

(15) 鉄筋内蔵 C F T の柱継手と柱脚に関する 実験的研究

喬 崎雲¹・黒木 歩²・河野 昭彦³・九谷 和秀⁴・白川 敏夫⁵

¹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.arch.kyushu-u.ac.jp

²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(同上)

E-mail: kuroki_09g@web5.arch.kyushu-u.ac.jp

³正会員 九州大学大学院教授・工博 人間環境学研究院(同上)

E-mail: kawano@arch.kyushu-u.ac.jp

⁴正会員 九州産業大学教授・工博 工学部建築学科(〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

E-mail: kutani@ip.kyusan-u.ac.jp

⁵正会員 九州産業大学・副手 工学部建築学科(同上)

E-mail: toshio@ip.kyusan-u.ac.jp

本研究は、鉄筋内蔵CFTの柱継手と柱脚に関する実験的研究である。柱継手実験については、CFTに鉄筋を内蔵することで鉄筋も応力を伝達するため、鋼管の溶接を部分溶け込み溶接もしくは無溶接にすることが可能となり、施工性の向上につながると考えられる。そこで、鉄筋内蔵CFTの内蔵鉄筋引き抜き試験により、鉄筋の引張り応力が付着、機械式定着及びリングの機械的ずれ止めにより、充填コンクリートを介して鋼管へ伝達される機構を、実験的に調査し、耐力評価を行う。また、柱脚実験では、内蔵鉄筋と僅かな大きさのベースプレートからなるCFT柱脚を提案し、加力実験を実施し、終局曲げ耐力とせん断耐力について検討・考察する。

Key Words : CFT Column Joint and base, Built-in Steel Bar, Stress Transmission, Tensile Strength, Ultimate Strength

1. 序

(1) 研究背景

鉄筋内蔵CFTは欧米諸国で多数導入されているが、理由は耐火設計にある。つまり、無筋の無耐火被覆CFT構造では、火災加熱によって鋼管が抵抗力を失うのに対して、内蔵鉄筋を配したCFTはRC柱として耐力を保持するためである。国外では英国規準BS 5950、ドイツ連邦基準DIN、ヨーロッパ統一規準Euro Code 4、カナダ規準NBCに耐火規定がある。もちろん、内蔵鉄筋の耐力も柱の設計に利用される。国内では、鉄筋内蔵CFTに対応した規準類はまだない。

当初は副次的と考えられた耐力増強効果であったが、高強度鉄筋の使用により高強度化・高靱性化が容易に実現できることが判明し、特に大空間や超高層のCFT柱のコンパクト化や管厚低減、あるいは繰返し荷重に対する履歴性状の劣化抑制や

軸歪累積の抑制など耐震性向上に高い効果が認められている。鉄筋内蔵CFTの耐震研究は、国外ではほとんどないが、国内では2000年頃からゼネコン数社によって研究報告がなされ、実施物件も増えている。

(2) 接合部における内蔵鉄筋のメリット

鉄筋内蔵CFTに期待されるもう一つの大きなメリットは、内蔵鉄筋を利用すれば、充填コンクリートを介して、鋼管の応力を他の鋼管あるいは鉄筋コンクリート(RC)など異種構造部材へ容易に伝達できることである。これによって、柱継手での鋼管の接合は部分溶込み溶接や無溶接が可能となり、露出型柱脚では、回転剛性やせん断耐力の向上、ベースプレートの寸法やアンカーボルト量の大幅な低減が期待できる。また、柱梁接合部では、鉄骨梁と薄肉鋼管CFT柱あるいはRC柱との接合が容易に可能になる。

2. 継手引き抜き実験

(1) 序論

本研究は、鉄筋内蔵コンクリート充填鋼管(CFT)構造の開発の一環である。CFT 柱継手は溶接接合が一般的であるが、CFT に鉄筋を内蔵することで鉄筋も応力を伝達するため、鋼管の溶接を部分溶け込み溶接もしくは無溶接にすることが可能となり、施工性の向上につながると考えられる。そこで、鉄筋内蔵 CFT の内蔵鉄筋引き抜き試験により、鉄筋の引張り応力が付着、機械式定着及びリングの機械的ずれ止めにより、充填コンクリートを介して鋼管へ伝達される機構を、実験的に調査し、耐力評価を行う。

(2) 実験概要

a) 試験体概要

試験体一覧を表 1 に、試験体概要を図 1 に示す。内蔵する鉄筋の本数は 1 本と 8 本の 2 種類である。用いた鋼材の機械的性質を表 2 に、コンクリートの材料特性を表 3 に示す。

1 本内蔵 CFT の鋼管は、径 101.6mm、管厚 3.2mm の円形鋼管と、一辺 100mm、管厚 3.2mm の角形鋼管の 2 種類、鉄筋は、異形鉄筋 D25(SD295A) と PC 棒鋼 23φ(SBPR930/1080) の 2 種類、定着長さは 150mm と 300mm の 2 種類を実験変数とした計 8 体である。鋼管の仕口端部の内面には、6mm×25mm の機械的ずれどめ(リング)がすみ肉溶接されている。また、鉄筋の端部には、径 50mm の円形の定着板を設け、所定の定着長さを取り、設計基準強度 Fc80 のコンク

