

長方形箱型断面材の曲げ性能に関する研究

日大生産工 (学部) ○今井皓己 日大生産工 藤本利昭
日大生産工 (院) 三浦智美

1. まえがき

コンクリート充填鋼管 (CFT: Concrete Filled Steel Tube, 以下CFTと略称) 構造とは, 鋼管内部にコンクリートを充填して用いる構造部材であり, 主に柱部材として円形・正方形断面が使用されている¹⁾。

一方でCFT柱が適用される建物を見てみると, 近年では, 特に平面的にX方向, Y方向ともに均等な建物は少なく, 鉄筋コンクリート構造のように柱断面を長方形とすれば, より合理的かつ自由な設計をすることが可能である。これまで長方形CFT柱が適用された事例もあるが, 構造設計で適用される角形断面柱の設計式は正方形断面を対象に示されており, 適用に当たっては設計者の適切な判断が必要となる。更に, その判断材料となる長方形断面柱材に関する研究は, CFT柱に限らずその基礎となる中空鋼管の研究も僅かで, 実験データも不足している。よって, 未だ設計式が確立されていないのが現状である。

そこで本研究では地震時における長方形鋼管柱材の基本性能を把握する目的で曲げ実験を実施し, 更に柱としての構造性能を把握する目的で一定軸力を作用させた曲げ実験を実施することとした。

本報告では, これら二種類の実験の概要と, 昨年度実施した曲げ実験^{2), 3)}の実験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 曲げ実験

a) 試験体

試験体には, 一般構造用角形鋼管STKR400を使用した。表1に材料試験結果, 表2に試験体概要を示す。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。試験体形状は, 板厚を4.5mm, 支点間距離 L は断面長辺 B の6倍 ($L=6B=900\text{mm}$) に統一し, 断面寸法 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$, $150\text{mm} \times 100\text{mm}$, $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ の3種類の鋼管について実験を行うこととした。また, 長方形断面においては強軸となる長辺方向と弱軸となる短辺方向があり, 幅厚比や曲げ方向の違いにより構造的

能が異なると考えられることから, 強軸と弱軸の2方向について検討することとした。

b) 実験方法

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, ダイアフラムを模擬した試験体中央部のプレートより加力した。各種測定は, 試験体側面に取り付けた4つの変位計を用いてたわみ δ から変形角 R を測定した。試験体上面, 下面には1軸のひずみゲージを各4本, 試験体側面には3軸のひずみゲージを各2本取り付け, 各部のひずみを測定した。

表 1 材料試験結果一覧

	板厚 $t(\text{mm})$	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 $E(\text{kN/mm}^2)$	伸び率 $\varepsilon(\%)$
150×150	4.22	405.3	489.7	205	32.6
150×100s	4.24	417.2	469.7		30.8
150×100w					
150×75s	4.16	414.3	484.2		31.5
150×75w					

表 2 試験体概要

	断面寸法			支点間距離 $L(\text{mm})$	幅厚比	
	幅 $B(\text{mm})$	せい $D(\text{mm})$	板厚 $t(\text{mm})$		B/t (長辺)	D/t (短辺)
150×150	150	150	4.22	900	35.5	35.5
150×100s	150	100	4.24	900	35.4	23.6
150×100w						
150×75s	150	75	4.16	900	31.6	18.0
150×75w						

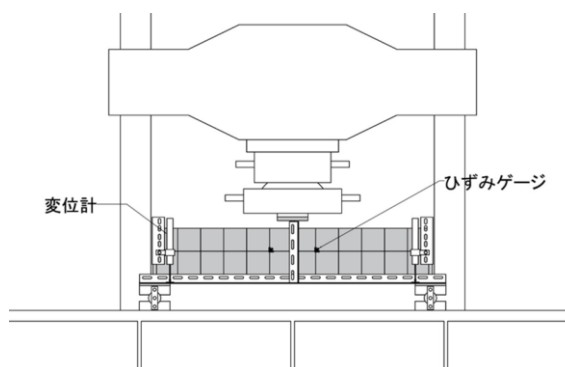


図 1 曲げ実験載荷装置

Study on Bending Performance of Rectangular Box-Section Members

Koki IMAI, Toshiaki FUJIMOTO and Tomomi MIURA

2.2 一定軸力下の曲げ実験

a) 試験体

一定軸力下の曲げ実験に用いる試験体は、2.1節に示した曲げ実験と同一の角形鋼管を用いて製作しており、使用材料は表1に示すとおりである。また試験体変数および試験体形状に関しても曲げ実験と同一である。

b) 実験方法

実験は軸力载荷用のフレームを5000kN万能試験機に組み込み行うこととした。加力は軸力载荷用の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万能試験機によりせん断力及び曲げモーメントを作用させることとした。

