

(38) 矩形断面を有するCFT柱の 構造性能に関する研究

今井 皓己¹・藤本 利昭²・大石 琴³・助川 海都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1-2-1)
E-mail:ciko20005@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 生産工学部建築工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
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1-2-1)
E-mail:ciko21015@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1-2-1)
E-mail:ciki21007@g.nihon-u.ac.jp

CFT構造は、他の構造と比較して優れた構造性能を有していることから多くの超高層建築物に適用されている。その柱断面には円形・正方形が多く用いられてきたが、近年では設計の自由度を広げるために断面を長方形としたCFT柱の事例もいくつか確認されている。しかしながら、CFT柱の設計式は長方形断面を対象に示されておらず、適用には構造設計者の適切な判断が必要となるため適用事例は極めて少ないのが現状である。現在、長方形CFT柱の研究は継続的に行われているが、軸力及び水平力を作用させた実験データや研究は少ない。そこで本研究では長方形CFT柱のデータ蓄積を目的として、断面形状、軸力比、曲げ方向を実験変数とした曲げ実験及び一定軸力下の曲げ実験を行い構造性能の検討を行う。

Key Words : *Concrete Filled Steel Tube, Rectangular Section, Bending Behavior, Constant Axial load, Strong Axis, Weak Axis*

1. 研究背景及び目的

鉄骨構造、鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造と比較して、耐力低下の緩和や耐震性など優れた構造性能を持つと考えられるコンクリート充填鋼管（CFT: Concrete Filled Steel Tube, 以下CFT）構造は「あべのハルカス」¹⁾をはじめとした超高層建築物に適用されている。それら超高層建築物への適用事例は2000年以降増加²⁾しており、他の構造と比較しても柱断面をコンパクトにでき、平面計画の自由度も高く大規模な空間を確保できることから多くのオフィスビルに適用されている。

現在の「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」³⁾（以下CFT指針）の角形断面の設計式は正方形断面を対象としており、長方形断面を対象とした設計式は示されていない。CFT指針では、長方形断面も適用可能とされているがその適用に関しては明確な記述はなく設計者の適切な判断が必要になる。長方形断面を適用できれば意匠面・設備面において有効な活用ができ、設計の自由度

も高くなることから、実際に「大手町フィナンシャルシティグランキューブ」など、意匠面・設備面に配慮し断面を長方形とした建物事例も確認されている⁴⁾。

長方形断面は正方形断面とは異なり、強軸側と弱軸側が存在するためその影響に関する実験や研究が継続的に行われてきた⁵⁾⁷⁾。しかしながら、実際の建物の柱材には軸方向力、曲げモーメント及びせん断力が作用するのに対し、これらの研究では軸方向力及び水平力を作用させた研究知見は少ない。そこで本研究では、断面形状や曲げ方向、軸力比を実験変数とし、軸方向力及び水平力を作用させた曲げ実験を行い構造性能の検討を行った。

2. 実験概要

CFT柱に水平力のみが作用した場合の構造性能を把握するために、試験体中央部に荷重を作用させた曲げ実験、更に一定軸力を作用させた曲げ実験を行った。

(1) 試験体概要

表1に試験体一覧を示す。断面形状は150×150, 150×100, 150×75とし長方形断面については強軸曲げと弱軸曲げの2方向の5種類の断面とした。なお、試験体名は短辺の長さを示しており、“s”は強軸曲げ，“w”は弱軸曲げ，Nは軸力比を表している。軸力比 (N/N_0 , N : 作用軸力, N_0 : CFT柱の圧縮耐力, $N_0 = \sigma_y \cdot A_s + \sigma_B \cdot A_c$) は0, 0.2, 0.3としており，断面形状5種類×軸力比3種類の計15体の試験体を用いた。

実験に使用した鋼材の機械的性質を表2に，コンクリートの材料特性を表3に示す。試験体には一般構造用角形鋼管STKR400, $F_c = 33 \text{ N/mm}^2$ の普通コンクリートを使用した。

図1に試験体形状 (150×150) を示す。支点間距離は900mmに統一し，試験体両端のエンドプレート部を支点，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点としている。

