

論文 アンボンドPC圧着工法を用いたエネルギー吸収型PCa架構の履歴挙動に関する解析的研究

越川 武晃^{*1}・上田 正生^{*2}・菊地 優^{*3}・小林 正仁^{*4}

要旨: 本論文では、クリティカル断面となる圧着接合部に普通強度鉄筋を通し配筋し、原点指向性を維持しつつ鉄筋の降伏によってエネルギー吸収を図るアンボンドPC圧着型PCa架構を対象に、著者等の既往の解析法を用いた履歴挙動解析を行い、実験結果との比較ならびにパラメトリックスタディを通して、この種の架構の構造特性について解析的に検証を行った。

キーワード: エネルギー吸収型PCa架構, アンボンドPC圧着, 履歴挙動, 付着すべり

1. はじめに

アンボンドPC圧着工法を用いたPCa架構は、地震力を経験した後の残留変位量が少ない「高復元性」を特徴としたものである。一方そのエネルギー吸収能力は一般的なRC架構などと比べると著しく乏しいことが知られており、この点を改善する一つの方法として、クリティカル断面となる圧着接合部に普通強度鉄筋を付加し、高復元性を維持しつつ鉄筋の降伏によってエネルギー吸収を図る新しい構造形式が提案されている。しかしながら、現状ではこの種の構造の研究^{1)~4)}はまだ少なく、履歴挙動を含めた構造特性を定量的に明示し得る段階までには至っていない。

本研究は、著者等の既往の材料非線形解析法^{5),6)}を用いてアンボンドPC圧着工法を用いたエネルギー吸収型PCa架構の履歴挙動解析を行い、その構造特性について解析的に検討することを目的としたものである。すなわち、まず既往の実験結果を対象とした数値計算を行い、比較を通してこの種の架構に対する本解析法の適合性を検証する。次いでプレストレス力導入量や普通鉄筋量を変数としたパラメトリックスタディを行い、これらが架構の履歴挙動に及ぼす影響について明らかにする。

2. 解析手法の概要

本論文では、有限要素法に基づいた著者等の既往の梁・柱要素⁵⁾と接合部要素⁶⁾を用いてエネルギー吸収型PCa架構のモデル化を行う。以下にその概要について示す。

2.1 付着すべりを考慮した梁・柱要素

解析に用いた梁・柱要素は、補強材の付着すべりを考慮したものである。図-1に示すように、この要素では一般的な梁・柱要素の自由度に加えてそれぞれの補強材のすべりを相対変位 s として設定し有限要素方程式を誘導する手法を用いており、付着すべりの影響を直接表現することが可能である。また、コンクリートと補強材、およびこの両者間の付着境界の3種で構成される要素の断面は、断面せい方向に層分割して取り扱うファイバーモデルで表示し、それぞれの層には著者等の既報告⁵⁾と同様の材料モデルを設定している。即ち、図-2に示すように、コンクリートは圧縮強度まではSaenz式で、引張強度までは線形弾性で表現し、以降は要素分割の影響を軽減する目的で圧縮・引張両側に破壊エネルギーを導入した応力-歪関係を設定している。補強材にはbilinear型の単調載荷経路を設定し、繰り返し載荷経路にはMenegotto-Pintoモデル⁸⁾を用いている。また、付着-すべり関

*1 北海道大学大学院助手 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 博士(工学)(正会員)

*2 北海道大学大学院教授 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 博士(工学)(正会員)

*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 博士(工学)

