

(39) 角形CFT長柱の変形能力に関する 実験的研究

助川 海都¹・藤本 利昭²・今井 皓己³・大石 琴⁴

¹正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575千葉県習志野市泉町1丁目2-1)
E-mail: ciki21007@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学大学院生産工学研究科 教授・博士(工学) (〒275-8575千葉県習志野市泉町1丁目2-1)
E-mail: fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575千葉県習志野市泉町1丁目2-1)
E-mail: ciko20005@g.nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575千葉県習志野市泉町1丁目2-1)
E-mail: ciko21015@g.nihon-u.ac.jp

コンクリート充填鋼管構造 (以下, CFTと略称) は, 鋼管にコンクリートを充填する構造である。CFT柱は, 鉄骨梁との混合構造としてオフィスビルで多く用いられ, 一般的に基準階では, 短柱, 中柱となり, 比較的階高が高いエントランス部分では長柱となる場合が多い。座屈長さが異なる柱の構造性能は異なり, 2008年発行の「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」では, 圧縮材との整合性を鑑み曲げ座屈が挙動に影響しない短柱, 付加曲げモーメントを考慮した長柱, およびその中間の中柱に分けられている。

本研究では, CFT長柱の変形能力に焦点をあて, 正方形断面で実験変数を軸力, 部材長さとした5体の試験体の実験結果と設計式の値と比較をする。

Key Words : CFT, Buckling length diameter ratio, Square cross section, Deformation capacity

1. はじめに

現在, CFT部材は柱材として広く用いられ, その優れた剛性および耐力から鉄骨梁との合成構造として, オフィスビルの主要な構造システムを担っている。そういったオフィスビルにおいて, CFT柱は一般階 (基準階) では比較的短い柱 (短柱) となるが, 最下階においては, 比較的階高が高くなる場合や吹き抜けなどにより, 細長い柱 (長柱) となる場合が多い。

現在のCFT造の設計は, 日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」¹⁾ (以下, CFT指針と略称) 等に基づいて行われるが, 柱区分は座屈長さ径比 L_k/D

(L_k : 座屈長さ, D : 断面せい) により決定されている。軸耐力および曲げ耐力の算定に当たっては, 断面の局部座屈が支配的になる短柱 ($L_k/D \leq 4$), 部材の全体座屈が支配的になる長柱 ($12 < L_k/D \leq 30$), 短柱と長柱の中間の中柱 ($4 < L_k/D \leq 12$) と定義し, 異なる評価式が適用される。

一方, CFT柱の変形能力を表す限界部材角 R_u は, 元

来 $L_k/D \approx 6$ の実験データに基づき評価式が構築されていた。そのため, $L_k/D > 10$ となる細長い柱に対しては低減係数を乗じる形で評価することとなっており, $L_k/D = 10$ を境に評価式が不連続になっているという課題がある。

そこで本研究では, 試験体の座屈長さ軸力比に焦点を当て, 方形断面CFT柱の変形能力を明らかにすることを目的として, 曲げ実験および一定軸力下の曲げ実験を行った。

2. 実験計画

(1) 試験体概要

表 1 に試験体一覧を示す。試験体は, □-150×4.5 の正方形鋼管にコンクリートを充填した CFT 柱とした。部材長さ L は, 座屈長さ径比 (L_k/D) が 6.0 となるよう 900mm を基本とし, 軸力比 (N/N_0 , N : 作用軸力, N_0 : CFT 柱の軸圧縮耐力) は 0, 0.2, 0.3 の 3 種類を設定した。また, 部材長さによる比較のため軸力比 0.2,

表1 試験体一覧

試験体名称	部材長さ L (mm)	軸力比 N/N_0	板厚 t (mm)	幅 B (mm)	せい D (mm)	幅厚比 B/t	座屈長さ径比 L_k/D
900-N0	900	0	4.22	150	150	35.5	6.00
900-N20	900	0.2					6.00
900-N30	900	0.3					6.00
1250-N20	1250	0.2					8.33
1600-N20	1600	0.2					10.67

