

論文 高強度コンクリートを利用した資源循環型 PCa 圧着接合柱の開発と耐震性能に関する解析評価手法の提案

福原 武史*1・中原 佑*1・松尾 英典*2・孫 玉平*3

要旨 : $F_c=80\text{N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートを利用した資源循環型 PCa 圧着接合構造体を提案し、特にその柱脚部を想定した試験体に対して一定軸力下における繰り返し载荷実験を行い、水平力-部材角関係等、耐震性能に関するデータを取得した。この結果、提案した構造体の柱は靱性能に優れ残留変形は抑制されることが明らかとなった。次いで、部材の耐震性能を、材軸方向の変形によるプレストレスの抜けを考慮して解析的に評価する手法を提案し、その妥当性を実験結果と比較することで検証した。この結果、本論中で提案する解析評価手法を用いれば、構造体の部材の耐震性能を精度良く評価することができる。

キーワード : 高強度コンクリート, 資源循環型, プレキャスト, プレストレス, 圧着接合

1. 序

近年、環境問題が世界規模の問題になりつつある中で、環境負荷低減を目的として高強度コンクリートの高い耐力と耐久性能が構造物のライフサイクル性能の向上に有効であると注目されている。また、阪神大震災以降、地震のような大規模な都市災害の際においては、人命に加えて経済的なリスク管理も注目されつつあり、建物の耐震性能には高い耐力に加えて災害後の損傷抑制と修復の容易さが求められつつある。

著者らは、近年の構造物の課題となりつつある環境負荷低減と、災害時の損傷抑制を可能とする構造体として、これまでに高強度コンクリ

ートを利用した資源循環型 PCa 圧着接合構造体を提案した。¹⁾ この構造体は、高強度コンクリートを鋼管拘束した柱および梁部材を塑性ヒンジ発現領域に、短期荷重において曲げ荷重が小さい区間にはその接続要素として円形 CFT を用い、これを PC 鋼により圧着接合するプレキャスト構造を想定した。(図-1 参照) これら部材の接合は、プレストレスによる圧着接合のみで行い、グラウトなどの接着材料を用いないものとした。なお、軸方向の力が入らない梁の接続要素には鉄骨部材を弾性材として用いることを想定している。塑性ヒンジ発現領域のコンクリートを横拘束する鋼管は、容易にコンクリートと

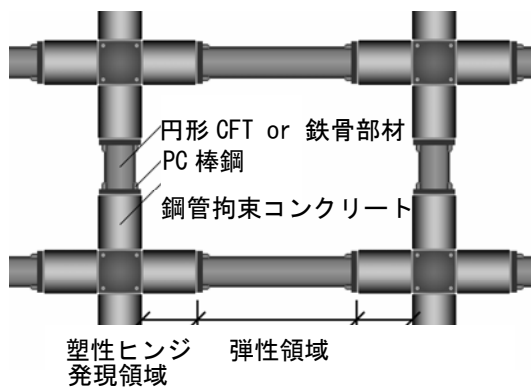


図-1 構造体概念図

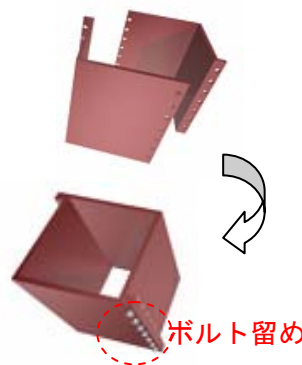


図-2 拘束鋼管の容易な脱着

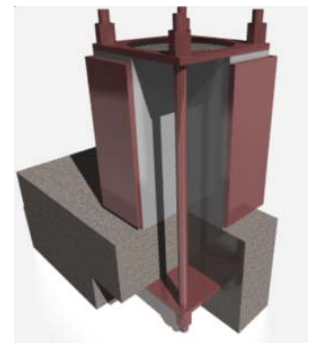


図-3 基礎部分イメージ

*1 九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 工修 (正会員)

*2 株式会社間組設計・技術センター 工修 (正会員)

*3 神戸大学工学部建設学科建築系教授 工博 (正会員)

