

角形 CFT 柱の変形能力に関する実験的研究

-座屈長さ径比の影響-

日大生産工(院) ○助川 海都 日大生産工 藤本 利昭
日大生産工(院) 今井 皓己 日大生産工(院) 大石 琴

1. まえがき

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。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る。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、試験体の座屈長さ径比と軸力比に焦点を当て、正方形断面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

2.1 試験体概要

表1に試験体一覧を示す。試験体は、 \square -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, 部材長さを $L=1250$ 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)とした。

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3 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	0.21	169
軸力比0.3					

表1 試験体概要

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

Experimental Study of the Deformation Capacity of Square CFT Columns

- Effect of Buckling Length-Diameter Ratio -

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

2.2 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介して加力した。

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、軸力載荷用のフレームを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介して加力を行った。

各種の測定は、曲げ実験の測定項目に加え、図3に示した⑤、⑥の変位計により、部材全長の軸変位を測定した。

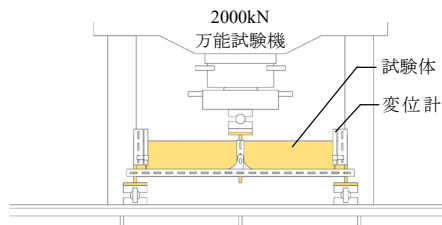


図1 曲げ実験概要

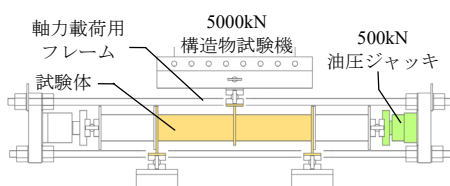


図2 一定軸力下の曲げ実験概要

3. 実験方法および測定方法

3.1 実験結果概要

表4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2)に基づき鋼管角R部を考慮して求めた値であり、最大荷重の計算値 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。

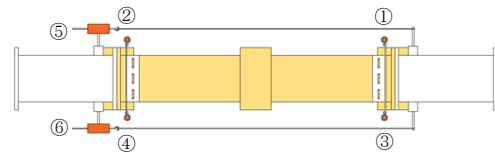
$$eM_u = eM_{uP} + eM_{uN} \quad (1)$$

$$eM_{uP} = \frac{eP_u \cdot L}{4} \quad (2)$$

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

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 ρ 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³⁾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。また、今回の実験では実験装置の都合などから部材角6%に達した時点で実験を終了している。



鉛直方向変位計①～④ 水平方向変位計⑤、⑥

図3 変位計位置（平面図）

表4 実験結果一覧

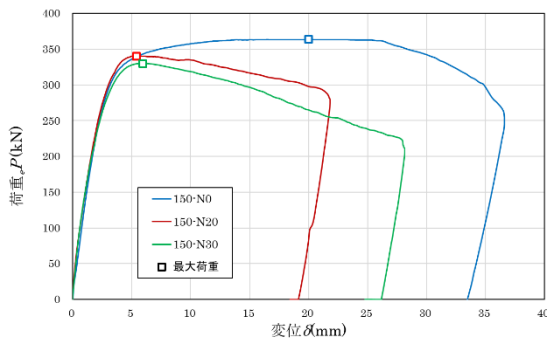
試験体名称	部材長さ L (mm)	最大荷重			最大曲げモーメント				部材角	
		実験値	計算値	eP_u/cP_u	実験値	実験値	計算値	eM_u/cM_u	実験値	実験値
		eP_u (kN)	cP_u (kN)		eM_{uP} (kN·m)	eM_u (kN·m)	cM_u (kN·m)		R_{max} (%)	R_u (%)
900-N0	900	364	276	1.32	81.9	81.9	62.1	1.32	4.44	6.59
900-N20		341	304	1.12	76.7	78.8	68.4	1.15	1.20	2.97
900-N30		330	302	1.09	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

3.2 荷重-変位関係

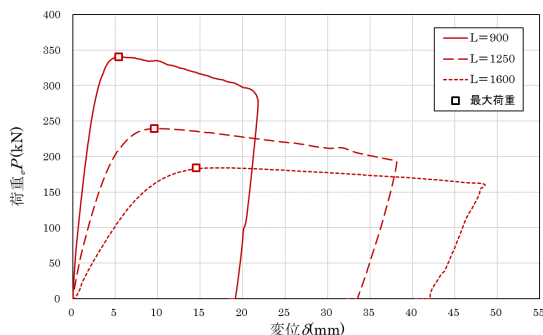
図4(a)には、部材長さが900mmと等しく、軸力比が0, 0.2, 0.3と異なる試験体を、図4(b)には、軸力比が0.2と等しく、部材長さが900mm, 1250mm, 1600mmと異なる試験体の荷重-変位関係を比較して示している。図の縦軸は荷重 eP 、横軸は変位 δ であり、図中の“□”は各試験体の最大荷重 eP_u の点を示している。

