

論文 RPC を用いた外殻プレキャスト合成柱の復元力特性に関する実験的研究

須間 里美^{*1}・菅野 俊介^{*2}・和泉 信之^{*3}・下山 善秀^{*4}

要旨：本研究は 200N/mm² 級のコンクリートを建築構造に適用することを目的としており、本報では RPC（反応性粉体コンクリート）を用いた合成柱の復元力特性試験について行ったパイロット試験の結果を報告する。コア部分に 60N/mm² 級コンクリートを用い、外殻部分の厚さ比 0.33 で軸力レベルおよび横補強筋量を変えた実験の結果、軸力比 0.4~0.5 の高軸力下では、横補強筋を外殻部分の主筋外周に密に配置することにより、所定の曲げ強度を得ることができるが、大きな変形能力を得ることは難しいことが判った。一方、軸力比 0.2 の低軸力下では 1/25 を超える大きな変形能力がみられた。

キーワード：超高強度コンクリート，RPC，外殻プレキャスト，復元力特性

1. はじめに

近年、100N/mm² 級コンクリートを用いた建物が建設されるようになったが、それを超える強度のコンクリートは建築においてまだ実用化されていない。本研究は、設計基準強度 200N/mm² 級の超高強度コンクリートの建物構造物への適応性を検討することを目的としており、ここでは新しいコンクリート系材料である RPC（反応性粉体コンクリート）の利用に着目している。

RPC を用いた部材は高温蒸気養生の必要性から現場製作が難しいため、工場で作成して現場で組み立てるプレキャスト工法が現実的である。また、柱軸力の大きな超高層建物にプレキャスト工法を用いる場合、1階柱ではヒンジの発生する柱に対応して RPC フルプレキャスト柱を用い、ヒンジの発生しない柱では外殻部にのみ RPC を用いるプレキャスト合成柱とする工法が考えられる。この工法では、柱の軸力や応力条件に応じて RPC の外殻厚さ、コアコンクリートの強度を合理的に変化させる設計が必要になる。

これまでに、超高強度コンクリートを用いたプレキャスト合成柱や外殻部分とコア部分のコ

ンクリート強度が大きく異なる合成柱の資料がないため、そのような合成柱の水平力下における復元力特性および終局耐力の評価方法を検討するためのパイロット試験を実施した。本実験では、外殻部分に圧縮強度 200N/mm² 級の RPC、コア部分に圧縮強度 60N/mm² 級の超高強度コンクリートを使用した。

本報は、実験結果と終局耐力の評価等についてまとめたものである。

2. 実験計画

2.1 実験因子

実験因子は、横補強筋量レベル ($p_w \cdot w \sigma_y / \sigma_B'$, 3水準)、軸力比 (3水準)、横補強筋の配置とした。本実験では、コンクリート強度を外殻とコアの断面積に応じた等価コンクリート強度としている。 p_w : 横補強筋比, $w \sigma_y$: 横補強筋強度, σ_B' : 等価コンクリート強度)

2.2 試験体の設計

試験体は全て 240×240mm の正方形断面で、全高は 960mm (せん断スパン比: 2.0) とする。外殻の厚さは、主筋および横補強筋を内蔵した

*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 戸田建設 (株) 構造設計部 主管 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 技術企画部 部長 工博 (正会員)

最小厚さを想定して、40mm (2t/D=0.33) とする。
試験体形状及び配筋図を図-1 に示す。

試験体は全部で 5 体とし、試験体一覧を表-1 に示す。軸力比は等価コンクリート強度に対して 0.5, 0.4 および 0.2 とした。横補強筋間隔, 17.5, 27.5, 37.5mm は、それぞれダブル配筋とした時の 35, 55, 75mm に対応している。実施工では横補強筋をダブル配筋とすることを想定しているが、本試験体では鉄筋の加工上スパイラル筋をダブル配筋とすることができないので、間隔を 1/2 にしてシングル配筋とした。中子筋を有する試験体では、対応する試験体の横補強筋比と同じにするためにダブル配筋のときの間隔 55mm とした。この横補強筋間隔は主筋径の 5.5 倍であり、横補強筋の最大間隔の規定¹⁾を満たしている。また横補強筋量レベルは等価コンクリート強度に対して 0.18, 0.11, 0.08 とした。表-1 において 2 試験体は、せん断耐力が曲げ耐力をやや下回っているが、鋼繊維の混入によってせん断耐力が向上することが RPC 梁に関する既往の研究²⁾で示されていることから、表-1 の試験体ではせん断破壊は生じないとして計画を行った。また、同表で付着応力度が付着信頼強度よりも低いので付着破壊は生じないとしている。

