

CFT 柱の変形能力評価手法に関する研究

日大生産工(院) ○柴田 知実 日大生産工 藤本 利昭

1 まえがき

現在のCFT柱の変形能力の定義は日本建築学会の「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」¹⁾ (以下、CFT指針) において、軸力による付加曲げモーメントを考慮した水平力一部材角関係を用いて水平耐力の95%に低下した点(95%耐力限界)における部材角を限界部材角 R_u として定義しており、またその値を基に部材種別の判定を行っている。一方鋼構造では、文献2)において、塑性率による変形能力の評価方法が示されている。このように、構造種別ごとに変形能力の評価法が統一されていないのが現状である³⁾。また、筆者らは⁴⁾、既往のCFT柱の曲げせん断実験による結果を用い、実験変数と塑性率及び限界部材角と塑性率の関係について示した。

そこで本研究では、日米共研⁵⁾と新都市ハウジングプロジェクト⁶⁾によるCFT柱の曲げせん断実験を基に、鉄骨造の変形能力の評価法として用いられている塑性率の評価を図-1のような定義とし、実験変数との関係について、また、限界部材角と塑性率の関係について、比較・検討をした。

2 検討内容

本研究ではまず図-1に示すように、実験値から得られる累積塑性変形曲線とCFT柱をバイリニアにモデル化し、塑性率を算出し、各種実験変数(コンクリート圧縮強度、鋼管降伏強度、幅(径)厚比、軸力比、座屈長さ径比)との比較・検討を行った。次に95%耐力限界時の限界部材角と塑性率の比較・検討を行った。

3 既往の実験の概要

3.1 日米共研⁵⁾

検討に用いた試験体は、座屈長さ径比 $L_k/D = 6.0$ 、軸力比 $N/N_0 = 0.4$ の短柱試験体で、材料強度 ($s\sigma_y = 323 \sim 837 \text{ N/mm}^2$, $c\sigma_B = 35.5 \sim 94.5 \text{ N/mm}^2$)、幅(径)厚比 ($B/t = 18.8 \sim 46.7$, $D/t = 17.7 \sim 53.1$) を実験変数と

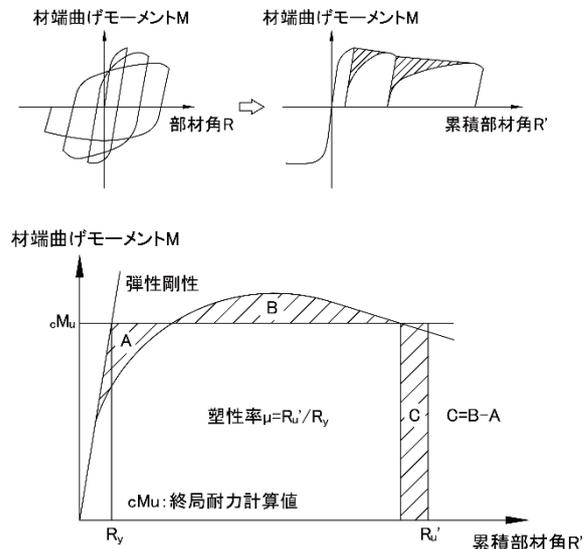


図-1 累積塑性変形倍率

した、円形断面9体、正方形断面12体の合計21体である。

3.2 新都市ハウジングプロジェクト⁶⁾

検討に用いた試験体は、材料強度 $s\sigma_y = 352 \sim 402 \text{ N/mm}^2$, $c\sigma_B = 52.3 \sim 58.8 \text{ N/mm}^2$ の長柱試験体で、幅(径)厚比 ($B/t = 31.0 \sim 55.4$, $D/t = 27.8 \sim 42.6$)、軸力比 ($N/N_0 = 0.1 \sim 0.6$)、座屈長さ径比 ($L_k/D = 12 \sim 24$) を実験変数とした、円形断面7体、正方形断面7体の合計14体である。

