

Cr-Ni 系ステンレス鋼製中空正方形断面柱の座屈挙動

Interaction buckling behaviors of square hollow section columns made of Cr-Ni type stainless steels

○中村 健人^{*1}

宮寄 靖大^{*2}

Kento NAKAMURA ^{*1}

Yasuhiro MIYAZAKI ^{*2}

ABSTRACT The stainless steels have high corrosion resistance than the structural carbon steels. This study clarified the buckling behavior of square hollow section columns made of SUS316 and SUS821L1 by using numerical analysis. The strength behaviors of these stainless columns were compared with the results of the carbon steel columns and with the load capacity evaluation values in the current Specifications for Highway Bridges. In this study, the interaction buckling strength of stainless steel columns is investigated in detail.

Keyword: オーステナイト系ステンレス鋼, 二相系ステンレス鋼, 連成座屈, 終局圧縮強度
austenitic stainless steel, duplex stainless steel, interaction buckling,
ultimate compressive strength

1. はじめに

高度経済成長期に建設された我が国の土木構造物の多くは、供用年数 50 年を経過しはじめ、これら構造物の維持管理に対するコスト低減や省力化が求められている。こうした中で、今後、架け替えまたは新設される鋼橋に対して、耐食性に優れたステンレス鋼の活用による構造物の高性能化が注目されている[1]。

ステンレス鋼は、従来から土木構造物に用いられている構造用炭素鋼に比べて高耐食性を有する。また、ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、一般的な構造用炭素鋼にみられる明確な降伏棚が現れず、ひずみの増大に伴い応力が上昇するラウンドハウス型を示す。ステンレス鋼製土木構造物の設計について、炭素鋼製土木構造物の設計基準類を準用するためには、多くのデータを検証する必要がある。ステンレス鋼製土木構造物の設計基準は Eurocode[2]がある。我が国では、ステンレス鋼製建築構造物の設計基準[3]および文献[4]がある。堀澤ら[5]は、部材両端をステンレス鋼、それ以外を炭素鋼とした箱形およびI形

断面を有する鋼製長柱を対象として、そのハイブリッド部材の全体座屈強度特性を明らかにしている。また、宮寄ら[6,7]は、ステンレス鋼板の圧縮挙動および圧縮強度特性を明らかにし、ステンレス鋼圧縮板の強度評価法を提案している。しかし、これらの研究は、ステンレス鋼製柱の全体座屈または板要素の局部座屈にのみ着目したものであり、柱の座屈と板の座屈が相互に発現する連成座屈に関する検討がされていない。

本研究では、Cr-Ni 系ステンレス鋼製中空正方形断面柱を対象に、柱の全体座屈、柱断面を構成する板の局部座屈およびそれらが相互に発現する連成座屈挙動について数値計算を用いて明らかにする。また、これらの結果は、炭素鋼製中空正方形断面柱の結果および現行の道路橋示方書[8]で規定される強度評価値との比較を行い、ステンレス鋼製土木構造物の実現に向けた新たな強度評価式の構築に向けた考察を行う。

2. 数値計算方法

2.1 対象材料

本研究で対象とする材料は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および二相系（リネン型）ステンレス鋼 SUS821L1 とする。また、これらステンレス鋼の比較用として、強度がほぼ等しい関係にある構造用炭素鋼 SM400 および SM570 を対象とする。表 1 は、材料試験[9,10]により得られた対象材料の機

^{*1} 準会員（学生）

長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

^{*2} 第 2 種正会員

博士(工学) 長岡工業高等専門学校 環境都市
工学科 准教授
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

機械的性質を示す。同表中の記号は、 E がヤング係数を、 σ_F が設計基準耐力（ステンレス鋼の場合 0.2%耐力、構造用炭素鋼の場合降伏応力）を、 $\sigma_{0.01}$ がステンレス鋼における 0.01%耐力を、 ν がポアソン比をそれぞれ意味する。図 1 は、数値計算に用いる応力塑性ひずみ関係を示す。この応力塑性ひずみ関係における塑性開始点は、ステンレス鋼の場合 0.01%耐力、炭素鋼の場合で降伏応力とする。ここで、ステンレス鋼の塑性開始点を 0.01%耐力とした理由は、ラウンドハウス型を示すステンレス鋼の応力ひずみ関係において、比例限界点を 0.01%耐力とするためである。図 1 より、ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、塑性開始後も連続的に応力が上昇することが確認できる。

2.2 中空正方形断面柱

図 2 は、本研究で対象とする中空正方形断面柱を示す。図中の記号は、 t および b が柱断面を構成する板の板厚および板の支持間隔、 L が柱長さをそれぞれ意味する。本研究では、 b を 200mm とし、板厚 t および柱長さ L を式(1)の幅厚比パラメータ R を 0.2 から 1.8 まで 0.2 刻みで変化させ、式(2)の細長比パラメータを 0.2 から 1.2 まで 0.2 刻みで変化させて決定する。

