論文 鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能に関する FEM 解析

高橋 響子*1·柏崎 隆志*2·野口 博*3·高津 比呂人*4

要旨:鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部材を対象として,鋼繊維混入量・横補強筋比等をパ ラメータとした3次元 FEM 解析を行った。実験ではコンクリートに鋼繊維を混入することで,曲げ耐力の向 上や変形性能の向上,ひび割れの分散性が確認されている。本解析では,鋼繊維混入試験体におけるコンク リート引張応力-ひずみ関係の引張強度以降に引張応力低下が緩やかなモデルを用いることで,鋼繊維混入 コンクリートの曲げ耐力上昇や変形性能改善等の力学的挙動を確認した。 キーワード:柱,超高強度コンクリート,鋼繊維,曲げせん断,3次元 FEM 解析

1. はじめに

近年,超高層建物にも鉄筋コンクリート(以下, RC) 造が用いられるようになり,大きな軸力が作用する下層 階には,圧縮強度が100N/mm²を超える超高強度コンク リートが使用されている。しかし,コンクリート強度が 高くなるにつれ,圧縮時の力学性状は脆性的になり,設 計クライテリアを満足するような変形性能を確保する ためには,多大な横補強筋量が必要となる場合がある。

横補強筋量を低減するため,鋼繊維(以下, SF)を混 入した超高強度コンクリート部材の開発が進められて おり, SF 混入による強度上昇や靭性の向上,ひび割れ抑 制の効果などが確認されているが,そのメカニズムは明 確には解明されていない。

吉澤,野口ら¹⁾,関口,野口ら²⁾は,鋼繊維を混入し た超高強度鉄筋コンクリートを対象として3次元 FEM 解析を行い,コンクリート引張応力--ひずみ関係におけ る引張強度以降の引張応力低下を緩やかに設定するこ とにより,鋼繊維混入による曲げ耐力の上昇,ひび割れ 抑制効果等を再現した。本研究では,解析モデルの再検 討及び SF 混入量と横補強筋量に着目したパラメータ解 析を行い,解析結果から SF 混入超高強度コンクリート の耐力上昇機構について検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は,木村,高津ら³により実験が行われた超高強度 SFRC 柱試験体と,これをもとに SF 混入 量,横補強筋比,横補強筋間隔をパラメータとした仮想 試験体の計 16 体である。

実験の載荷装置を図-1 に、試験体形状を図-2 に、

材料特性を表-1 に, 試験体名称と変動因子を表-2 に 示す。

共通因子は、コンクリート設計基準強度 $Fc=150N/mm^2$ 、 柱断面 $b \times D=250mm \times 250mm$ 、柱内法高さ h=1000mm、 柱主筋比 $p_g=2.44\%$ (高強度鉄筋 USD685, 12-D13)、軸 力比 $\eta_0=0.3$ である。変動因子は、SF 混入量が 0%, 0.5%、 1.0%、1.5%の4水準、横補強比が $p_w=0.51\%$ 、1.02%の2 水準、横補強筋間隔が s=35mm、70mm の2水準である。



*1 日本放送協会 (前千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース) 工修 (正会員)
*2 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 助教 工修 (正会員)
*3 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 教授 工博 (正会員)
*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 研究員 工修 (正会員)



2.2 解析モデル

本研究では、余・野口ら⁴により開発され、洪⁵によ り改良された 3 次元 FEM 解析プログラムを用いた。コ ンクリートには 8 節点ソリッド要素、鉄筋には 2 節点線 材要素、コンクリートの破壊条件には Willam-Warnke の 5 パラメータモデルを用いた。図-3 に示すように、コ ンクリートの圧縮上昇曲線は Fafitis – Shah 式、圧縮軟化 域は直線とし、収斂点は木村モデル⁶によって算出した。 ひび割れモデルは固定ひび割れモデル、ひび割れ発生以 降の圧縮強度低減には野口・飯塚式、ひび割れ方向のせ ん断伝達特性には Al-Mahaidi モデルを用いた。鉄筋の応 カーひずみ関係は修正 Menegotto-Pinto モデルとした。上 記モデルの詳細および関連文献は、文献 1)、文献 2)を参 照されたい。鉄筋とコンクリート間の付着特性は超高強 度コンクリートの鉄筋引抜き実験結果⁷から導いた(図 -4)。

