

論文

[2102] 高強度鉄筋 USD685を用いた高層 RC 柱の曲げせん断実験

張 愛暉*³・別所 佐登志*¹・加藤 友康*²・山本 孝一*⁴

1. はじめに

高強度鉄筋USD685は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発（略称New RC）」において開発されたが、筆者らも独自の検討を加え、既に超高層RC柱部材を対象に実用化している。本研究では、高強度鉄筋USD685の活用促進を狙い、USD685鉄筋と高強度コンクリートを用いた柱部材の曲げせん断性状の把握と高強度主筋の機械式継ぎ手を有する柱部材の構造性能の把握を目的として本実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、1/2.3モデルで、断面が350mm角の4体とした。主筋にD19(USD685)を、横補強筋にD8(USD785)を用いた。柱のせん断スパン比(M/QD)は1.5とした。試験体の配筋は共通で、主筋比 P_g （全主筋面積/柱断面積）は2.81%(12-D19)とした。横補強筋比 P_w に

ついては、著者らの既往実験結果^{1,2,3)}を参考にし、せん断破壊を先行させないように P_w を1.2%(4-D8@45)とした。また、横補強筋は溶接閉鎖型鉄筋三枚を一組としたもち網形式である。試験体の軸力は応力条件が厳しい釣り合い軸力比の近傍とし、 $N/BDFc=0.3$ になるように設定した。

C400A及びC400B試験体はコンクリート設計強度 F_c が400kgf/cm²である。C400A試験体の主筋は通し筋であるが、C400B試験体では、柱主筋は機械式継ぎ手（ネジ・グラウト継ぎ手）により継がれている。主筋の継ぎ手位置は最も応力条件の厳しい柱頭・柱脚端部（ヒンジゾーン：約柱せい分の長さ）に配置した。また、実験時の加力の対称性を考慮して主筋継ぎ手は柱の柱頭・柱脚のほかに加力柱部分にも設置した。C600A及びC600B試験体のコンクリート設計強度 F_c は600kgf/cm²である。コンクリートは平置し打設した。C600Aは通し筋、C600BはC400Bと同様に主筋に継ぎ手がある。試験体の一覧を表-1に、試験体形状及び配筋図を図-1に示す。

表-1 試験体一覧

試験体	コンクリート強度 F_c (kgf/cm ²)	継手	軸力	備考
C400A	400	無	N=150tf	全試験体の横補強筋は共通である
C400B		有	(0.3BDFc)	
C600A	600	無	N=220tf	$P_w=1.2\%$
C600B		有	(0.3BDFc)	4-D8(@45)

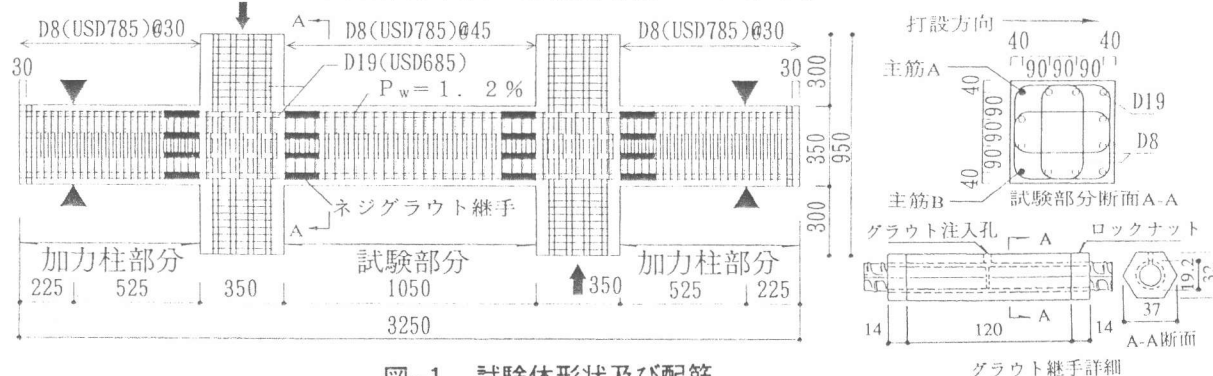


図-1 試験体形状及び配筋

- * 1 鹿島技術研究所 第三研究部専門部長（正会員）
- * 2 鹿島技術研究所 第三研究部主任研究員
- * 3 鹿島技術研究所 第三研究部研究員（正会員）
- * 4 神戸製鋼所 鉄鋼事業本部 生産本部課長