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

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E} \frac{L}{r}} \quad (2)$$

ここで、 r は断面 2 次半径、 k は板の座屈係数 (=4) を意味する。表 2 は、 R と $\bar{\lambda}$ の組合せの一例を示す。このように、1 鋼種あたり 54 ケース、計 216 ケースの柱を対象とする。また、本研究で対象とする中空正方形断面柱のモデル名は、鋼種、 $\bar{\lambda}$ 、 R の順に示し

表 1 対象材料の機械的性質[9,10]

鋼種	E (GPa)	σ_F (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	ν
SUS316	198	302	175	0.306
SUS821L1	199	526	354	0.228
SM400	214	288	—	0.271
SM570	210	638	—	0.302

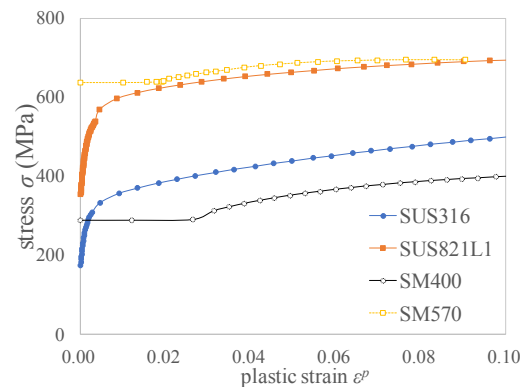


図 1 応力塑性ひずみ関係[9,10]

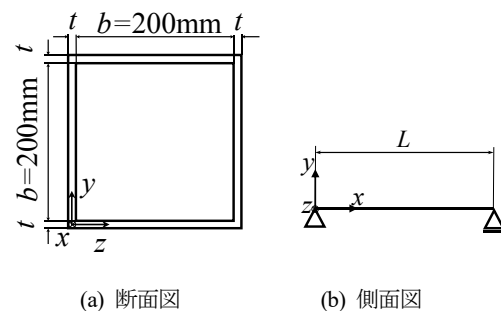


図 2 中空正方形断面柱

表 2 R と $\bar{\lambda}$ の組合せ

		$\bar{\lambda}$					
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
R	0.2	鋼種-0202	鋼種-0402	鋼種-0602	鋼種-0802	鋼種-1002	鋼種-1202
	0.4	鋼種-0204	鋼種-0404	鋼種-0604	鋼種-0804	鋼種-1004	鋼種-1204
	0.6	鋼種-0206	鋼種-0406	鋼種-0606	鋼種-0806	鋼種-1006	鋼種-1206
	0.8	鋼種-0208	鋼種-0408	鋼種-0608	鋼種-0808	鋼種-1008	鋼種-1208
	1.0	鋼種-0210	鋼種-0410	鋼種-0610	鋼種-0810	鋼種-1010	鋼種-1210
	1.2	鋼種-0212	鋼種-0412	鋼種-0612	鋼種-0812	鋼種-1012	鋼種-1212
	1.4	鋼種-0214	鋼種-0414	鋼種-0614	鋼種-0814	鋼種-1014	鋼種-1214
	1.6	鋼種-0216	鋼種-0416	鋼種-0616	鋼種-0816	鋼種-1016	鋼種-1216
	1.8	鋼種-0218	鋼種-0418	鋼種-0618	鋼種-0818	鋼種-1018	鋼種-1218

ており、例えば、鋼種が SUS316、 $\bar{\lambda}$ が 0.2、 R が 0.2 のモデル名は SUS316-0202 とする。

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して、その最大値を $L/1000$ とした \sin 半波形を図 3(a)に示す y 軸方向に与える。加えて、図 3(b)に示す柱断面を構成する板の初期たわみとして、その最大値を $b/150$ とした \sin 半波形が板の縦横比 1.0 で生じるようにして与える。なお、柱全体および柱断面を構成する初期たわみの最大値は、道路橋示方書で規定される設計許容値を採用した。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る。ここで、同図中の残留応力は、圧縮残留応力 σ_{rc} の大きさを $-0.3\sigma_F$ 、引張残留応力 σ_{rt} の大きさを σ_F とした。なお、ステンレス鋼の残留応力は、既往の研究で炭素鋼と同程度であることが確認されているため[11,12]、終局強度の下限值レベルを求める際に用いられる代表的な値[13]を採用した。

本研究で実施する数値計算は、以上の中空正方形断面柱を、8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて、圧縮残留応力部分を 2 分割、引張残留応力部分を 13 分割、柱長さ方向を柱長さ L に応じて各シェル要素の縦横比 1.0 を目標に分割し、有限要素離散化を行う。また、同モデルにおける幾何学的境界条件は両端単純支持とし、柱断面の重心位置に設けた仮想節点に図 2 で示した x 軸方向に強制変位 U を与える。なお、これらの数値計算は、汎用非線形有限要素解析プログラム MARC[14]を使用する。