4 検討結果

表-1に実験結果一覧を示す。

今回検討に用いた実験では、最終サイクル時点で、部材角が各耐力限界点まで低下していない試験体があるため、その試験体に関しては表中に黄色で示している。

また、 $L_k/D = 6.0$ を超える円形試験体では、拘束効果を考慮しない曲げ耐力により、塑性率を算出している。そして、実験値による水平最大耐力が計算耐力を下回った試験体については、

A study on evaluation method of deformation capacity of concrete filled steel tube columns

Tomomi SHIBATA and Toshiaki FUJIMOTO

塑性率の評価ができないものとして表中に値を示していない。

4.1 塑性率と実験変数との比較

図-2に短柱における塑性率と実験変数の比較を示す。

(a) 短柱試験体（円形断面）

コンクリート圧縮強度—塑性率において、鋼管降伏強度が低い場合、コンクリート圧縮強度が高いほど、塑性率は小さくなった。これは、Fc90のような高強度コンクリートを用いた場合は、最大耐力後に急激な耐力低下が生じるためであると考えられる。ただし、その傾向は、鋼管降伏強度が高くなるにつれ、小さくなっている。

また、鋼管降伏強度—塑性率において、鋼管降伏強度が大きくなると塑性率は減少する。これは鋼管降伏強度が大きくなることで降伏変形が大きくなるため、塑性率が小さくなったと考えられる。

また、径厚比—塑性率において、コンクリートと鋼管降伏強度の影響による塑性率の変化はわずかである。

(b) 短柱試験体（角形）

コンクリート圧縮強度—塑性率において、円形断面同様、低い強度の鋼管を用いた場合、コンクリート圧縮強度が大きくなると塑性率は小さくなった。

また、幅厚比—塑性率において、幅厚比が大きくなると塑性率は小さくなる傾向が見られ、その傾向は高強度鋼管を用いるほど、高強度コンクリートを用いるほど顕著に見られるがこれ

表-1 実験結果一覧

試験体		計算曲げ耐力 M_u [kN・m]	載荷軸力 N [kN]	95%耐力限界時 R_{95}	塑性率 μ	
短柱	円形	SC4A4C	123	1034	0.0450	97.3
		SC4A9C	168	1784	0.0184	64.2
		SC6A4C	280	1809	0.0398以上	50.5
		SC6A9C	331	2567	0.0399以上	45.2
		SC6C4C	165	1462	0.0299以上	60.1
		SC6C9C	229	2086	0.0318	43.1
		SC8A4C	182	1612	0.0437	18.0
		SC8A9C	198	1988	0.0439	18.5
	SC8C9C	116	1347	0.0320	15.2	
	角形	SR4A4C	145	1162	0.0154	29.9
		SR4A9C	196	1895	0.0146	12.4
		SR4C4C	120	1021	0.0152	30.7
		SR4C9C	170	1791	0.0099	11.1
		SR6A4C	297	1959	0.0288	27.6
		SR6A9C	355	2649	0.0222	16.2
		SR6C4C	226	1545	0.0205	15.7
		SR6C9C	288	2368	0.0177	5.4
		SR8A4C	300	2576	0.0328	15.0
		SR8A9C	345	3077	0.0317	11.1
		SR8C4C	236	2003	0.0203	5.3
SR8C9C		280	2540	0.0217	—	
長柱	円形	C12M4	473	2942	0.0191	36.5
		C12M4M	474	2970	0.0255	9.3
		C12M6	403	4413	0.0149	45.7
		C12T4	366	2452	0.0187	—
		C18M4	467	2942	0.0185	21.7
		C24M2	472	1471	0.0295	11.0
	角形	C24M4	457	2942	0.0222	5.7
		R12M3	367	1765	0.0226	11.6
		R12M3M	367	1765	0.0272	9.0
		R12M5	333	2942	0.0153	4.7
		R12T3	286	1520	0.0187	4.3
		R18M3	364	1765	0.0241	9.2
		R24M1	346	588	0.0416	15.8
		R24M3	360	1765	0.0247	—

