

角形薄肉 CFT 柱の曲げせん断実験による

劣化挙動の分析および耐力評価

佐藤 亮輔

1. 序論

近年、CFT 構造(Concrete Filled Steel Tube)は S 造、RC 造、SRC 造に次ぐ構法として普及が進んでおり、高層建築物への適用が多くみられる。建物のさらなる高層化に伴い、一般には使用する材料も高強度化する傾向にある。一方、高強度材を使用することによる材料価格の上昇や、施工難度が上がるなどのデメリットがある。技術力の高さや施工事例に富むゼネコンなどには普及するが、そうでない施工者への CFT の適用は今後の課題ともいえる。また、使用する鋼管を薄肉化することにより、経済的な設計が可能になる。

以上の理由から、本実験では鋼管幅厚比の大きい領域を対象として、実験を行う。また、材料強度は鋼材を 590N/mm² 級程度、コンクリートを Fc80~90 程度を上限值として実験変数を決定した。

実験を通して、薄肉かつ超高強度材を使用しない範囲

での角形 CFT 柱の構造性能や耐力劣化性状を分析、評価することが目的である。

2. 実験計画

2.1 試験体および荷重装置

表 1 に本実験で使用する試験体、表 2 に鋼材引張試験結果、充填コンクリートのシリンダー試験結果を示す。また、図 1 に試験体図面、図 2 に荷重装置の全体図を示す。柱脚部はベースプレート上部に溶接されており下端は固定端とした。上端はピンで 10MN 試験機および 1000kN ジャッキに接続した。また、柱脚の固定端から柱頭ピンまでは 1140mm であり、径高さ比が 4 (Lk/D=8) の中柱に分類される (CFT 構造設計施工指針 (以下 CFT 指針))¹⁾。

表 1 実験で使用する試験体

No.	試験体名	鋼管規格	コンクリート 設計基準強度 [N/mm ²]	柱幅B[mm]	柱せい D[mm]	板厚t[mm]	幅厚比D/t	軸力比
単調荷重								
No.1	t6n023	SN490	60	285	285	6	47.5	0.23
No.2	t6n042							0.42
No.3	t6n060							0.60
繰返し荷重								
No.4	t6n023c	SN490	60	285	285	6	47.5	0.23
No.5	t6n042c							0.42
No.6	t6n060c							0.60

表 2 材料試験結果

コンクリート		鋼材	
シリンダー強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	鋼管板厚t mm	降伏応力 N/mm ²
64.8	32306.2	6.24	380.6
鋼材			
降伏ひずみ %	引張強度 N/mm ²	降伏比	ヤング係数 N/mm ²
0.18	545.9	69.7	205803

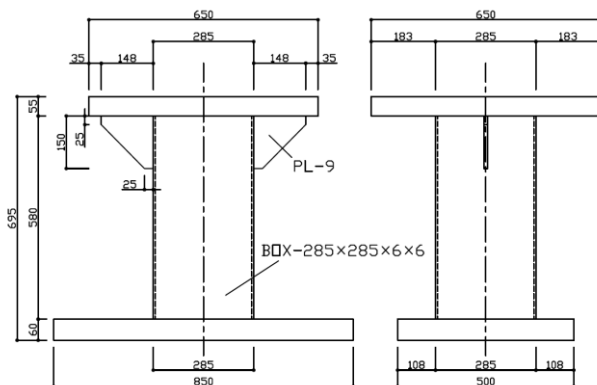


図 1 試験体図面

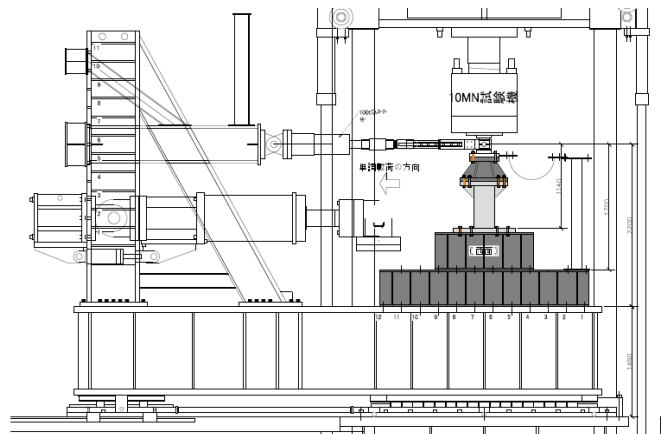


図 2 試験機全体図 (西面)

