

# 矩形 CFT 柱の曲げ性状に関する研究

## -CFT 柱の実験概要-

日大生産工(院) ○今井 皓己 日大生産工 藤本 利昭 日大生産工(院) 三浦 智美  
日大生産工(学部) 大石 琴 日大生産工(学部) 助川 海都

### 1. まえがき

優れた構造性能を有しているコンクリート充填鋼管 (CFT: Concrete Filled Steel Tube, 以下CFTと略称) 構造は, 多くの超高層建築物に適用されている。そのCFT柱の断面を長方形とすることで構造面だけでなく意匠面, 設備面でも有効な活用ができ, 設計の自由度が広がると考えられる。長方形CFT柱が適用された事例<sup>1)</sup>もあるが, 長方形断面に関する研究, 実験データは僅かで設計式も確立されていない。

そこで本研究では, 断面形状, 曲げ方向, 軸力の有無, 部材長さを実験変数とした長方形CFT柱を用いた曲げ実験及び一定軸力下の曲げ実験を行い構造性能について検討する。

付けた変位計を用いて, たわみ $\delta$ から変形角 $R$  ( $=\delta/(L/2)$ ) を測定した。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。

表 1 試験体一覧

	断面寸法		支点間距離 $L$ (mm)	軸力		
	幅 $B$ (mm)	せい $D$ (mm)		0%	20%	30%
150×150	150	150	1600		⑥	
			1250		⑦	
150×100s	100	150	900	①	⑧	⑬
150×100w	150	100		②	⑨	⑭
150×75s	75	150		③	⑩	⑮
150×75w	150	75		④	⑪	⑯
				⑤	⑫	⑰

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

表1に本実験に用いる17体の試験体一覧, 表2に鋼材の材料試験結果, 表3にコンクリートの調合表, 表4に曲げ実験時のコンクリート材料試験結果を示す。試験体には, 一般構造用鋼材STKR400を使用し, 材料試験片は5号試験片とし角形鋼管の平板部より切り出して製作した。コンクリートは設計基準強度 $F_c=33\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを使用した。試験体の断面寸法は, 長辺を150mmに統一し, 短辺を150mm, 100mm, 75mmとした。試験体の支点間距離 $L$ は900mmを標準とし, 正方形断面の⑥, ⑦については1250mm, 1600mmと変化させている。軸力は0%, 20%, 30%とし, 本報告では①~⑤の試験体による曲げ実験の結果について報告する。

#### 2.2 実験方法

##### a) 曲げ実験

曲げ実験に用いた載荷装置を図1に示す。加力は2000kN万能試験機を使用した。実験は3点曲げとし, 試験体両端のエンドプレート部を支点として, 試験体中央部のプレートより加力した。各種測定は, 試験体両端に2本ずつ取り

表 2 鋼材材料試験結果

	板厚 $t$ (mm)	降伏強度 $\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び率 $\epsilon$ (%)
150×150	4.22	417	496	205	32.2
150×100s	4.19	382	464		34.7
150×100w					
150×75s	4.25	418	481		
150×75w					

表 3 コンクリート調合表

	W/C (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		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	59	331	195	528	232	950	3.64

表 4 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	設計基準強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度ひずみ $\epsilon$ (%)	材令 (日)
普通コンクリート	36.3	33	30.1	0.22	82

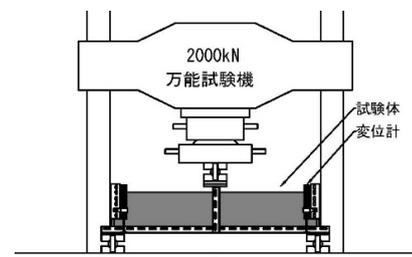


図 1 曲げ実験載荷装置

Study on Flexural Behavior of Rectangular CFT Columns

- Outline of CFT Column Experiment -

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

b) 一定軸力下の曲げ実験

一定軸力下の曲げ実験に用いた载荷装置を図2に示す。実験は3点曲げとし、軸力载荷用フレームを5000kN構造物試験機に組み込み行う。軸力载荷用フレームに取り付けた500kN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構造物試験機により試験体中央部のプレートを介して加力を行う。各種測定は曲げ実験と同様である。