表1 試験体一覧

試験体	B [mm]	D [mm]	t [mm]	sA [mm ²]	cA [mm ²]	sI [×10 ³ mm ⁴]	cI [×10 ³ mm ⁴]	L [mm]
150 (N0,N20,N30)	150	150	4.22	2415	20024	8471	33390	900
100s (N0,N20,N30)	100	150	4.19	1980	12960	6190	21613	
100w (N0,N20,N30)	150	100				3314	9046	
75s (N0,N20,N30)	75	150	4.25	1794	9394	5137	15625	
75w (N0,N20,N30)	150	75				1743	3452	

B: 断面幅, D: 断面せい, t: 板厚, sA , cA : 鋼管, コンクリートの断面積
 sI , cI : 鋼管, コンクリートの断面二次モーメント, L: 支点間距離

表2 鋼材の機械的性質

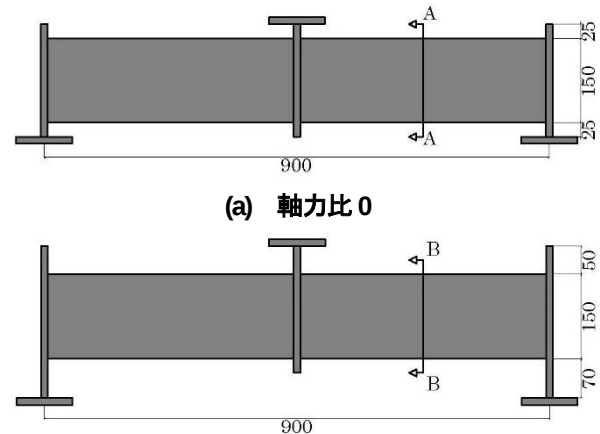
STKR400 [5号試験片]	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	E_s [kN/mm ²]	ε_s [%]
150 (N0,N20,N30)	417	496	205	32.2
100s (N0,N20,N30)	382	464		34.7
100w (N0,N20,N30)				
75s (N0,N20,N30)	418	418		31.6
75w (N0,N20,N30)				

σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強度, E_s : ヤング率, ε_s : 伸び率

表3 コンクリートの材料特性

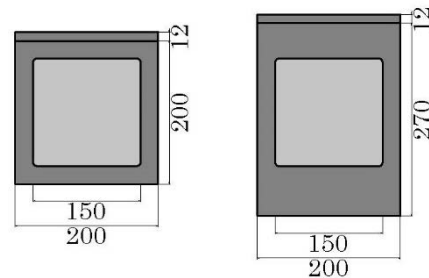
普通 コンクリート	σ_B [N/mm ²]	E_c [kN/mm ²]	ε_c [%]	材齢 [日]
軸力比0	36.3	30.8	0.22	82
軸力比0.2	38.7	31.8	0.21	169
軸力比0.3				

σ_B : 圧縮強度, E_c : ヤング率, ε_c : 圧縮強度時ひずみ



(a) 軸力比 0

(b) 軸力比 0.2, 0.3



(c) AA 断面

(d) BB 断面

図1 代表的な試験体形状 (150×150)

(2) 実験方法

図2に曲げ実験（軸力比0）の荷重方法を示す。実験は2000kN万能試験機を用いて行い、測定は試験体の両端に2本ずつ計4本の変位計を用いて試験体の変形を測定した。試験体の上下面には1軸ひずみゲージを各4枚、試験体側面には3軸ひずみゲージを各2枚設置し各部のひずみを測定した。

図3に一定軸力下の曲げ実験（軸力比0.2, 0.3）の荷重方法を示す。500kN油圧ジャッキを取り付けた軸力荷重用フレームを5000kN構造物試験機に組み込み、軸力を一定に保った状態で実験を行った。測定は曲げ実験と同様に変位計及びひずみゲージを設置し、軸方向変位を測定するために両側面に変位計を設置した。

