

論文 RPC を用いた柱の復元力特性に関する実験的研究

上甲尚典*1・菅野俊介*2・木村秀樹*3・下山善秀*4

要旨：本研究は、 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートの建築構造物への適用を目的とし、本報では RPC (反応性粉体コンクリート) を利用した柱の復元力特性試験結果について報告する。軸力比と横補強筋量を変えた実験により、軸力比 0.6 の高軸力下においても十分な変形性能を保ち、横補強筋量に伴って変形性能が向上することが分かった。また鋼繊維の混入により、曲げ耐力、変形能力ともに増大することがわかった。

キーワード：超高強度コンクリート, RPC, 鋼繊維, 復元力特性

1. はじめに

近年、 100N/mm^2 級の圧縮強度を持つ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まだ使用されていない。本研究は、 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートの建築構造物への適用性を検討することを目的としており、これまでに RPC の素材特性試験、RPC 柱の中心圧縮試験¹⁾を行ってきた。本報ではまだ研究例のない 200N/mm^2 級 RPC 柱の水平力下での復元力特性に関する実験について報告する。

なお、ここで用いる RPC (Reactive Powder Concrete, 反応性粉体コンクリート) は、セメント、減水剤、珪石質微粉末、細骨材、及び短繊維を主な構成成分としており、低水セメント比、粉体の最密充填、凝結過程での加圧及び硬化後の熱処理を基本条件として緻密化、均質化を達成した超高強度のセメント系材料である。短繊維には靱性の付与を目的とする、直径 0.2mm、長さ 15mm の鋼繊維を使用した。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は 6 体で、全て $200 \times 200\text{mm}$ の正方形断面、全高は 1000mm でせん断スパン比 2.5 とし

た。また実験因子は軸力比 0.3, 0.6, 横補強筋量レベル($P_w \cdot \sigma_y / \sigma_B$: 0.037~0.160), 鋼繊維の有無とした。横補強筋比は 2.29, 1.60, 0.53 の 3 種類で、0.53 のものは中子筋なし、また 1.60 のうち 03NF16 のみ繊維無混入とした。試験体一覧を表-1、試験体形状および配筋図を図-1 に示す。03FM05 はせん断破壊先行型、それ以外を曲げ破壊先行型として設計した。また付着信頼強度が付着応力度を上回るように設計した。

2.2 試験体の製作方法

RPC の材料は、セメント、石英質微粉末、桂砂などをあらかじめ混合したプレミックス粉体、高性能専用減水剤、鋼繊維であり、調合を表-2 に示す。本実験の試験体の軸鉄筋は全て D10-SD685 を 12 本配しており、横補強筋は外周筋には U7.1-USD1275 のスパイラル筋を、中子筋にはフック 135°、余長 8d のものを使用している。これらの鋼材の機械的性質を表-3 に示す。また試験体の製作手順を以下に示す。

- (1)試験体の鉄筋を配筋して型枠に設置する。
- (2)パン型ミキサーにプレミックス粉体、高性能減水剤、水を投入し練り混ぜ、その後鋼繊維を投入しさらに練り混ぜる。
- (3)型枠に打設する。
- (4)48 時間の湿潤養生をし、脱型後 90°C で 48 時

*1 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期 (正会員)

*2 広島大学大学院教授 工学研究科 工博 (正会員)

*3 ㈱竹中工務店技術研究所 建設技術開発部 主任研究員 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)

間の蒸気養生を行う。

2.4 加力方法

加力は建研式載荷装置を用い、軸力比 0.6 と 0.3 の一定軸力下で正負交番繰り返し水平力を載荷し、載荷履歴は±1, 2, 3.3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 50/1000rad.で2サイクルを原則とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊形式

