初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける 角形鋼管柱の弾塑性挙動に与える影響

EFFECT OF INITIAL IMPERFECTION ON ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF SQUARE STEEL TUBULAR COLUMNS UNDER COMPRESSIVE AXIAL FORCE WITH MONOTONIC ANTISYMMETRIC BENDING MOMENT

佐藤 篤司*, 三井 和也**, 青山 雅弘***, 位田 健太***

*Atsushi SATO, Kazuya MITSUI, Masahiro AOYAMA
and Kenta INDEN*

The influences of initial imperfections on the performance of square steel tubular columns under axial force with one end bending moment were investigated by means of FEM in our previous study. In reality, columns of steel structures are subjected to axial load with bending moment close to antisymmetric. Therefore, it is necessary to clarify the performance and the elasto-plastic behavior under such load conditions. Firstly, the influence of initial imperfection on the performance is investigated in this study, individually. Secondly, the influence of combined initial imperfections on the performance and on the elasto-plastic behavior are investigated; comparison between the experimental results are also shown.

Keywords : Square steel tubular column, Initial deflection, Residual stress, Maximum bending moment, Plastic deformation capacity

角形鋼管柱, 元たわみ, 残留応力, 最大曲げモーメント, 塑性変形能力

1. はじめに

現在, 我が国の鋼構造建築物の柱部材には冷間成形角形鋼管が広く使用されている。冷間成形角形鋼管はその製造過程で冷間加工や溶接加工を受けるため, 部材内には残留応力が生じる。また, 部材の曲がりや平板部の凹凸といった幾何学的な初期不整が生じることは避けられない。そのため, 部材の曲がり, 平板部の凹凸および残留応力が部材性能に及ぼす影響を明らかにすることは, 鋼構造建築物の性能評価を行うにあたり, 重要な課題であると言える。

冷間成形角形鋼管部材の初期不整量の調査や初期不整が部材性能に与える影響についての研究はこれまでに実施され, その影響の一端は明らかになりつつある。木村らは軸圧縮力を受ける角形鋼管部材の短柱を対象に板要素の元たわみを実測し, 板要素の元たわみと角部曲率半径が局部座屈耐力に与える影響を解析によって検討している¹⁾。Chan らは矩形中空断面の元たわみの実測試験, 断面各部の素材引張試験を行い, これらが局部座屈耐力に及ぼす影響を実験および数値解析により検討している²⁾。川島らの研究では溶接または冷間成形により導入された軸方向の残留応力を測定し, 非弾性域での座屈耐力に残留応力が与える影響を調査している³⁾。Key らは断面各部の材料特性と残留応力を測定し, 軸圧縮力を受ける角形鋼管部材に残留応力が及

ぼす影響を実験と解析により検討している⁴⁾。加藤らは断面各部の材料特性と残留応力を測定し, 残留応力が軸方向圧縮力を受ける角形鋼管部材に及ぼす影響を解析によって検討している⁵⁾。伊藤らは角形鋼管の短柱を対象として, 軸圧縮力を受ける場合の大変形挙動に及ぼす残留応力の影響を数値解析により検討している⁶⁾。桑原らは角形鋼管部材を対象として, 残留応力の有無や残留応力分布形状, 元たわみが局部座屈挙動に与える影響を数値解析により考察している⁷⁾。佐藤・五十嵐は角形鋼管の断面各部の引張試験, 初期不整の測定, 残留応力分布の測定を実施し, 数値解析により2軸せん断力を受ける角形鋼管の大変形挙動に初期不整が与える影響の検討を行っている⁸⁾。また, 製造加工による断面形状の変化と残留応力分布形状の計測を行い, 断面内の応力分布や塑性ひずみを考慮した数値解析を実施している⁹⁾。

上述したように, 軸方向圧縮力または水平力が作用する角形鋼管部材の元たわみ・残留応力が部材性能に及ぼす影響は数多く実施されている。しかし, 鋼構造建築物に水平力が作用した場合, 柱部材には軸方向圧縮力と逆対称曲げモーメントに近い分布形状の曲げモーメントを同時に受けるため, このような組合せ応力下において元たわみ・残留応力といった初期不整が角形鋼管柱の部材性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。筆者らはこれまでに元たわみ・残留応力とい

* 名古屋工業大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)
** 元 名古屋工業大学大学院創成シミュレーション工学専攻
博士後期課程・修士(工学)
*** 名古屋工業大学大学院社会工学専攻
博士前期課程・学士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr.Eng.
The then doctoral Student, Dept. of Scientific and Engineering Simulation, Nagoya
Institute of Technology, Dr.Eng.
Grad. Student, Dept. of Architecture, Design, Civil Engineering and Industrial
Management Engineering, Nagoya Institute of Technology

Fig.1 Analysis model and boundary condition

た初期不整が軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に及ぼす影響を明らかにした¹⁰⁾。部材中央で最大変位となる弓なり状の元たわみを有する柱に逆対称曲げモーメントが作用する場合、幾何学的非線形を考慮しない解析から求まる曲げモーメントの反曲点と元たわみの最大変位位置が近接するため、一端曲げを受ける柱に比べ部材の元たわみによる付加曲げモーメントの影響が小さくなる。これに伴い、柱材端が曲げモーメントの最大値となりやすく、局部座屈に対し影響力の大きい部材板要素の凹凸がより大きな影響力を持つ可能性がある。したがって、逆対称曲げと一端曲げのような端的な応力条件下では、再度幾何学的な初期不整の影響を考慮する必要がある。また、既報の解析的研究¹⁰⁾では材長方向の残留応力の大きさの検討は行っているものの、材長方向に対し直交方向である管周方向の残留応力の影響については検討を行っていない。管周方向の残留応力の影響力を示すことは冷間成形材の製作技術発達にも有益な情報となり、検討すべき課題である。以上の背景を踏まえ、本報では軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の曲げモーメント - 回転角関係と曲げ構面内・構面外の変形量の実験結果を利用し、曲がりの大きさ¹¹⁾、平板部分の凹凸の大きさ¹¹⁾および部材内の残留応力の大きさが部材性能に及ぼす影響を数値解析により考察する。また、角形鋼管柱の数値解析の手法を示すことは今後の柱の研究において極めて重要である。そこで、本報で示す初期不整に基づく解析の方法で軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動に対して妥当に再現できることを確認する。

2. 有限要素法解析概要

幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の最大曲げモーメント、塑性変形能力および変形性状に与える影響を把握するための有限要素法大変形解析を実施する。数値解析には有限要素法汎用プログラム「MSC.