部材長さを $L=1250\text{mm}$, 1600mm とした試験体を計画した。試験体名称の最初の数字は「部材長さ」, "N"以降の数値は「軸力比 (%)」を表している。

表2に使用した鋼管の材料試験結果を示す。鋼管は一般構造用角形鋼管 STKR400 を使用し, 材料試験片は5号試験片とした。

表3に充填コンクリートの調合表を, 表4にコンクリートの材料特性を示す。試験体コンクリートの設計基準強度は $F_c=33$ (N/mm^2) とし, 実験時のコンクリート強度は, 軸力比0の試験体が $\sigma_B=36.3\text{N/mm}^2$, 軸力比0.2, 0.3の試験体は $\sigma_B=38.7\text{N/mm}^2$ であった。

表3 コンクリート調合表

	W/C (%)	セメント	水	単位質量(kg/m^3)			混和剤
				細骨材 山砂	粗骨材 砕砂	6号砕石	
普通コンクリート	59	331	195	528	232	950	3.64

表4 コンクリートの材料特性

	設計基準強度 F_c (N/mm^2)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (kN/mm^2)	圧縮強度時ひずみ ε (%)	材齢 (日)
軸力比0	33	36.3	30.1	0.22	82
軸力比0.2		38.7	31.8	0.208	169
軸力比0.3					

(2) 実験方法

a) 曲げ実験概要

図1に軸力比0の試験体の実験方法を示す。実験には2000kN万能試験機を使用した。実験方法は柱を90度回転させた状態での3点曲げ試験とし, 試験体両側のエンドプレート部をピンローラー支持とし, 試験体中央部のダイアフラムを模擬したプレートを加力した。

変位計測は, 試験体両端に各2本取り付け付けた変位計①～④(図3参照)で試験体両端の支点と加力点間の鉛直方向の変位差 δ を計測し, 変位 δ から部材角 $R(=\delta/L/2)$ を求めた。また試験体上下面には1軸のひずみゲージを各4枚, 試験体側面には3軸のひずみゲージを各2枚取り付け, 各部のひずみを測定した。

b) 一定軸力下の曲げ実験概要

図2に軸力比0.2, 0.3の試験体の実験方法を示す。一定軸力下の曲げ実験も曲げ実験と同様に3点曲げ試験とした。実験に際しては, 軸力载荷用のフレームを5000kN構造物試験機内にセットし, フレームに設置した500kN油圧ジャッキにより軸力を一定に保った状態で試験体中央部のプレートを加力を行った。

各種の測定は, 曲げ実験の測定項目に加え, 図3に示

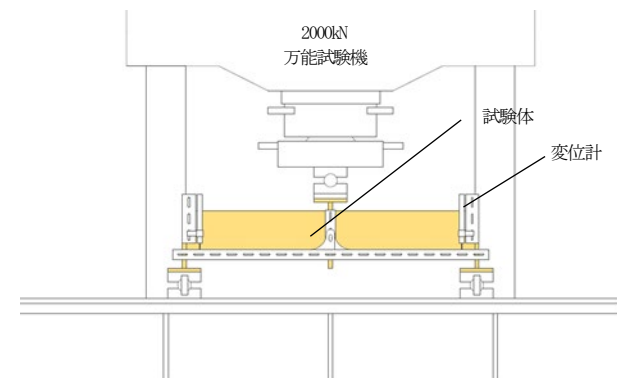


図1 曲げ実験概要

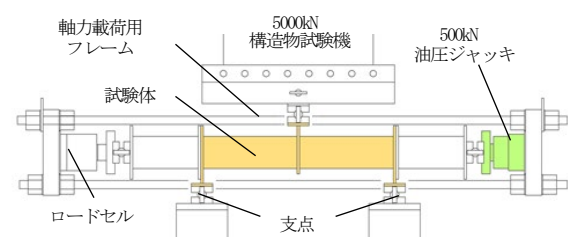


図2 試験機概要

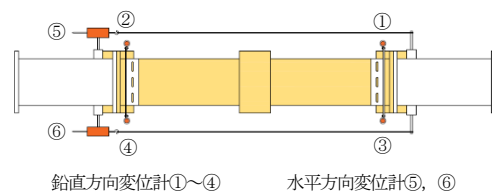


図3 変位計位置 (平面図)