3. 曲げ実験の実験結果

3.1 実験結果概要

曲げ実験の結果の一覧を表3に示す。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)式により求めた。変形角の実験値 R_{max} は、試験体に設置した変位計から得られた値を左右で比較し大きい方のたわみ δ を支点間距離 L の1/2で除した値を用いた。

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

また計算値 cM_u 、 cP_u は各試験体の全塑性モーメントおよび全塑性モーメント時の荷重であり、 R_y は全塑性モーメント時の変形角を表している。それぞれの計算式を(2)～(3)式に示す。

$$cM_u = \frac{cP_u \cdot L}{4} = Z_p \cdot \sigma_y \dots\dots\dots(2)$$

$$R_y = \frac{cM_u \cdot L}{6EI} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 Z_p は試験体の塑性断面係数、 I は断面二次モーメントである。

表3より、耐力比 eP_u/cP_u は1.08～1.31であり、試験体形状・曲げ方向に関わらず、全ての試験体で実験より得られた曲げ耐力が計算値を上回っていることがわかる。

更に、強軸曲げと弱軸曲げの曲げ耐力比を比較すると、強軸曲げの方が大きく上回っている

ことがわかる。一方、正方形断面は強軸曲げよりは小さい値となったが、弱軸曲げよりは大きな値となっている。

3.2 荷重-たわみ関係

図2、図3に荷重-たわみ関係を示す。図の縦軸は試験機による鉛直荷重 eP 、横軸はたわみ $e\delta$ を示しており、たわみの実験値には4ヶ所に設置した変位計より得られたたわみの平均値を用いている。

強軸曲げ試験体において、最大荷重時のたわみを比較すると、短辺の幅厚比が小さいほど大きくなり、最大荷重以降の耐力低下も僅かであった。

一方、弱軸曲げ試験体においては、短辺の幅厚比の違いによる顕著な差異はみられなかったものの、最大荷重以降の耐力低下は短辺の幅厚比が小さいほど僅かであった。

同一断面で曲げ方向が異なる試験体の最大荷重時のたわみを比較すると、弱軸曲げより強軸曲げ試験体の方が大きな値を示しており、曲げ方向による差異は明確である。

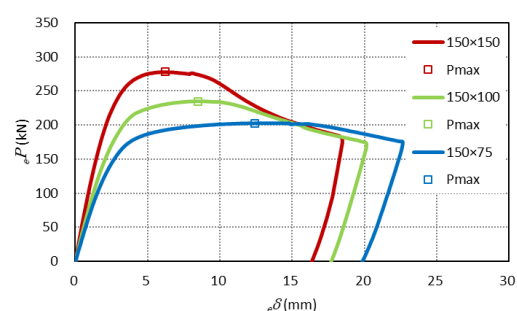


図 2 荷重-たわみ関係（強軸曲げ）

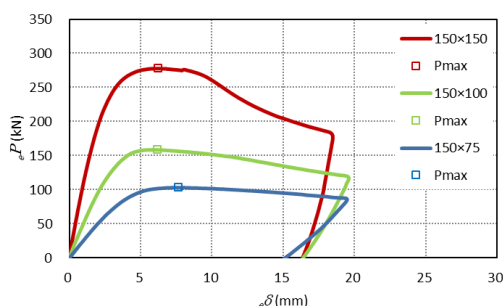


図 3 荷重-たわみ関係（弱軸曲げ）

表 3 曲げ実験結果一覧

	曲げ方向	断面二次 モーメント $I(\times 10^4 \text{mm}^4)$	最大荷重			最大曲げモーメント			変形角		
			計算値 cP_u (kN)	実験値 eP_u (kN)	eP_u/cP_u	計算値 cM_u (kN・m)	実験値 eM_u (kN・m)	eM_u/cM_u	計算値 R_y (%)	実験値 R_{max} (%)	R_{max}/R_y
150×150	—	8684	236	278	1.18	53.2	62.5	1.18	0.47	1.60	3.40
150×100s	強軸	6253	187	235	1.26	42.1	52.8	1.26	0.49	2.21	4.51
150×100w	弱軸	3348	142	159	1.12	31.9	35.7	1.12	0.70	1.56	2.23
150×75s	強軸	5045	155	203	1.31	34.8	45.6	1.31	0.50	2.97	5.94
150×75w	弱軸	1713	95	103	1.08	21.5	23.3	1.08	0.92	1.94	2.11

