

# 長方形 CFT 柱の曲げ圧縮性状に関する実験的研究

日大生産工(院) ○城戸 基 日大生産工 藤本 利昭

## 1. はじめに

現在, コンクリート充填鋼管(以下, CFTと略記)は, 柱材として主に円形・正方形断面が使用されている。しかし, 実際の建築物は平面的に X 方向, Y 両方向共に均等な建物は少なく, 鉄筋コンクリート (RC) 造のように柱断面を長方形にすることができれば, より合理的な設計が可能となり自由度も拡大する。このようなことから, 既に長方形CFT柱が適用された建物の事例もある<sup>1)</sup>。しかし, 長方形CFT柱は, 日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針(以下, CFT指針と略記)」<sup>2)</sup>において適用可能とされているものの, その適用にあたっては明確な記述はない。また, これまで長方形断面を対象としたCFT柱の実験資料も僅かである<sup>3)-5)</sup>。そのため近年, 長方形断面を有するCFT柱の構造性能を把握することを目的とした研究が継続的に行われている<sup>6)-9)</sup>。

そこで本研究では, 長方形CFT柱の構造性能を把握するため, 長辺と短辺との比が2:1の長方形断面を対象に, 幅厚比(板厚)が異なる短柱試験体により, 偏心圧縮実験を行い, その構造性能について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。試験体の断面形状は150mm

表-1 試験体一覧

	幅×せい B×D[mm]	高さ L[mm]	板厚 t[mm]	幅厚比 D/t(B/t)	一般化幅厚比 $\alpha$	曲げ方向	
						強軸	弱軸
CFT	150×75	450	3.06	49.0 (24.5)	2.26 (1.13)	強軸	50
						弱軸	25
						強軸	25
			弱軸	50			
			強軸	25			
			弱軸	50			
	5.53	27.1 (13.6)	1.22 (0.61)	強軸	50		
				弱軸	25		
				強軸	25		
		弱軸	50				
		強軸	50				
		弱軸	25				
中空鋼管	150×75	450	3.06	49.0 (24.5)	2.26 (1.13)	強軸	50
						弱軸	25
						強軸	50
			弱軸	25			
			強軸	50			
			弱軸	25			
	5.53	27.1 (13.6)	1.22 (0.61)	強軸	50		
				弱軸	25		
				強軸	25		
		弱軸	50				
		強軸	50				
		弱軸	25				

※本実験では長辺を(D), 短辺を(B)と定義している  
 $\alpha = D/t \cdot \sqrt{\sigma_y/E_s}$

×75mm(長辺:短辺=2:1)の長方形とした。なお, 以降の説明では, 断面の短辺をB, 長辺をDと定義して説明する。試験体高さLは450mm, 試験体鋼管の板厚tは3.2mm, 4.5mm, 6.0mmの3種類とした。実験変数は, 幅厚比, 曲げ方向(強軸曲げ, 弱軸曲げ), 断面図心からの偏心距離e(25mm, 50mm), 充填コンクリートの有無とし, 中空鋼管試験体6体, CFT試験体12体の合計18体の試験体を用いて実験を行った。

表-2に鋼材の材料試験結果を示す。また, 表-3にコンクリートの調査表を, 表-4にコンクリートの材料試験結果を示す。試験体には, 市販の一般構造用角形鋼管STKR400を用い, 鋼材の材料試験片は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 $F_c=40\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを使用し, 打設は試験体上端より縦打ちで行った。

### 2.2 加力および計測

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, 載荷は一方向単調載荷で実験を行った。拘束条件は, 試験体上下に偏心距離が所定の値になるようピンを偏心して取り付け, 軸方向力と曲げモーメントを載荷し, 曲率 $\phi$ Dが5%に達するまで行った。変位の測定は, 4本の変位計により得られる軸方向変位 $\delta_1$ (引張側2本の変位計の平均値),  $\delta_2$ (圧縮側2本の変位計の平均値)から試験体全長Lの平均軸ひずみ $\varepsilon = (\delta_1 + \delta_2)/L$  および平均曲率 $\phi D = ((\delta_1 - \delta_2)/(L \times$

表-2 材料試験結果(鋼材)

板厚 t[mm]	鋼材材料強度	降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び率 $\varepsilon_s$ (%)
3.06	STKR400	435	508	205	28.6
4.33		414	504		33.0
5.53		414	480		31.9