表1 試験体一覧

試験体名	鋼管	鋼種	棒鋼	定着長さ
C-295-150	○-101.6×3.2	STK400	SD295A (D25)	150mm
C-295-300	○-101.6×3.2	STK400	SD295A (D25)	300mm
C-980-150	○-101.6×3.2	STK400	SBPR930/1080(23φ)	150mm
C-980-300	○-101.6×3.2	STK400	SBPR930/1080(23φ)	300mm
S-295-150	□-100×100×3.2	STKR400	SD295A (D25)	150mm
S-295-300	□-100×100×3.2	STKR400	SD295A (D25)	300mm
S-980-150	□-100×100×3.2	STKR400	SBPR930/1080(23φ)	150mm
S-980-300	□-100×100×3.2	STKR400	SBPR930/1080(23φ)	300mm
C8	○-216.3×4.5	STK400	SD295A (D16,D6)	338mm
S8	□-200×200×4.5	STKR400	SD295A (D16,D6)	338mm

表2 鋼材の機械

鋼材	材種	厚さ, 径 (mm)	ヤング率 (GPa)	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	降伏比 (%)	降伏歪 (%)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
円形鋼管	STK400	2.90	193	408	486	0.84	0.21	24	33
円形鋼管	STK400	4.45	196	415	491	0.84	0.21	14	33
角形鋼管	STKR400	2.94	197	396	449	0.88	0.20	13	32
角形鋼管	STKR400	4.14	204	384	451	0.85	0.19	16	35
D25	SD295	25.4	165	357	549	0.65	0.22	19	16
D16	SD295	15.9	180	333	469	0.71	0.18	11	19

表3 コンクリートの材料特性

材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ヤング係数 (GPa)	終局歪 (%)
45日	79.8	2.43	44.3	0.28
52日	80.2	2.41	44.0	0.26

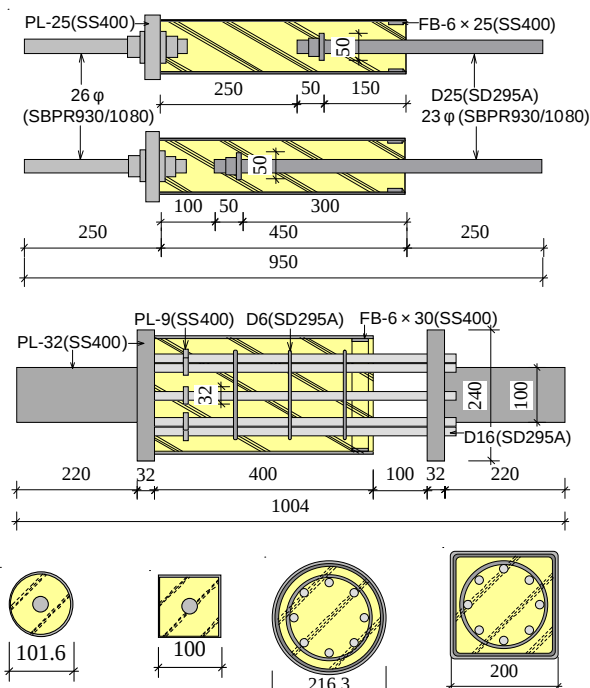


図1 試験体概要

リートを充填させている。

8本内蔵CFTの鋼管は、径216.3mm、管厚4.5mmの円形鋼管と一辺200mm、管厚4.5mmの角形鋼管の2体であり、仕口端部には6mm×30mmのリングを設けている。また、径32mmの定着板を設けた異形鉄筋D16(SD295A)8本を円形に配置し、Fc80のコンクリートを充填させている。

b) 加力方法及び測定方法

加力は、能力2000kN試験機によって内蔵鉄筋の単調引張りを行う。加力状況を写真1に示す。

変位は図2に示すように鋼管長さLの伸びΔLと鉄筋の抜け出し量δを変位計により測定する。歪ゲージ添付位置を図2に示す。鉄筋には、加力側と定着板側に単軸ゲージを、鋼管には、二軸ゲージを両側にそれぞれ2枚ずつ添付している。

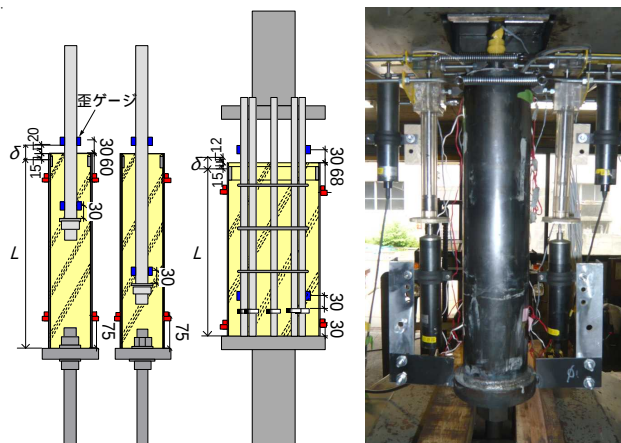


図2 変位計及び歪ゲージによる測定位置

写真1 加力状況

(3) 実験結果

a) 破壊性状

表5に実験結果一覧を、写真2に最終破壊状況を示す。次に示す4タイプの破壊性状が見られた。

A- 鉄筋破断

異形鉄筋のC-295-150、C-295-300、S-295-150、S-295-300、C8、S8はすべて加力側の鉄筋で破断した。

B- 鋼管破断

円形鋼管PC棒鋼のC-980-150、C-980-300では、定着板のナット下30mmの位置で鋼管が破断した。鉄筋の抜け出しもほぼみられず、定着板及びリングの支圧で応力が伝達できたといえる。