*4 北海道大学大学院 工学研究科建築都市空間デザイン専攻

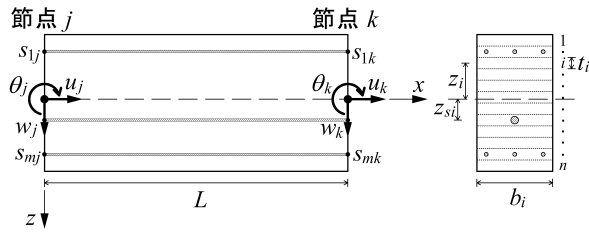


図-1 梁・柱要素

係には、森田等⁹⁾の研究に準拠した著者らの既往のモデルを設定している。

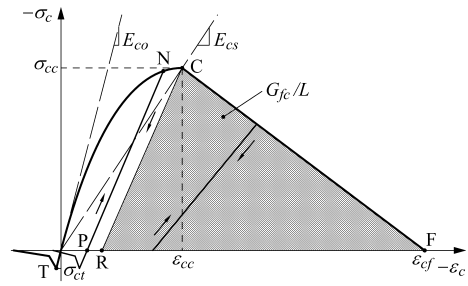
2.2 接合部要素

図-3に接合部要素の概要を示す。この要素は前項の付着すべりを考慮した梁・柱要素との変位の連続性を考慮して、これを2つ直交に重ね合わせて作製したものである。具体的には、接合部要素を構成する4つの節点をリジットリンクを用いて結合し、要素全体としては剛体変位するように設定している。このため、接合部要素における変形状態としては、コンクリート部分は剛であるが、補強材にはすべり変位 s によるひずみが生じる。即ち、この要素ではリジットリンクとは無関係なすべり変位 s が設定されているため、隣接する梁・柱要素から接合部要素内部へと通じる主筋の連続的な付着すべり現象が表現可能であり、本研究で対象とするようなアンボンドPC鋼材が接合部を貫通するPCa架構の解析にも適用できる。

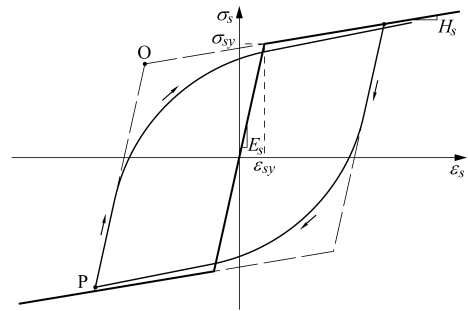
3. 既往の実験結果との比較

3.1 対象試験体とそのモデル化

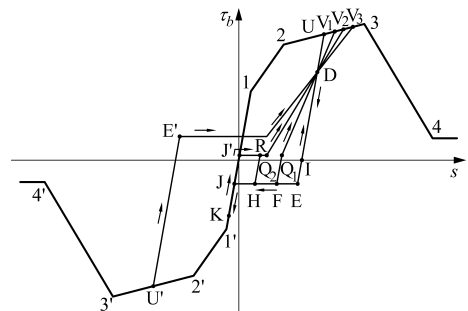
ここでは既往の実験結果に対する数値計算を行い、本解析法の適合性について検証を試みる。対象とした試験体はStone等^{1),2)}が実施した2体のアンボンドPC圧着工法を用いたエネルギー吸収型PCa架構である。図-4に各試験体(名称:M-P-Z4, O-P-Z4)の概要を示す。これらの試験体はPCaの梁と柱をそれぞれ作製した後、PC鋼材と梁断面上下に配置されたエネルギー吸収用の普通強度鉄筋をシース孔に通し、プレストレス力の導入と鉄筋のグラウトを施して梁と柱を一体化した1/3スケールの部分架構であ



(a) コンクリートの応力-歪関係



(b) 補強材の応力-歪関係



(c) 付着応力-すべり関係

図-2 材料モデル

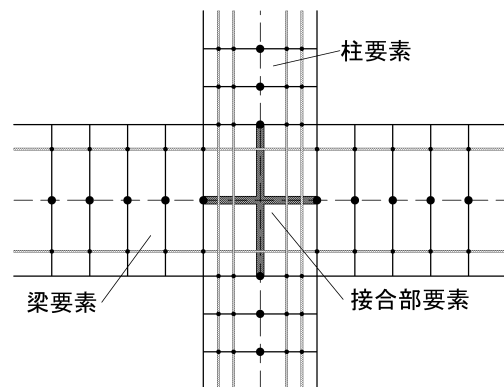
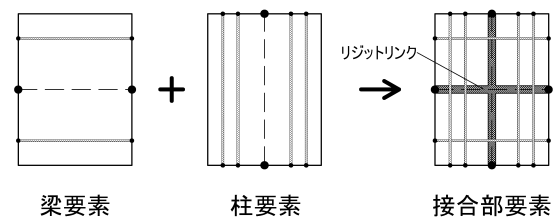