図-5 に本研究で用いたコンクリート引張応力-ひず み関係を示す。SF 混入によるコンクリート引張強度・曲 げ引張靭性の向上を考慮するために、SF を混入していな い試験体には引張強度以降は徐々に応力が低下する白 井式を、SF を混入した試験体には白井式よりも緩やかに 応力が低下していくモデル(森田・角モデルのパラメータ cを変動させたモデル)を用いた。パラメータ cの値は、 筆者らが行った SF 混入コンクリートの引張基礎実験を もとに、小林・睦好ら⁸⁾による推定法を用いて、SF0.5% 混入では c =0.23、SF1.0%混入では c =0.14、SF1.5%混入 では c =0.01 と設定した。なお、コンクリート・鉄筋の 応力-ひずみ関係、付着応力-すべり関係の除荷再載荷 時のモデル化については、文献 9)を参照されたい。

要素分割および境界条件を図-6 に示す。要素分割は 試験体の対称性からY方向を1/2 にし、切断面をY方向 面ローラー支持とした。境界条件は実験での載荷方法を 模して、軸力を与える際は下スタブ底面を XYZ 方向拘 束、せん断力を与える際は上下のスタブの水平を保ち、 柱の中央高さ位置が反曲点となるように設定し、下スタ ブ底面に変位制御で正負繰返し載荷した。



-1 実験試験体の材料特性

衣 · 天秋四秋年6月								
(a)試験体概要, コンクリート	試験体 名称	SF混入量 ^[%]	横補強節 比[%]	5 横補強筋 間隔[mm]	コンクリート 圧縮強度 [N/mm ²]			
材料特性	C00-35	0.0	1.02	35	157.9			
	C10-35	1.0	1.02	35	148.2			
	C10-70	1.0	0.51	70	148.2			
(b)鉄筋 材料特性		降伏強度 σy[N/mn	度 弾 n ²](× 10	生係数Ec)⁵)[N∕mm²]	引張強度 σ t[N/mm2]			
	D13	716		1.89	899			
	U5.1	1473		2.02	1488			

表-2 試験体名称と変動因子

試験体シリーズ名称	試験体名称	SF混入量 [%]	横補強筋 比[%]	横補強筋 間隔[mm]
	SF00-0.51-35	0.0		35
P0 51-25シリーブ	SF05-0.51-35	0.5	0.51	
110.01 002 7 7	SF10-0.51-35	1.0	0.51	
	SF15-0.51-35	1.5		
	SF00-0.51-70	0.0		
R0.51-70シリーズ	SF05-0.51-70	0.5		70
	SF10-0.51-70 (実験試験体C10-70)	1.0	0.51	
	SF15-0.51-70	1.5		
	SF00−1.02−35 (実験試験体C00−35)	SF00-1.02-35 実験試験体C00-35)		
P1 02-25シリーブ	SF05-1.02-35	0.5	1.02	35
R1.02-35シリーズ	SF10-1.02-35 (実験試験体C10-35)	1.0	1.02	
	SF15-1.02-35	1.5		
R1.02-35シリーズ	SF00-1.02-70	0.0		
	SF05-1.02-70	0.5	1.02	70
	SF10-1.02-70	1.0	1.02	
	SF15-1.02-70	1.5		



3. 解析結果

3.1 せん断力-部材角関係

図-7(a)~(c)に、実験試験体 C00-35, C10-35, C10-70 の実験と解析のせん断力-部材角関係の比較を示す。い ずれも、コンクリート圧壊後、R=7.5/1000rad.付近で柱主 筋が圧縮降伏した後に最大耐力に至った。破壊形式は実 験と同様に曲げ破壊であると考えられる。解析での最大 耐力は、実験値をやや下回った。

