

ステンレス鋼製中空正方形断面柱の連成座屈挙動

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○中村 健人
長岡工業高等専門学校 正会員 宮寄 靖大

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来から土木構造物に用いられている炭素鋼に比べて優れた耐食性を示す。そのため、ステンレス鋼を厳しい腐食環境下にある構造物の部材に活用することで、構造物の高耐久化およびライフサイクルコストの低減が期待できる。このようなステンレス鋼製土木構造物の実現には、部材強度を明確にした上での設計法の確立が必要不可欠である。本研究では、ステンレス鋼製柱を対象として、柱断面を構成する板の局部座屈と柱の全体座屈が相互に発現する連成座屈挙動を数値計算により調べる。

2. 数値計算方法

2.1 対象材料

本研究で対象とするステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 とする。また、比較用として、構造用炭素鋼 SM400 を用いる。表 1 は、既往の実験^{1), 2)}により得られた、対象材料の機械的性質を示す。同表中の記号は、 E がヤング係数を、 σ_y が炭素鋼の降伏応力を、 $\sigma_{0.2}$ および $\sigma_{0.01}$ がステンレス鋼における 0.2% 耐力および 0.01% 耐力を、 ν がポアソン比をそれぞれ意味する。また、図 1 は、数値計算に用いる対象材料の応力塑性ひずみ関係を示す。同図より、SUS316 の応力ひずみ関係は、炭素鋼にみられる明確な降伏点を有さないラウンドハウス型を示すことがわかる。なお、数値計算では、ステンレス鋼の塑性開始点を 0.01% 耐力とする。

2.2 中空正方形断面柱形状

図 2 は、本研究で対象とする中空正方形断面柱の形状を示す。同図中の t が板厚、 b が断面幅、 L が柱の長さを意味する。本研究では、断面幅 b を 200mm とし、部材長 L および板厚 t を式(1)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ および式(2)の幅厚比パラメータ R を変化させ決定する。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_F L}{E r}} \quad (1)$$

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (2)$$

式 (1) および式 (2) 中の、 σ_F は設計基準強度(炭素鋼では σ_y , ステンレス鋼では $\sigma_{0.2}$), r は断面 2 次半径, k は座屈係数(=4)である。なお、 $\bar{\lambda}=0.2, 0.4$ とし R

表 1 対象材料の機械的性質

鋼種	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	ν
SUS316	198	302	175	0.306
SM400	214	288	—	0.271