3. 数値計算結果

3.1 荷重と変位の関係

図 5 は、数値計算により得られた中空正方形断面柱の荷重と変位の関係の一例を示す。ここで、同図の縦軸は数値計算により得られた圧縮荷重 P を柱の断面積に設計基準耐力を乗じて算出した基準耐力時の荷重 P_F で無次元化した値を、横軸は数値計算で与えた圧縮変位 U を式(3)で定義する設計基準耐力時の圧縮変位 U_F で無次元化した値を意味する。

$$U_F = \frac{\sigma_F L}{E} \quad (3)$$

なお、同図の一点鎖線は、表 1 に示した各ステンレス鋼の塑性開始点に相当する荷重を意味している。同図より、本研究で対象とした全ての柱の荷重と変位の関係は、 $\bar{\lambda}$ の増加とともに、最大荷重を向かえた後、急激な荷重低下の発生が確認できる。また、 R の増加に伴い、板厚の減少による初期剛性の低下が確

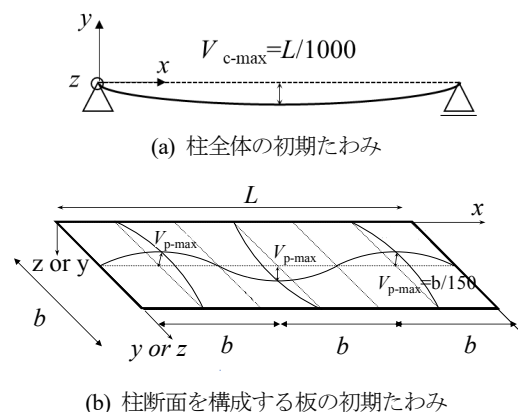


図 3 初期たわみ形状

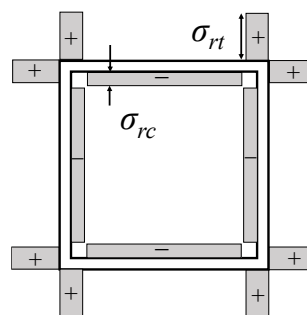


図 4 残留応力分布

認できる。つぎに、鋼種の違いによる荷重と変位の関係についてみると、 R が 0.2 のとき、SUS316 および SUS821L1 製中空正方形断面柱では、初期状態から最大荷重点まで緩やかに変化し、最大荷重後も荷重の低下が殆ど見られない。一方、 R が 0.2 の SM400 および SM570 製中空正方形断面柱の荷重と変位の関係は、初期勾配から 2 次勾配への変化および最大荷重点が明確に確認でき、最大荷重を迎えた後の荷重低下が大きくなることからわかる。このように、 R が小さい範囲では、柱断面を構成する板の板厚が大きくなり、塑性域での座屈が生じるため、ひずみ硬化に伴う応力上昇が大きいステンレス鋼が炭素鋼に比べて優れた塑性変形能を示すことがわかる。また、 R の増加に伴い、鋼種の違いによる結果の差異は殆どみられなくなることがわかる。

3.2 座屈挙動の判別

図 6 は、本研究で対象とした全ての鋼種の中空正方形断面柱の終局圧縮強度時における柱断面を構成する板について、図 2 で示した y 軸方向の変位より、座屈挙動を判別した結果を示す。座屈挙動の判別は、上下のフランジが明確に異なる面外方向に変形して

