

## 長方形断面を有する角形鋼管の変形能力の評価方法に関する研究

日大生産工(院) ○三浦 智美 日大生産工 藤本 利昭  
日大生産工(院) 今井 皓己

## 1. まえがき

鉄骨造建物の柱に使用される角形鋼管に関する研究はこれまで数多く行われており、設計の際に使用される「鋼管構造設計施工指針・同解説」<sup>1)</sup>では、円形および正方形断面を有する鋼管の変形能力評価式が示されている。しかしながら、近年ではコンクリート充填鋼管(CFT)柱の普及により、曲げ方向により曲げ耐力や変形能力が異なる長方形断面の柱を用いた鉄骨造建物もみられるようになってきた。

そこで、本研究では正方形断面の鋼管を対象に示されている変形能力評価式を基に、長方形断面の変形能力の評価方法を検討する。また、正方形および長方形の断面を仮定し、評価式による塑性率の傾向を確認するとともに、これまで行ってきた曲げ実験および一定軸力下の曲げ実験の結果<sup>2),3)</sup>とも比較を行う。

2. 加藤の正方形等厚鋼管の変形能力式<sup>4)</sup>

文献1)では、曲げと一定軸力を受ける冷間成形角形鋼管柱の変形能力式として、正方形等厚鋼管を対象とした剛塑性モデルによる理論式(A式)<sup>4)</sup>と、既往の実験資料に基づき定式化された(C式)<sup>5)</sup>が示されている。本研究では正方形断面を対象としたこれらの式から、断面形状の違いを考慮することが可能な理論式(A式)を用いることとした。

文献4)では、鋼管の断面を全塑性モーメント( $M_p$ )と断面積( $A$ )の等しいtwo-flangeモデルに置き換え、軸力の有無により、変形性能を塑性率 $\eta$ の形で表している。なお、変形性能の評価は、 $0 < \rho \leq (s-1)/2$ の条件に該当する軸力比は極めて小さいことから記述を省略している。

- $\rho > (s-1)/2$ の場合

$$\eta = \frac{1}{4} \left( \frac{s-1}{s-\rho} \right)^2 \left( \frac{2s-3\rho+1}{1-\rho} \right) \left( \frac{E}{E_{st}} \right) \left( \frac{I}{I_e} \right) \quad (1)$$

- $\rho = 0$ の場合

$$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{s-1}{s} \right)^2 (2s+1) \left( \frac{E}{E_{st}} \right) \left( \frac{I}{I_e} \right) \quad (2)$$

ここで、 $s$ : 応力上昇率 ( $=\sigma_m/\sigma_y$ )、 $\rho$ : 軸力比 ( $=\sigma_0/\sigma_y$ )、 $E$ : ヤング係数[kN/mm<sup>2</sup>]、 $E_{st}$ :

ひずみ硬化域のヤング係数[kN/mm<sup>2</sup>]、 $I$ : 断面二次モーメント[mm<sup>4</sup>]、 $I_e$ : 等価断面二次モーメント[mm<sup>4</sup>]である。

応力上昇率 $s$ には、短柱圧縮試験の結果より統計的に評価された式<sup>6)</sup>のうち、冷間成形角形鋼管について示されている次式を用いている。なお、式中の $\alpha$ は曲げ圧縮を受ける鋼管の圧縮側フランジとウェブの有効幅厚比を考慮した無次元化幅厚比である。

$$\frac{1}{s} = 0.778 + 0.13 \left( \frac{1}{\alpha} \right) \quad (3)$$

## 3. 長方形への適用方法

正方形断面を対象に示されている(1)、(2)式を長方形断面に適用するため、図-1のように断面幅を $B$ 、断面せいを $D$ 、板厚を $t$ としてtwo-flangeモデルに置き換えた。

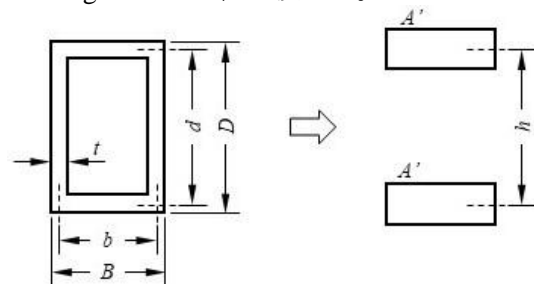


図-1 two-flangeモデル

長方形鋼管の断面積は $A=2(b+d)t$ であることから、等価断面の断面積 $A'=(b+d)t$ となる。長方形鋼管の全塑性モーメント $M_p$ は(4)式、等価断面の全塑性モーメント $M_p'$ は(5)式のようになり、 $M_p=M_p'$ より $h$ は(6)式のように表すことができる。長方形鋼管の断面二次モーメント $I$ は(7)式、等価断面二次モーメント $I_e$ は(8)式の通りである。なお、いずれもフランジの板厚は幅に比べて極めて小さいことから、面積と図心の距離のみを考慮して断面二次モーメントとしている。