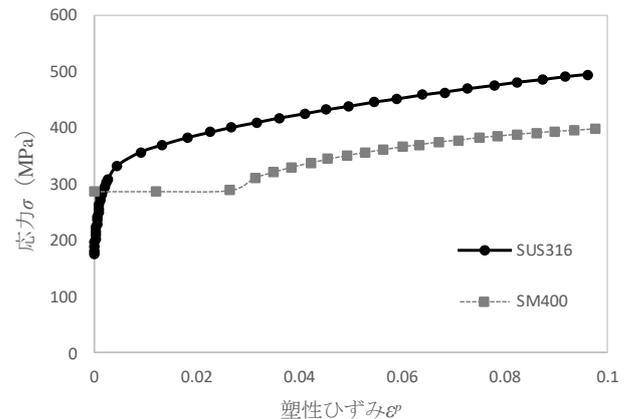


図 1 対象材料の応力塑性ひずみ関係

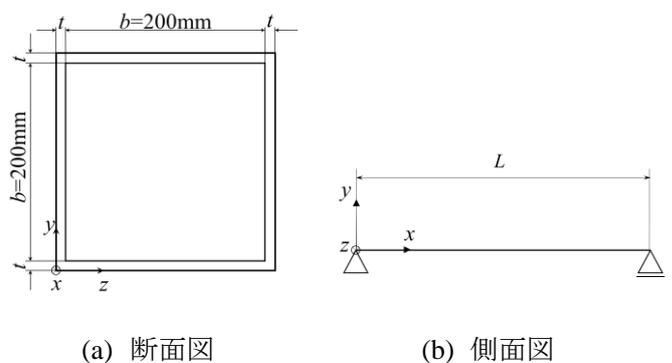


図 2 中空正方形断面柱の概形

は 0.2 から 1.2 まで 0.2 刻みで変化させる。

2.3 数値計算モデル

数値計算では、中空正方形断面柱が柱軸方向に一樣な圧縮荷重を受けることとして、 x 軸方向に強制変位 u を与える。なお、数値計算では中空正方形断面柱の初期不整として、初期たわみおよび残留応力を考慮する。まず、初期たわみは、柱全体の初期たわみと、柱を構成する板に生じる局部モードの初期たわみを考慮する。まず、初期たわみは、柱全体の初期たわみを図 3(a)に示す \sin 半波で与え、柱を構成する板に生じる初期たわみを図 3(b)に示す柱の断面幅 b に対して 1:1 となるよう柱の長さ L に合わせた \sin 波形で与える。なお、初期たわみの最大値は、柱全体の初期たわみおよび板の初期たわみにて、 $L/1000$ および $b/150$ とする。つぎに、残留応力は、図 4 に示す自己平衡を保つ矩形分布で与え、圧縮残留応力 σ_{rc} を $-0.3\sigma_F$ 、引張残留応力 σ_{rt} を σ_F とする。以上の数値計算は 8 節点シェル要素を用いて、正方形断面を構成する各板の引張残留応力部分を 2 分割、圧縮残留応力部分を 13 分割、長さ方向は各要素が正方形となるように部材長 L に応じて分割して、有限要素離散化を行う。以上の数値計算は、汎用非線形有限要素プログラム MARC³⁾を用いる。

3. 数値計算結果

図 5 および図 6 は、数値計算により得られた荷重と変位の関係を示す。ここで、縦軸は数値計算により得られた圧縮荷重 P をそれぞれの柱の 0.2%耐力時の荷重 $P_{0.2}$ または降伏荷重 P_y で無次元化した値を、横軸は圧縮変位をそれぞれの柱の 0.2%耐力時の変位 $U_{0.2}$ または降伏変位 U_y で無次元化した値を意味する。同図より、幅厚比パラメータの値が大きくなるに伴い、最大耐力の大きさが低下することがわかる。

図 7 は、終局強度と幅厚比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で得られた柱の終局圧縮荷重 P_u を $P_{0.2}$ および P_y で無次元化した値を意味する。同図中には、比較のため、道路橋示方書⁴⁾および Eurocode⁵⁾で規定される無補剛板の耐荷力曲線を示す。同図より、 $R=0.2$ の場合、 $\bar{\lambda}=0.4$ の SUS316 の終局強度は、道路橋示方書および Eurocode で規定される耐荷力曲線に比べて小さくなることを確認できる。また、 $R=0.4$ から 0.8 の SUS316 の終局強度は $\bar{\lambda}=0.2$ を除いて道路橋示方書のおよび Eurocode で規定される耐荷力曲線に比べて小さくなることを確認できる。材料の違いによる結果についてみると、 $\bar{\lambda}=0.2$ の

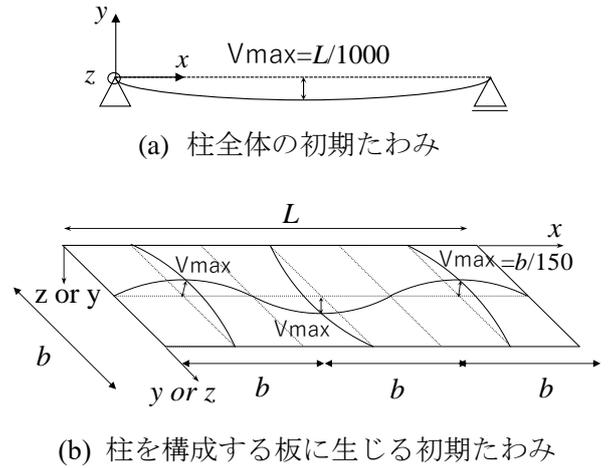


図 3 初期たわみ形状

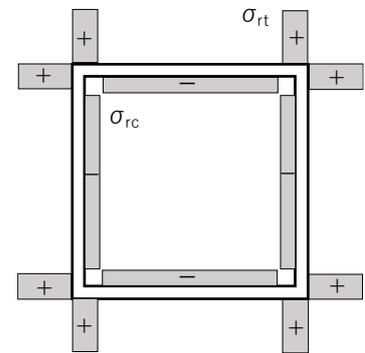
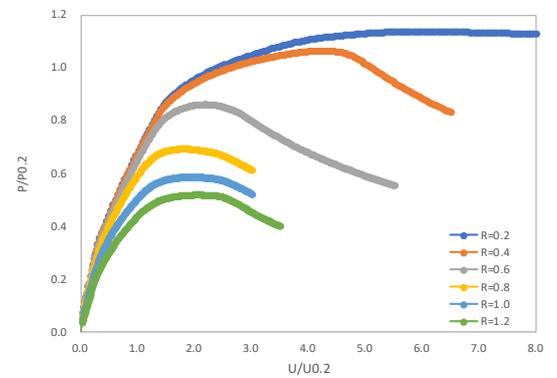
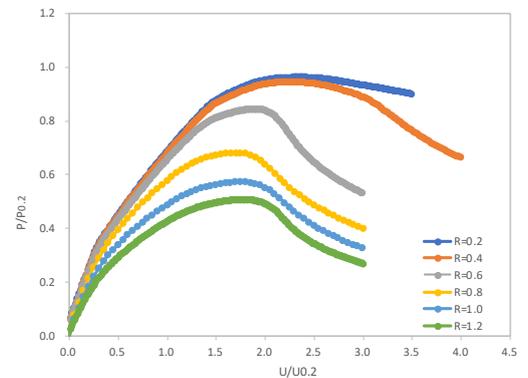