なお、付録に曲げ実験及び一定軸力下の曲げ実験の様子を示している。

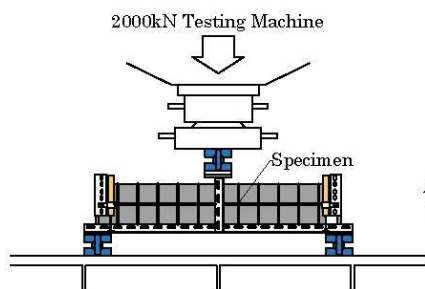


図2 曲げ実験(軸力比 0)荷重方法

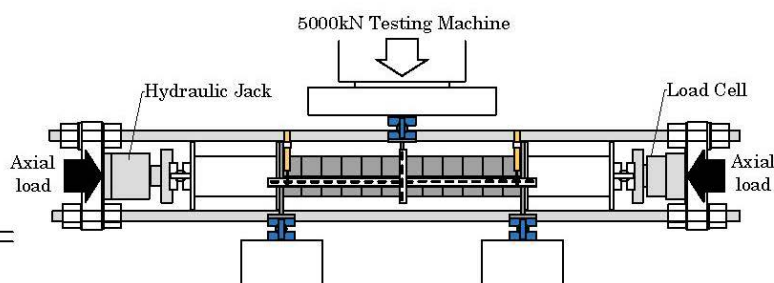


図3 一定軸力下の曲げ実験(軸力比 0.2, 0.3)荷重方法

表4 実験結果一覧

試験体	P_{cu} [kN]	P_{eu} [kN]	P_{eu}/P_{cu}	M_{cu} [kN・m]	M_{eu} [kN・m]	M_{eu}/M_{cu}	R_{max} [%]	R_u [%]	N [kN]
150-N0	276	364	1.32	62.1	81.9	1.32	4.44	6.59	0
100s-N0	194	278	1.44	43.6	62.6	1.44	2.42	7.95	0
100w-N0	142	199	1.41	31.9	44.9	1.41	3.05	7.23	0
75s-N0	179	240	1.34	40.3	54.1	1.34	3.13	6.82	0
75w-N0	105	141	1.34	23.7	31.8	1.34	5.24	7.98	0
150-N20	304	341	1.12	68.4	78.8	1.15	1.20	2.97	352
100s-N20	209	258	1.23	47.0	60.3	1.28	1.93	3.46	249
100w-N20	154	182	1.18	34.6	42.7	1.23	1.56	2.61	251
75s-N20	186	218	1.17	41.9	51.3	1.22	1.94	3.50	250
75w-N20	111	121	1.09	25.0	29.1	1.16	1.74	2.48	221
150-N30	302	330	1.09	67.9	77.4	1.14	1.28	2.49	496
100s-N30	205	245	1.19	46.2	57.8	1.25	1.55	2.66	375
100w-N30	151	173	1.15	33.9	41.4	1.22	1.49	2.20	375
75s-N30	182	208	1.14	41.0	49.3	1.20	1.53	2.74	332
75w-N30	107	108	1.00	24.2	26.8	1.11	1.63	2.24	333

P_{cu} , P_{eu} : 最大荷重の計算値, 実験値, M_{cu} , M_{eu} : 最大曲げモーメントの計算値, 実験値
 R_{max} : 最大荷重時の部材角, R_u : 限界部材角, N : 平均作用軸力

ここで、 δ ：変位計より得られた変位とし、変位は局部座屈発生後に部材の変形が非対称となることから、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としている。

部材角 R_{max} は(3)式より求め、 δ_{max} は最大荷重時の変位としている。限界部材角 R_u は図4に示したように水平力-部材角関係を用いて最大耐力から5%耐力低下した時の部材角としている。なお、水平力-部材角関係は軸力による水平力の低下を考慮している。

$$R_{max} = \frac{\delta_{max}}{L/2} \quad (3)$$

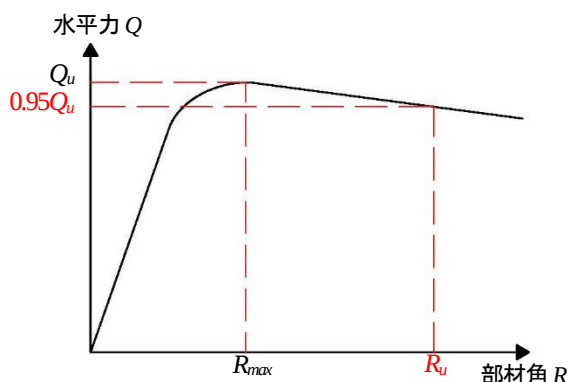
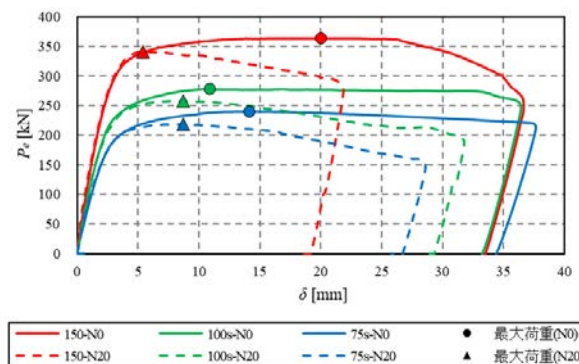
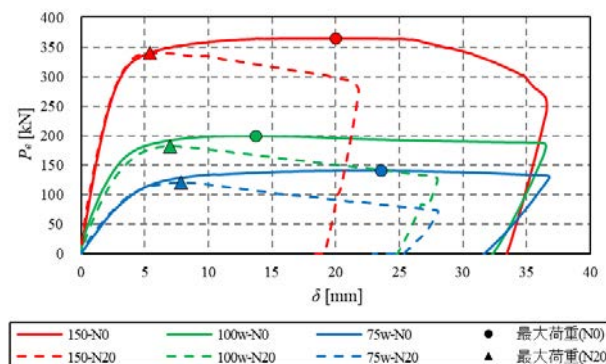


