

(33) 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

荒井 望¹・長崎 透²・藤本 利昭³

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: arairairai@hotmail.co.jp

²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: cito13028@g.nihon-u.co.jp

³正会員 日本大学准教授 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

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）は、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、RC造のように柱断面を長方形と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が柱に適用された建物もある。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」において適用可能とされているが、その適用にあたっては明確な記述はなく実験資料も僅かである。そこで本報では、長方形CFTの構造性能を把握するため、圧縮実験と曲げ実験を行った。

本実験結果から、長方形CFTの圧縮耐力、曲げ耐力及び限界部材角の評価において、長辺と短辺両方の幅厚比の影響を受けることがわかった。また、圧縮耐力の幅厚比の算定に長辺と短辺の平均を用いることで、概ね正方形と同様に評価することができた。

Key Words: CFT, Compression experiment, Flexural experiment, Compression behavior, Flexural behavior, Compression strength, Flexural strength

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱は、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とすることができれば、より合理的な設計が可能となり設計の自由度も拡大する。このようなことから、既に長方形がCFT柱に適用された建物もある¹⁾。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）」²⁾において適用可能とされているが、その適用にあたっては明確な記述はなく、また実験資料も僅かである³⁻⁵⁾。

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、コンクリート充填長方形鋼管の圧縮性能、曲げ性能について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体

表-1に試験体一覧を、図-1, 2に圧縮と曲げの試験体詳細図を示す。試験体には市販の一般構造用鋼管STKR400を用いた。実験変数は、鋼管の断面形状（正方形、長方形）、幅厚比、鋼管の高さ（長さ）とし、圧縮試験体7体、曲げ試験体7体の合計14体の試験体について実験を行った。なお圧縮試験体の高さは、断面幅（B）及びせい（D）の3倍とし、長方形断面については幅とせいが異なるため、それぞれの3倍の高さの試験体を製作した。曲げ試験体の支点間距離は、曲げ方向に対する断面せい（D）の6倍とした。表-2に鋼材の材料試験結果を示す。また、表-3にコンクリートの材料試験結果を示す。なお、使用鋼材は圧縮試験体、曲げ試験体共に同じである。コンクリートは再生コンクリートを使用し、打設は試験体端部より縦打ちで行った。

表-1 試験体一覧

	幅×せい B×D (mm)	板厚 t (mm)	幅厚比 B/t (D/t)	一般化 幅厚比 α	鋼管材料 強度 (N/mm ²)	設計基準 強度 F _c (N/mm ²)	高さ (圧縮試験体) L (mm)	支点間距離 (曲げ試験体) L (mm)
正方形	75×75	3.01	24.9	1.08	400 (STKR400)	21.0	225	450
	100×100	2.97	33.7	1.48			300	600
	150×150	4.17	36.0	1.68			450	900
長方形	150×75	3.03	49.5(24.8)	2.13(1.06)			225	450
	75×150	3.03	49.5(24.8)	2.13(1.06)			450	900
	150×100	3.05	49.2(32.8)	2.29(1.53)			300	600
	100×150	3.05	49.2(32.8)	2.29(1.53)	450	900		

(-)短辺方向を使用した値
α=D/t・√(σ_y/E_c)

(2) 加力及び計測

実験に用いた荷重装置を図-3に示す。加力は、2000kN 万能試験機を使用した。

a) 圧縮試験

圧縮実験は試験体上下の拘束条件を、上部を球座、下部を固定として実験を行った。荷重は、軸方向ひずみが5%に達するまで行うことを原則とした。実験に際しては凹凸のあるコンクリート打設面を、石膏を用いて平滑にしてから荷重を行った。測定は、試験体上下の加力用プレート間に設置した2本の変位計により得られる軸方向変位δから、試験体全長(L)の平均軸ひずみε(=δ/L)を測定した。

b) 曲げ試験

曲げ実験は3点曲げ試験とし、試験体両端部より50mmの位置を支点とし、試験体中央に幅100mm厚さ20mmの加圧プレートを設け、試験体変形角が5%を超えるまで荷重した。測定には、試験体側面に2ヶ所、底面に2ヶ所、合計4ヶ所に変位計を取り付け、変位計から得られた中央のたわみδを用いて、各試験体の変形角R(=δ/L2)を測定した。

表-2 材料試験結果 (鋼材)

