

SUS316 および SUS821L1 製中空正方形断面柱の座屈挙動

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、従来の鋼材に比べて高耐食性を有するため、土木構造物に活用することで、構造物の長寿命化および維持管理費用の削減が期待できる。ステンレス鋼を土木構造物に活用するためには、部材レベルでの強度特性を明確にした設計法の確立が必要である。本研究は、ステンレス鋼製柱部材の座屈挙動に着目し、その強度特性について、炭素鋼製柱の結果や各種設計基準類^{1),2)}との比較を行い、新たな強度評価式の提案に向けた検討を行う。

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（リーン型）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^{3),4)}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_F が設計基準耐力（ステンレス鋼の場合 0.2%耐力、炭素鋼の場合降伏応力）を、 $\sigma_{0.01}$ がステンレス鋼の 0.01% 耐力を、 ν がポアソン比を意味する。図 1 は、数値計算に用いる応力塑性ひずみ関係を示す。なお、ステンレス鋼の応力ひずみ関係は明確な降伏点を有さないラウンドハウス型を示すため、ステンレス鋼の塑性開始点を $\sigma_{0.01}$ とした。

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の形状を示す。同図中の記号は、 t 、 b および L が柱断面を構成する板の板厚、板の支持間隔および柱長さを意味する。本研究では、 b を 200mm として、 t を式 (1) で定義する幅厚比パラメータ R を 0.2 から 1.8 まで、 L を式 (2) で定義する細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を 0.2 から 1.4 までそれぞれ 0.2 刻みで変化させて決定する。式中の記号は、 k および r が板の座屈係数 (=4) および断面 2 次半径を意味する。また、数値計算では、柱の初期不整として、初期たわみおよび残留応力を

表 1 対象材料の機械的性質^{3),4)}

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

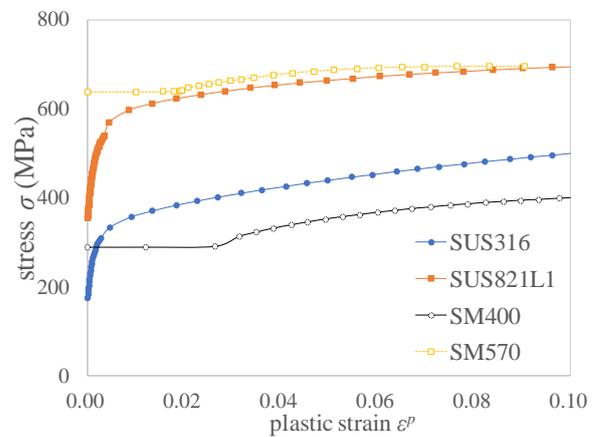
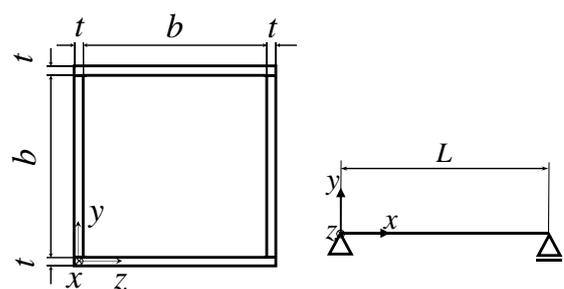