表2 鋼材の材料特性

	板厚 t (mm)	降伏強度 σ_y (N/mm^2)	引張強度 σ_u (N/mm^2)	ヤング係数 E_s (kN/mm^2)	伸び率 ε (%)
STKR400	4.22	417	496	205	32.2

表5 実験結果一覧

試験体名称	部材長さ L (mm)	最大荷重			最大曲げモーメント				部材角	
		実験値 ${}_eP_u$ (kN)	計算値 ${}_cP_u$ (kN)	${}_eP_u/{}_cP_u$	実験値 ${}_eM_{uP}$ (kN・m)	実験値 ${}_eM_u$ (kN・m)	計算値 ${}_cM_u$ (kN・m)	${}_eM_u/{}_cM_u$	実験値 R_{max} (%)	実験値 R_{95} (%)
900-N0	900	364	276	1.32	81.9	81.9	62.1	1.32	4.44	6.59
900-N20		341	304	1.12	76.7	78.8	68.4	1.15	1.20	2.97
900-N30		330	302	1.09	74.3	77.4	67.5	1.15	1.28	2.49
1250-N20	1250	240	219	1.10	75.0	78.0	68.4	1.14	1.53	3.22
1600-N20	1600	184	171	1.08	73.6	79.4	68.4	1.16	1.96	3.70

した⑤、⑥の変位計により、部材全長の軸変位を測定した。

3. 実験結果

(1) 実験結果概要

表5に実験結果の一覧を示す。表中の終局曲げ耐力の計算値 ${}_cM_u$ は、文献3)に基づき鋼管角R部を考慮して求めた値であり、最大荷重計算値 ${}_cP_u$ は、 ${}_cM_u$ を部材長さ L の1/4で除して求めた値である。

終局曲げモーメントの実験値 ${}_eM_u$ は、付加曲げモーメントを含む値とし、式(1)～(3)によって算定した。

$${}_eM_u = {}_eM_{uP} + {}_eM_{uN} \quad (1)$$

$${}_eM_{uP} = \frac{{}_eP_u \cdot L}{4} \quad (2)$$

$${}_eM_{uN} = N \cdot \delta \quad (3)$$

ここで、 ${}_eM_{uP}$ ：水平力（せん断力）による終局曲げモーメント実験値、 ${}_eM_{uN}$ ：軸力による付加曲げモーメント実験値、 ${}_eP_u$ ：最大荷重、 δ ：鉛直方向の変位である。

R_{max} は最大荷重時の部材角であり、変位 δ を部材長さ L の1/2で除して求めた。 R_u は限界部材角であり、荷重が最大荷重以降に95%まで低下した時の部材角 η の値を示している。なお部材角の評価にあたっては、局部座屈発生後、変形が非対称となる η ことから、変位計から得られた結果より左右で大きい方の値を用いて求めた。

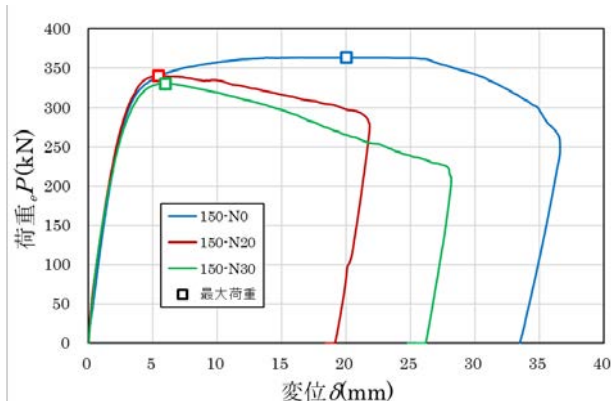
(2) 荷重-変位関係

図4(a)には、部材長さが900mmと等しく、軸力比が0、0.2、0.3と異なる試験体を、図4(b)には、軸力比が0.2と等しく、部材長さが900mm、1250mm、1600mmと異なる試験体の荷重-変位関係を比較して示している。図の縦軸は荷重 ${}_eP$ 、横軸は変位 δ であり、図中の“□”は各試験体の最大荷重 ${}_eP_u$ の点を示している。