2. 2 使用材料

使用コンクリートの機械的特性を表-2に示す。鉄筋の機械的特性を表-3に示す。もち網型横補強筋の溶接部及び主筋の機械式継ぎ手部についても引張試験を行い、すべて母材破断であることを確認した。

2. 3 実験方法

加力は、口の字型に構築した鉄骨製反力フレームの中に試験体をセットし、試験体の両端をピン・ローラー支持した状態で、柱軸方向力(C400A、Bでは150tf、C600A、Bでは220tf)を導入後、加力スタブ部分の上下から油圧ジャッキにより左右逆対称のせん断力を正負繰り返し作用させる方法で行った。加力手順は、層間部材角 $R = \delta / L$ (δ : 加力スタブ間の鉛直相対変位、 L : 柱のクリアスパン)を基準に漸増変位で数回繰り返し加力し、最後に $R=1/25$ radまで加力した。鉛直変形、加力スタブ回転変形、軸変形、主筋ひずみ及び横補強筋ひずみについて計測した。加力状況を写真-1に、加力手順を表-4に示す。

3. 実験結果

3. 1 破壊性状

各試験体の $R=1/50$ radのひび割れ発生状況を図-2に示す。C400A試験体では、曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れの順に生じた。 $R=1/100$ radのピークに達する前に試験体上面に付着割裂ひび割れが生じ、そのピーク付近でヒンジゾーンの圧縮領域に圧壊の兆候があり、 $1/100$ radでの繰り返し加力で試験体上面の付着割裂ひび割れが柱全長につながり、コンクリートが圧壊し、主筋の圧縮降伏が生じた。 $1/50$ radのピーク付近で主筋の引張降伏(降伏時部材角 $1/65$ rad)が生じると共に、主筋に沿う付着割裂ひび割れが顕著になり、微少な耐力低下が生じた。 $1/50$ radでの繰り返し加力では、明瞭な付着割裂面が形成され、ヒンジゾーン及び主筋に沿う被りコンクリートの剥離が顕著になった。 $1/25$ radでの繰り返し加力では、さらに耐力が低下した。破壊性状は曲げ降伏後の付着割裂破壊(FB)と判断した。

表-2 コンクリートの機械的性質

試験体	養生	材令 (日)	圧縮強度 σ_B (kgf/cm ²)	割裂強度 σ_t (kgf/cm ²)	ヤング率 E_c 1/3 (10 ⁶ kgf/cm ²)	ポアソン比 ν
C400A	現封	3.8	36.8	27.6	2.60	0.21
C400B	"	4.9	38.1	31.5	2.71	0.20
C600A	"	5.6	73.3	40.1	3.58	0.19
C600B	"	6.2	73.8	43.3	3.68	0.21

表-3 鉄筋の機械的性質

径	降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	引張強さ σ_{max} (kgf/cm ²)	降伏比 Y_R	降伏歪 ϵ_y (μ)	伸び率 (%)	ヤング率 E_s (kgf/cm ²)
D19	7340	9410	0.78	3500	13.4	2.10×10^6
D8	8240	9770	0.84	7280 (4000*)	10.5	2.06×10^6

注*: 0.2%オフセット法により求めた値

表-4 加力手順

サイクルNo	±1	±2 ±3	±4 ±5	±6 ±7	±8 ±9
部材角(rad)	1/400	1/200	1/100	1/50	1/25
変形量(mm)	2.625	5.25	10.5	21.0	42.0

