

# (14) 高強度鉄筋を内蔵した大径厚比円形CFT柱脚部の力学的性状に関する実験的研究

黒木 歩<sup>1</sup>・喬 崎雲<sup>2</sup>・中村 泰教<sup>3</sup>・市川 康<sup>4</sup>・吉川 秀章<sup>5</sup>・河野 昭彦<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州大学大学院・修士 人間環境学府空間システム専攻(〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10-1)  
E-mail:kuroki\_09g@web5.arch.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 九州大学大学院・修士 人間環境学府空間システム専攻(〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10-1)  
E-mail:qiao\_08g@web5.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 新日鉄エンジニアリング(株)・修士(工学)(〒293-0011 千葉県富津市新富20-1)  
E-mail:nakamura.yasunori1@nsc-eng.co.jp

<sup>4</sup>正会員 新日鉄エンジニアリング(株)・博士(工学)(〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1大崎センタービル)  
E-mail:ichikawa.yasushi@nsc-eng.co.jp

<sup>5</sup>正会員 新日鉄エンジニアリング(株)・修士(工学)(〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1大崎センタービル)  
E-mail:yoshikawa.hideaki@nsc-eng.co.jp

<sup>6</sup>正会員 九州大学大学院教授・工博 人間環境学研究院(〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10-1)  
E-mail:kawano@arch.kyushu-u.ac.jp

本研究は、大径厚比の円形鋼管を用いたCFT柱の柱脚部に高強度鉄筋を内蔵したCFT柱脚部の力学的性状に関する実験的研究である。通常、CFT柱の柱脚工法として根巻き・埋込み形式が考えられる。根巻き形式では根巻き形状が平面計画上の制約となり、埋込み形式では、鉄骨建て方時期を早める必要があり施工工程に影響を及ぼす。そこで本研究では、円形CFT柱脚部を、接合鉄筋として高強度鉄筋を内蔵したRC造とすることを考え、その応力伝達機構、耐力、および変形性能を明らかにすることを目的とする。柱脚部分では、鋼管と基礎コンクリート間は縁が切れており、鋼管の軸方向応力は機械式ずり止めによって充填コンクリートへ、付着によって充填コンクリートから接合鉄筋へ、さらに接合鉄筋から基礎コンクリートへと伝達される。

**Key Words :** CFT Column Base, High Strength Re-bars, Bending Strength, Deformation Performance, Stress Transmission

## 1. 序

### (1) 研究背景

コンクリート充填鋼管(以下、CFT)柱は、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鋼管を組み合わせた優れた構造部材で、今や超高層建築物や重量構造物等には欠かせない合成構造部材である。またCFT柱耐力の増大を目的に、CFT柱内に鉄筋を主筋として挿入し、よりコンパクトな断面とした柱材や柱梁接合部に関する実験および解析が報告されている。これらは、高層RCのRC柱を薄肉鋼管で被覆する考えと、比較的厚肉のCFT柱に鉄筋を挿入する考えとに区分される。前者には川端等<sup>1)</sup>の研究があり、後者には山内等<sup>2)</sup>、中山等<sup>3)</sup>および岩岡等<sup>4)</sup>の研究がある。何れも490N級の高強度鉄筋が使用され、柱耐力の算定には鉄筋耐力の累加が可能であり、柱梁接合部では柱の曲げ耐力の伝達が十分に可能であることが示されている。

一方、柱脚部では十分な鉄筋の定着長をとれば内蔵鉄筋も引張力を負担できるため、鋼管による引張力伝達の接合部要件が緩和でき、ベースプレートやアンカーボルトのコンパクト化や、応力によっては省略も可能となり、施工性の向上が期待される。

### (2) 研究目的

一般的に、CFT柱の柱脚工法には根巻き・埋込み形式が考えられる。根巻き形式ではRC根巻き自身の形状、大きさが平面計画に制約を与える。一方、埋込み形式では予め鉄骨を埋込む必要があるため、施工工程に影響を及ぼす。

そこで本研究では、円形CFT柱と基礎コンクリートを590N、685N級の高強度鉄筋を介して接合し、部材構成を簡略化することを考える。柱脚部分では鋼管と基礎コンクリートを直接結合せず力学的に縁を切りRC断面とする。つまり、円形鋼管はベースプレートやアンカーボルト等で基礎コンクリートには結合されて

おらず、全くフリーな状態となる。

本研究では、高強度鉄筋を内蔵したCFT柱脚部について、応力伝達機構、耐力および変形性能を明らかにすることを目的とし、以下の4点に着目し実験による検証を行った。

軸力比の影響（軸力比0.10, 0.25, 0.45）

コンクリート強度の影響（ $F_c=36, 60\text{N/mm}^2$ ）

CFT曲げ耐力とRC曲げ耐力差の影響

CFT柱せん断補強筋の影響（帯筋比0.1%, 0.2%）

表2.1 試験体諸元

試験体No.	1	2	3	4	5	6
鋼管 サイズ、種類	390×4, SKK490					
コンクリート	設計基準強度			60		36
	種類 普通コンクリート					
接合鉄筋	鉄筋量			8-D19		16-D19
	種類			USD590		USD685
	鉄筋比			4.0%		2.0%
帯筋	鉄筋量			D6@90		D6@180
	鉄筋比			0.2%		0.1%
載荷軸力 $N$	1426	2575	559	3798	1421	1509
軸力比	0.24	0.43	0.10	0.43	0.25	0.24