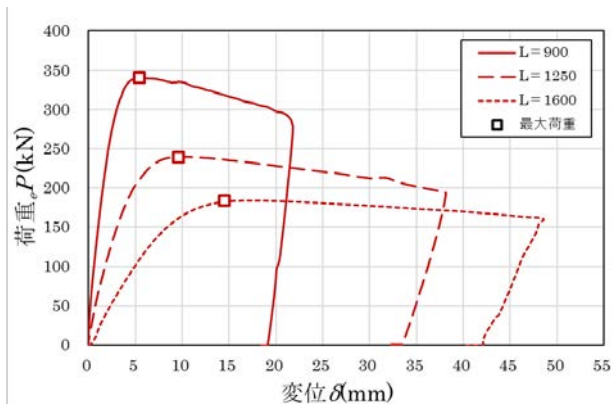
図4(a)より、軸力比が小さい順に最大荷重 ${}_eP_u$ は大きい結果となり、最大荷重時の変位は軸力比0が大きく、

軸力比0.2、0.3では大きな差異は生じなかった。軸力比0.2、0.3では最大荷重後に耐力低下がみられるが、軸力比0は最大荷重直後に急激な耐力低下は見られず、変位約25mmから耐力低下がみられた。

図4(b)より、部材長さが長くなるに従い、初期剛性、最大荷重が小さくなるが、最大荷重時の変位は大きくなっている。また最大荷重後の耐力低下は、全ての試験体で確認できるが、その耐力低下の傾きは部材長さが短いほど大きくなっている。



(a) 軸力比 (N0, N20, N30)
部材長さ900mm



(b) 部材長さ (L=900, 1250, 1600)
軸力比0.2

図4 荷重-変位関係

(3) 荷重-部材角関係

図4と同様に、図5(a)は部材長さが900mmと等しく、軸力比が0, 0.2, 0.3と異なる試験体、図5(b)には軸力比が0.2と等しく、部材長さが900mm, 1250mm, 1600mmと異なる試験体について、荷重-部材角関係を比較して示す。図の縦軸は荷重 P 、横軸は部材角 R 、図中の“■”は最大荷重時の部材角を、“□”は限界部材角を示している。

図5(a)より、限界部材角は軸力比が小さいほど大きくなった。軸力比0.2と0.3の試験体の限界部材角は約3%で、その差は僅かであったが、軸力比0の試験体の限界部材角は約6.5%で、他の試験体より大きな値となった。また、最大荷重時の部材角から荷重が5%低下する限界部材角までの部材角の変化量は、試験体900-N0が2.15%、試験体900-N20が1.77%、試験体900-N30が1.21%であり、軸力比が高くなるほど最大耐力から限界部材角に到達するまでの部材角が小さくなっている。

図5(b)より、限界部材角は試験体900-N20が約3%、試験体1250-N20が約3.5%、試験体1600-N20が約4%となり、部材長さが長いほど大きくなった。また、最大荷重時の部材角から各限界部材角までの部材角の変化量は

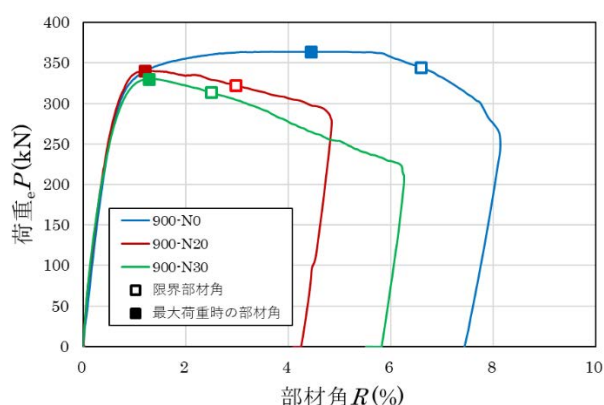
900-N20が1.77%、1250-N20が1.69%、1600-N20が1.74%となり顕著な差異はみられなかった。