分離できるように、折り曲げ加工した2組の鋼板をボルト止めで作成した。(図-2参照)

この構造体は次の利点を持つ。

- 1) 乾式工法である圧着接合とボルト接合を利用し、容易な建物の更新・再使用・再資源化(reuse・recycle)を可能とする。
- 2) 高強度コンクリートと鋼管横拘束法による部材の高い耐震性能を持たせることが可能である。(高耐力・高靱性)
- 3) プレキャストによる施工および品質管理の合理化を可能とする。(プレキャスト, 工場内打設)
- 4) 主筋を用いないことで、RC部材の残留変形の主因となるのは主筋の降伏がなく、地震後の建物の損傷によるリスクの低減が可能である。(残留変形抑制)

本論では、本提案構造体の耐震性能を評価するために必要である、1) 実験による部材の耐震性能に関する基礎データの取得と分析 2) 解析による部材の耐震性能評価手法の提案を目的とし、まず基礎と直接接合する柱脚部を想定した(図-3参照)繰り返し曲げ載荷実験を行う。次いで、実験で対象とした部材の耐震性能を評価する解析手法を提案し、提案解析評価手法の精度検証を行う。解析は、1.0D(Dは部材断面せい)を塑性ヒンジと設定した集中ヒンジモデルを仮定し、コンクリートは平面保持、PC棒鋼の張力は部材の回転および部材の軸方向変形により変化するものとして逐次計算を行い、これより部材の水平力-部材角関係を計算した。

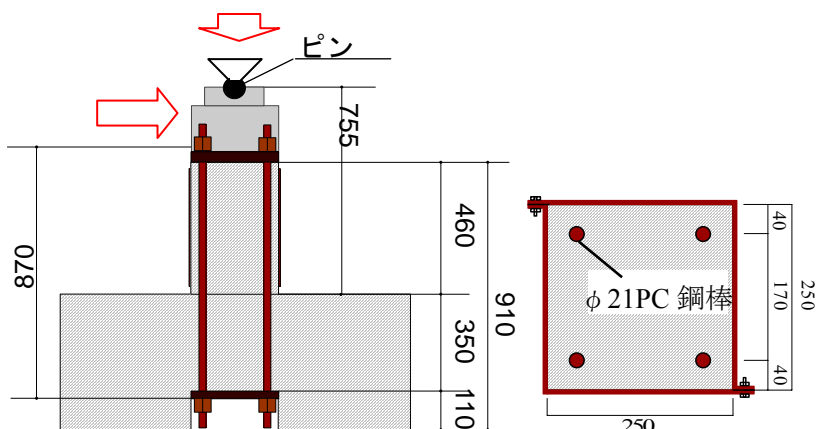


図-4 試験体詳細と断面詳細

2. 実験概要と実験方法

本研究では、パイロット実験として提案構造体の1階柱脚部分を想定した試験体を1体作成し、その耐震性能を実験的に検証した。図-4に試験体概要を示す。試験体は、1階柱脚部を模擬した1/3縮小モデルで、内幅250mmの角形鋼管により拘束されたPCa圧着接合RC柱である。試験体作成においては、異材料の完全分離の観点からシーす等を利用せず、φ28の丸鋼にグリスを塗布した紙を巻いて引き抜きやすく加工し、これを打設後に引き抜くことでPC棒鋼用の穴を開けた。引き抜き後の穴はφ30相当であった。試験体の柱部分の高さは460mm、基礎部分のうち柱部材を乗せる位置は110mmくり貫かれ、高さ350mmである。PC棒鋼による圧着には、加力装置との接続用鋼板、上下ナット用のワッシ