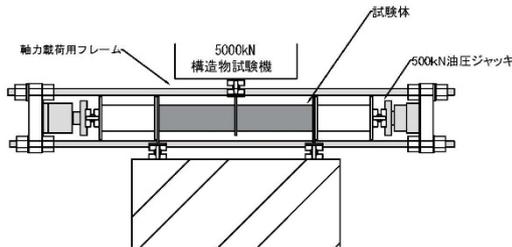


図 2 一定軸力下の曲げ実験载荷装置

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

表 5 に曲げ実験結果一覧、図 3 に縦軸を軸力、横軸を曲げモーメントとした軸力-曲げモーメント相関曲線の一例(150×150)を示す。

表中の最大曲げモーメントの実験値  $eM_u$  は、実験で得られた最大荷重  $eP_u$  を用いて (1) 式より求めた。変位及び変形角の評価は、局部座屈発生後、変形が非対称となる<sup>2)</sup> 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いる。 $R_{max}$  は最大荷重時のたわみ  $\delta$  を支点間距離  $L$  の 1/2 で除して求めた。また計算値  $eP_u$ 、 $eM_u$  は各試験体の計算により求めた荷重及びモーメントであり、 $R_y$  は  $eM_u$  に達したときの弾性変形角を表している。

計算に用いた式を (1) ~ (8) に示す。

$$eM_u = \frac{eP_u \cdot L}{4} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$cN_u = N_{su} + N_{cu} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$cM_u = M_{su} + M_{cu} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$N_{su} = 2(2x_n - cD) \cdot t \cdot \sigma_y \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$M_{su} = \left\{ (D - t)(B - 2R)t + 2t(x_n - r)(cD - r - x_n) \right\} \sigma_y + \left\{ \left( \frac{D}{2} + \frac{4}{3\pi}R - R \right) \pi R^2 - \left( \frac{cD}{2} + \frac{4}{3\pi}r - r \right) \pi r^2 \right\} \sigma_y \quad \dots \dots (5)$$

$$N_{cu} = \left\{ \left( cB \cdot x_n - r^2 \left( 2 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right\} \sigma_B \quad \dots \dots (6)$$

$$M_{cu} = \frac{1}{2} x_n (cB - 2r)(cD - x_n) \sigma_B + \left\{ r(cD - r - x_n)(x_n - r) + \frac{\pi r^2}{2} \left( \frac{cD}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) \right\} \sigma_B \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$R_y = \frac{cM_u \cdot L}{6(E_s \cdot I_s + E_c \cdot I_c)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $cN_u$ : CFTの作用軸力、 $N_{su}$ : 鋼管の負担圧縮耐力、 $N_{cu}$ : コンクリートの負担圧縮耐力、 $M_{su}$ : 鋼管の終局曲げ耐力、 $M_{cu}$ : コンクリートの終局曲げ耐力、 $x_n$ : コンクリート圧縮縁から中立軸までの距離、 $r (=t)$ : 鋼管角部内側の曲げ半径、 $R (=2t)$ : 鋼管角部外側の曲げ半径、 $cB$ : コンクリートの断面幅、 $cD$ : コンクリートの断面せい、 $I_s$ : 鋼管の断面二次モーメント、 $I_c$ : コンクリートの断面二次モーメントである。(2) ~ (7) 及び断面二次モーメント  $I_s$ 、 $I_c$  の計算には文献<sup>3)</sup> による式を用いた。

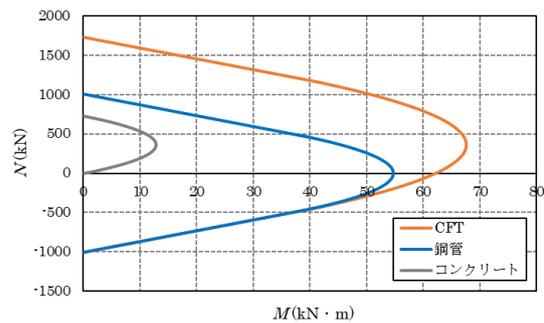


図 3 軸力-曲げモーメント相関曲線

表 5 実験結果一覧

	断面二次モーメント $I_s \times 10^{-3}(\text{mm}^4)$	断面二次モーメント $I_c \times 10^{-3}(\text{mm}^4)$	最大荷重		最大曲げモーメント			変形角		
			計算値 $eP_u(\text{kN})$	実験値 $eP_u(\text{kN})$	計算値 $cM_u(\text{kN} \cdot \text{m})$	実験値 $cM_u(\text{kN} \cdot \text{m})$	耐力比 $eM_u/cM_u$	計算値 $R_y(\%)$	実験値 $R_{max}(\%)$	塑性率 $R_{max}/R_y$
150×150	8471	33525	276	364	62.1	81.9	1.32	0.34	4.50	13.2
150×100s	6190	21745	194	278	43.6	62.6	1.44	0.34	2.87	8.44
150×100w	3314	9135	142	199	31.9	44.9	1.41	0.50	2.92	5.84
150×75s	5137	15763	179	240	40.3	54.1	1.34	0.40	3.13	7.83
150×75w	1743	3522	105	141	23.7	31.8	1.34	0.77	6.04	7.84