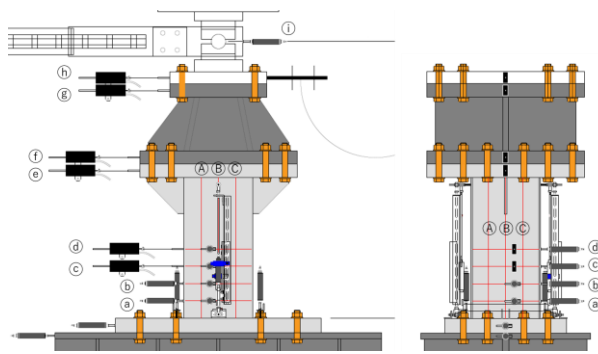


図3 変位計 計測位置

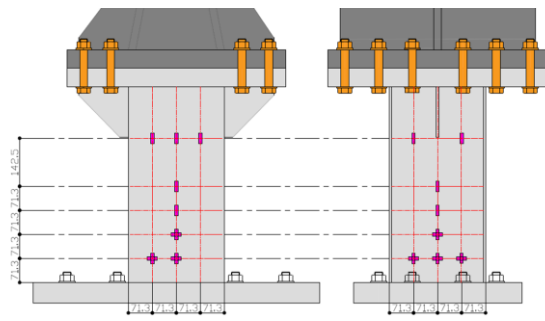


図4 ひずみゲージ 計測位置

2.2 荷重方法

柱頭のピン治具を介し、10MN 試験機により一定の軸力を与える。一定軸力下で 1000kN ジャッキにより柱頭部に水平力を与え、単調荷重と正負交番荷重を行う。付与する軸力は荷重治具の制約により決定し、その範囲で低軸力、高軸力とその中間をとる軸力比を設定した。繰返し荷重のプログラムは柱脚からピンまでの部材角で制御し、 $R=\pm 0.25\%$ で1サイクル、その後は $R=\pm 0.5\%$ から2サイクルごとに0.5%ずつ増加する漸増振幅荷重を行う計画とした。

2.3 測定方法

図3、図4に変位計、ひずみゲージの計測位置を示す。計測位置は全体の挙動、および柱脚部の局部座屈性状を観察できるように設定した。

3. 実験結果

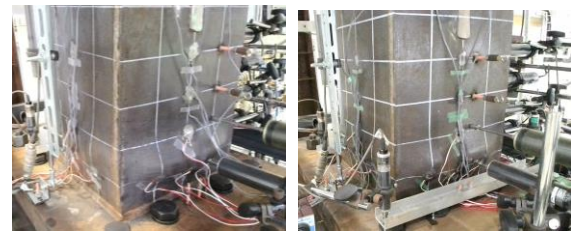
3.1 破壊性状および荷重－変形関係

図5に単調荷重、および繰返し荷重の水平力－部材角関係を示す。繰返し荷重のグラフには単調荷重のグラフを重ねて表示した。各グラフに灯色の破線による剛塑性崩壊機構直線を重ねて示しており、終局曲げ耐力はCFT 指針⁹⁾に従って求めた値を使用した。また、写真1に水平荷重終了時点の各試験体(北西柱脚部)の写真を示す。No.1では最大耐力発現後の勾配が塑性崩壊機構直線の勾配とほぼ一致しており、柱脚部の耐力劣化がほとんど起こらなかった。図には示していないが、柱脚部の曲げモーメントも一定値を保持し続けた。No.2では最大耐力発現後に塑性崩壊機構直線の勾配を大きく上回る勾配を示しており、変形の進行に伴い徐々に劣化は緩やかになっていった。No.3では前述した2体に比べて急激に耐力劣化が進行した。繰返し荷重においては、最大耐力点までは単調荷重をやや上回る形で進行するが、それ以降は同目標部材角のサイクルで明確な耐力低下が見られ、高軸力の実験ではその傾向が顕著であ