図 4 溶接残留応力分布



(a) $\bar{\lambda}=0.2$



(b) $\bar{\lambda}=0.4$

図 5 SUS316 の荷重変位関係

SUS316 の終局強度は、 $R=0.2$ から 0.4 の場合、SM400 の終局強度に比べて 1.1 倍程度となり、 $R=0.6$ から 1.2 にて SM400 と同様の傾向を示すことがわかる。この結果より塑性化の進展により応力上昇が期待できる SUS316 は、 R が小さい領域にて SM400 に比べて優れた耐荷力特性を示すことがわかる。

図 8 は、対象とした中空正方形断面柱の終局圧縮強度と細長比パラメータの関係を示す。同図(a)の SUS316 では、いずれの細長比パラメータにおいても、 $R=0.6$ 以上で道路橋示方書の耐荷力曲線を下回ることがわかる。また、同図(b)の SM400 では、 $\bar{\lambda}=0.2$, $R=0.2$ および $\bar{\lambda}=0.4$, $R=0.2$ から 0.4 の場合を除き、道路橋示方書の耐荷力曲線を下回ることがわかる。

表 2 は、柱の終局強度時にて、柱断面を構成する各板の y 軸方向のたわみを板厚で無次元化した値を示す。同表の $R=0.2$ の結果をみると、柱断面を構成する全ての板が同一方向かつほぼ同じ大きさで変位しており、全体座屈による終局となることがわかる。他方、 $R=0.4$ の場合は、左右のウェブが同一方向かつ同じ大きさで、上下のフランジが方向と大きさにばらつきが生じる変位となっており、柱の全体座屈と断面を構成する板の局部座屈が連成しているものと判断する。そして、 $R=0.6$ から 1.2 の場合は、上下のフランジの変位量が大きく異なり、局部座屈により終局に至るがわかる。

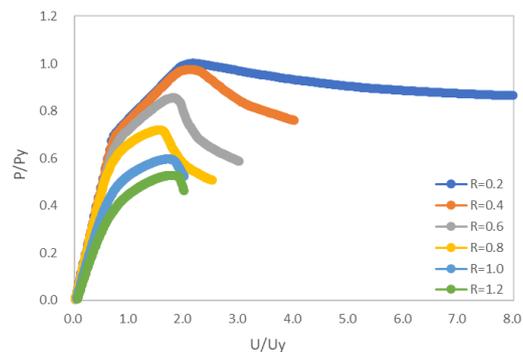
4. おわりに

本研究では、オーステナイトステンレス鋼 SUS316 および構造用炭素鋼 SM400 で構成される中空正方形断面柱の連成座屈挙動を数値計算により明らかにした。本研究で得られた内容は以下のとおりである。

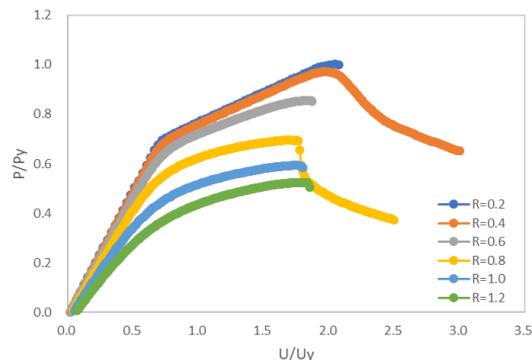
- (1) 終局強度と幅厚パラメータの関係は、 $\bar{\lambda}=0.2$ の SUS316 の $R=0.2$ から 0.4 の場合、SM400 の終局強度に比べて 1.1 倍程度となり、 R が小さい領域にて SM400 に比べて優れた耐荷力特性を示す。
- (2) 終局強度と幅厚パラメータの関係は、 $R=0.6$ から 1.2 にかけて SUS316, SM400 で同様の傾向を示す。
- (3) SUS316 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}=0.6$ から 1.2 の場合に道路橋示方書の耐荷力曲線を下回る。
- (4) 本研究で対象とした柱は、 $R=0.2$ の場合は全体座屈、 $R=0.4$ の場合は連成座屈、 $R=0.6$ から 1.2 の場合は局部座屈により終局に至る。

参考文献

- 1) 井崎茜, 宮寄靖大, 小野潔, 宮下剛: Cr-Ni 系ステンレス鋼の材料特性および材料モデルの定式化, 鋼構造年次論文報告集, 第 27 巻, pp.1-9, 2019.11.
- 2) 佐藤龍輝, 宮寄靖大, 志村保美: ステンレス鋼と炭素鋼を突合せ溶接した板部材の引張強度特性, 第 37 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-314, 2019.11.
- 3) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC Software Corporation, 2014.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編. 日本道路協会, 2017.