(N/mm<sup>2</sup>, kN)

## 2. 実験

### (1) 実験概要

円形鋼管内に高強度鉄筋を内蔵した円形CFT柱脚部の部分縮小試験体を用いて、柱に一定軸力 $N$ を作用させた状態で、ピン支持の柱頭部に繰り返し水平力を加える正負交番載荷試験を行った。

### (2) 試験体

試験体形状、および試験体諸元をそれぞれ図2.1, および表2.1に示す。試験体は同一外形の6体とし、軸力比、コンクリート強度、接合鉄筋量および帯筋量を実験パラメータとした。

円形鋼管柱は6体全て 400×9を切削加工し、径厚比を100程度としている。

鋼管下端の内面にはフラットバー（6×13, SS400）をリング状に2段にわたり溶接し、機械式ずれ止めとしている。

接合鉄筋量は、試験体5については載荷軸力 $N$ に対して、柱脚部RC断面による一般化累加終局曲げ耐力がCFT柱の曲げ耐力を下回るように設定し、他は同等程度となるようにした。試験体状況写真を図2.2に示す。

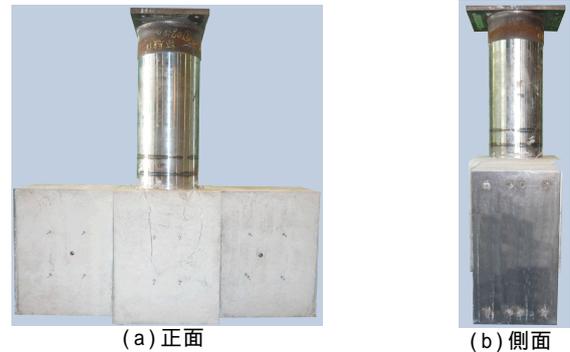


図2.2 試験体状況写真

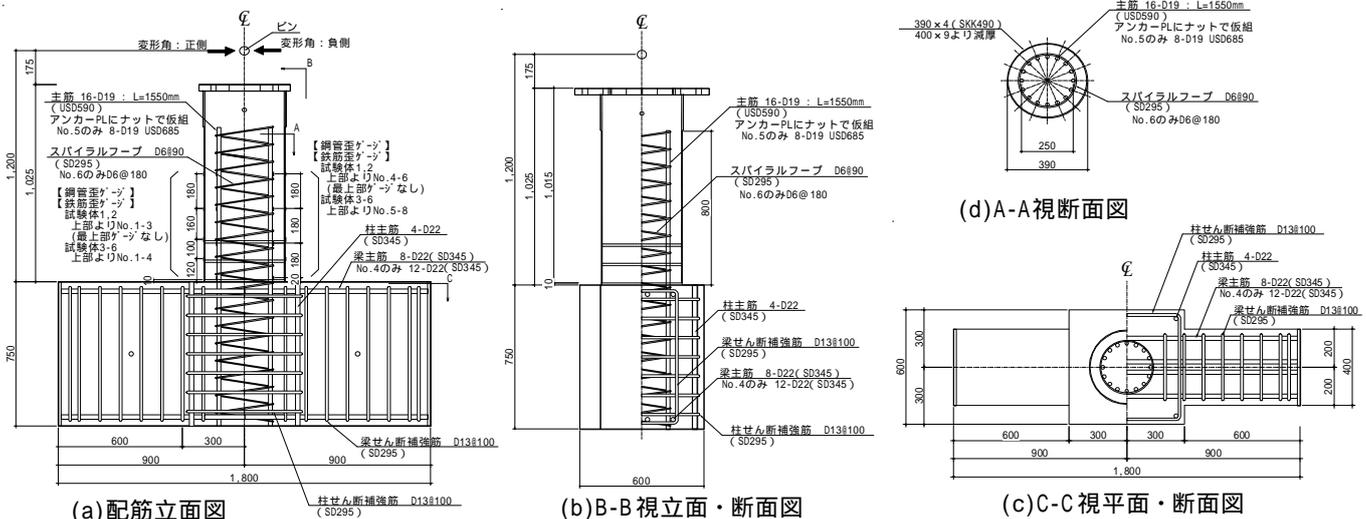


図2.1 試験体形状

### (3) 材料の機械的性質

#### a) 鋼材

試験体に使用した鋼材の引張試験から得た機械的性質を表2.2に示す。降伏応力度は0.2%オフセット法に基づくものであり、いずれの鋼材についても機械的性質の規格値を満足している。

表2.2 鋼材の機械的性質

サイズ	鋼種	試験体No.	降伏 応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張 応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏比	降伏歪 [%]	伸び [%]
390×4	SKK490	1,2	446	591	0.75	0.23	33.4
		3	409	527	0.78	0.22	25.3
		4	428	550	0.78	0.22	28.7
		5,6	431	550	0.78	0.22	25.7
D19	590N級	1,2	625	843	0.74	0.32	12.7
		3,4,6	643	863	0.74	0.33	13.2
		685N級	5	740	914	0.81	0.37

#### b) コンクリート

実験に使用したコンクリートの調合および、シリンダー圧縮試験から得られた強度を表2.3に示す。スランブおよび空気量はコンクリート打設時の実測値である。

### (4) 加力装置

図2.3に加力装置を示す。試験体は反力梁に固定用ブロックを介してPC鋼棒で固定され、鉛直荷重は5000kN試験機、水平力は反力フレームに接合された1000kN油圧ジャッキで試験体柱頭部に加えられる。