### 3.2 荷重-変位関係

図4に荷重-変位関係を示す。図の縦軸は試験機による荷重 $P_e$ 、横軸は前述の通り大きい方の値をたわみ $\delta_e$ として示している。なお、図中の“□”は各試験体の最大荷重を示している。

断面寸法の違いによる最大荷重 $eP_u$ を比較すると強軸曲げ弱軸曲げともに短辺が短いほど最大荷重は小さくなった。

長方形断面において最大荷重以降の耐力低下は、顕著な差異はなく著しい耐力低下もみられなかった。正方形断面については耐力低下がみられるが、これは試験体中央部のプレート部分の溶接部近傍に生じた亀裂のためである。

最大荷重時の変位 $\delta_e$ を比較すると、長方形断面においては強軸曲げ弱軸曲げともに短辺が短いほど変位は大きい。同一断面で曲げ方向が異なる試験体を比較すると、強軸曲げの方が最大荷重時の変位は小さい。

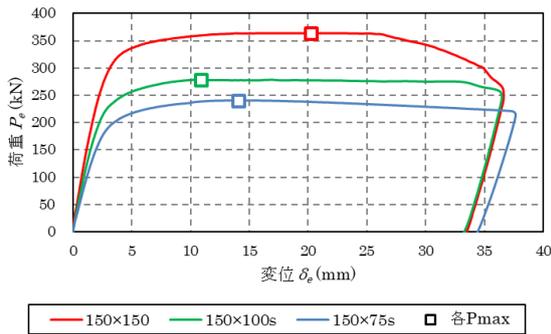
強軸曲げでは、正方形断面より長方形断面の方が最大荷重時の変位は小さい。一方、弱軸曲げでは、同様の傾向は示さず短辺75mmの試験体が正方形断面より大きくなった。

### 3.3 曲げ耐力比-変形角関係

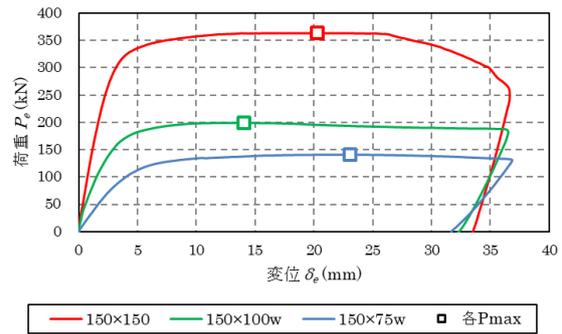
図5に曲げ耐力比-変形角関係を示す。図の縦軸は実験値 $M_e$ と計算値 $eMu$ との比 $M_e/eMu$ 、横軸は変形角 $R$ としている。なお、図中の“□”は各試験体の最大荷重を示している。

最大荷重時の曲げ耐力比は正方形断面が1.32、長方形断面が1.34~1.44と長方形断面の方が大きな値を示した。同一断面で曲げ方向が異なる試験体を比較すると曲げ耐力比は短辺100mmが強軸1.44と弱軸1.41、短辺75mmが強軸1.34と弱軸1.34となり同程度の値を示し、短辺100mmの方が大きな値となった。全ての試験体で最大荷重時の曲げ耐力比が1.32~1.44と1.0を超えており、実験値が計算値を上回っている。実験値が計算値を大きく上回った要因としては、試験体中央部にプレートを設けていることが考えられる。

長方形断面において最大荷重時の変形角 $R$ を比較すると、短辺が短い方が変形角は大きいが強軸曲げではその差は僅かで、弱軸曲げでは強軸曲げより差が大きくなった。

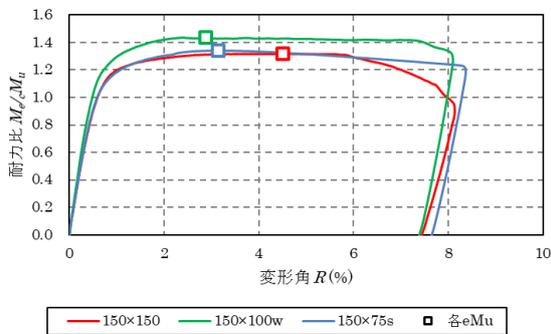


(a) 強軸

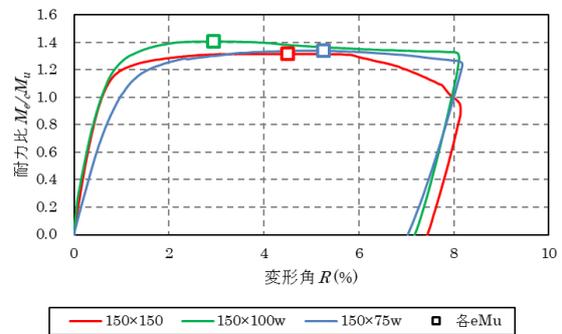


(b) 弱軸

図 4 荷重-変位関係



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 5 曲げ耐力-変形角関係

### 3.4 座屈波長

#### a) 座屈波長

表6に座屈波長一覧を示す。座屈波長 $L_b$ は実験終了後の試験体において、圧縮面となる面の座屈が生じていない部分の長さを、支点間距離の1/2から差し引いて求めた。