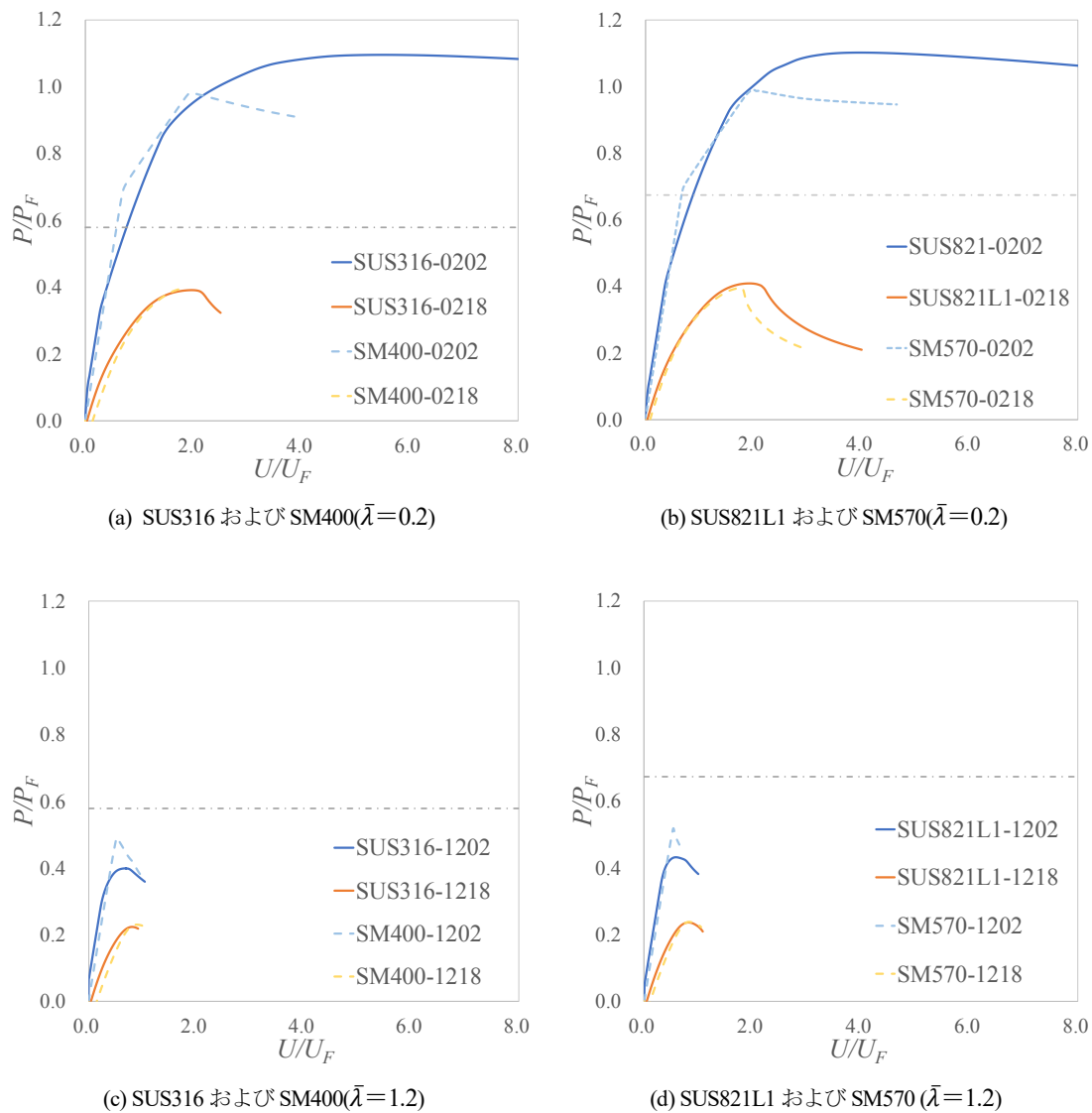


図5 荷重と変位の関係

いる場合は局部座屈，同一方向に同じ大きさで変形している場合は全体座屈，同一方向かつ上下のフランジの面外変形が異なる大きさで生じている場合は連成座屈が発現しているとした。図6より， R が0.2， R が0.4かつ $\bar{\lambda}$ が0.4以上， R が0.6かつ $\bar{\lambda}$ が0.6以上の場合に全体座屈が発現することがわかる。また， $\bar{\lambda}$ が0.2かつ R が0.6以上， $\bar{\lambda}$ が0.4以上かつ R が0.8以上の場合に局部座屈が発現することがわかる。そして，連成座屈は， R が0.4かつ $\bar{\lambda}$ が0.2， R が0.6かつ $\bar{\lambda}$ が0.4， R が0.8以上かつ $\bar{\lambda}$ が0.6以上の場合に発現することが確認できる。これらは，一部の $\bar{\lambda}$ と R が小さい領域にて連成座屈が発生する結果を除いて，

