

論文 コンクリート充填鋼管部と接合した高強度鉄筋コンクリート柱の曲げ特性に関する実験的研究

西村 英一郎*1・太田 行孝*2・山本 裕太*3・和泉 信之*4

要旨：下層階をコンクリート充填鋼管造（以下、CFT造）、上層階を鉄筋コンクリート造（以下、RC造）とした建築物において、CFT部とRC柱とを接合するため、「主筋付着方式」と「主筋定着方式」の2つの接合方式を計画した。本研究では、接合方式が異なる3体の試験体を対象に構造実験を実施し、CFT部と接合された高強度RC柱の曲げ特性を検討した。その結果、接合方式に関わらず、各試験体とも安定した紡錘形の履歴性状を示すことを明らかにした。さらに、主筋定着方式を対象としたファイバーモデルは、履歴特性などの解析値が実験値に概ね対応し、一定軸力下の高強度RC柱の曲げ特性を評価できることを示した。

キーワード：CFT, 高強度RC柱, 合成構造, 定着板, ファイバーモデル

1. はじめに

下層階では柱スパンが大きく計画の自由度が高い空間とするためコンクリート充填鋼管造（以下、CFT造）とし、上層階では居住性を確保するため鉄筋コンクリート造（以下、RC造）とする建築物では、途中階で下階のCFT柱と上階のRC柱とを接合することが求められる（図-1）。CFT柱とRC柱との接合に関する既往の研究では、CFT柱梁接合部内へRC柱主筋を定着する方式¹⁾のほか、柱に設けた接合鋼管内へRC柱主筋を定着する方式²⁾³⁾など、様々な接合方式が検討されている。

筆者らは、柱の柱脚部にてCFT部とRC柱を接合する方式として、接合鋼管内コンクリートとの付着力により柱主筋の引張力を接合鋼管へ伝達する「主筋付着方式」のほかに、接合鋼管内に設けた定着板に柱主筋を機械的に緊結した「主筋定着方式」を考案して、2つの接合方式について研究している。本論文では、接合方式が異なる3体の試験体を対象として構造実験を実施し、CFT部と接合された高強度RC柱の曲げ特性を検討する。さらに、主筋定着方式を対象としたファイバーモデルによる解析値の実験値に対する適合性について検討する。

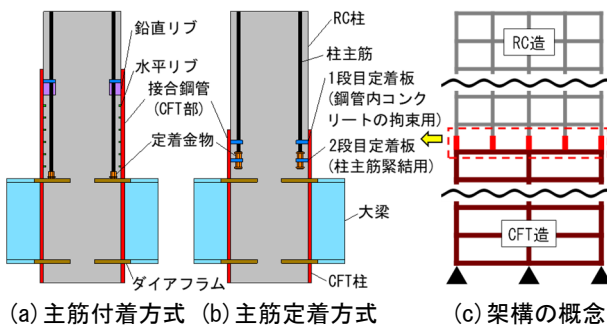


図-1 本研究の対象とする異種部材の接合方式

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

表-1に試験体一覧、図-2に試験体図を示す。試験体は柱脚と柱頭に異なるCFT部との接合部を有する3体のF_c60級の高強度RC柱である。主な試験体パラメータは、CFT部とRC柱の接合方式のほか、接合鋼管の板厚および高さ、補強リブの有無、定着金物の箇所数等とした。CFTRC-0は縮尺を実大の約2/3とし、RC柱の柱頭を主筋定着方式、柱脚を主筋付着方式でCFT部と接合した。主筋付着方式では、接合鋼管内の上部にロ形の定着板を設けた。定着板には柱主筋貫通用の孔があり、柱主筋は接合鋼管内の定着長が30d_b（d_b：柱主筋径）の機械式定着とした。また、接合鋼管内にはコンクリートの抜け出し防止のための水平リブ、定着板には補強用の鉛直リブを設けた。主筋定着方式では、接合鋼管内にロ形の定着板を2段設け、左側は2段とも定着金物を用いて柱主筋を定着板に緊結し、右側は1段だけ柱主筋と緊結した。また定着板には2段とも補強用の鉛直リブを設けた。CFTRC-1,2は縮尺を実大の約1/2とし、RC柱の柱頭と柱脚ともに主筋定着方式によりCFT部と接合した。接合鋼管内にロ形の定着板を2段設けたが、柱主筋と定着板の緊結は共に1段だけである。補強用の鉛直リブは柱脚側

表-1 試験体一覧

試験体名	CFTRC-0	CFTRC-1	CFTRC-2
縮尺	約2/3	約1/2	
骨材径	20mm	13mm	
軸力N	一定軸力 (0→引張→圧縮)	一定軸力 (圧縮)	変動軸力
接合方式	柱頭側(上)	主筋定着方式 (鋼管板厚28mm)	主筋定着方式 (鋼管板厚25mm)
	柱脚側(下)	主筋付着方式 (定着長30d _b)	主筋定着方式 (鋼管板厚22mm)

