

円形 CFT 柱の構造性能に関する実験的研究

－ 柱長さによる比較 －

日大生産工(院) ○堀 紗友梨 日大生産工 藤本利昭

1. まえがき

鋼管にコンクリートを充填した構造であるコンクリート充填鋼管(Concrete Filled Steel Tube, 以下CFTと略称)構造は、優れた構造性能を持つことから、CFT柱として超高層建築物に用いられた事例が多くある。CFT構造は、鋼管と充填コンクリートの相互拘束効果(コンファインド効果)により軸圧縮耐力・曲げ耐力・変形能力が増大する。そのため従来使用されてきた鉄骨造や鉄筋コンクリート造に比べて多くのメリットを有している¹⁾。本研究の対象であるCFT柱は、一般的に円形・角形断面が用いられるが、断面の径が等しい場合、構造性能が優れること、納まりが良いことから、角形断面の採用が一般的である。一方、円形CFT柱は、意匠上の要求により使用されることが多く、エントランスの吹き抜け部など比較的細長い柱が用いられることが多い。

そこで本研究では、円形CFT柱の実験データの収集を目的に、部材長さを900mm, 1200mm, 1400mm, 1600mmと変化した一定軸力下の曲げ実験を行い、構造性能の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

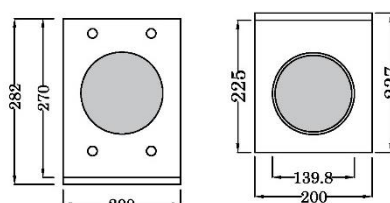
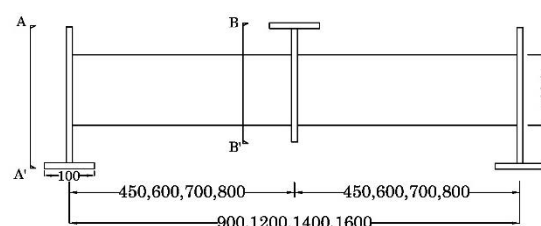
表1に試験体概要、図1に試験体図を示す。試験体は断面径を139.8mm、板厚を4.5mmとし、柱長さによる比較のため、部材長さを900mm, 1200mm, 1400mm, 1600mmの4種類とした。軸力比 N/N_0 (N : 載荷軸力, N_0 : CFT 柱の軸圧縮耐力)は0.3に設定した。また、試験体の加力点と反力点にはプレートを溶接し、試験体を製作した。

表2に鋼材の材料試験結果を示す。試験体には一般構造用鋼管STK400材を使用し、材料試験片は14号B試験片とし、引張実験を行った。

表3にコンクリート調合表を、表4にコンクリートの材料試験結果を示す。試験体のコンクリートは設計基準強度 $F_c = 30(\text{N/mm}^2)$ の普通コンクリートを用いた。

表 1 試験体概要

試験体名称	部材長さ	断面寸法		幅厚比
	$L(\text{mm})$	直径 $D(\text{mm})$	板厚 $t(\text{mm})$	D/t
900	900	139.8	4.50	31.1
1200	1200			
1400	1400			
1600	1600			



(a)A-A' 側面図 (b)B-B'断面図

単位: mm

図 1 試験体図

表 2 鋼材の材料試験結果

試験体名称	降伏強度 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	引張強度 $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 $E_s(\text{kN/mm}^2)$	伸び率 $\epsilon(\%)$
STK400	384.7	419.0	205	26.1

表 3 コンクリート調合表

	W/C(%)	単位質量(kg/m ³)					
		セメント	水	細骨材		粗骨材 6号砕石	混和剤
				山砂	砕砂		
普通コンクリート	62	315	195	489	335	900	3.31

表 4 コンクリートの材料試験結果

	設計基準強度 $F_c(\text{N/mm}^2)$	圧縮強度 $\sigma_B(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 $E_c(\text{kN/mm}^2)$	材齢 (日)
普通コンクリート	30	29.7	29.5	57