C- 支圧破壊 + コーン状破壊

角形鋼管PC棒鋼のS-980-150では、定着板での支圧破壊後、逆四角錐形にコンクリートを形成したままPC棒鋼が抜け出した。

D- 支圧破壊

角形鋼管PC棒鋼のS-980-300では、定着板での支圧破壊後、くさびを形成し¹⁾、定着部が移動することで、コンクリートが周方向へ押し出され、鋼管がはらみ出した。この定着板での支圧破壊とはらみ出しを繰り返しながら徐々に鉄筋が抜け出し、試験機の容量上155mm引き抜き、試験を終了した。

b) 鉄筋の抜け出し性状

図3に破壊性状ごとに荷重Pと鉄筋の抜け出し量 δ (鉄筋伸び含む)関係を示す。A(鉄筋破断:1本内、8本内)では、加力側の鉄筋の降伏までは、ほぼ鉄筋の抜け出しは見られないが、降伏以降抜け出しが急増し、最終的に鉄筋が破断した。写真3に試験後のC8、S8のリングによる支圧破壊の状況を示す。

円形では支圧面から下部にかけて全体的に破壊が生じているのに対し、角形では隅部のみ破壊が生じているのが確認できる。B(鋼管破断)では、初期の段階からPC棒鋼の抜け出しがみられ、鉄筋の塑性化とともに抜け出し量が急増し、最終的に鋼管が破断した。初期段階でのA、Bの鉄筋の抜け出しの量の違いは、鉄筋の付着によるものと考えられる。C(支圧 + コーン状破壊)では、定着板での支圧破壊後、コーン状破壊により耐力低下し、D(支圧破壊)では、支圧破壊後、荷重の増減を繰り返しながらも荷重を保持している。以上より、鉄筋の抜け出し量は、定着長さと鋼管形状に影響されており、定着長さが短いほど、また、円形よりも角形の方が抜け出し量が大きくなるのがわかる。

c) 鉄筋の歪挙動

図4に、C-295-150、C-980-150の荷重-鉄筋歪関係を示す。C-295-150の異形鉄筋では加力側ゲージと定着端側ゲージの降伏荷重が異なるのに対し、C-980-150のPC棒鋼では一様に塑性化している。図5にC-295-150、C-295-300、C-980-150の各荷重段階での歪分布を示す。(c)よりPC棒鋼の歪は一様であるのに対し、(a)、(b)の異形鉄筋では、付着効果によりコンクリート内部と外部で歪が異なるのがよく分かる。C-295-300は最大荷重まで定着板側の鉄筋は弾性であり、鉄筋の付着のみで応力の伝達が可能であった。ここで、表4に加力側鉄筋の降伏時における定着端部鉄筋応力の加力端部鉄筋応力に対する比率 λ 、支圧応力度 σ 、及び支圧強度比 σ/F_c を各試験体ごとに示す²⁾。PC棒鋼の λ はほぼ1であり、定着板での支圧応力度は、最大のもの