*1 戸田建設株式会社 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*2 戸田建設株式会社 構造設計部 博士 (工学) (正会員)

*3 戸田建設株式会社 構造設計部 修士 (工学) (正会員)

*4 元千葉大学大学院工学研究院 教授 博士 (工学) (フェロー会員)

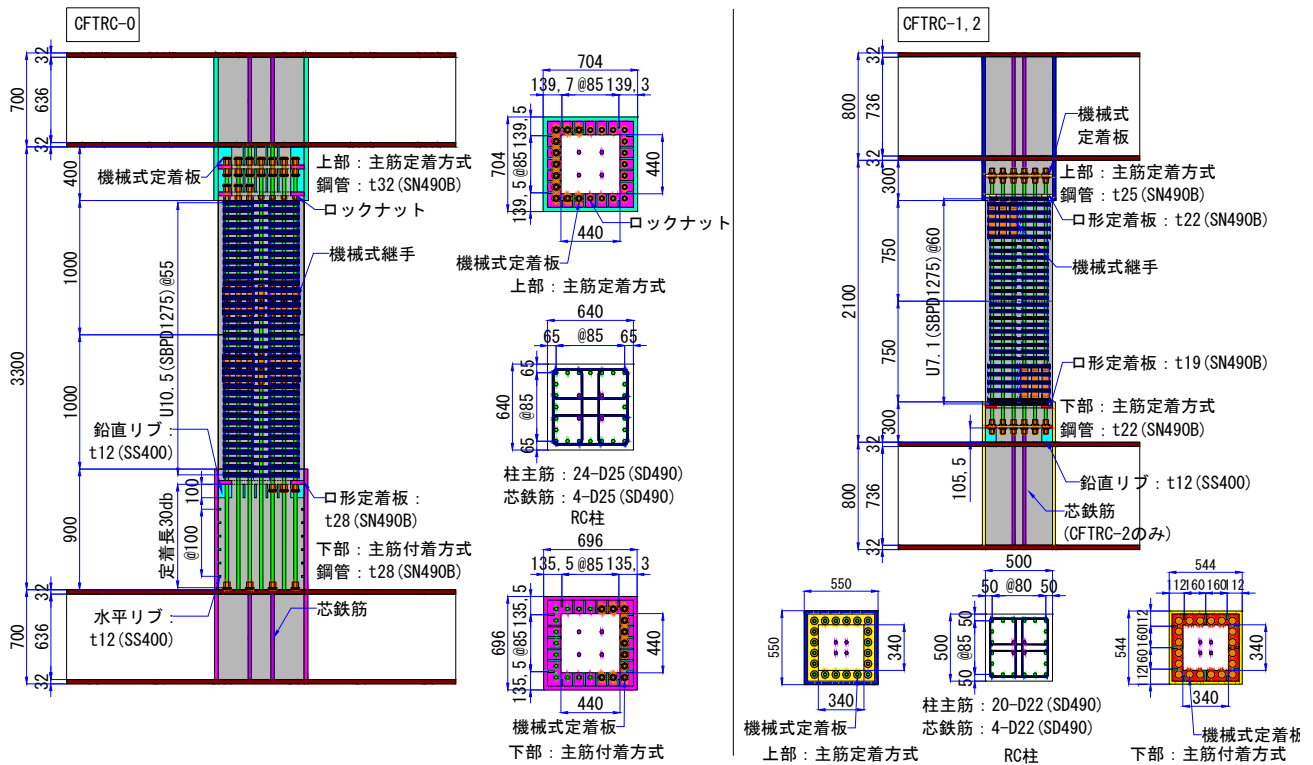


図-2 試験体図 (単位: mm)

接合鋼管の下段の定着板にのみ設けた。また、RC 柱端面近傍の一部の柱主筋に機械式継手を設けた。各試験体の耐力余裕度は表-2 のように設定し、RC 柱の曲げ破壊が先行するように計画した。