Table 1 List of analysis model¹²⁾

Name	No.	Section	L	n_y	M_{pc}	θ_{pc}
B125bt21ny020L2800	1	<div><div><div></div></div><div>-125×125 ×6</div><div>A=2763mm²</div></div>	2800	0.20	47.69	0.01668
B125bt21ny030L2800	2			0.30	44.20	0.01564
B125bt21ny040L2800	3			0.40	39.32	0.01408
B125bt21ny050L2800	4			0.50	33.10	0.01199
B125bt21ny020L3200	5		3200	0.20	47.69	0.01920
B125bt21ny030L3200	6			0.30	44.20	0.01807
B125bt21ny040L3200	7			0.40	39.32	0.01633
B125bt21ny030L3600	8		3600	0.30	44.20	0.02059
B125bt21ny040L3600	9			0.40	39.32	0.01869
B125bt21ny030L4200	10		4200	0.30	44.20	0.02456
B125bt21ny040L4200	11			0.40	39.32	0.02250

A: Area (mm²), L: Length (mm), n_y : Compressive axial force ratio ($=N_i/N_y$), N_i : Target axial force (kN), N_y : Yield axial force ($=A\cdot\sigma_y/1000$) (kN), M_{pc} : Full plastic bending moment considering the effect of compressive axial force (kN·m), θ_{pc} : Elastic rotation corresponding to M_{pc} (rad)

Fig.2 $\sigma - \epsilon$ curve¹²⁾

Table 2 Material properties¹²⁾

t_b	E	σ_y	σ_u	Y.R.	E_{long}
6.0	212.9	414.2	444.8	93.1	35.1

t_b : Nominal thickness (mm),
E: Young's modulus (kN/mm²),
 σ_y : Yield stress (N/mm²),
 σ_u : Ultimate stress (N/mm²),
Y.R.: Yield ratio (%),
 E_{long} : Elongation (%)

Marc 2011」を用い、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した弾塑性解析を行った。降伏条件には Von Mises、非線形反復計算には Full-newton-raphson 法を用いた。

2.1. 解析モデル概要

Fig.1(a)に有限要素法解析モデルを、Table 1に本解析で使用する角形鋼管柱の解析モデル一覧を示す。対象とする断面 (Fig.1(b) 参照) は筆者らが軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける柱の実験的研究¹²⁾で使用した角形鋼管部材の□ -125×125×6 (鋼種:STKR400)であり、導入する軸力比 n_y ($=N_i/N_y$, N_i : 目標とする軸方向圧縮力, N_y : 降伏軸力) と材長 L の組合せも筆者らの既報研究¹²⁾と同一とした。既報研究¹²⁾では柱材両端部に試験装置に設置するためのエンドプレートを溶接しているが、本解析では材端部にエンドプレートを作成せず、剛体要素 (Rigid link) により柱材端部の断面を拘束した。後述する 4 章で示すように、エンドプレートを再現していない数値解析結果であっても、実験結果の曲げモーメント - 回転角関係および変形性状を再現できることから、本論文で実施する解析モデルでは柱材両端部にエンドプレートを作成していない。角形鋼管の断面幅 B および板厚 t は公称値を使用した。軸方向力を考慮した全塑性モーメント M_{pc} (以後、全塑性モーメント M_{pc} と称す) は材料データに使用した素材引張試験より得た鋼材特性に基づき算定した。全塑性モーメント M_{pc} に対応する弾性回転角 θ_{pc} は座屈たわみ角法により算定した。

解析モデルは 4 節点シェル要素で構成されている。角形鋼管の要素分割については、平板部の周方向に対し 8 等分割、角部は 22.5° 毎に 4 等分割し、角部外側曲率半径は板厚の 2.0 倍とした。材長方向については、柱材両端部から断面幅 B の 2 倍までの範囲を 16 等分割し、柱材両端部から断面幅 B の 2 倍以上離れた範囲は 100mm 毎に分割を行った^{10), 13), 14)}。

本解析に使用した材料データは既報の実験的研究の素材引張試験

(a) Direction of initial global imperfection
Fig.3 Initial global imperfection and initial local imperfection

の結果を使用した¹²⁾。佐藤らは角形鋼管各部の材料特性が大変形挙動に与える影響を数値解析により検討している⁸⁾。その中で角形鋼管の角部、平板部、シーム溶接部毎に材料データを導入した解析モデルの塑性変形能力と全断面に平板部の材料データを導入した解析モデルの塑性変形能力を比較し、塑性変形能力は材料特性の影響をほとんど受けないことを報告している。そのため本研究において角形鋼管部材の素材引張試験片はシーム溶接部を除く3面の平板部から各1本ずつ採取し、平均値に最も近い材料データを解析モデルの全断面に適用する簡易な方法を用いた。Table 2に本解析で使用する材料データを、Fig.2に応力度-ひずみ度関係を示す。降伏応力度は0.2%オフセット耐力により求めた。なお、塑性域の材料データは素材引張試験結果を真応力-対数塑性ひずみに変換して入力し、ポアソン比は0.3とした。

Fig.1(a), (c)に解析モデルの境界条件を示す。解析モデルの下端では、断面の図心に配置された支持点(Node 1)と下端断面を剛体要素(Rigid link)を介し接合している。柱の上端では、断面の図心に配置された支持点(Node 2)と上端断面を剛体要素(Rigid link)を介し接合している。なお、Node 1とNode 2は両材端断面と同一平面上に配置されている。下端のNode 1はピン支承、上端のNode 2はローラー支承であり、柱材両端部の回転軸はx軸まわりの回転(曲げ構面内)のみを許容している。部材の両端は剛体要素により断面形状を保持し、柱材両端部の断面の変位・回転は支持点に從属させた。荷重方法は目標とする軸方向圧縮力 N_i (部材の降伏軸力 $N_y = A \cdot \sigma_y$ に軸力比 n_y を乗じた値)を解析モデル上端の支持点(ローラー支持点)に導入した後、軸方向圧縮力 N_i を一定に保った状態で、両端の支持点にx軸まわりの単調逆対称曲げモーメント M (材端モーメント比 $\kappa = 1.0$)を導入した。

2.2. 解析パラメータ

本論文では幾何学的な初期不整として、曲がり(以後、部材の元たわみと称す)の大きさ、平板部分の凹凸(以後、板要素の元たわみと称す)を解析パラメータとし、材料的な初期不整として材長方向・管周方向の残留応力の大きさを解析パラメータとする。

Table 3に「2008年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル¹¹⁾」に記載された角形鋼管部材の製造工程で生じる元たわみの寸法許容差を示す。本研究でを使用したSTKR400に対し文献11)では製造工程

Table 3 Permissible deviation ($t \leq 16 \text{ mm}$, $L < 9 \text{ m}$)

Item	Permissible deviation
Bend	$\leq L/1500$
Flatness of each flat plate	$\leq 1\%$ or $\leq \pm 3.0 \text{ mm}$