表-1 鋼材の機械的性質

	t[φ] (mm)	Es (N/mm ²)	fsy (N/mm ²)	fsu (N/mm ²)
PL-6(鋼板)	6.0	205000	290	432
PC-21(PC)	[21]	200000	1080	1230

t:板厚, φ:直径, Es:ヤング係数,
fsy:降伏強度, fsu:終局強度

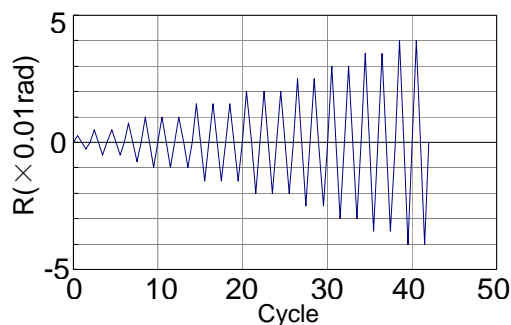


図-5 載荷プログラム

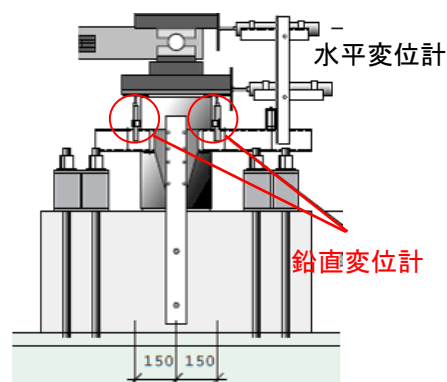


図-6 変位計取り付け位置

ヤー、アンカープレートを使用し、厚さはそれぞれ 20mm, 5mm, 30mm である。PC 棒鋼の長さはこれらの厚さを加えた 870mm である。

表-1 に鋼材の機械的性質を示す。角形鋼管は、幅圧比 41.7 で、2 枚の加工鉄板をボルト留めしたものである。PC 棒鋼は $\phi 21$, C 種 1 号を使用し、部材断面に対する面積比は 2.22% である。コンクリートは目標強度 80N/mm^2 の高強度コンクリートとし、実験日に行ったシリンダー試験による平均圧縮強度は 85.5N/mm^2 であった。

実験の手順は、まず基礎部分と柱の部品を PC 棒鋼で圧着して組み立てた。この時のプレストレスは軸力比で 0.15 レベルである。次いで、油圧試験機（能力 5MN）で軸力比 0.15 相当の軸力を部材に与え、1MN 油圧ジャッキを水平方向に押し引きすることによって一定軸力下における静的繰り返し曲げ剪断実験を行った。载荷は図-5 に示す载荷プログラムに従い、図-6 に示す水平変位計より得られた部材角 R により制御した。なお、プレストレス導入から実験終了までの全工程は一日で行った。

3 実験結果

実験結果を図-7 中に実線で示す。図より分かるように、試験体は $R=0.02\text{rad}$ で最大耐力に達し、その後耐力低下はあるものの予定した载荷プログラム $R=0.04\text{rad}$ の大変形まで安定して軸力を負担した。これより靱性能に優れることが分かる。また、残留変形角は $R=0.02\text{rad}$ で 0.16%(正負の平均)と非常に強い原点指向を示しており、損傷抑制に優れているといえる。加力後、試験体には拘束鋼管にふくらみが観察されたが、亀裂等の損傷は見られなかった。また、鋼管を取り外して柱部分を観察すると、コンクリートには PC 鋼を挿入した穴に沿って縦にひび割れが観察されたが、ヒンジ領域あるいは PC 棒鋼を挿入した穴の内部の剥離・剥落は観察されず、鋼管拘束法を用いることで高強度コンクリートの脆性的な破壊を抑えられた。