反力梁は2点ローラー支持であり、柱頭部に水平力を加えた際に反力梁が水平移動することにより、柱頭部分とコンクリート基礎部分とに相対的な水平変位が生じる。

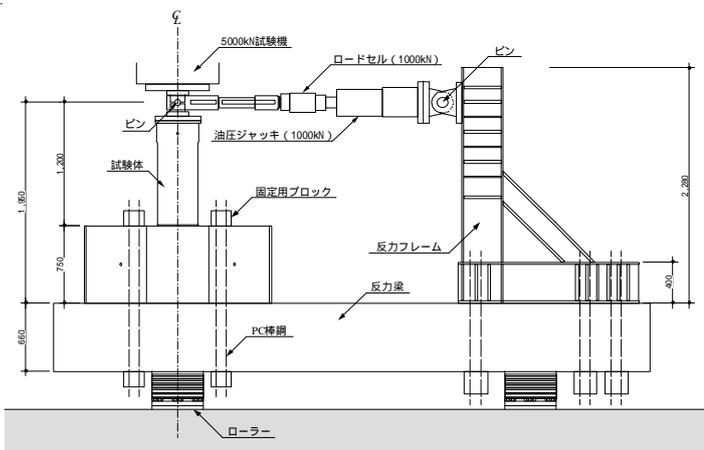


図2.3 加力装置

### (5) 加力方法および測定方法

基礎梁天端から  $L=1.2\text{m}$  上部の柱頭に作用させる圧縮軸力  $N$  を一定に保持した状態で、水平力  $P$  を載荷する。水平力は高さ  $L$  の部材変形角  $R$  で制御し、 $R$  を  $\pm 0.5\% \sim \pm 3\%$  まで  $0.5\%$  ずつ漸増させ、各2サイクルずつ載荷する。その後、負方向に押切り、柱頭部の水平変位  $80\text{mm}$  ( $R = 6.7\%$ ) まで載荷を行った。加力モデルおよび水平力載荷プログラムをそれぞれ図2.4、図2.5に示す。また、接合鉄筋及び鋼管の歪ゲージ貼付位置を図2.1(a)に併せて示す。貼付は曲げモーメント最外縁のみとした。

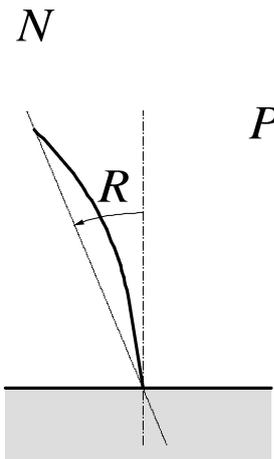


図2.4 加力モデル

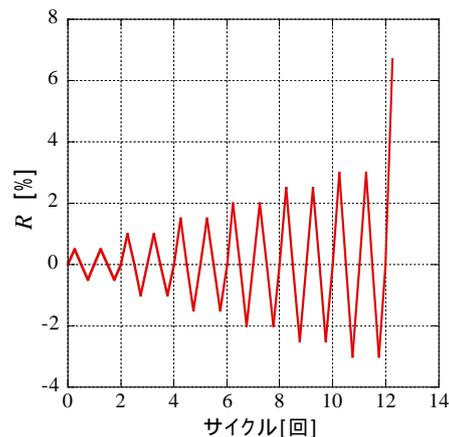


図2.5 水平力載荷プログラム

表2.3 充填コンクリートの調合および強度

試験体 No.	$F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	実強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [kN/mm <sup>2</sup> ]	セメント [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> ]	細骨材率 [%]	混和剤 [kg/m <sup>3</sup> ]	W/C [%]	スランブ [cm]	空気量 [%]
1	36	32.8	39.33	377	181	709	1023	42.1	0.942	48.0	15.5	5.5
2	36	33.6	38.66	377	181	709	1023	42.1	0.942	48.0	15.5	5.5
3	36	31.3	32.06	377	181	706	1023	42.0	0.942	48.0	19.5	5.2
4	60	61.4	40.07	464	170	807	943	47.4	5.43	36.7	21.5	2.5
5	36	32.0	35.36	377	181	706	1023	42.0	0.942	48.0	19.5	5.2
6	36	34.8	34.76	377	181	706	1023	42.0	0.942	48.0	18.0	4.5

セメント種類：普通ポルトランドセメント 粗骨材最大寸法：20mm  $F_c$ ：設計基準強度 W/C：水セメント比

### 3. 実験結果

#### (1) 柱頭水平荷重 - 変形角関係

柱頭水平荷重  $P$  - 変形角  $R$  関係を図3.1に示す。図中の破線は、柱脚部RC断面の一般化累加強度のスケルトンカーブである。試験体1～3では軸力比のみが異なるが、軸力比の増加に伴い水平耐力も増大している。試験体3では軸力が小さい為、試験体と反力梁との間でずれが生じ、部材角6%手前で実験を終了している。

試験体1では部材角5.7%、試験体2では4.7%時点で最大水平荷重に達し、軸力比の大きい試験体2の方が早い段階で水平荷重のピークを迎えている。両者ともピーク後の急激な耐力低下は見られず、(変形角5%付近で水平耐力が一度低下しているが、加力・測定装置の安全確認の為に荷重を中断したことによる)高い変形能力を有している。