Table 4 List of analysis parameters of geometrical imperfection

Item	Permissible deviation	Amplitude
		(0 %, ± 1 %, ± 10 %, ± 50 %, ± 100 %, ± 150 %)
Crookedness	$\leq L/1500$	$D_G = L/1500 \cdot 0\%, \pm L/1500 \cdot 1\%, \pm L/1500 \cdot 10\%, \pm L/1500 \cdot 50\%, \pm L/1500 \cdot 100\%, \pm L/1500 \cdot 150\%$
Flatness of each flat plate	$\leq 1\%$ or $\leq \pm 3.0 \text{ mm}$	$D_L = B/100 \cdot 0\%, \pm B/100 \cdot 1\%, \pm B/100 \cdot 10\%, \pm B/100 \cdot 50\%, \pm B/100 \cdot 100\%, \pm B/100 \cdot 150\%$

D_G : Amplitude of initial global imperfection,

D_L : Amplitude of initial local imperfection

Table 5 List of analysis parameters of residual stress

Item	Magnitude	
	(0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %)	
Residual stress	$\gamma_L = \sigma_y \cdot 0\%, \sigma_y \cdot 20\%, \sigma_y \cdot 40\%, \sigma_y \cdot 60\%, \sigma_y \cdot 80\%, \sigma_y \cdot 100\%$	
	$\gamma_C = \sigma_y \cdot 0\%, \sigma_y \cdot 20\%, \sigma_y \cdot 40\%, \sigma_y \cdot 60\%, \sigma_y \cdot 80\%, \sigma_y \cdot 100\%$	

γ_L : Magnitude of residual stress in the longitudinal direction,

γ_C : Magnitude of residual stress in the circumferential direction

で生じる元たわみの寸法許容差を示していないが、BCR材、BCP材の寸法許容差を参考に幾何学的な初期不整のパラメータを決定した。

Table 4に幾何学的な初期不整である部材の元たわみと板要素の元たわみの数値解析パラメータを示す。部材の元たわみの大きさは、部材中央での最大元たわみ量 D_G が寸法許容差の最大値に対し0%, 1%, 10%, 50%, 100%, 150%となる6種類を設定した。また、部材の元たわみの方向性も角形鋼管柱の部材性能に影響を及ぼす可能性があるため、Fig.3(a)に示すように、荷重される曲げモーメントに対し並行する2方向(y軸正負方向)に、(1)式によって部材の元たわみを与えた(Table 4参照)。本論文では部材の元たわみを正弦半波により仮定する^{15), 16)}。なお、原点はFig. 1およびFig. 3に示すように、上端の図心位置である。

$$u_{y,G} = D_G \cdot L \cdot \sin \frac{\pi z}{L} \quad (1)$$

板要素の元たわみも部材の元たわみと同様に、最大元たわみ量 D_L が寸法許容差の最大値に対し0%, 1%, 10%, 50%, 100%, 150%となる6種類を設定した。板要素の元たわみ形状は既報研究¹²⁾で観察された局部座屈形状を参考に、周方向に対しては余弦半波により、材長方向に対しては正弦波により与え、2面が角部で直角を維持するような波形を三角関数により導入した^{13), 14)}。板要素の元たわみを与える関数を(2)式に、解析モデルに導入した板要素の元たわみ形状をFig.3(b)に示す。

$$u_{x,L} = \mp \frac{D_L \cdot B}{2} \cdot \left(\cos \frac{2\pi y}{B} + 1 \right) \cdot \sin \frac{\pi z}{B'} \quad (2.a)$$

$$u_{y,L} = \pm \frac{D_L \cdot B}{2} \cdot \left(\cos \frac{2\pi x}{B} + 1 \right) \cdot \sin \frac{\pi z}{B'} \quad (2.b)$$

(2.a)式は角形鋼管柱のウェブ面にあたるSide AとSide Cに対し、(2.b)式はフランジ面にあたるSide BとSide Dに対して適用した。ここで、既報研究¹²⁾で観察された局部座屈の波長がおおよそ断面幅 B と同じであることと逆対称曲げモーメントを受ける解析モデルであることを考慮し、(2)式中の B' の値は、断面幅 B に最も近い値となり、かつ、凹凸の形状、凹凸の向きが柱材両端部で同一となるように、材長方

Fig. 4 Residual stress distribution

向の凹凸が部材中央に対し、波形が対称となるように設定した。板要素の元たわみの方向性は形成される局部座屈の形状に影響を与えると考えられるため、部材の元たわみと同様に凹凸の順序 (D_L の値の正負) も解析パラメータとした (Table 4 参照)。現実的な板要素の初期不整は周期性を持たないが、板要素には部材全体にわたり凹凸が生じている^{7), 8), 9)}。三角関数により板要素の凹凸を導入することで、部材全体にわたり初期不整を簡易に導入することが可能であり、柱の解析の一手法を示すことにも繋がる。本報では簡易な三角関数により表現される幾何学的な初期不整の大きさをパラメータとし、軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管部材の部材性能に与える影響の検討を行う。

Table 5 に材料的な初期不整である材長方向・管周方向の残留応力の数値解析パラメータを、Fig.4(a) に材長方向・管周方向の残留応力の調査を行った既往研究^{5), 9), 17)}を参考にモデル化を行い、解析モデルに導入した残留応力の分布形状を示す。板厚方向の残留応力分布は材長方向・管周方向とも Fig.4(b) のような分布形状とした^{7), 10)}。材長方向・管周方向の残留応力の大きさは、部材に生じる最大残留応力が降伏応力度 σ_y の 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% となる 6 種類を設定した。

本論文では、3 章において、幾何学的・材料的な初期不整を単独で導入した数値解析を実施する。4 章において、幾何学的・材料的な初期不整を複合させ導入した数値解析を実施する。また、各章では既報の実験結果¹²⁾と比較し、単独または複合させた幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響を考察する。

3. 単独で導入した幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響

本解析において確認された軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の終局状態は、Fig.5(a) に示す曲げモーメント荷重点付近に局部座屈が生じる終局状態と Fig.5(b) に示す $P\delta$ 効果による付加曲げモーメントにより曲げ構面内の水平変形が生じる終局状態の 2 種類に大別できた。したがって、本章では局部座屈により終局状態が決定した B125bt21ny030L2800 (No.2) と $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定した B125bt21ny040L3600 (No.9) を例として挙げ、部材の元たわみ、板要素の元たわみまたは残留応力を単独で導入した解析モデルにおいて、幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響を考察する。