幅×せい	降伏強度 σ _y (N/mm ²)	引張強度 σ _t (N/mm ²)	ヤング係数 E _c (kN/mm ²)	伸び率 ε (%)
75×75	384	452	205	41.6
100×100	397	467		29.5
150×150	447	480		31.3
150×75	379	428		29.5
150×100	446	489		30.4

表-3 材料試験結果 (コンクリート)

試験体名	圧縮試験体	曲げ試験体	設計基準 強度 F _c (N/mm ²)	ヤング率 E _c (kN/mm ²)	最大圧縮 ひずみ度 ε _B (%)	割裂強度 (kN)
	圧縮強度 σ _B (N/mm ²)					
再生コンクリート	27.4	29.9	21	22.5	0.207	77.2

3. 実験結果及び考察

(1) 耐力の実験値と計算値の比較

a) 圧縮試験

表-4に実験結果一覧を示す。圧縮実験における最大荷重N_uとCFT指針²⁾によるCFT柱の計算圧縮耐力N₀(=A_s・σ_y+A_c・σ_B)との比(N_u/N₀)は、正方形断面では0.97~1.05となり、長方形断面においては0.86~0.99であった。正方形断面においては100mm×100mmの試験体のみ1.0を上回った。長方形断面においてはわずかではあるが全ての試験体で1.0を下回り、特にB×D=150mm×100mmの試験体が他と比べ小さな値を示した。

b) 曲げ試験

圧縮試験と同様に、表-4に曲げ実験における最大曲げモーメントM_{exp}とCFT指針²⁾に基づく計算値M_{cal}との比(M_{exp}/M_{cal})を示す。実験における最大曲げモーメントM_{exp}は、加圧プレートの拘束による影響を考慮して、M_{exp}=(P/2)×(L-100)/2として評価している。

正方形断面では、1.10~1.20となり、長方形断面では、1.07~1.15となった。曲げ実験における正方形断面では、3体の試験体共に耐力比が1.0を大きく上回った。長方形断面においては、正方形ほどではないが耐力比が1.0を大きく上回り、特にB×D=150mm×75mmの試験体が他と比べ大きな値を示した。

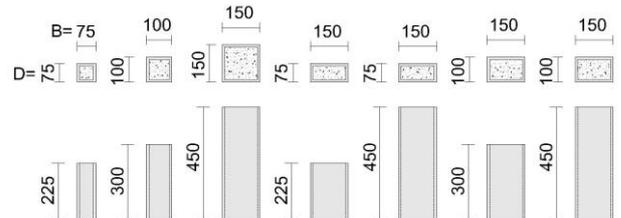


図-1 圧縮試験体詳細図

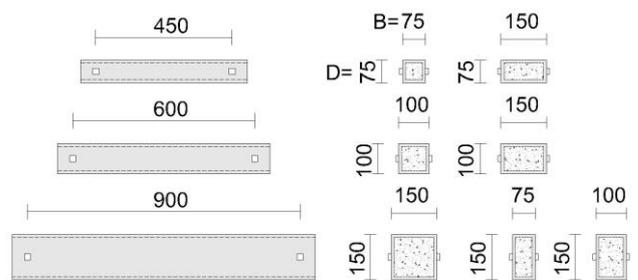
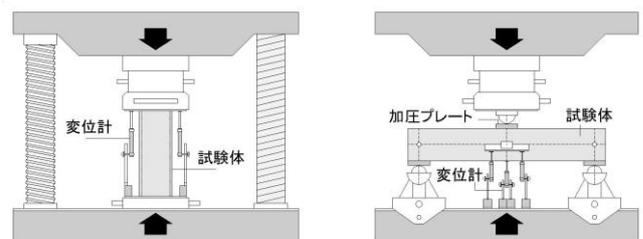