2.3 使用材料

本研究で使用した RPC の調合を表-2 に示す。RPC はプレミックス粉体 (セメントを基材とし、珪砂, 反応微粉末等をあらかじめ混合したもの), 専用の高性能減水剤, 水および鋼繊維からなる。鋼繊維は靱性の付与を目的とするもので、直径 0.2mm 長さ 15mm のものを使用した。

主筋には SHD685 D10 を 12 本、横補強筋と中子筋には USD1285 U7.1 の高強度鉄筋を使用している。また、外周筋はフック 135°, 余長 8d のスパイラル筋である。使用鋼材の機械的性質を表-3 に示す。

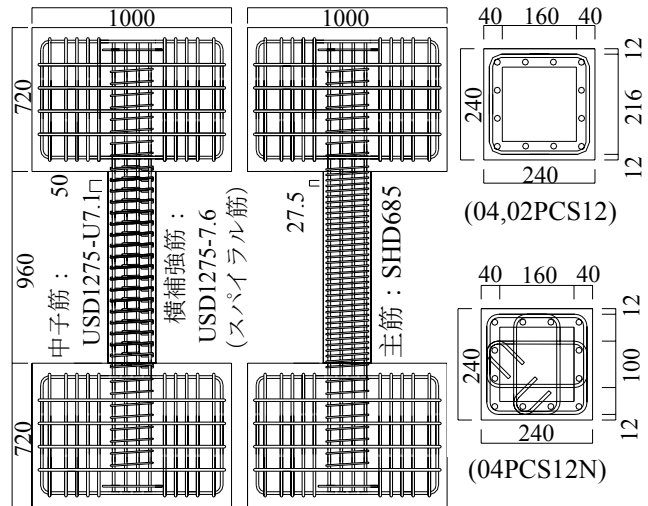


図-1 試験体形状

表-1 試験体一覧

試験体名	軸力比 η	横補強筋間隔 (mm)	横補強筋比 $\rho_w(\%)$	曲げ終局 ³⁾ 強度時せん断力 $Q_{mu}(kN)$	せん断信頼強度 $V_u(kN)$	付着 ¹⁾ 応力度 $\tau_f (N/mm^2)$	付着 ¹⁾ 信頼強度 $\tau_{bu} (N/mm^2)$	V_u / Q_{mu}	予想破壊形式
05PCS19	0.5	17.5	1.90	381	420	5.8	15.4	1.10	F
04PCS12	0.4	27.5	1.21	430	406	5.8	12.1	0.94	S
04PCS09		37.5	0.88	430	391	5.8	10.6	0.91	S
04PCS12N		55.0	1.21	430	465	5.8	13.8	1.08	F
02PCS12	0.2	27.5	1.21	364	406	5.8	12.1	1.12	F

<試験体名>(軸力比)PCS(横補強筋比)(N:中子筋あり) <破壊形式>S:せん断破壊先行型, F:曲げ破壊先行型

等価コンクリート強度: $(\rho \sigma_B \times pA + \sigma_c \sigma_B \times cA) / (pA + cA) = 138(N/mm^2)$

$\rho \sigma_B$: 外殻部分コンクリート強度, $\sigma_c \sigma_B$: コア部分コンクリート強度, pA : 外殻部分断面積, cA : コア部分断面積

表-2 調合表 (kg/m³)