(4) モーメント-部材角関係

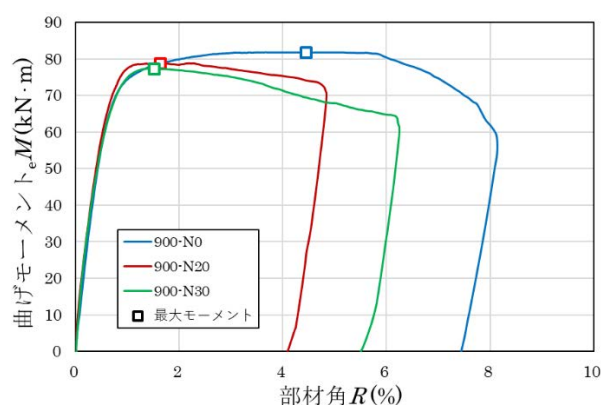
図4, 5と同様に、図6(a)に部材長さが等しく軸力比が異なる試験体、図6(b)に軸力比が等しく部材長さが異なる試験体の曲げモーメント-部材角関係を示す。なお図の縦軸は軸力による付加曲げモーメントを含んだ曲げモーメント、横軸は部材角 R を示している。また図中の“□”は各試験体の最大モーメント時の部材角である。

図6(a)より、最大曲げモーメントは、軸力比が小さいほど大きくなったが、3体の試験体の最大曲げモーメントは約80kN・mで、顕著な差異はなかった。また最大モーメント時の部材角は、軸力比が小さいほど大きくなり900-N20, 900-N30にはほとんど差異は認められないが、900-N0は2体に比べ約3%大きくなった。

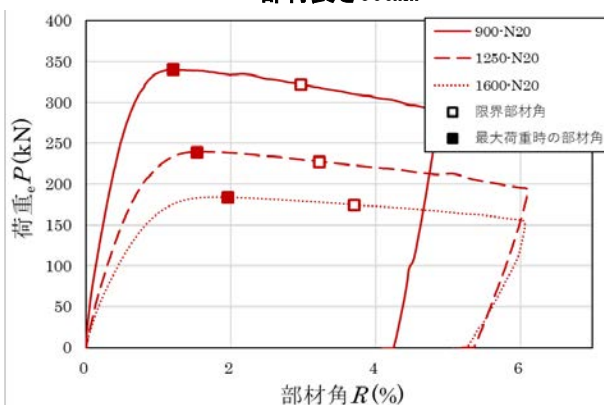
図6(b)より、最大曲げモーメントは、部材長さが長いほど大きくなったが、3体の試験体で約80kN・mとなり顕著な差異はなかった。最大モーメント時の部材角は部材長さが長いほど大きくなり、1600-N20の値は900-N20, 1250-N20に比べ約2%大きくなった。



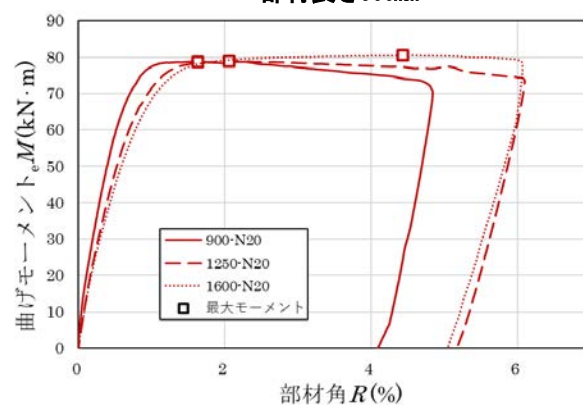
(a) 軸力比 (N0, N20, N30)
部材長さ900mm



(a) 軸力比 (N0, N20, N30)
部材長さ900mm



(b) 部材長さ (L=900, 1250, 1600)
軸力比0.2



(b) 部材長さ (L=900, 1250, 1600)
軸力比0.2

図5 荷重-部材角関係

図6 モーメント-部材角関係

(5) 曲げ耐力

図7にCFT指針により求めた軸力-曲げモーメント (M-N) 相関曲線に実験値をプロットして示す。ここでCFT指針のM-N相関曲線は、試験体の座屈長さ径比 L_k/D に対応して示しているが、 $L_k/D = 6$ の曲線は、短柱式の値を示した。また実験値の曲げモーメントは軸力による付加曲げモーメントを含めない eM_{uP} である。