3.3 曲げモーメント-変形角関係

図4, 図5に曲げモーメント-変形角関係を示す。図の縦軸は、実験値 eM と計算値 cM_u との比 eM/cM_u とし、横軸は変形角 R とした。

変位計 R は実験により得られたたわみを支点間距離の1/2で除した値としている。変位計は4ヶ所に設置したが、局部座屈発生後は変形が非対称となるため、左右それぞれの値を平均し、たわみが大きいほうを用いた⁴⁾。

強軸曲げ試験体では、短辺の幅厚比が小さいほど最大荷重時の変形角は大きくなり、耐力比 eM/cM_u についても僅かに大きくなった。

一方、弱軸曲げ試験体では、最大荷重時の変形角については短辺の幅厚比の違いによる差異はみられなかったが、短辺の幅厚比が大きい試験体ほど eM/cM_u が僅かに大きくなる傾向が認められた。

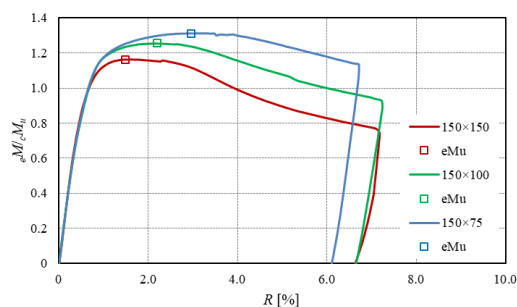


図 4 曲げモーメント-変形角関係 (強軸曲げ)

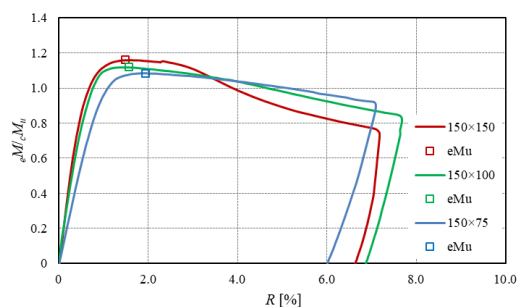
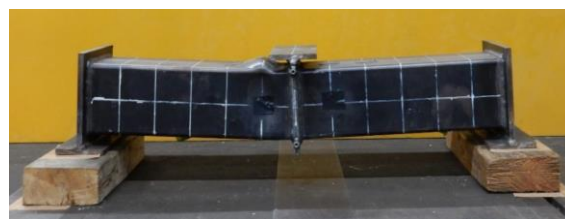


図 5 曲げモーメント-変形角関係 (弱軸曲げ)

3.4 座屈波長

a) 最終破壊形状

各試験体の最終破壊形状を写真1に示す。最終破壊形状は、全ての試験体において試験体中央部に局部座屈がみられた。局部座屈は正方形断面、強軸曲げにおいては、試験体上部が凸、側部が凹となった。弱軸曲げ試験体においては、試験体側部が凸、上部が凹となったことから、長方形断面では短辺側が膨らみ、長辺側がへこむ傾向があると考えられる。



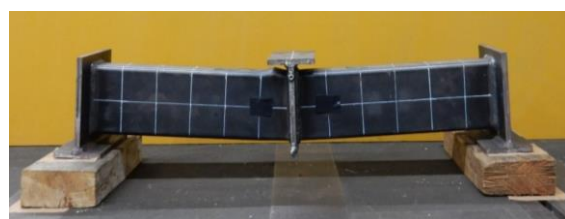
(a) 150×150



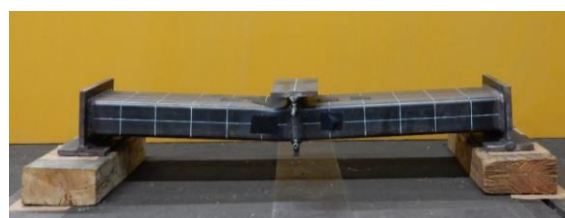
(b) 150×100 強軸



(c) 150×100 弱軸



(d) 150×75 強軸



(e) 150×75 弱軸

写真1 最終破壊形状

b) 座屈波長

表4に座屈波長の一覧を示す。なお座屈波長 L_b は、図6に示すように、実験終了後の試験体において、圧縮側となる面の座屈が生じていない部分の長さ L_1 , L_2 を、支点間距離 L から差し引いて求めた。

正方形断面の座屈波長と断面幅との比 L_b/B は、0.93であった。長方形断面については、長辺、短辺それぞれの比を求め、正方形断面の結果と比較を行った。座屈波長と長辺との比 L_b/B では0.53~0.77となり、正方形断面の結果と