2.2 試験方法

図2に実験に用いた載荷装置および軸力載荷用フレーム、図3に変位計設置位置を示す。変位計の①～④は鉛直方向の変位を測定し、⑤、⑥は試験体材軸方向の変位を測定した。また、試験体上下面には1軸ゲージを各4枚、試験体側面には3軸ゲージを各2枚貼り付け各部のひずみを測定した。

加力は、軸力載荷用フレームに取り付けた500kN油圧ジャッキにより試験体に所定の軸力を作用させ、軸力を一定に保った状態で、5000kN構造物試験機を使用し実験を行った。

実験は3点曲げとし、試験体両端に取り付けたエンドプレート部を支点として、ダイアフラムを模擬した試験体中央部のプレートを介して加力を行い、部材角が6%に達するまで行った。なお、本実験装置では、支点と軸力作用点が異なるため、軸力と変形による付加曲げモーメント(P- δ)が本来より大きく作用する。

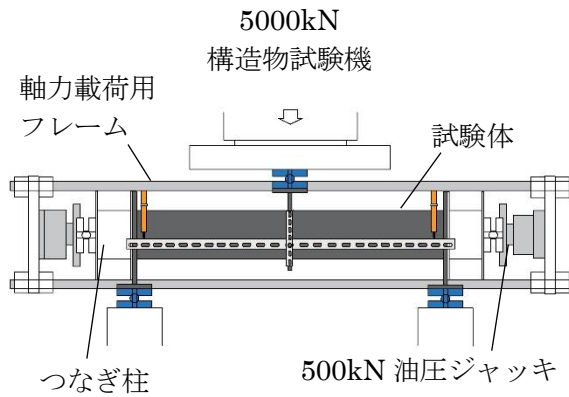


図2 実験載荷装置

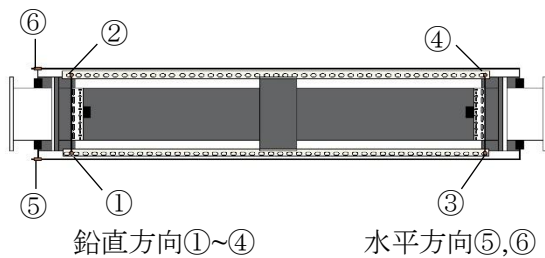


図3 変位計設置位置（見下げ図）

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

図4に試験体4体の終局耐力曲線、表5に実験結果一覧を示す。図の縦軸は軸力 N 、横軸は曲げモーメント M としている。図4に示した900、1200、1400、1600は座屈長さ径比 L_k/D がそれぞれ6.4、8.6、10.0、11.4となっている。4< $L_k/D \leq 12$ が中柱、12< L_k/D が長柱とCFT指針で定義されており、今回の試験体はすべて中柱となっている。

表中の最大荷重計算値 cP_u は、(1)式で図4の終局耐力曲線より求め、CFTの終局耐力 cM_u は短柱の終局耐力曲線により軸力 N が30%の時の曲げモーメント M である。

$$cP_u = \frac{4 \cdot cM_u}{L} \quad (1)$$

最大曲げモーメントの実験値 eM_u は軸力による付加曲げモーメントを含む値として、実験で得られた最大荷重 eP_u から(2)式を用いて求めた曲げモーメント eM_{up} と(3)式に示す載荷軸力 N と変位 δ により生じる曲げモーメント eM_{uN} を足し合わせることで(4)式で求めた。

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

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

$$eM_u = eM_{up} + eM_{uN} \quad (4)$$

ここで、 eM_{up} : 最大荷重時の曲げモーメントの実験値、 eM_{uN} : 軸力による曲げモーメントの実験値、 N : 載荷軸力、 δ : 鉛直方向の変位、 eM_u : 付加曲げを含む曲げモーメントの実験値である。