図-3 接合部要素

る。この2体の試験体では試験体形状やPC鋼材量などは同一で、エネルギー吸収用鉄筋の本数のみが異なっており、M-P-Z4には上下それぞれに2本、O-P-Z4には3本の鉄筋が配置されている。また、この種の構造では、鉄筋の降伏のみによってエネルギーを吸収し、PC鋼材は降伏させないことを想定していることから、導入プレストレス力はPC鋼材の降伏耐力の1/2程度に設定されている。なお、PC鋼材の一部にあるグラウト区間は、部分架構でプレストレス力の減退が生じた場合に、架構全体に及ぼす影響を軽減させることを意図したものである。

解析では、梁部分を圧着目地部分(1要素)を含めて22要素、柱部分9要素、接合部1要素の計63要素で試験体全体を表現し、断面はそれぞれ梁65層、柱45層分割とした。接合部要素については、この種の構造ではPCa梁端部に損傷が集中し、接合部の変形が全体の変形挙動に対して支配的とはならないことから、コンクリートを剛と仮定しても十分に適用できると判断した。解析時には、まずプレストレス力を導入し、柱に軸力を作用させた後に、実験と同様に各層

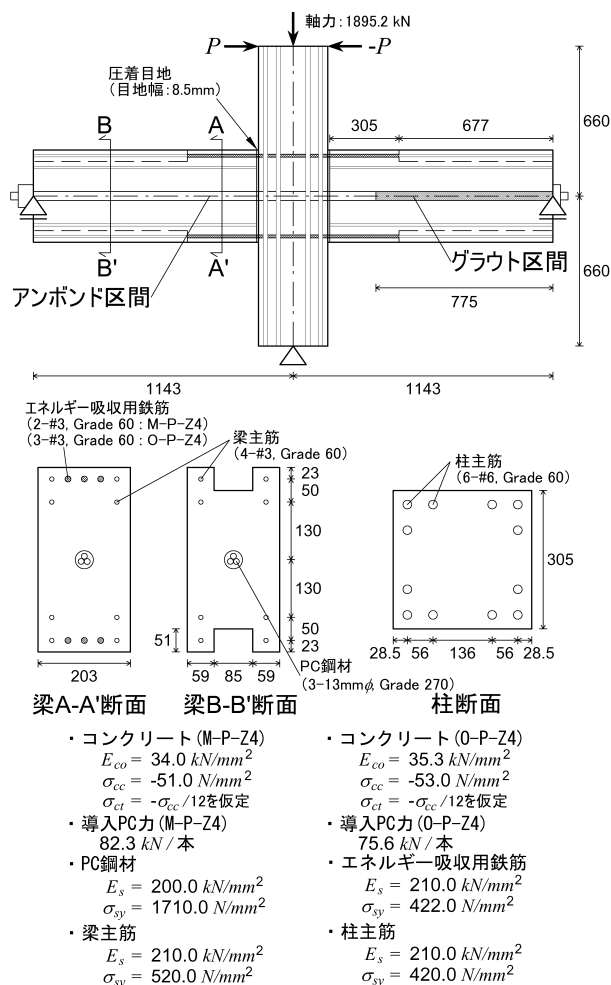


図-4 Stone等^{1),2)}のPCa架構と材料特性

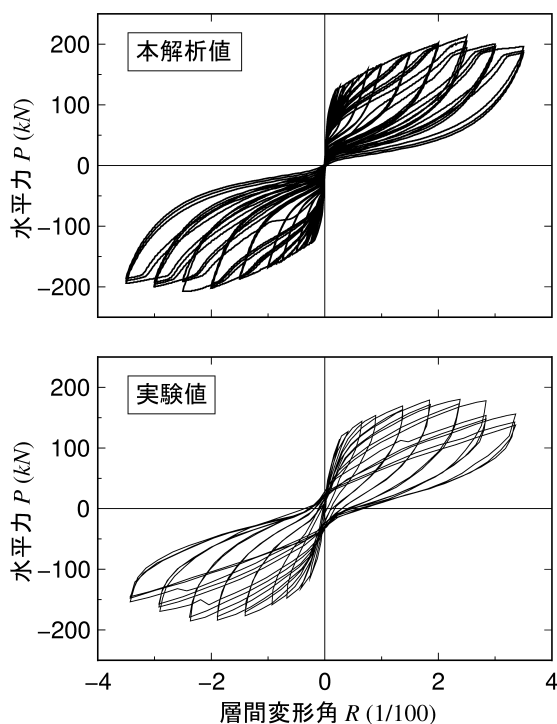


図-5 水平力-層間変形角関係 (M-P-Z4)

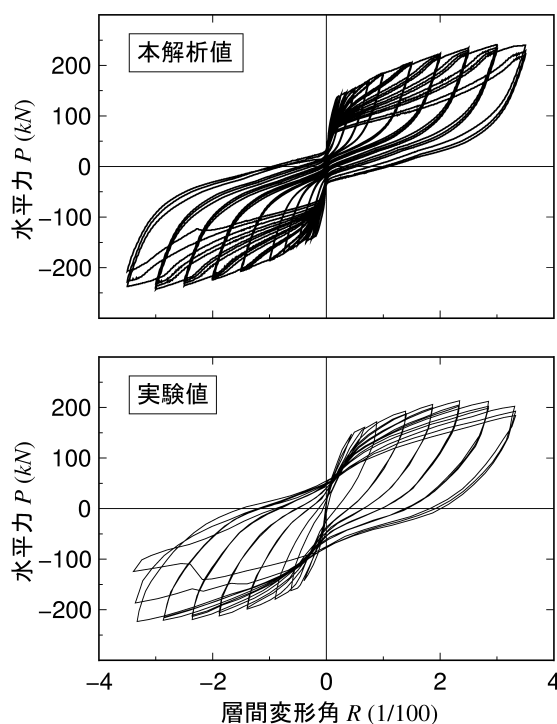


図-6 水平力-層間変形角関係 (O-P-Z4)

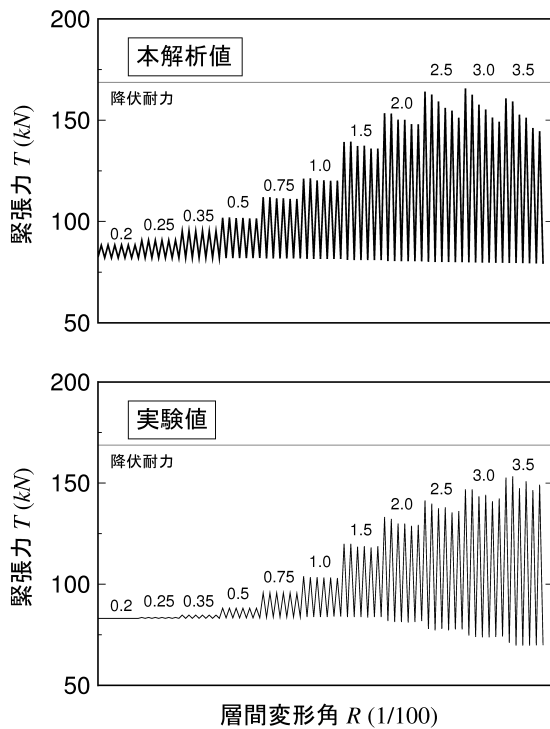


図-7 緊張力の推移 (M-P-Z4)