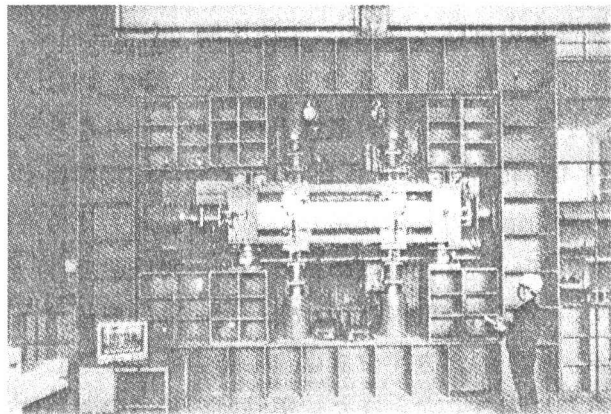


写真-1 加力状況

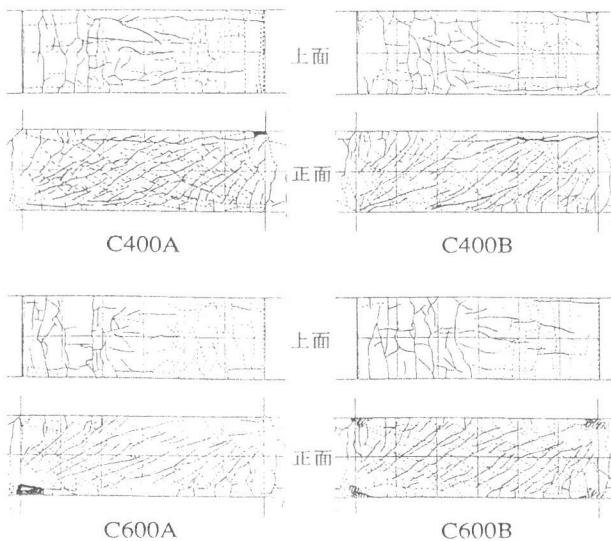


図-2 $R=1/50$ radのひび割れ状況

一方、継ぎ手のあるC400B試験体では、継ぎ手部を除くと付着長さが短くなり、C400A試験体より、付着割裂ひび割れが若干早く生じた。しかし、その後の性状はC400Aとほぼ同じであった。破壊性状は曲げ降伏後の付着割裂破壊(FB)と判断した。

C600A試験体では、1/100radで付着割裂ひび割れが生じ、ピーク直前にコンクリートの圧壊が微量に生じた。1/80rad付近で柱主筋の引張側と圧縮側が共に降伏し、1/50radで最大耐力に達した。同時にコンクリート圧壊が顕著に生じ、試験体上面の付着割裂ひび割れが柱全長につながった。1/25radの加力では、柱の中段筋も引張降伏した。1/25rad時ではヒンジ部の被りコンクリートの剥離が顕著に生じ、主筋に沿う付着割裂面も形成されたが、著しい損傷とならず、耐力低下は生じなかった。1/25radの繰り返し加力では、付着劣化による剛性低下が生じた。破壊性状は靱性のある曲げ破壊(F)と判断した。

一方、継ぎ手のあるC600B試験体では、付着割裂ひび割れが、C600A試験体より若干早く生じた。しかし、1/50radまでは、C600A試験体とほぼ同様な性状を示した。1/25radの加力では、ピークに達する前に若干耐力低下が生じたが、1/25radの加力を終了するまで、曲げ破壊特有の性状を示した。1/25radでの繰り返し加力では、付着劣化による剛性低下が生じた。この試験体の破壊性状も曲げ破壊(F)と判断した。