試験体4では、最大荷重到達後の水平耐力の低下勾配はやや大きく、これはRCスケルトンカーブの傾きにほぼ等しい。

試験体5は、定性的には試験体1と同様であるが、接合鉄筋量が少ない為、最大水平耐力は小さく出ている。

#### (2) 柱脚部曲げモーメント - 変形角関係

図3.2に柱脚部曲げモーメント  $M$  - 変形角  $R$  関係を示す。 $P$  効果を考慮し、柱脚部曲げモーメント  $M$  は次式により算定した。

$$M = P \cdot L + N \cdot \Delta \quad (1)$$

ここで、

- $P$  : 水平力
- $L$  : 水平加力点の高さ
- $N$  : 一定圧縮軸力
- : 柱頭部の水平変位

いずれの試験体も交番荷重の最終サイクル $\pm 3\%$ 付近でも曲げ耐力低下を起こさず、安定した履歴性状を示している。その後の押切荷重では、加力装置の都合上、最大曲げ耐力の確認前に荷重を終了したが、変形角6～7%付近でも曲げ耐力低下を起こさず、高い変形能力を有している。図3.2(a)より、試験体1(帯筋比0.2%)と試験体6(帯筋比0.1%)を比較した場合、両者の履歴性状に殆ど相違が見られないことから、実験の範囲内においては、せん断補強筋比が0.1%でも問題無いと考えられる。図3.2(b)より、試験体2( $F_c/34$ )と試験体4( $F_c/61$ )を比較した場合、同軸力比(=0.45)の下で、コンクリート強度の高い試験体4の方が大きく上回る曲げ耐力を発揮している。

