論文 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

北風野歩*1 菅野俊介*2 木村秀樹*3 片桐誠*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 (Reactive Powder Concrete 又は Composite:反応性粉体コンクリート)を用い, 高強度横補強筋や鋼管で補強した柱の中心圧縮実験の結果を報告する。実験により圧縮強度 が120~200N/mm²の超々高強度コンクリートに鋼繊維を混入し,700~1400N/mm²級の高強度 横補強筋を密に配筋することにより最大耐力時の爆裂的破壊を防止し,それ以降の変形性能 を確保出来ることが分った。また,横補強筋のコンファインド効果によるコアコンクリート の圧縮強度の増大が認められた。

キーワード:超々高強度コンクリート,RPC,蒸気養生,鋼繊維,圧縮特性

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 120~ 200N/mm²級の超々高強度コンクリート*の建物 構造体への適用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 (Reactive Powder Concrete 又は Composite:反応性粉体コンクリート)に着目し、その利 用を図る。RPC は粗骨材を使用せずセメント, 珪石質微粉末,細骨材及び短繊維を使用した複 合材料で、粉体の最密充填による低水結合材比 及び高温養生により 800N/mm²までの圧縮強度 が可能とされている。短繊維は靭性の付与を目 的とするもので、本研究では直径 0.2mm 長さ 15mmの鋼繊維を使用した。

本報は200N/mm²級の RPC を高強度横補強筋 や鋼管で補強した柱の中心圧縮試験の結果に基 づき, RPC の圧縮特性についてまとめたもので ある。

*) 本研究では40~80N/mm²までを高触度コンクリート、 80~120N/mm²までを超高強度コンクリート、 120N/mm²以上を超々高触度コンクリートと定義する。

2. 実験方法

2.1 試験体

200N/mm²級の RPC の適切な補強方法を検討 するために、高強度横補強筋を施工上の限界ま で配筋した RC 柱 9 体と、より高い横補強効果 を期待した CFT 柱を 4 体作製し、中心圧縮試験 を実施した。試験体は全て 200×200mm の正方 形断面、全高は 570mm とする。実験因子は RC 試験体ではコンクリート強度(120, 160, 200N/ mm²)、横補強筋量レベル P_w·w σ_y / σ_B ,鋼繊維 の有無とし、CFT 試験体では横補強筋量レベル 及び鋼繊維の有無とした。RC 試験体の上下端 部は試験体部分より密な配筋として補強した。 また CFT 試験体には、厚さ 12mm、9mm の 2 種類の鋼管を使用した。RC 及び CFT の試験体 一覧を表-1、表-2 に、試験体形状及び配筋図を 図-1、図-2 に示す。

2.2 RPC の製造方法

試験体混入材料は、プレミックス粉体(セメントを基材とし、珪砂、反応性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、および鋼繊維であり調合表を表-3に示す。また試験体作製にあたってその混練順序は以下の1)

- *1 広島大学大学院生 工学研究科 (正会員)
- *2 広島大学大学院教授 工学研究科 工博 (正会員)
- *3 (株)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 主任研究員 工博 (正会員)

	F	横補強筋				最大耐力時		累加強度式				
試験体名	圧縮強度 σ _B (N/mm²)	ヤング係数 E _{1/3} (×10 ⁴) (N/mm ²)	<mark>公称径</mark> (mm)	ピッチ (mm)	帯筋比 Pw	$_{w}\sigma_{y}$ (N/mm ²)	$P_w \cdot_w \sigma_y$ (N/mm ²)	P _w • _w σ _y ∕ σ _Β	荷重Pmax (kN)	軸歪度 (%)	Pmax1 ⁴⁾ (kN)	Pmax∕ Pmax1
*200FM2-35				35	0.023		32.20	0.145	8839	1.64	5719	1.55
*200FM2-45	222.2	5.44	7.1	45	0.018	1408.8	25.04	0.113	8360	0.97	5719	1.46
*200FM2-55				55	0.015		20.49	0.092	8057	0.75	5719	1.41
*160FM2-35	180.6	5 37		35	0.018		12.80	0.071	6485	0.49	5520	1.17
*160FM2-45	180.0	5.57	6	45	0.014	700.0	9.96	0.055	6628	0.50	5520	1.20
*120FM2-35	159.5	158.5 5.29	0	35	0.018	700.0	12.80	0.081	5938	0.32	4928	1.20
*120FM2-45	136.5			45	0.014		9.96	0.063	6062	0.52	4928	1.23
200NF-35	212.6	212.6 5.31	7 1	35	0.023	1/08 8	32.20	0.151	6949	1.29	5502	1.26
200NF-45	212.0	5.51	/.1	45	0.018	1400.0	25.04	0.118	6527	1.28	5502	1.19