図4 限界部材角の定義

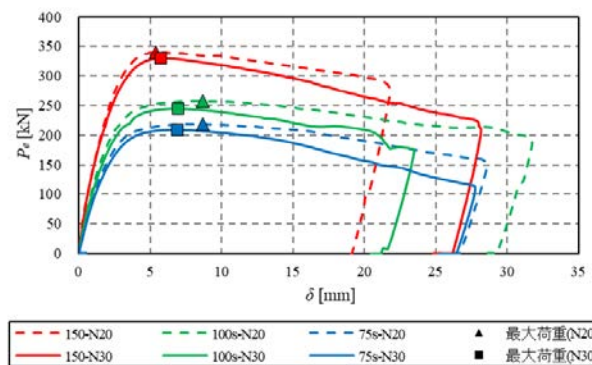


(a) 強軸曲げ

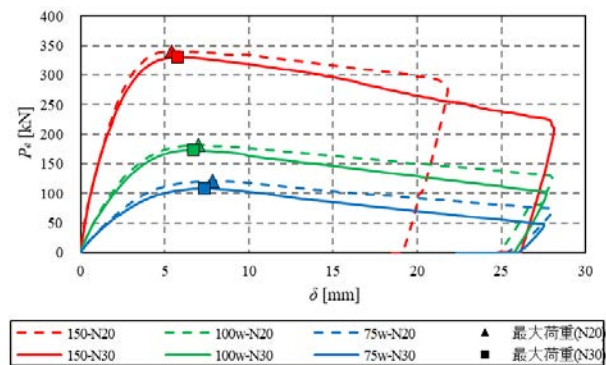


(b) 弱軸曲げ

図5 荷重-変位関係 (軸力比 0.2)



(a) 強軸曲げ



(b) 弱軸曲げ

図6 荷重-変位関係 (軸力比 0.2, 0.3)

(2) 荷重-変位関係

図5(a), (b)に軸力比0と0.2の強軸曲げ、弱軸曲げ試験体、図6(a), (b)に軸力比0.2と0.3の強軸曲げ、弱軸曲げ試験体の荷重-変位関係を示す。図の縦軸は試験機より得られた荷重、横軸は変位計より得られた変位としている。なお、図中のプロットは各試験体の最大荷重 P_u の時の変位としている。

図5(a), (b)より、曲げ方向に関わらず軸力比0の方が最大荷重及び最大荷重時の変位は大きな結果となっている。断面形状による比較を行うと軸力比0.2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大きい。また、軸力比0では75w-N0を除くと正方形断面より長方形断面の方が小さな値を示している。また、軸力比0の長方形断面4体は最大耐力発揮後に大きな耐力低下はみられなかったが正方形断面に関しては耐力低下がみられる。これは試験体中央部のプレート近傍に亀裂が生じたためである。

図6(a), (b)より、長方形断面では、曲げ方向に関わらず軸力比0.2の方が最大荷重及び最大荷重時の変位は大きい。軸力比0.2, 0.3では大きな差異はなく同一の挙動を示している。弱軸曲げに関しては短辺の長さが短いほど変位は大きくなる傾向がみられた。