表-3 コンクリートの調査表

試験体名	W/C (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤
普通コンクリート	51.0	205	402	546	140	965	4.42
細骨材①・・・山砂, 細骨材②砕砂・・・砕砂, 粗骨材・・・6号砕石							

表-4 材料試験結果(コンクリート)

試験体名	設計基準強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング率 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 ひずみ度 $\varepsilon_c$ (%)
普通コンクリート	40.0	55.5	36.1	0.270

## Experimental Study on Bending Compressive Behavior of Rectangular CFT Columns

Hajime KIDO and Toshiaki FUJIMOTO

$l) \times D$ ,  $l$ : 引張側と圧縮側の変位計間の距離で150mmとした)を求めた。また、2軸のひずみゲージを鋼管側面の中央に貼り付け、鋼管のひずみを測定した。

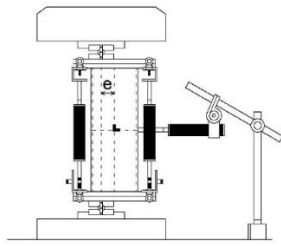


図-1 加力方法

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 最大耐力

表-5に偏心圧縮実験結果の一覧を示す。なお、表中の最大軸力 $N_u$ は、実験時の最大荷重とし、曲げ耐力実験値 $eM_u$ は最大軸力時の付加曲げモーメント(曲げ変形による試験体高さ中央の水平変形 $\delta_L$ により生じる値)を考慮した値 $eM_u = eN_u \cdot (e + \delta_L)$ として評価した。また計算耐力 $N_u$ ,  $M_u$ は、正方形断面CFTの設計式を長方形断面に適用できるように明示した次式<sup>10)</sup>によって求めた。

$$sM_u = \left\{ (D - t)(B - 2R) \cdot t + 2t(x_n - r)(cD - r - x_n) \right\} \sigma_y + \left\{ \left( \frac{D}{2} + \frac{4}{3\pi}R - R \right) \pi R^2 - \left( \frac{cD}{2} + \frac{4}{3\pi}r - r \right) \pi r^2 \right\} \sigma_y \dots\dots\dots (1)$$

$$sN_u = 2(cD - r - x_n) \cdot cD \cdot \sigma_y \dots\dots\dots (2)$$

$$cM_u = \frac{1}{2}(cB - 2r)(cD - x_n) \cdot x_n \cdot \sigma_c + \left\{ r(cD - r - x_n)(x_n - r) + \frac{\pi r^2}{2} \left( \frac{cD}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) \right\} \cdot \sigma_c \dots\dots\dots (3)$$

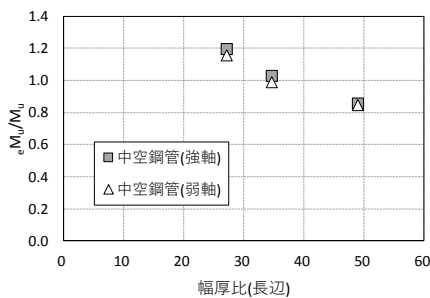
$$cN_u = \left\{ cB \cdot x_n - r^2 \left( 2 - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \cdot F_c \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $sM_u$ : 鋼管の終局曲げ耐力、 $D$ : 鋼管の断面せい、 $t$ : 鋼管の板厚、 $B$ : 鋼管の断面幅、 $R$ : 鋼管角部外側の曲げ半径、 $x_n$ : コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離、 $r$ : 鋼管角部内側の曲げ半径、 $sN_u$ : 鋼管の終局圧縮耐力、 $cD$ : コンクリートの断面せい、 $cM_u$ : コンクリートの終局曲げ耐力、 $cB$ : コンクリートの断面幅、 $cN_u$ : コンクリートの終局圧縮耐力である。

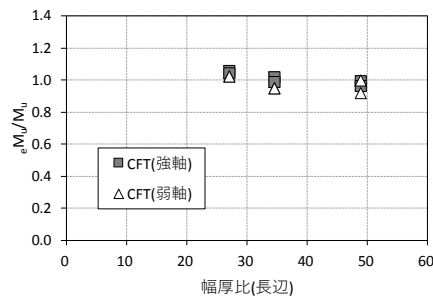
図-2に実験値と計算曲げ耐力との比 $eM_u / M_u$ と幅厚比との関係を示す。