実験と解析を比較すると,初期剛性は良好に対応して いるが,R=5/1000rad.付近からの剛性低下が,解析では 顕著であった。R=10/1000rad.以降では,実験では耐力が やや上昇するのに対して,解析では耐力が低下しはじめ た。これは変形初期に生じたコンクリートの圧壊が,部 材角の増加に伴い,急激に進行したためであると考えら れる。後に説明する軸ひずみ度からも,解析ではコンク リートの軸方向の圧縮ひずみが実験よりも早い段階で 進行する傾向がみられ,これによって耐力保持能力が失 われたと考えられる。この原因として,同試験体を対象 に単調載荷解析を行った文献1)では最大耐力時までは良 好な解析結果が得られたことから,繰り返し載荷時コン クリートモデルではコンクリート劣化を過大評価して いることが推察され、より高精度なモデル化による検討 が必要である。

図-7(d)~(g)に、変動因子を SF 混入量と横補強筋 比・横補強筋間隔としたパラメータ解析のせん断力-部 材角関係を示す。ここでは、横補強筋比(Pw=0.51%, 1.02%の二水準)・横補強筋間隔(S=35mm, 70mm の二 水準)が同条件である各試験体について、SF 混入量を変 動させた結果を比較して示している。いずれも、SF 混入 量が増加するに従って、最大耐力は増加し、最大耐力以 降の耐力低下は緩やかになる傾向がみられた。また同じ 横補強筋比では、横拘束筋間隔 s が 35mm の試験体より も 70mm の試験体の方が、最大耐力以降の耐力低下が大 きくなるとともに、履歴ループがやや膨らむ傾向がある。

図-8に、SF 混入による最大耐力上昇率を示す。ここでは、各シリーズの SF0.0%試験体の最大耐力 Q_{SF0.0}に対する、SF0.5%~1.5%混入試験体の最大耐力 Q_{max}の比率 (Q_{max}/Q_{SF0.0})として示した。SF 混入量の増加に伴う Q_{max}/Q_{SF0.0}比率の推移を見ると、SF 混入量 0.5%試験体で は Q_{max}/Q_{SF0.0}比率 1.12~1.16、SF1.0%混入試験体では



図-9 柱の軸方向ひずみ-部材角関係

1.14~1.18, SF 1.5%試験体では 1.15~1.19 である。実験 においても, SF1.0%混入試験体 C10-35 は, SF0.0%試験 体 C00-35 に対して,最大耐力が約 17%増加しており, 解析でもほぼ同様の傾向が得られたといえる。これらの ことから,コンクリート引張強度以降に,SF 混入量に応 じた森田・角モデルのパラメータ c の値を設定し,コン クリートの引張靱性を向上させることで,SF 混入による 曲げ耐力の向上を再現できると考えられる。

3.2 柱の軸方向ひずみ

図-9(a)~(c)に実験と解析の柱の軸方向ひずみ-部 材角関係の比較を、図-9(d)に解析どうしの比較を示 す。実験と解析を比較すると、いずれの試験体において も、解析では実験よりも早期に軸方向ひずみが進展して いる。このように、解析では柱の圧縮ひずみが実験より も早期に進行してしまうことが、前述のせん断力-部材 角関係において、解析の最大耐力時部材角が実験よりも 小さく、最大耐力以降の耐力低下の度合いが実験よりも 大きいことの一因であると推察される。しかしながら、 SF の混入によって柱の軸方向ひずみの進展が抑えられ ており、実験と同様の傾向をとらえているといえる。

3.3 柱脚コンクリート応力度分布

図-10(a)(b)に最大耐力時における柱脚コンクリートの応力度分布を示す。SF0.0%試験体では、コンクリート引張強度以降に白井式を用いており、引張側コンクリートにおいて引張応力をほとんど負担していない。一方で、SF0.5%~1.5%混入試験体では、コンクリート引張強度以降に森田・角モデルを用いて、各 SF 混入量に応じて引張強度の低下が緩やかになるモデルを用いており、引張側コンクリートも応力を負担している。表-3 に、最大耐力時の柱脚コンクリート応力度分布から求めた、コンクリート引張応力度を示す。コンクリート引張応力度とは、図-11 のように引張側コンクリートが負担する