比較すると小さな値となった。座屈波長と短辺との比 L_b/D では1.00~1.53となり、正方形断面の結果より大きく、値にばらつきがあった。

表 4 座屈波長一覧

	幅 $B(\text{mm})$	せい $D(\text{mm})$	板厚 $t(\text{mm})$	座屈波長 $L_b(\text{mm})$	L_b/B (長辺)	L_b/D (短辺)
150×150	150	150	4.22	140	0.93	0.93
150×100s	150	100	4.24	100	0.67	1.00
150×100w				100	0.67	1.00
150×75s	150	75	4.16	80	0.53	1.07
150×75w				115	0.77	1.53

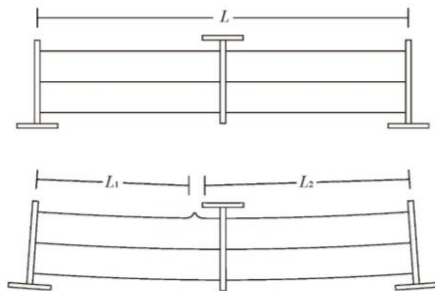


図 6 座屈波長の測定方法

c) 終局曲げ耐力と座屈波長の関係

図7に終局曲げ耐力と座屈波長の関係を示す。縦軸は、実験値 eM_u と計算値 cM_u との比 eM_u/cM_u とし、横軸は、座屈波長とした。

すべての試験体において実験値 eM_u が計算値 cM_u を超える値となった。強軸曲げにおいては、 eM_u/cM_u が小さくなるほど座屈波長が大きくなった。

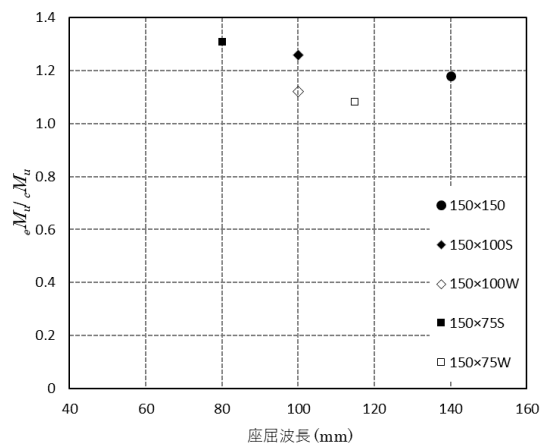


図 7 終局曲げ耐力と座屈波長の関係

d) 座屈波長と幅厚比の関係

図8に座屈波長と幅厚比の関係を示す。図の横軸は短辺 D を用いた幅厚比 D/t 、縦軸は座屈波長 L_b とした。

強軸曲げでは、短辺の幅厚比が小さいほど座屈波長は小さくなったが、弱軸曲げでは、短辺の幅厚比の違いによる座屈波長の変化はみられなかった。

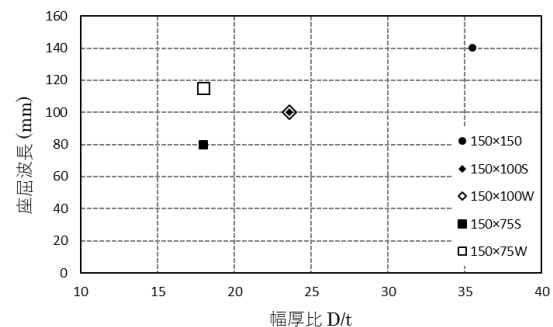


図 8 座屈波長と幅厚比の関係

4. まとめ

昨年度実施された曲げ実験から得られた知見を以下に示す。

- ・正方形断面において、曲げ耐力比は強軸曲げより小さな値となるが、弱軸曲げよりは大きな値となる。
- ・強軸曲げにおいては、最大荷重時の変形角は、短辺の幅厚比が小さいほど大きくなる。
- ・最大荷重時の変形角は、同一断面の場合、弱軸曲げより強軸曲げの方が大きくなった。
- ・強軸曲げにおける座屈波長は、幅厚比が小さいほど小さくなった。また、 eM_u/cM_u が小さいほど座屈波長は大きくなった。

今後、一定軸力下の曲げ実験を行い、曲げ実験との比較考察を行っていく。

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, 株式会社オーム社 pp.1-17
- 2) 瀬川良祐, 中島瑞希, 三浦智美, 藤本利昭: 角形鋼管の曲げ圧縮性状に関する実験的研究, 日本大学生産工学部建築工学科卒業論文概要集, pp.17-18 2019.3
- 3) 三浦智美, 藤本利昭: 長方形鋼管の曲げ圧縮性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1327-1328 2019.9
- 4) 加藤勉, 秋山宏, 北沢進: 局部座屈を伴う箱型断面材の変形, 日本建築学会論文報告集, pp.71-76 1978.6