圧縮破壊エネルギー、 L ：要素長、 ε_{cr} ：圧縮強度点 C からの除荷時の残留歪

繰り返し載荷に対しては、除荷開始点 N と残留歪点 P とを結ぶ直線経路とし、残留歪 ε_{cp} は除荷開始点の歪 ε_{cn} の大きさに応じて、以下に示す Karsan 等⁵⁾の実験式を用いて算定する。

$$\varepsilon_{cp} = \left\{ 0.145 \left(\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{cc}} \right) \right\} \varepsilon_{cc} \quad (3)$$

3.2 補強材の応力 - 歪関係

補強材の構成則は、単調載荷経路には bilinear 型の応力 - 歪関係を設定することにし、降伏強度 σ_{sy} 以降の接線剛性 H_s を初期弾性係数 E_s の $\frac{1}{100}$ と仮定する。

また繰り返し載荷に対しては、図 - 4 に示すように、補強材の降伏後に生じる Bauschinger 効果を適切に表現し得る Menegotto-Pinto モデル^{6),7)}を採用することにする。ここに、載荷反転点 P から始まる履歴曲線は次式によって与えられる。

$$\sigma^* = Q\varepsilon^* + \frac{(1-Q)\varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^*R)^{\frac{1}{R}}} \quad (4)$$

ここに、

$$\sigma^* = \frac{\sigma_s - \sigma_p}{\sigma_o - \sigma_p}, \quad \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_p}{\varepsilon_o - \varepsilon_p}, \quad Q = \frac{H_s}{E_s}$$

但し、 Q ：歪硬化係数、 E_s ：補強材の初期弾性係数、 H_s ：補強材の降伏後の接線係数、 R ：Bauschinger 効果を表す係数、 σ_p, ε_p ：それぞれ載荷反転点 P の応力と歪、 σ_o, ε_o ：

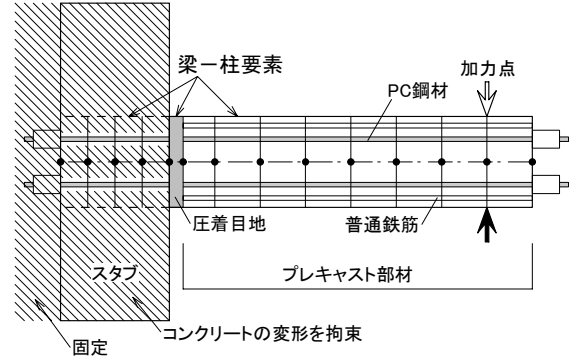


図 - 6 圧着型 PCaPC 部材のモデル化

それぞれ履歴曲線の載荷反転点での接線と漸近線との交点 O の応力と歪

3.3 付着応力 - すべり変位関係

図 - 5 は、本解析で使用する補強材とコンクリート間の付着応力 - すべり変位関係を示したものである¹⁾。この図には、点 1,2,3,4（点 1',2',3',4'）を通る正・負両側の単調載荷経路と、森田等の研究⁸⁾に準拠して設定した、図中の点 U に始まる幾つかの除荷経路および再載荷経路の典型が示されている。

4. 圧着型 PCaPC 部材のモデル化

図 - 6 は、本論で対象とする片持ち形式の圧着型 PCaPC 梁 - 柱部材とそのモデル化の概要を示したものである。この図に示すように、本解析ではプレキャスト部材と圧着目地およびスタブの 3 部分をそれぞれ配筋量や材料特性が異なるコンクリート梁 - 柱要素で表示し、スタブ内ではコンクリートの変形を拘束し、PC 鋼材の付着すべりのみが生じるものとして取り扱うこととする。また、圧着接合面近傍の変形は、引張側ではスタブと圧着目地の離間が支配的になると考えられるため、圧着目地部分のコンクリート（モルタル）層の引張強度には $0(N/mm^2)$ を仮定する。

5. 数値計算例

5.1 岡本等のアンボンド PCaPC 試験体の実験結果との比較

ここではまず、補強材の付着すべりを考慮しなければ取り扱うことができない岡本博士等

9) のアンボンド PC ストランドで圧着接合した PCaPC 試験体を対象に計算を行ってみる。図 - 7 に試験体（試験体名：UH3）の概要と解析に用いた仮定材料特性を示す。また，PC 鋼材の付着特性には，十分にアンボンド状態とみなせるように， 0.001N/mm^3 の勾配を有する線形弾性型の付着応力 - すべり関係を設定した。

図 - 8 の (a),(b) は，それぞれこの試験体の荷重 - 部材角関係の本解析結果および実験結果を示したものである。これらの図に示すように，部材が接合されるスタブ内のコンクリートの変形を拘束したためか，本解析値は実験値に比べて初期剛性や最大耐力を若干高めに評価しているが，履歴吸収エネルギーの小さなアンボンド PC 部材特有の原点指向性の高い変形挙動を表現し得ている。