表-1 RC 試験体及び最大耐力一覧

*FM2:鋼繊維 2%混入 NF:繊維無混入 全主筋比 Pg(%): 2.13 主筋 SD685

表-2 CFT 試験体及び最大耐力一覧

試驗休夕	RPC圧縮強度	鋼管厚さ (mm)	幅厚比	横補強筋量レベル 最大耐力時		力時	累加強度式	Pmax/
これまでも	$\sigma_{\rm B}({\rm N/mm}^2)$		D/t	$(P_w \cdot \sigma_y) / \sigma_B$	荷重Pmax(kN)	軸歪度(%)	$Pmax2^{2)}(kN)$	Pmax2
*490CFTFM-12	222.2	12	16.67	0.200	10374	0.77	8651	1.20
*490CFTFM-9		9	22.22	0.146	9289	0.62	8398	1.11
490CFTNF-12	212.6	12	16.67	0.209	10107	0.69	8410	1.20
490CFTNF-9		9	22.22	0.153	8370	0.57	8140	1.03

* FM2: 鋼繊維 2% 混入

表-3	調合表(kg/m ³)
-----	-----------------------	---

繊維種類	水	減水剤 (固形分)	プレミックス 粉体	繊維
鋼繊維混入	173	7	2207	157
繊維無混入	175	/	2291	-

衣⁻4 食土米什							
試験体名	設計強度(N/mm ²)	時間 (h)	温度 (℃)				
200FM2	200	48	90				
160FM2	160	24	60				
120FM2	120	6	60				
200NF	200	48	90				

~8)の順で実施した。1)強制パン型ミキサーに プレミックス粉体,高性能減水剤,水を投入し 15 分間練り混ぜ、2)フロー試験、3)繊維を投入 し3分間練り混ぜ、4)型枠へ打設、5)48時間の 水中養生, 6)型枠の脱型, 7)所定の条件下での 蒸気養生(表-4),8)試験体上下面ともに平面度, 平行度を確保する為研磨。

2.3 使用鋼材

RC 試験体の軸鉄筋には全て D10-SD685 を 12 本配しており、横補強筋は USD1275 と SHD685 の2種類を用いた。200FM2及び200NFシリー ズは外周筋が USD1275 のスパイラル筋と 135° フックで余長 8d の中子筋を使用した。また 160FM2, 120FM2 シリーズは,上下端部は US

表-5 鋼材の機械的性質

	降伏歪	降伏強度	引張強度	ヤング係数
種類	ε _γ (μ)	σ_y (N/mm ²)	$\sigma_u^{}$ (N/mm ²)	E_{s} (\times 10 ⁵ N/mm ²)
STKR490 t9	2457	462	519	1.88
STKR490 t12	2713	475	523	1.75
SHD685 D6	4107	700	954	1.71
SHD685 D10	4125	807	959	1.96
USD1275 U7.1	7484	1409	1454	1.88



D1275 の一筆書き囲型タイプ(135°フック余長 8d)を用い試験体中央部は SHD685 の溶接閉鎖 型フープ使用している。CFT 試験体には SM490 を使用した。表-5に鋼材の機械的性質を示す。

2.4 加力及び測定方法

加力は 20MN 級試験機を用いて行った。載荷 方法は荷重制御とし,最大耐力後はフィードバ ック信号を読み取ることによる変位制御とした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-3に全試験体の荷重-軸歪度関係を示す。 破壊は200FM2-45を除く全てのRC 試験体にお いて,1)軸筋の降伏,2)カバーコンクリートの 剥落,3)横補強筋の降伏開始,4)最大耐力,の 順に進行し最終破壊に至っており、200FM2-45 は3)4)が逆になっている。表-6に各試験体の主 筋及び横補強筋の降伏開始時歪を示す。

写真-1にRC及びCFT 試験体の破壊状況を示 す。FM シリーズ(繊維混入)はコンクリート強度 が高くなるほど終局時の破壊が激しかった。ま た繊維無混入試験体は繊維混入試験体に比べて カバーコンクリートの剥落が激しかった。図-4 から, CFT 試験体は端部で局部座屈が起きて最 大耐力に到達した。その後、最大耐力の60%か ら80%程度まで耐力低下した後、急激な耐力低 下を起こさずに歪が進展した。

3.2 応力度-歪度関係

図-5にRC試験体の応力度-軸歪関係をシリ ーズごとにテストピースと比較したものを示す。 応力度は RC 試験体の全断面の圧縮応力から鉄 筋の応力を引き、コア断面で除して算出した。





(繊維無混入)

写真-1 破壊状況



載荷初期の段階から主筋に沿った縦ひび割れを 確認した事から、最大耐力時にかぶり部分は非 応力負担部分とした。RC 柱はいずれもテスト ピースより高い強度を示したが,CFT 柱はテス トピースより低い強度であった。これは内部の コンクリートが圧縮強度に至る前に鋼管が局部 座屈を起こした事が原因と考えられる。