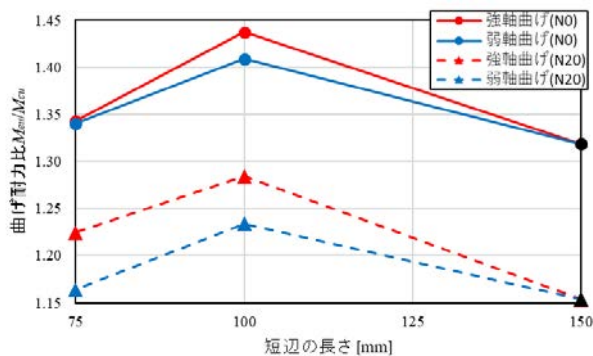
(3) 曲げ耐力比

図7(a)を軸力比0, 0.2, (b)を軸力比0.2, 0.3とし, 曲げ耐力比を短辺の長さで比較したものを示す。縦軸は曲げ耐力比 M_a/M_u とし曲げモーメントの実験値を計算値で除した値, 横軸は短辺の長さとしている。

図7(a)より, 軸力比0, 0.2ともに曲げ耐力比は1.0を超え, 実験値が計算値を上回っており, 軸力比0は曲げ耐力比が1.3~1.45となり大きく上回っていることがわかる。曲げ方向では, 弱軸曲げより強軸曲げの方が大きい結果となり, 短辺の長さでは軸力比や曲げ方向に関わらず100mm>75mm>150mmの順となった。また, 正方形断面より長方形断面の方が曲げ耐力比は大きくなる結果となった。

図7(b)より, 図7(a)と同様に曲げ耐力比は1.0を超え, 実験値が計算値を上回っており, 曲げ方向では弱軸曲げより強軸曲げの方が大きくなっている。軸力比0.3の強軸曲げでは100mm>75mm>150mmの順となったが, 軸力比0.3の弱軸曲げでは100mm>150mm>75mmとなった。75w-N30の試験体を除くと正方形断面より長方形断面の方が曲げ耐力比は大きくなる結果となった。

曲げ耐力比が1.0を大きく上回る要因は, 試験体中央部に加力用プレートを設けていることが考えられる。



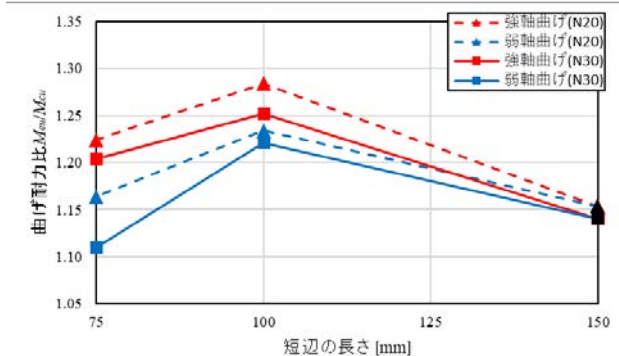
(a) 軸力比0, 0.2

(4) 限界部材角

図8(a)を軸力比0, (b)を軸力比0.2, 0.3とし, 限界部材角を短辺の長さで比較したものを示す。縦軸は限界部材角 R_u , 横軸は短辺の長さとしている。なお, 軸力比0の限界部材角は軸力比0.2, 0.3の試験体に比べて大きな値を示したため, 図8(a)は軸力比0の試験体のみの検討としている。

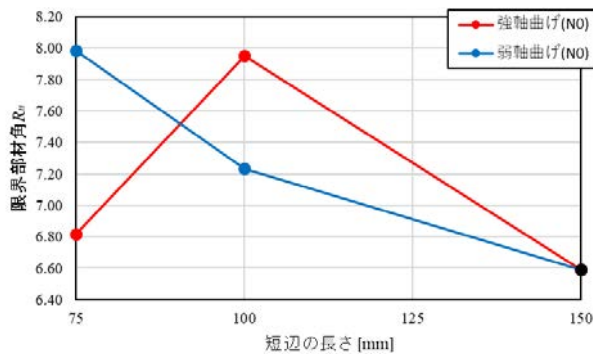
図8(a)より, 短辺100mmは強軸曲げが, 短辺75mmは弱軸曲げの方が大きくなっており, 長方形断面は正方形断面より大きな結果となった。

図8(b)より, 軸力比0.2の試験体の方が限界部材角は大きな値を示し, 曲げ方向では弱軸曲げより強軸曲げの方が大きい結果となっている。軸力比0.2の強軸曲げでは短辺の長さが短いほど限界部材角は大きくなっており, 弱軸曲げでは短辺の長さが短いほど限界部材角は小さくなっている。一方軸力比0.3では, 強軸曲げは軸力比0.2と同様の傾向を示したが弱軸曲げでは同様の傾向は示さず, 短辺100mmと75mmは同程度の値となった。軸力比0.2, 0.3ともに限界部材角の大きさは, 強軸曲げ>正方形断面>弱軸曲げとなった。