図-2 曲げ試験体詳細図



a) 圧縮試験

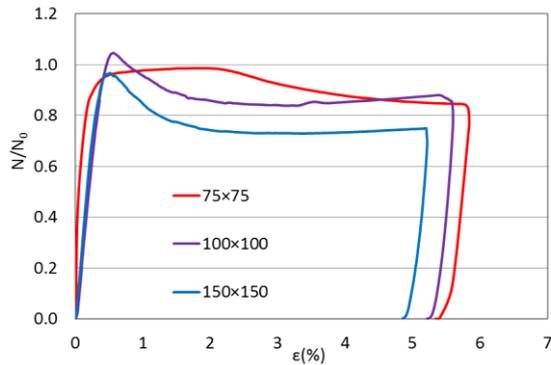
b) 曲げ試験

図-3 2000kN試験機

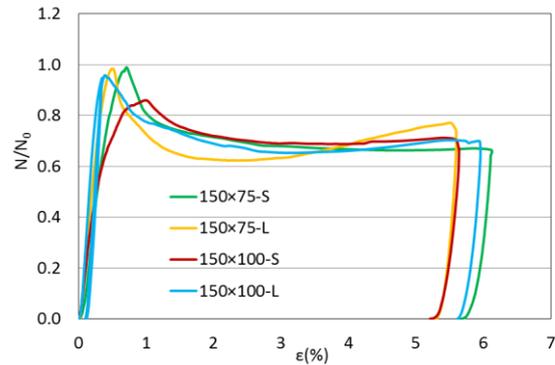
表-4 実験結果一覧

試験体名 B×D (mm)	一般化 幅厚比 α	鋼管の 断面積 A _s (mm ²)	σ _y (N/mm ²)	コンクリート の断面積 A _c (mm ²)	σ _g (N/mm ²)		圧縮耐力		耐力比 $\frac{N_u}{N_0}$	曲げ耐力		耐力比 $\frac{M_{exp}}{M_{cal}}$	限界 部材角 R _u
					圧縮 試験体	曲げ 試験体	計算値 N ₀ (kN)	実験値 N _u (kN)		計算値 M _{cal} (kN・m)	実験値 M _{exp} (kN・m)		
75×75	1.08	867	384	4785			467	457	0.99	9.80	11.8	1.20	0.0896
100×100	1.48	1153	397	8847	27.4	29.9	700	733	1.05	18.6	22.0	1.18	0.0715
150×150	1.68	2432	447	20068			1638	1584	0.97	66.3	73.2	1.10	0.0507
150×75	1.60	1327	379	9923			775	770	0.99	16.4	19.0	1.15	0.0732
75×150	1.60	1327	379	9923	27.4	29.9	775	763	0.98	28.2	30.5	1.08	0.0603
150×100	1.91	1488	446	13512			1034	889	0.86	28.4	31.3	1.10	0.0628
100×150	1.91	1488	446	13512			1034	990	0.96	38.9	41.7	1.07	0.0449

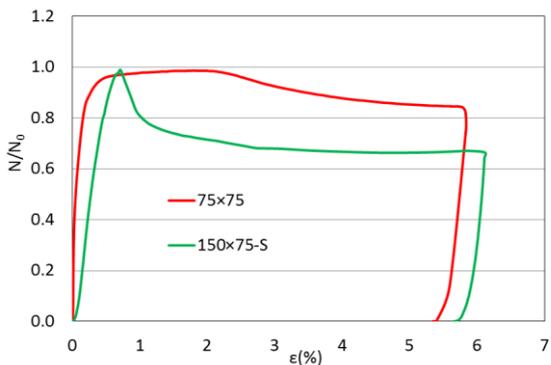
長方形断面の一般化幅厚比には長辺と短辺の平均を使用



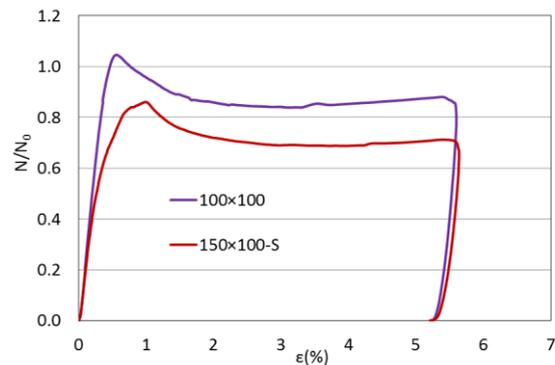
(a) 正方形断面



(b) 長方形断面



(c) 断面形状の比較



(d) 断面形状の比較

図-4 荷重-変形関係

(2) 荷重-変形関係

a) 圧縮試験

図4(a)～(d)に圧縮実験の荷重-変形関係を示す。なお、図の縦軸は軸力Nを計算圧縮耐力 N_0 で除したもので、横軸は試験体全長の平均軸ひずみ ϵ で表している。図-4(a)は正方形断面、(b)は長方形断面を比較した図で、(c)、(d)は長方形断面と断面の短辺が等しい正方形断面試験体を比較したものである。