$$M_p = \frac{dt(2b+d)\sigma_y}{2} \quad (4)$$

Study on Evaluation Method of Deformation Capacity for  
Rectangular Cross-Sectional Steel Tube

Tomomi MIURA, Toshiaki FUJIMOTO and Koki IMAI

$$M_p' = A' h \sigma_y \quad (5)$$

$$h = \frac{d(2b+d)}{2(b+d)} \quad (6)$$

$$I = \frac{td^3}{12} \times 2 + bt \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times 2$$

$$= \frac{d^2 t(3b+d)}{6} \quad (7)$$

$$I_e = A' \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 \times 2$$

$$= \frac{d^2 t(2b+d)^2}{8(b+d)} \quad (8)$$

文献4) では、軸力と曲げを受ける部材の幅厚比の評価に、全塑性状態でのウェブの応力状態を考慮した等価幅厚比を用いている。圧縮側フランジと、側面のウェブ全体が圧縮状態を想定したとき(図-2)、正方形断面の場合は軸力比 $\rho_c=0.5$ となる。一方、断面幅 $B$ 、断面せい $D$ が異なる長方形断面では、ウェブ全体が圧縮状態になるときの軸力比 $\rho_c$ は(9)式のように断面形状により変化する。

$$\rho_c = \frac{D-t}{B+D-2t}$$

$$\approx \frac{D}{B+D} \quad (9)$$

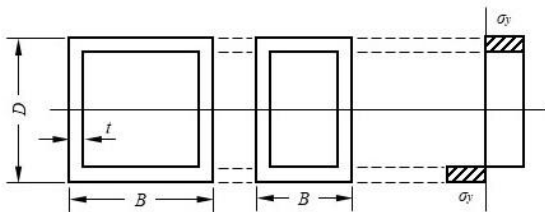


図-2 ウェブ全体圧縮状態

ウェブの1/2が圧縮状態になる軸力比 $\rho=0$ の場合と、ウェブ全体が圧縮状態になる $\rho_c$ の場合の中間を線形補間し、ウェブの有効幅厚比を(10)式、ウェブ2枚、圧縮フランジ1枚の幅厚比の平均値を(11)式とする。なお、 $a$ は断面のせいと幅の比( $=D/B$ )である。

$$\left(\frac{D}{t}\right)_e = \frac{a}{2a-(a+1)\rho} \cdot \frac{D}{t} \quad (10)$$

$$\left(\frac{B}{t}\right)_e = \frac{2a-\rho}{3[2a/(a+1)-\rho]} \cdot \frac{B}{t} \quad (11)$$

(11)式より曲げ圧縮を受ける鋼管の圧縮側フランジとウェブの有効幅厚比を考慮した無次元化幅厚比 $\alpha$ および断面二次モーメントは以下のように示される。

$$\alpha = \frac{9[2a/(a+1)-\rho]^2}{(2a-\rho)^2 \beta^2} \quad (12)$$

$$\frac{I}{I_e} = \frac{[(3+a)B-4t][(1+a)B-2t]}{[(2+a)B-3t]^2} \quad (13)$$

ここで、 $\beta$ ：一般化幅厚比( $=B/t \times \sqrt{\sigma_y/E}$ )である。

#### 4. 仮定断面による検討

正方形断面および長辺と短辺の比が2:1となる長方形断面を仮定し、各断面の変形能力評価式から得られる塑性率 $\eta$ の傾向を確認した。表-1に仮定断面の概要及び評価式の計算結果を示す。断面形状は、 $B \times D=150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、板厚 $t=6.0$ の正方形断面を基準とし、断面積 $A$ の等しい $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、短辺の幅厚比が等しい $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、長辺の幅厚比が等しい $75\text{mm} \times 150\text{mm}$ の3種類の長方形断面を用いた。なお、仮定した断面は板厚 $t=6[\text{mm}]$ に統一し、変形能力評価式中の $E/E_{st}$ は、文献4)と同様に130、軸力比 $\rho$ は、既往の実験<sup>2),3)</sup>と同様に0と0.2の2種類、鋼管の降伏強度 $\sigma_y=245[\text{N/mm}^2]$ として