2.2 材料試験結果

表-3 および表-4 に材料試験結果を示す。全試験体共通でコンクリートの設計基準強度は F_c60 、柱主筋は SD490、柱帯筋は SBPD1275 とした。

2.3 加力方法および加力スケジュール

図-3 に加力装置と変動軸力を示す。加力は RC 部の中央高さを反曲点とした逆対称曲げせん断実験とした。加力は試験体の部材角 $R=\delta_H/H$ (δ_H : 水平変位, H : 試験区間) で制御した。CFTRC-0 に作用させる軸力は 3 段階あり、まず初めに軸力 0kN とし、 $R=\pm 1.25, 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 1 回、 $R=\pm 5 \times 10^{-3} \text{rad}$ を 2 回加力した。次に一定引張軸力 $0.5a_g\sigma_y$ (a_g : 柱主筋の全断面積, σ_y : 降伏強度) を作用させて、 $R=\pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ を 1 回、 $R=\pm 5, 6.7, 10, 15, 20, 25 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 2 回加力した。最後に一定圧縮軸力 $0.25b_cD_c\sigma_B$ (b_c : RC 柱幅, D_c : RC 柱せい, σ_B : コンクリートの圧縮強度) を作用させて、 $R=\pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ を 1 回、 $R=\pm 5, 6.7, 10, 15, 20, 25, 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 2 回加力した。CFTRC-1 は一定圧縮軸力 $0.22b_cD_c\sigma_B$ 、CFTRC-2 は水平力に対応して圧縮側が最大 $0.5b_cD_c\sigma_B$ 、引張側が最大 $0.5a_g\sigma_y$ となる変動軸力を作用させて、 $R=\pm 1.25, 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 1 回、 $R=\pm 5, 6.7, 10, 15, 20, 25, 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 2 回の後、 $R=\pm 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ を 1 回加力した。

表-2 試験体の耐力余裕度

試験体		CFTRC-0		CFTRC-1		CFTRC-2	
		柱頭	柱脚	柱頭	柱脚	柱頭	柱脚
RC 柱の曲げ余裕度 ^{※1}	なし	3.45	2.24	-	-	-	-
	引張	5.21	3.36	-	-	5.02	4.35
	圧縮	2.48	1.64	2.47	2.20	2.58	2.30
RC 柱のせん断余裕度 ^{※2}	なし	2.53	-	-	-	-	-
	引張	4.04	-	-	-	3.31	-
	圧縮	2.80	-	1.45	-	1.50	-
RC 柱の付着余裕度 ^{※3}	なし	1.72	-	-	-	-	-
	引張	2.55	-	-	-	3.32	-
	圧縮	1.08	-	1.41	-	1.45	-

※1: (CFT 脚部短期曲げ耐力⁴⁾ / (RC 柱端部曲げ終局モーメント⁵⁾ 時に生じる CFT 脚部の曲げモーメント)

※2: (RC 柱せん断終局耐力⁶⁾ / (RC 柱端部曲げ終局モーメント⁵⁾ 時に生じる RC 柱せん断力)

※3: (RC 柱主筋の付着割裂破壊によって決まるせん断終局耐力⁶⁾ / (RC 柱端部曲げ終局モーメント⁵⁾ 時に生じる RC 柱せん断力)

表-3 材料試験結果 (コンクリート)

試験体名	圧縮強度 σ_B [N/mm ²]	圧縮強度時ひずみ ϵ_c [μ]	引張強度 σ_t [N/mm ²]	ヤング係数 E_c [$\times 10^4$ N/mm ²]
CFTRC-0	67.8	2669	3.63	3.27
CFTRC-1	63.3	2774	3.14	3.65
CFTRC-2				

表-4 材料試験結果 (鉄筋・鋼材)

試験体名	試験片	使用部位	降伏強度 σ_y [N/mm ²]	降伏ひずみ ϵ_y [μ]
CFTRC-0	D25(SD490)	柱主筋・芯鉄筋	508	2696
	U10.7(SBPD1275)	柱帯筋	1403	8636
	t12(SS400)	鉛直・水平リブ	349	1859
	t28(SN490B)	下部接合鋼管 口形定着板	354	2380
	t32(SN490B)	上部接合鋼管	351	3544
CFTRC-1 CFTRC-2	D22(SD490)	柱主筋・芯鉄筋	538	3008
	U7.1(SBPD1275)	柱帯筋	1282	8027
	t12(SS400)	鉛直リブ	361	1986
	t19(SN490B)	下部口形定着板	354	1960
	t22(SN490B)	下部接合鋼管 上部口形定着板	338	1923
	t25(SN490B)	上部接合鋼管	338	1947

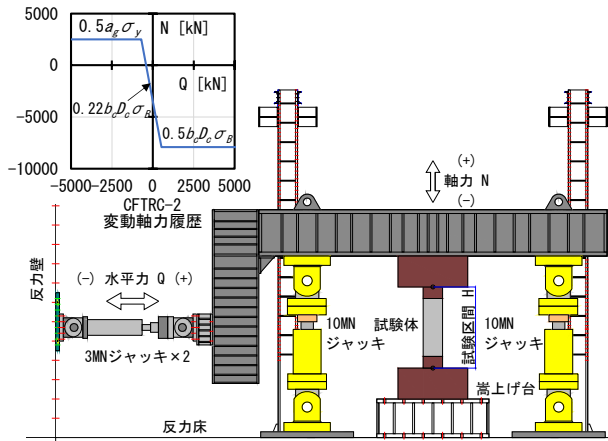


図-3 加力装置と変動軸力の履歴

3. 実験結果

3.1 層せん断力-一部材角関係

図-4 に各試験体の層せん断力 (Q) - 一部材角 (R) 関係および破壊状況写真, 表-5 に最大耐力と計算値との比較を示す。図中の cQ_{Mu} は, RC 柱の両端部が曲げ終局モーメント (靱性指針⁵⁾に示される ACI ストレスブロック法により軸力の最大値を用いて算出) に達した時に生じる柱の内法高さにおけるせん断力の計算値である。