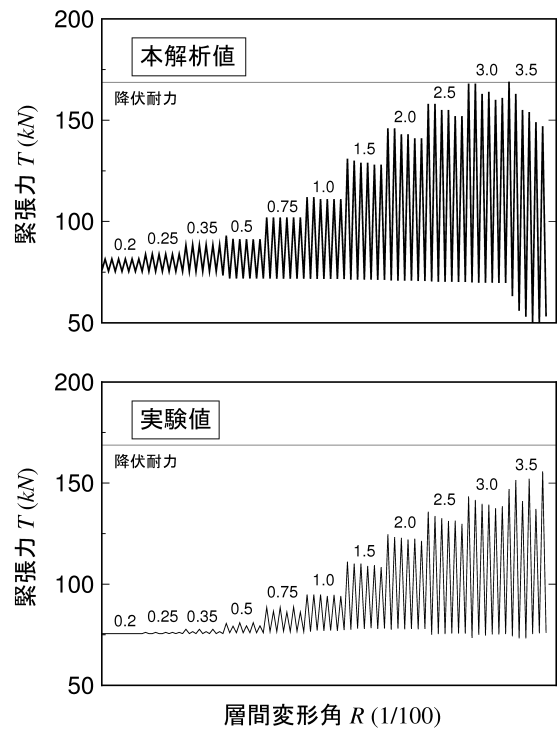


図-8 緊張力の推移 (O-P-Z4)

間変形角において3サイクルずつ柱頭に正負繰返しの水平力を作用させた。また、PC鋼材のアンボンド部分には $1/1000(N/mm^3)$ の付着剛性を設定し、グラウト区間はアンボンド状態でプレストレス力を導入した後にグラウトによる付着特性を文献9)に基づいて仮定した。なお、付着すべりを考慮した本解析法では、PC鋼材のすべり変位に対応する荷重項に荷重を作用させることによって、プレストレス力を導入することが可能である。ここでは、PC鋼材の両端部のすべり変位に対応する荷重項に対して、各試験体の所要のプレストレス力値を作用させている。

3.2 実験結果と解析結果の比較

図-5と図-6は各試験体の水平力-層間変形角を、また図-7と図-8は各試験体におけるアンボンド区間側定着端のPC鋼材緊張力の推移を本解析値と実験値で対比して示したものである。まず、水平力-層間変形角関係について見てみると、いずれの試験体においても本解析値では同一サイクルにおける最大水平力値を若干高めに評価し、除荷時においては実験値に

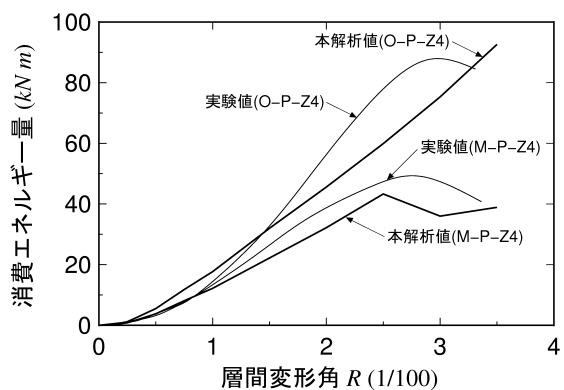


図-9 エネルギー吸収量の比較

比べてより原点指向性が高く、残留変位量を低めに見積もっており、架構の損傷に伴うプレストレス圧着力の減退がさほど生じていないことが窺える。このような傾向は、緊張力の推移からも明らかであり、例えばM-P-Z4の実験値では層間変形角が増加するにつれて各サイクルにおける緊張力の最小値が導入プレストレス力から徐々に減少していくのに対し、本解析値ではほとんど変化していない。一方、緊張力の最大値については層間変形角が0.2とかなり低い段階から本解析値では緊張力の増加が見られ、O-P-Z4では最終的に降伏耐力にまで達している。