実験結果は、何れのM-N曲線も上回る結果となっている。

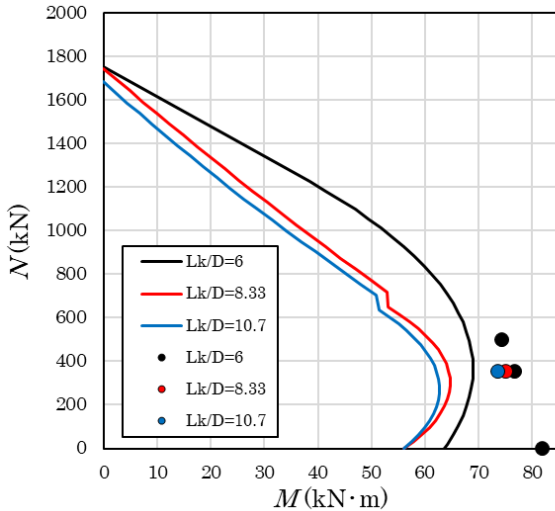


図7 曲げ耐力の比較

(6) 変形能力

CFT柱の変形能力を表す限界部材角 R_u は、CFT指針式の以下の評価式が適用される。

$$R_u = \frac{\gamma_r}{0.15 + 3.79 \frac{N}{N_0}} \cdot \frac{t}{D} \cdot \beta \quad (4)$$

$$\beta = 1.0 - \frac{F_c - 40.3}{566} \leq 1.0$$

ここでCFT指針の評価式は、 $L_k/D \approx 6$ の比較的短い柱の実験データに基づき構築され、限界部材角の影響因子である鋼管の幅厚比、コンクリート強度、軸力比がパラメータとなる式であり、これらが大きくなるほど限界部材角が小さくなるという物理現象を表している。

また柱の長さによる影響は、 $L_k/D > 10$ となる細長い柱に対しては低減係数 γ_r を乗じる形で評価することとなっており、 $L_k/D \leq 10$ の場合 $\gamma_r = 1.0$ 、 $L_k/D > 10$ の場合 $\gamma_r = 0.8$ となっている。よって $L_k/D = 10$ を境に評価式が不連続になっているということがわかる。

表6に実験により得られた各試験体の限界部材角と、CFT指針の評価式による値を比較して示す。なお本実験

では、試験体1600-N20が $L_k/D > 10$ であり、 $\gamma_r = 0.8$ とした値は () 内に示している。

また図8は、縦軸を限界部材角の実験値、横軸をCFT指針式の限界部材角として比較した図である。なおCFT指針の値は座屈長さによる低減は考慮していない。また図中には、文献5)に示された既往の実験データを座屈長さで分類して“□”と“■”でプロットしている。

表6より、軸力が作用していない試験体900-N0についてみると、実験値に対しCFT指針の評価式が過大評価してしまい、正確に評価することができないことが分かる。よってここでは、軸力比0の試験体は検討から除外する。

試験体900-N30、1250-N20、1600-N20の試験体は、実験値が計算値を上回り安全側の評価となった。しかしながら、900-N20は実験値が計算値を下回り、危険側の評価となっている。安全側の評価となった試験体の中でも、1600-N20の実験値は計算値を上回り、更に座屈長さの低減係数 $\gamma_r = 0.8$ を適用するとその差異は約1.2%になった。

図8より、既往の実験データに対し、CFT指針の評価式は $L_k/D \leq 10$ の実験値を平均的に評価していること、 $L_k/D > 10$ の実験値は評価式を下回る試験体が多いことがわかる。

一方で本実験結果は、試験体900-N30、1250-N20、1600-N20の試験体は、実験値と評価式との対応が良い

表6 変形能力 (実験値と評価式の比較)

		試験体名称				
		900-N0	900-N20	900-N30	1250-N20	1600-N20
R_{95} (%)	実験値	6.59	2.97	2.49	3.22	3.70
	CFT指針	18.8	3.10	2.19	3.10	3.10 (2.48)

