

論文 超高強度材料を用いた RC 柱部材に関する実験研究

菊田 繁美*¹ · 千葉 脩*²

要旨：圧縮強度が100MPaのコンクリートとUSD685の鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造柱部材の曲げ性状の把握を目的とする。試験体は超高層建築物の下層部を対象とした縮尺約1/3で、中柱および側柱を対象として一定圧縮軸力および変動軸力を作用させた。結果として、いずれの試験体も耐力低下の少ない優れた靱性を示し、曲げ最大耐力はNewRCプロジェクトで提案された式を用いてコアコンクリートをコンファインドコンクリートとする断面分割法により精度よく推定することができた。せん断ストラッドが柱脚部の曲げ性状に影響し、主筋の圧縮降伏耐力および圧壊強度が低下した。

キーワード：せん断ストラッド、曲げ圧縮破壊、コンファインド、変動軸力

1. はじめに

建設省総合技術開発プロジェクト(NewRCプロジェクト)をはじめとして超高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート造建築物の設計施工技術の研究開発が進められている。本報では、圧縮強度が100MPaのコンクリート

とUSD685の鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造柱部材の曲げ性状の把握を目的として行った実験の概要について報告する。

2. 試験体

試験体の一覧および試験体形状を表-1、図-1に示す。試験体は超高層建築物の下層部を対象とした縮尺約1/3の3体(UHRC01~03)で、中柱を対象とした試験体が1体(UHRC01)、側柱を対象とした試験体が2体(UHRC02,03)である。変動軸力を作用させたUHRC02を基準として、UHRC01では軸力を一定とし、UHRC03では芯鉄筋を追加した。各試験体とも断面が30cm×30cmでせん断スパン比が1.5である。せん断破壊を防止するためにNewRCプロジェクトで提案されたヒンジ領

表-1 試験体の一覧

試験体	Fc (MPa)	主筋		せん断補強筋		M/QD	軸力比 $N_t/N_{ut} \Leftrightarrow N_c/N_{uc}$ <N (KN)>
		材種	Pg (%)	材種	Pw (%)		
UHRC01	100	12-D16	2.65	6-D6 @40	USD685	1.60	0.30
<-2650>							
UHRC02		0.70 \Leftrightarrow 0.45					
UHRC03	12-D16 +4-D16	3.54					0.70 \Leftrightarrow 0.45
							<1530 \Leftrightarrow -3970>

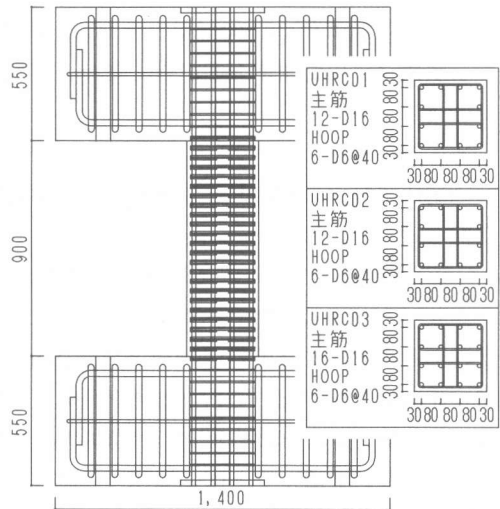


図-1 試験体形状

*1 戸田建設(株)技術研究所 研究第2室研究員、工修(正会員)

*2 戸田建設(株)技術研究所 研究第2室室長、工修(正会員)

域のせん断強度式 ($R_p=$

0.01)を用いて、せん断余裕度が約1.2となるようにせん断補強筋を配した[1]。各試験体とも、柱と上下スタブのコンクリートを同時に打設した。

材料試験結果を表-2に示す。柱主筋の降伏強度は713MPaで約15000 μ まで降伏棚を有している。コンクリートの圧縮強度は各試験体とも約100MPaである。

3. 加力方法

加力装置を図-2、加力スケジュールを図-3、せん断力と軸力の関係を図-4に示す。柱試験体の柱脚を固定し、柱頭のL型加力梁を用いて試験体中央部が反曲点となるように逆対称繰り返し加力を行った。中柱対象試験体には-2650kNの一定圧縮軸力、側柱対象試験体には変動軸力を作用させた。変動軸力は水平力の1次関数($N=-15Q-882$)として与え、圧縮軸力の上限値を-3970kN、引張軸力の上限値を1150kN(UHRC02)、1530kN(UHRC03)とした。これらの上限値は、圧縮軸応力度が約0.45 σ_B 、引張軸応力度が約0.7 σ_s に相当する。