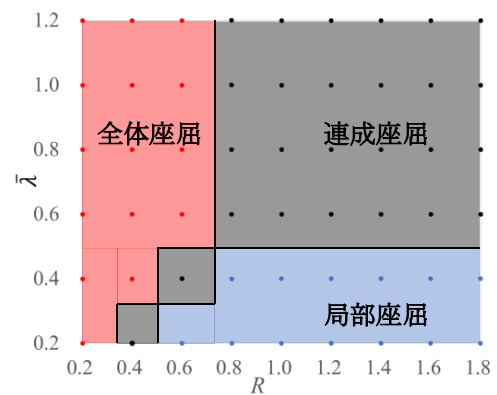


図6 対象とした全ての鋼種の中空正方形断面の座屈挙動

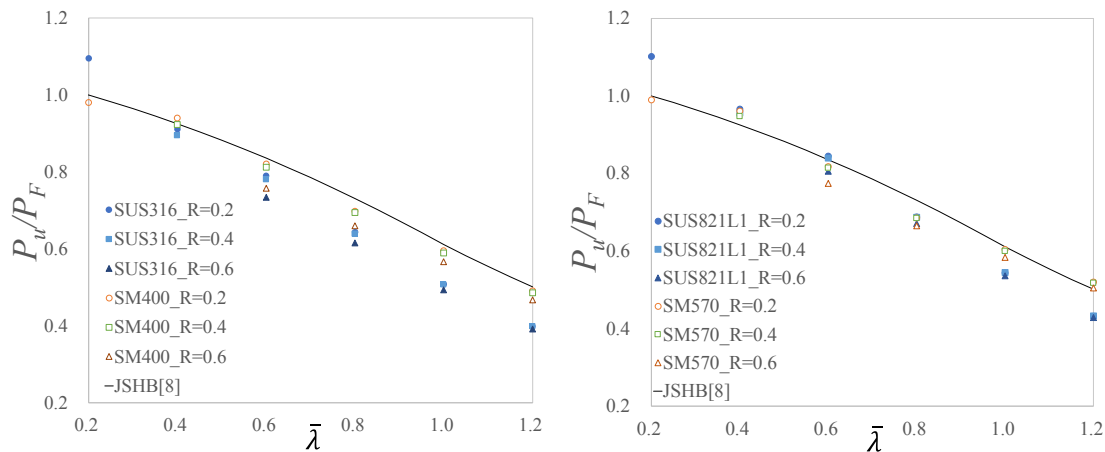
道路橋示方書で示される軸方向圧縮力を受ける部材の限界状態の区分に概ね即した結果となった。

3.3 終局圧縮強度

図7は、図6で示した全体座屈挙動が発現する中空正方形断面柱の終局圧縮強度と $\bar{\lambda}$ の関係を表す。同図の縦軸は、数値計算により得られた中空正方形断面柱の終局圧縮荷重を設計基準耐力時の荷重で除した終局圧縮強度 P_u/P_F を意味する。なお、同図中には比較のため、道路橋示方書で規定される炭素鋼製溶接箱形断面圧縮部材の耐荷力曲線を示している。同図(a)より、SUS316製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書で規定される強度評価値に比べて、 $\bar{\lambda}$ が0.2のとき1.1倍となる。一方、 $\bar{\lambda}$ が0.4から1.2のとき最小で0.78倍、最大で0.98倍、平均で0.87倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書で規定さ

れる強度評価値に比べて、 $\bar{\lambda}$ が0.2のとき1.1倍、 $\bar{\lambda}$ が0.4のとき平均で1.04倍、 $\bar{\lambda}$ が0.6かつ R が0.2および0.4のとき平均で1.01倍となる。一方、 $\bar{\lambda}$ が0.6かつ R が0.6のとき0.99倍、 $\bar{\lambda}$ が0.8から1.2のとき最小で0.85倍、最大で0.94倍、平均で0.89倍となる。これより、SUS316およびSUS821L1製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}$ が0.2のときに道路橋示方書の強度評価値を大きく上回る結果を示し、 $\bar{\lambda}$ が小さく、全体座屈が発現する範囲でのステンレス鋼の活用が有効であるといえる。一方、SUS316およびSUS821L1製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}$ が0.6以上および $\bar{\lambda}$ が0.8以上において、道路橋示方書の強度評価値を下回り、 $\bar{\lambda}$ の増加とともにその差が大きくなるのがわかる。

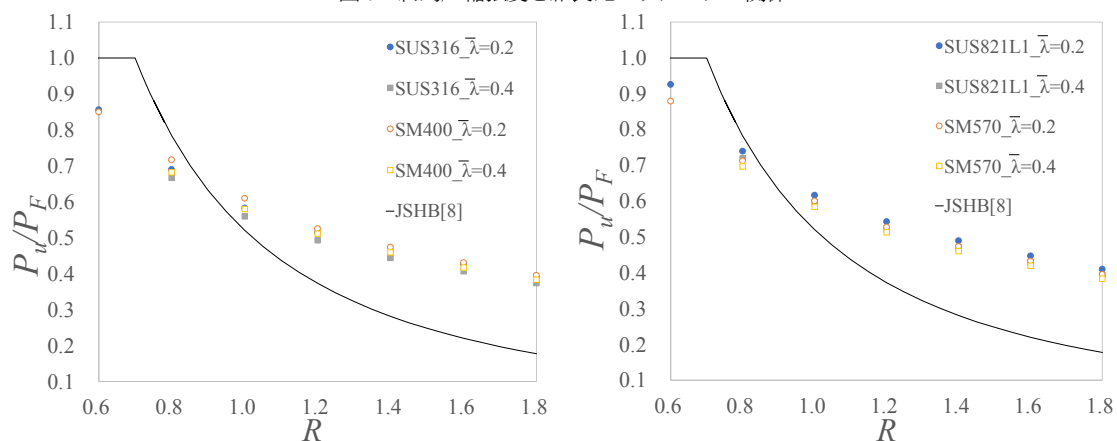
図8は、図6で示した局部座屈挙動が発現する中空正方形断面柱の終局圧縮強度と R の関係を示す。