写真2 最終破壊状況例

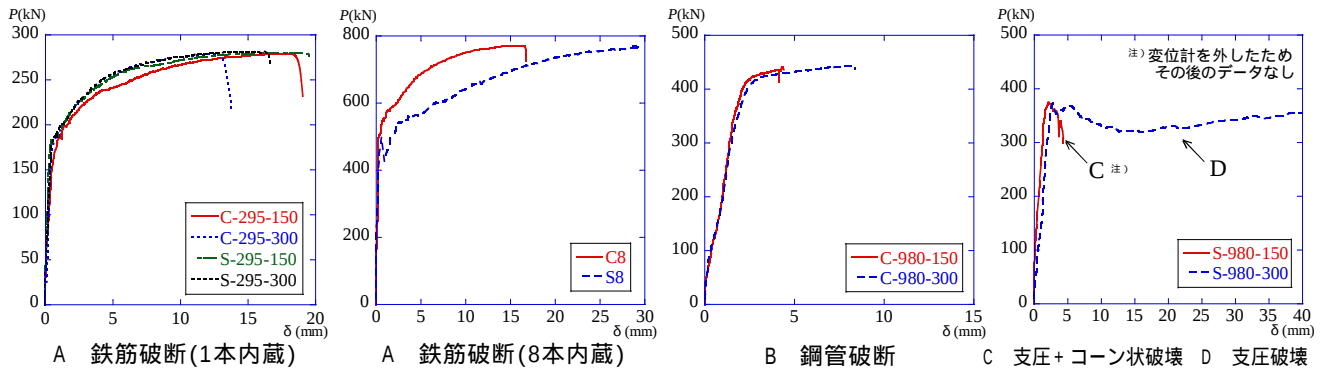


図3 荷重 - 鉄筋抜け出し量関係

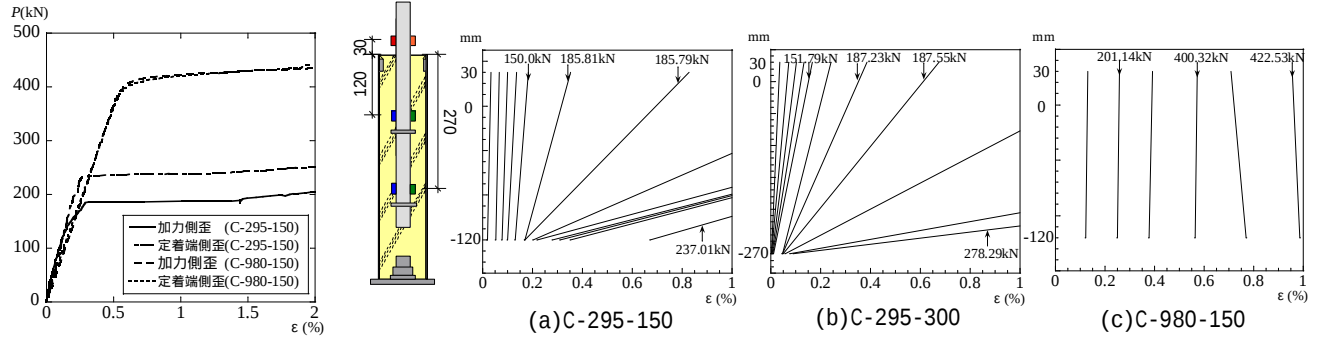


図4 荷重 - 鉄筋歪関係

図5 歪分布

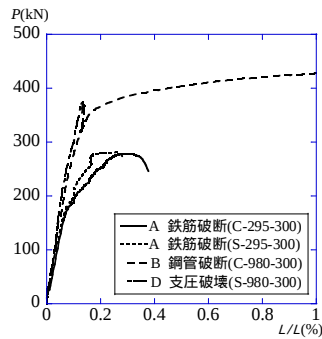


図6 荷重 - 鋼管伸び関係

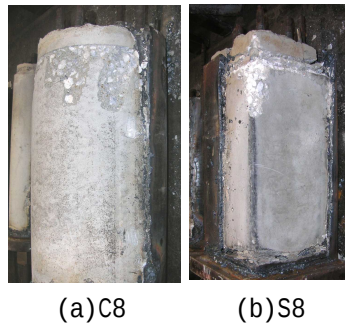


写真3 リングによる支圧破壊

表4 定着板の支圧応力度

試験体名	λ	$\sigma(\text{N/mm}^2)$	σ/F_c
C-295-150	0.79	101.2	1.27
C-295-300	0.22	28.3	0.35
C-980-150	0.98	178.3	2.23
C-980-300	1.00	182.1	2.28
S-295-150	0.53	69.7	0.87
S-295-300	0.04	5.1	0.06
S-980-150	0.85	143.3	1.79
S-980-300	0.99	167.0	2.09
C8	0.03	3.5	0.04
S8	0.02	1.7	0.02

) 最大値での値

でもコンクリート圧縮強度の2.3倍程度である。

d) 鋼管伸び性状

図6に荷重Pと鋼管伸び L/L 関係を破壊性状ごとに示す。A(鉄筋破断)、C(支圧破壊 + コーン状破壊)、D(支圧破壊)では、鋼管はほぼ弾性であったが、B(鋼管破断)は、鋼管の降伏以降伸びが急増し、鋼管の破断に至った。

(4) 実験耐力と計算値の比較

鉄筋内蔵 CFT の最大引張強度を (1) 式で提案する。

$$P_{\max} = \min[P_{s \max}, P_{r \max}, P_{br \max}, P_{ba \max}] \quad (1)$$

$$P_{s \max} = s \sigma_u \cdot A_s \quad (2)$$

$$P_{r \max} = \sum_{i=1}^n \sigma_t \cdot a_t \quad (3)$$

$$P_{br \max} = \phi_1 \cdot \sqrt{A_c \cdot A_{bro}} \cdot F_c^{3)} \quad (4)$$

$$P_{ba \max} = \phi_2 \cdot \sqrt{A_c \cdot A_{bao}} \cdot F_c^{4)} \quad (5)$$

$P_{s \max}$: 鋼管の最大耐力

A_s : 鋼管の断面積

σ_t : 鉄筋の引張強さ

n : 鉄筋本数

A_c : 鋼管の内面積

$P_{ba \max}$: 定着板の支圧耐力

F_c : コンクリートの設計規準強度

$s \sigma_u$: 鋼管の引張強さ

$P_{r \max}$: 鉄筋の最大耐力

a_t : 鉄筋の断面積

$P_{br \max}$: リングの支圧耐力

A_{bro} : リングの支圧面積

A_{bao} : 定着板の支圧面積

表5 最大引張強度の計算値と実験値

試験体名	材齢	計算値				実験結果	
		P_{smax} (kN)	P_{rmax} (kN)	P_{brmax} (kN)	P_{bamax} (kN)	$e P_{max}$ (kN)	破壊 性状
C-295-150	46日	452	276	468	361	279	A
C-295-300	47日	451	276	448	362	278	A
C-980-150	46日	466	441	440	444	441	B
C-980-300	47日	452	440	445	445	444	B
S-295-150	48日	529	280	351	278	280	A
S-295-300	48日	546	280	338	280	281	A
S-980-150	48日	534	440	354	350	375	C
S-980-300	49日	567	440	334	347	373	D
C8	53日	1526	783	1431	1421	771	A
S8	53日	1526	783	986	1050	769	A