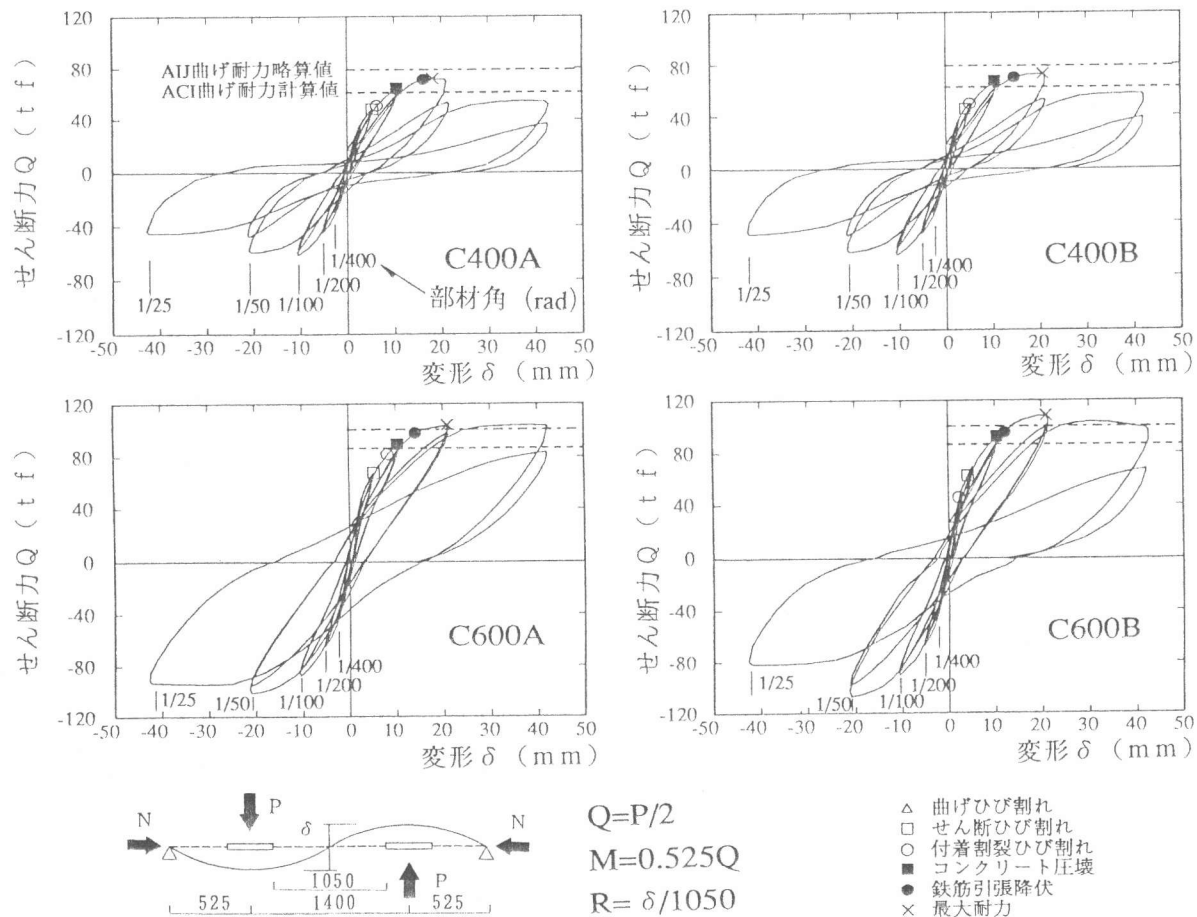


図-3 荷重-変形関係

3.2 変形

各試験体の荷重-変形関係(Q-δ曲線)を図-3に示す。

Fc400の両試験体(C400A、C400B)ともに、1/100radのピーク時にコンクリートの圧壊が生じ、ACI曲げ耐力計算値(表-5参照)に達した。1/50radのピークに達する前に、主筋の引張降伏と同時に急激に剛性が低下し、ピーク付近で最大耐力を示した。1/50radの繰り返しの耐力維持率(1サイクル目に対する2サイ

ループの耐力比)は8割以下と低く、ループ性状もスリップ型になった。その後の加力においても、典型的なスリップ型のループ性状を示した。この両試験体の荷重-変形関係には顕著な差は見られなかった。