図-8 中に、柱の軸方向ひずみの実験結果を

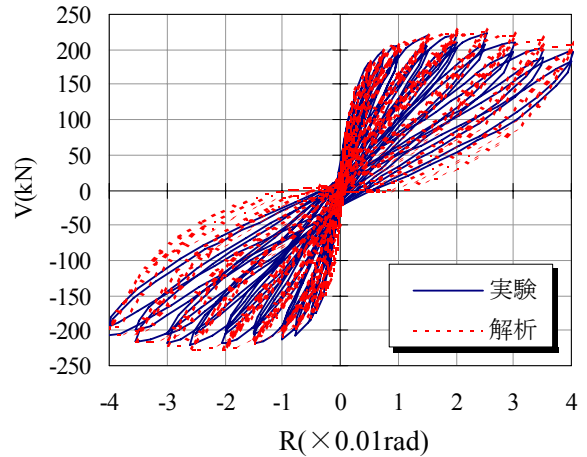


図-7 水平力-部材角関係

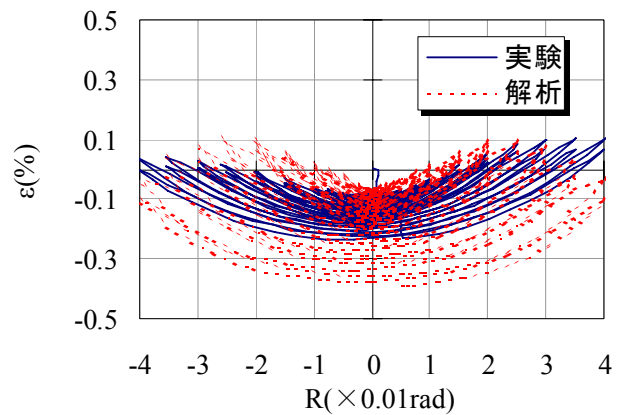


図-8 軸ひずみ（解析）

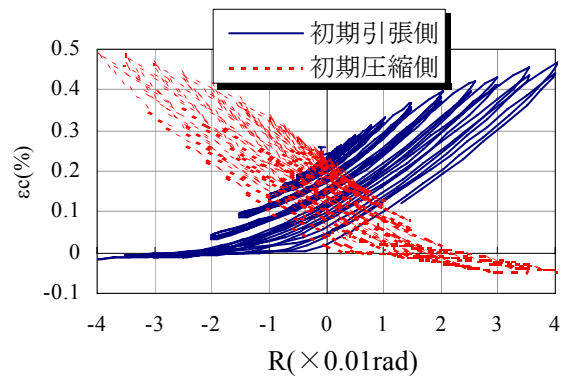


図-9 PC 棒鋼の歪み状況

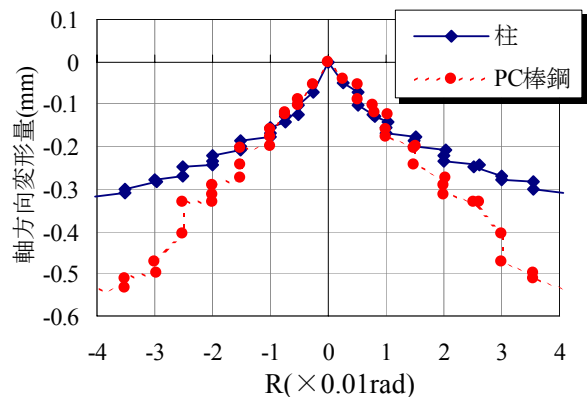


図-10 柱と PC 棒鋼の軸方向変形量の推移

実線で示す。軸方向ひずみは、4本の鉛直変位計から得られた鉛直方向変位の平均を柱の長さ460mmで除した値であり、引張を正とする。プレストレス導入後、油圧試験機による鉛直軸力の載荷前の軸方向ひずみが0である。図より分かるように、いずれの試験体も部材角 $R=0.02\text{rad}$ まで軸方向ひずみは大きく発散することなく、安定した履歴性状を示すことが分かる。

図-9にPC棒鋼のひずみ状況を示す。PC棒鋼のひずみは、PC棒鋼中央部の軸方向へ裏表2枚貼り付けたひずみゲージの平均値として計測した。図より分かるように、PC棒鋼のひずみは、柱の変形の進行に伴って小さくなる。これは、柱の軸方向変形によってプレストレスが緩むことに起因する現象である。また、PC棒鋼と柱のコンクリート部分の付着は切ってあったため、ひずみは0付近で収束している。

図-10には、軸力導入後、加力開始前を初期値とした、水平力の繰り返し載加によるコンクリートの軸方向変形の進行と、プレストレスの抜けによるPC棒鋼の縮み量の相対量をそれぞれ各サイクル経験後、部材角 $R=0\text{rad}$ 時の値を抜き出して比較したものである。PC棒鋼の縮み量は、PC棒鋼の長さ870mmを乗じて得たものである。図より分かるように、柱の軸方向変形の進行とともにプレストレスに緩みが生じ、緩み量が $R=0.01\text{rad}$ までは柱のそれとよく一致した。このことは、プレストレスの緩みの適切な評価には、柱の軸変形の適正評価が重要であることを示唆している。

