

# 論文 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱に関する実験研究

菊田 繁美<sup>\*1</sup>・千葉 脩<sup>\*2</sup>・羽鳥 敏明<sup>\*3</sup>・飯塚 信一<sup>\*4</sup>

**要旨** : 圧縮強度が 150MPa 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構造性能の向上を目的として曲げせん断実験を行った。圧縮域主筋の増加や鋼板を巻くことにより曲げ耐力および変形性能が増大した。最大曲げ耐力はコンクリートのコンファインド効果を考慮した断面分割法により精度よく推定することができた。ACI ストレスブロック法は鋼板巻き試験体を除いて ACI 設定の係数が適用可能であったが、鋼板巻き試験体はコンファインド効果を考慮して係数を増大する必要があった。

**キーワード** : 超高強度, 曲げ耐力, コンファインド効果, ストレスブロック

## 1. はじめに

既往の Fc150 の超高強度コンクリートと USD685 の主筋を用いた圧縮軸力比 0.3 ~ 0.7 の RC 柱の実験においては, 早期に曲げ圧縮域コンクリートが圧壊し, 軸力比が 0.5 以上では最大耐力以降のコンクリートの損傷及び耐力低下が激しくなると報告されている<sup>1)</sup>。

本研究は, 曲げ圧縮域の補強を目的として, 主筋の圧縮力負担を増加させるために主筋本数を増やす方法と柱に鋼板を巻きコンファインド効果によりコンクリートの圧縮強度を増大させる方法について実験結果を基に検討したものである。

## 2. 試験体

試験体の一覧および試験体断面形状を表-1, 図-1に示す。試験体は, せん断スパン比が 1.5 と共通で

300mm×300mm 断面と 250mm×250mm 断面の 2 シリーズから成っており, それぞれ 3 体の合計 6

表-1 試験体の一覧

試験体名	断面	主筋		せん断補強筋		M/QD	軸力比	鋼板厚 (mm)					
		材種	P <sub>g</sub> (%)	材種	P <sub>w</sub> (%)								
UHRC12	300mm × 300mm	12-D16	USD685	2.65	4-U6.4@40	SBPD1275	1.07	---					
UHRC13									20-D16	4.42	6-U6.4@40	1.60	-0.35~0.7
UHRC14													-0.3
UHRC15	250mm × 250mm	12+4-D13	USD685	3.25	6-U5.1@35	SBPD1275	1.40	---					
UHRC16									20+4-D13	4.88	6-U5.1@35	1.40	-0.5~0.7
UHRC17													-0.5~0.47

軸力比 : 圧縮軸力比(負)  $N/(A_c \cdot \sigma_{cB})$  引張軸力比(正)  $N/(A_s \cdot \sigma_{sY})$

N: 軸力, A<sub>c</sub>・A<sub>s</sub>: コンクリート及び鉄筋の断面積,  $\sigma_{cB}$ : コンクリートの圧縮強度,  $\sigma_{sY}$ : 鉄筋の降伏強度