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連れ、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-部材角関係

3.3 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ことがわかる。

表5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。

表5 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_u (%)	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)

また図5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指針式の値は座屈長さ径比による低減は考慮していない。また図中には、文献4)に示された既往の実験データを座屈長さ径比で分類して“□”と“■”でプロットしている。

CFT指針の限界部材角評価式の構築に用いられた軸力比は0.12~0.80となっていること、表5より、軸力が作用していない試験体900-N0は、実験値に対しCFT指針の評価式が過大評価してしまうことから、今回は軸力比0の試験体は検討から除外する。

表5より、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のパラメータを用いたCFT指針式に低減係数 $\gamma_r=0.8$ を適用すると実験値との差異は約1.2%と大きく、安全側の評価となった。

図5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。

図6に、軸力比と限界部材角実験値を示す。図中には、文献4)に示された既往の実験データを座屈長さ径比(柱区分)で分類して座屈長さ径比が小さい順に“○, ●, ●”でプロットしている。また、CFT指針では、部材の変形能力を確保する目的で柱軸力の上限值($N/N_0 = 0.7$)が規定されている。

図6より、既往の実験データは軸力比が低くなるに従って限界部材角実験値が大きくなる右下がりの傾向がみられ、特に座屈長さ径比が12を上回る(長柱)でその傾向が顕著である。また、限界部材角実験値1%を下回る試験体も既往の実験データに数体確認できるが軸力比0.5を下回る全ての試験体で限界部材角実験値が1%を上回っている。

本実験の値においても既往のデータと同様の傾向がみられ、限界部材角実験値の最小値は900-N30の2.19%であった。

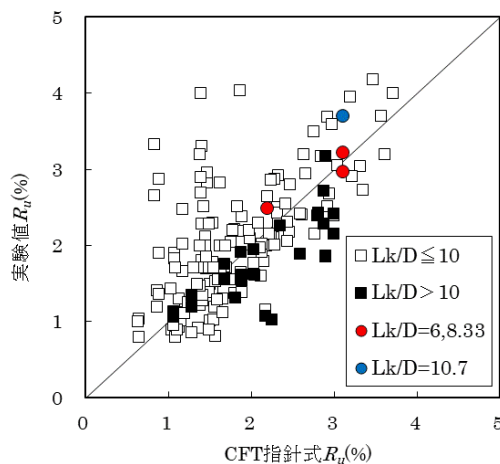


図5 限界部材角実験値と評価式($\gamma_r = 1.0$)の比較

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。

- 最大荷重における耐力比は、軸力が加わらない試験体は32%、軸力が加わる試験体は約10%計算値を上回った。付加曲げモーメントを含むと耐力比は、約15%計算値を上回りより安全側の評価となった。
- 初期剛性は部材長さが短いほど大きく、軸力比での違いはなかった。
- 今回実験を行った試験体の限界部材角は、2%以上を確保できている
- 限界部材角の実験値は軸力比が小さいほど、部材長さが長いほど大きくなった。CFT指針は軸力比において低軸力比(今回の実験では、軸力比0)で過度に値が大きくなり、十分に評価ができない。また、座屈長さ径比についても $L_k/D = 10$ を境に低減係数が考慮されているが不連続となっており、更なる検討が必要と考えられる。

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, p.244, 2008
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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，No.16, pp. 129-134, 2002.12

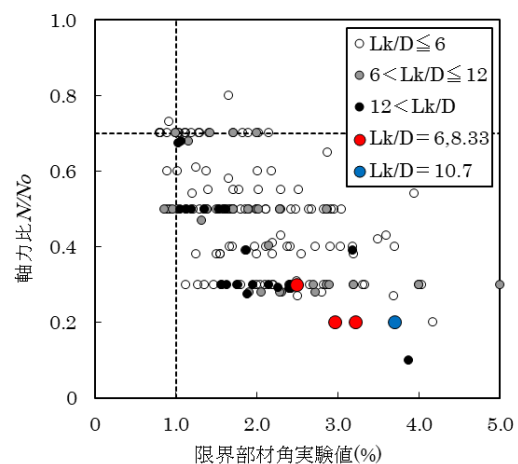


図6 軸力比と限界部材角実験値の比較