表-5 実験結果一覧

試験体名	板厚	曲げ方向	偏心距離 e[mm]	幅×せい B×D[mm]	高さ L[mm]	断面積 [mm <sup>2</sup> ]		降伏・圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]		軸力			曲げ		
						As	Ac	$\sigma_y$	$\sigma_B$	$N_0$ [kN]	$eN_u$ [kN]	$eN_u/N_0$	$M_u$ [kN·m]	$eM_u$ [kN·m]	$eM_u/M_u$
CFT	C3.2-S50	強軸	50	75×150	450	1315	9902	435	55.5	1122	574	0.51	31.0	29.9	0.96
		弱軸									391	0.35	21.1	21.0	1.00
	C3.2-S25	強軸	25			1315	9902	435	55.5	1122	769	0.69	20.7	20.3	0.99
		弱軸									547	0.49	16.4	15.0	0.91
	C3.2-W25	強軸	50			1825	9360	414	55.5	1275	679	0.53	35.7	35.2	0.99
		弱軸									428	0.34	24.7	23.4	0.95
	C4.5-S25	強軸	25			1825	9360	414	55.5	1275	886	0.69	23.6	23.9	1.01
		弱軸									649	0.51	18.6	17.6	0.95
	C6-S50	強軸	50			2287	8858	414	55.5	1438	793	0.55	40.5	42.1	1.04
											弱軸	509	0.35	28.2	28.8
C6-S25		25	1039	0.72	26.6						28.00	1.05			
			弱軸	750	0.52						20.7	21.1	1.02		
中空鋼管	S3.2-S50	強軸	50	75×150	450	1315	—	435	—	572	284	0.50	16.9	14.5	0.86
		弱軸									275	0.48	8.4	7.1	0.85
	S4.5-S50	強軸	50			1825	—	414	—	756	433	0.57	22.2	22.9	1.03
		弱軸									400	0.53	11.0	10.9	0.99
	S6-S50	強軸	50			2287	—	414	—	947	585	0.62	27.7	33.1	1.20
		弱軸									535	0.57	13.7	15.8	1.16



(a)中空鋼管試験体



(b)CFT試験体

図-2 最大曲げ耐力の比較

CFTでは、幅厚比の増大に伴い曲げ耐力比 $eM_u/M_u$ が低下する傾向は僅かに認められるものの、中空鋼管ほど顕著ではない。また、曲げ方向による $eM_u/M_u$ の差異も僅かである。

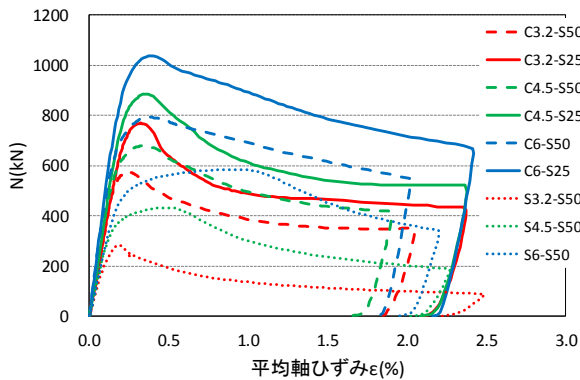
これらのことから、長方形断面においてもコンクリートを充填した効果は明らかであり、概ね一般化累加耐力により評価できるものと考えられる。

### 3.2 軸力-軸ひずみ関係

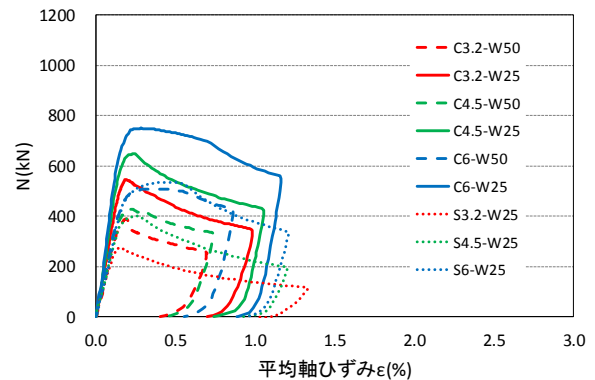
図-3に軸力-軸ひずみ関係を示す。中空鋼管試験体は、同一断面で曲げ方向が異なる試験体の軸圧縮力の最大値がほぼ等しくなるよう偏心距離を設定していることから、軸力の最大値はほぼ同程度となっている。また軸力-軸ひずみ関係では、最大値に到達するまでの変形能力は、強軸曲げ方向の試験体の方が大きくなっている。