水	プレミックス粉体	鋼繊維
180	2254	157
高性能減水剤25 (固形分5kg)を含む		

表-3 鋼材の機械的性質

鉄筋種類	鉄筋径 (mm)	降伏強度 $\sigma_y (N/mm^2)$	降伏時歪度 $\epsilon_y (\mu)$	引張強度 $\sigma_u (N/mm^2)$
SHD685-UHD10	10	746	4588	935
USD1275-U7.1	7.1	1393	9528	1448

2.4 試験体の作製

試験体作製順序は以下の 1) ~9) の順で実施した。1) 試験体配筋, 2) 試験体外殻部分 RPC 打設, 3) 湿布養生, 4) スタブ内外殻部分 RPC 打設, 5) 湿布養生, 6) 脱型, 7) 蒸気養生, 8) コアコンクリート打設(スタブ部分から試験体部分まで一体), 9) スタブコンクリート打設, の順で行った。また, 外殻部分とコア部分の接合面は型枠脱型時のまま処理は行っていない。

2.5 加力方法

加力は福山大学ハイテクリサーチセンター所有の 10MN 級試験機を用い, 一定軸力下での逆対称正負交番繰り返し载荷としている。载荷プログラムは, 1/800, 1/400, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/37.5, 1/25rad. としている。

3. 実験結果

3.1 破壊経過・破壊形式⁴⁾

高軸力の 05PCS19, 04PCS12, 04PCS12N においては 1) 主筋の曲げ圧縮降伏, 2) コンクリートの圧壊, 3) 最大耐力, 4) 圧縮主筋座屈の順に, 高軸力でせん断補強筋量レベルが低い 04PCS09 においては 1) 主筋の曲げ圧縮降伏, 2) 最大耐力, 3) せん断圧縮破壊の順で最終破壊に至っている。低軸力の 02PCS12 においては 1) 主筋の曲げ引張降伏, 2) コンクリートの圧壊, 3) 最大耐力の順に

破壊が進行し, 変形角 1/25 まで繰り返し水平力を加えても耐力低下が小さかったため押し抜きを行った。実験後試験体をはつり鉄筋の状態を確認したところ, 05PCS19, 04PCS12, 04PCS12N では圧縮鉄筋の座屈・破断, 横補強筋の破断がみられた。04PCS09, 02PCS12 ではせん断クラックがみられた。

写真-1 に試験体の破壊状況を示す。曲げ圧縮破壊を起こした 05PCS19, 04PCS12, 04PCS12N は試験体柱頭・柱脚がはらみ, カバーコンクリートが剥落した後, 最大耐力に到達した。せん断圧縮破壊を起こした 04PCS09 は柱脚から中央に向けて多数のせん断ひび割れが入り一部カバーコンクリートが剥落した。高軸力の 05PCS19 は柱頭・柱脚部の破壊状況が最も激しかった。