表-2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 σ_c MPa	割線剛性 E_c GPa	割裂強度 σ_{ct} MPa	鉄筋	降伏強度 σ_y MPa	引張強度 σ_u MPa	ヤング係数 E_s GPa	伸び %
UHRC01	104	41.7	4.67	D16	713	915	206	18
UHRC02	103	41.7	4.48	D6	740	933	180	19
UHRC03	104	41.5	4.12					

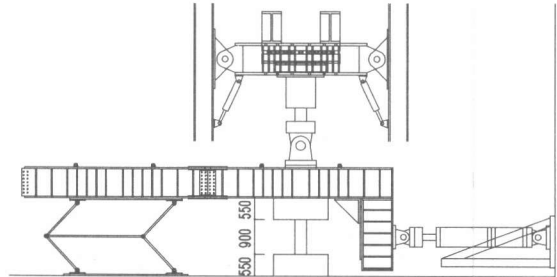


図-2 加力装置

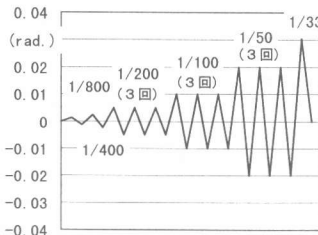


図-3 加力スケジュール

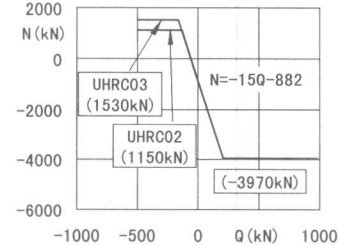


図-4 水平力と軸力の関係

4. 実験経過

一定圧縮軸力のUHRC01と変動軸力のUHRC02試験体の部材角1/200,1/100,1/50におけるひびわれ状況を図-5に示す。

一定圧縮軸力では1/400で端部に曲げひびわれが発生し、1/200のサイクルで圧縮域隅角部のコンクリートが剥落した。1/100のサイクルで端部に圧壊が発生した後、45°方向のせん断ひびわれが端部と中央部に発生した。1/100で端部の主筋が圧縮降伏し、その後に引張降伏したが主筋がすでに圧縮域で塑性化していたため引張降伏時は特定できなかった。1/50のサイクルで端部と中央部のせん断ひびわれがつながり対角線方向のひびわれに進展し、ほぼ全面にせん断ひびわれが分散した。最終破壊モードは、端部での曲げ圧縮破壊であった。

変動軸力のUHRC02では、引張軸力時において、1/800で軸力がほぼ0の時に曲げひびわれが発生し、1/400で水平方向のひびわれが試験体全面に分散した。1/100以降では上下端のひびわれにひびわれ幅が集中した。圧縮軸力時において、1/200のサイクルで圧縮歪増分域の隅角部コンクリートが剥落した後、曲げひびわれと端部の圧壊が発生し、1/100で中央部に縦方向のせん断ひびわれが発生した。1/100で端部の主筋が圧縮降伏し、その後に引張降伏したが主筋がすでに圧縮域で塑

性化していたため引張降伏時は特定できなかった。1/50で対角線方向の数本のひびわれにひびわれ幅が集中した。圧縮軸力時の最終破壊モードは、端部での曲げ圧縮破壊であった。引張軸力時では、1/50においても耐力上昇過程にあった。UHRC03のひびわれ発生状況および破壊状況はUHRC02と同様であった。