は円形と同様の理由であると考えられる。

(c) 長柱試験体

図-3に長柱試験体における塑性率と座屈長さ径比の比較を示す。ここでは、円形・角形両試験体とも座屈長さが大きくなると塑性率は小さ

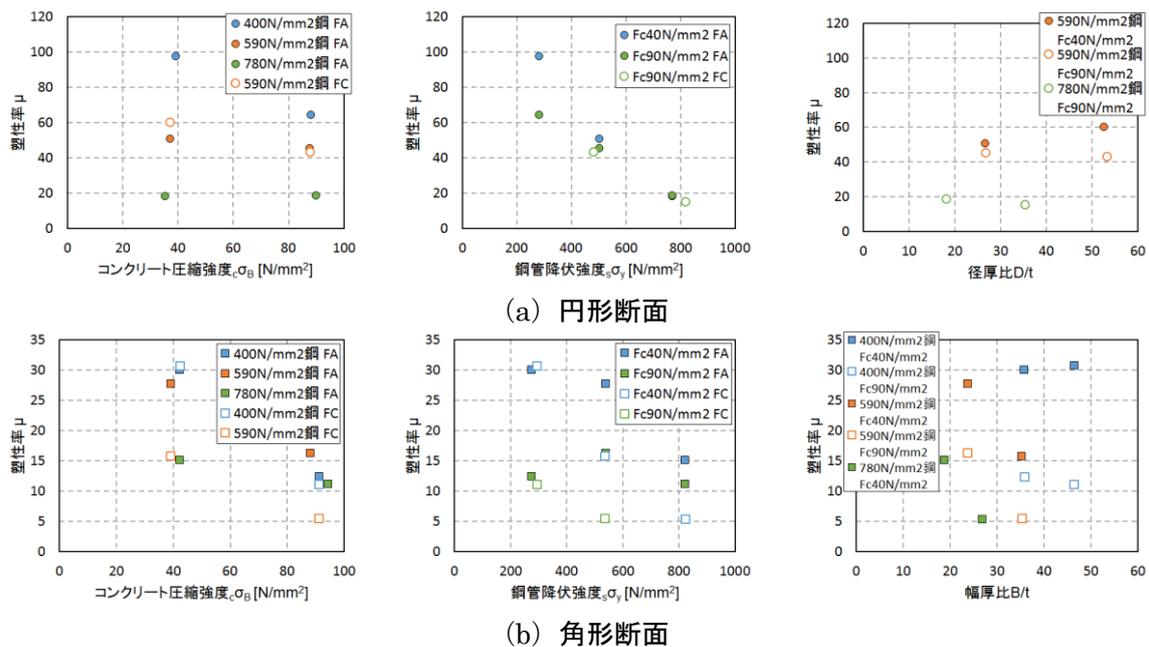


図-2 実験変数—塑性率（短柱）

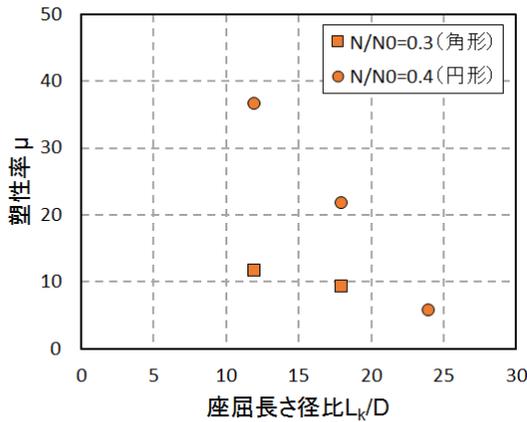


図-3 座屈長さ径比—塑性率（長柱）

くなった。これは、一般に柱が細長くなると水平力による弾性変形が大きくなるため、軸力による付加曲げモーメントにより水平耐力の低下が生じやすくなったためであると考えられる。

4.2 限界部材角と塑性率との比較

図-4 (a) に円形断面、図-4 (b) に角形断面の限界部材角と塑性率の比較を示す。

また、現行のCFT指針による限界部材角の評価式は以下に示す (1), (2) 式の通りである。

(a) 円形断面

$$R_u = \frac{\gamma_c \left(8.8 - 6.7 \cdot \frac{N}{N_0} - 0.04 \cdot \frac{D}{t} - 0.012 \cdot F_c \right)}{100} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 γ_c は円形CFT柱の座屈長さ径比による低減係数で $L_k/D \leq 10$ の場合1.0, $L_k/D > 10$ の場合0.6である。