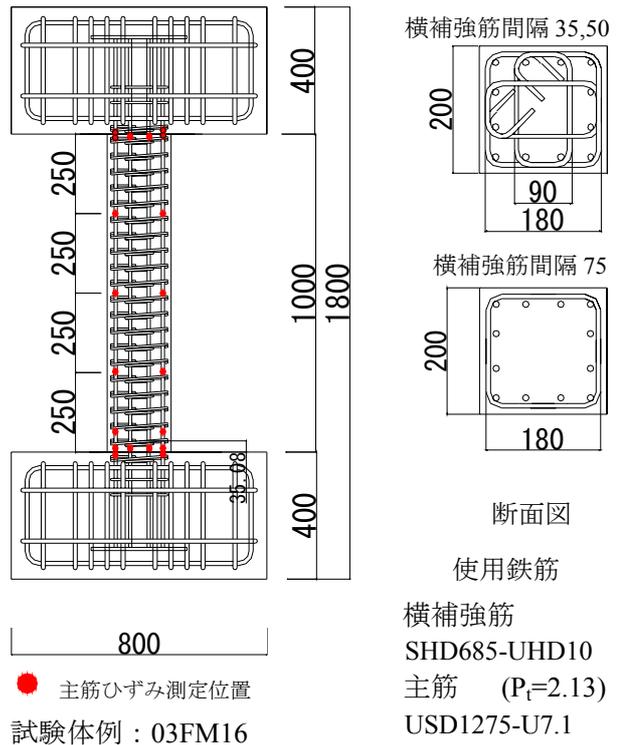
表-4 に試験体耐力一覧を、図-2 に水平力-変形角の履歴曲線および終局時の写真を示す。本実験における破壊形式は2つであった。1つは主筋曲げ圧縮降伏、コンクリート圧壊の後に主筋の座屈により破壊するタイプ (F-C-Bu)。もう1つは主筋曲げ圧縮降伏、コンクリート圧壊の後にせん断圧縮破壊するタイプであり、この時フープは破断した(F-C-S-W)。

3.2 破壊経過

F-C-Bu の破壊形式の 06FM16 は変形角 0.1% からコンクリートの圧壊、剥離が生じ、変形角 0.31% で主筋が圧縮降伏した。また変形角 0.75% で曲げひび割れが生じ、変形角 3.0% で主筋が座屈、耐力が著しく低下し破壊した。

F-C-S-W の破壊形式の 03FM05 は変形角 1.0% でコンクリートの圧壊、曲げひび割れが発生するとともに主筋が圧縮降伏した。さらに変形角

1.5% でせん断ひび割れが生じ、ひび割れが圧壊部分に達して、せん断圧縮破壊した。さらに変形を増大させると中央付近に大きな縦ひび割れを生じ、フープが破断した。繊維無混入の試験体 03NF16 は変形角 1.33% からかぶり部分が剥離を始め、最大耐力時にはほぼ鉄筋とコアコンクリートのみで軸力を支える状態になったが、変形角 5% まで急激な耐力低下はなく、押し抜きを行った。



試験体例：03FM16

図-1 試験体配筋図

表-1 試験体一覧

試験体	軸力比	横補強筋			曲げ耐力	せん断力	付着耐力		せん断余裕度	想定破壊形式
		横補強筋間隔	横補強筋比	横補強筋量レベル	曲げ終局時せん断力 ²⁾	信頼強度 ³⁾	応力度	信頼強度 ³⁾	V_u/cQ_{mu}	
	η	s (mm)	P_w (%)	$P_w \cdot \sigma_y / F_c$	cQ_{mu} (kN)	V_u (kN)	τ_f (N/mm ²)	τ_{bu} (N/mm ²)		
06FM23	0.6	35	2.29	0.160	244	431	5.21	11.66	1.77	F
06FM16		50	1.60	0.112	244	409	5.21	8.48	1.67	F
06FM05*		75	0.53	0.037	244	282	5.21	2.97	1.16	F
03NF16	0.3	50	1.60	0.112	351	409	5.21	8.48	1.16	F
03FM16		50	1.60	0.112	351	409	5.21	8.48	1.16	F
03FM05*		75	0.53	0.037	351	282	5.21	2.97	0.80	S

$F_c=200(N/mm^2)$ *: 中子筋なし FM: 鋼繊維混入 NF: 繊維無混入 S: せん断破壊先行型 F: 曲げ破壊先行型

表-3 鋼材の機械的性質

鉄筋種類	鉄筋径	降伏強度	降伏歪	引張強度	ヤング係数
	(mm)	σ_y (N/mm ²)	ϵ (μ)	σ_{max} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
USD1275	7.1	1400.4	9635.2	1472.1	183.7
USD1275	12.6	1345.0	9005.2	1481.0	193.4
SHD685	10.0	745.5	4587.9	935.2	182.3

表-2 RPC 調合表 (kg/m³)