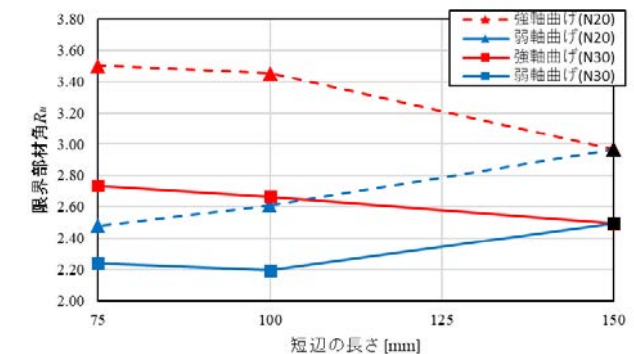


(b) 軸力比0.2, 0.3

図7 曲げ耐力比と短辺の長さ関係



(a) 軸力比0



(b) 軸力比0.2, 0.3

図8 限界部材角と短辺の長さ関係

(5) 変形能力評価式

CFT柱材は、構造特性係数を決定するための部材種別を限界部材角 R_u に基づき設定しており、変形能力評価式が重要になる。そこでCFT指針と新都市ハウジング協会「コンクリート充填鋼管造技術基準・同解説」⁹⁾（以下新都市基準）の変形能力評価式を用いて実験結果との比較を行う。（4）式にCFT指針、（5）式に新都市基準の変形能力評価式を示す。

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

ここで、

$$\beta = 1.0 - \frac{\sigma_B - 40.3}{566} \leq 1.0 \quad (\beta \geq 1.0 \text{ の場合は } \beta = 1.0)$$

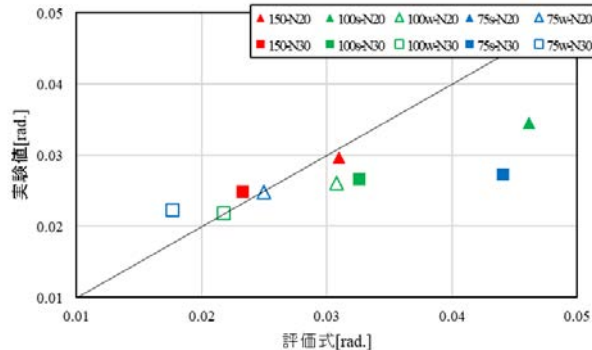
$\gamma_r : l_k/D \leq 10$ の場合は1.0, $l_k/D > 10$ の場合は0.8とする。

$$R_u = \frac{3.25 - 5.0 \left(\frac{N}{N_0} \right) + 800 \eta \left(\frac{t}{B} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{325}{\sigma_y}}}{100} \quad (5)$$

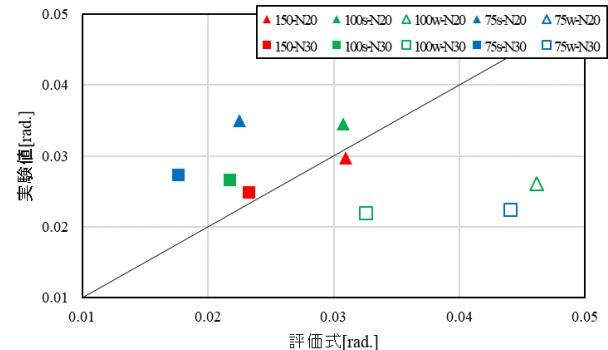
ここで、

$$\eta = \frac{1}{3} \left(4.0 - \frac{\sigma_B}{39} \right) \leq 1.0 \quad (\eta \geq 1.0 \text{ の場合は } \eta = 1.0)$$

とする。

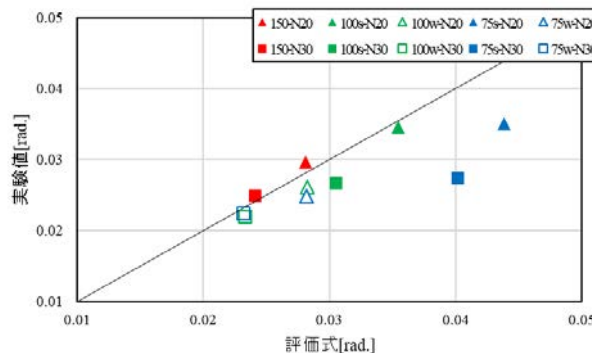


(a) CFT指針(フランジ幅を用いた場合)