図 - 9 の (a),(b) は，上側 PC 鋼材にかかる緊張力の推移を本解析値と実験値で比較したもので，両図にはどちらも定着端位置での値が示さ

れている。これらの図を見てみると，正側載荷時の両曲線の包絡線が幾分異なっていることが示されている。この相違に関しては，実際のアンボンド PC 部材における PC 鋼材の緊張力の増減がその応力 - 歪曲線に大きく依存するものと推測されることから，本解析で設定した bilinear 型の包絡線を有する PC 鋼材の応力 - 歪モデルに一因があると考えられる。しかしながら，

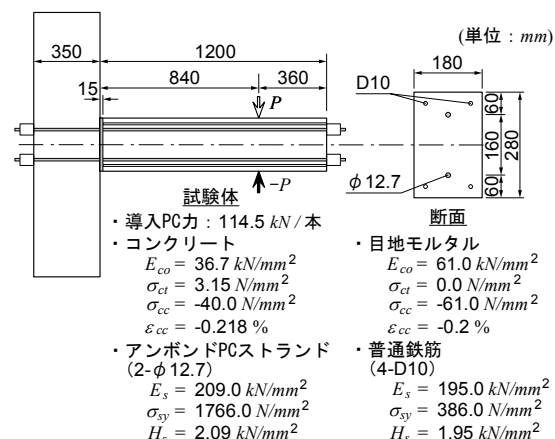
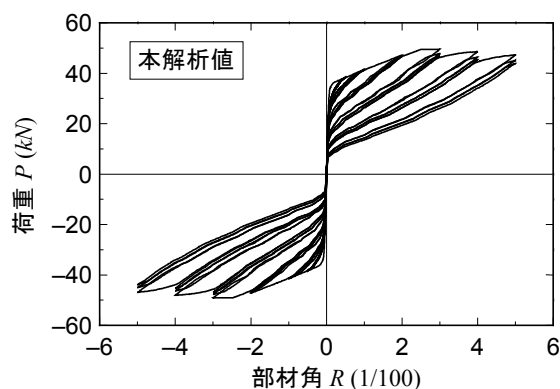
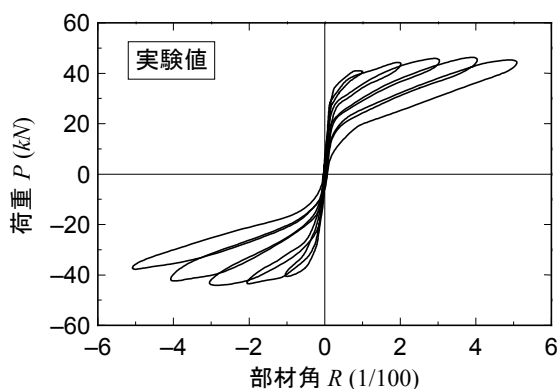