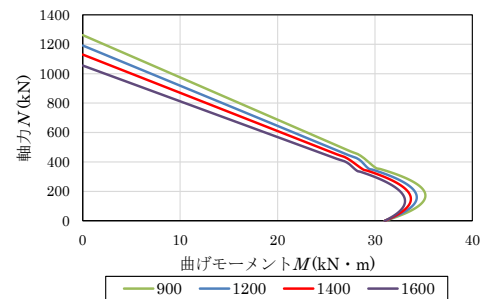


図4 試験体4体の終局耐力曲線

表5 実験結果一覧

試験体名称	作用軸力	座屈長さ径比	最大荷重			最大曲げモーメント			部材角		
	N (kN)	L_k/D	実験値 eP_u (kN)	計算値 cP_u (kN)	eP_u/cP_u	実験値 eM_u (kN・m)	計算値 cM_u (kN・m)	eM_u/cM_u	実験値 eR_u (%)	補正後 R_u (%)	計算値 cR_u (%)
900	336	6.4	181.7	139.2	1.31	43.1	40.0	1.08	2.63	6.09	5.16
1200	336	8.6	119.6	101.0	1.18	39.9	40.0	1.00	2.90	4.37	5.16
1400	336	10.0	101.3	84.0	1.21	40.9	40.0	1.02	3.04	3.67	3.10
1600	336	11.4	85.3	71.0	1.20	43.1	40.0	1.08	3.42	3.63	3.10

3.2 荷重-変位関係

図5に荷重-変位関係を示す。図の縦軸は試験機による荷重 P 、横軸は変位 δ とした。変位 δ は試験体の左右各2本の変位計の値から大きい変位を示した方の平均値を用いている。図中の□は各試験体の最大荷重点である。

図より最大荷重は、部材長さが $1600 < 1400 < 1200 < 900$ の順に大きくなった。表5より、計算値と比較すると1200, 1400, 1600では計算値の約1.2倍になり、900が最も計算値を上回り、約1.3倍になった。最大荷重時の変位は、1600では $\delta = 16.1\text{mm}$ 、1400では $\delta = 12.3\text{mm}$ 、1200では $\delta = 9.7\text{mm}$ 、900では $\delta = 6.1\text{mm}$ となり部材長さが長いほど大きい値になったが、初期剛性は、部材長さが短いほど高くなった。最大荷重後の耐力低下は、部材長さが長いほど緩やかになり、1600の耐力低下が最も小さくなった。

3.3 モーメント-部材角関係

図6に曲げモーメント-部材角関係を示す。図の縦軸は軸力と荷重による曲げモーメント M 、横軸は部材角 R とした。図中の□は各試験体の最大曲げモーメント時における部材角を示している。

最大曲げモーメントは、900と1600は同じ値で最も大きくなり次に1400, 1200の順に大きくなった。900は、他の3体と比べて軸力による曲げモーメントは小さいが、荷重による曲げモーメントが大きくなったため、1400, 1200より大きくなったと考えられる。1600は試験終了時の曲げモーメントが最大曲げモーメントになっており、軸力による曲げモーメントが他の3体と比べて大きくなったためだと考えられる。計算値と比べると、1200以外の試験体は計算値を上回った。最大曲げモーメント後の耐力低下は900では僅かに低下したが、他の試験体ではほとんど低下しなかった。

最大曲げモーメント時の部材角は、1600では $R = 6.01\%$ 、1400では $R = 3.78\%$ 、1200では $R = 2.89\%$ 、900では $R = 2.27\%$ となり部材長さが長いほど大きくなった。900と1200, 1200と1400の部材角の差は約1%でほとんど同じであるが、1400と1600の部材角の差は2.2%となり大きくなった。

3.4 セン断力-部材角関係

図7にせん断力-部材角関係を示す。図の縦軸はせん断力 Q 、横軸は部材角 R を表している。なお、せん断力は、前述の試験装置による影響は補正してある。図中の□は各試験体の実