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

4.1 荷重-変形関係の包絡線の比較

図-3 の包絡線は、水平力を最大水平耐力で除した値 P/P_{max} と変形角 R の関係を示すものである。この図より軸力比 0.6 において横補強筋量レ

ベルの差によって限界変形角と耐力低下に大きな相違があることが分かる。横補強筋量が最も少ない 06FM05 は最大耐力に達した後、急激に耐力が低下したのに対し、横補強筋量を増すに

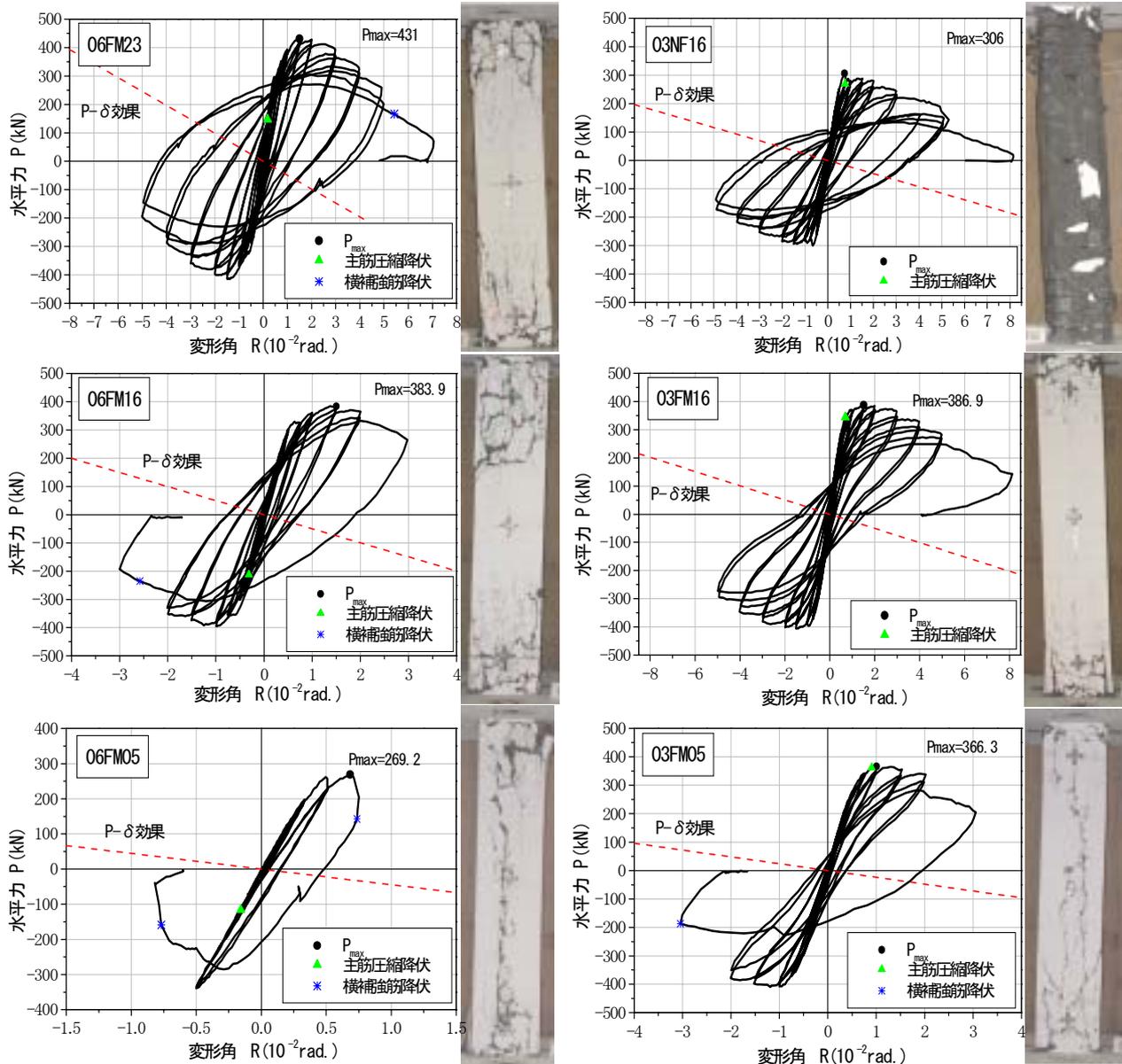


図-2 履歴曲線図と破壊状況

表-4 試験体耐力一覧

試験体	RPC 材料特性		曲げ耐力	せん断耐力	付着耐力		せん断余裕度	実験値			
	圧縮強度	ヤング係数	M-N 相関曲線	信頼強度	応力度	信頼強度	V_u/Q_{M-N}	最大水平荷重	P_{max}/Q_{M-N}	限界変形角	破壊形式
	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	Q_{M-N} (kN)	V_u (kN)	τ_f (N/mm ²)	τ_{bu} (N/mm ²)		P_{max} (kN)		R_u (%)	
06FM23	217.9	54.4	224	422	5.21	11.69	1.88	431	1.92	3.69	F-C-Bu
06FM16	229.6	56.8	224	399	5.21	8.51	1.78	384	1.71	2.57	F-C-Bu
06FM05*	213.8	55.1	224	276	5.21	3.01	1.23	269	1.20	0.68	F-C-Bu
03NF16	199.0	52.1	328	409	5.21	8.48	1.25	306	0.93	3.00	F-C-Bu
03FM16	207.0	54.3	328	399	5.21	8.51	1.22	387	1.18	4.38	F-C-Bu
03FM05*	202.3	53.6	328	276	5.21	3.01	0.84	366	1.12	2.35	F-C-S-W