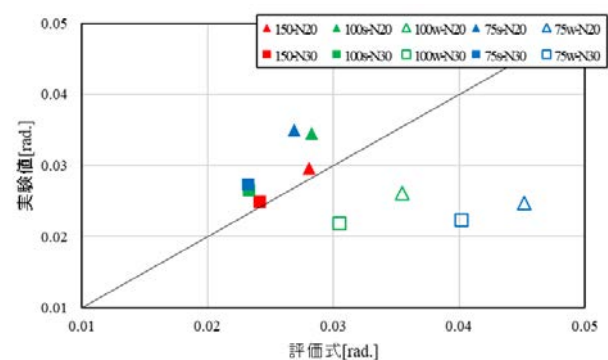


(b) CFT指針(ウェブ幅を用いた場合)

図9 CFT 指針評価式と実験結果の比較



(a) 新都市基準(フランジ幅を用いた場合)



(b) 新都市基準(ウェブ幅を用いた場合)

図10 新都市基準評価式と実験結果の比較

図9、図10にCFT指針と新都市基準の評価式と軸力を作用させた試験体10体の実験結果を比較したものを示す。縦軸は実験値、横軸は評価式の値としている。なお、(a)は評価式の B にフランジ幅、(b)はウェブ幅を用いた場合とする。

図9(a)、図10(a)のフランジ幅を用いた場合は、CFT指針、新都市基準ともに強軸曲げより弱軸曲げの方が評価式に近い値を示している。一方、図9(b)、図10(b)のウェブ幅を用いた場合は、強軸曲げは評価式より大きな値を示し、弱軸曲げでは評価式より小さな値を示した。このことから、断面の幅とせいが異なる長方形断面においては、評価式の B に長辺の値を用いることで評価できると考えられる。しかし、弱軸曲げにおいては長辺の値を用いた場合でも評価式より小さな値を示している試験体もあるため検討が必要だと考えられる。

また、どちらの評価式も正方形断面に関しては概ね評価できており、大きな差はない。今回実験に用いた試験体の中で75wの試験体については座屈長さ径比 (l_k/D) が12を超え長柱の評価になるが、新都市基準は部材長さが考慮されていない。そのため、図9(a)及び図10(a)の75wの結果をみるとCFT指針では評価式より大きな値または同程度となっているが、新都市基準では評価式より小さな値となっている。

(6) 付加曲げの割合

長方形断面の場合は曲げ方向（強軸曲げ，弱軸曲げ）によって曲げ耐力が異なる。また，軸力が作用すると付加曲げモーメントが生じる。この付加曲げモーメントが断面形状によってどのように影響するのかを検討する。

図11に付加曲げの割合と短辺の長さ関係を示す。縦軸の付加曲げの割合は最大曲げモーメントの実験値 M_{du} のうち付加曲げモーメント（ $N\delta$ ）が占める割合（％）とし，横軸は短辺の長さとしている。なお，検討に用いる試験体は軸力を作用させた10体の試験体とする。

図11より，軸力比0.3及び弱軸曲げの方が付加曲げの割合は大きくなっている。また，曲げ方向や軸力比に関わらず付加曲げの割合は短辺の長さが短いほど大きくなっている。軸力比0.3の75sと75wの付加曲げの割合は約2倍の差があるが軸力比0.2の100sと100wは大きな差はない。付加曲げの割合は弱軸曲げ及び短辺の長さが短い方が大きくなっており，軸力の影響を大きく受けていることがわかる。

4. まとめ

曲げ実験及び一定軸力下の曲げ実験から得られた知見を以下に示す。

- ・軸力比0.2，0.3では最大荷重や最大荷重時の変位に大きな差異はない。
- ・曲げ耐力比はすべての試験体で1.0を超え，75w-N30の試験体を除くと長方形断面は正方形断面より大きくなった。
- ・限界部材角は軸力比が小さいほど大きくなっており，軸力比0.2，0.3では強軸曲げ＞正方形断面＞弱軸曲げの順となった。
- ・変形能力評価式は長方形断面の場合，長辺の値を用いれば評価できると考えられるが，弱軸曲げの場合は検討が必要になってくると考えられる。
- ・付加曲げの割合は弱軸曲げ及び短辺の長さが短い方が大きくなっており，軸力の影響を大きく受けていることがわかった。