験から得られた最大せん断力点、○は各試験体の限界部材角の点を示している。

図7より、最大せん断力時の部材角は部材長さが $1200 < 1400 < 1600 < 900$ の順に大きくなり、1400と1600はほぼ等しくなった。表5より、補正後の限界部材角を比較すると、900では $R_u = 6.09\%$ 、1200では $R_u = 4.37\%$ 、1400では $R_u = 3.67\%$ 、1600では $R_u = 3.63\%$ となり部材長さが短いほど大きくなった。これは図からわかるように部材長さが短いと耐力低下が緩やかになり、限界部材角は900が最も大きくなったと考えられる。

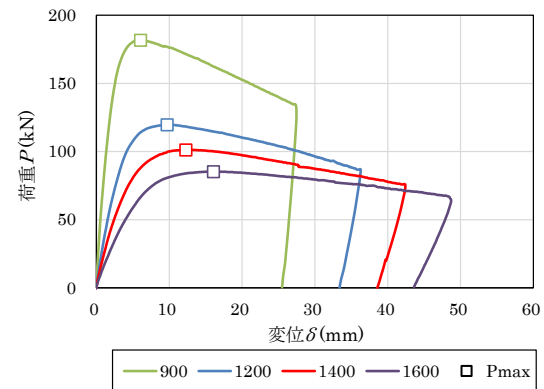


図5 荷重-変位関係

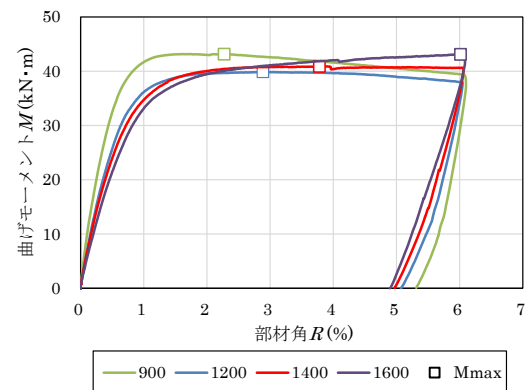


図6 曲げモーメント-部材角関係

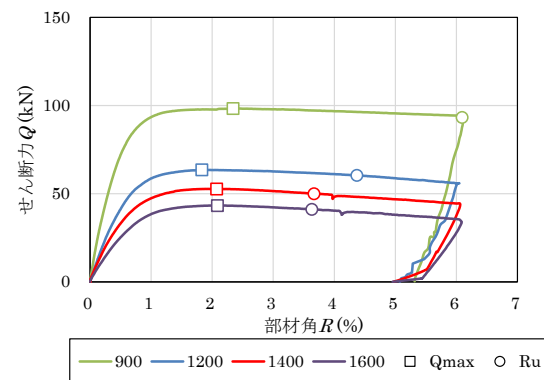


図7 荷重-部材角関係

3.5 限界部材角

図 8 に限界部材角の定義図を示す。CFT 部材の変形能力は、実験における包絡線のせん断力 Q と部材角 R の関係を用いて、せん断力が最大耐力以降で 5% 低下した点を限界部材角 ${}_cR_u$ (左右の変位計から得られた大きい方の変位 δ を部材長さ L の 1/2 で除して求めた値) として定義して評価される。CFT 柱の限界部材角 R_u は、コンクリート充填鋼管構造設計施工指針²⁾(以下、CFT 指針と略称)に基づき $L_k/D \leq 30$ の柱については、(5)式を用いて求める。

CFT 柱の変形能力は、軸力 N と水平変位 δ により生じる付加曲げモーメントによるせん断力の低下の影響を含めた形で評価している。

$${}_cR_u = \gamma_c \cdot \left(8.8 - 6.7 \frac{N}{N_0} - 0.04 \frac{D}{t} - 0.012 \cdot F_c \right) / 100 \quad (5)$$