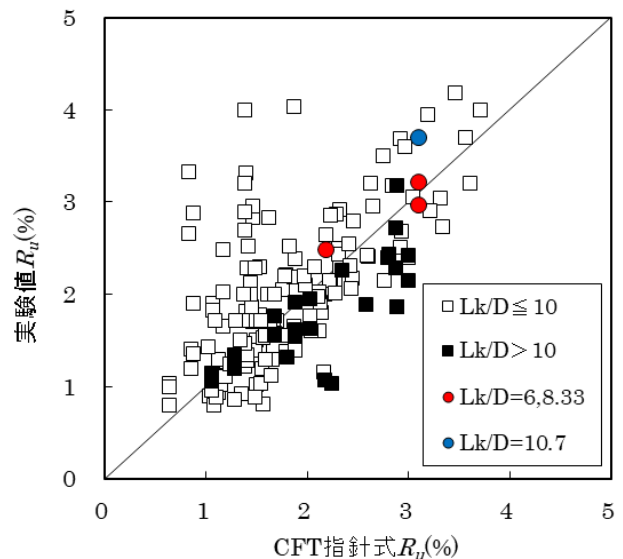


図8 変形能力実験値と評価式 ($\gamma_r = 1.0$) の比較

ことがわかる。しかしながら、 $L_k/D > 10$ となる試験体 1600-N20の実験値は計算値を上回っており、更に座屈長さの低減を考慮すると、その差異は約1.2%と大きくなった。安全側の結果ではあるが、より精度良く評価するためには、今後座屈長さの影響に関しては、更に検討が必要そうである。

4. まとめ

軸力比と部材長さを変数とした、曲げ実験および一定軸力下の曲げ実験から以下の知見が得られた。

- ・最大曲げモーメントの実験値は計算値に対して、軸力が作用しない試験体は32%、軸力が作用する試験体は約10%上回った。付加曲げモーメントを含めた材端曲げモーメントの比では、約15%計算値を上回り安全側の評価となった。
- ・柱の初期剛性は部材長さが短いほど大きくなる。一方部材長さが等しい場合、軸力比での違いはわずかであった。
- ・限界部材角の実験値は部材長さが等しい場合、軸力比が小さいほど大きく、軸力比が等しい場合、部材長さが長いほど大きくなった。CFT指針の式は、柱を対象としていることから、軸力比が0の場合で過大評価することがわかった。CFT指針の式では、部材長さが $L_k/D = 10$ を超えると低減係数が考慮されているが本実験では部材長さによる限界部材角の差異はわずかであり、今後更なる検討が必要である。

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，第2版，p.42，2008
- 2) 助川海都，藤本利昭，今井皓己，三浦智美，大石琴：矩形CFT柱の曲げ性状に関する実験的研究 - その1 実験概要 -，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.197-200，2021.3
- 3) 藤本利昭，田中宏和，平出亨，竹中啓之：断面形状を考慮した角形CFT柱の設計式，日本建築学会技術報告集，Vol.15, No.31, pp.757-760, 2009.10
- 4) 加藤勉，秋山宏，北沢進：局部座屈を伴う箱型断面部材の変形，日本建築学会論文報告集，pp.71-76，1978.6
- 5) 藤本利昭，田中宏和，出水俊彦，西内晃二，上田弘樹，福元敏之：コンクリート充填鋼管柱の構造性能に関する調査研究，日本建築学会技術報告集，第16巻，pp.129-134，2002.12

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION CAPACITY OF SQUARE CFT SLENDER COLUMNS

Kaito SUKEGAWA, Toshiaki FUJIMOTO, Koki IMAI, and Koto OISHI

Concrete Filled Steel Tube (CFT) columns are often used in office buildings as elements in a mixed structure including steel beams. They are often placed as slender columns at entrances, which often have a relatively high floor height. The structural performance of columns that have different buckling lengths is different, and slender columns take additional bending moment into consideration. In this study, we focus on the deformation capacity of long CFT columns and compare the experimental results with the values given in design formulas. Furthermore, the deformation ability of a long column will be examined through a comparison between past experimental data and the results of this experiment.