CFTRC-0 では, 準備加力として軸力なしの状態 $R = \pm 1.25 \sim 5 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで加力した。概ね $R = \pm 1.25 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に曲げひび割れが発生して, $R = +5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクル目において両接合方式の RC 柱端面近傍の柱主筋が降伏した。この時点で両接合方式ともにかぶりコンクリートの圧壊は生じなかった。次に, 一定引張軸力とした $R = \pm 2.5 \sim 25 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力では, $R = +5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サ

イクル目において両接合方式の RC 柱端面近傍の柱主筋が一部降伏した。 $R = \pm 6.7 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクル目において cQ_{Mu} に達した。両接合方式ともに RC 柱端面近傍において曲げひび割れおよびコンクリートの圧壊が生じたが, $R = \pm 25 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで顕著な耐力低下は見られなかった。最後に, 一定圧縮軸力とした $R = \pm 2.5 \sim 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力では, $R = \pm 15 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクル目において cQ_{Mu} に達した。両接合方式ともに RC 柱端面近傍においてコンクリートの圧壊が生じて, かぶりコンクリートの剥落が見られたが, $R = \pm 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで顕著な耐力低下は見られず, 安定した紡錘型の履歴ループを示した。

CFTRC-1 では, $R = \pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に曲げひび割れが発生した。荷重が cQ_{Mu} に達した $R = \pm 15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に RC 柱端面近傍のコンクリートが圧壊して, $R = \pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に上下の接合部の RC 柱端面近傍の柱主筋が降伏した。 $R = \pm 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで大きな耐力低下は見られず, 最後まで安定した紡錘型の履歴ループを示した。

CFTRC-2 では, $R = \pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に曲げひび割れが発生した。圧縮軸力下の正側加力では, 荷重が cQ_{Mu} に達した $R = +5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に RC 柱端面近傍のコンクリートが圧壊して, $R = +20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に上下の接合部の RC 柱端面近傍の柱主筋が降伏した。引張軸力下の負側加力では, 荷重が cQ_{Mu} に達した $R = -5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に上下の接続部の RC 柱端面近傍の柱主筋が降伏して, $R = -20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に RC 柱端面近傍のコンクリートが圧壊した。 $R = +40 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にコンクリートの圧壊が原因と考えられる耐力低下が見られたが, 最後まで安定した履歴ループを示した。