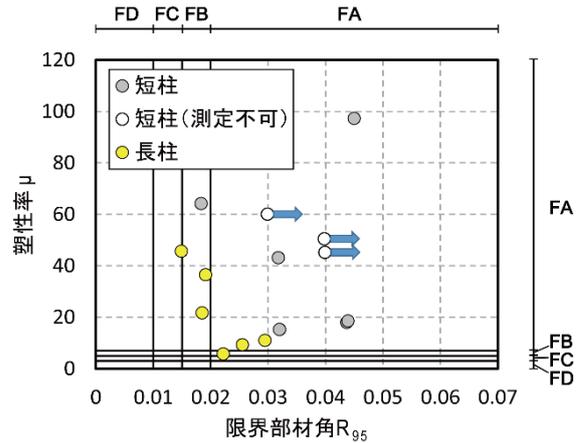
(b) 角形断面

$$R_u = \frac{\gamma_r}{0.15 + 3.79 \cdot \frac{N}{N_0}} \cdot \frac{t}{D} \cdot \beta$$

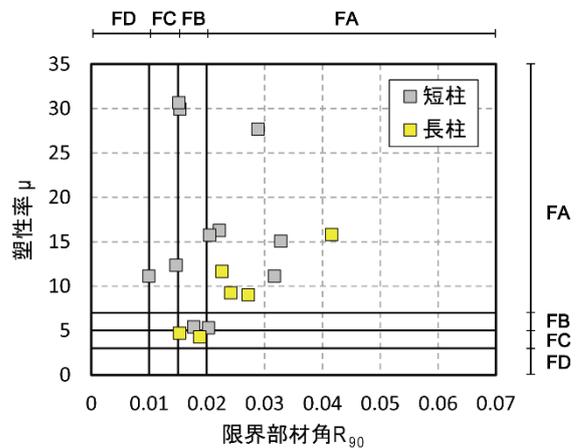
$$\beta = 1.0 - \frac{F_c - 40.3}{566} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 γ_r は角形CFT柱の座屈長さ径比による低減係数で $L_k/D \leq 10$ の場合1.0, $L_k/D > 10$ の場合0.8である。

そして図中には、CFT指針における限界部材角に基づく柱部材の構造種別 (FA~FD) 及び文献7) に示された塑性率に基づくS造の柱部材の構造種別 (FA~FD) を併せて示している。また、前述の通り今回の実験では部材角6%の時点で実験を終了しているため、その試験体については、プロットの限界部材角の値以上の余力があることを示す矢印を加えている。



(a) 円形断面



(b) 角形断面

図-4 限界部材角—塑性率

(a) 円形断面

図-4 (a) に円形断面における限界部材角と塑性率の比較を示す。短柱試験体において、限界部材角と塑性率のそれぞれの評価は、概ね FA ランクで良好な対応を示した。また、長柱試験体では、表-1 より C12M4, C18M4, C24M4 ($L_k/D = 12, 18, 24$ かつ全て $N/N_0 = 0.4$) において、座屈長さが長くなることによる限界部材角と塑性率の値についてばらつきが生じ、C12M4 と C18M4 の間では正比例に、C18M4 と C24M4 の間では反比例の関係となった。そして、C24M4 については、限界部材角による評価法では、FA クラスであるのに対し、塑性率による評価法では、FB クラスとなり、現行の CFT 指針での評価では、塑性率による評価に比べて過大評価となるため、注意が必要である。今回の実験では、図-5 のような片持ち形式であり、弾性域の部材角は増加していく一方で座屈長さが長い場合において、同一部材角に対するたわみ量が大きく、 $P-\Delta$ 効果の影響が大きくなるため、最大耐力後の耐力劣化勾配も大きくなる。