* : 中子筋なし試験体, FM: 鋼繊維混入, NF: 鋼繊維無混入, F: 曲げ圧縮降伏, C: 圧壊, S: せん断破壊, Bu: 主筋座屈, W: 帯筋破断

したがって耐力の低下は緩やかになり、水平荷重-変形関係より描いた包絡線上において、最大耐力の80%まで耐力が低下した時の変形と定義した限界変形角 R_u は 0.68, 2.57, 3.69%と増大している。ここで図-3の包絡線は、最大耐力点を明らかにすることを意図し、P- δ 効果を補正していない。¹¹⁾

図-4の包絡線は繊維の影響を示している。繊維の有無のみが異なる2体とも、最大耐力までの耐力上昇の程度は同様であり、最大耐力後の耐力低下の程度も同様であるが、鋼繊維混入によって耐力、限界変形角ともに増大している

4.2 変形性能

各試験体の変形性能を限界変形角 R_u を用いて評価する。図-5.6は各試験体の横補強筋量レベルと限界変形角との関係を示し、既往の実験値⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ ($F_c=60-150\text{N/mm}^2$, 鋼繊維 0-3.0%混入)及び鋼繊維を考慮した既往実験による R_u の下限値、平均値を示す提案式⁸⁾と本実験値との比較を行った。

図-5.6より全ての実験値が下限値を上回っていることが分かる。同一軸力比においては横補強筋量レベルの増加に伴って R_u が線形的に増加する傾向が見られ、その増分は平均値を示す既往式より大きくなる傾向が見られた。

図-5における既往の実験値⁴⁾より、繊維を混入する事によって R_u が 1.7~1.8倍に増加しており、本実験の 03FM16 と 03NF16 を比較すると、 R_u が約 1.5倍増加している事から鋼繊維を混入する事により変形能力が向上する事が分かった。

4.3 最大耐力と破壊形式

最大耐力実験値と曲げ耐力計算値との比が横補強筋量と共に増大することを、筆者らが昨年行ったRPC柱の中心圧縮試験結果に基づいて考察する。横補強筋の拘束効果により柱の中心圧縮強度は横補強筋量に伴って下式(1)のように増大する。