(a) SUS316 および SM400

(b) SUS821L1 および SM570

図7 終局圧縮強度と細長比パラメータの関係



(a) SUS316 および SM400

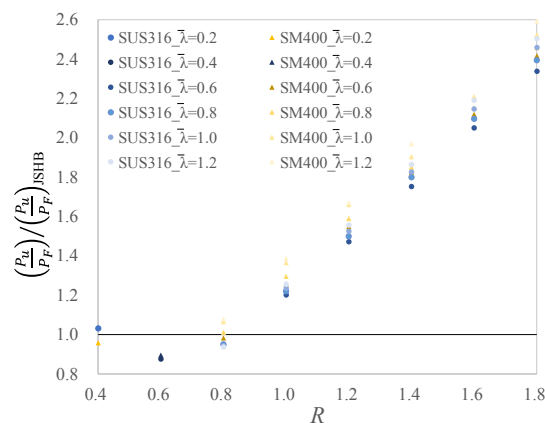
(b) SUS821L1 および SM570

図8 終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

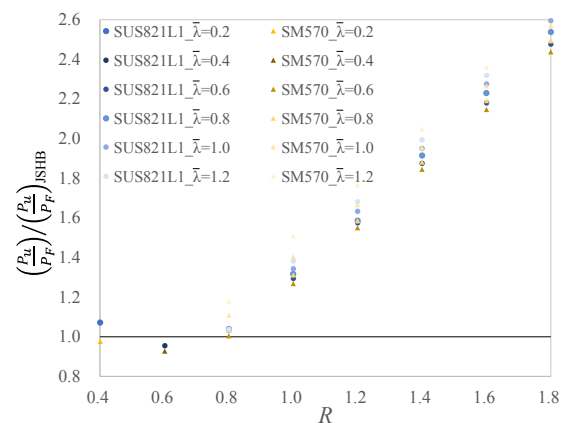
同図の縦軸は、図7と同様に算出した終局圧縮強度 P_u/P_F を意味する。また、同図中には、比較のため、道路橋示方書で規定される炭素鋼製両縁支持板の局部座屈に対する耐荷力曲線を示している。同図(a)より、SUS316 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書で規定される強度評価値に比べて、 R が 0.6 のとき 0.85 倍、 R が 0.8 のとき平均で 0.87 倍、 R が 1.0 から 1.8 のときは、最小で 1.08 倍、最大で 2.20 倍、平均で 1.50 倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書で規定される強度評価値に比べて、 R が 0.6 のとき 0.93 倍、 R が 0.8 のとき平均で 0.93 倍、 R が 1.0 から 1.8 のときは、最小で 1.15 倍、最大で 2.31 倍、平均で 1.58 倍となる。これより、SUS316 および SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 R が 1.0 以上の場合、道路橋示方書の強度評価値を大きく上回ることがわかる。また、これらの結果は、比較用とした SM400 および SM570 製の柱においても、同様の傾向を示すことから、ステンレス鋼および炭素鋼製両縁支持板の局部座屈に対する強度評価

法について検討する余地があると判断する。ただし、使用性能を考慮した場合には強度のみで評価するのに対して、その傾向が異なることも考えられるため、引き続き詳細に検討する必要があるといえる。

図9は、図6で示した連成座屈挙動が発現する中空正方形断面柱の終局圧縮強度と道路橋示方書で採用されている積公式による炭素鋼製溶接箱形断面柱の連成座屈強度評価値との比較を示す。同図の縦軸は、数値計算により得られた終局圧縮強度 P_u/P_F を道路橋示方書の連成座屈強度評価値 $(P_u/P_F)_{JSHB}$ で無次元化した値を示す。同図(a)より、SUS316 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書の連成座屈強度評価値に比べて、 R が 0.4 のとき 1.03 倍、 R が 0.6 のとき 0.88 倍、 R が 0.8 のとき平均で 0.95 倍、 R が 1.0 から 1.8 のとき最小で 1.20 倍、最大で 2.50 倍、平均で 1.82 倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、道路橋示方書の連成座屈強度評価値に比べて、 R が 0.4 のとき 1.07 倍、 R が 0.6 のとき 0.96 倍、 R が 0.8 から 1.8 のとき最小で 1.03 倍、最大で 2.65 倍、平均で 1.79 倍