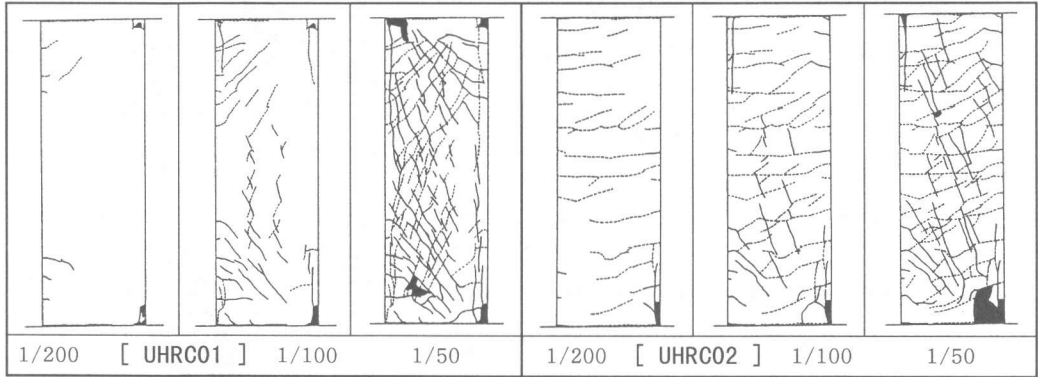


図-5 ひび割れ状況

5. 実験結果

5.1 試験体の諸強度

柱試験体の諸強度に関する実験値と計算値の比較を表-3に、曲げ最大耐力と軸力の相関関係を図-6に示す。曲げひびわれ強度については、UHRC01およびUHRC02,03の引張軸力時において実験値と計算値がほぼ一致したが、UHRC02,03の圧縮軸力時においては実験値が計算値を1~3割上回った。せん断ひびわれ強度については、実験値が計算値を2割程度上回った。各試験体とも柱主筋が引張降伏以前に圧縮降伏したため、引張降伏時が特定できなかった。柱主筋の圧縮降伏耐力については、UHRC02,03で実験値が計算値を1~3割下回った。UHRC01においては、計算では引張降伏が先行し最大耐力時においても圧縮降伏しなかったのに対して実験では圧縮降伏した。圧壊強度については、各試験体とも実験値が計算値を2割程度下回った。最大耐力については、圧縮軸力時では実験値と計算値はほぼ一致しており、引張軸力時では実験値が計算値を3~4割上回った。

5.2 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-7に示す。UH

表-3 実験値と計算値の比較

		UHRC01	UHRC02	UHRC03	
曲げひびわれ強度		353	575	-68	670
Q_c (kN)		(360)	(508)	(-62)	(516)
せん断ひびわれ強度		673	880	—	874
Q_{sc} (kN)		(562)	(733)	—	(693)
主筋圧縮降伏耐力	柱頭	781	880	—	837
	柱脚	(917*)	(956)	—	(978)
Q_y (kN)	柱頭	776	690	—	806
	柱脚	(917*)	(956)	—	(978)
圧壊強度	柱頭	710	652	—	712
	柱脚	(819)	(814)	—	(830)
Q_{oc} (kN)	柱頭	673	606	—	670
	柱脚	(819)	(814)	—	(830)
最大耐力		917	972	-215	965
Q_u (kN)		(930)	(956)	(-155)	(978)

()は計算値

$$Q_c = [(1.8\sqrt{\sigma_B} Z_n + ND/6) / (h_0/2)] \times 9.8 \quad h_0: \text{内法高さ}$$

$$Q_{sc} = [(1 + \sigma_0/150) (0.085k_c (500\sigma_c \sigma_B) / (M/(Qd) + 1.7)) b_j] \times 9.8$$

[]内は kgf 単位

Q_y, Q_{oc}, Q_u : 材料試験結果を用いた断面分割法による。
コアコンクリートをコンファインドコンクリートとし、New RCで提案された次式を用いた[1]。

$$\sigma / \sigma_B = (AX + (D-1)X^2) / (1 + (A-2)X + DX^2) \quad \sigma_B = \sigma_p + \kappa \rho_h \sigma_{hy}$$