$$f_{cc}/f_c'' = 0.922(P_w \cdot w \sigma_y / f_c'')^{1/2} + 1 \quad (1)^9$$

f_{cc} : コンファインドコンクリートの最大応力度

f_c'' : 無拘束コンクリートの最大応力度

$P_w \cdot w \sigma_y / f_c''$: 横補強筋量レベル

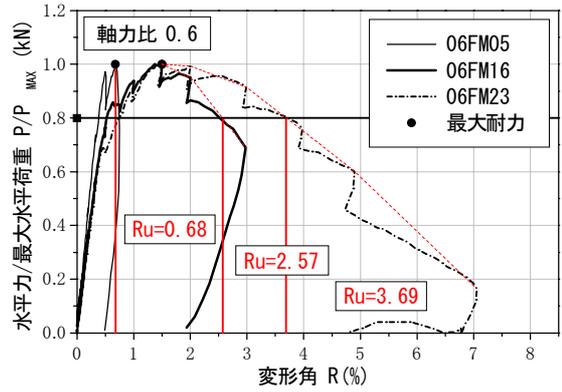


図-3 横補強筋レベルによる変形能力比較

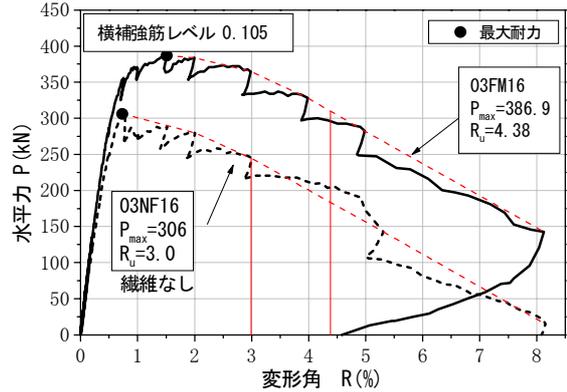


図-4 繊維の有無による耐力、変形能力比較

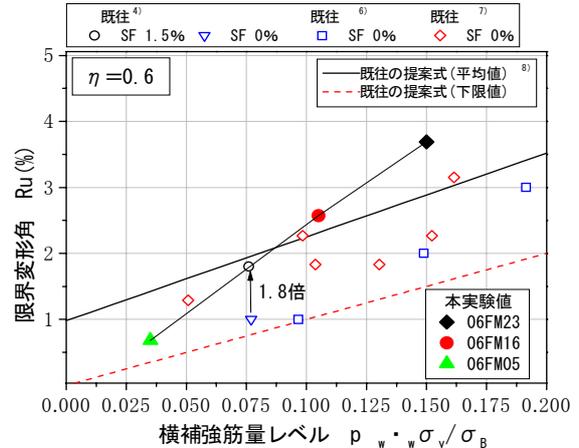


図-5 横補強筋量レベルによる変形能力比較

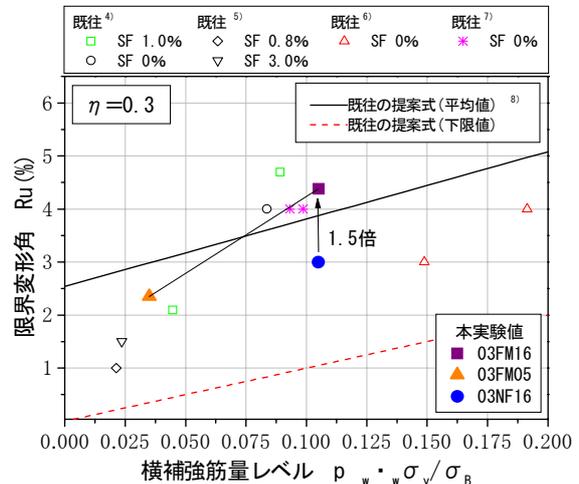


図-6 繊維及び横補強筋量レベルによる変形能力比較

図-7 に最大耐力実験値と強度増分を考慮して計算した曲げ耐力との比 (P_{max}/Q_{M-N}) と、横補強筋量レベルとの関係を示す。軸力比 0.6, ではコアコンクリートの強度増分を考慮すると 1.0 に近い値を示すことから、横補強筋量の増加に伴う最大耐力の上昇は、拘束効果によるものと考えられ、強度の増分は (1) 式で評価できる事が分かった。軸力比 0.3 では計算値との比が横補強筋量によらずほぼ 1.0 であることから、軸力が低い領域では横補強による拘束効果が小さかったと推定される。

4.4 等価粘性減衰定数 (h_{eq})

荷重-変形関係における 2 回目の繰り返しループから求まる等価粘性減衰定数 (h_{eq}) と軸横補強筋量との関係を図-8 に示す。

同一変形時の h_{eq} を比較すると、繊維混入で軸力の低い 03FM16, 繊維無混入の 03NF16, 軸力の高い 06FM16 の順で大きくなる。軸力やコンクリートの圧壊に伴って圧縮鉄筋に生じる歪が大きいかほど h_{eq} が大きかったと推定される。