Fig. 5 Collapse mode of analysis model

Fig.6(a), Fig.7(a), Fig.8(a) および Fig.9(a) に各初期不整を単独で導入した解析モデルの曲げモーメント - 回転角関係を示す。縦軸は荷重点で計測された曲げモーメント M を全塑性モーメント M_{pc} で除した値であり、横軸は荷重点の材端回転角 θ を弾性回転角 θ_{pc} で除した値である。曲げモーメント - 回転角関係は上端の荷重点で得られた値を使用した。太実線は既報の実験結果¹²⁾を、細線は解析結果を示しており、凡例は各図に記載している。Fig.6(b), Fig.7(b), Fig.8(b) および Fig.9(b) は各初期不整の大きさを横軸として、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力を初期不整を導入していない解析モデル ($D_G = D_L = \gamma_L = \gamma_C = 0$) の解析結果により基準化した結果である。縦軸の ${}_0M_{max}$ および ${}_0R$ はそれぞれ幾何学的・材料的な初期不整を導入していない解析モデルの最大曲げモーメント、塑性変形能力を意味している。□印の凡例は最大曲げモーメント M_{max} の変化を、○印の凡例は塑性変形能力 R の変化を示している。なお、全塑性モーメント M_{pc} に到達していない解析モデルの塑性変形能力は示していない。塑性変形能力 R は荷重点の曲げモーメントが最大曲げモーメント M_{max} に至り、変形を伴い耐力劣化をはじめ、(3) 式に示す曲げモーメント M_u に到達した時の変形角を θ_u として、(4) 式により求めた^{10), 12)}。

$$M_u = \max(0.90M_{max}, M_{pc}) \quad (3)$$

$$R = \theta_u / \theta_{pc} - 1 \quad (4)$$

各図の左側は局部座屈により終局状態が決定した 125bt21ny030L2800 (No.2)、各図の右側は $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定した B125bt21ny040L3600 (No.9) の解析結果である。

3.1 幾何学的な初期不整が軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響

Fig.6 に部材の元たわみを導入した解析モデルの結果を示す。局部座屈により終局状態が決定された解析モデル (Fig.6(a.1), (b.1) 参照) において、部材の元たわみの大きさは最大曲げモーメントにほとんど影響を与えないことが確認できる。塑性変形能力は D_G の値が負方向に大きくなると僅かに増加し、 D_G の値が正方向に大きくなると僅かに低下する。部材の元たわみの最大変形位置は部材中央であるが、局部座屈が生じる位置は部材の端部であるため、元たわみの大きさは部材性能にほとんど影響を与えなかったと考えられる。 $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定した解析モデル (Fig.6(a.2), (b.2)

Fig. 6 Influence of initial global imperfection

参照)においては、最大曲げモーメントは D_G の値が負方向に大きくなると僅かに低下し、 D_G の値が正方向に大きくなると僅かに増加する。また、曲げモーメント-回転角関係は放物線のような形状となるため、塑性変形能力の値は最大曲げモーメントの増減に連動し、その変化量は最大曲げモーメントより大きくなる。元たわみの方向性により部材性能の増減が変化する要因は、変形状がFig.5(b)に示すような1方向へ偏った曲げ変形であり、部材の元たわみの大きさ(水平変形量)に応じて $P\delta$ 効果による付加曲げモーメントが変化するためである。曲げモーメント分布と部材の元たわみの関係上、下端の荷重点の曲げモーメント-回転角関係で得られる部材性能の増減は上端で得られた部材性能の増減と逆の挙動を示した(Fig.6(b))において、初期不整を導入していない解析モデルを中心とした点対称の関係)。なお、Fig.6に示していない解析モデルにおいても、同様に、終局状態毎の最大曲げモーメントおよび塑性変形能力の変化傾向が確認された。

Fig.7に板要素の元たわみを導入した解析モデルの結果を示す。板要素の元たわみの大きさが同一で、正負の方向性が異なる結果を比較すると、部材性能の優劣に多少の差が認められるものの、正負方向共に板要素の元たわみの増加に伴い部材性能が低下する傾向は一致する。 $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定された解析モデルであっても板要素の元たわみが大きくなると局部座屈による終局状態へと変化する。したがって、部材の元たわみを導入した解析モデルで確認されたような崩壊形式毎の部材性能の変化傾向は確認されなかった。また、板要素の元たわみの大きさの影響は非常に大きく、最大振幅($D_L = \pm B/100-150\%$)を与えたほとんどの解析モデルは全塑性モーメント M_{pc} を上回らなかった。なお、Fig.7に示していない解析モデルにおいても、同様の最大曲げモーメントおよび塑性変形能力の変化傾向が確認された。

既報の解析的研究¹⁰⁾では本報と同様な条件で設定した幾何学的な初期不整が軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼

Fig. 7 Influence of initial local imperfection

管柱の部材性能に与える影響についての考察を行った。1章で述べたように逆対称曲げを受ける場合、曲げモーメントの反曲点位置と元たわみの最大変位位置が近接し、一端曲げを受ける柱に比べ部材の元たわみによる付加曲げモーメントの影響が小さくなり、最大曲げモーメントが柱端部に近づくため端部での局部座屈が生じやすい。軸力比・細長比が異なるため同一パラメータでの比較は行えないが、既報の解析的研究¹⁰⁾と比較し、部材の元たわみの影響は小さくなる。板要素の元たわみの影響は既報の解析的研究¹⁰⁾と同様に軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に大きな影響を与え、逆対称曲げモーメントを受ける場合は一端曲げモーメント場合より大きな影響を与える。したがって、単独で導入した幾何学的な初期不整の影響は曲げモーメント分布によって変化するといえる。

3.2 材料的な初期不整が軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける

角形鋼管柱の部材性能に与える影響

Fig.8に材長方向の残留応力を導入した解析モデルの結果を示す。局部座屈により終局状態が決定された解析モデル(Fig.8(a.1), (b.1)参照)において、材長方向の残留応力の大きさの変化は最大曲げモーメントにほとんど影響を及ぼさない。塑性変形能力は材長方向の残留応力の増加に伴い僅かに増加するが、その影響は小さいと言える。 $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定された解析モデル(Fig.8(a.2), (b.2)参照)では、材長方向の残留応力の増加に伴い最大曲げモーメントは僅かに低下する。曲げモーメント-回転角関係は放物線のような形状となるため、塑性変形能力の値は最大曲げモーメントの増減に連動し、その変化量は最大曲げモーメントより大きくなる。また、崩壊形式に関わらず、初期剛性が低下することが確認できる。既報の解析的研究¹⁰⁾では本報と異なる残留応力分形で数値解析を行ったが、本報の解析結果の傾向と既報の解析的研究¹⁰⁾の傾向はほとんど同様であり、材長方向の分布形状の影響は小さいと言える。

Fig.9に管周方向の残留応力を導入した解析モデルの結果を示す。

Fig.8 Influence of the amplitude of residual stress in the longitudinal direction

Fig.9 Influence of the amplitude of residual stress in the circumferential direction