Fc600の両試験体(C600A、C600B)では、1/100radのピーク時にコンクリートの圧壊が生じ、ACI曲げ耐力計算値に達した。1/50radのピークに達する前に、主筋が引張降伏したが、Fc400の試験体のような急激な剛性低下はなかった。1/50radのピークで最大耐力を示した。1/50radの耐力維持率は9割以上であり、安定したループを示した。1/25rad加力の1サイクル目のピーク時耐力は最大耐力の9割以上を維持でき、安定したループを示したが、1/25radの繰り返しの耐力維持率は8割以下であった。この両試験体の荷重-変形には大差はなかった。

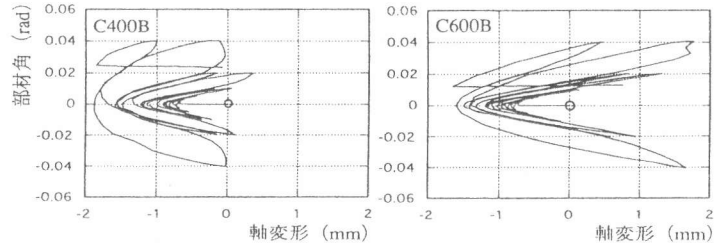


図-4 部材角-軸変形関係

C400BとC600Bの両試験体の部材角-軸変形関係を図-4に示す。大変形時において、C600Bの方がC400Bより軸伸び変形が大きく増えたのは、C600Bは曲げ変形成分が支配的であったのに対し、C400Bは付着劣化によるせん断変形成分が大きくなり、曲げ変形の割合が小さくなったからと思われる。

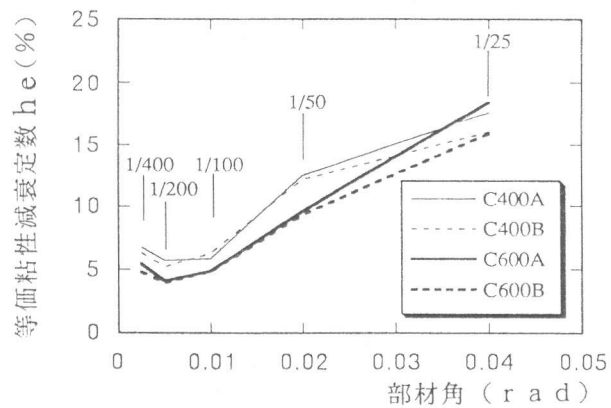


図-5 等価粘性減衰定数の推移

各試験体の履歴ループより求めた等価粘性減衰定数 h_e の部材角に伴う推移を図-5に示す。1/50radまでは、Fc600の試験体はFc400の試験体に比べ、 h_e は若干小さいが、1/50rad以後では、 h_e は大きくなった。また、1/50radまでは、継ぎ手の有無による差はほとんどないが、1/50rad以後では、継ぎ手のある試験体の h_e は継ぎ手のない試験体に比べ若干小さくなった。

3.3 ひずみ

各試験体の主筋A(図-1参照)のひずみ分布を図-6に示す。Fc400の両試験体では、部材角1/50radでは、主筋Aが降伏しなかった(主筋Aと同列の主筋は降伏した。主筋Aは打設上の上端筋である)が、Fc600の両試験体では、主筋Aが降伏した。また、継ぎ手のある主筋と継ぎ手のない主筋のひずみ分布はほとんど差はなかった。