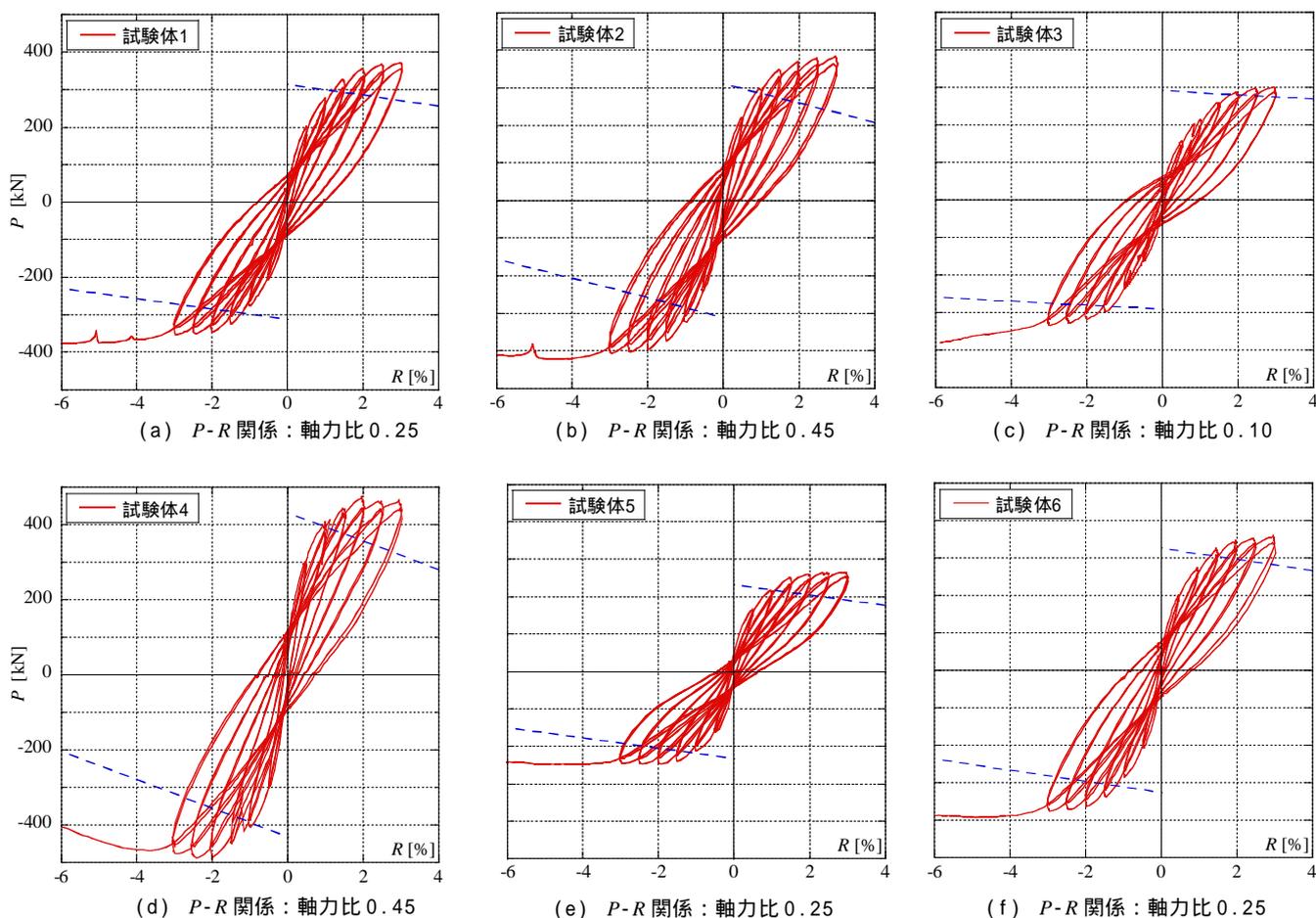


図3.1 柱頭水平荷重  $P$  - 変形角  $R$  関係

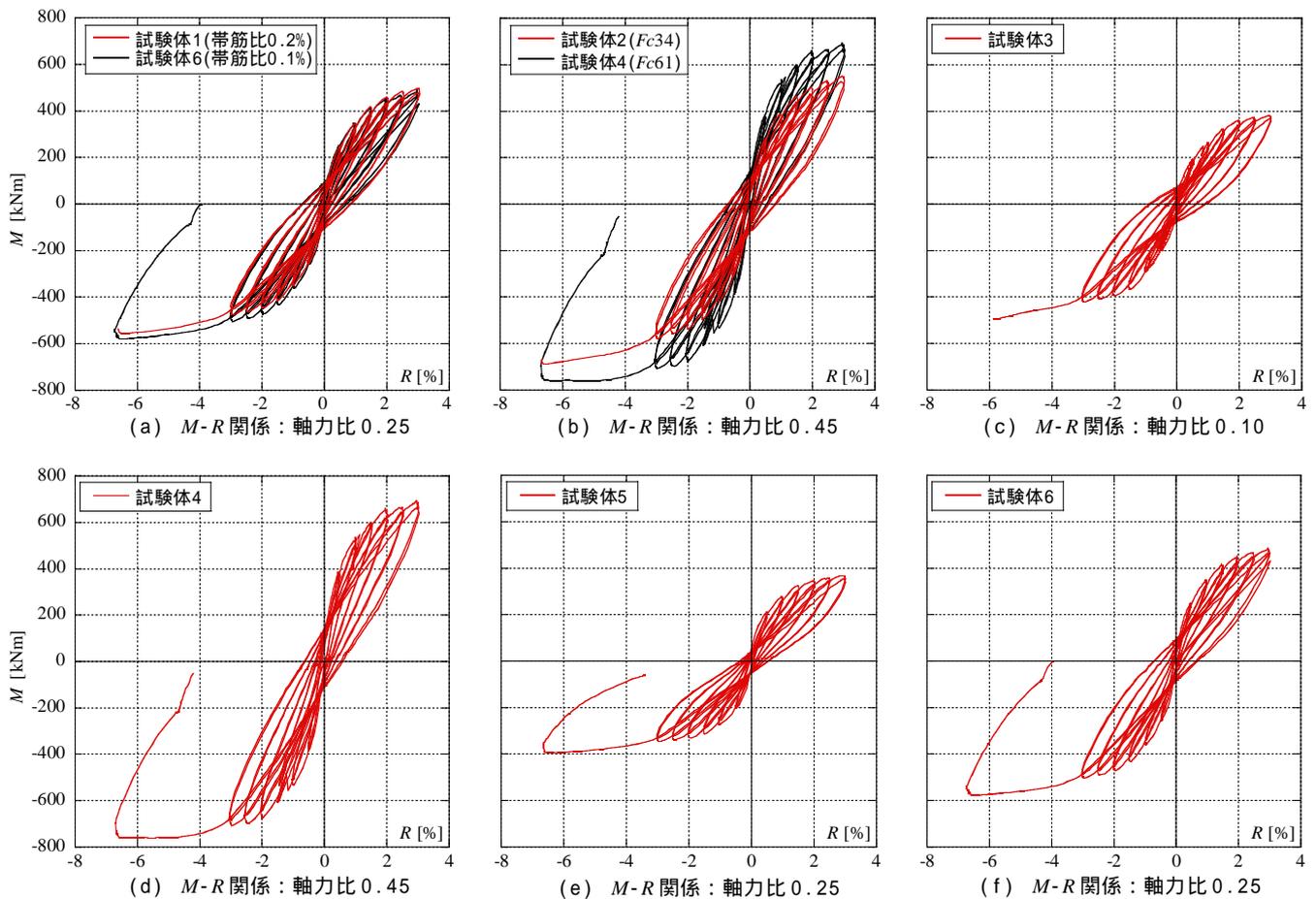


図3.2 柱脚部曲げモーメント $M$  - 変形角 $R$ 関係

### (3) 終局曲げ耐力

CFT断面（シャフト部分）とRC断面（柱脚部）の終局時の一般化累加終局 $M-N$ 曲線（計算値）を図3.3に示す。また、実験から得られた各変形角振幅における耐力（実測値）も併せて同図中に示す。

いずれの試験体についても、変形角1.5%時点でRC断面の終局耐力の計算値を上回っている。特に軸力比の大きい試験体2,4（軸力比0.45）については部材角1.0%時点で既に計算値と同等以上の耐力を発揮している。いずれの試験体についても変形角振幅の増大に伴い耐力は上昇し、計算によるRC断面の一般化累加強度を上回る十分な耐力を確認出来た。

### (4) 曲げモーメントの負担状況

変形角1%時点における、鋼管、接合鉄筋、およびコンクリートの負担曲げモーメントの高さ方向分布を図3.4に示す。鋼管および接合鉄筋の曲げモーメントは、曲げ最外縁に貼付した歪ゲージにより測定した歪値に基づき算出し、コンクリート負担分は、全体の曲げモーメントから鋼管と接合鉄筋の負担分を差し引いた値とした。