図-6にRC及びCFT試験体の最大耐力時の実 験値と計算値の比較を行う。200N/mm²級のRC 試験体では累加強度(Pmax1⁴⁾⁶⁾)に対し,実験値は 繊維混入時で41%~55%増,繊維無混入時では 120 19%~26%増となり鋼繊維による増分がみられ 100 た。また,120FM2,160FM2シリーズ共に17% 20 ~23%増であった。CFT 試験体では累加強度 20 (Pmax2²)に対し,繊維混入時に10%~20%増,繊維無混入時では3%~20%増となり,繊維の有 無に関わらず全試験体,累加強度を上回った。 CFT 試験体では全断面を有効とした際に荷重増 分がみられた。ここで,式(1)(2)中の記号は cgs 単位とする。

 $P \max 1 = 0.85 \cdot {}_{c}\sigma_{B}(A_{g} - a_{g}) + a_{g} \cdot \sigma_{y}$ (1) ${}_{c}\sigma_{B} : \neg \neg \neg \neg \neg \vdash E 縮強度 (kg/cm²), \sigma_{y} : 鉄筋降伏強$ $度 (kg/cm²), A_{g} : \neg \neg 断面積 (cm²) a_{g} : 主筋断面積 (cm²)$

$$P \max 2 = A \cdot F + A \cdot F_{\mu} \cdot F_{\mu}$$

 $F: 基準値 (3.3t/cm²) F_c: コンクリートシリンダー$ $圧縮強度 <math>(kg/cm²)_s A:$ 鋼管断面積 $(cm²)_c A: コンクリ$ ート断面積 $(cm²)_c r_u: コンクリート低減係数 (0.85)$

表-6 主筋·横補強筋降伏開始時歪

\square	最大応力度 (N/mm ²)	最大耐力 時軸歪(%)	主筋降伏 時歪(%)	横補強筋降 伏開始時歪 ^(%)
200FM2-35	306.0	1.64	0.32	1.28
200FM2-45	288.0	0.97	0.34	1.11
200FM2-55	276.7	0.75	0.32	0.52
160FM2-35	211.8	0.49	0.27	0.49
160FM2-45	217.0	0.50	0.31	0.40
120FM2-35	191.8	0.38	0.31	0.33
120FM2-45	196.4	0.53	0.33	0.37
200NF-35	235.1	1.29	0.31	0.80
200NF-45	219.2	1.28	0.33	0.84



4. 考察

4.1 最大耐力

図-5より最大応力度に関して RC 試験体はどの シリーズもテストピースの最大応力度を上回っ た。しかしながら 200N/mm² 級でも NF シリー ズ(繊維無混入)は, FM シリーズ(鋼繊維混入)に 比べて 50N/mm²程度最大応力度が低い。この違

(2)

いは繊維の有無に起因すると考えられる。

図-7 にテストピースに対する RC 試験体の強 度増分(Δσ/σ_B) - 横補強筋量レベル(P_w・_wσ_v/ σ_B)を示す。 グラフから FM シリーズ (鋼繊維混 入)に関しては、横補強筋量レベルが 0.055 から 0.145 の範囲内での強度増分はテストピースの 強度に対しておよそ 0.2 から 0.4 であり、横補 強筋量レベルの増加に伴い線形的に増加してい る。さらに NF シリーズ(繊維無混入)に比べ FM シリーズ(鋼繊維混入)の方が大きな値を示して おり、繊維を混入する事によって、より大きな 強度増分が得られた。また,繊維を混入した 120FM2 と 160FM2 シリーズは、横補強筋間隔 が35mmのものよりも45mmの方が若干大きな 強度増分がみられた。これは実験によるばらつ きと考えられる。

図-7 に既往の応力度-盃度関係の評価式よ り得られた横補強筋量レベルに対する強度増 分の関係を示す。横補強筋の拘束効果に関する 既往の評価式の中から,今回の実験に近い強度 のコンクリートに関する長嶋らの評価式 5)と今 回の実験値よりはるかに低い強度のコンクリ ートに対する Park の評価式³⁾をとりあげて今回 の実験結果と比較する。



160FM2-45 200FM2-45 + ∇ 200NF-35 Á 200NF-45 200FM2-55 120FM2-35 ۲ 0.7 Parkによる評価式³⁾ 0.6 (48N/mm²級コンクリート) ა^ო0.5 海陵増分⊿の/ 0.3 0.2 長嶋らによる評価式 \diamond (120N/mm²級コンクリート) ж 繊維無混入 試験体 0.1 Y 0.0 0.08 0.12 0.16 0.20 横補強筋量レベル P_w·_wσ_v/σ_B 強度増分ー横補強筋量レベル関係 図-7 ₩ 160FM2-35 + 160FM2-45 ♦ 120FM2-45 200NF-35 200NF-45 200FM2-35 繊維混入CFT 200FM2-45 繊維無混入CFT 200FM2-55 ٠ 120FM2-35 ▲ テストピース 2.5 :既往の実験結果^{1) 4)} (1991, 2000JCI) ි 2.0 ω 最大型力時軸沿 E 1.5 1.0 0.5 • Λ 0.24