図 - 7 アンボンド PCaPC 試験体の概要

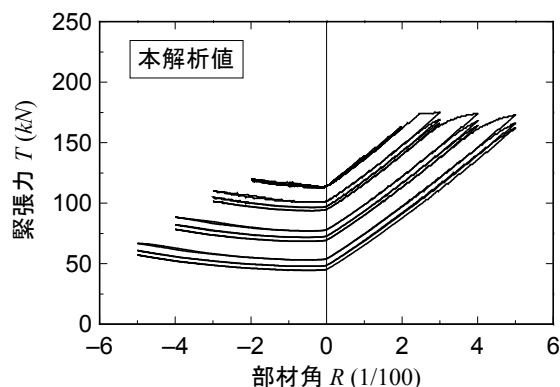


(a) 本解析値

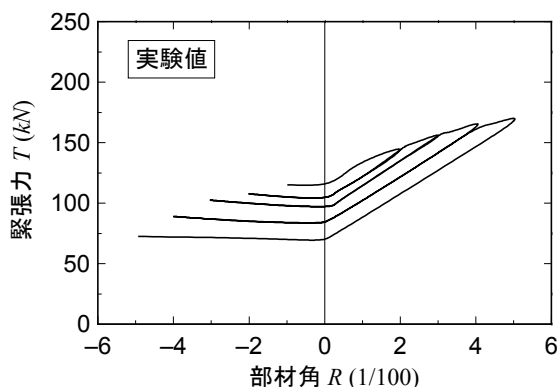


(b) 実験値

図 - 8 荷重 - 部材角関係の比較



(a) 本解析値



(b) 実験値

図 - 9 上側 PC 鋼材にかかる緊張力 - 部材角関係の比較

正側載荷時の緊張力の上昇，下降勾配や負側載荷時の挙動など，本解析値は実験値と比較的よく対応していることが分かる。

5.2 中塚等のボンド PCaPC 試験体の実験結果との比較

次に，ボンデッドタイプの梁の一例として，中塚博士等¹⁰⁾の行なった一連の片持ち PC 梁試験体のうち，異形鋼棒を用いてスタブに圧着接合された PCaPC 梁（試験体名：CA3-06D3）を取り上げて計算を行なうことにする。図 - 10 に試験体の概要と解析に用いた仮定材料特性を，また図 - 11 に異形 PC 鋼棒の仮定付着特性を示す。尚，ここで用いる付着特性は，中塚等の実験結果に基づいて設定したものである。

図 - 12 の (a),(b) は，本解析結果と実験結果をこの試験体の荷重 - 部材角曲線で比較したものである。これらの図の結果より，履歴ループ形状や残留変位量など，本解析値は実験値の全体的な傾向を概ね捉えていることが分かる。

図 - 13 は，PC 鋼材の付着特性の設定が本解

析結果に及ぼす影響を見るために試みに行った，PC 鋼材の付着特性のみを仮定して変化させた

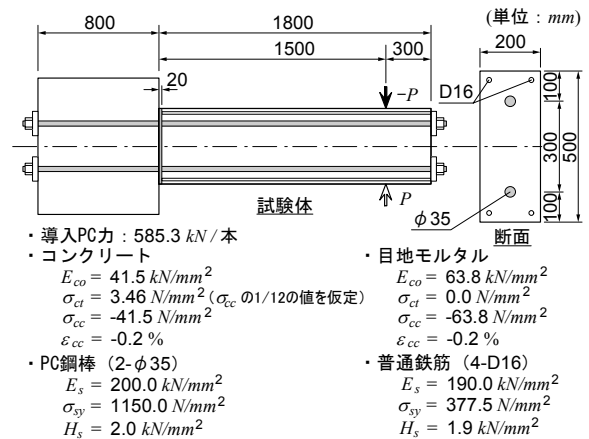


図 - 10 ボンド PCaPC 試験体の概要

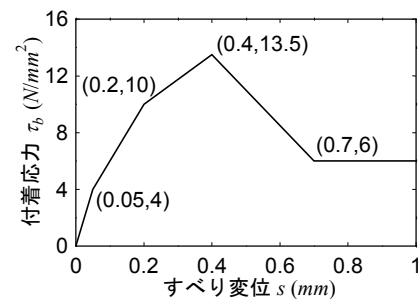
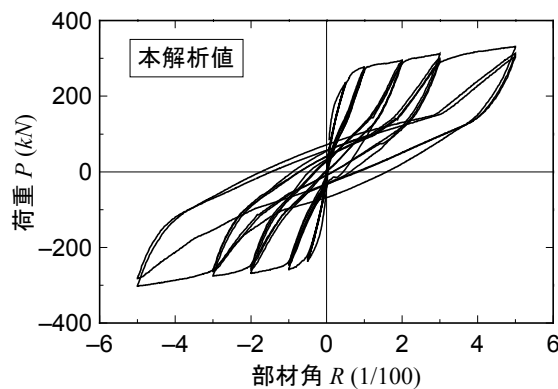
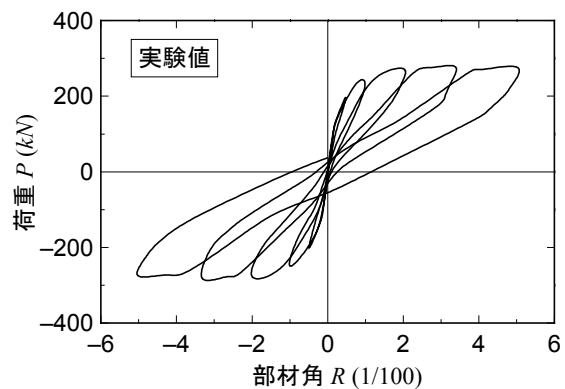


図 - 11 仮定付着応力 - すべり変位関係

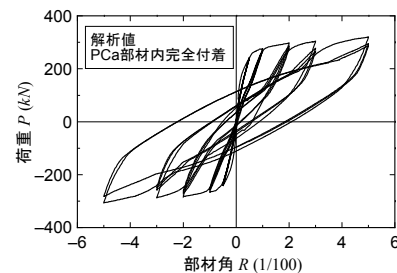
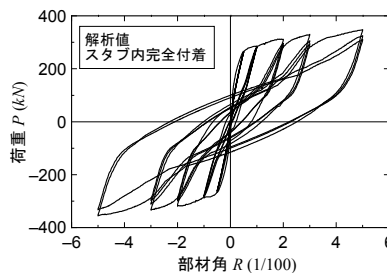
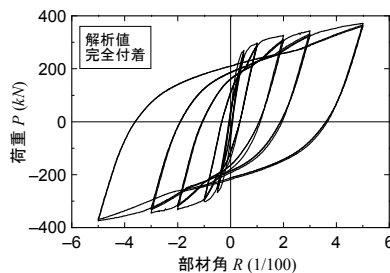