4 解析手法の提案

提案した構造体の耐震性能を、適切に解析的に評価するためには、1) PC棒鋼がアンボンドであるためにコンクリートのPC棒鋼位置のひずみはPC棒鋼のひずみとは一致しない、2) 柱部材の軸方向変形に従ってPC棒鋼によるプレストレスが徐々に抜けることに注意する必要がある。このため、1) についてはコンクリートのみ平面保持を仮定し、PC棒鋼のひずみは軸力の

釣り合いから決定することで、2) についてはPC棒鋼位置のコンクリートの軸方向変形からPC棒鋼のひずみを算定することで解決できると考えられる。本研究では、これを適切に考慮した解析を次のように提案する。

まず、図-11に示すように、柱部材を、曲げの影響が大きいと予想されるヒンジ領域部分(以下領域A)と、曲げの影響が顕著に表れないと予想されるヒンジ領域外部分(以下領域B)へと分ける。ここで、領域Aのコンクリートは軸方向変形と曲げ変形、領域Bのコンクリートは軸方向変形のみ生ずるものとする。なお、基礎部分は十分剛と仮定し、変形しないものとする。次いで、曲げ変形が材端の塑性ヒンジ領域に集中する集中ヒンジモデルを仮定すれば、塑性ヒンジ領域に曲率 ϕ_k を与えることで水平力一部材角関係が次に示す手順で得られる。

- 1) 載荷軸力を一定軸力 N として与える。
- 2) 領域Aの曲率 ϕ_k を与える
- 3) 領域Aの中央軸ひずみ $\varepsilon_{Aco,k}$ を仮定する。以下、ひずみおよび応力はいずれも圧縮側を正とする。
- 4) ϕ_k と $\varepsilon_{Aco,k}$ より、領域Aのコンクリートファ

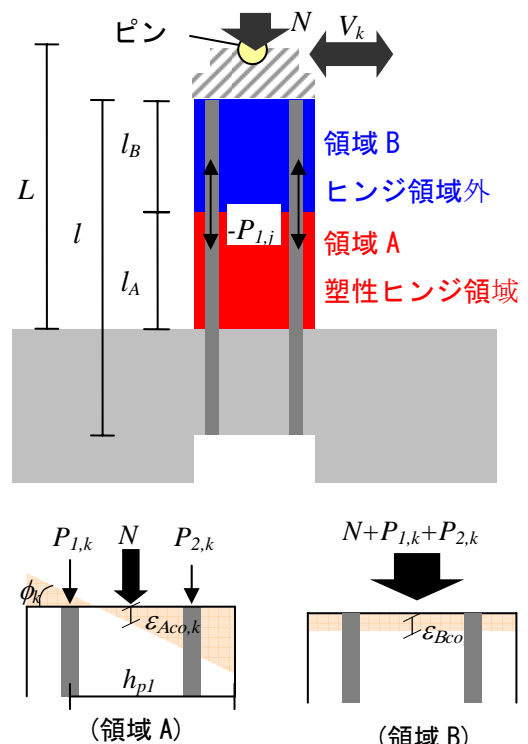


図-11 解析の領域分けとひずみ分布

イバーの各ひずみ $\varepsilon_{ci,k}$ が式(1)より得られる。

$$\varepsilon_{ci,k} = \varepsilon_{Aco,k} + \left(\frac{D_c}{2} - h_{ci}\right) \cdot \phi_k \quad (1)$$