3.2 荷重変形関係

図-2 に各試験体の履歴曲線を示す。ここでは



05PCS19, 04PCS12, 04PCS12N, 04PCS09, 02PCS12

写真-1 破壊状況

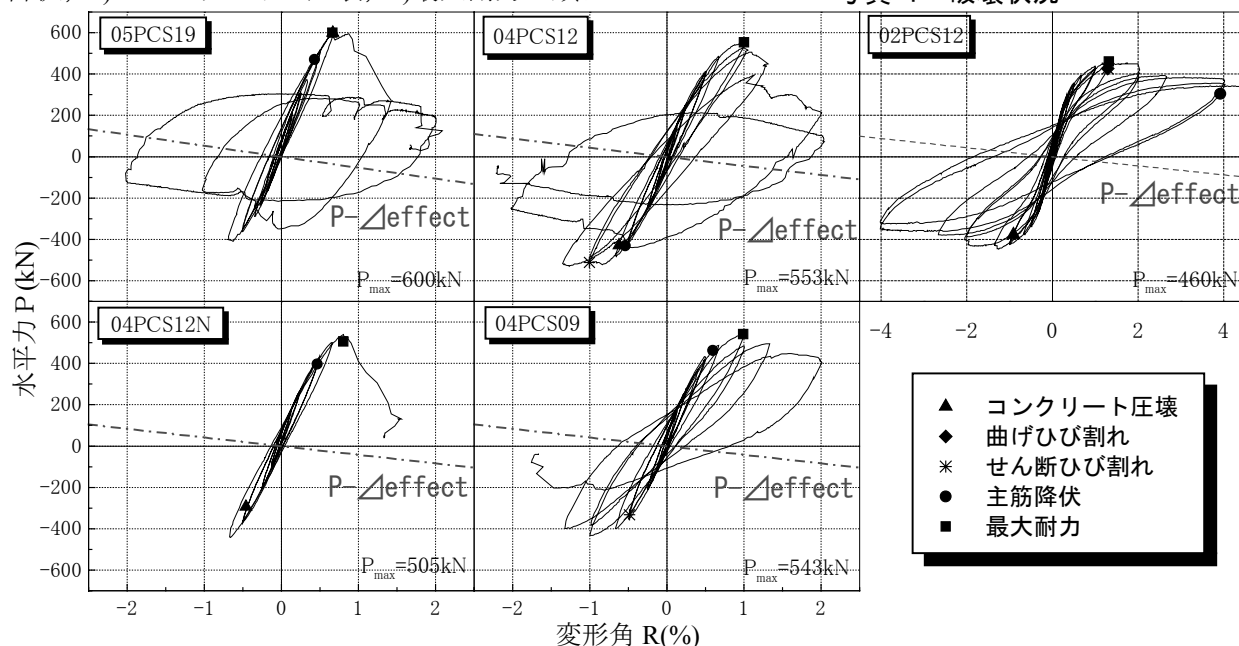


図-2 履歴曲線

限界変形と最大耐力点の定義⁴⁾のため、P- Δ 効果補正は行っておらず実測値をそのまま用いている。高軸力である 05PCS19, 04PCS12 は最大耐力到達後大きく耐力低下を起こしたが、その後も軸力保持能力は確保している。中子筋を有する 04PCS12N は最大耐力到達後急激に破壊し、軸力保持能力を喪失した。横補強筋量の少ない 04PCS09 は最大耐力到達後徐々に耐力低下しながら、負側の加力で急激にせん断圧縮破壊を起こした。また、低軸力である 02PCS12 は最大耐力到達後多少の耐力低下はあるものの安定した履歴ループを示した。

4. 実験結果の検討

4.1 最大耐力

表-4 に実験結果一覧を示す。曲げ耐力においては外殻とコアの圧縮強度、圧縮強度時歪が異なることから本実験ではそれらを考慮するため断面分割法によって M-N 相関曲線を算出し比較検討を行った。M-N 相関関係を図-3 に示す。条件として平面保持を仮定し、本実験の材料特性試験結果を用いた。材料特性を図-4、表-5 に示す。(コア部分の材料特性については最大応力後

の応力は一定とする。)

中子筋を有する 04PCS12N を除く 4 試験体において曲げ耐力を発揮した。05PCS19, 04PCS12 について予想破壊形式はせん断破壊先行であったが、せん断破壊を起こさなかった。これは、鋼繊維の効果によりせん断耐力が上昇したためと考えられる。また、せん断破壊を起こした 04PCS09 についても計算値を上回っており、鋼繊維によって耐力が上昇したと考えられる。