*: 主筋の引張降伏耐力

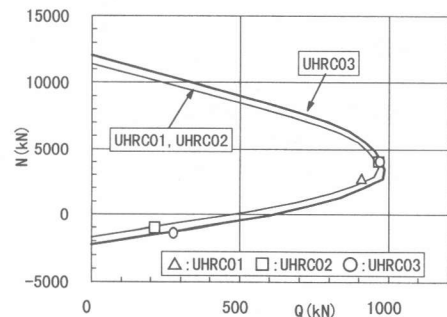


図-6 曲げ耐力と軸力の相関関係

RC01はせん断ひびわれと圧壊の発生以降に剛性が低下し、1/50で最大耐力を示した。UHRC02,3は圧縮軸力時において圧壊発生、せん断ひびわれ発生と徐々に剛性が低下し、約1/60で最大耐力を示した。圧縮軸力の場合、いずれの試験体も1/33まで耐力低下の少ない優れた靱性を示した。引張軸力時には一定軸力となる1/100近傍から耐力が上昇し、1/50においても耐力上昇過程にあった。引張軸力時の残留変形は圧縮軸力時に比べて非常に小さかった。

5. 3 柱主筋の歪度

変動軸力を作用させたUHRC03試験体について、部材角1/100の圧縮軸力時および引張軸力時における柱脚部の歪度分布の実験値と計算値の比較を図-8に示す。計算値は、New RCプロジェクトで提案された式を用いてコアコンクリートをコンファインドコンクリートとして断面分割法で求めた[1]。圧縮軸力時においては、引張域鉄筋および中央部の鉄筋の歪の実験値と計算値はほぼ同じであったが、圧縮域最外縁の鉄筋の圧縮歪の実験値は計算値の約2倍であり、表-3に示したように圧縮降伏耐力および圧壊強度の実験値が計算値に比べて小さかったことに対応している。UHRC01,2試験体についても同様の傾向がみられた。引張軸力時においては、全ての鉄筋の歪度が引張歪度となり、実験値と計算値はほぼ同じであった。

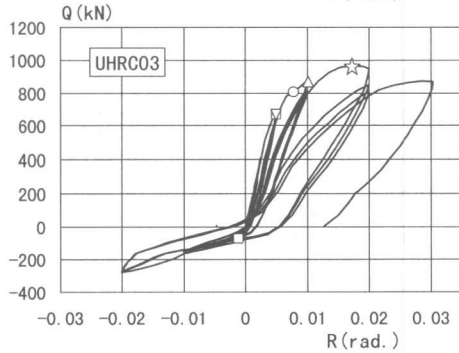
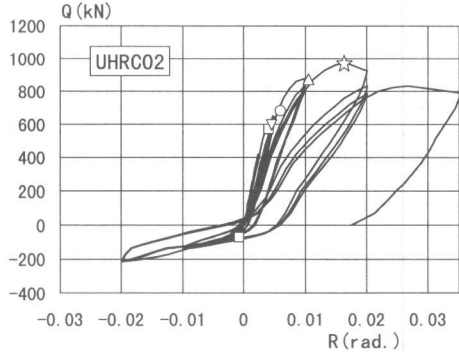
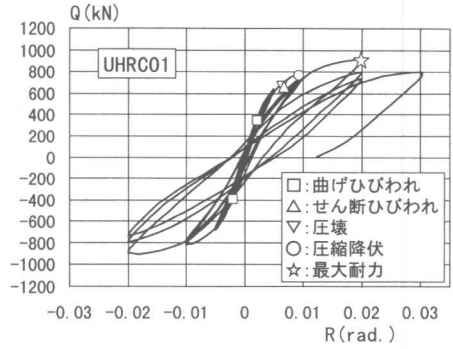


図-7 荷重-変形関係

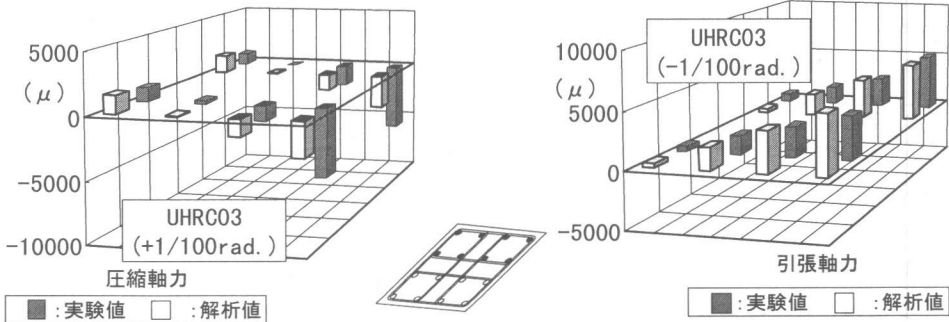


図-8 柱主筋の歪度分布

5. 4 せん断補強筋の歪度

一定圧縮軸力のUHRC01と変動軸力のUHRC02試験体について、圧縮軸力作用時の各サイクルのピーク時における外周せん断補強筋の歪度を図-9に示す。UHRC01では上部、下部、中央のせん断