一方CFT試験体では、同一断面で曲げ方向が異なる試験体の軸力-軸ひずみ関係は、軸力が最大値に到達するまでの変形能力は、強軸曲げ方向の試験体の方が若干大きくなっているものの、耐力劣化等の挙動に大きな差異は認められない。

幅厚比の影響に関しては、中空鋼管試験体、CFT試験体共に、幅厚比が小さくなるほど最大耐力に達するまでの変形能力が大きくなる傾向が認められる。

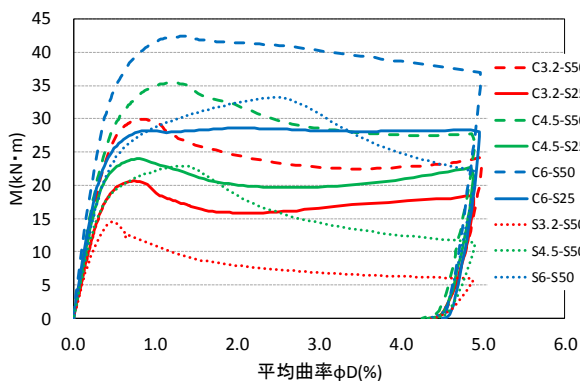


(a) 強軸

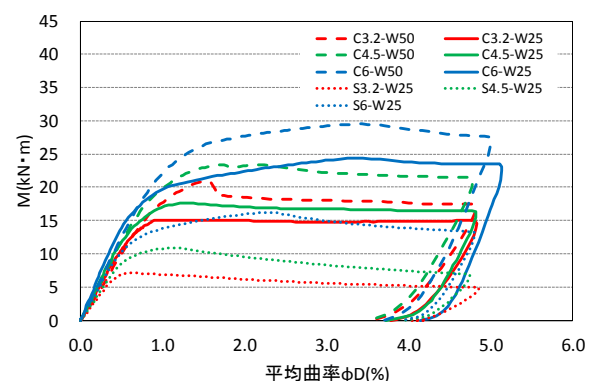


(b) 弱軸

図-3 軸力-軸ひずみ関係



(a) 強軸



(b) 弱軸

図-4 曲げモーメント-曲率関係

### 3.3 曲げモーメント-曲率関係

図-4に曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、図の縦軸 $M$ は付加曲げモーメント考慮した値 $M=P \cdot (e+\delta L)$ とし、横軸は試験体全長にわたる平均曲率に長辺の断面せい $D$ を乗じた $\phi D$ で示している。

中空鋼管試験体は、同一断面の場合、曲げ方向が異なる場合でも最大値に到達するまでの変形能力は、強軸曲げ方向の試験体の方が大きくなっている。

一方CFT試験体では、同一断面の場合、曲げ方向が弱軸の場合が、強軸に比べて最大耐力までの変形能力が大きくなっている。

幅厚比の影響に関しては、中空鋼管試験体、CFT試験体共に、幅厚比が小さくなるほど最大耐力に達するまでの変形能力が大きくなる傾向が認められる。

CFTと中空鋼管を比較した場合、CFTの曲げモーメント-曲率関係における変形能力が中空鋼管に比べて明らかに改善されていることがわかる。曲げモーメント-曲率関係では、たわみによる付加曲げモーメントが考慮されているため、大変形まで耐力が低下しないことを表している。

### 3.4 座屈波長-幅厚比関係

座屈波長 $L_b$ は、圧縮部材だけでなく、軸方向力と水平力を受ける柱部材においても塑性ヒンジ長さ $L_p$ と関

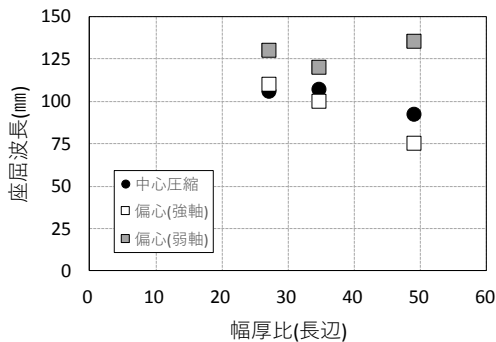
連付けされる重要なパラメーターであることから、その長さを適切に評価することが重要となる<sup>11)</sup>。