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

この式の構成から、径厚比が大きくなるほど、コンクリート強度が大きくなるほど、軸力比が大きくなるほど限界部材角が小さくなるという CFT 部材の構造特性が考慮されていることがわかる。

一方で(5)式には、柱長さの違いによる限界部材角への影響は、 $L_k/D > 10$ の CFT 柱に対して低減係数を乗じる形で評価している。

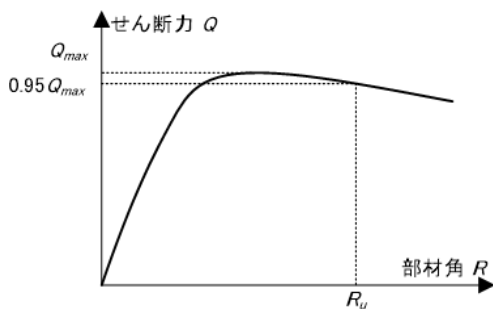


図 8 限界部材角の定義図

表 5 より、補正後の限界部材角を指針式と比べると 1200 は 0.79% 下回った。1400 と 1600 は低減係数を乗じていない値と比べると下回ったが、低減係数 γ_c を考慮した値と比べると指針式を上回った。

図 9 に $R_u/{}_cR_u$ ・座屈長さ径比関係を文献 3) のデータと共に示す。図の $R_u/{}_cR_u$ の R_u は実験から得られた補正後の限界部材角、 ${}_cR_u$ は(5)式

に示す CFT 指針式を用いており、低減係数 γ_c は考慮していない。実線は評価式の低減係数 γ_c を示す。

図 9 より、 $L_k/D > 10$ である 1600 は $R_u/{}_cR_u = 0.70$ 、1400 は $R_u/{}_cR_u = 0.71$ となり、指針式を下回ったが、低減係数によって指針式を上回り安全側の評価となった。そのため低減係数が効果的に機能していることがわかる。 $L_k/D \leq 10$ である 900 は $R_u/{}_cR_u = 1.18$ 、となり安全側の評価となったが、1200 は $R_u/{}_cR_u = 0.84$ と危険側の評価となった。既往の研究結果と比べても同じような結果となった。

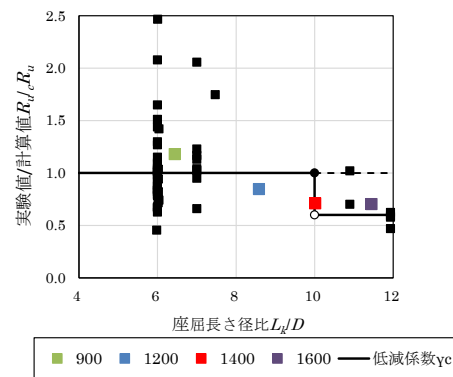


図 9 $R_u/{}_cR_u$ ・座屈長さ径比関係

4. まとめ

本実験では、柱の長さを 900mm, 1200mm, 1400mm, 1600mm と変化させた円形 CFT 柱の一定軸力下の曲げ実験を行った。実験から得られた結果を以下に示す。

- ・最大荷重と初期剛性は、部材長さが短いほど高くなり、最大荷重時の変位は、部材長さが長いほど大きい。
- ・最大曲げモーメントは、座屈長さにかかわらず、実験値は計算値とほぼ一致した。
- ・最大曲げモーメント時の部材角は、部材長さが長いほど大きい。
- ・限界部材角は、部材長さが短いほど大きくなり、 $L_k/D > 10$ の試験体は低減係数によって安全側の評価となった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管設計ガイドブック，pp.30-34，2012
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管設計構造施工指針，第2版，2008
- 3) 藤本利昭：コンクリート充填鋼管長柱の変形性能評価法，日本構造協会，鋼構造論文集，第11巻第43号，pp.99-105，2004.9