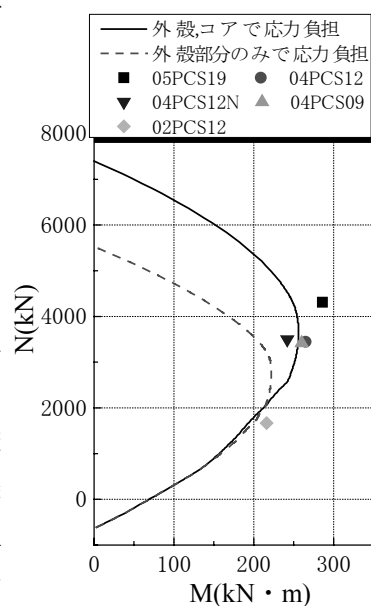


図-3 M-N 相関関係

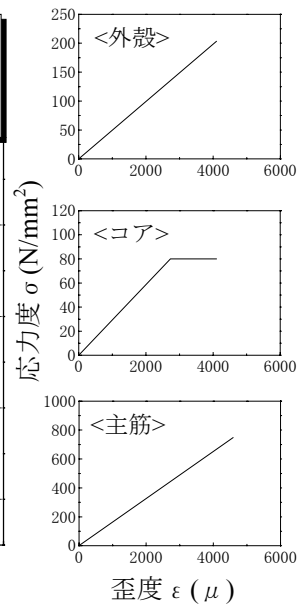


図-4 材料特性

表-4 実験結果一覧

試験体名	横補強筋量 レベル $P_w \cdot w \cdot \sigma_y / \sigma_B$	限界 変形 $R_u(\%)$	最大 荷重 $P_{max}(kN)$	M-N相関 関係による 曲げ強度 $Q_M(kN)$	1)			実験値/計算値		5) 破壊 形式
					せん断 信頼強度 $V_u(kN)$	付着 応力度 τ_f (N/mm^2)	付着信頼 強度 τ_{bu} (N/mm^2)	P_{max} / Q_M	P_{max} / V_u	
05PCS19	0.177	1.11	600	518	444	6.3	15.7	1.16	1.35	I
04PCS12	0.113	1.25	553	533	428	6.3	12.4	1.04	1.29	I
04PCS09	0.083	0.80	543	533	411	6.3	10.8	1.02	1.32	II
04PCS12N	0.111	1.34	505	534	496	6.3	12.4	0.95	1.02	I
02PCS12	0.117	3.90	460	403	419	6.3	12.3	1.14	1.10	III

<破壊形式> I: 主筋圧縮降伏後の曲げ圧縮破壊, II: 主筋圧縮降伏後のせん断圧縮破壊,
III: 主筋の曲げ引張降伏後の曲げ圧縮破壊

表-5 材料試験結果

試験体名	外殻($RPC: \rho F_c = 200N/mm^2$)			コア(高強度コンクリート: $c F_c = 60N/mm^2$)		
	圧縮強度 $\rho \sigma_B (N/mm^2)$	圧縮強度時 歪度 $\rho \epsilon (\mu)$	ヤング係数 $\rho E_{1/3}$ ($\times 10^4 N/mm^2$)	圧縮強度 $c \sigma_B (N/mm^2)$	圧縮強度時 歪度 $c \epsilon (\mu)$	ヤング係数 $c E_{1/3}$ ($\times 10^4 N/mm^2$)
05PCS19	204	4046	5.47	82	2672	3.44
04PCS12	202	3995	5.51	83	2899	3.55
04PCS09	209	4211	5.27	80	2827	3.54
04PCS-12N	203	4272	5.27	80	2788	3.58
02PCS12	198	3889	5.39	79	2462	3.60

一方、中子筋を有する 04PCS12N については M-N 相関関係による曲げ耐力には至らなかった。これは同補強筋比の 04PCS12, 02PCS12 に比べ横補強筋間隔が大きかったため曲げ耐力到達直前に主筋が座屈して耐力を失ったと推定される。しかし、せん断信頼強度を上回る結果となったことから他の試験体と同様に鋼繊維の効果によりせん断耐力が上昇したと考えられる。また、付着強度においては表-4 より付着信頼強度が付着応力度を上回っており、付着破壊を起こしていない実験結果と対応した。

4.2 変形能力

図-5 に全試験体の横補強筋量レベル-限界変形角関係を示す。ここで、限界変形角は最大耐力後、水平力が最大耐力の 0.8 倍に至った点、及び急激に耐力低下した場合は 1 サイクル前のピーク時の変形角としている。図-6 に実験因子の異なる試験体の包絡線の比較を示す。ここで、変形角に対する最大耐力到達後の耐力低下の比較のため、水平力を最大耐力で基準化した。横補強筋量レベルの違いによって大きな影響はみ