図-4(a)から正方形断面においては、最大耐力以降の耐力低下が少なく、幅厚比が最も小さい $B \times D = 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ の試験体は、最も変形能力が高く、最大耐力以降の耐力低下も緩やかである。

図-4(b)より長方形断面においては、同図(a)と比較すると、正方形断面と同様に最大耐力以降の耐力低下が緩やかであることがわかる。 $B \times D = 150\text{mm} \times 100\text{mm}$ と $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ の試験体を比較すると、わずかに耐力比に差があり、短辺が100mmと比べ75mmと短い試験体の N/N_0 が大きくなった。

図-4(c)、(d)より短辺が等しい場合、長辺が長くなると N/N_0 が小さくなり、また最大耐力以後の変形性能も低下することがわかる。これらのことから、最大耐力には長辺と短辺の両者の幅厚比の影響を受けるものと考えられる。

b) 曲げ試験

図-5～図-7に曲げ実験の曲げモーメント-変形角関係を示す。なお、図の縦軸は実験における曲げモーメント M を計算値 M_{cal} で除したもので、横軸は変位計から得られた変形角 R で表している。図-5(a)に正方形断面の曲げモーメント-変形角関係を、(b)に長方形断面の曲げモーメント-変形角関係を示す。同図(c)には同じ幅で異なるせいの長方形断面を比較したものを、(d)には異なる幅で同じせいの長方形断面を比較したものを示す。

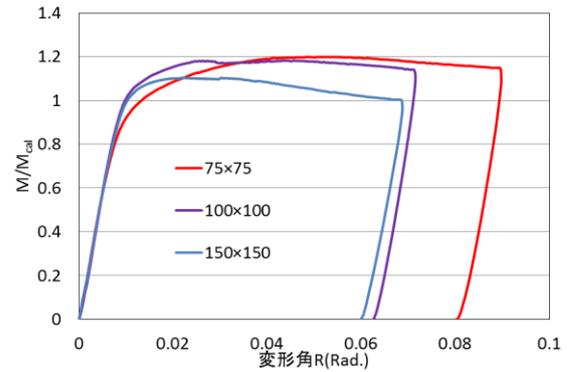
図-5(a)より、正方形断面においては、幅厚比が最も小さい $B \times D = 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ の試験体の、変形能力が最も大きく、最大曲げモーメント近くになってからグラフの勾配が緩やかに上昇し、大きな変形能力を示した。また、幅厚比が最も大きい $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ の試験体については、変形能力が最も小さく、最大曲げモーメントに最も早く達しており、その後の耐力低下も他の試験体と比べ大きくなった。

図-5(b)より、長方形断面においては、同図(a)と比較すると、断面せい(D)が大きい $B \times D = 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ と $100\text{mm} \times 150\text{mm}$ の試験体が、 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ の試験体と近い性状を示した。また、断面幅(B)が大きい $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ と $150\text{mm} \times 100\text{mm}$ の試験体では概ね $75\text{mm} \times 75\text{mm}$ の試験体に近い性状を示し、他2体の試験体に比べ耐力比、変形能力共に大きい値を示した。

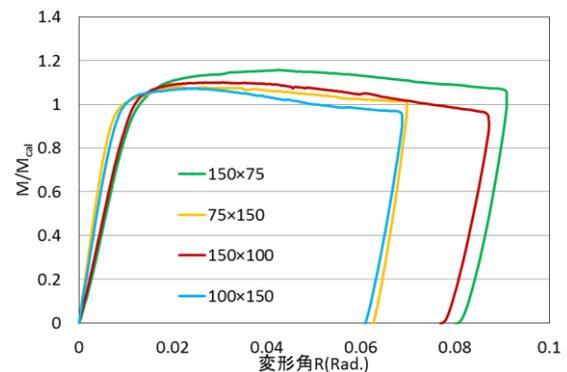
図-5(c)より、同じ幅(B)で異なるせい(D)の長方形断面の試験体 $B \times D = 150\text{mm} \times 75\text{mm}$ と $150\text{mm} \times 100\text{mm}$ においては、最大耐力比 M_{exp}/M_{cal} がせいの小さい試験体のほうが大きくなり、その後の耐力低下もせいの小さい試験体のほうが緩やかになった。

図-5(d)より、異なる幅(B)で同じせい(D)の長方形断面の試験体 $B \times D = 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ と $100\text{mm} \times 150\text{mm}$ においては、幅の小さい試験体のほうがわずかに耐力比は大きくなったが、ほぼ同様のグラフ形状がみられた。