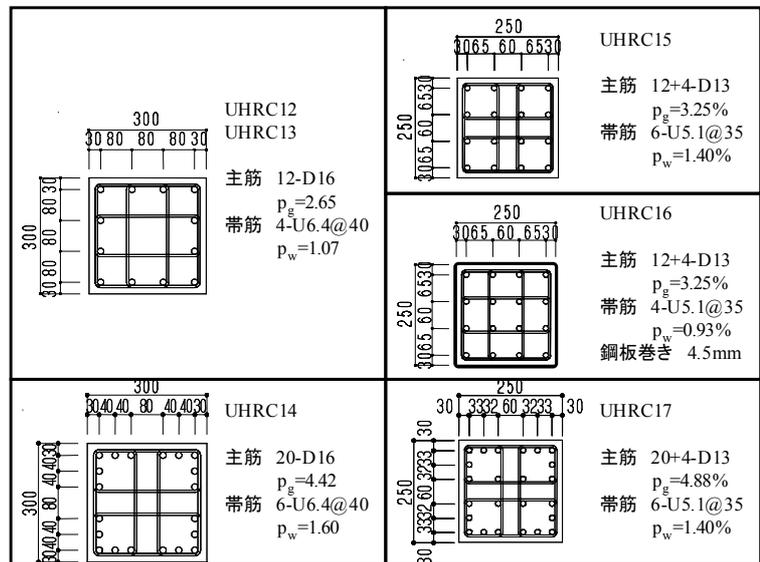


図-1 試験体形状

体である。UHRC12,13,14 は圧縮軸力比が約 0.3 であり, 一定軸力の UHRC12 を基本に, UHRC13

\*1 戸田建設 (株) 技術研究所複合構造プロジェクトサブマネージャー 工修 (正会員)

\*2 戸田建設 (株) 技術研究所所長 工修 (正会員)

\*3 戸田建設 (株) 技術研究所複合構造プロジェクトマネージャー

\*4 西松建設 (株) 技術研究所建築技術研究課長 工博 (正会員)

が変動軸力, UHRC14 が主筋を増加させたものである。

UHRC15,16,17 は圧縮軸力比が0.5であり, UHRC15を基本に, UHRC16 が鋼板巻き,

UHRC17 が主筋を増加させたものである。各試験体ともせん断余裕度が1.15~1.25となるようにせん断補強筋を配筋した。UHRC16 は柱頭と柱脚の20mmの範囲には鋼板を設けていない。各試験体とも上下スタブと柱部分を分離して打設した。

コンクリートの調合および材料試験結果を表-2, 表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は封緘養生テストピースと断面が50cm×50cmで高さが100cmの角柱のコア抜きテストピースで若干異なっているものの, 両シリーズともほぼ150N/mm<sup>2</sup>であった。

### 3. 加力方法

加力装置、加力スケジュールおよび変動軸力時の水平力と軸力の関係を図-2, 3, 4に示す。

加力は、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正負逆対称繰り返し加力を行った。UHRC12,14には-4050kN(軸力比0.3)の一定圧縮軸力, UHRC13およびUHRC15,16,17には図-4に示すような変動軸力を作用させた。変動軸力は上下限の範囲内で水平力の1次関数として与えた。1次関数の切片は外柱の長期軸力を想定して-0.1F<sub>c</sub>A<sub>c</sub>とし、傾きは上下限の軸力において最大耐力が得られるように設定した。

### 4. 実験経過

全試験体の部材角1/50rad.におけるひび割れ発生状況を図-5に示す。

UHRC12,14では, 部材角1/300rad.で柱頭・柱脚部に曲げひび割れが発生し, 1/200rad.で試験体中央部に角度の急なせん断ひび割れが発生した。1/150rad.で柱頭・柱脚部に圧壊が発生し, 同部位での主筋

表-2 コンクリートの調合

	水結合材比 (%)	結合材 (kg/m <sup>3</sup> )	シリカフューム (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤① (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤② (kg/m <sup>3</sup> )
UHRC12,13,14	16	938 <sup>*1</sup>	---	150	505	889	20.64	0.75
UHRC15,16,17	16	750 <sup>*2</sup>	188	150	498	841	28.66	---

\*1: シリカフュームセメント 密度3.08g/cm<sup>3</sup>  
混和剤①: 高性能AE減水剤

\*2: 普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm<sup>3</sup>  
混和剤②: 消泡剤

表-3 材料試験結果

コンクリート		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割線剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
UHRC12,13,14	封緘養生	155	47800	6.4
	コア抜き	145	44100	---
UHRC15,16,17	封緘養生	147	42417	4.8
	コア抜き	149	---	---

鉄筋、鋼板	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D16(USD685)	789 <sup>**</sup>	196000	1060
D13(USD685)	725 <sup>**</sup>	186000	907
U6.4(SBPD1275)	1315 <sup>**</sup>	185000	1350
U5.1(SBPD1275)	1314 <sup>**</sup>	183000	1330
PL4.5	261	208000	352