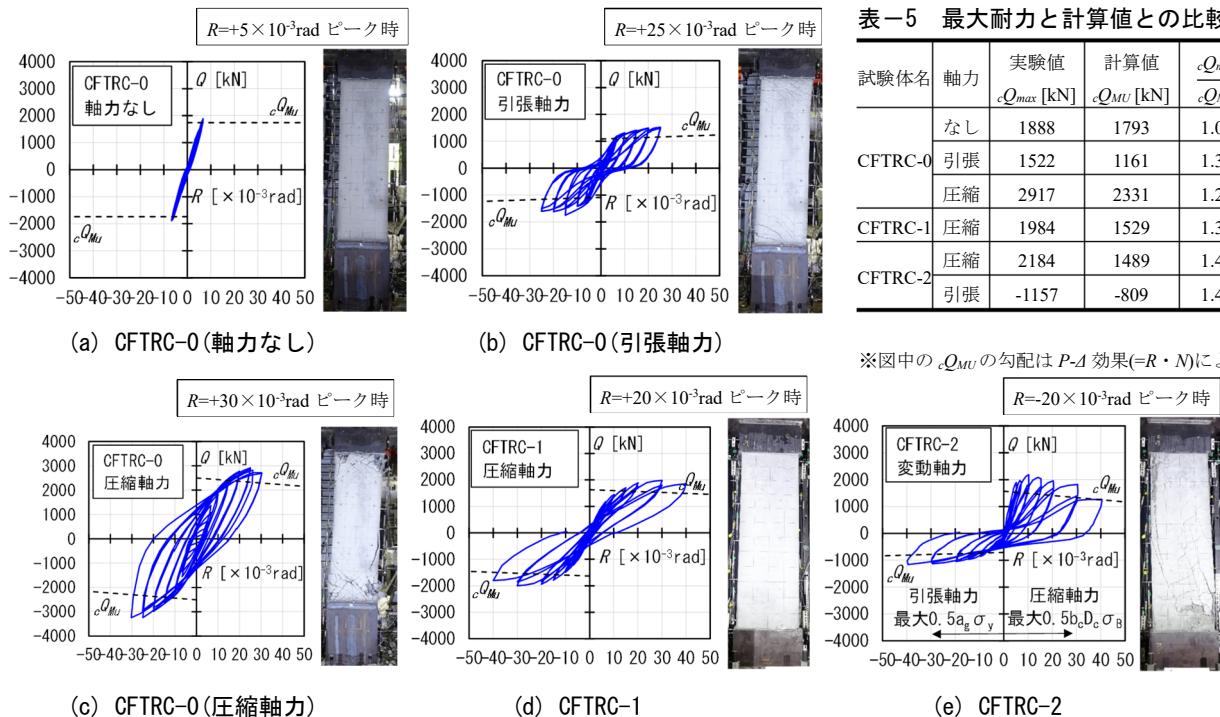


図-4 層せん断力-変形角関係

表-5 最大耐力と計算値との比較

試験体名	軸力	実験値 cQ_{Mu} [kN]	計算値 cQ_{Mu} [kN]	$\frac{cQ_{Mu, \text{max}}}{cQ_{Mu}}$
CFTRC-0	なし	1888	1793	1.05
	引張	1522	1161	1.31
	圧縮	2917	2331	1.25
CFTRC-1	圧縮	1984	1529	1.30
CFTRC-2	圧縮	2184	1489	1.46
	引張	-1157	-809	1.43

※図中の cQ_{Mu} の勾配は $P-A$ 効果 ($=R \cdot M$) による。

3.2 変形成分

図-5 に各試験体の柱を反曲点位置で上下に分割した時の変形成分割合を示す。変形成分の内訳は RC 柱の曲げ変形およびせん断変形と、 接合鋼管の曲げ変形およびせん断変形とした。なお、CFTRC-0 の圧縮軸力時の変形成分は、 かぶりコンクリートの破壊の進展により測定機器を取り外したため検討から除外する。各試験体とも RC 柱の曲げ変形が全変形の 50%以上を占めていた。特に、 引張軸力下では RC 柱の曲げ変形とせん断変形が大きく、 接合鋼管の変形は小さい。CFTRC-0 では、 接合鋼管の高さの違いから、 主筋付着方式における接合鋼管の曲げ変形が主筋定着方式に比べて 10%程度大きい。また、 CFTRC-1 および CFTRC-2 の上下の接合方式で変形成分を比較すると、 最大でも 10%程度の差であり、 接合鋼管の板厚や鉛直リブの有無の影響は僅かであった。

3.3 曲率分布

図-6 に各試験体の曲率分布、 図-7 に曲率分布の測定方法を示す。曲率分布についても、 なお、 曲率分布についても、 CFTRC-0 の圧縮軸力時は加力の途中で測定機器を取り外したため検討から除外する。各試験体の曲率は、 接合方式および軸力の大きさに関わらず、 CFT 部と RC 柱の接合位置で最も卓越し、 それ以外の RC 柱や接合鋼管の位置では非常に小さい。

RC 柱の主筋が接合鋼管から抜け出すような挙動は見られず、 2つの接合方式において CFT 部の接合鋼管と RC 柱の主筋との間で応力伝達がなされ、 RC 柱端面近傍において RC 柱の曲げ破壊が進展したと考えられる。

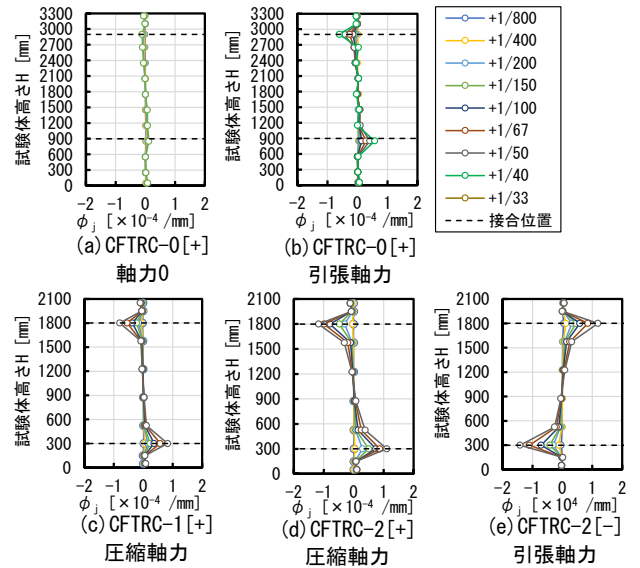


図-6 曲率分布 ([]内は加力方向)