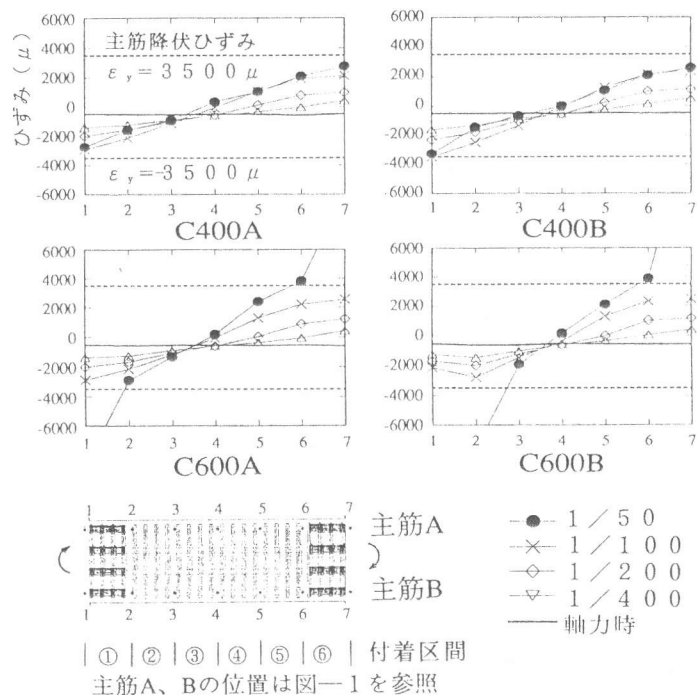


図-6 各試験体主筋Aのひずみ分布

表-5 最大耐力実験値と計算値の比較

試験体	実験値 (tf)	計算値								破壊 モード
		曲げ耐力				せん断耐力		付着割裂耐力		
		計1 (tf)	実 計1	計2 (tf)	実 計2	計3 (tf)	実 計3	計4 (tf)	実 計4	
C400A	71.8	78.6	0.91	60.8	1.18	76.3	0.94	50.1	1.43	FB
C400B	72.8	78.6	0.93	62.0	1.17	78.0	0.93	55.2	1.32	FB
C600A	104.3	100.4	1.04	86.2	1.21	98.1	1.06	97.9	1.07	F
C600B	109.0	100.4	1.09	86.3	1.26	98.2	1.11	98.2	1.11	F

計1: A I J 曲げ耐力略算値
 $bQu = Mu/a$ $Mu = 0.8a_s \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D [1 - N/(bd\sigma_c)]$
 a_s : 引張主筋断面積 σ_y : 主筋降伏強度 D : 柱せい N : 軸力
 b : 柱幅 σ_c : コンクリート圧縮強度

計2: A C I 曲げ耐力計算値
 (平面保持を仮定し、圧縮線コンクリートのひずみが3000 μ に達した時の曲げ耐力)

計3: R C 終局型設計指針のせん断A法による計算値 ($R_p = 1/100$ radとした)
 $Qu = b \cdot j_s \cdot P_w y \cdot \sigma_w \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_c / 2$
 j_s : 主筋間距離 P_w : 横筋比 $\sigma_w y$: 横筋降伏強度 ν : コンクリート有効圧縮強度

計4: R C 終局型設計指針により求めた付着割裂耐力 (ヒンジあり、全割裂モード)
 $Qbu = (\tau_{bu} / \tau_f) bQu$
 τ_{bu} : 付着割裂強度 τ_f : 主筋降伏時の付着割裂応力度 bQu : A I J 曲げ耐力