終局状態に関わらず、管周方向の残留応力の増大に伴い部材性能が低下する傾向がある。その低下率は塑性変形能力の方が最大曲げモーメントより大きく、局部座屈による終局状態の方が、 $P\delta$ 効果による曲げ変形による終局状態より大きい。なお、Fig.8およびFig.9に示していない解析モデルにおいても、同様の最大曲げモーメントおよび塑性変形能力の変化傾向が確認された。

3.3 実験結果との比較

Fig.10に既報の実験的研究¹²⁾で確認された無次元化最大曲げモーメント $_{exp}M_{max}/_{med}M_{pc}$ に対する本研究で得られた無次元化最大曲げモー

Fig.10 Ratios of average maximum bending moment and deformation capacity to experimental results and coefficient of variation

Table 6 Combination of global and local imperfection

$D_L \backslash D_G$	L/1500-0%	+L/1500-1%	+L/1500-10%	+L/1500-50%
-B/100-1%	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
B/100-0%	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
+B/100-1%	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
+B/100-10%	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16

Table 7 Combination of residual stress in longitudinal direction and residual stress in circumferential direction

$\gamma_L \backslash \gamma_C$	σ_y 20%	σ_y 40%	σ_y 60%
σ_y 0%	Type A	Type B	Type C
σ_y 20%	Type D	Type E	Type F
σ_y 40%	Type G	Type H	Type I

メント M_{max}/M_{pc} の平均比率およびその変動係数と、既報の実験的研究¹²⁾で確認された塑性変形能力 $_{exp}R$ に対する本研究で得られた塑性変形能力 R の平均比率およびその変動係数を示す。平均比率とその変動係数はTable 1に示す全解析モデルの結果より求めた。白抜きの凡例は最大曲げモーメントを、黒塗りの凡例は塑性変形能力を、実線は平均比率を、破線は変動係数を意味している。なお、全塑性モーメントに到達していない解析モデルは塑性変形能力を求める過程で除外している。 $_{exp}M_{max}$ は実験的研究¹²⁾で確認された最大曲げモーメントを、 $_{med}M_{pc}$ は実験における角形鋼管柱の実測寸法、降伏応力度および導入軸方向圧縮力に基づいた全塑性モーメントを、 $_{exp}R$ は実験的研究¹²⁾で確認された塑性変形能力を意味する。Fig.10(a)に示すように部材の元たわみは負方向から正方向への変化に伴い、最大曲げモーメントと塑性変形能力の比率が上昇する傾向がある。一方で、板要素の元たわみは最大振幅の増大に伴い最大曲げモーメントの平均比率は低下し、塑性変形能力は最大変形量が $\pm 10\%$ となると急激に低下することがわかる。Fig.10(b)に示すように、材長方向・管周方向ともに残留応力の上昇に伴い、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力が僅かに低下する。幾何学的な初期不整に比較し、残留応力の大きさの影響は小さい。

Fig.11 Influence of combined initial imperfection

4. 複合せ導出した幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響

本章では幾何学的・材料的な初期不整を複合せ導出した解析モデルに導入し、複合した幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響を考察する。Table 6 に幾何学的な初期不整の組合せを、Table 7 に材料的な初期不整の組合せを示す。幾何学的・材料的な初期不整は曲げモーメント-回転角関係の考察に加え、Fig.10 に示す最大曲げモーメントと塑性変形能力の平均比率が 1.0 に近く、変動係数の小さい値も選出した。解析モデルに導入した初期不整は Table 6 と Table 7 に示す組合せを掛け合わせた（幾何学的な初期不整 16 cases）×（材料的な初期不整 9 types）= 144 通りとした。

本章で確認された軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の終局状態は、前章と同様に Fig.5(a) に示す曲げモーメント荷重点付近に局部座屈が生じる終局状態と Fig.5(b) に示す $P\delta$ 効果による付加曲げモーメントにより曲げ構面内の水平変形が生じる終局状態の 2 種類に大別できた。本章では局部座屈により終局状態が決定した B125bt21ny030L2800 (No.2)、B125bt21ny030L3200 (No.6) と $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定した B125bt21ny040L3600 (No.9)、B125bt21ny030L4200 (No.10) を例として挙げ、幾何学的・材料的な初期不整の組合せが軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメント

トを受ける角形鋼管柱の部材性能に与える影響を考察する。

Fig.11(a) に各初期不整を複合せ導出した解析モデルの曲げモーメント-回転角関係を示す。縦軸は上端の荷重点で計測された曲げモーメント M を全塑性モーメント M_{pc} で除した値であり、横軸は上端の荷重点の材端回転角 θ を弾性回転角 θ_{pc} で除した値である。太実線は既報の実験結果¹²⁾を、細線は解析結果を示しており、凡例は各図に記載している。ここでは Case 1~Case 4, Case 13~Case 16 で Type I とした解析結果を例とする。Fig.11(b) は幾何学的な初期不整の組合せを横軸として、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力を初期不整を導入していない解析モデル ($D_G=D_L=\gamma_L=\gamma_C=0$) の解析結果により基準化した結果である。ここでは Type I の解析結果を例とする。Fig.11(c) は材料的な初期不整の組合せを横軸として、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力を初期不整を導入していない解析モデルの解析結果により基準化した結果である。ここでは Case 4 の解析結果を例とする。Fig.11(b), (c) に示す□印の凡例は最大曲げモーメント M_{max} の変化を、○印の凡例は塑性変形能力 R の変化を示している。

Fig.11(a.1), (a.2), (b.1), (b.2) に示す局部座屈により終局状態が決定した解析モデルにおいて、最大曲げモーメントは幾何学的な初期不整の影響をほとんど受けないと言える。塑性変形能力は部材の元たわみの最大振幅が寸法許容差の +10% に至るまでは (Case 1 → Case 3, Case 5 → Case 7, Case 9 → Case 11, Case 13 → Case 15) 非常に小さく、

Fig. 12 Ratios of average maximum bending moment and deformation capacity to experimental results and coefficient of variation

最大振幅が寸法許容差の+10%以上となると塑性変形能力が低下する傾向がある。板要素の元たわみが塑性変形能力に与える影響も同様であり、最大振幅が寸法許容差の-1%→0%→+1%と変化する過程で上昇し、+1%→+10%と変化する過程で減少傾向に転じている。また、Fig.11(c.1), (c.2)に示すように、塑性変形能力は管周方向の残留応力の増大 (Type A→Type B→Type C, Type D→Type E→Type F, Type G→Type H→Type I) に伴う低下傾向が、材長方向の残留応力の増大 (Type A→Type D→Type G, Type B→Type E→Type H, Type C→Type F→Type I) に伴う増加傾向が確認された。Fig.11(a.3), (a.4), (b.3), (b.4)に示す $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定した解析モデルにおいて、単独で部材の元たわみを導入した時と同様に部材の元たわみが正方向に増加 (Case 1→Case 4, Case 5→Case 8, Case 9→Case 12, Case 13→Case 16) すると、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力は増加する。板要素の元たわみの最大振幅を+10%とした解析結果では、終局状態が局部座屈に変化するケースも確認され、この時の塑性変形能力は著しく低下する。また、Fig.11(c.3), (c.4)に示すように材長方向・管周方向の残留応力の増加に伴い、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力は低下する。単独で初期不整を導入した解析結果と比較すると、初期不整が複合したことによる部材性能の変化傾向に与える影響は認められないが、板要素の元たわみは寸法許容差の+10%程度で大きな影響力を示すことから、単独で初期不整を導入した前章と同様に板要素の元たわみが最も大きな影響力を持つ。