謝辞：本研究の構造実験は，藤本研究室の大学院生及び卒研生の多大なる協力によるものです。ここに謝意を表します。

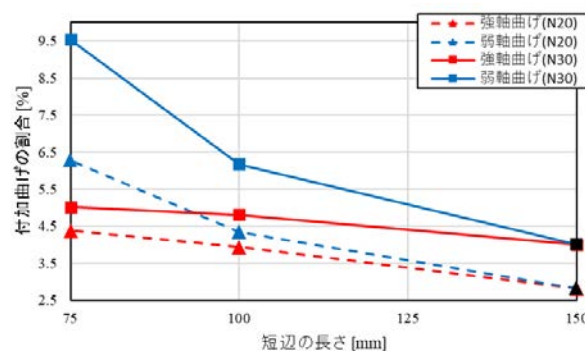


図11 付加曲げの割合と短辺の長さ関係

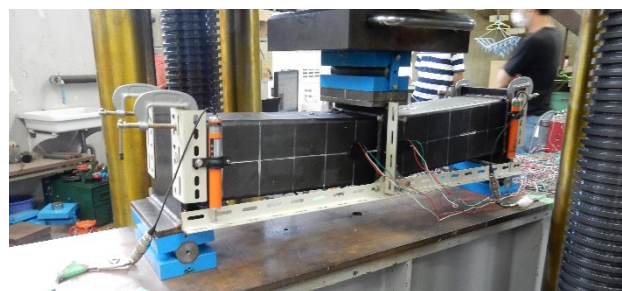
付録

写真1(a), (b)に曲げ実験，一定軸力下の曲げ実験の様子を示す。

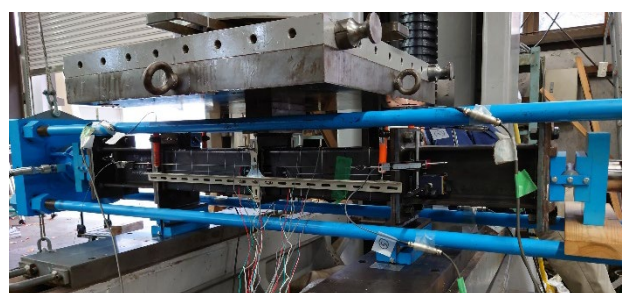
写真2に実験後の試験体の一例を示す。試験体は軸力比0.3の短辺75mmの試験体とし(a)を強軸曲げ，(b)を弱軸曲げとしており，試験体中央部の圧縮側フランジに局部座屈がみられた。

写真3(a), (b)に写真2の試験体のコンクリート破壊の様子を示す。なお，コンクリートの破壊写真はそれぞれの試験体の座屈が生じた部分としている。

鋼管内部のコンクリートは圧縮破壊によるひび割れを確認することができた。



(a) 曲げ実験



(b) 一定軸力下の曲げ実験

写真1 実験の様子



(a) 75s-N30



(b) 75w-N30

写真2 最終破壊形状



(a) 75s-N30



(b) 75s-N30

写真3 コンクリート破壊

参考文献

- 1) 日本建築総合試験所：GBRC, Vol.37, No.2, 2012.4
- 2) 藤本利昭, 三上功生, 水野僚子, 山中美穂：CFT 造超高層建築物の構造計画の変遷, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.55, pp.897-902, 2017.10
- 3) 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, 2008
- 4) 有馬榮梨, 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
- 5) 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 圧縮性状-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1537-1538, 2013.8
- 6) 荒井望, 長崎透, 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 2 曲げ性状-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1539-1540, 2013.8
- 7) 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, 2017.8
- 8) 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
- 9) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管造技術基準・同解説, 2012

(Received September 10, 2021)

STUDY ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF RECTANGULAR CFT COLUMNS

Koki IMAI, Toshiaki FUJIMOTO, Koto OISHI and Kaito SUKEGAWA

Circular and square columns have been used frequently for the column cross-section of the CFT structure. However, in recent years, some CFT columns with a rectangular cross-section have been shown to increase the degree of freedom in design. The design formula for CFT columns is not evident for rectangular cross-sections, and application requires appropriate judgment by the structural designer. Currently, research on rectangular CFT columns is ongoing, but there are few experimental data and studies on the action of axial and horizontal forces. Therefore, this study examines the structural performance by conducting bending experiments, particularly those under a constant axial force.