※0.2%オフセット

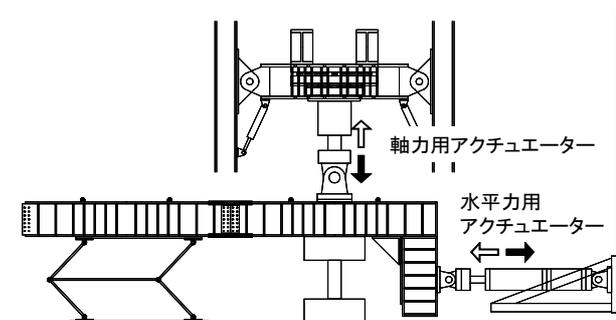


図-2 加力装置

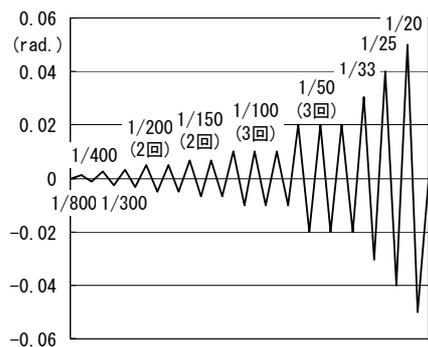


図-3 加力スケジュール

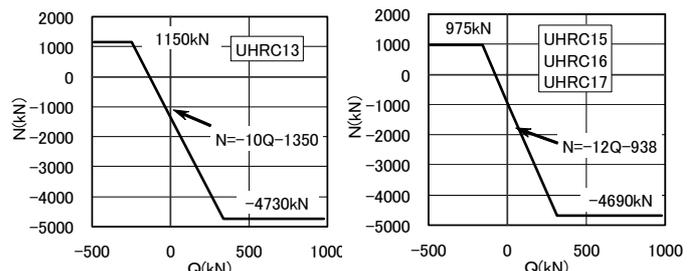


図-4 水平力と軸力の関係

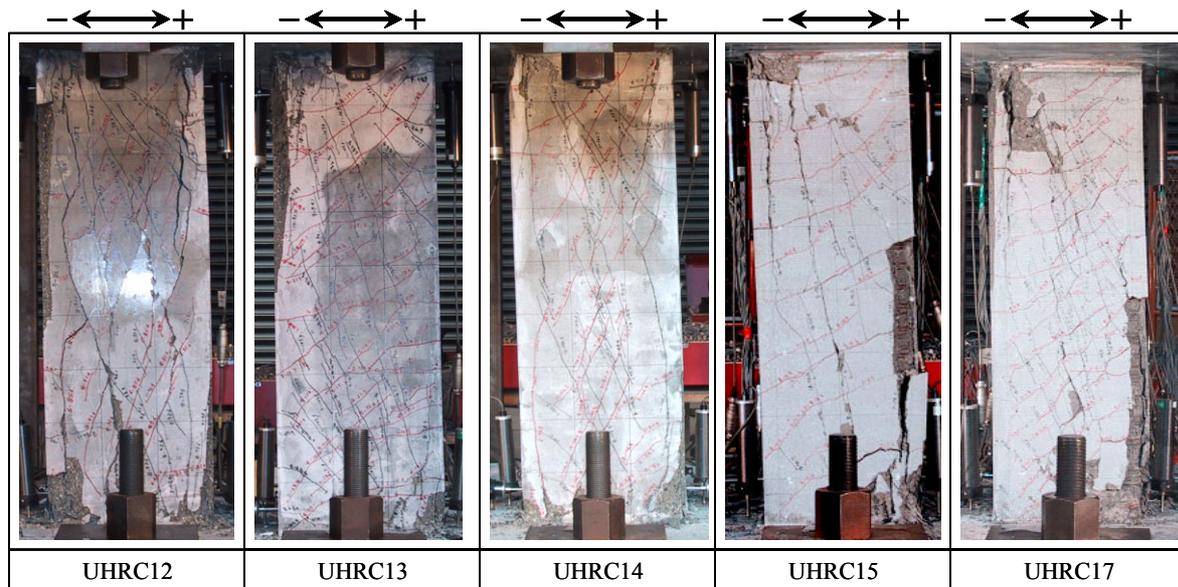


図-5 ひび割れ状況 (1/50rad.)