このように本解析法はPC鋼材の緊張力をやや過大に評価しており、このことが水平力や変形量の評価にも影響しているものと考えられる。しかしながら全体的な水平力-層間変形角関係の外形状などは比較的良く対応しており、本解析法はこれらの試験体における変形特性の傾向を定性的には捉えていると言える。

また、図-9には各試験体におけるエネルギー吸収量の推移について実験値と本解析値を示してある。ここに、本解析値については、解析の結果得られた水平力-水平変位関係において各載荷サイクルの荷重0点から正負水平力载荷を受けて再び荷重0点に至るまでの1ループの曲線が作る面積から求めた。この結果から、接合部のコンクリートを剛と仮定した本解析値は、接合部に若干のせん断ひび割れが生じた実験値に対し、層間変形角が増加するにつれてエネルギー吸収量を低めに見積もっているものの、全体的にはおおむね表現し得ていると考えられる。

4. パラメトリックスタディ

4.1 パラメータの設定

アンボンドPC圧着工法を用いたエネルギー吸収型PCa架構の構造特性は、「高復元性」と「エネルギー吸収能力」の2つに特徴付けられる。既往の研究³⁾では、この種の部材の荷重-変形関係はPC鋼材による曲げ耐力 M_p とエネルギー吸収用の普通鉄筋による曲げ耐力 M_r の重ね合わせで表示でき、適度にエネルギーを吸収しつつ高復元性を保持するための条件を次のように表している。

$$M_p \geq M_r \quad (1)$$

ここで、 M_p および M_r は断面の釣合い条件を用いると、略算的にそれぞれプレストレス導入量 P_o と普通鉄筋の降伏荷重 T_{ry} とで表示することができる。この条件式を前節で取り上げた試験体M-P-Z4に適用すると最終的に次式が得られることになる。

$$P_o \geq 1.9T_{ry} \quad (2)$$

本節では、この種の架構の構造特性を検証す

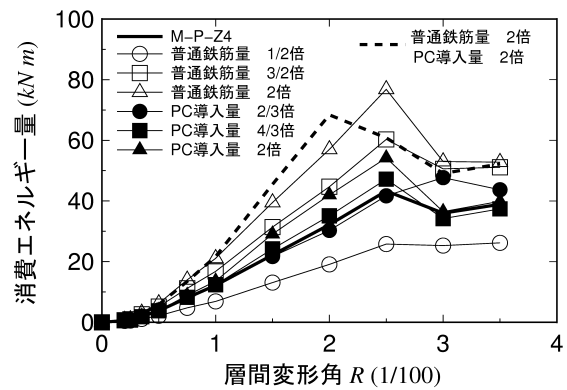


図-10 エネルギー吸収量の比較

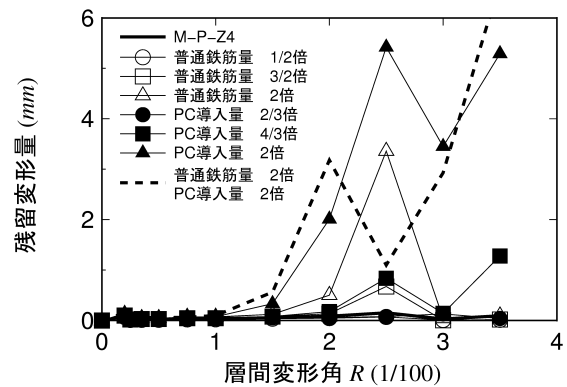


図-11 残留変形量の比較

ることを目的に、このプレストレス導入量 P_o と普通鉄筋の降伏荷重 T_{ry} をパラメータとした数値解析を試みる。パラメータには、試験体M-P-Z4の解析値を基準とし、プレストレス導入量のみを2/3倍、4/3倍、2倍に変化させた3種類、普通鉄筋量のみを1/2倍、3/2倍、2倍と変化させた3種類、およびプレストレス導入量、普通鉄筋量ともに2倍とした、計7種類を設定した。ここに、プレストレス導入量については、PC鋼材の早期降伏を避けるためにPC鋼材1本あたりの導入プレストレス力はすべて同一とし、PC鋼材の本数によって増減させた。ここでは、これらが解析結果に及ぼす影響について検証する。