150×150, 150×100の強軸曲げにおいては試験体中央部の加力プレートの両側に局部座屈がみられた。残り3体の試験体については片側のみ局部座屈がみられた。なお、両側に局部座屈がみられた試験体は左右で変形が大きかった方を座屈波長の結果として示している。

#### b) 座屈波長と曲げ耐力比の関係

図6に座屈波長と曲げ耐力比の関係を示す。図の縦軸は座屈波長 $L_b$ 、横軸は曲げ耐力比 $aM_u/cM_u$ とした。

短辺150mm, 100mmの試験体をみると曲げ耐力比が大きくなるほど座屈波長は小さくなる傾向がみられた。短辺75mmを含めると明確な傾向はみられない。そのため、今後実施予定の一定軸力下の曲げ実験の試験体も含めて考察する必要があると考える。

#### c) 座屈波長と幅厚比の関係

図7に座屈波長と幅厚比の関係を示す。図の縦軸は座屈波長 $L_b$ 、横軸は短辺を用いた幅厚比とした。

強軸曲げ弱軸曲げともに幅厚比が小さいほど座屈波長も小さくなった。同一断面で曲げ方向が異なる試験体を比較すると弱軸曲げの方が大きくなった。

表 6 座屈波長一覧

	幅厚比		座屈波長 $L_b$ (mm)	$L_b/B$	$L_b/D$
	$B/t$	$D/t$			
150×150	35.5	35.5	100	0.67	0.67
150×100s	23.9	35.8	65	0.65	0.43
150×100w	35.8	23.9	88	0.59	0.88
150×75s	17.6	35.3	43	0.57	0.29
150×75w	35.3	17.6	64	0.43	0.85

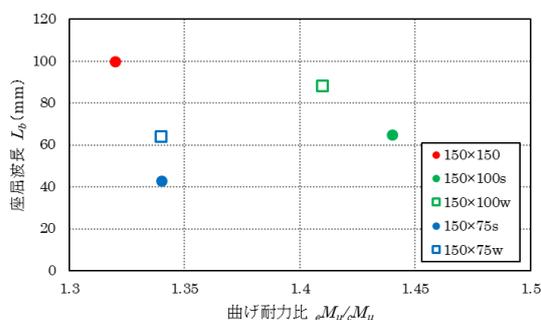


図 6 座屈波長と曲げ耐力比の関係

### 4. まとめ

今回実施した曲げ実験 (①～⑤の試験体) から得られた知見を以下に示す。

- ・同一断面で曲げ方向が異なる試験体の最大荷重は弱軸曲げより強軸曲げの方が大きな値を示した。また最大荷重以降、大きな耐力低下はなかった。
- ・曲げ耐力比は正方形断面より長方形断面の方が大きな値を示し、同一断面では同程度の値を示した。長方形断面においては、短辺100mmの方が大きな値を示した。
- ・最大荷重時の変位及び変形角は強軸曲げでは、正方形断面より長方形断面の方が小さくなった。弱軸曲げでは短辺100mmのみ正方形断面より小さくなった。長方形断面においては、曲げ方向に関わらず短辺100mmの方が小さくなった。
- ・座屈波長は曲げ方向に関わらず、幅厚比が小さいほど座屈波長は小さくなった。また、同一断面では強軸曲げの方が小さくなった。

今後、残り12体の試験体 (⑥～⑰) を用いて一定軸力下の曲げ実験を実施し、軸力の有無や部材長さから曲げ実験との比較・考察を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 有馬栄梨, 藤本利昭, 三浦智美, 今井皓己: 長方形 CFT 柱の適用事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1249-1250, 2020
- 2) 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
- 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

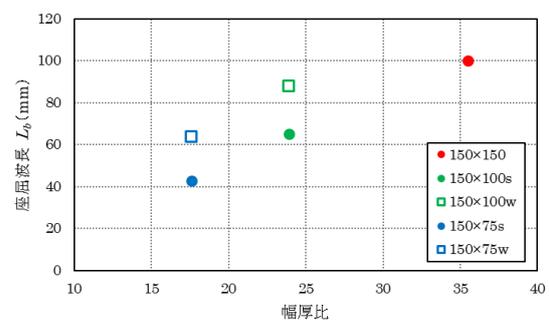


図 7 座屈波長と幅厚比の関係