が圧縮降伏した。その後、せん断ひび割れが試験体全面に発生、柱頭・柱脚部の圧壊も進展し、最終的には側面かぶりコンクリートが剥落し、付着割裂破壊の様相を呈した。

UHRC13 の負方向加力時においては、部材角 1/800rad. で曲げひび割れが発生した後、引張軸力で発生したと考えられる水平方向のひび割れが増大した。部材角 1/200rad. で柱頭・柱脚部に 45° 方向の曲げせん断ひび割れが発生した。正方向加力時においては、部材角 1/150rad. で圧壊が発生し、同部位での主筋が圧縮降伏した。1/100rad. で試験体中央部に角度の急なせん断ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れが試験体全面に発生、柱頭・柱脚部の圧壊も進展し、最終的には側面かぶりコンクリートの一部が剥落したが、UHRC12 に比べて損傷程度は小さかった。

UHRC15,17 とともに負方向加力時は UHRC13 の負方向加力時と同様のひび割れ発生状況であった。正方向加力時においては、部材角 1/200rad. で圧壊が発生し、同部位での主筋が圧縮降伏した。UHRC15 は 1/100rad., UHRC17 は 1/150rad. で試験体中央部に角度の急なせん断ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れが増加し、最終的に

は柱頭・柱脚部の圧壊が進展して曲げ圧縮破壊の様相を呈した。

UHRC16 は、部材角 1/200rad. で主筋が圧縮降伏し、1/150rad. で柱脚柱頭の鋼板を巻いていない部分に圧壊が発生した。その後実験終了時まで、圧壊が若干進展する程度であった。

## 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-4に示す。なお、断面分割法において、コアコンクリートは NewRC<sup>2)</sup>で提案されたコンファインドコンクリートとした。曲げひび割れ

表-4 実験値と計算値の比較

	UHRC12	UHRC13	UHRC14	UHRC15	UHRC16	UHRC17	
曲げひび割れ強度 Mc(kN・m)	293 (250)	27 <sup>*1</sup> (48)	305 (258)	28 <sup>*1</sup> (27)	29 <sup>*1</sup> (27)	28 <sup>*1</sup> (27)	
主筋圧縮降伏強度 My(kN・m)	柱頭	375 (462)	423 (465)	451 (544)	224 (254)	255 (319)	258 (289)
	柱脚	389 (462)	423 (465)	415 (544)	224 (254)	254 (319)	258 (289)
圧壊強度 Mcc(kN・m)	柱頭	383 (472)	407 (476)	439 (546)	206 (270)	280 (290)	258 (302)
	柱脚	366 (472)	433 (476)	422 (546)	197 (270)	280 (290)	216 (302)
最大耐力 Mu(kN・m)	圧縮	473 (492)	518 (513)	578 (556)	295 (271)	390 (375)	334 (319)
	引張	---	163 (---)	---	77 (---)	78 (---)	147 (---)