引張応力が、中立軸位置からコンクリート引張縁にわた り均一に分布する応力状態と仮定して計算したもので ある。SF 混入量が増加するに従って、コンクリート引張 応力度も増加している。SF0.0%~1.0%混入試験体では、 横補強筋比 Pw=1.02%である R1.02-35, R1.02-70 シリー ズの方が、Pw=0.51%である R0.51-35, R0.51-70 シリーズ よりも引張応力度が大きい傾向である。しかし、SF1.5% 混入試験体では横補強筋比 Pw によらず同程度であった。

このことから,文献 3)でも指摘されているように,SF 混入コンクリートの引張強度を評価する場合,SF 混入量 だけでなく,横補強筋量も重要な要素のひとつであると 考えられる。なお,SF による補強効果は,ある SF 混入 量において頭打ちになることを指摘する研究もあり,こ の点についても,横補強筋と SF 混入量の関係を考察す る上で重要であると考えられる。

3.4 変形成分の分離

図-12(a)(b)に柱の曲げ変形成分とせん断変形成分 の割合を,実験での曲げ変形成分の割合と比較して示す。 いずれも,初期変形時 R=3.3/1000rad.においては実験値 と解析値の対応はあまり良くないが,R=5/1000rad.以降 では曲げ変形成分が約90%と良好に対応している。 R=20/1000rad.におけるせん断変形成分の割合に着目す ると,SF0.0%試験体ではせん断変形成分が大幅に増加す



るのに対して,SF1.0%混入試験体ではその増加が抑えら れており,実験と同様の傾向を示した。

図-13に R=15/1000rad.におけるせん断変形成分の割 合を示す。SF0.0%試験体では、横補強筋比 Pw=0.51%試 験体ではせん断変形成分が 12.0~13.2%, Pw=1.02%では 6.6~7.2%であり、せん断補強筋比 Pw が大きいほど、ま たせん断補強筋間隔 s が密であるほど、せん断変形成分 が抑制されていることがわかる。いずれも SF 混入量が 増加するほどせん断変形が抑制されるが、その効果は横 補強筋比が小さい Pw=0.51%試験体の方がより大きい。

3.5 曲げ耐力に関する検討

表-4に実験での最大耐力 Q_{exp}と, ACI 式¹⁰による曲 げ耐力計算値 Q_{ACI}の比較を示す。ACI318 規準では,等 価ストレスブロックにおける圧縮縁コンクリートの終

表-3 柱脚コンクリートの引張応力度(N/mm²)

	SF混入量[%]						
試験体シリーズ	0.0	0.5	1.0	1.5			
Pw=0.51%,s=35mm	0.01	3.02	3.84	5.29			
Pw=0.51%,s=70mm	0.15	3.13	3.65	5.35			
Pw=1.02%,s=35mm	0.47	3.25	4.07	5.16			
Pw=1.02%,s=70mm	0.60	3.28	3.98	5.36			







表一4 実験値 Q_{exp}と各計算値 Q_{ACI}, Q_{ACI}*, Q_{ACI}**, Q_{ACI}***の比較

			(0)ACI318規準 (1)ε c=((1)ε c=0.	0045とする	(2)拘束コンクリート の強度増分を考慮		(3)解析結果から コンクリート引張力 負担を考慮		
試験体名称	SF混入量 [%]	コンクリート設計 基準強度[N/mm ²]	Qexp [kN]	Q _{ACI} [kN]	Qexp/Q _{AC}	Q _{ACI} * [kN]	Qexp/Q _{AC}	Q _{ACI} ** [kN]	Qexp/Q _{AC}	Q _{ACI} *** [kN]	Qexp/Q _{AC}
C00-35	0.0	157.9	602.00	568.02	1.06	614.11	0.98	639.58	0.94	639.58	0.94
C10-35	1.0	148.2	706.51	538.74	1.31	584.95	1.21	641.87	1.10	656.34	1.08
C10-70	1.0	148.2	625.65	538.74	1.16	584.95	1.07	605.66	1.03	619.09	1.01