(a) 本解析値



(b) 実験値

図 - 12 荷重 - 部材角関係の比較



(a) 部材全長にわたって PC 鋼材の完全付着を仮定した解析値 (b) スタブ内の PC 鋼材に完全付着を仮定した解析値 (c) PCa 部材内の PC 鋼材に完全付着を仮定した解析値

図 - 13 荷重 - 部材角関係の解析結果に及ぼす PC 鋼材の付着特性の影響

3種の解析結果を荷重 - 部材角関係で表示したものである。即ち、同図(a)には試験体全長にわたってPC鋼材の完全付着を仮定した場合、同図(b)にはスタブ内の完全付着を仮定し、PCa部材のみからのPC鋼材の抜け出しを考慮した場合、および同図(c)にはPCa部材内を完全付着とし、スタブからのPC鋼材の抜け出しのみを評価した場合の解析結果が示されている。完全付着以外の区間に設定した付着特性は、図 - 11のものである。まず図(a)を見てみると、その履歴ループ形状は先の図 - 12(a),(b)の荷重 - 部材角曲線とは大きく異なっており、PC鋼材の付着すべりを考慮しなければ、原点指向性を示すこの試験体の履歴挙動を全く表現し得ないことが分かる。一方、図(b)と(c)では、両解析値は共に図 - 12(a)の本解析曲線と類似した傾向を示していることを読み取ることができ、また若干ではあるが図(c)の方が最大耐力値が低くなっている。このことは、一般に指摘されているように¹¹⁾、圧着型PCaPC部材の圧着接合面近傍におけるPC鋼材の抜け出し現象が、スタブからのみならずPCa部材からも生じ得ること、更には荷重 - 変形応答に及ぼす影響はスタブからの抜け出しの方が大きいこと、を示唆しているものと考えることができる。

6. まとめ

本論文では、「PC鋼材の付着すべり現象を考慮した、繰返し荷重を受ける圧着型プレキャスト・プレストレストコンクリート(PCaPC)梁 - 柱部材の材料非線形解析法」について論じた。即ち、まず本解析手法について概述し、次いでこの種の部材の全体的な荷重 - 変形応答を精度良く表現するための材料モデルならびに部材のモデル化について記述した。更に、本解析法による数値計算例を掲げ、解析結果と既往の実験結果との比較により、本解析法の妥当性を明らかにするとともに、解析結果に及ぼす付着特性の影響について検証した。今後は、この解析法を柱梁接合部モデルをも含めた、より精度

の高い材料非線形解析へと拡張・発展させたいと考えている。

参考文献

- 1) 上田正生, 土橋由造: 補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリートはり部材の曲げ変形解析, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.55-64, 1986.8
- 2) 越川武晃, 上田正生, 内山武司, 和田俊良: 補強材の付着すべりを考慮したプレストレスト・コンクリート・チモシェンコ梁の材料非線形解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.301-306, 2001.6
- 3) 土木学会 コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 社団法人 土木学会, pp.19-45, 2002.12
- 4) 斉藤成彦, 中村光, 檜貝勇: 剛体 - バネモデルを用いた軸方向圧縮力を受けるRC梁のせん断破壊挙動の数値解析, コンクリート工学論文集, 第12巻, 第2号, pp.71-81, 2001.5
- 5) Karsan, I. D. and Jirsa, J. O.: Behavior of concrete under compressive loadings, ASCE, Vol.95, No.ST12, pp.2543-2563, Dec.1969
- 6) 平尾正, 中塚信, 溝口茂: PC鋼材の繰返し応力 - ひずみ関係モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp.7-14, 2001.12
- 7) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.159-169, 2003.7
- 8) 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, pp.15-24, 1975.3
- 9) 岡本晴彦, 平出亨, 太田義弘: プレキャストコンクリート柱・梁圧着接合面のせん断力伝達(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.27, C-2, pp.901-904, 1997.9
- 10) 中塚信, 阿波野昌幸: 接合形式(圧着型・一体型)とPC鋼材種(丸形・異形)の異なる片持PC梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, 第11巻, 第3号, pp.97-110, 2000.9
- 11) 是永健好, 渡辺英善, 小林淳: 梁端部における塑性回転評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.323-328, 1994