表5に実測寸法及び全試験体の材料試験から得られた値を用いて算出した鉄筋内蔵CFTにおける各部の最大強度の計算値と実験結果の一覧を示す。なお、実験でみられた破壊形式の耐力に色をつけている。

図7に(2)～(5)式で算出した各種破壊形式の耐力と実験耐力の比を各試験体ごとに示す。実験で見られた破壊形式はプロットを塗りつぶしているが、概ね1.0となっている。

3. 柱脚の曲げ実験

本研究は、内蔵鉄筋と僅かな大きさのベースプレートからなるCFT柱脚を提案し、加力実験を実施し、終局曲げ耐力について検討・考察する。

(1) 実験概要

a) 試験体概要

曲げ試験用のCR1,2は、図8,9に示すように、それぞれ角形鋼管柱(STKR400, □-200×200×4.5)、並びに円形鋼管柱(STK400, ○-216.3×4.5)とベースプレート(SS400, 25×250×250)を完全溶込み溶接接合し、内蔵鉄筋(SD295B, 8D16)を介して基礎と緊結する構造とした。

また、鉄筋用貫通孔は、角形鋼管柱用を□-179×179、円形鋼管柱用をφ-195とし、ベースプレート中央部に設けた。なお、実験では鋼製基礎を使用するため、鉄筋下端部を捨板(SS400, t=50)にプラグ溶接し、捨板と基礎をPC鋼棒(8M24)で緊結した。

本実験に用いた鋼材及びコンクリートの機械的性質は表6に示す通りである。

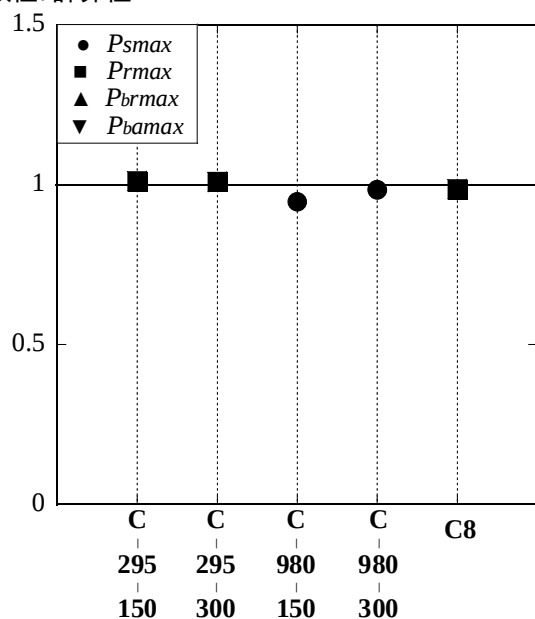
b) 加力方法

曲げ試験状況を図9に示す。加力点はベースブ

表6 材料の特性

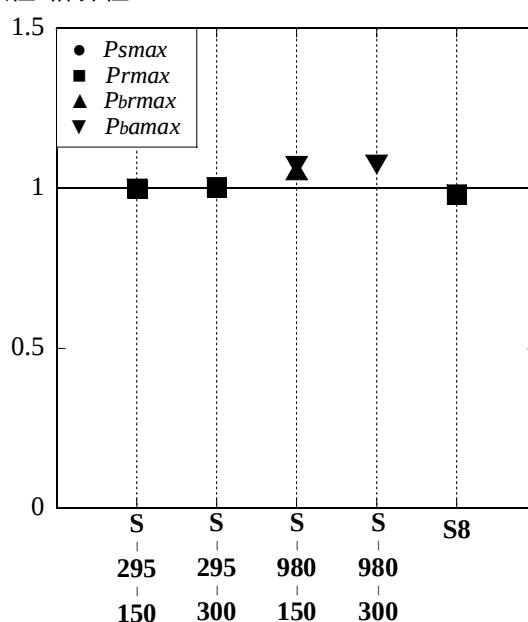
Materials	$s\sigma_Y$ (N/mm ²)	$s\sigma_B$ (N/mm ²)	ϵ_B (%)
□-200×200×4.5	419	505	32
○-216.3×4.5	413	505	31
○-165.2×4.5	400	479	36
Base plate	332	424	36
Main bar	341	498	26
Concrete	$4.4(c\sigma_t)$	$70.8(c\sigma_t)$	—