られなかった。低軸力である 02PCS12 は変形能力に優れ、最大耐力到達後の耐力低下が緩やかであったのは、コンクリートの圧壊があまり進まなかったためと考えられる。また、中子筋を有する 04PCS12N は同じ横補強筋比でも横補強筋間隔が広がったため、早期に主筋が座屈し、急激な耐力低下を起こしたと考えられる。

同時期に行った全断面 RPC 柱の実験⁶⁾より、図-7 に軸力比と横補強筋量レベルがほぼ等しい全断面 RPC 柱との包絡線の比較、図-8 に全断面 RPC 柱の断面図を示す。ここで、外殻部分のみで軸力を負担すると考えると、等価コンクリート強度に基づく本実験での軸力比は、0.5→0.62,

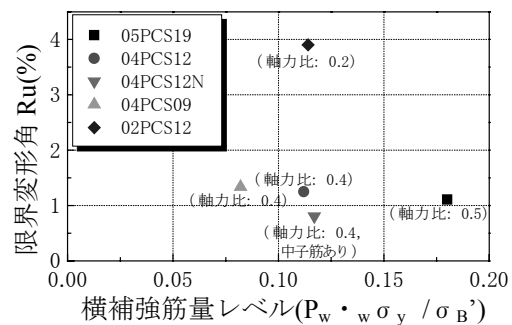


図-5 限界変形角

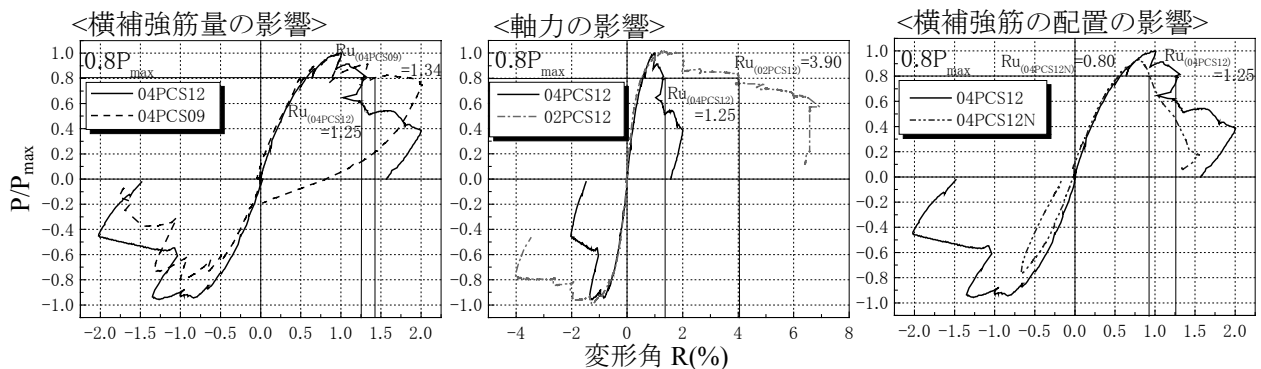


図-6 包絡線比較

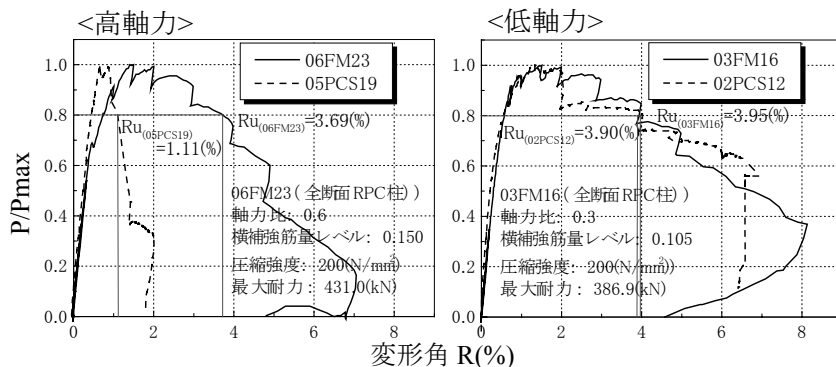


図-7 全断面 RPC 柱との包絡線の比較

全高: 1000mm
M/Qd: 2.5
使用鋼材は本実験と同様

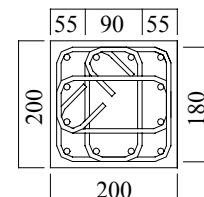


図-8 全断面 RPC 柱断面図⁶⁾

0.2→0.25 となり、実情は全断面 RPC 柱と軸力比が近いと考えられる。高軸力柱では、全断面 RPC 柱の変形性能が高い。これは、合成柱では外周にのみ横補強筋が配置されているのに比べ、中子筋を有していることで全ての主筋が横拘束されている全断面 RPC 柱のほうがコンクリートの拘束が大きかったためと考えられる。また、低軸力柱では、コンクリートの圧壊が進行しなかったため、横補強筋の配置による変形能力の違いはみられなかった。

4.3 等価粘性減衰定数

図-9 に全試験体の等価粘性減衰定数を示す。ここで等価粘性減衰定数は 2 回目サイクルの正負の和として算出している。

軸力の高い 4 体は軸力の低い 02PCS12 に比べて、初期サイクルから等価粘性減衰定数が大きい。また、高軸力柱では初期段階で耐力低下が進んだため、横補強筋量レベルや横補強筋の配置によって顕著な違いを確認することができなかった。

5. まとめ

RPC を用いた外殻プレキャスト合成柱の復元力特性試験により以下のことが分かった。

(1)最大耐力の評価

実験で得られた最大耐力は、計算による M-N 相関関係と良い対応をしており曲げ耐力を発揮できた。中子筋を有する試験体が他の試験体に比べ曲げ耐力が計算値に至らなかったのは、横補強筋間隔が広がったため主筋座屈が起りやすかったことが原因と考えられる。