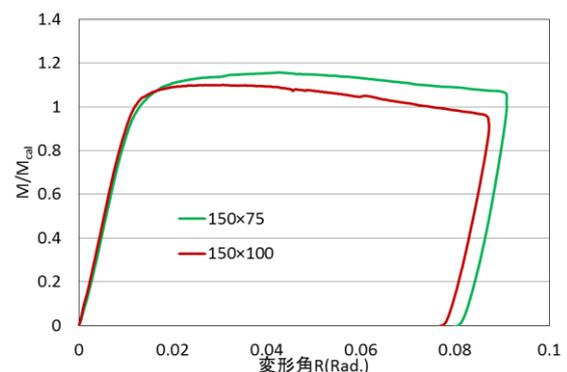
これらのことから、断面せい(D)が小さくなるほど耐力比は大きくなり、その後の耐力低下もわずかとなり、変形能力も大きくなると思われる。また、断面幅(B)の影響は耐力比、変形能力共に断面せいの影響に比べ少ないものと考えられたため、図-6(a)～(c)では正方形断面と同じ幅で異なるせいの長方形断面試験体をそれぞれ比較した。同様に図-7(a)～(c)には正方形断面と異なる幅で同じせいの長方形断面試験体を比較した。



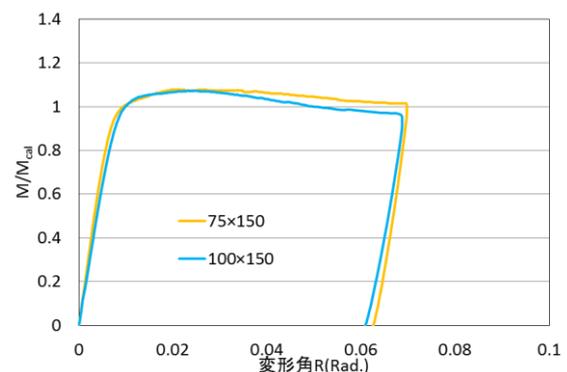
(a) 正方形断面



(b) 長方形断面

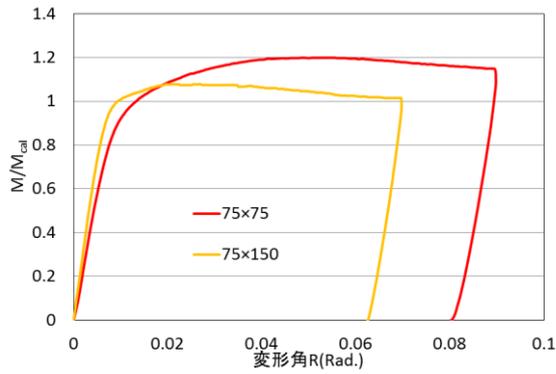


(c) 断面せいの差異による比較

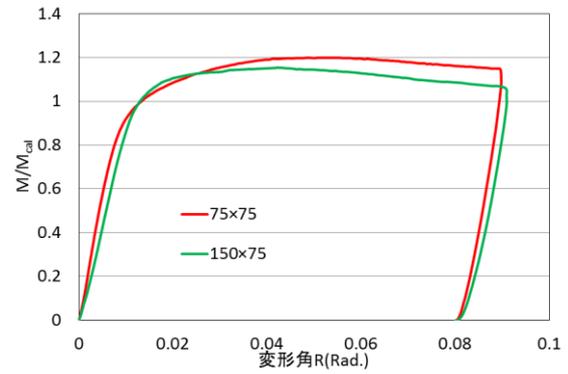


(d) 断面幅の差異による比較

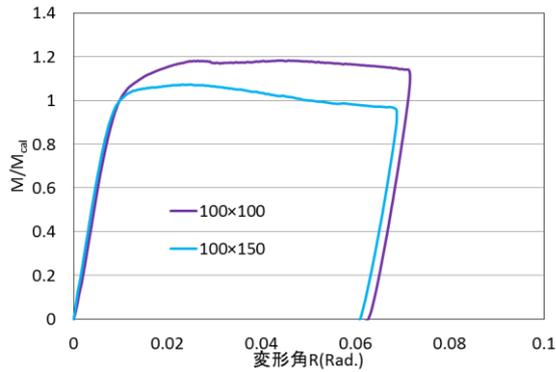
図-5 曲げモーメント-変形角関係



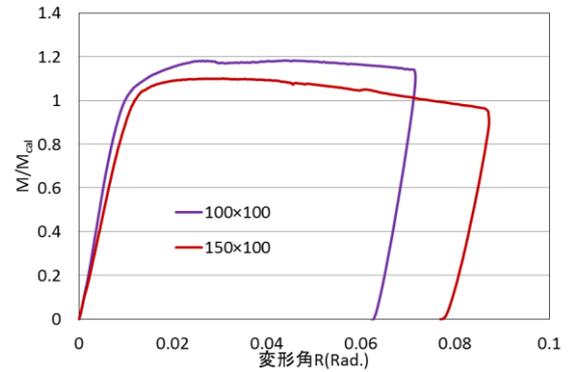
(a) 正方形断面と長方形断面の比較



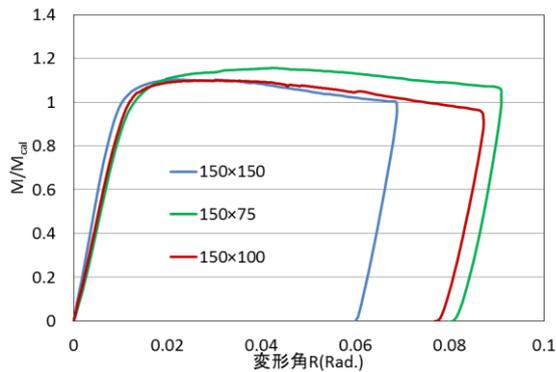
(a) 正方形断面と長方形断面の比較



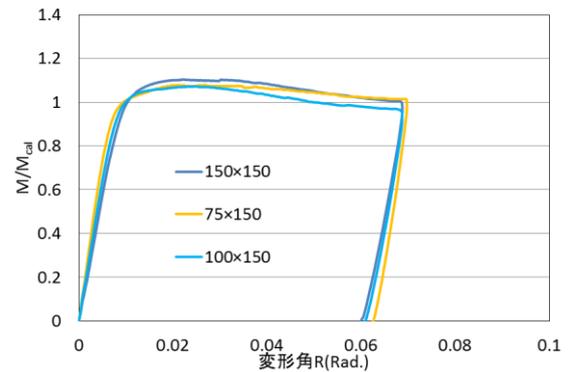
(b) 正方形断面と長方形断面の比較



(b) 正方形断面と長方形断面の比較



(c) 正方形断面と長方形断面の比較



(c) 正方形断面と長方形断面の比較

図-6 断面せいの差異による比較