実験値/計算値



(a) 円形

実験値/計算値



(b) 角形

図7 実験値と計算値の対応

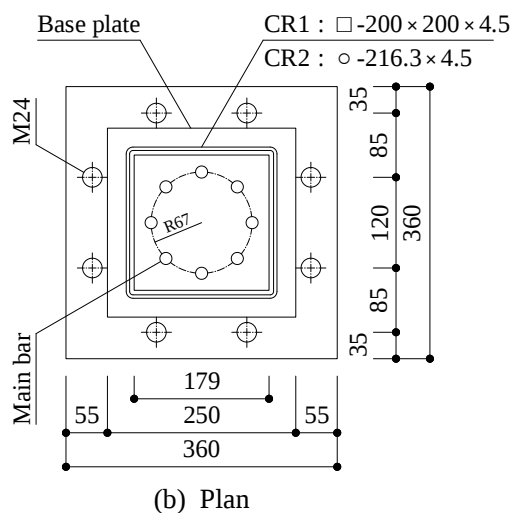
レート下面から反曲点高さ $h=1200\text{mm}$ の位置とし、除荷点は柱部材角 $\theta = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/20\text{rad}$ を目標とした。なお、一定圧縮軸力 N は、試験体 CR1,2 の順に CFT 断面の N_Y の 25%、すなわち $1009,907\text{kN}$ とした。

c) 実験結果および考察

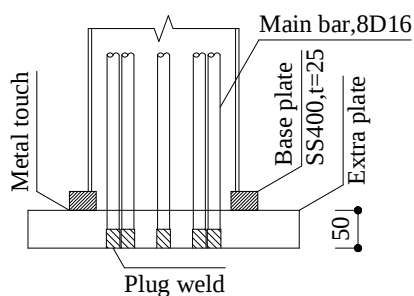
累加強度式による CFT 柱断面、並びに柱脚の M-N 曲線を図 10 に示す。 $N=0.25N_Y$ における柱脚の終局曲げ耐力は、CR1,2 の順に柱断面耐力の 93,103%

を示しており、本柱脚の実用性が検証された。

柱脚の曲げモーメント M と回転角 θ の関係を図 11 に示す。なお、実験値 M は $M=Qh+N\delta$ とした。ここで、 δ は水平加力点とベースプレート下面間における柱の相対水平変位とした。図中には、累加強度式による終局曲げ耐力を破線、鉄筋の引張降伏を $\circ$ 、鋼柱の圧縮降伏を $\blacktriangledown$ 印で示す。なお、 $\blacktriangledown$ の最大値を実験耐力とした。何れの試験体も鋼柱の圧縮降伏が先行し、回転角が増大するにつれ



(b) Plan



(a) Section

図8 柱脚詳細図

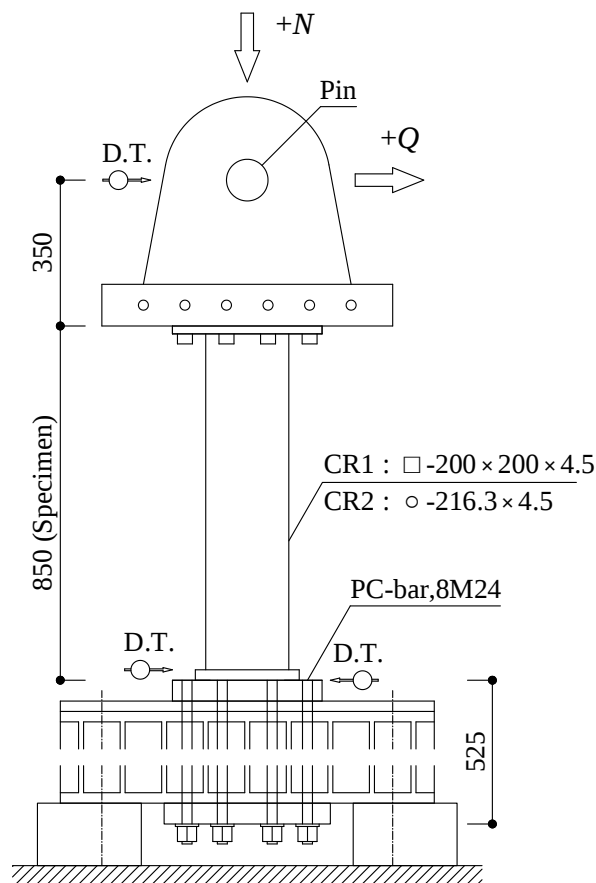
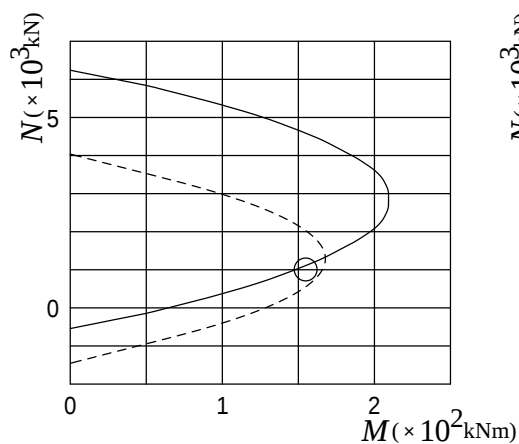
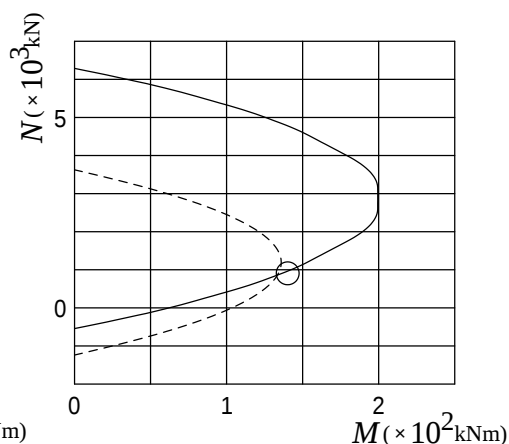