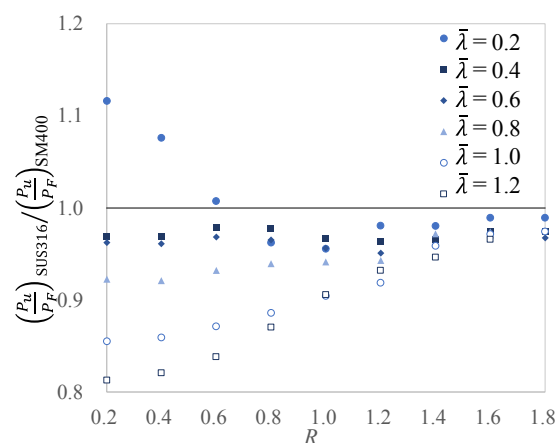


(a) SUS316 および SM400

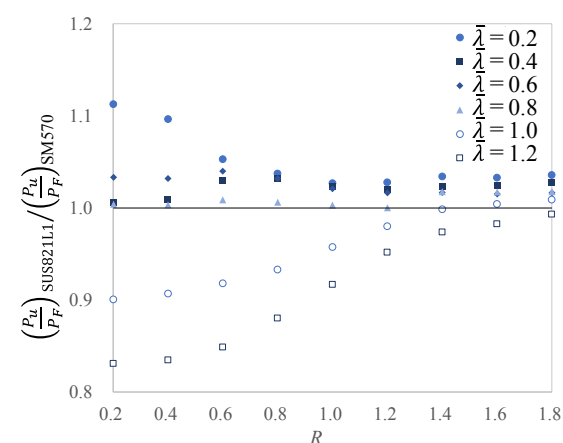


(b) SUS821L1 および SM570

図9 終局圧縮強度と道路橋示方書の連成座屈強度評価値との比較



(a) SUS316 と SM400 の比較



(b) SUS821L1 と SM570 の比較

図10 対象とした炭素鋼製中空正方形断面柱に対するステンレス鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度比

となる。これより、本研究で対象とした連成座屈が生じる SUS316 および SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 R が 0.6, 0.8 のときおよび R が 0.6 のとき、道路橋示方書の強度評価値を下回ることがわかる。これは、道路橋示方書において局部座屈に対する強度評価値を R が 0.7 以下の範囲までを降伏応力相当としていることによるものである。一方、 R の増大に伴い、道路橋示方書の強度評価値を過度に上回ることがわかる。

図 9 について、ステンレス鋼と炭素鋼の結果を比較してみると、 R が 0.4 のとき、ステンレス鋼の終局圧縮強度は、道路橋示方書の強度評価値を上回る結果に対して、炭素鋼のそれは下回ることがわかる。これは、 R が小さい領域で、ひずみ硬化に伴う応力上昇が大きくなるという、ステンレス鋼の材料特性によるものである。

図 10 は、対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱と炭素鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度の比を示す。ここで、同図の縦軸はステンレス鋼の終局圧縮強度を炭素鋼の終局圧縮強度で除した値を意味する。同図(a)より、SUS316 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、SM400 製中空正方形断面柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 から 0.6 のとき平均で 1.07 倍となる。一方、その他の場合は平均で 0.94 倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、SM570 製中空正方形断面柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 から 0.8 のとき平均で 1.03 倍となる。一方、 $\bar{\lambda}$ が 1.0 および 1.2 のとき平均で 0.93 倍となる。

さらに、図 10 より、対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱と炭素鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度の比は、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 から 0.6 の場合、他の結果と異なる傾向を示すことがわかる。これは、 $\bar{\lambda}$ と R がともに小さい領域において、炭素鋼製中空正方形断面柱が十分な塑性域に達する前に終局

状態に達するのに対し、ステンレス鋼製中空正方形断面柱は、ラウンドハウス型の応力ひずみ関係により、ひずみの進行に伴う連続的な応力上昇が発生することが要因であると考えられる。また、ステンレス鋼製中空正方形断面柱と炭素鋼製中空正方形断面柱の終局強度比は、 R の増加に伴い、鋼種による差が減少する傾向を示すことがわかる。

3.4 終局圧縮強度時の圧縮変位

図 11 は、対象とした中空正方形断面柱の終局圧縮強度時における圧縮変位と $\bar{\lambda}$ の関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で得られた終局圧縮強度時の圧縮変位 U_u を式(3)で定義した設計基準耐力時の圧縮変位 U_F で無次元化した値を意味する。同図(a)より、SUS316 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度時の圧縮変位は、SM400 製中空正方形断面柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 のとき最小で 1.07 倍、最大で 2.85 倍、平均で 1.44 倍となる。一方、 R が 1.8 から 1.2 の場合、平均で 0.92 倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1 製中空正方形断面柱の終局圧縮強度時の圧縮変位は、SM570 製中空正方形断面柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 のとき最小で 1.05 倍、最大で 1.98 倍、平均で 1.26 倍となる。一方、 R が 1.8 から 1.2 のとき平均で 0.97 倍となる。これらの結果より、ステンレス鋼製中空正方形断面柱は、 $\bar{\lambda}$ が小さい領域にて、炭素鋼製中空正方形断面柱と比べて、変形が大きくなる。これは、ステンレス鋼製中空正方形断面柱は、 $\bar{\lambda}$ が小さい範囲で、柱の全体または一部で塑性域に達し、その際、ステンレス鋼の材料特性により、塑性化の進行とともに強度発現がみられるためである。また、 $\bar{\lambda}$ と R がともに大きく、概ね連成座屈が生じる領域では、ステンレス鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度時における圧縮変位