ここで、 D_c はコンクリートコア断面せい、 h_{ci} は断面中央からコンクリートファイバーの*i*要素の重心位置までの距離である。

5)領域 B でのコンクリートのひずみを $\varepsilon_{Bc,k}$ と仮定する。

6)領域 A での PC 棒鋼位置のコンクリートの軸方向変形量領域 B での PC 棒鋼の緩み量 $S_{B,k}$ が式(2)より、領域 A でのコンクリートの軸縮みにより生ずる j 列の PC 棒鋼の緩み量 $S_{Aj,k}$ は式(3)より計算できるので、j 列の PC 棒鋼の張力(引張側は負)の総和 $P_{j,k}$ が式(4)から得られる。

$$S_{B,k} = \varepsilon_{Bc,k} \cdot l_B \quad (2)$$

$$S_{Aj,k} = \left\{ \varepsilon_{Aco,k} + \left(\frac{D_c}{2} - h_{pj}\right) \cdot \phi_k \right\} \cdot l_A \quad (3)$$

$$P_{j,k} = A_{pj} \cdot f_p \left(\varepsilon_{pini} + \frac{S_{Aj,k} + S_{B,k}}{l} \right) \quad (4)$$

ここで、 l_A および l_B はそれぞれ領域 A および領域 B の高さ、 l は PC 棒鋼の全長で領域 A および領域 B の長さの和にプレート厚さ、 A_{pj} は j 列の PC 棒鋼の総断面積、 ε_{pini} は初期導入プレストレスにより生ずる PC 棒鋼のひずみ、 h_{pj} は断面中央から PC 棒鋼の j 要素の重心位置までの距離、 $f_p()$ は PC 棒鋼のひずみから応力を返す関数である。

7)領域 B での軸方向力の釣り合い条件である式(5)を満たせば次へ、満たさなければ $\varepsilon_{Bc,k}$ を新たに仮定して6)へ戻る。

$$N + \sum_{j=1}^{n_p} (-1) \cdot P_{j,k} = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \cdot f_c(\varepsilon_{Bc,k}) \quad (5)$$

ここで、 A_{ci} はコンクリートファイバーの*i*要素の面積、 n_p, n_s はそれぞれ PC 棒鋼の列数とコンクリートファイバーの要素数、 $f_c()$ はコンクリートのひずみから応力を返す関数である。

8)軸力とプレストレスの和と、領域 A の各コンクリート要素が負担する軸力の釣り合い条件である式(6)を満たせば次へ、満たさなければ新たな $\varepsilon_{Aco,k}$ を仮定し4)へ戻る。

$$N + \sum_{j=1}^{n_p} P_{j,k} = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \cdot f_c(\varepsilon_{ci,k}) \quad (6)$$

9)式(7)より、領域 A の断面モーメント M_k を算定する。

$$M_k = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} \cdot f_c(\varepsilon_{ci,k}) \cdot \left(\frac{D_c}{2} - h_{ci}\right) + \sum_{j=1}^{n_p} P_{j,k} \cdot \left(\frac{D_c}{2} - h_{pj}\right) \quad (7)$$

10)曲率分布に集中ヒンジモデルを仮定することで、部材各 R_k および水平力 V_k はそれぞれ式(8)および式(9)から算定される。

$$R_k = L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L} \right) \cdot \phi_k \quad (8)$$

$$V_k = \frac{M_k}{L} - N \cdot R_k \quad (9)$$

ここで、 L_p は塑性ヒンジ長さで $L_p=l_A$ 、 L はせん断スパンで図-4では柱の基礎側材端からピン中央までの高さ(755mm)

なお、本試験体においては、PC 棒鋼を通すための $\phi=30\text{mm}$ の空洞が4箇所ある。空洞部分のコンクリートは、同じ位置のコンクリートファイバーの断面積を減ずることで考慮した。

5 解析手法の妥当性の検証

提案解析手法の妥当性を検証するため、実験結果と解析結果の比較を行った。

解析に用いたコンクリートの履歴則は高強度までの適用が検証された文献2で提案されたものを、PC 棒鋼の履歴則は文献3で提案したモデルを用いた。なお、PC 棒鋼の応力ひずみ関係を描くために必要なヤング係数と接線合成の比 Q および特性ひずみ ε_{ch} は、表-1の機械的性質である 0.2%offset 強度および終局強度を満たす