局ひずみ ε cu を 0.003 としている。ここで, 超高強度コ ンクリートでは, シリンダー圧縮試験における圧縮強度 時ひずみが 0.0045 程度になることを考慮して, 等価スト レスブロックにおける ε cu を 0.0045 として計算値 Q_{ACI} * を得た。SF1.0%混入試験体の実験値と計算値 Q_{ACI} *の比 は, C10-35 では 1.21, C10-70 では 1.07 となる。

また, SF 混入によって拘束コンクリートの圧縮強度増 分が増加することが,文献 3)では確認されており,SF 混入による圧縮強度増分を考慮した拘束コンクリート 強度(fcc*)が示されている。この fcc*を用いて拘束コ ンクリート強度上昇を考慮した計算値 Q_{ACI}**を得た。ま た,柱脚コンクリートの応力度分布から,SF 混入による, 柱端コンクリートの引張力負担が予想される。解析の最 大耐力時における応力度分布から,コンクリート引張負 担力を考慮した計算 Q_{ACI}***を得た。

以上から,図-14に示すように,SF1.0%混入試験体の 実験値と計算値Q_{ACI}***の比は,C10-35 では1.08,C10-70 では1.01とより近い値になった。このことから,SF 混 入コンクリートの曲げ耐力を評価する場合,SF 混入によ る拘束コンクリート強度の上昇と,コンクリートの引張 力負担を考慮することで,より適切な計算値が得られる と考えられる。



4. まとめ

鋼繊維(SF)を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部 材の3次元 FEM 解析を行い,以下の知見を得た。

(1) 各 SF 混入量に応じたコンクリート引張応力-ひず み関係を設定することで, SF 混入による曲げ耐力の上昇, 変形性能の向上等を再現できた。

(2) SF 混入により,最大耐力時でもコンクリートが引 張力を負担するために曲げ耐力が上昇すると考えられ る。このとき,SF 混入コンクリートの引張力負担の評価 には,横補強筋量が重要な要素であり,今後さらなる検 討が必要である。

(3) SF 混入試験体の曲げ耐力算定においては, SF 混 入による拘束コンクリート強度の上昇と, コンクリート の引張力負担を考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、竹中工務店技術研究所との共同研究として 行われた。竹中工務店・木村秀樹氏、上林厚志氏、中村 尚弘氏、Ousalem Hassane 氏、山田藍氏、木下拓也氏には 貴重な実験データの提供や多くのご助言を頂きました。 ここに感謝の意を表します。

また,本研究の一部は,科学研究費補助金・基盤研究 C(研究代表者:野口博)により行われた。

参考文献

- 吉澤徳康,柏崎隆志,野口博,高津比呂人:鋼繊維混 入超高強度鉄筋コンクリート柱部材に関する解析 的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.199-204,2009
- 関口雄平,柏崎隆志,野口博,高津比呂人:鋼繊維混 入超高強度鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能に 関する解析的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.175-180,2010
- 木村秀樹,高津比呂人,石川裕次,武田浩:鋼繊維を 混入した高強度コンクリート RC 柱に関する実験的 研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.235-240, 2003
- 余勇,柏崎隆,野口博:繰返し載荷時の RC 柱部材の性能評価に関する 3 次元 FEM 解析,コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.157-162, 2005
- (洪杰,柏崎隆志,野口博:3 次元 FEM 解析による RC 造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究,コン クリート工学年次論文集, Vol.31, No.2pp.301-306, 2009
- T.Nagashima, S.Sugano, H.Kimura, A.Ichikawa : Monotonic axial compression test on ultra-high-strength concrete tied columns, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.5, pp.2983-2988, 1992.7
- 7) 辻 大二郎ほか: Fc200N/mm2 超高性能コンクリートの開発(その2)自己収縮およびその他の力学特性, AIJ 大会学術講演梗概集, pp.1089-1090,2008.7
- 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した 鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, 土木学 会論文報告集 Vol.299, pp.101-112, 1980.7
- 9) 余勇,柏崎隆,野口博: RC 構造部材の3次元繰り 返し載荷時のFEM 解析プログラムの開発(その1: 解析モデルの概要), AIJ 大会学術講演梗概集, pp.67-68,2004.8
- American Concrete Institute : Building Code and Commentary ACI 318-95/318R-95, 1995