図-7 断面幅の差異による比較

図-6(a)より、最大耐力と変形能力共に断面せいの小さい正方形断面のほうが大きな値を示している。同様に図-6(b)より、断面せいの小さい正方形断面のほうが最大耐力は大きな値を示した。また(a)程ではないが、変形能力も正方形断面のほうがわずかに上回っている。図-6(c)より、変形能力は断面せいが小さい長方形断面のほうが大きな値を示した。最大耐力比でも図-6(a)、(b)程ではないが、長方形断面のほうがわずかに上回った。

以上のことから、全体的に耐力比、変形能力共に断面せいの違いにより大きな変化がみられたことから、断面せい(D)の影響が大きいことがわかる。

図-7(a)より、変形能力に大きな変化はみられなかったが、最大耐力では断面幅の小さい正方形断面のほうがわずかに上回っている。

同様に図-7(b)では、最大耐力、変形能力共に断面幅の小さい正方形断面が、大きな値を示している。

図-7(c)においては、正方形断面と長方形断面には大きな違いはみられなかった。

以上のことから、全体的に耐力比、変形能力共に断面せいに比べ断面幅の違いにより、大きな差異はみられなかったことから、断面幅(B)の影響は小さいものと考えられる。

(3) 一般化幅厚比との関係

a) 圧縮試験

図-8には、圧縮実験より得られた最大荷重の実験値と計算値との比 (N_u/N_0) と一般化幅厚比 α との関係を示す。なお、図中の長方形断面の一般化幅厚比の算定には、長辺、短辺、長辺と短辺の平均値を用いた場合の3通りを示している。また、図中には文献³⁾の正方形断面、長方形断面CFT柱の実験データも示している。なお、文献³⁾の長方形断面の一般化幅厚比の算定には長辺と短辺の平均値を用いたもので示してある。