200FM2-35

¥ 160FM2-35

120FM2-45

 \diamond

繊維混入試験体の実験値を大きく上回る強度増 分を示している。このことは,使用するコン クリート強度が低いと鋼材補強による強度増分 の割合を多く見込む傾向にあることを表してい る。一方,長嶋らによる評価式は,繊維を混入 した試験体の実験値より強度増分を低く評価し ているが,200NFシリーズと良好な対応が見ら れた。このことはコンクリート強度が高いと繊 維を混入していない NF に関しては長嶋らによ る提案式で評価できることが分かった。

4.2 最大耐力時歪

高強度横補強筋で補強した RC 試験体の圧縮 靭性を,最大耐力時歪の観点から評価する。図 -8 に横補強筋量レベル - 最大耐力時歪関係を 示す。横補強筋量レベルの増加に伴い最大耐力 時軸歪は増加する傾向にあり,横補強筋量レベ ルが 0.08 以上であればどの試験体もテストピ ースより最大耐力時歪が大きくなった。また既 往の研究 ¹⁾⁴⁾に比べ同横補強筋量レベルにおい て軸歪が大きな値を示していた。

4.3 応力度-軸歪度関係

実験より得られた各シリーズの応力度 - 軸歪 度関係と, 既往の応力度-軸歪度曲線の比較を図 -9 に示す。比較は Park モデル³⁾ と長嶋らによ る評価式⁵⁾である。

長嶋らによる評価式と比較すると,上昇域の 初期剛性,下降域の耐力低下ともに良好な対応 はみられなかった。最大耐力,最大耐力時歪に ついては繊維無混入試験体との適合性が見られ たが,繊維混入試験体においては実験値が評価 式の値を上回る傾向がみられた。これは繊維に よる強度増分が原因であると考えられる。

park モデルと比較すると、下降域で実験値を 大きく上回る耐力保持を示したため、上昇域と 共に実験値との適合はみられなかった。

5. まとめ

今回の実験より 200N/mm²級の超々高強度コ ンクリートを用いた柱においては, 鋼繊維を混 入し, 高強度横補強筋を密に配筋することによ って最大耐力時の爆裂的破壊を防止し,最大耐 力以降の変形性能を確保できることがわかった。 以下に得られた知見をまとめる。

1) 圧縮強度

高強度横補強筋の拘束効果により、コアコン クリートの圧縮強度は増大し、鋼繊維を混入す る事によって、より大きな強度増分がみられた。 一方、CFT 柱ではコア部分の強度増分はみられ なかったが、柱部材として強度増分がみられた。 2) 最大耐力時歪

横補強筋量の増加に伴い柱の最大耐力時歪は 増大した。CFT 柱では,最大耐力時の歪は RC 柱に比べて小さかったが最大耐力以降急激な耐 力低下を起こさず安定した耐力保持がみられた。

3) 圧縮応力度-歪度関係

繊維を混入した 120N/mm² から 200N/mm² 級 の RPC 柱は、コンクリート強度が 120N/mm²で 繊維無混入の長嶋らの評価式と、コンクリート 強度がはるかに低い Park 式との中間に位置し ていることが分かった。

謝辞

本研究の実施にあたって太平洋セメント(株)の 下山善秀氏,上田宣人氏,白井一義氏,また横補強 筋を提供してくださった高周波熱錬株式会社,小幡 一博氏(現,西松建設株式会社)をはじめとする広島大 学大学院耐震工学研究室の皆様,ここに記して謝意 を表します。

参考文献

- 1) 木村秀樹ほか: 短繊維混入超高強度コンクリート 柱の基本的力学性状に関する研究, コンクリート 工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.379-384, 2000
- 日本建築学会:コンクリート充填鋼管構造設計施 工指針,pp.35,1997
- J.B.Monder, et.al. :Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug.1988
- 4)市川敦史ほか:超高強度コンクリート柱の中心圧 縮性状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.403-408 13-2, 1991
- 5)T.Nagashima, et.al. : Monotonic axial compression test on ultra-high-strength concrete tied columns, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.5, pp.2983-2988, Sep.1992
- 6)板倉康久ほか:高強度鉄筋コンクリート造柱の中 心圧縮性状に関する研究,日本建築学会大会学術 講演梗概集(中国), pp.839-840, 1990.10