表-1 仮定断面の検討

	$B$ [mm]	$D$ [mm]	$a$	$t$ [mm]	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$I$ [ $\times 10^3 \text{mm}^4$ ]	$I/I_e$	$s_0$	$\eta_0$	$s_{0.2}$	$\eta_{0.2}$
150×150	150	150	1.0	6.0	3456	11944	1.185	1.218	8.47	1.201	5.44
100×200	100	200	2.0		3456	17915	1.253	1.218	8.95	1.202	5.80
	200	100	0.5		3456	5973	1.117	1.218	7.98	1.199	5.02
150×300	150	300	2.0		5256	62753	1.252	1.143	4.17	1.112	2.01
	300	150	0.5		5256	21275	1.118	1.143	3.73	1.105	1.60
75×150	75	150	2.0		2556	7278	1.254	1.246	11.13	1.237	7.65
	150	75	0.5		2556	2385	1.116	1.246	9.91	1.235	6.71

$s_0$  :  $\rho=0$  の応力上昇率,  $\eta_0$  :  $\rho=0$  の塑性率,  $s_{0.2}$  :  $\rho=0.2$  の応力上昇率,  $\eta_{0.2}$  :  $\rho=0.2$  の塑性率

検討した。

長方形断面の塑性率 $\eta$ を比較すると、長辺の幅厚比が大きいほど塑性率が小さくなる傾向がみられ、正方形断面と断面積が等しい長方形断面（100×200）では、塑性率も同程度の値となった。また、断面積に関わらず弱軸曲げに比べ強軸曲げの方が塑性率は僅かに大きくなる傾向がみられた。

各断面のフランジの一般化幅厚比 $\beta$ と塑性率 $\eta$ の関係を図-3に示す。100×200の長方形断面を図-3 (a)、150×300の長方形断面を図-3 (b)、75×150の長方形断面を図-3 (c)に示し、すべてに基準の正方形断面も示している。なお、実線は軸力比 $\rho=0$ 、点線は軸力比 $\rho=0.2$ の場合を表しており、正方形断面を黒色、長方形断面の強軸曲げを赤色、弱軸曲げを青色とした。

断面のせいと幅の比 $a$ が等しい場合、変形能力評価式による曲線は、幅やせいが異なる断面においてもあまり差がみられなかった。これは、

断面二次モーメントと等価断面二次モーメントの比 ( $I/I_e$ ) がほぼ等しいためである。

同一幅厚比で比較すると、150×300の強軸曲げ ( $a=2.0$ )、正方形断面 ( $a=1.0$ ) および75×150の弱軸曲げ ( $a=0.5$ ) はフランジの幅厚比が等しくなるが、塑性率は150×300、正方形、75×150の順に大きくなった。これは、ウェブの拘束による差であると考えられる。最も塑性率の大きい75×150の弱軸曲げでは、幅厚比の小さい短辺がウェブとなり、長辺のフランジの変形を拘束する。一方、最も塑性率の小さい150×300の強軸曲げでは、ウェブが幅厚比の大きい長辺となるため、ウェブによるフランジの拘束力は小さくなる。

図-4に軸力比 $\rho$ と塑性率 $\eta$ の関係を示す。100×200の長方形断面を図-4 (a)、150×300の長方形断面を図-4 (b)、75×150の長方形断面を図-4 (c)に示し、すべてに基準として正方形断面を示している。(9)式より求めたウェブ全体