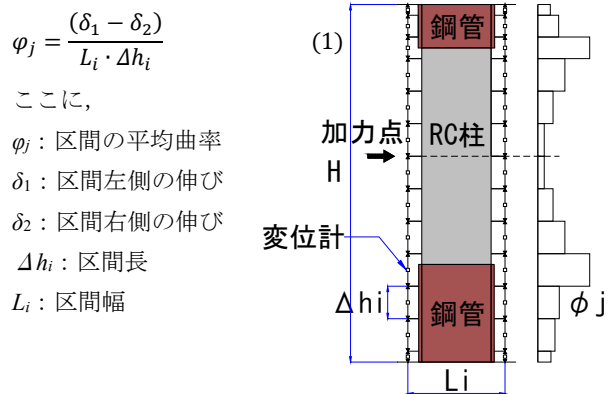


図-7 曲率の計測方法

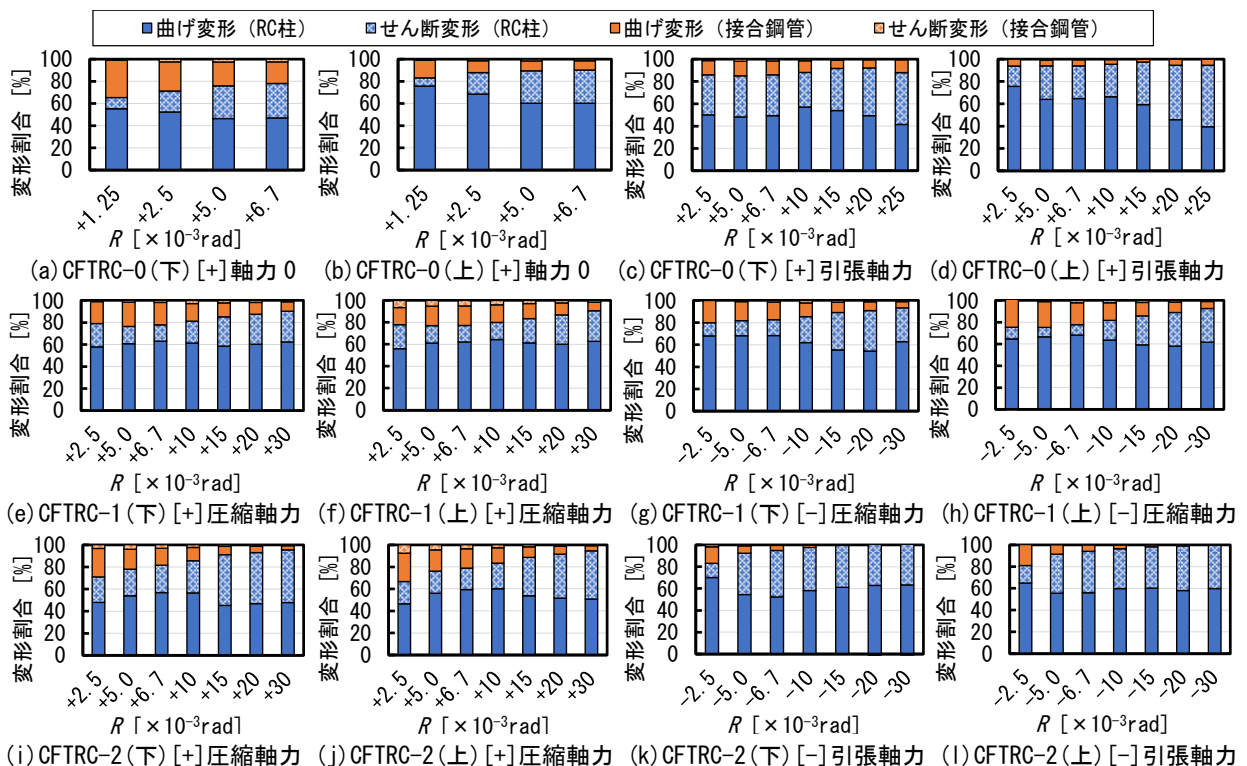


図-5 変形成分割合 ([]内は加力方向)

4. 主筋定着方式を対象としたファイバーモデル

4.1 解析計画

主筋定着方式の CFTRC-1 を対象として、ファイバー要素を用いた部材モデルを構築して静的弾塑性解析を実施した。解析値と実験値との比較により、部材モデルの適合性について検討した。解析には、曲げおよび軸力に対して平面保持を仮定したファイバーモデル(図-8, 9)を用い、部材の柔性分布は両端を直線補間する仮定⁷⁾とした。解析ケースは部材軸方向の分割数および接合鋼管のモデルが異なる2ケースとした。ケースAでは、CFT部とRC柱に分割して、RC柱と上下のCFT部の3部材にモデル化した。ケースBでは、接合鋼管の拘束や主筋降伏位置に着目し、接合鋼管をロ形定着板位置でCFT部と接合部に2分割して、RC柱と上下のCFT部・接合部の5部材にモデル化した。

コンクリートの復元力特性には曲線剛性逓減型モデル⁷⁾を用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係には、柱帯筋および接合鋼管による拘束効果⁸⁾を考慮した(図-10)。RC柱のコンクリート要素は、柱帯筋の内側をコアコンクリート(拘束考慮)、外側をかぶりコンクリート(非拘束)として区別した。CFT部の内側のコンクリート要素は、接合鋼管による拘束効果を考慮した。接合部の内部のコンクリート要素は、RC柱とCFT部との中間領域と考えて接合鋼管の拘束を低減させ、帯筋の外側と内側のコンクリートともRC柱のコアコンクリートと同様に柱帯筋による拘束のみ考慮した。柱主筋および接合鋼管の復元力特性には修正 Ramberg-Osgood 型モデル⁷⁾を用いた(図-11)。降伏後の剛性は $1/100E_s$ (E_s : 鋼材のヤング係数)とした。ただし、CFT部とRC柱との接合位置が危険断面位置となるように、ケースBの接合部内の柱主筋は弾性体と仮定した。各要素のヤング係数および降伏強度には材料試験結果を用いた。