図9 試験装置及び測定位置



(a) CR1, $N=1009\text{kN}$



(b) CR2, $N=907\text{kN}$

図10 M-N相関曲線

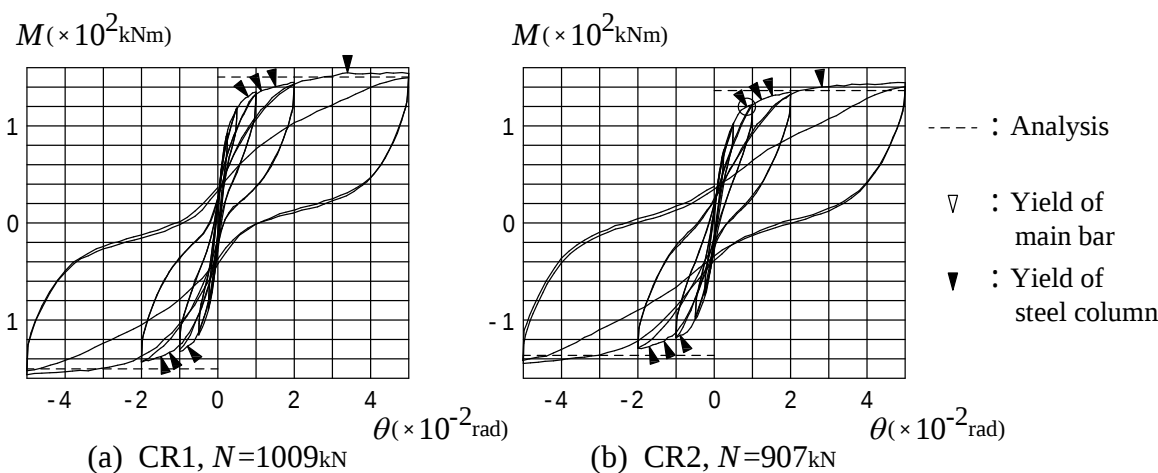


図11 M-θ 曲線

て局部座屈を生じるものの、これに伴う荷重低下はなく、鉄筋の降伏によって終局に至った。実験耐力と計算耐力の比は、CR1,2 の順に 1.04, 1.03 であり、良く一致している。

4. 柱脚のせん断実験

本研究も、せん断実験と同じように、内蔵鉄筋と僅かな大きさのベースプレートからなる CFT 柱脚を提案し、加力実験を実施し、せん断耐力について検討・考察する。

(1) 試験体概要および加力方法

せん断試験用の CR3,4 は、図 12 に示すように、角形鋼管柱 (STKR400, □-200 × 200 × 4.5) のみを使用し、ベースプレート (SS400, 50 × 250 × 250) と完全溶込み溶接接合した左右同一形状のもの 2 個を組合わせて 1 体とした。内蔵鉄筋 (SD295B, 8D16) を両者に貫通後、コンクリートを打設することにより結合した。なお, CR4 には帯筋の代替材として φ-165.2 × 4.5 をベースプレート同士の境界から両側に 100mm づつ挿入した。

せん断試験状況を図 12 に示す。せん断試験は、最大変位 30mm までの漸増片振加力とした

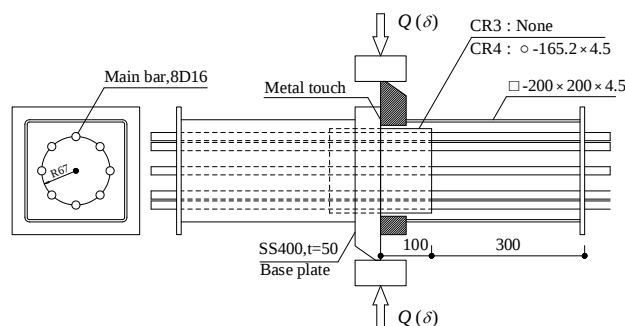


図12 試験体および試験装置

(2) 実験結果および考察

柱脚のせん断力 Q と変位 δ の関係を図 13 に示す。一方向加力実験から、以下のことが確認された。コンクリート破壊前の耐力は、鋼材とコンクリートのせん断耐力の累加 Q_1, Q_4 (CR3,4 の順) が成り立つ。コンクリート破壊後の耐力は、鋼材の引張降伏耐力 Q_2, Q_5 に依存する。終局時の耐力は、鋼材の引張破断耐力 Q_3, Q_6 に漸近する。

また、CR4 の耐力が CR3 を大きく上回り、かつ鉄筋の破断を遅延できることから、本挿入金物の有効性が検証された。なお、引張軸力・曲げ・せん断を受ける実柱脚では、本挿入金物のように曲げ抵抗機構から独立した要素のせん断耐力のみを評価することが肝要と考える。