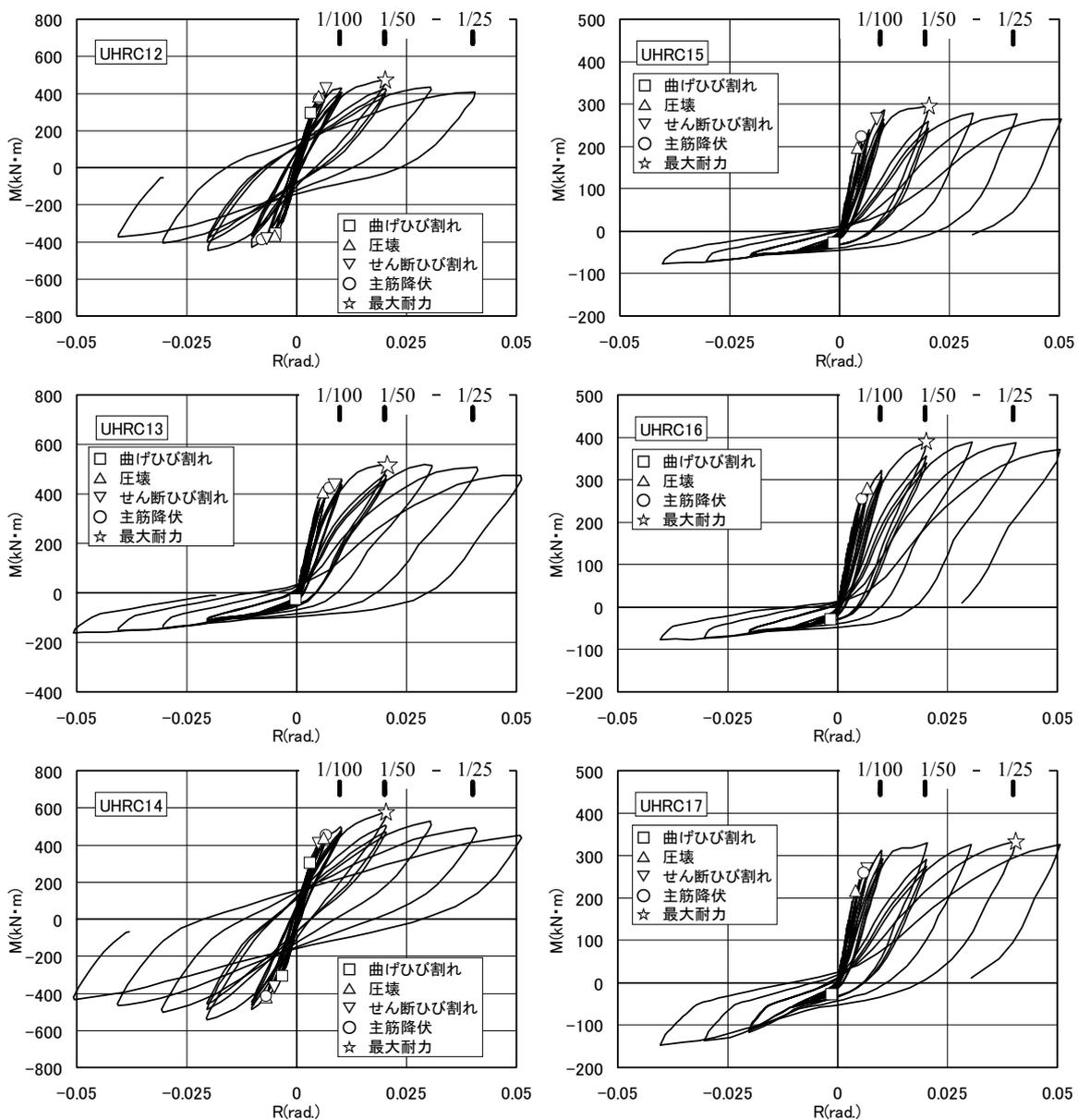
( )内は計算値  
 $Mc = (0.56 \sqrt{\sigma_c} Z_e + ND/6)$   
 My, Mcc, Mu: 断面分割法による。  
 コアコンクリートをNewRCで提案されたコンファインドコンクリートとした。  
 \*1: 引張軸力時