せん断ばねの履歴特性は原点指向型として、RC柱ではせん断ひび割れによる剛性低下を考慮したトリリニア(図-12)、CFT部および接合部ではバイリニアとした。RC柱のせん断ひび割れ強度は文献¹⁰⁾、曲げ降伏時のせん断変形(R_{sy})は文献¹¹⁾に準拠し算出した。CFT部および接合部のせん断耐力には接合鋼管を考慮し、せん断剛性には接合鋼管と接合鋼管内のコンクリートを考慮した。

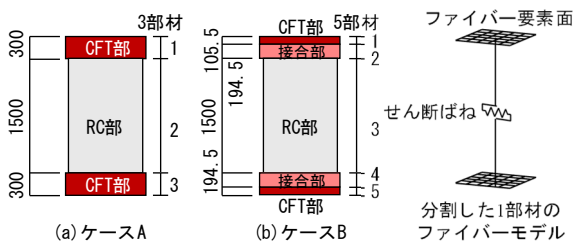


図-8 部材モデル (単位: mm)

4.2 解析結果

図-13に層せん断力(Q) - 部材角(R)関係、図-14に各サイクルにおける履歴性状の解析値と実験値との比較を示す。ケースAでは解析値の初期剛性および $R=\pm 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時の Q が実験値と比較してやや大きい。降伏後の $R=\pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ の Q は解析値と実験値で概ね対応している。 $R=\pm 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降は解析値の Q が実験値と比較して1割ほど小さい。これはRC柱とCFT柱との中間領域として定義した接合部を設けず、接合鋼管を全てCFT部として評価したためであると考えられる。ケースBでは初期剛性が実験値に概ね対応しており、 $R=\pm 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ および $R=\pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ の Q も対応がよく、 $R=\pm 30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降の大変形時の Q および履歴性状はケースAに比べて実験値に対応していることがわかる。

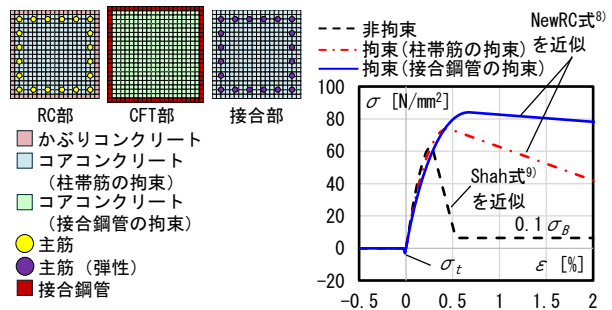


図-9 ファイバー要素 図-10 コンクリート特性

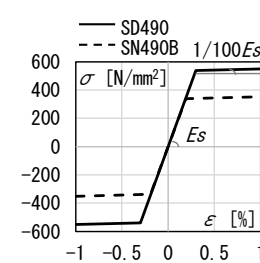


図-11 主筋・鋼管特性

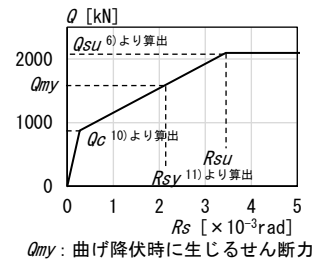
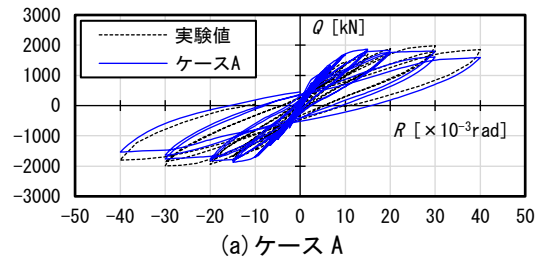
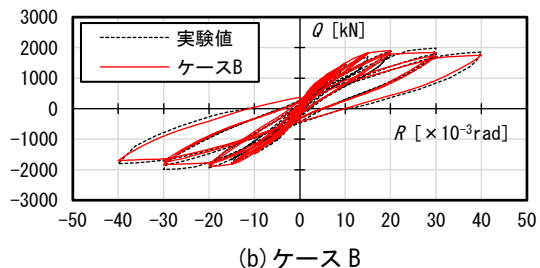


図-12 RC柱のせん断ばね特性



(a) ケースA



(b) ケースB

図-13 層せん断力-変形角関係の比較

図-15 に正加力時における等価粘性減衰定数 (heq) の解析値と実験値との比較を示す。両ケースともに $R=\pm 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度までは解析値が実験値をやや下回る傾向にある。ケース A では $R=\pm 15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降、ケース B では $R=\pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降において解析値は実験値よりやや大きいが、 $R=\pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ までは概ね対応している。