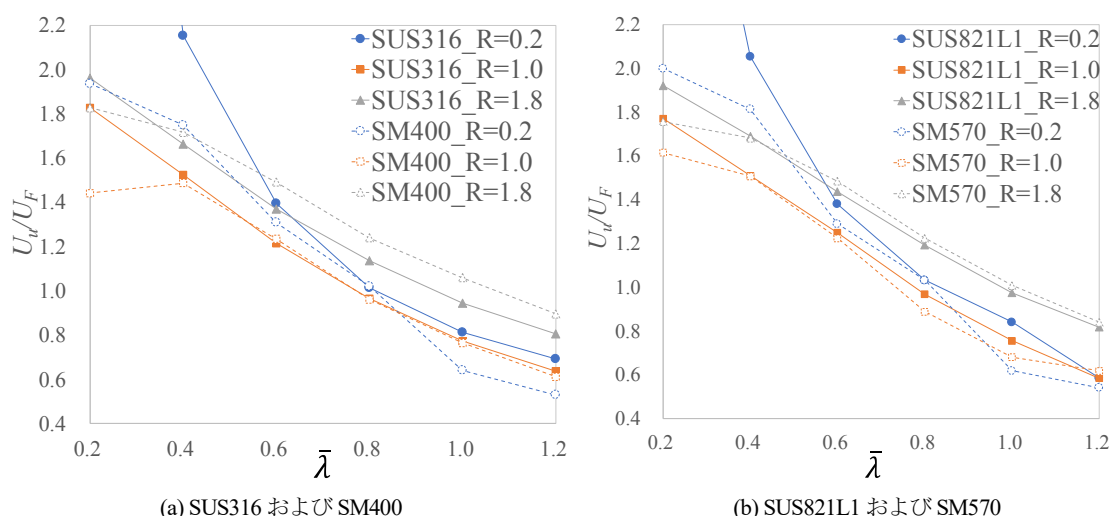


図 11 終局圧縮強度時の圧縮変位と細長比パラメータの関係

は、炭素鋼製中空正方形断面柱に比べて小さくなる。さらに、本研究で対象とした全ての柱の終局圧縮強度時の圧縮変位は、 R の増加に伴い同様の傾向を示すことが確認できる。これは、3.1 で述べたように、 R の増加に伴い、鋼種による荷重と変位の関係に差異が見られなくなることに依存する。

4. おわりに

本研究では、SUS316 および SUS821L1 製中空正方形断面柱の座屈挙動および終局圧縮強度について、数値計算により明らかにした。本研究で得られた成果は、つぎの通りである。

- (1) 本研究で対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱の荷重と変位の関係は、 R が小さい範囲で、炭素鋼製中空正方形断面柱の結果に比べて、終局圧縮強度が大きくなる。
- (2) 本研究で対象とした全ての柱において、 $\bar{\lambda}$ および R がともに大きい領域で、連成座屈挙動が発現する。
- (3) 本研究で対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}$ が小さい範囲および R が大きい範囲において、道路橋示方書の耐荷力評価値を上回る。
- (4) 本研究で対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱と炭素鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度の比は、 $\bar{\lambda}$ および R が小さい範囲で、他の結果と異なる傾向を示す。
- (5) 対象としたステンレス鋼製中空正方形断面柱の終局圧縮強度時における圧縮変位は、連成座屈が発現する領域で、炭素鋼製中空正方形断面柱の結果を下回る。

参考文献

- [1] Graham Gedge : Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering, J. of Const. Steel Res., Vol.64, pp.1194-1198, 2008.
- [2] 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, 2015.
- [3] ステンレス建築構造設計基準作成委員会：ステンレス建築設計基準・同解説，ステンレス構造建築協会，2001.
- [4] 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート No.108 ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針（案），日本鋼構造協会，2015.

- [5] 堀澤英太郎，宮寄靖大：部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法，構造工学論文集，Vol.60A，土木学会，pp.114-125，2014.
- [6] 宮寄靖大，奈良敬：無補剛ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法，構造工学論文集，Vol.56A，土木学会，pp.122-134，2010.
- [7] 宮寄靖大，奈良敬：応力ひずみ関係に基づくステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法，鋼構造論文集，第 20 巻第 79 号，土木学会，pp.67-79，2013.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 宮寄靖大，佐藤龍輝，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.
- [11] 宮寄靖大，上谷明夫，奈良敬：溶接組立てされたステンレス鋼箱形短柱の終局強度，鋼構造年次論文報告集，第 17 巻，pp.367-374，2009.
- [12] 宮寄靖大：SUS323L および SM570 製溶接組立部材断面の残留応力分布，鋼構造年次論文報告集，第 25 巻，pp.397-403，2017.
- [13] 土木学会 鋼構造委員会 座屈設計ガイドライン改訂小委員会：鋼構造シリーズ 12 座屈設計ガイドライン（改訂第 2 版），土木学会，2005.
- [14] MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC Software Corporation, 2020.