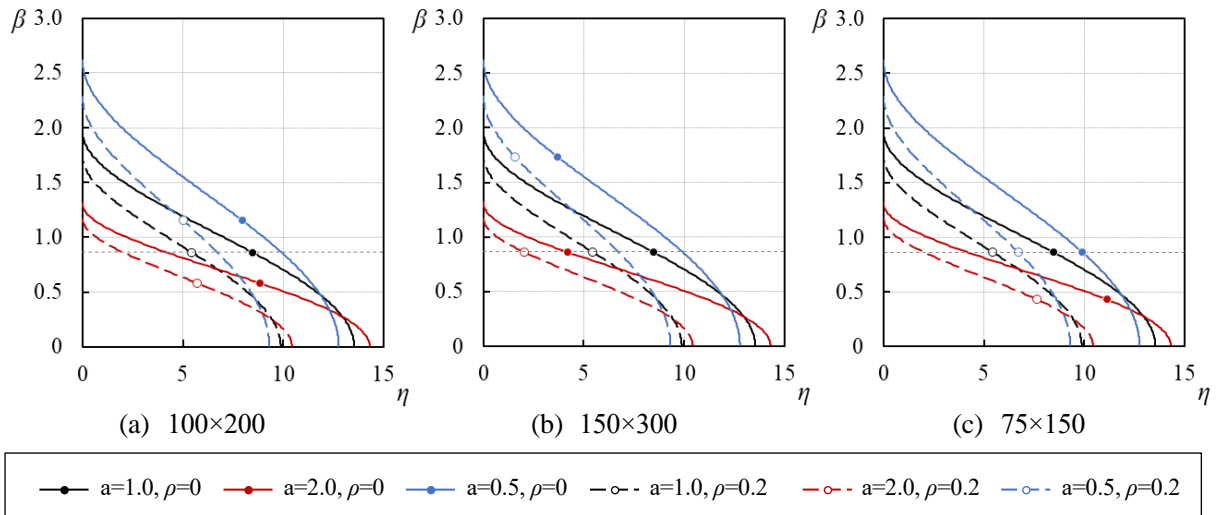


図-3 一般化幅厚比－塑性率関係

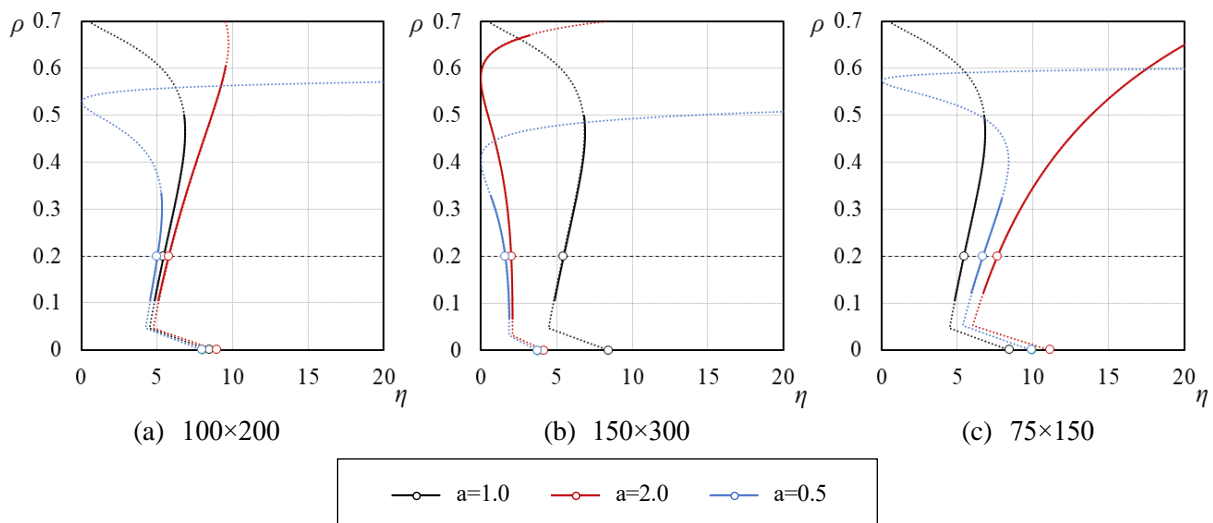


図-4 軸力比－塑性率関係

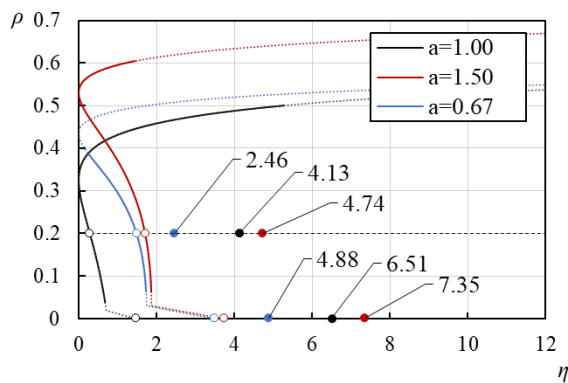
が圧縮となる範囲および、線形補間した $0 < \rho \leq (s-1)/2$ の範囲を点線、(1)式より求めた圧縮および引張状態となる範囲を実線で表した。