低軸力の 02PCS12 を除く 4 試験体では、せん断信頼強度は M-N 相関関係による計算値を下回っているがせん断破壊を起こさなかったことから、既往研究²⁾にあるように鋼繊維により耐力が上昇したと考えられる。

(2)復元力特性・変形能力

高軸力柱では、変形性能は 1/100 前後で横補強筋量レベルや横補強筋の配置による影響はあまりみられなかった。これは横補強筋が外周にのみ

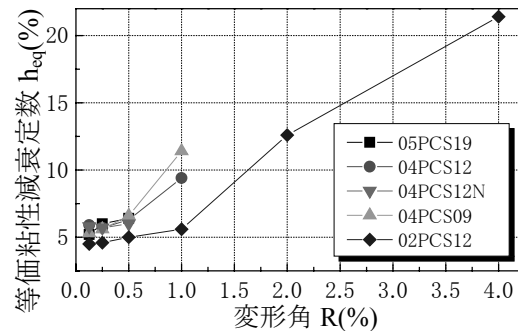


図-9 等価粘性減衰定数

み配置されたことと、中子筋がある場合でも横補強筋間隔が広くコンクリート拘束が弱かったためと考えられる。低軸力試験体では同因子の全断面 RPC 柱とほぼ等しい変形能力がみられた。(3)今後の課題

今回のパイロット試験結果より、高軸力下における外殻 RPC 合成柱の曲げ靱性を確保するために必要な外殻厚さ、外殻部を拘束するための横補強筋量と横補強筋の配置について実験的に検討する必要があると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、横補強筋を提供して下さった高周波熱錬株式会社、実験計画から実施にあたりご指導して頂いた福山大学工学部建築学科南宏一教授および実施にあたり多大なご協力を頂いた同研究室の皆様、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説
- 2) 白井一義ほか：RPC を用いたはり部材の曲げせん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，p841 - 846，2003
- 3) 嶋津孝之，福原安洋，佐藤立美：新しい建築工学 3 鉄筋コンクリート構造，森北出版株式会社，p48，1986
- 4) 石川裕次：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱部材の復元力特性，東京大学学位論文，2002
- 5) 東洋一ほか：鉄筋コンクリート柱の崩壊防止に関する総合研究について，コンクリート工学，p2 - 17，Vol3，No.1，1975，6
- 6) 上甲尚典ほか：RPC を用いた RC 柱の復元力特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，2004 投稿中