5. 結論

本実験結果から、次の結論が得られた。

(1) 内蔵鉄筋の引張耐力評価式を提案した。その算定値は実験値とほぼ一致した。

(2) 付着、定着力及びずれ止めにより、コンクリートを介して、鉄筋—鋼管間の応力伝達が可能であることを確認できた。

(3) 内蔵鉄筋と僅かな大きさのベースプレートからなる本柱脚は、CFT 柱断面耐力に匹敵する耐力を発揮する。

(4) 帯筋の代替材として柱—基礎打継ぎ部に挿入した鋼管により、柱脚のせん断抵抗力は大幅に改善される。

(5) 施工上難点の多いアンカーボルトに依存することのないコンパクトな CFT 柱脚を提案した。

謝辞：試験体の製作にあたり、五光工業(株)の協力を得ました。実験に際し、縄愛子氏(新日本製鐵)

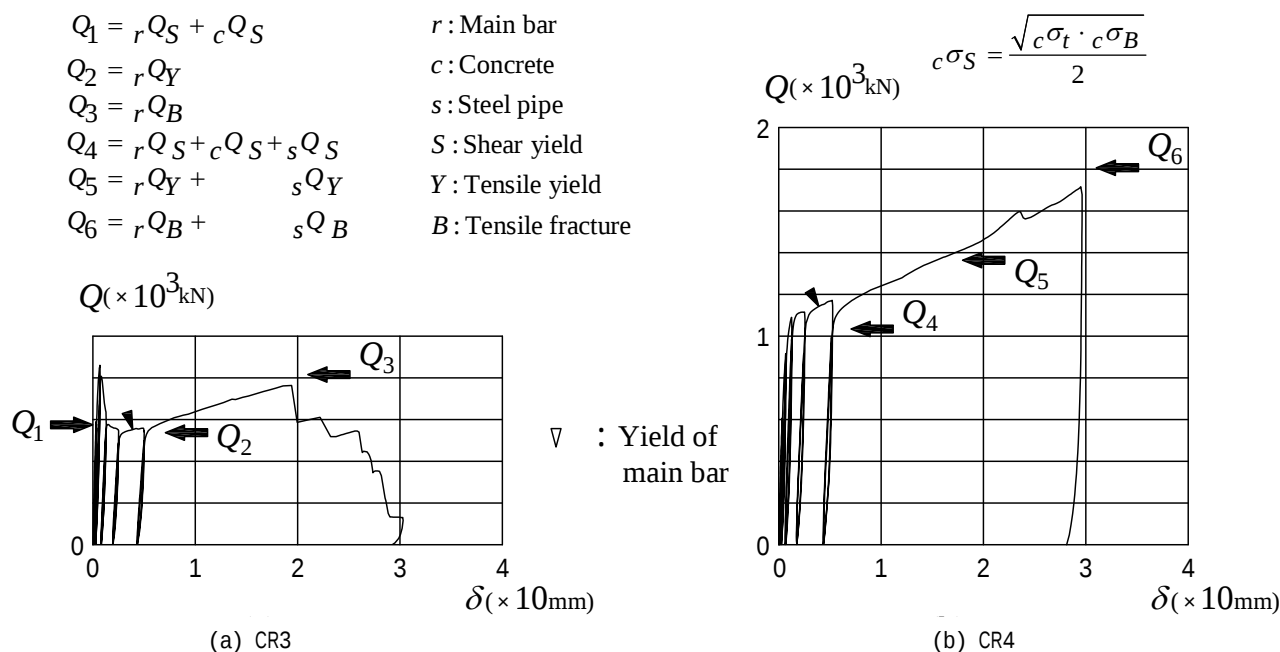


図13 Q- δ 曲線

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) 村上雅英，藤達也，窪田敏行：引抜き実験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価，コンクリート工学論文集，第8巻第2号，pp.1-10,1997.7
- 2) 中澤春生，坂口昇，浅井政宏：引抜き実験における鉄筋コンクリートはり主筋の機械式定着性状に関する研究，日

本建築学会構造系論文集 第558号，173-180，2002年8月
 3) 河野昭彦，崎野健治，岡本勇紀，豊里健二：コンクリート充填鋼管柱の有孔ダイヤフラムによるずれ止め効果の定量的評価，日本建築学会構造系論文集 第598号，163-167，2005年12月
 4) 各種合成構造設計指針同解説，日本建築学会，pp191～198,1985

A STUDY ON THE COLUMN JOINT AND COLUMN BASE OF CONCRETE FILLED STEEL TUBES(CFT) WITH BUILT-IN STEEL BARS

Qiyun QIAO, Furu KUROKI, Akihiko KAWANO,
Kazuhide KUTANI, SHIRAKAWA Toshio

This experimental study focuses on the column joint and column base of CFT with built-in steel bars. For the column joints, since the built-in steel bars can also transfer the stress, the partial joint penetration or non-welding may be achieved in the joint part. In this study, the mechanism of transferring the tensile strength of the steel bars to the steel tube by bonding, mechanical rib-band and the steel ring is investigated experimentally, and the strength evaluation has also been done. As to the column base study, the column base with built-in steel bars and compact base plate is proposed, the ultimate flexural strength and shear strength are investigated in this experiment.