ように試行錯誤的に求めたもので、 $Q=0.003$ 、特性ひずみ $\varepsilon_{ch}=0.615\%$ と設定した。また、領域 A の高さ $l_A=1.0D$ (D は断面せいでここでは 250mm) と設定した。また、試験体の柱部分の高さ (l_A+l_B) は 460mm、試験体のせん断スパン L はこれに試験体との接続治具のピンまでの高さを加えて 755mm である。

図-7には水平力-部材角関係の実験結果と解析結果を示す。最大耐力について比較すれば、実験結果は 222.4kN に対して解析結果は 226.8kN であり、その差は 2.0%と解析値は実験値を良く評価していることが分かる。

図-8には軸方向変形の実験結果と解析結果を示す。軸方向変形は、実験値では鉛直変位計から測定された柱部材の軸方向変形を柱部材長で除したものを、解析値では領域 A と領域 B の軸方向変形の和を柱部材長で除したものである。図より分かるように、解析結果は実験結果を良く追跡していることから、本解析手法を用いれば、柱部材の軸方向変形に伴う PC 棒鋼の緩みを適切に評価することが出来るといえる。

図-7では部材の履歴特性を適切に評価できているか定量的に判断することが難しいため、図-12に実験結果と解析結果の部材の等価粘性減衰定数を算定し、履歴特性に関して比較した。まず、実験結果を見ると、その値は 4.4%~6.1 とおおよそ一定で、弾性的な挙動を示していることが分かる。一方、解析結果を見ると、その値は 2.1%~6.2%であり、実験結果をやや小さく見積もる傾向にあるものの、実験結果と同様にその値は大変形まで小さく、弾性的な履歴特性を評価しているといえる。

6 まとめ

設計強度 80N/mm² 級の高強度コンクリートを利用した資源循環型 PC a 圧着接合構造体を提案し、この実現にあたって必要になる柱の耐震性能を実験的に明らかにした。この結果、本提案構造体の柱は靱性能に優れ残留変形は抑制されることが分かった。次いで、部材の軸方向変

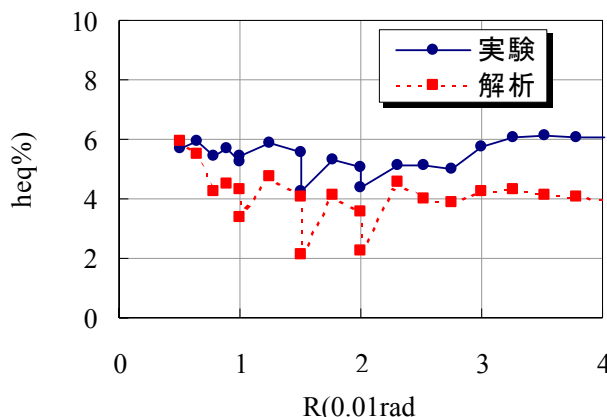


図-12 等価粘性減衰定数

形によって生ずるプレストレスの緩みを考慮した部材の耐震性能評価手法を提案し、実験結果と比較してその妥当性を検証した結果、提案した解析結果は実験結果に良く一致した。なお、中間層階柱については上下の柱が対称に変形すると仮定すれば、プレストレスの緩みのみを解析的に追跡すればよいと推測されるが、これについては実験的検討と共に今後の課題としたい。

謝辞

実験に用いた PC 棒鋼は高周波熱錬株式会社から提供していただきました。また、本研究は 21 世紀 COE プログラム「循環型住空間システムの構築」若手研究者研究活動の助成および、竹中育英会建築研究助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松尾英典, 福原武史ほか: 高強度コンクリートを利用した資源循環型 PC a 圧着接合構造体の開発 その 1~その 2, 日本建築学会 学術講演梗概集, C-2 分冊, pp.743-746, 2006.9
- 2) 北島, 他: 高強度 RC 部材の耐震性能評価法の提案その 1、日本建築学会研究報告九州支部, No. 44・1[構造系] pp. 349-352 2005. 3
- 3) 孫玉平ほか: 付着すべりの影響を考慮した高強度 RC 柱の履歴性状の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.619-624, 2006