軸力比が小さい範囲では、いずれの長方形断面も曲げ方向の違いによる塑性率の差は小さくなった。一方、軸力比の大きい範囲では、曲げ方向や断面寸法により大きく差がみられた。

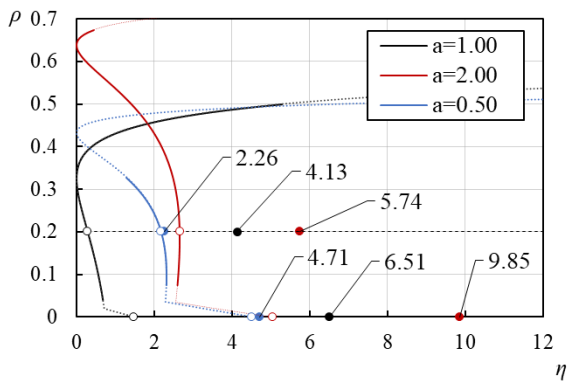
### 5. 実験結果<sup>2),3)</sup>との比較

図-5に軸力比 $\rho$ と塑性率 $\eta$ の関係を実験結果と併せて示す。変形能力評価式で得られた塑性率を $\eta_c$ とし、実験より得られた塑性率を $\eta_e$ とする。実験値 $\eta_e$ は、最大荷重到達後の耐力5%低下時の変形角 $R_{95}$ を全塑性モーメント時の変形角 $R_y$ で除した値( $R_{95}/R_y$ )を用いた。図-5(a)は□-150×150×4.5の正方形断面( $a=1.00$ )および□-100×150×4.5の長方形断面を強軸曲げ( $a=1.50$ )と弱軸曲げ( $a=0.67$ )の2方向で示し、図-5(b)は正方形断面および□-75×150×4.5の長方形断面を強軸曲げ( $a=2.00$ )と弱軸曲げ( $a=0.50$ )の2方向で示している。

評価式による塑性率 $\eta_c$ は、長方形断面の場合曲げ方向の違いによる塑性率の差が僅かとな



(a) 100×150



(b) 75×150

図-5 軸力比—塑性率関係

ったが、実験値 $\eta_e$ は、弱軸曲げが強軸曲げを大きく下回る結果となった。また、その差は断面形状が細長くなる方が顕著であり、正方形断面は強軸曲げと弱軸曲げの間の値となった。

今回の実験結果と評価式による塑性率の差をみると、長方形断面の強軸曲げおよび正方形断面では、実験値が評価式による値を大きく上回る結果となった。弱軸曲げにおいても実験値は計算値を上回ったものの、その差は僅かであり、曲げ方向の違いについてのより詳細な検討が必要であると考えられる。

### 6. まとめ

長方形断面を有する冷間成形角形鋼管柱の変形能力評価方法の検討および、仮定断面、曲げ実験の結果と評価式との比較より以下の知見を得た。

- 剛塑性理論に基づく正方形鋼管を対象とした変形能力評価式の長方形鋼管への適用方法を示した。
- 仮定断面による変形能力評価式の検討では、正方形断面とフランジの幅厚比が等しい長方形断面の塑性率は、ウェブの拘束による影響を受ける傾向がみられた。
- 仮定断面の検討において、軸力比が小さい範囲の長方形断面の塑性率は、曲げ方向が異なる場合においても塑性率の差は僅かとなる傾向がみられた。
- 変形能力評価式で算出した塑性率を長方形鋼管の曲げ実験の結果と比較すると、評価式による値はすべて安全側の評価となったが、曲げ方向の影響に関するさらなる検討の必要性が確認された。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会: 鋼管構造設計施工指針・同解説, pp.198-243, 1990.1
- 2) 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, 2019.7
- 3) 今井皓己, 藤本利昭, 三浦智美, 有馬栄梨: 長方形箱型断面材構造性能に関する研究 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1225-1228, 2020.7
- 4) 加藤勉: 閉断面部材の局部座屈と変形能力, 日本建築学会構造系論文報告集, No.378, pp.27-36, 1987.8
- 5) 三谷勲, 松井千秋, 津田恵吾: 角形鋼管柱の塑性変形能力評価式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1299-1300, 1984.9
- 6) 加藤勉, 西山功: 冷間成形角形鋼管の局部座屈強さおよび変形能力, 日本建築学会論文報告集, No.294, pp.45-52, 1980.8