Fig.12に既報の実験的研究¹²⁾で確認された無次元化最大曲げモーメント $exp M_{\max}/med M_{pc}$ に対する本研究で得られた無次元化最大曲げモーメント $M_{\max}/M_{pc}$ の平均比率およびその変動係数と、既報の実験的研究¹²⁾で確認された塑性変形能力 $exp R$ に対する本研究で得られた塑性変形能力 R の平均比率およびその変動係数を示す。平均比率とその変動係数はFig.10と同様に、Table 1に示す全解析モデルの結果より求めた。なお、全塑性モーメント M_{pc} に到達していない解析モデル

Fig. 13 Influence of combined initial imperfection on the deflection in the longitudinal direction (Case 4, Type I)

Fig. 14 Local buckling at the end of No. 2 (Case 4, Type I)

は塑性変形能力を求める過程で除外している。ここではFig.12(a)にType AとType Iの結果を、Fig.12(b)にCase 4とCase 8の結果を例として示す。Fig.12(a)より、幾何学的な初期不整の組合せが変化しても最大曲げモーメントはほとんど変化しない。部材の元たわみが0%~+10%の範囲の塑性変形能力は板要素の元たわみにより塑性変形能力が決定されほぼ一定となる。部材の元たわみが+50%となるとそれまでの傾向に比較しType Aでは上昇し、Type Iでは減少する。Fig.12(b)より、材長方向・管周方向ともに残留応力の上昇に伴い、最大曲げモーメントは僅かに低下し、塑性変形能力も低下する傾向がある。また、材長方向の残留応力 γ_L が小さい時ほど、管周方向の残留応力の影響が大きくなる。

Fig.12(a)に示すように、Case 13~Case 15では既報研究¹²⁾で確認された部材性能と本解析で確認された部材性能の対応が非常によいことが確認できる ($(M_{\max}/M_{pc})/(exp M_{\max}/med M_{pc}) = 0.984\sim0.985$, $R/exp R = 0.976\sim0.984$)。一方で、Fig.11(a.3), (a.4)に示すように終局状態は $P\delta$ 効果による曲げ変形から局部座屈による終局状態へと変化するため、実験結果を適切に再現できていない。Case 4でType Iとした場合、 $(M_{\max}/M_{pc})/(exp M_{\max}/med M_{pc})$ と $R/exp R$ の値はそれぞれ0.991と1.029となり、塑性変形能力の過大評価も3%程度と実験結果と良い対応を示す。Fig.13にCase 4でType Iとした解析モデルと既報研究¹²⁾で確認された最大曲げモーメント到達時の曲げ構面内の図心位置水平変形量を、

Fig. 15 Ratios of average maximum bending moment and deformation capacity to experimental results and coefficient of variation

Fig. 14 に既報研究¹²⁾で報告した B125bt21ny030L2800 (No.2) の実験終了時 (材端回転角 0.30(rad)) の局部座屈変形状態と Case 4 で Type I とした解析モデルで確認された局部座屈変形を比較した結果を示す。Fig.13 中の細実線は解析結果であり、太実線は実験結果である。破線は計測時に変位計が試験体または治具に接触したことが要因で適切に計測できなかった領域である。結果より、既報研究¹²⁾で確認された変形状態と良い対応を示し、材端部に生じる局部座屈変形も適切に再現できている。

既報の解析的研究¹⁰⁾で扱った軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に対しても本章で実施した同様の考察を行った。その結果を Fig.15 に示す。なお、既報の解析的研究¹⁰⁾で確認された実験結果と解析結果の比率は $(M_{\max}/M_{pc})/(exp M_{\max}/mea M_{pc}) = 0.930$ と $R/exp R = 0.814$ であった。本解析において、実験で確認された部材性能を最も精度よく再現する初期不整の組合せは Case 4 で Type A とした解析モデルで $(M_{\max}/M_{pc})/(exp M_{\max}/mea M_{pc}) = 0.922$ と $R/exp R = 0.826$ となり、既報の解析的研究¹⁰⁾と同程度の精度で実験結果を再現することが可能である。また、Case 4 で Type I とした解析モデルでも $(M_{\max}/M_{pc})/(exp M_{\max}/mea M_{pc}) = 0.908$ と $R/exp R = 0.791$ となり、管周方向の残留応力を考慮したため最大曲げモーメントの比率は僅かに低下するが、既報の解析的研究¹⁰⁾と同程度の精度で実験結果を再現することができる。

以上に示したように、軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に対し、幾何学的な初期不整の組合せを Case 4 とし、材料的な初期不整の組合せを Type I とした場合、一端曲げ ($\kappa = 0.0$) と逆対称曲げ ($\kappa = 1.0$) の実験結果^{12), 18)}を適切に再現できることを確認した。したがって、 $\kappa = 0.0 \sim 1.0$ の範囲であれば、本報で示した初期不整の組合せにより、軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の部材性能および変形状態を妥当に再現できると考えられる。なお、 $\kappa = 0.5$ のような曲げモーメント分布は今後、実験により確認を行う。

5. まとめ

本論文では幾何学的・材料的な初期不整が軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の最大曲げモーメント、塑性変形能力および変形状態に与える影響を把握するための有限要素法大変形解析を実施した。まず、幾何学的・材料的な初期不整を単独で導入した解析において得られた知見を述べる。