正方形断面の強度上昇率と一般化幅厚比の関係 (図中の■, □) は、本実験結果および既往の実験データ共に一般化幅厚比が大きくなると、 N_u/N_0 が小さくなる傾向が認められる。長方形断面に関しては、一般化幅厚比の評価方法に関わらず、同様の傾向が認められる。一般化幅厚比の評価方法の違いでは、長辺と短辺の平均値を用いて評価すると、正方形断面と同様の傾向がより明確になっているものと判断される。

b) 曲げ試験

図-9には、曲げ実験より得られた限界部材角 R_p と一般化幅厚比 α との関係を示す。なお、図中の長方形断面の一般化幅厚比の算定には、断面幅 (B) , 断面せい (D) , BとDの平均値を用いた場合の3通りを示している。同図から、一般化幅厚比が大きくなるほど限界部材角が小さくなることがわかる。また、長方形断面の一般化幅厚比の算定にBとDの平均を用いると、限界部材角の評価は正方形とほぼ同様の傾向になった。

ただし、同一断面形状で載荷方向が異なる場合には、長辺方向に載荷した場合に比べ、短辺方向に載荷した場合の限界部材角が大きくなる傾向があり、今後の検討課題である。

4. 結論

長方形CFT柱の圧縮と曲げ実験により、以下の知見が得られた。

- ・圧縮耐力は計算値を超えるものは少なかったが、曲げ耐力は全ての試験体において計算値を上回った。
- ・圧縮実験の最大耐力には長辺側の幅厚比だけでなく、短辺側の幅厚比の影響も受ける。
- ・圧縮耐力の幅厚比の算定に長辺と短辺の平均を用いることで、概ね正方形と同様に評価することができる。
- ・曲げ実験の最大曲げモーメントに関しては、断面せいを用いた幅厚比 (D/t) の影響が顕著である。
- ・曲げ実験の限界部材角の評価において、幅厚比の算定にBとDの平均を用いることで、概ね正方形と同様に

評価することができる。

- ・ただし、同一断面形状で載荷方向が異なる場合には、長辺方向に載荷した場合に比べ、短辺方向に載荷した場合の限界部材角が大きくなる傾向があり、今後の検討課題である。

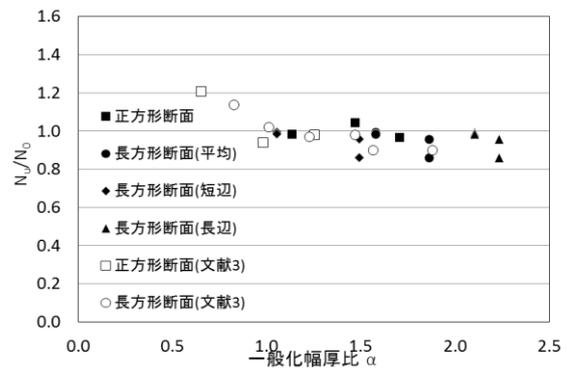


図-8 強度上昇率と一般化幅厚比の関係

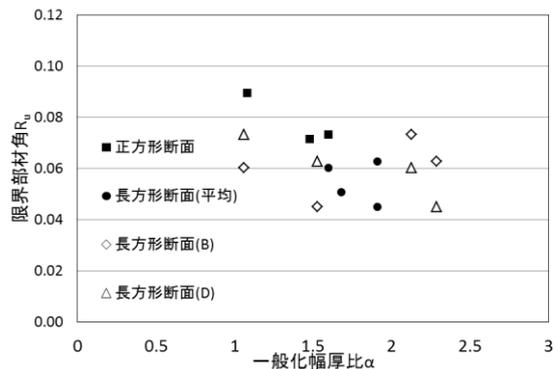


図-9 限界部材角と一般化幅厚比の関係

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的性状に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.1115-1116, 2002.
- 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

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF CONCRETE FILLED RECTANGULAR STEEL TUBES

Nozomu ARAI, Toru NAGASAKI and Toshiaki FUJIMOTO

A lot of study has been executed on the ultimate strength of concrete filled steel tubular columns (CFT). However, in case of the CFT in which rectangular steel tubes were used, the contribution of the confinement effect to the structural performance has not yet been clarified. Therefore, the stub column tests and beam-column tests on CFT columns were tested which have rectangular steel tubes and recycled concrete. The effect of cross-section as the deformation capacity and ultimate strength are discussed in this paper based on test results.