図 1 対象材料の応力塑性ひずみ関係^{3),4)}



(a) 断面図 (b) 側面図

図 2 中空正方形断面柱

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

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

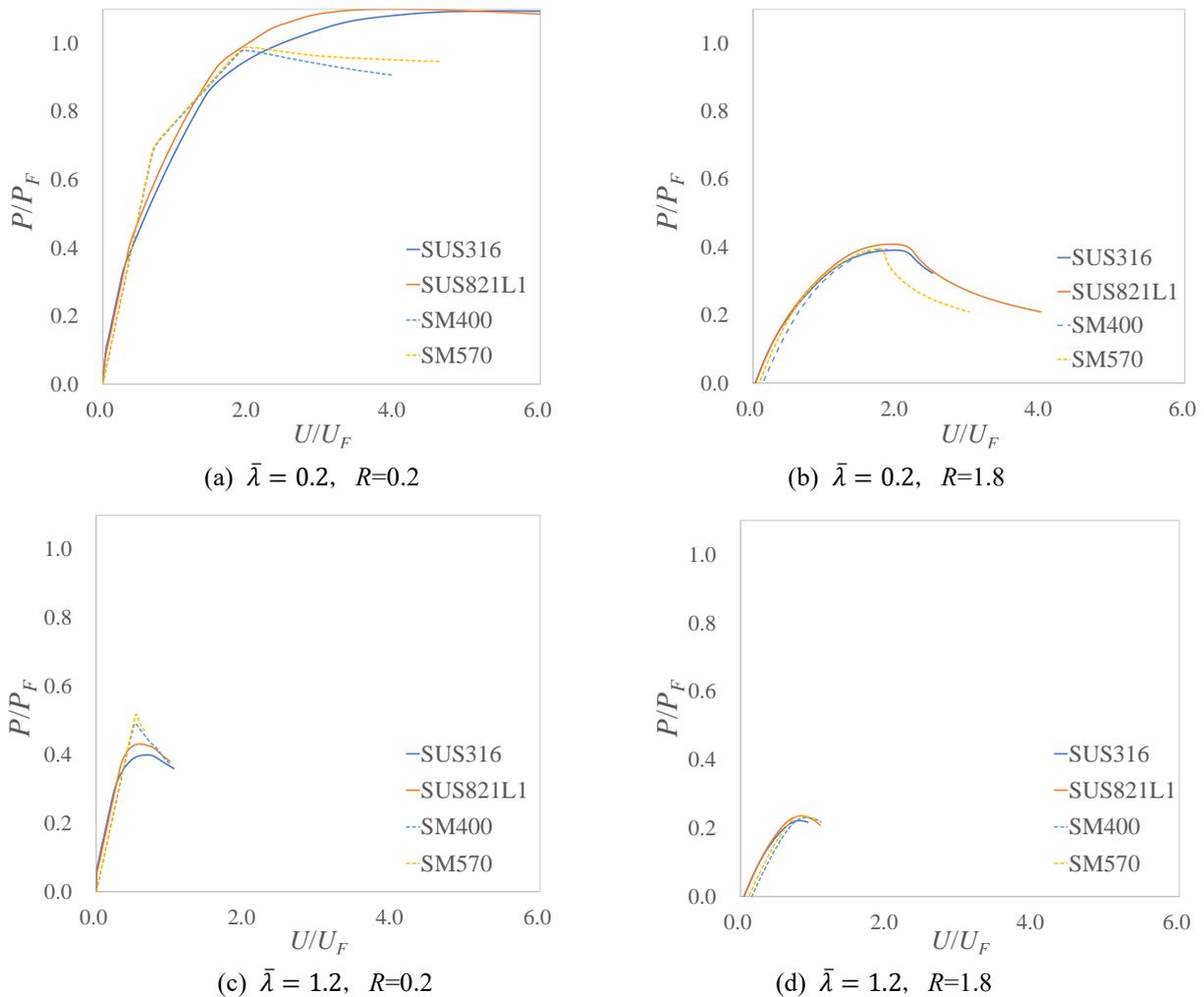


図3 荷重－変位関係

考慮する．まず，初期たわみは，柱全体の初期たわみをたわみの最大値が $L/1000$ となる \sin 半波形で与え，板に生じる初期たわみをたわみの最大値が $b/150$ となる \sin 半波形が板の縦横比 1.0 で生じるようにして与える．つぎに，残留応力は，引張残留応力の大きさを σ_F ，圧縮残留応力の大きさを $-0.3\sigma_F$ とした自己平衡を保つ矩形分布で与える．本研究で実施する数値計算⁵⁾は，対象とする柱断面を構成する各板について，8 節点アイソパラメトリックシェル要素により，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，長さ方向を L に応じて各要素の縦横比が 1.0 になるように分割して有限要素離散化を行う．