図-5に座屈波長—幅厚比関係を示す。なお、文献<sup>12)</sup>の中心圧縮の実験データも示している。座屈波長は、実験前の試験体全長から実験後の試験体において座屈が生じていない部分の長さを差し引くことにより求めている。座屈波長の測定については、中心圧縮実験の場合は、座屈波長が複数生じているものについては、実験の際に目視で確認できた最初の局部座屈の座屈波長のみ、測定しており、他の座屈波長については無視して行っている。また偏心圧縮の場合は、圧縮側鋼管の座屈波長のみ測定を行った。

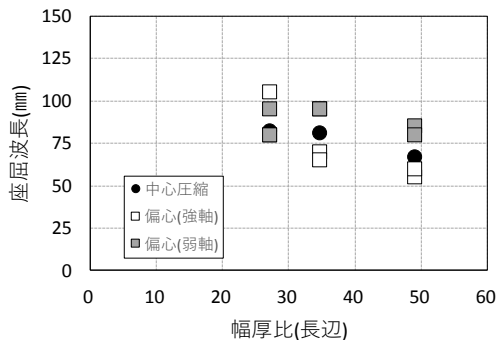
まず中空鋼管とCFTについて比較した場合、中心・偏心圧縮実験共に中空鋼管の方が座屈波長は大きくなる傾向が認められる。

次に幅厚比による影響を比較すると、中空鋼管、CFTともに幅厚比が大きくなるに従い座屈波長が短くなる傾向が認められる。

更に実験方法の違いによる影響を見てみると、中心圧縮実験では、均等に圧縮力を受けるのに対し、偏心圧縮実験では強軸曲げでは短辺、弱軸曲げでは長辺が最も大きな圧縮力を受けることになる。実験結果を見てみると、強軸曲げが弱軸曲げに比べ座屈波長が短い傾向にあり、また中心圧縮はそれらの中間に位置している。この傾向は中空鋼管とCFT共に同様であり、断面内の応力状態の違いにより座屈波長が異なる傾向があるようである。



(a) 中空鋼管試験体



(b) CFT試験体

図-5 座屈波長—幅厚比関係

#### 4. まとめ

長辺と短辺の比を2:1とした長方形柱断面を有するCFT柱の偏心圧縮実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 中空鋼管試験体では、幅厚比による構造性能への影響が顕著であり、幅厚比が大きくなるほど耐力は低く、変形能力も低下する。特に幅厚比が最も大きな試験体の耐力は計算耐力を下回った。
- CFT試験体では、幅厚比による構造性能への影響は顕著ではなく、変形能力に明確な差異は認められない。また中空鋼管では計算耐力を下回る試験体が、コンクリートを充填することで計算耐力に達し、累加耐力で評価できることがわかった。

#### 「参考文献」

- 1) 松井千秋：コンクリート充填鋼管構造—CFT構造の性能と設計，オーム社，2009.2
- 2) 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
- 3) 管田裕樹，山口育雄，高木潤一，諸菱亮太：長方形断面CFTの中心圧縮性状に関する実験的研究その1～2，日本建築学会学術講演梗概集，C-1分冊，pp.1103-1106，2001.9
- 4) 管田裕樹，山口育雄，高木潤一：曲げモーメントとせん断力を受ける矩形断面コンクリート充填鋼管柱の力学性状に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，C-1分冊，pp.1115-1116，2002.8
- 5) 高木潤一，東啓太，山口育雄：圧縮軸力下で単調な曲げせん断を受ける長方形断面CFT柱に関する研究その1～2，C-1分冊，pp.1165-1168，2003.9
- 6) 長崎透，荒井望，藤本利昭：コンクリート充填長方形鋼管の構造性能に関する実験的研究その1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1537-1540，2013.8
- 7) 長崎透，荒井望，岡修平，藤本利昭：コンクリート充填長方形鋼管の構造性能に関する実験的研究その3～5，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1421-1426，2014.9
- 8) 長崎透，岡修平，藤本利昭：コンクリート充填長方形鋼管短柱の構造性能に関する研究，構造工学論文集，61B，pp.133-140，2015.3
- 9) 岡修平，藤本利昭：長方形CFT柱—鉄骨梁接合部の構造性能に関する研究，第11回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，土木学会/日本建築学会，2015.11，paper nNo.30(CD-ROM)
- 10) 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.756-760，2009.10
- 11) 山田哲，秋山宏，桑村仁：局部座屈を伴う箱形断面鋼材の劣化域を含む終局挙動，日本建築学会構造系論文報告集，No.444，pp.135-143，1993.
- 12) 城戸基，藤本利昭：長方形CFT柱の圧縮性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1395-1396，2017.7