破壊モード: FB: 曲げ降伏後の付着割裂破壊 F: 曲げ破壊

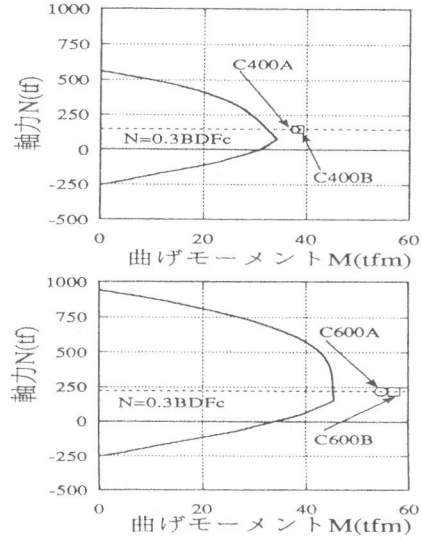


図-7 M-N曲線及び
実験最大耐力

4. 考察

4.1 最大耐力の検討

各試験体の最大耐力実験値と計算値との比較を表-5に示す。Fc400とFc600において、継ぎ手のある試験体の最大耐力は継ぎ手なしの試験体の最大耐力よりわずかに高かった(1~5%)。これは、4試験体ともコンクリート圧壊で終局耐力が決まり、継ぎ手部は鉄筋一般部よりも断面積が大きく、より高い圧縮応力を負担できるからと思われる。曲げ降伏後付着割裂破壊となったFc400の両試験体の最大耐力実験値はACI曲げ耐力計算値より大きい、AIJ曲げ耐力略算値に達しなかった。これはこの両試験体の全引張主筋が降伏する前に、付着割裂劣化及びコンクリートの圧壊が生じたため、主筋の高強度が十分発揮できなかったからと思われる。この両試験体の最大耐力はRC終局型設計指針式⁴⁾による付着割裂耐力のそれぞれ1.43、1.32倍で、設計付着割裂耐力を大きく上回った。曲げ破壊となったFc600の両試験体では、引張降伏及び圧縮降伏が同時に生じ、最大耐力はACI曲げ耐力計算値及びAIJ曲げ耐力略算値のいずれに対しても上回り、柱主筋の高強度が十分発揮できた。

図-7にACIの方法による曲げモーメントM-軸力N曲線及び各試験体の最大耐力を示す。曲げ降伏後付着割裂破壊となったFc400の両試験体では、最大耐力はACI曲げ耐力を少し上回ったが、曲げ破壊したFc600の両試験体では、最大耐力はACI曲げ耐力を大きく上回った。

4.2 付着性状

各試験体の主筋Aの付着応力分布を図-8に示す。Fc400の両試験体では、1/100radでの付着応力度と比べ、1/50radでの付着応力度はほとんど増加しなかった。また、その時点の付着応力度が付着割裂強度を越え

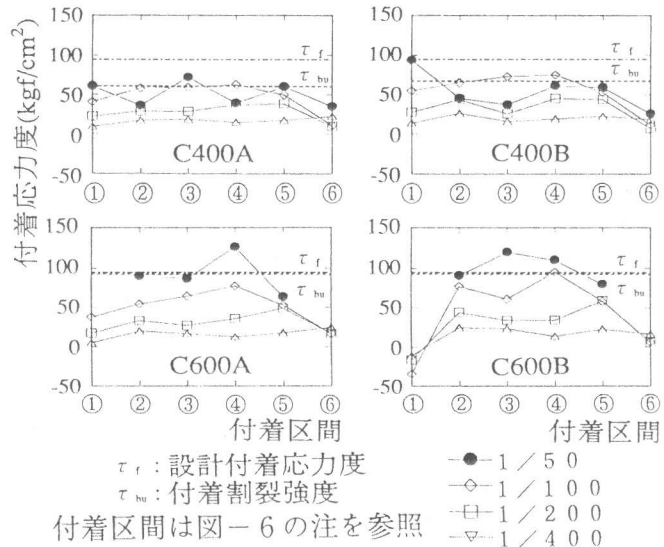


図-8 各試験体主筋Aの付着応力分布

る領域は少なかった。Fc600の両試験体では、1/50radにおいてヒンジゾーンの主筋が降伏し、ヒンジゾーンが付着を負担しないので、ヒンジゾーン以外の区間の付着応力度は1/100radの付着応力より大きく増加し付着割裂強度及び設計付着応力度より大きかった。

表-6に各試験体の1/50rad (最大耐力)時の主筋付着応力度、主筋降伏時の平均付着応力度(設計付着応力度)及び付着割裂強度を比較検討した結果を示す。曲げ降伏後の付着割裂破壊となったFc400の両試験体では、最大耐力時の平均付着応力度は、設計付着応力度に達しなかったが、主筋の付着割裂強度を大きく上回った。曲げ破壊となったFc600の両試験体では、最大耐力時の平均付着応力度は、設計付着応力度と付着割裂強度の両方を上回った。