強度については、一定軸力の UHRC12,14 および変動軸力の UHRC15,16,17 は実験値と計算値がほぼ一致したが、変動軸力の UHRC13 は実験値が計算値に比べて小さかった。柱主筋の圧縮降伏強度と圧壊強度は、実験値が計算値を最大で 20%程度下回った。この原因としてはせん断圧縮ストラットが影響しているものと考えられる<sup>3)</sup>。最大耐力については、実験値と曲げ耐力の計算値は 10%の誤差範囲内で一致した。変動軸力試験体の引張軸力時においては、実験終了時まで耐力上昇過程にあり、最大耐力は確認できなかった。UHRC12 と UHRC14 および UHRC15 と UHRC17

を比較すると主筋量の増加により最大耐力が約 15~20%上昇し、UHRC15 と UHRC16 を比較すると鋼板巻きにより最大耐力が約 30%上昇したと考えられる。

## 5.2 荷重—変形関係

各試験体の荷重—変形関係を図—6 に示す。いずれの試験体とも 1/200~1/150rad. で柱頭・柱脚の圧壊、せん断ひび割れおよび主筋の圧縮降伏が発生し、剛性が低下した。UHRC12~UHRC16 は 1/50rad, UHRC17 は 1/25rad. で最大耐力を示し、耐力低下の少ない安定した履歴性状を示した。変動軸力の引張軸力時においては、耐力が上昇し



図—6 荷重—変形関係

続けた。

### 5.3 主筋の抵抗力

変動軸力を作用させた UHRC15, 16, 17 について、部材角  $1/50\text{rad}$  の圧縮軸力時における柱脚部主筋の応力分布を図-7 に示す。主筋の応力-歪度関係を Ramberg Osgood モデルとして歪度データから応力を求めた。UHRC15 と UHRC17 に比べて鋼板巻きの UHRC16 は引張側主筋に大きな引張応力が作用しているのは鋼板のコンファインド効果により圧縮域コンクリートの強度が増大したためであり、曲げ耐力の増大に寄与したものと考えられる。

部材角  $1/50\text{rad}$  における曲げモーメントに対する主筋のモーメント負担割合を図-8 に示す。主筋比 ( $P_g$ ) の増大に伴い負担割合が増大した。軸力比が 0.3 の UHRC12 と UHRC14 に比べて軸力比が 0.5 の UHRC15 と UHRC17 は主筋量の増加に対する主筋のモーメント負担割合の増加が少なかった。軸力比 0.3 は 0.5 に比べて、主筋量の増加が曲げ圧縮破壊時耐力の増加に有効であることが判った。

### 6. 実験結果の検討

最大曲げ耐力について実験値と計算値の比較を図-9 に示す。計算値は  $\beta_1=0.65$  の ACI 式と NewRC で提案されたコンファインド効果を用いた断面分割法によるものである。ACI 式は鋼板巻きの UHRC16 について実験値を大きく下回ったが、その他の試験体については 20% の誤差範囲内で評価することができた。断面分割法では実験値を 10% の誤差範囲内で適切に評価することができた。

図-10 に示す ACI ストレスブロックの  $\alpha$  と  $\beta_1$  の係数を実験結果から求め、ストレスブロックの形状について検討した。軸力と Ramberg Osgood モデルによる主筋の応力を用いて力の釣り合い条件からコンクリートの負担圧縮力を求め、断面の中心におけるモーメントの釣り合い条件からストレスブロックの形状を求めた。中立