そのため塑性率と限界部材角とで変形能力の評価にばらつきが生じたと考えられる。そこで、図-6に示すように、座屈長さ径比のみの違いによる3つの試験体について、材端曲げモーメント—累積部材角を比較した。ここでは、C24M4において降伏変形が小さく、塑性率が小さくなったことが確認できる。

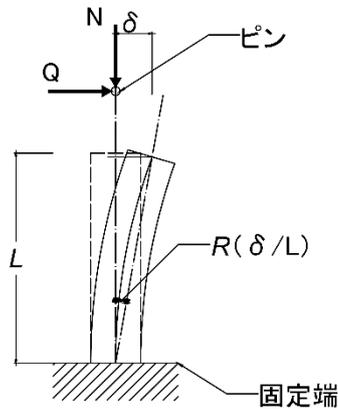


図-5 荷重条件

(b) 角形断面

図-4 (b) に角形断面における限界部材角と塑性率の比較を示す。

短柱・長柱両試験体とも限界部材角と塑性率それぞれの評価は概ね、FAランクで良好な対応を示した。しかし、長柱試験体では、表-1よりR12M5, R12T3について限界部材角による評価ではFBクラスであるのに対し、塑性率による評価は、FCクラスであり、CFT指針による評価が塑性率での評価に対して、過大評価となっている。R12M5については、軸力比が0.5と大きく、最大耐力後にP-Δ効果による急激な耐力劣化が生じるためであると考えられ、R12T3については、幅厚比が42.6と大きいため早期に局部座屈が生じたためと考えられる。

5 まとめ

本研究では以下の知見が得られた。

- ・限界部材角と塑性率による評価は円形断面について短柱試験体において、角形断面では短柱・長柱両試験体において、概ねFAランクで良好な対応を示した。
- ・長柱試験体の円形断面では、 $N/N_0 = 0.4$, $L_k/D = 12$ の試験体について、角形断面では、 $N/N_0 = 0.5$, $L_k/D = 12$ について、限界部材角による評価は塑性率による評価に対して過大評価となり得る。

・長柱試験体の角形断面において、 $N/N_0 = 0.3$, $L_k/D = 12$ では、幅厚比の大きさによっては、

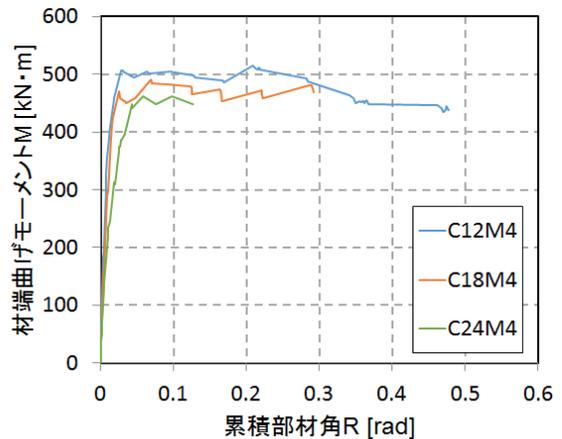


図-6 材端曲げモーメント—累積部材角

限界部材角による評価は塑性率による評価に対して過大評価となり得る。

「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，2008.10.
- 2) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，2011.4
- 3) 藤本利昭：CFT柱材の変形能力，2016年度日本建築学会（九州）構造部門（SCCS）パネルディスカッション資料「CFT構造計算規準化に向けて—長周期地震動も考慮した規準—」，2016.8
- 4) 柴田知実，藤本利昭，城戸基：CFT柱の変形能力の評価法に関する研究，第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，No.17, 2017.11
- 5) 藤本利昭，他：高強度材料を用いたコンクリート充てん鋼管柱の曲げせん断性状，日本建築学会構造論文集，No.509, pp.167-174, 1998.7
- 6) 山口種美，他：CFT長柱の構造性能に関する研究—その1 実験計画—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1185-1186, 2000.9
- 7) 広沢雅也，山内博之：新しい耐震設計法に基づく建築物の構造計算の実際，季刊カラム，No82, pp.5-38, 1981.10