表-6 主筋付着応力の検討

試験体	主筋位置	R=1/50rad 時の平均付着 応力度 $\tau_{1/50}^{(1)}$	主筋降伏 時平均付着 応力度 $\tau_{1/50}^{(2)}$	主筋付着 割裂強度 $\tau_{su}^{(3)}$	設計付着応力度		設計付着 応力度 $\tau_{1/50}$
					$\tau_{1/50}$	τ_{su}	
C400A	主筋A	75.6	94.2	60.1	0.80	1.26	0.64
	主筋B	86.1			0.91	1.43	
	平均	80.8			0.86	1.35	
C400B	主筋A	80.4	94.2	66.2	0.85	1.21	0.70
	主筋B	51.0			0.54	0.77	
	平均	65.7			0.70	0.99	
C600A	主筋A	91.8	94.2	91.9	0.97	1.00	0.97
	主筋B	97.7			1.03	1.06	
	平均	94.8			1.00	1.03	
C600B	主筋A	100.5	94.2	92.2	1.06	1.09	0.98
	主筋B	99.8			1.06	1.08	
	平均	100.1			1.06	1.09	

注：1) 部材角1/50rad時の主筋の付着応力を②、③、④、⑤区間で負担していると仮定した平均付着応力度。(付着区間の定義は図-6の注を参照)

2) 下式により計算した主筋降伏時平均付着応力度(設計付着応力度)、付着長さは(L-d)であり、注1)に仮定した付着長さ(L-D)とほぼ同じである。

$$\tau_{1/50} = 2\sigma_y d_s / 4(L-d)$$

σ_y : 主筋降伏応力度 d_s : 主筋呼び径
L: 柱クリアランス D: 柱せい d: 柱有効せい

3) RC終局型設計指針により求めた付着割裂強度。

5. まとめ

高強度鉄筋USD685を主筋とした柱の曲げせん断実験を行い、以下の知見が得られた。

- 高強度鉄筋USD685を柱主筋とする場合、Fc400のコンクリートとの組み合わせにおいては、曲げ降伏後付着割裂破壊し、主筋の高強度が十分に発揮できなかったが、Fc600のコンクリートとの組み合わせにおいては、靱性のある曲げ破壊となり、主筋の高強度が発揮できる結果となった。
- 柱主筋の付着割裂強度に対するRC終局型設計指針による評価値は安全側であった。
- 柱ヒンジゾーンの最も応力条件の厳しい位置に機械式継ぎ手を設けた場合、付着割裂ひび割れは継ぎ手のない試験体より若干早く生じるが、破壊性状に与える影響は小さかった。荷重-変形関係も継ぎ手の有無により大差が無かった。
- 高強度鉄筋を主筋とする柱部材の曲げ耐力は、引張主筋が降伏すれば、A I J曲げ耐力略算式より良く評価できる。しかし、高圧縮軸力を受ける柱では、コンクリートの圧壊で部材の終局を決める場合があり、A I J曲げ耐力略算式は柱の曲げ耐力を過大評価する恐れがある。一方、圧縮縁コンクリートのひずみを制限するA C I曲げ耐力計算式は高強度コンクリート柱部材の曲げ耐力を過小評価する。

参考文献

- 別所ほか、「高層鉄筋コンクリート造建物の柱及び柱はり接合部に関する実験的研究」鹿島技術研究所年報 第27号 PP.85~94 1979.6
- 別所ほか、「30階建高層鉄筋コンクリート造建物の柱及び柱はり接合部に関する実験的研究」鹿島技術研究所年報 第34号 PP.107~114 1986.6
- 丸田ほか、「高強度材料を用いた高層RC柱の弾塑性挙動」コンクリート工学年次論文報告書 第14巻 第2号 PP.523~529 1992.6
- 「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」日本建築学会 1990.11