但し、歪値は弾性域にあり、平面保持の仮定が成立することを前提とし、歪値にヤング係数を乗じることで各高さにおける負担曲げモーメントを算出した。

高さ0mmはコンクリート基礎天端、1200mmは水平力載荷点（柱頭）を意味する。何れの試験体でも上段ずれ止めのある高さ200mm付近で接合鉄筋と鋼管の負担曲げモーメント量の大小関係が逆転し、高さ200mm以下では鋼管に比べ接合鉄筋の負担量が卓越する。本結果より、鋼管の軸方向力は機械式ずれ止めを介して充填コンクリートへ、付着力によって充填コンクリートから接合鉄筋へ伝達されたことを確認できる。従って、鋼管と基礎コンクリートの縁は切れているが、鋼管内面に取り付けられた機械式ずれ止めによって確実に力を伝達できたといえる。

また、コンクリートの負担する曲げモーメントの大小関係は、軸力比の大小関係と対応しており、接合鉄筋量が半分の試験体5では、接合鉄筋の負担曲げモーメントが他の試験体と比べて小さいことが分かる。

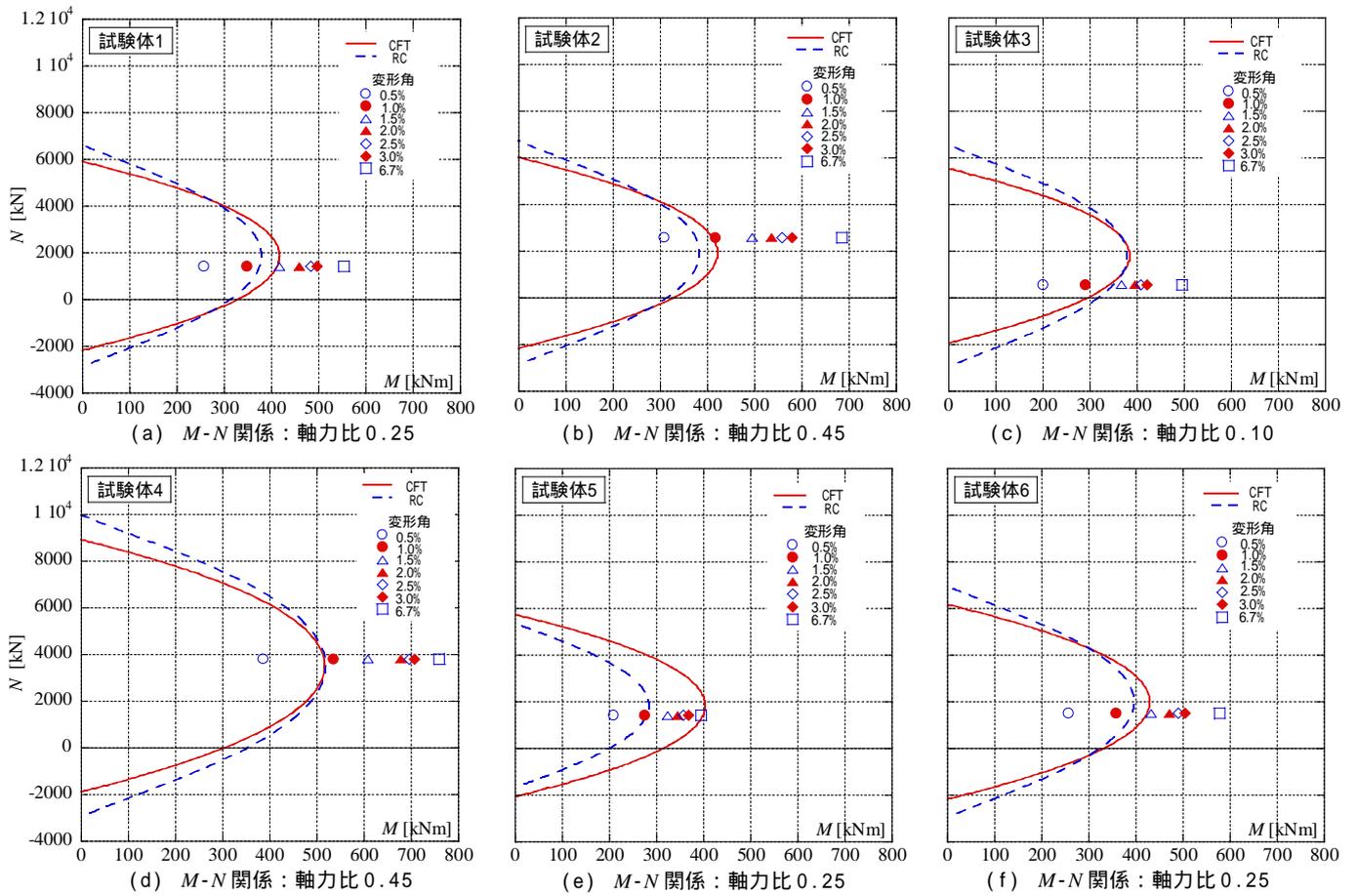


図3.3 一般化累加終局M-N曲線

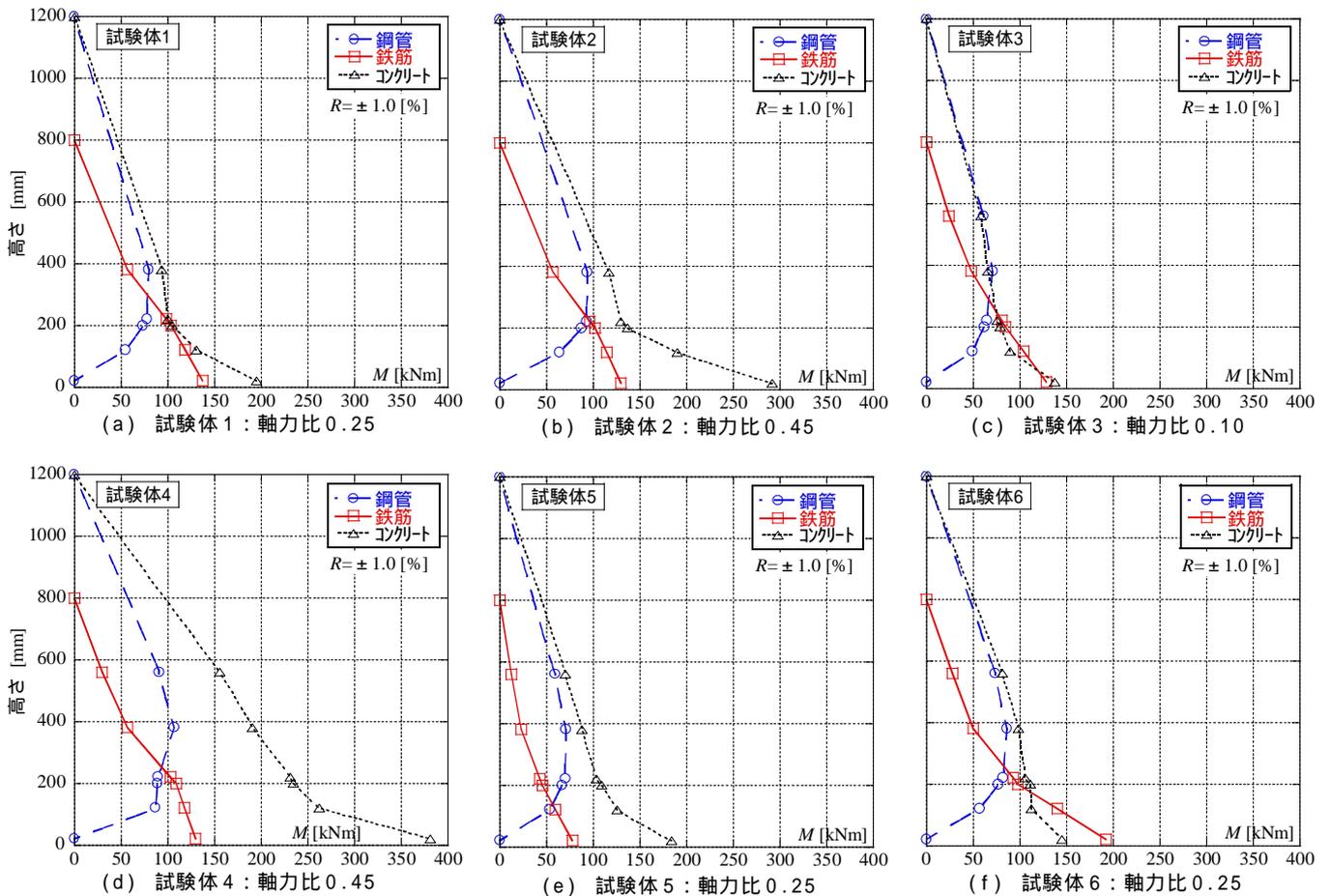


図3.4 曲げモーメントの負担状況

#### (5) 破壊状況

図3.5に試験体2の押切載荷後の破壊状況写真を示す。押切載荷後の損傷はCFT柱と基礎コンクリートの境界となる柱脚部分に集中した。柱脚部の曲げ圧縮側では鋼管下端部の基礎コンクリート天端への沈み込みが確認された。また、曲げ引張側では柱脚部RC断面でひび割れを生じ、近傍の基礎コンクリート上面を薄く剥ぎ取りつつ接合鉄筋が伸び変形していた。柱脚部RC断面と基礎コンクリート上面のひび割れは、変形角が1.5%を超える辺りから発生し、変形角の増大に伴ってひび割れ幅も増大した。