- 1) 局部座屈により終局状態が決定される場合、部材の元たわみの大きさが最大曲げモーメントおよび塑性変形能力に及ぼす影響は小さい。 $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定される場合、部材の元たわみの方向により、最大曲げモーメントおよび塑性変形能力の増減が変化する。以上の知見は既報の解析的研究¹⁰⁾においても観察されたが、一端曲げを受ける柱¹⁰⁾に比較し、部材の元たわみの影響は小さい。
- 2) 板要素の元たわみはその方向性または崩壊形式に関わらず、板要素の元たわみの増加に伴い部材性能が著しく低下し、板要素の最大振幅が寸法許容差の最大値の $\pm 10\%$ を超えるとより顕著に低下する。以上の知見は既報の解析的研究¹⁰⁾においても観察されたが、一端曲げを受ける柱¹⁰⁾に比較し、板要素の凹凸の大きさがより影響を持つことが確認された。
- 3) 局部座屈により終局状態が決定される場合、材長方向の残留応力の大きさは部材性能にほとんど影響を及ぼさない。 $P\delta$ 効果による曲げ変形により終局状態が決定される場合、材長方向の残留応力の増加に伴い塑性変形能力は低下する。また、崩壊形式に関わらず、初期剛性が低下する。以上の知見は既報の解析的研究¹⁰⁾においても観察され、大きさの変化に伴う影響の程度も同程度である。
- 4) 終局状態に関わらず、管周方向の残留応力の増大に伴い部材性能が低下する傾向がある。その低下率は塑性変形能力の方が最大曲げモーメントより大きく、局部座屈による終局状態の方が、 $P\delta$ 効果による曲げ変形による終局状態より大きい。

次に、幾何学的・材料的な初期不整を複合させ導入した解析において得られた知見を述べる。

- 5) 複合した初期不整を導入した場合と単独で初期不整を導入した場合を比較すると、初期不整が複合したことによる部材性能の変化傾向に与える影響は認められないが、単独で初期不整を導入した場合と同様に板要素の元たわみが最も大きな影響力を持つ。
- 6) 最大元たわみ量 D_L を $+L/1500 \sim 50\%$ とした部材の元たわみを (1) 式により与え、最大元たわみ量 D_G を $-B/100 \sim 1\%$ とした板要素の元たわみを (2) 式により与え、Fig.4 に示す分布形状を有する材長方向・管周方向の残留応力の大きさを $\gamma_L = \sigma_y 40\%$ 、 $\gamma_C = \sigma_y 60\%$ とした解析モデルにより、軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱 (材端モーメント比 $\kappa = 0.0, 1.0$) の最大曲げモーメント、塑性変形能力および変形状態を適切に再現することができる。

謝辞

本研究は日本鉄鋼連盟・鋼構造研究支援助成金 (代表者: 三井和也) を受けて行った。また、本研究で実施した数値解析において、大阪大学准教授・桑原進氏、市坪佑梨君 (当時大阪大学博士前期課程 2 年) にご助言を頂いた。ここに深く感謝します。

参考文献

- 1) Kimura, M. and Kaneko, H.: LOCAL BUCKLING BEHAVIOR AND

- EVALUATION ON WIDTH-TO-THICKNESS RATIO OF SQUARE STEEL TUBES, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 372, pp. 65-71, 1987. 2 (in Japanese)
- 木村 衛, 金子 洋文: 角形鋼管の局部座屈性状と幅厚比評価について, 日本建築学会構造系報告集, 第 372 号, pp. 65-71, 1987. 2
- 2) Jia-Lin Ma, Tak-Ming Chan, Ben Young M.ASCE: Experimental Investigation on Stub-Column Behavior of Cold-Formed High-Strength Steel Tubular Sections, Journal of Structural Engineering, Volume 142, Issue 5, 2016. 5
- 3) Kawashima, Y. and Nishimura, M.: Study on Buckling Strength of SHS Columns, Effect of Welding and Cold Forming, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures, pp. 1007-1008, 1973. 10 (In Japanese)
- 川島 義克, 西村 誠: 角鋼管柱の座屈耐力に関する研究 (溶接および冷間成形の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp. 1007-1008, 1973. 10
- 4) Peter W. Key, Syed Waqar Hasan, Gregory J. Hancock: Column Behavior of Cold-Formed Hollow Sections, Journal of Structural Engineering, Volume 114, Issue 2, 1988. 2
- 5) Kato, B., Aoki, H. and Kurosawa, T.: PLASTIC STRAIN HISTORY AND RESIDUAL STRESSES LOCKED IN COLD-FORMED SQUARE STEEL TUBES, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 385, pp. 39-48, 1988. 3 (In Japanese)
- 加藤 勉, 青木 博文, 黒澤 隆志: 冷間成形角形鋼管の塑性ひずみ履歴と残留応力, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 385 号, pp. 39-48, 1988. 3
- 6) Ito, A., Shimizu, N., Hanya, K., Kanno, R. and Terada, S.: Effect of residual stress distribution on buckling behavior of SHS column, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp. 1213-1214, 2013. 8 (In Japanese)
- 伊藤 綾那, 清水 信孝, 半谷 公司, 菅野 良一, 寺田 慎平: 残留応力分布形状が角形鋼管の座屈挙動に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp. 1213-1214, 2013. 8
- 7) Ichitsubo, Y. and Kuwahara, S.: The effect of residual stress of cold-formed rectangular hollow section columns for the local buckling strength: FEM analysis for stub column tests, Proceedings of annual research meeting Chugoku Chapter, Architectural Institute of Japan (AIJ), No. 54, pp. 473-476, 2014. 5 (In Japanese)
- 市坪 佑梨, 桑原 進: 冷間成形角形鋼管の残留応力が局部座屈耐力に及ぼす影響 短柱圧縮材の FEM 解析による検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 54 号, pp. 473-476, 2014. 5
- 8) Sato, K. and Ikarashi, K.: EFFECT OF INITIAL IMPERFECTION ON LARGE DEFORMATION BEHAVIOR OF COLD-FORMED SQUARE STEEL TUBE MEMBER, Journal of Structural Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 60B, pp. 327-334, 2014. 3 (In Japanese)
- 佐藤 公亮, 五十嵐 規矩夫: 初期不整が冷間成形角形鋼管部材の大変形挙動に与える影響, 構造工学論文集, Vol. 60B, pp. 327-334, 2014. 3
- 9) Sato, K. and Ikarashi, K.: EFFECT OF INITIAL IMPERFECTION ON LOCAL BUCKLING BEHAVIOR OF SQUARE HOLLOW SECTION MEMBER, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 723, pp. 893-903, 2016. 5 (In Japanese)
- 佐藤 公亮, 五十嵐 規矩夫: 正方形中空断面部材の局部座屈性状に及ぼす初期不整の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 723 号, pp. 893-903, 2016. 5
- 10) Sato, A. and Mitsui, K.: EFFECT OF INITIAL IMPERFECTION ON ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF SQUARE STEEL TUBULAR COLUMNS UNDER COMPRESSIVE AXIAL FORCE WITH ONE END MONOTONIC BENDING MOMENT, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 736, 2017. 6 (In Japanese)
- 佐藤 篤司, 三井 和也, 青山 雅弘: 初期不整が軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 736 号, 2017. 6
- 11) Editorial Committee of the 2008 Design and Execution Manual on Cold Forming Square Steel Tube, The 2008 Design and Execution Manual on Cold Forming Square Steel Tube, 2008. 12 (In Japanese)
- 2008 年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル編集委員会: 2008 年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル, 2008. 12
- 12) Sato, A. and Mitsui, K.: EXPERIMENTAL STUDY ON SQUARE STEEL TUBULAR COLUMNS UNDER COMPRESSIVE AXIAL FORCE WITH MONOTONIC ANTISYMMETRIC BENDING MOMENT, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 732, pp. 267-277, 2017. 2 (In Japanese)
- 佐藤 篤司, 三井 和也: 軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 732 号, pp. 267-277, 2017. 2
- 13) Idota, H. and Yamazaki, K.: MEAN VALUE AND COEFFICIENT OF VARIATION OF STRENGTH FOR H-SHAPED STEEL BEAMS, Journal of Structural Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 701, pp. 1025-1035, 2014. 7 (In Japanese)
- 井戸田 秀樹, 山崎 和浩: H 形鋼梁部材の平均耐力式と変動係数, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 701 号, pp. 1025-1035, 2014. 7
- 14) Idota, H., Matsuno, T. and Ono, T.: A HYSTERETIC MODEL OF LATERALLY UNSUPPORTED H-SHAPED STEEL BEAMS UNDER CYCLIC LOADING AT ONE END, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 76, No. 669, pp. 1981-1988, 2011. 11 (In Japanese)
- 井戸田 秀樹, 松野 巧, 小野 徹郎: 横座屈で耐力が決まる一端曲げ H 形鋼梁の繰返し履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 669 号, pp. 1981-1988, 2011. 11
- 15) Mukudai, Y., Takamatsu, T. and Kanmaki, H.: Plastic Deformation of H-shaped Beam-column under compressive axial force with bending moment, Part 1 When Boundary Condition of Each Side Are Different, Proceedings of annual research meeting Chugoku Chapter, Architectural Institute of Japan (AIJ), pp. 53-56, 1979. 3 (In Japanese)
- 椋代 仁郎, 高松 隆夫, 上牧 久二: 圧縮と曲げを受ける H 形鋼柱の塑性変形性状 その 1. 端部支持条件の異なる場合, 日本建築学会中国史部研究報告集, pp. 53-56, 1979. 3
- 16) Tetsuro, O.: Plastic Deformation Capacity of H-shaped Beam-column under compressive axial force with bending moment, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures, pp. 1165-1166, 1980. 8 (In Japanese)
- 小野 徹郎: 圧縮と曲げを受ける鉄骨 H 形断面柱の塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp. 1165-1166, 1980. 8
- 17) Igarashi, S., Tsujioka, S. and Yajima, S.: An experimental Investigation of Axial Tensile and Compressive Behavior of Cold-Formed Rectangular Hollow Structural Sections, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures, pp. 1361-1362, 1983. 9 (In Japanese)
- 五十嵐 定義, 辻岡 静雄, 矢島 悟: 冷間成形角形鋼管の軸引張・軸圧縮挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp. 1361-1362, 1983. 9
- 18) Yamada, F., Mitsui, K. and Sato, A.: Study on Square Steel Tubular Columns under Compressive Axial Force with Bending Moment Part 1 Monotonic Bending Test at One End, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures - III, pp. 1011-1012, 2016. 8 (In Japanese)
- 山田 風人, 三井 和也, 佐藤 篤司: 圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究 その 1: 一端単調曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 - III, pp. 1011-1012, 2016. 8