図-16 に正加力時における引張主筋のひずみ分布について解析値と実験値との比較を示す。 $R=\pm 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ では、ケース A は解析値が実験値よりもやや大きいが、ケース B は解析値が実験値とほぼ一致している。 $R=\pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ では、ケース A は解析値が実験値よりやや大きく、ケース B は解析値が実験値よりやや小さいが、主筋ひずみ分布は両ケースとも概ね対応している。

解析値は実験値に対して、ケース A の初期剛性がやや高くケース B の対応が比較的良好だが、柱の部材角 1/50 以下の変形領域では両ケースとも概ね対応している。

なお、変動軸力下における CFTRC-2 を対象としたファイバーモデルの検討は、今後の課題である。

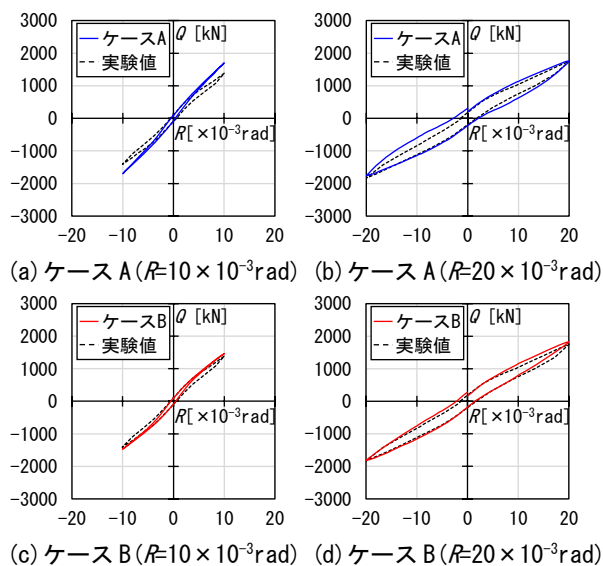


図-14 履歴性状の比較

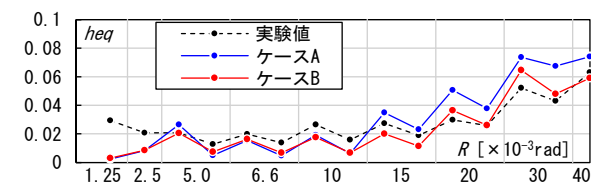


図-15 等価粘性減衰定数推移の比較

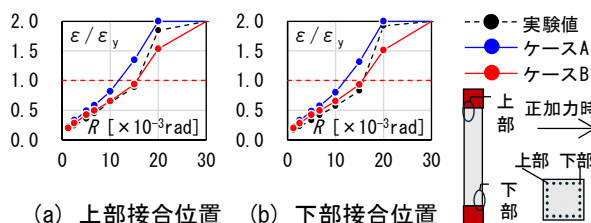


図-16 柱主筋ひずみ分布の比較

5. まとめ

CFT 部と接合された高強度 RC 柱試験体の構造実験を実施した。本実験の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 各試験体とも CFT 部と RC 柱の接合位置近傍において柱主筋が降伏する紡錘形の履歴性状を示した。
- (2) 各試験体の変形成分割合は、RC 柱の曲げ変形とせん断変形が大きく、CFT 部の変形は小さい。
- (3) 各試験体の曲率は、接合方式に関わらず CFT 部と RC 柱との接合位置近傍で最大となった。
- (4) 主筋定着方式を対象としたファイバーモデルによる一定軸力下の試験体の解析では、CFT 部などを考慮することにより、柱の部材角 1/50 以下の変形領域では、解析値は実験値と概ね対応した。

CFT 部と RC 柱の接合位置での応力伝達機構や、その評価方法については今後報告したい。

参考文献

- 1) 田邊裕介, 石川裕次, 山下真吾, 小澤宣行: CFT 柱と RC 柱の切替え部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1273-1278, 2016.7
- 2) 金本清臣, 小前健太郎, 小嶋一輝, 山野辺宏治: 鉄筋コンクリート造柱とコンクリート充填鋼管柱を材軸方向に接合した合成構造柱の力学的挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.697-702, 2022.7
- 3) 今野修ほか: 引張力を受ける RC 柱から CFT 柱の切り替え部における応力伝達機構 (その 1), 日本建築学会大会学術公演梗概集 (東北), 構造 III, pp.1272-1273, 2000.9
- 4) (一社) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.10
- 5) (一社) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2001.9
- 6) 高周波熱錬 (株): 鉄筋コンクリート造はり、柱のせん断補強筋として PC 鋼棒ウルボンを使用する工法 設計指針・同解説, 2018.3
- 7) (株) 構造システム: SNAP Ver.8 テクニカルマニュアル, 2024.3
- 8) (一財) 国土開発技術研究センター: 平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書, 1993.3
- 9) 長沼洋一: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 10) (一社) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021.2
- 11) (一社) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 2004.1