補強筋ともほぼ同程度の引張歪度であったが、UHRC02では上下部に比べて中央の引張歪度が約2倍と大きくなった。部材角1/50における中央のせん断補強筋の歪度を比較するとUHRC02はUHRC01の約1.4倍であった。UHRC01では45°方向のせん断ひび割れが分散して発生したのに対して、UHRC02では圧縮軸力時の対角線方向のせん断ひび割れにひび割れ幅が集中したことから判断されるように、トラス機構の負担せん断力がUHRC01では高さ方向でほぼ均等であったのに対して、UHRC02では上下部に比べて中央が大きくなったことによるものと考えられる。

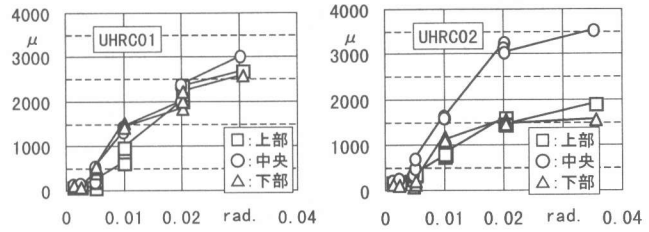


図-9 せん断補強筋の歪度

6. 実験結果の検討

圧縮軸力時において圧縮域最外縁の鉄筋の圧縮歪度の実験値が断面分割法による計算値に比べて大きくなり、主筋の圧縮降伏耐力及びコンクリートの圧壊強度の実験値が計算値に比べて小さくなった。この原因についてFEM解析を用いて検討した。図-10に示すように、UHRC03試験体を基にせん断スパン比を1.5と3.0とする2種類の解析モデルを設定した。コンクリートを2次元平面応力要素、鉄筋をトラス要素とした。

両モデルについて、実験の圧壊時および部材角1/100rad.に相当する31400kN・cmおよび38800kN・cmの柱脚部曲げモーメント時の柱脚部における鉛直方向の歪度分布を図-11、部材角1/100rad.相当曲げモーメント時の主応力度のコンターを図-12に示す。図-11から、圧壊時および部材角1/100rad.時ともせん断スパン比が3.0の場合に比べて1.5の場合は圧縮域端部の圧縮歪度が大きく平面保持が成り立っていないことが判る。図-12から、せん断スパン比が1.5の場合は3.0の場合に比べて、対角線方向のせん断ストラッドの応力度が大きくなっていることが判る。せん断スパン比が1.5の場合は3.0の場合に比べて水平力が2倍であるため、対角線方向のせん断ストラッドの応力度が大きくなり柱脚部の歪度分布に影響を及ぼすものと考えられる。