EFFECT OF INITIAL IMPERFECTION ON ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF SQUARE STEEL TUBULAR COLUMNS UNDER COMPRESSIVE AXIAL FORCE WITH MONOTONIC ANTISYMMETRIC BENDING MOMENT

Atsushi SATO *, *Kazuya MITSUI* **, *Masahiro AOYAMA* ***
and *Kenta INDEN* ***

* Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr.Eng.

** The then doctoral Student, Dept. of Scientific and Engineering Simulation, Nagoya Institute of Technology, Dr.Eng.

*** Grad. Student, Dept. of Architecture, Design, Civil Engineering and Industrial Management Engineering, Nagoya Institute of Technology

It is well known that initial imperfections (e.g. bow-shaped imperfection of member, bow-shaped imperfection of plate and residual stress) have an influence on the performance of the columns. Most studies regarding this issue are investigated under single axial load or single shear force. In reality, the columns of steel structures are subjected to axial load and bending moment. Therefore, it is necessary to clarify the influence of the initial imperfections under combined loading. The influences of initial imperfections on the performance of square steel tubular columns under compressive axial force with one end monotonic bending moment were investigated by means of FEM in our previous study. As mentioned before, the columns of steel structures are subjected to axial load and bending moment, and the moment diagram is antisymmetric bending moment distribution or bending moment distribution close to antisymmetric. Therefore, it is not enough to clarify one end bending moment distribution. Also, in the previous study, the influence of the residual stress in the circumferential direction was not considered despite it exists in the member. In this study, the influences of initial imperfection on the performance of the square steel tubular column which is subjected to a compressive axial force with monotonic antisymmetric bending moment are investigated. The bow-shaped imperfection of the member (global imperfection) and continuous bow-shaped of the plate (local imperfection) are selected as geometrical initial imperfections and these imperfections are described by trigonometric function to reproduce easily. The residual stress in the longitudinal direction and the residual stress in the circumferential direction are selected as material initial imperfections. Firstly, the influence of initial imperfection on the performance and on the elastic-plastic behavior is investigated individually. Secondly, the influence of combined initial imperfections on the performance of the columns and on the elasto-plastic behavior is investigated; comparison between the experimental results are shown.

Firstly, followings were found from the analysis results where initial imperfection is introduced in the member individually.

- 1) When the ultimate state was determined by local buckling, the global initial imperfection had a small impact on the performance. When the ultimate state was determined by bending deformation in in-plane, the direction of global imperfection had an impact on the performance as well its amplitude.
- 2) The amplitude of the local imperfection had a great impact on the performance of the columns. The maximum bending moment and the deformation capacity significantly decreased when its maximum amplitude exceeded 10% of permissible deviation.
- 3) When the ultimate state was determined by bending deformation, the plastic deformation capacity decreased with the increase of the amplitude of the residual stress in the longitudinal direction; initial stiffness gradually decreased with the increase of its magnitude.
- 4) Regardless of the ultimate states, with the increase of the amplitude of the residual stress in the circumferential direction, the maximum bending moment and plastic deformation capacity decreased.

Secondly, followings were found from the analysis results, where combined initial imperfections are introduced in the member.

- 5) In comparison with analysis results which were introduced the initial imperfection individually, the influence of the combination of initial imperfections on the variation trend of the performance was not confirmed. The local imperfection had the most significant influence on the performance in the imperfections that are considered in this study.
- 6) Validation of the numerical simulation was also performed; initial imperfections that could simulate test results in reasonable accuracy was shown.

(2017 年 5 月 9 日原稿受理, 2017 年 7 月 26 日採用決定)