った。

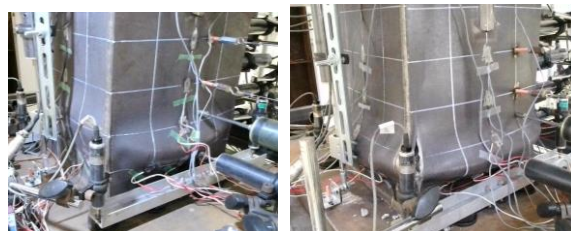
3.2 単調荷重と繰返し荷重の対応関係

図6に同軸力比の単調荷重、繰返し荷重の曲げモーメント－部材角関係の対応関係を示す。図中の赤線が単調荷重、黒実線が繰返しにおける正側、破線が負側の繰返しによる累積変形を表している。累積変形は、モーメントが正の部分と負の部分で分けて、それぞれの履歴曲線をつなぎ合わせたものである。いずれの軸力比の実験においても単調荷重は繰返し荷重を概ね包絡するような傾向にある。ことがわかる。このような傾向は津田等²⁾の論文でも示されている。



(a) No.1 t6n023

(b) No.4 t6n023c



(c) No.2 t6n042

(d) No.5 t6n042c



(e) No.3 t6n060

(f) No.6 t6n060c

写真1 破壊性状 (水平荷重終了時)