部材角1/100rad.における実験値と1/100rad.に相当する曲げモーメント時の断面分割法及びFEM解析の柱脚部主筋歪度分布を図-13に

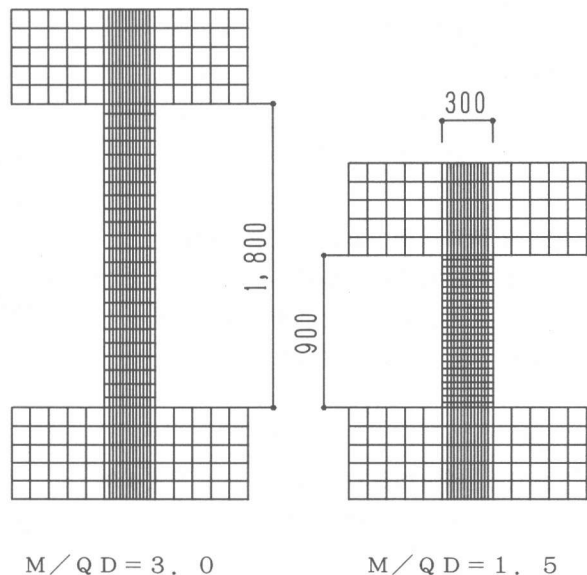


図-10 FEM解析モデル

示す。FEM解析は実験値の圧縮域端部で圧縮歪度が増加する傾向を良く再現した。

従って、高せん断力が作用する本柱部材においては、柱脚部曲げ性状にせん断ストラッドが影響し主筋の圧縮降伏耐力及びコンクリートの圧壊強度の実験値が断面分割法の計算値に比べて小さくなったものと考えられる。

7. まとめ

- ①一定圧縮軸力では、せん断ひびわれが試験体全面に分散したが、最終破壊モードは端部での曲げ圧縮破壊であった。変動軸力の圧縮軸力時では、対角線方向の数本のひびわれにひびわれ幅が集中したが、最終破壊モードは端部での曲げ圧縮破壊であった。引張軸力時では、上下端のひびわれにひびわれ幅が集中した。
- ②いずれの試験体も、圧縮軸力時には部材角1/50のサイクルで最大耐力を示し、1/33まで耐力低下の少ない優れた靱性を示した。引張軸力時には部材角1/50においても耐力上昇過程にあった。
- ③曲げ最大耐力は、NewRCプロジェクトで提案された式を用いてコアコンクリートをコンファインドコンクリートとして断面分割法により精度よく推定することができた。
- ④主筋の圧縮降伏耐力および圧壊強度の実験値が断面分割法の計算値に比べて小さくなったのは、柱脚部曲げ性状にせん断ストラッドが影響したためと考えられる。

参考文献

[1](財)国土開発技術研究センター：平成4年度 New RC研究開発概要報告書、1993.3

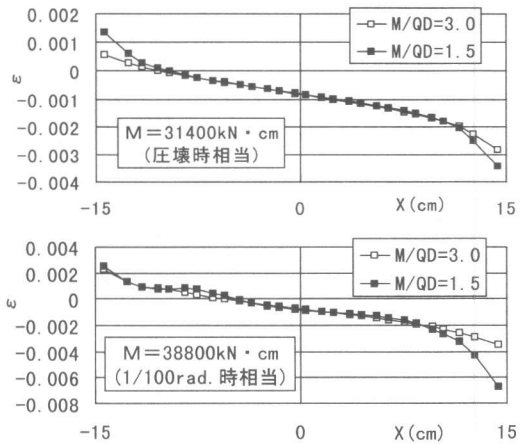


図-1-1 柱脚部の歪度分布

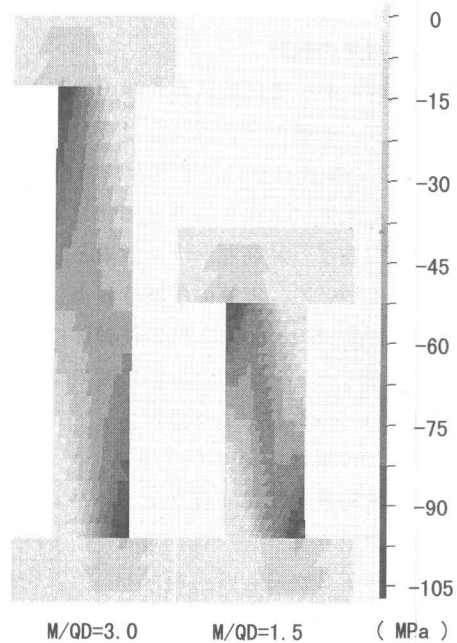
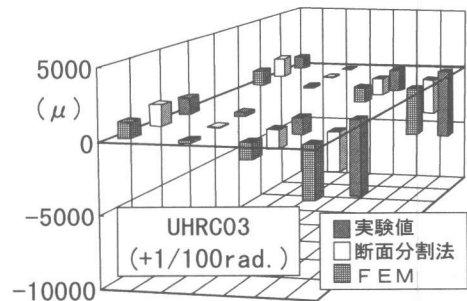


図-1-2 主応力度のコンター



圧縮軸力

図-1-3 柱脚部主筋歪度分布