#### 4. 結論

高強度異形鉄筋を接合鉄筋として内蔵し、柱脚部断面をRC造とすることで部材構成を簡略化した薄肉円形CFT柱脚について、柱頭部に所定の一定圧縮軸力と水平力を作用させた交番載荷試験を行い、以下の知見を得た。

- ・CFT断面（シャフト部）とRC断面（柱脚部）の終局曲げ耐力がほぼ等しくなる様に設定した試験体と、RC断面をCFT断面より小さくした試験体の柱脚部曲げ耐力は、変形角1.0%～1.5%時点で各々の一般化累加強度を上回った。

- ・柱脚部曲げモーメント - 変形角関係から、柱脚部の履歴性状は全ての試験体において変形角が6.0%を超えても曲げ耐力低下を起さず、安定した紡錘型の履歴ループを描き、十分な変形能力を示した。
- ・CFT柱部分のせん断補強筋比は0.1%であっても終局曲げ耐力、履歴特性および破壊性状に及ぼす影響は殆ど無かった。
- ・同軸力比の下、高強度コンクリートを使用した試験体の方が、より大きな終局曲げ耐力を示した。
- ・計測歪から算出した鋼管と接合鉄筋の負担曲げモーメントは、上段ずれ止め上部では鋼管、下部では接合鉄筋の負担曲げモーメントが卓越し、鋼管から接合鉄筋に確実に応力伝達が行われた。つまり、鋼管の鋼管下端内面に設けた機械式ずれ止めによって、鋼管に作用する軸方向力は充填コンクリートに伝達され、付着によって充填コンクリートから接合鉄筋に、接合鉄筋から基礎コンクリートに伝達されることが確認された。