4.2 解析結果の検証

図-10と図-11は、基準としたM-P-Z4を含めた8種類の解析結果について、それぞれ1回目のループ時のエネルギー吸収量と残留変形量の推移を示したものである。それぞれの図には普通鉄筋量を変化させた解析値が白抜きのマ

クで、プレストレス導入量を変化させた解析値は黒塗りのマークで示してある。

まず、エネルギー吸収量については、黒塗りで示した3種を見比べてみると明らかなように、普通鉄筋量が同一の場合にはエネルギー吸収能力には大きな差は生じていないことが分かる。また、この3種ではプレストレス導入量が大い順にエネルギー吸収量も大きくなっていることから、若干ではあるがコンクリート部分においても圧縮ひずみによるエネルギー吸収がなされているものと推察できる。普通鉄筋量を変化させた場合には、鉄筋量に応じたエネルギー吸収量の増減を明確に読み取ることができ、この種の架構のエネルギー吸収能力はほぼ普通鉄筋量で決定できるものと考えられる。

次に図-11からは、プレストレス導入量を増加させた解析結果では層間変形角2%程度から残留変形が見られるようになっていることが分かる。これはコンクリート部分にかかる圧縮力が増加したことによって、圧縮側コンクリートのひずみが進行したことによるものである。また、白抜きの普通鉄筋量のみを増加させた場合の残留変形は、プレストレス導入量に対する普通鉄筋量の割合が増加したことによる影響と考えることができ、このことは、この種の構造の高復元性を保持する条件について式(2)のような関係が成立し得ることを示唆している。

5. まとめ

本論文では、著者等の既往の解析法を用いてエネルギー吸収デバイスが付加されたアンボンドPC圧着型PCa架構の履歴挙動解析を行い、実験結果との比較ならびにパラメトリックスタディを通して、その構造特性に対して解析的に検討を行い、次のような知見を得た。

(1) 本解析法は、この種のPCa架構における全体的な荷重-変形関係や履歴エネルギー吸収量などを概ね評価可能である。

(2) プレストレス導入量と普通鉄筋量を変化させたパラメトリックスタディから、この種の架

構のエネルギー吸収能力はほぼ普通鉄筋量で決定でき、またその高復元性を保持する条件はプレストレス導入量と普通鉄筋量の関係で表現できる可能性がある。

参考文献

- 1) Stone, W. C. Cheok, G. S. and Stanton, J. F. : Performance of Hybrid Moment-Resisting Precast Beam-Column Concrete Connections Subjected to Cyclic Loading, ACI Structural Journal, Vol.91, No.2, march-April, pp.229-249, 1995
- 2) Cheok, G. S. and Stone, W. C. : Performance of 1/3-Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads - Report No4, NISTIR 5436, NIST, Gaithersburg, June, 1994
- 3) 菅田昌宏, 中塚侑 : アンボンドPC圧着工法によるエネルギー吸収型高復元性部材の荷重-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, 第584号, pp.153-159, 2004.10
- 4) 菅田昌宏, 中塚侑 : アンボンドPC圧着エネルギー吸収型高復元性部材のマクロモデルによる荷重-変形関係の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.103-110, 2005.4
- 5) 越川武晃, 齊藤隆典, 上田正生, 菊地優 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.37-42, 2004.7
- 6) 齊藤隆典, 越川武晃, 上田正生, 菊地優 : 柱梁接合部における主筋の付着すべりを考慮したRC平面骨組の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.73-78, 2005.6
- 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) Comitè Euro-International du Béton : CEB-FIP Model Code 1990, First Draft, CEB, 1990