(a) $\bar{\lambda}=0.2$



(b) $\bar{\lambda}=0.4$

図 4 SM400 の荷重変位関係

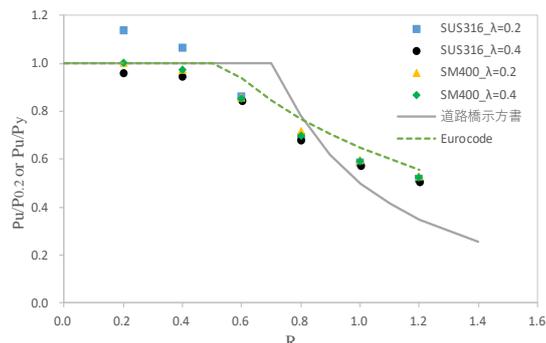
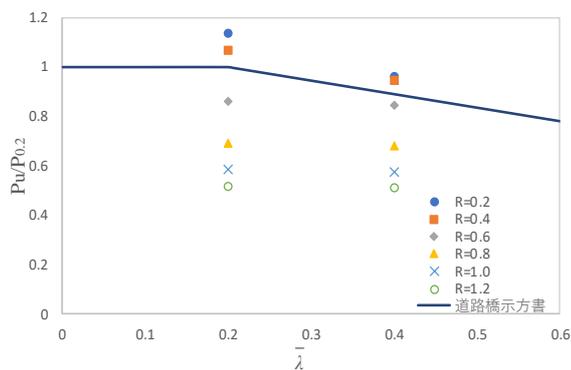
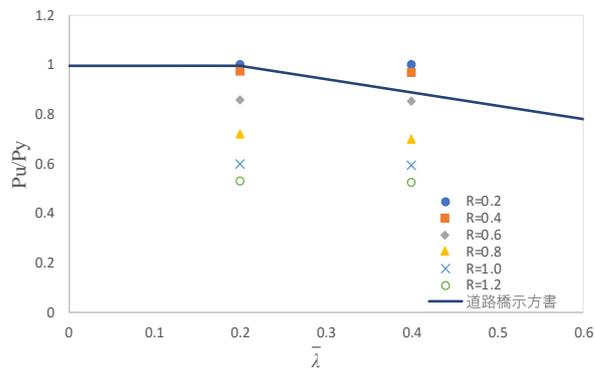


図 7 終局強度と幅厚比パラメータの関係

5) European Committee for Standardization and CEN. Eurocode 3: –Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels. EN 1993-1-4. CEN, 2006. European Standard.



(a) SUS316



(b) SM400

図 8 中空正方形断面柱の終局圧縮強度

表 2 終局時の y 軸方向のたわみ

(a) SUS316

$\bar{\lambda}$	R	Bottom Flange	Top Flange	Left Web	Right Web	
0.2	0.2	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	全体座屈
	0.4	0.1	-0.3	-0.1	-0.1	連成座屈
	0.6	0.4	-0.4	0.0	0.0	局部座屈
	0.8	0.7	-0.8	0.0	0.0	
	1.0	1.2	-1.3	0.0	0.0	
	1.2	1.6	-1.7	0.0	0.0	

(b) SM400

$\bar{\lambda}$	R	Bottom Flange	Top Flange	Left Web	Right Web	
0.2	0.2	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	全体座屈
	0.4	0.1	-0.1	-0.01	-0.01	連成座屈
	0.6	0.3	-0.3	0.00	0.00	局部座屈
	0.8	0.7	-0.7	-0.01	-0.01	
	1.0	1.2	-1.2	-0.02	-0.02	
	1.2	1.5	-1.6	-0.03	-0.03	

$\bar{\lambda}$	R	Bottom Flange	Top Flange	Left Web	Right Web	
0.4	0.2	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	全体座屈
	0.4	-1.0	-0.8	-0.9	-0.9	連成座屈
	0.6	-0.9	-0.1	-0.5	-0.5	局部座屈
	0.8	-1.2	0.0	-0.4	-0.4	
	1.0	-1.8	0.7	-0.6	-0.6	
	1.2	-2.4	1.0	-0.9	-0.9	

$\bar{\lambda}$	R	Bottom Flange	Top Flange	Left Web	Right Web	
0.4	0.2	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	全体座屈
	0.4	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	連成座屈
	0.6	-0.5	0.2	-0.1	-0.1	局部座屈
	0.8	-0.9	0.6	-0.2	-0.2	
	1.0	-1.4	0.8	-0.3	-0.3	
	1.2	-1.9	1.0	-0.5	-0.5	