以上より、本CFT柱脚部の応力伝達機構、耐力および変形性能を明らかにし、十分に実用へ供することが可能であることを示した。

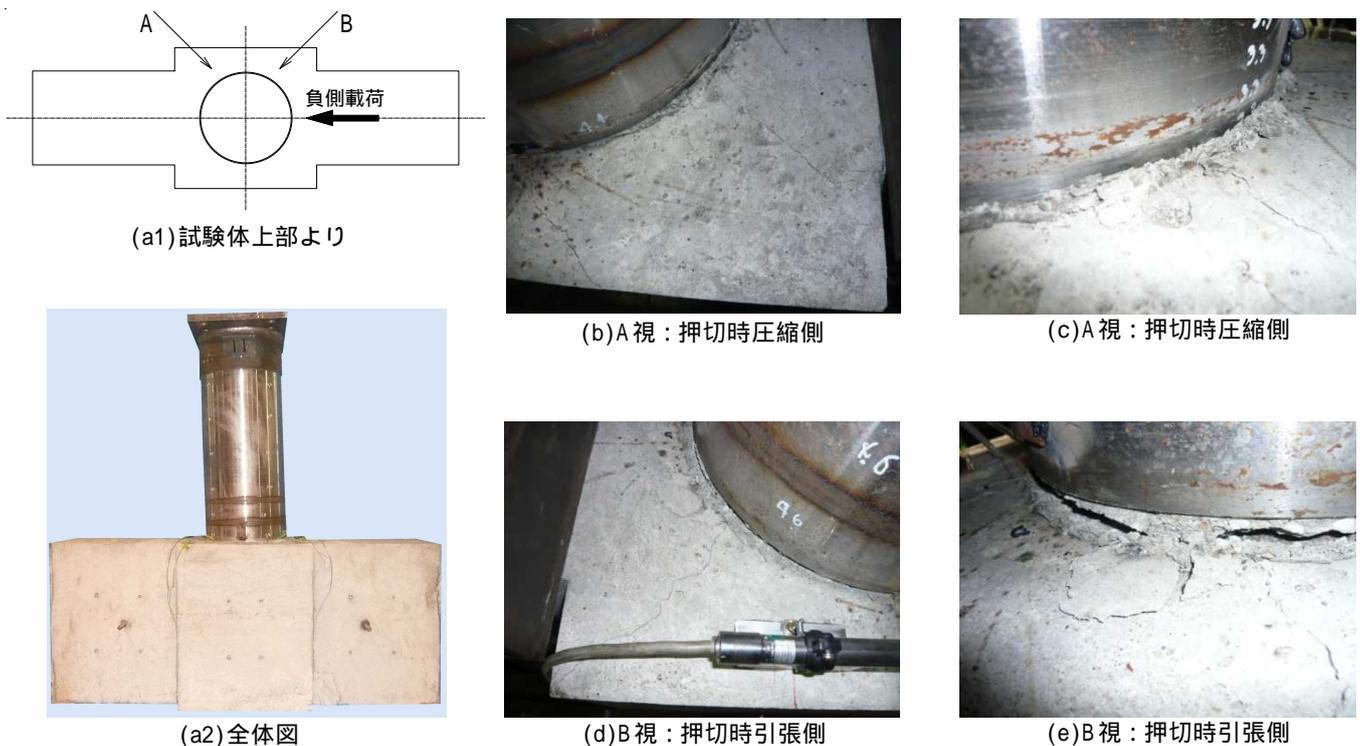


図3.5 押切載荷後の柱脚部破壊状況：試験体2

謝辞：実験に際し，縄愛子氏（新日本製鐵），窪寺弘顕氏（九州大学技術職員）のご協力を頂きました．ここに感謝の意を表します．

#### 参考文献

- 1) 川端一三：鋼管で囲んだ高強度鉄筋コンクリート柱（RCFT構造）の開発その1～5，日本建築学会大会梗概集，2000年，2001年，2003年．
- 2) 山内茂一等：鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造に関する実験的研究その1～7，日本建築学会大会梗概集，2005年，2006年．
- 3) 中山信雄等：鉄筋を内蔵する円形CFTの力学性状その1～4，日本建築学会大会梗概集，2005年，2006年．
- 4) 岩岡信一等：鉄筋を挿入した角形CFT柱部材の曲げせん断実験その1～2，日本建築学会大会梗概集，2007年．

## EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL BEHAVIOR OF CIRCULAR CFT COLUMN BASE WITH HIGH STRENGTH RE-BARS

Furu KUROKI, Qiyun QIAO, Yasunori NAKAMURA  
Yasushi ICHIKAWA, Hideaki YOSHIKAWA and Akihiko KAWANO

This experimental study focuses on the mechanical performance of large diameter-thickness ratio CFT column base with built-in high strength reinforcements. Generally, for CFT column base, there are two types: concrete encased column base and embedded column base. For concrete encased column base, the floor plan will be constrained by the shape and largeness of the base. As to the embedded column base, the process of the construction work will be affected by the necessity of the earlier built-up of steel frame. The stiffness and deformation capacity of circular CFT column base, which is considered as the RC structure with built-in high strength reinforcements as the joint reinforcements. In the column base proposed in this study, the steel tube is not connected to the concrete foundation, hence, the axial force of the steel tube is transferred to the concrete filled by the mechanical ring, then transferred to joint reinforcements by bonding, and finally transferred to the concrete foundation.