繊維の有無を比較した 03FM16, 03NF16 における主筋の歪と h_{eq} との関係を見るため、同一変形における履歴ループと柱脚部の主筋の歪を比較して、図-9, 図-10 に示す。図-9 に示すように、鋼繊維を有する方が逆 S 型のループ形状を示して残留変形が小さくループ面積が小さい。また図-10 から鋼繊維を有する 03FM16 は、繊維のない 03NF16 に比べ、軸力載荷時の歪は 1/2 程度であり、変形角 3.3% 時においても主筋の歪が小さいことが分かる。このことから、鋼繊維を有する 03FM16 は主筋の残留歪も小さい事が推測され、これは鋼繊維も圧縮力を負担することにより、主筋の負担が繊維無混入の場合より小さかったためと考えられる。

4.5 M-N 相関曲線

RPC 及び鉄筋の素材試験結果を考慮して計算した M-N 相関曲線に基づいて、実験の最大耐力を計算値と比較する。

図-11 に示すとおり、鋼繊維混入試験体の実験値はすべて計算値を上回っており、横補強筋量

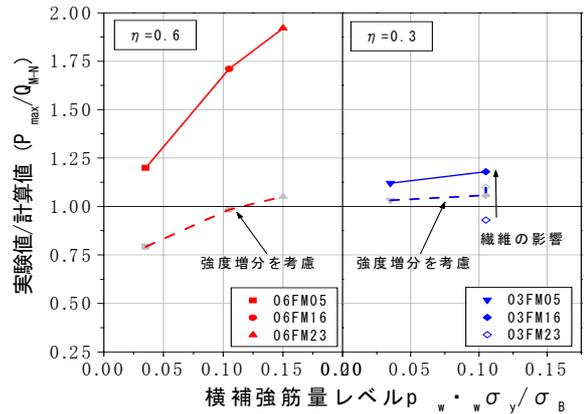


図-7 横補強筋の拘束効果による強度増分

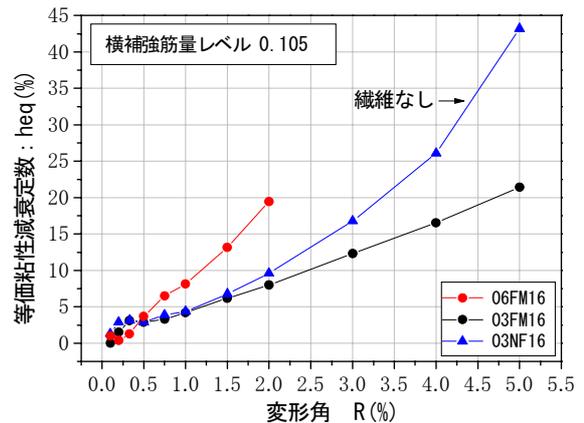


図-8 鋼繊維, 及び軸力比による h_{eq} 比較

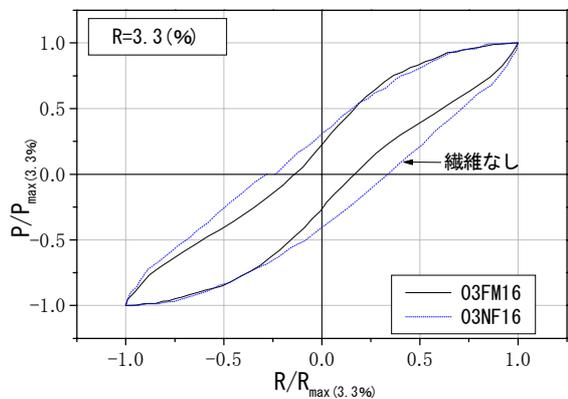


図-9 R=3.3(%) 時の $P/P_{max(3\%)} - R/R_{max(3\%)}$ 関係

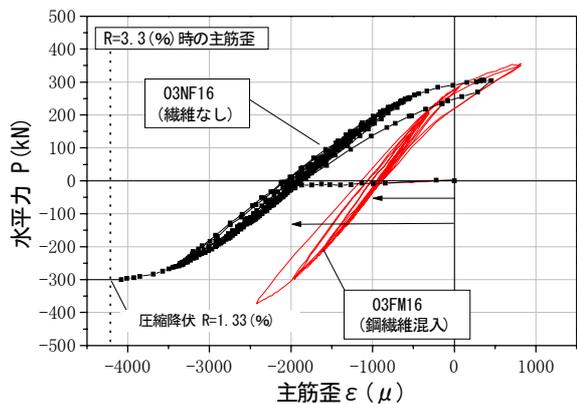


図-10 繊維の効果による残留歪みの検計

が多いほど計算値との比が大きかった。最大耐力に達するまでにカバーコンクリートの多くが剥落した繊維無混入の試験体 03NF16 では、コアコンクリートについて計算した曲げ強度を大きく上回った。これらの結果から、すべての試験体が曲げ強度を発揮したと考えられ、実験結果と対応している。