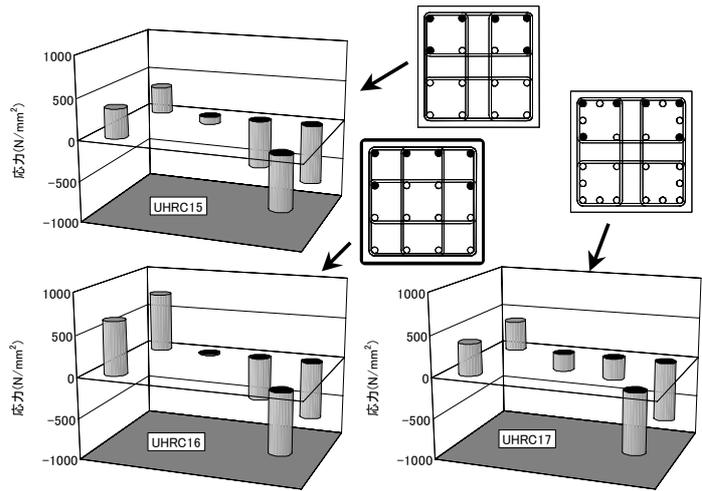
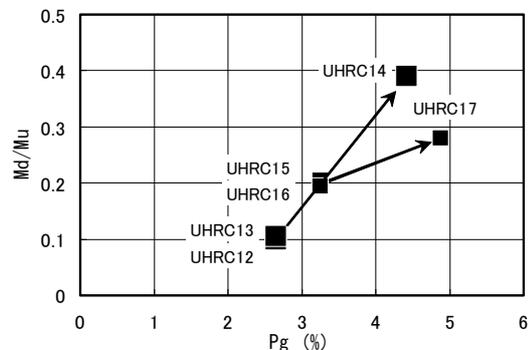


図-7 柱脚部主筋の応力分布



Md/Mu : 主筋負担モーメント/入力曲げモーメント

図-8 主筋のモーメント負担割合

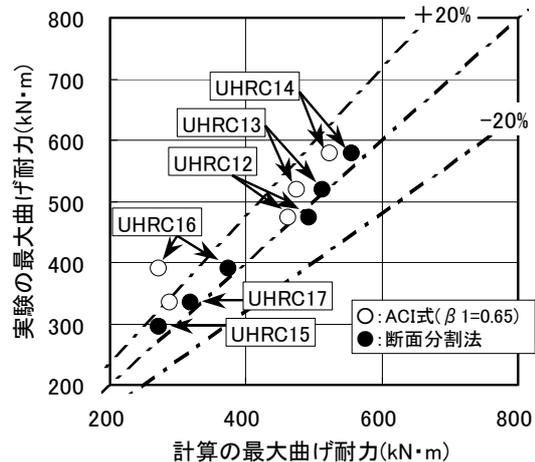


図-9 曲げ耐力の実験値と計算値の比較

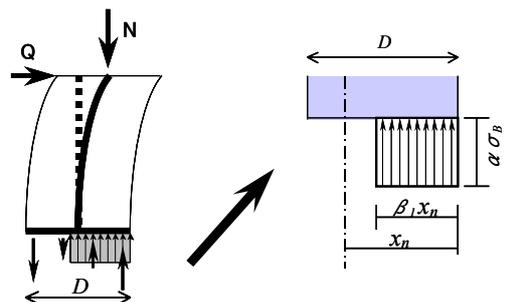


図-10 ACI ストレスブロックモデル

軸は主筋の歪分布から求めた。柱せい (D) に対する圧縮縁から中立軸までの距離 (Xn) の比 (Xn/D), ストレスブロックのせいの Xn に対する割合 ( $\beta 1$ ) および材料試験結果のコンクリート圧縮強度に対するストレスブロックの強度の割合 ( $\alpha$ ) を図-11 に示す。Xn/D の図には ACI ストレスブロックおよび断面分割法の計算値,  $\alpha$  の図には  $\beta 1$  を 0.65 とした場合の実験値も併記した。

Xn/D の実験値と断面分割法は良く一致した。UHRC16 の Xn/D は約 0.6 で UHRC15 と UHRC17 の約 0.7 に比べて小さく, UHRC12,13,14 とほぼ同じであった。これは, 鋼板のコンファインド効果によりコンクリートの圧縮強度が増大するため, 軸力比 0.5 でも軸力比 0.3 と同程度の圧縮域で抵抗できたものと考えられる。ACI では高強度コンクリートの  $\beta 1$  を 0.65,  $\alpha$  を 0.85 としているが, これら同時に一致するものは無かった。  $\beta 1$  を ACI の設定値 0.65 とすると,  $\alpha$  は鋼板巻き試験体が 1.15 と大きい, その他の試験体は 0.75~0.95 で ACI の設定値 0.85 に近似した。鋼板巻きの UHRC16 では, ACI ストレスブロック係数は  $\beta 1$  が 0.71,  $\alpha$  が 1.05 であった。以上から, ACI ストレスブロックを用いた曲げ耐力評価において, 鋼板巻きの場合はコンファインド効果によりコンクリートの圧縮強度が増加すること, および応力分布が三角形でなくなることを考慮する必要があるが, その他の試験体では  $\beta 1$  を 0.65,  $\alpha$  を 0.85 とし評価できるものと考えられる。