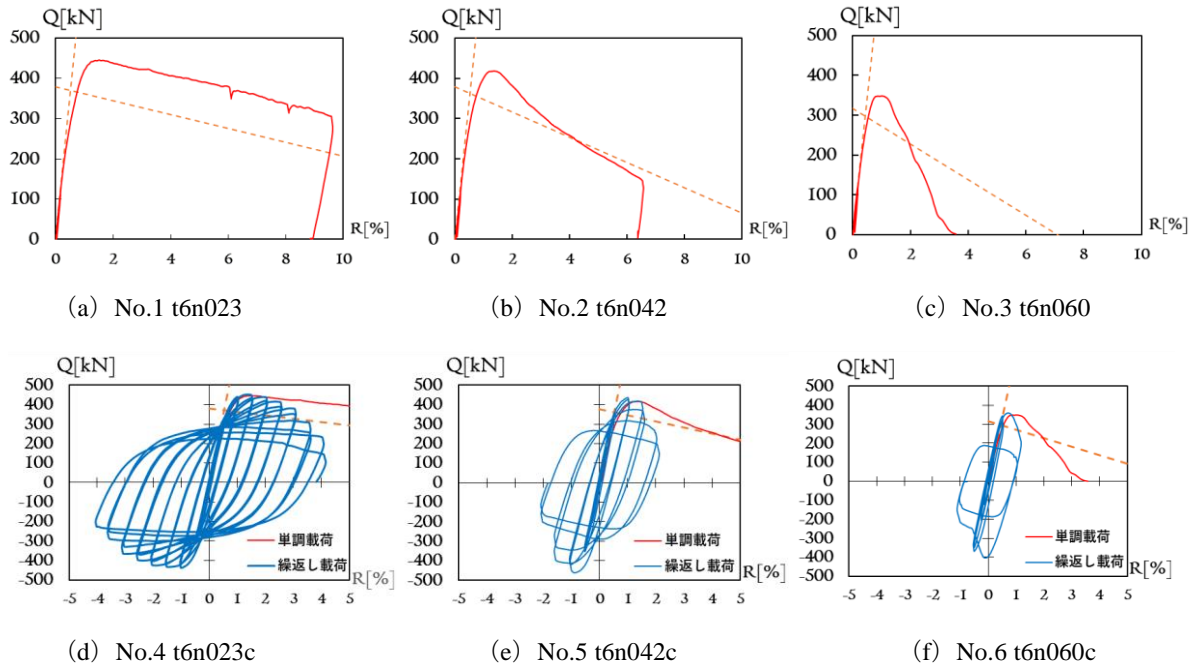


図5 水平力-部材角関係

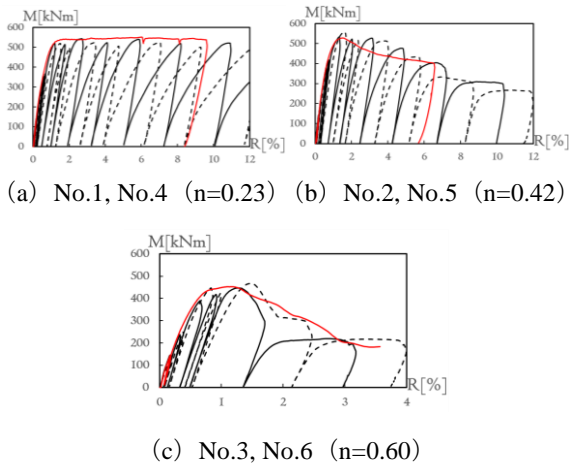


図6 単調挙動と繰返し挙動の対応

4. 耐力劣化を考慮した解析

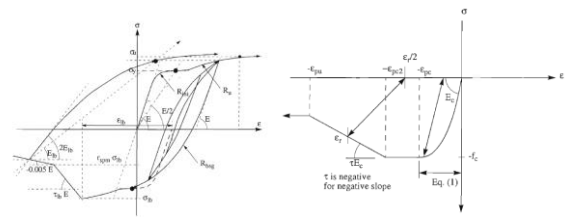
4.1 解析概要

本解析では、河野等が開発した解析プログラム³⁾を使用している。柱梁などの要素は材軸方向、また断面要素を任意に分割することで応力繊維を構成する。平面骨組の各要素に任意の材料特性を与え、変位や荷重を指定することで本解析が実行される。要素ごとの応力-歪関係モデルは小俵氏の修士論文⁴⁾で使用されたモデルを使用した。過去の論文では様々な既往の研究および実験を再現しており、本解析の妥当性を示している。

4.2 応力-歪関係モデル

図7に本解析で使用する応力-歪関係モデルを示す。鋼材は Menegotto-Pinto モデルを基本とし、繰返しによる剛性低下を考慮したモデルである。コンク

リートは Popovics の提案式を使用し、劣化域は崎野・孫式⁵⁾の提案による2段階に線形化したモデルである。



(a) 鋼材 (b) 充填コンクリート

図7 応力-歪関係モデル³⁾

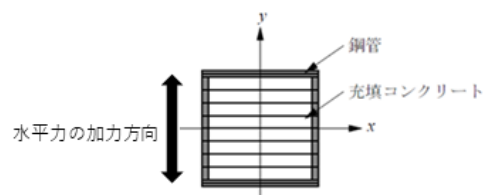


図8 角形CFT柱の断面分割

4.3 解析結果および断面分割の提案

コンクリートの全断面を均一な材とみなす従来の手法に加えて、角部付近の拘束効果が強いことを考慮した断面分割(図9)を提案する。

図10に各断面分割モデルの解析結果を示す。No.1においてはType5の解析が比較的精度よく水平力減少の勾配を示した。No.2、No.3ではType4の解析が比較的実験結果に近い劣化性状を示した。Type1(従来の解析モデル)では、特に低軸力の場合には水平力減少勾配がやや過大に表現されている。この傾