表-4 において、横補強筋量の少ない 03FM05 ではせん断強度計算値が曲げ強度計算値より低い、実験ではせん断破壊が先行していないことから、実際のせん断耐力は繊維の混入により同表の計算値よりも高かったと推定される。また、鋼繊維無混入の試験体は最大耐力時にはカバーコンクリートの激しい剥落がみられたため、剥離後の断面による M-N 曲線を図中の点線の曲線で示した。これにより、繊維無混入の試験体も計算値を上回ることが確認できた。

5. まとめ

200N/mm²級 RPC を用い、軸力、横補強筋量レベルを変えた柱の水平力下における復元力特性試験により以下の知見を得た。

(1) 破壊形式と最大耐力

横補強筋量レベルが最も低く、曲げ圧縮降伏、コンクリート圧壊後にせん断圧縮破壊をした 03FM05 を除き、いずれの試験体も曲げ圧縮降伏、コンクリート圧壊後に最大耐力に至り、主筋が座屈して破壊した。最大耐力は曲げ終局強度計算値を上回ったが、これは横補強筋の拘束によりコアコンクリートの強度が増大したことに起因すると考えられる。

(2) 復元力特性と変形性能

軸力比が高く横補強筋量レベルが最も低い 06FM05 を除き、曲げ破壊をした試験体は安定した履歴ループを描き、軸力比 0.3 では 3.0~4.4/100rad、軸力比 0.6 では 2.6~3.7/100rad の限界変形を示した。限界変形は横補強筋量に伴って直線的に増大した。

(3) 鋼繊維の影響

軸力比 0.3 では、鋼繊維の混入により曲げ耐力、限界変形共に顕著に増大した。横補強筋量が最

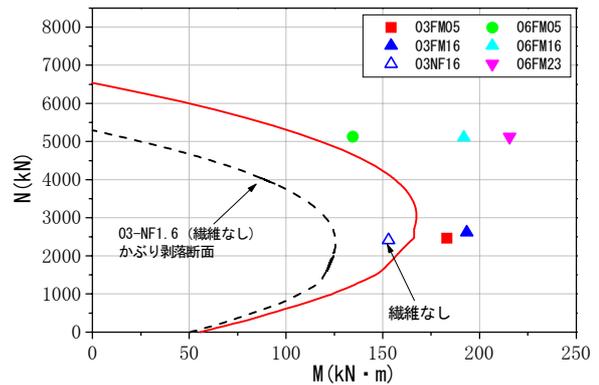


図-11 M-N 相関関係

も少ない 03FM05 では、せん断強度計算値が曲げ強度計算値を下回っているが、実験ではせん断破壊が先行しなかったことから、鋼繊維の混入により実際のせん断強度は計算値よりも高かったと考えられる。

謝辞

本研究の実施に当たり、横補強筋をご提供いただいた高周波熱錬(株)にここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 北風野歩ほか：超々高強度コンクリートを用いた柱の圧縮特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，pp.847~852, Vol.25, No.2, 2003,
- 2) 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 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の現況について, コンクリート工学, p2~17, Vol.13, No.1, Jan. 1975
- 3) 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, p142, 175~177, 293
- 4) 高津比呂人ほか：鋼繊維を混入した超高強度コンクリート柱部材に関する実験的研究，竹中技術研究報告，No58, 2002
- 5) 木村秀樹ほか：スチールファイバー混入超高強度コンクリートを用いた RC 柱の曲げせん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.205-206, 2000, 9
- 6) 木村秀樹ほか：高軸力下における超高強度コンクリートを用いた RC 柱の力学的性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.2, pp.871-876, 1994,
- 7) 菅野俊介ほか：高強度横補強筋を用いた高強度コンクリート柱及び梁の実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.1 10-3 1988
- 8) 木村秀樹：鉄筋コンクリート柱部材の変形能力に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.419-420, 1994.9
- 9) 小幡一博：超々高強度コンクリートを用いた RC 柱の中心圧縮性状に関する実験的研究，修士論文，2002
- 10) 白井一義他：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報告集，pp.841~846, Vol.25, No.2, 2003
- 11) 石川祐次：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，2003