## 7. まとめ

- ①各試験体とも, 実験終了時まで耐力低下の少ない優れた履歴性状を示した。
- ②主筋量の増加により曲げ圧縮域の劣化が抑制され, 最大耐力が 15~20%上昇した。
- ③鋼板巻きによるコンファインド効果は, 最大耐力を約 30%上昇させた。
- ④実験の最大曲げ耐力について, 断面分割法を用いると 10%の誤差範囲内で適切に評価することができた。

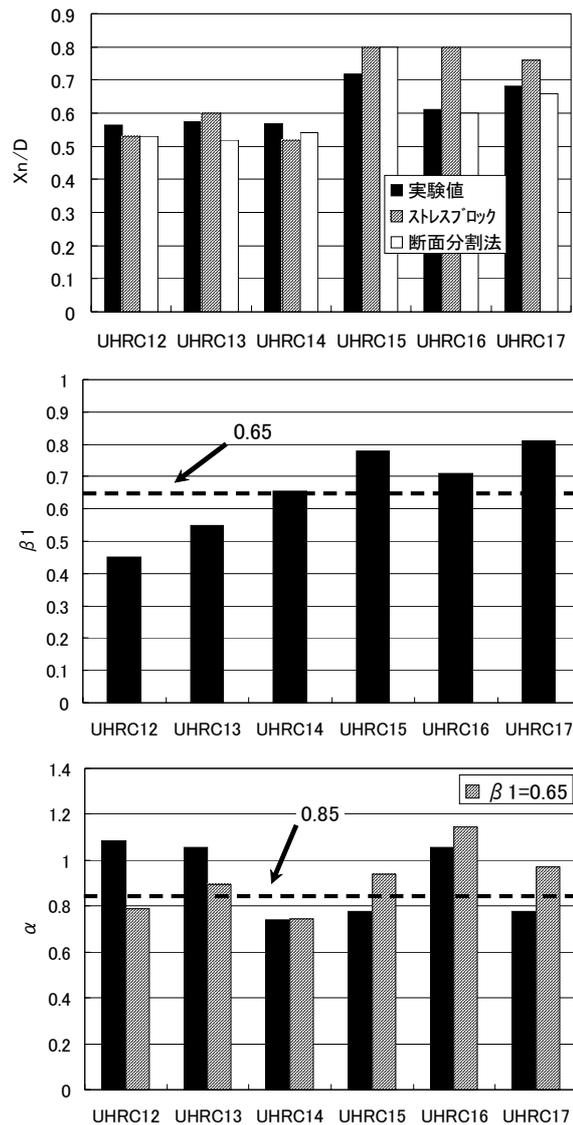


図-11 ACI ストレスブロック係数

- ⑤ACI ストレスブロック法は鋼板巻き試験体を除いて ACI の設定値 ( $\beta 1=0.65, \alpha=0.85$ ) が適用可能であったが, 鋼板巻き試験体はコンファインド効果を考慮して  $\beta 1$  と  $\alpha$  を増大する必要があった。

## 参考文献

- 1)小坂英生他：超高強度コンクリートを用いた RC 柱の高軸力下の構造的な性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.223-228, 2003.6
- 2) (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
- 3) 菊田繁美他：超高強度材料を用いた RC 柱部材に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.591-596, 1997.6