向を修正するために、角部の拘束効果をコンクリートのモデルに反映させることは有効な手段といえるだろう。

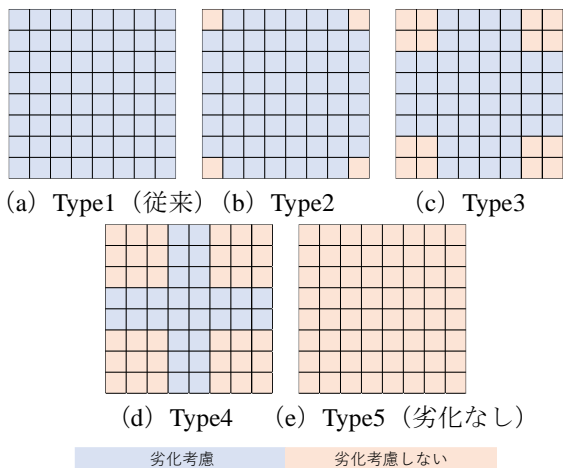


図9 充填コンクリートの断面分割モデル

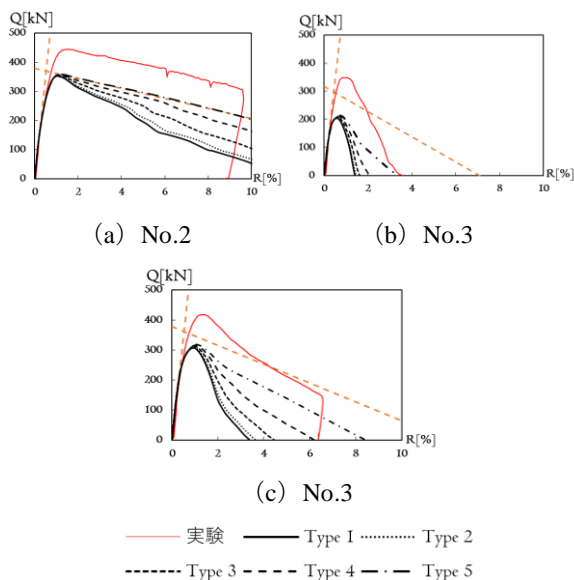


図10 実験値と解析値の比較

5. 耐力評価の考察

既存の耐力評価では、柱脚部の曲げモーメントが全塑性曲げモーメントに達した状態を曲げ終局状態とする。曲げモーメントが作用する鋼管柱脚部の応力状態を考えると、軸方向と柱幅（せい）方向の二軸圧縮ないしは二軸引張となることが考えられる。軸方向圧縮の状態になると鋼材は軸縮みを起こし、直交方向の伸びが生じる。しかし、柱脚部はベースプレートに溶接されており、直交方向の伸びが拘束され、その結果圧縮応力が生じる。二軸応力状態の降伏はミーゼスの降伏条件で考えることができ、降伏に至るための軸方向応力の割増が期待できる。また、充填コンクリートに関しても同様である。鋼管柱脚部は溶接により固定されており、鋼管の拘束効

果による圧縮強度の増加を期待できる。松井らの著書⁶⁾において、角形鋼管の拘束効果について言及されている。すなわち、軸圧縮時に側圧により充填コンクリートが三軸圧縮状態となり圧縮強度の上昇が期待できる。図11は上記の考察に従って終局曲げ耐力を割り増したものを剛塑性崩壊機構直線に適用した結果である。

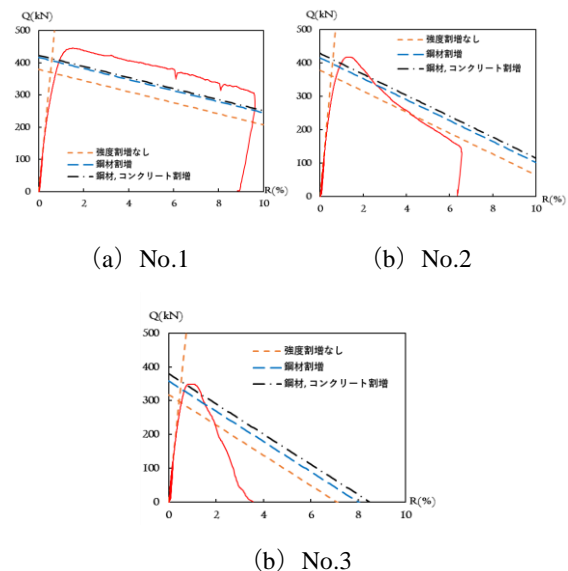


図11 柱脚部の材料強度を割増した剛塑性崩壊機構直線

6. まとめ

単調載荷と繰返し載荷の両方において、高軸力下では耐力劣化が顕著に現れた。ファイバー要素解析に関しては図9に示した断面分割の方法を適用することで精度良く劣化性状を示すことができた。

角形CFTに関する既往の研究と同様に、曲げ耐力は理論値を上回る傾向にあった。柱脚部の拘束効果を考慮して終局曲げ耐力を割り増しすることにより実験値に近い値を示した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 津田恵吾, 松井千秋: コンクリート充填角形鋼管柱の構造性能と幅厚比制限値について, 鋼構造論文集, 第1巻第2号, pp.25-36, 1994.
- 3) 河野昭彦: 平面骨組解析プログラムの理論マニュアル, 2009.
- 4) 小俣慶太: 巨大地震に対する超高層建築物の部材の耐力劣化を考慮した時刻歴応答解析, 九州大学修士論文, 2012.
- 5) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束された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461号, pp.95-104, 1994.
- 6) 松井千秋: コンクリート充填交換構造CFT構造の性能と設計 (オーム社), 2009.