3. 数値計算結果

3.1 荷重－変位関係

図3は，数値計算により得られたそれぞれの柱の荷重と変位の関係を示す．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設計基準耐力時の荷重 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 をフック則により算出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．同図より，ステンレス鋼製柱の荷重と変位の関係は炭素鋼製柱の結果に比べて，最大耐力後の劣化勾配が緩やかになることがわかる．また，同図(a)より， $\bar{\lambda}$ および R が小さい領域において，ステンレス鋼製柱は炭素鋼製柱に比べて大きな塑性変形能を示すことが確認できる．これは，この領域において，柱全体の塑性化が進展するため，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特性が発現したためである．一方，同図(d)より， $\bar{\lambda}$ および R がともに大きい領域では，鋼種による結果の違いは殆ど見られないことがわかる．

3.2 座屈挙動の判別

図4は，それぞれの柱の終局圧縮強度時における上下フランジについて，図2で示した y 軸方向の変

位より、座屈挙動の判別を行った結果を示す。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。同図より、 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、 $\bar{\lambda}$ 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、 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以上の場合に連成座屈が発現することがわかる。これらは、本研究で対象とした全ての鋼種で同様の結果を示した。

3.3 終局圧縮強度

図5は、対象としたステンレス鋼柱と炭素鋼製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製柱の終局圧縮強度を炭素鋼製柱の終局圧縮強度で除した値を意味する。同図(a)より、SUS316製柱の終局圧縮強度は、SM400製柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が0.2かつ R が0.2~0.6のとき平均で1.07倍となる。そして、その他の場合は平均で0.93倍となる。また、同図(b)より、SUS821L1製柱の終局圧縮強度は、SM570製柱の結果に比べて、 $\bar{\lambda}$ が0.2~0.8のとき平均で1.03倍となる。そして、 $\bar{\lambda}$ が1.0~1.4のとき平均で0.92倍となる。

図6は、前節にて全体座屈が発現するとした柱の終局圧縮強度と $\bar{\lambda}$ の関係を示す。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。また、同図には比較のため道路橋示方書¹⁾(以下、道示と呼称)およびEurocode²⁾で規定される溶接箱形断面柱の基準耐荷力曲線を示す。同図より、ステンレス鋼製柱の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}$ が0.2のとき、道示およびEurocodeによる強度評価値の1.10倍となる。一方、 $\bar{\lambda}$ が0.4以上の範囲におけるステンレス鋼製柱の終局圧縮強度は、平均で、道示による強度評価値の0.90倍、Eurocodeによる強度評価値の0.92倍となり、各設計基準による強度評価値よりも小さくなる。

図7は、前節にて局部座屈が発現するとした柱の終局圧縮強度と R の関係を示す。同図の縦軸は、図6と同様に算出した終局圧縮強度を意味する。また、

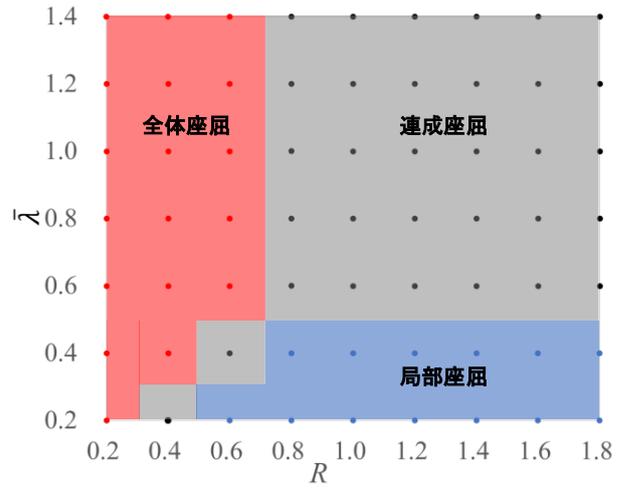
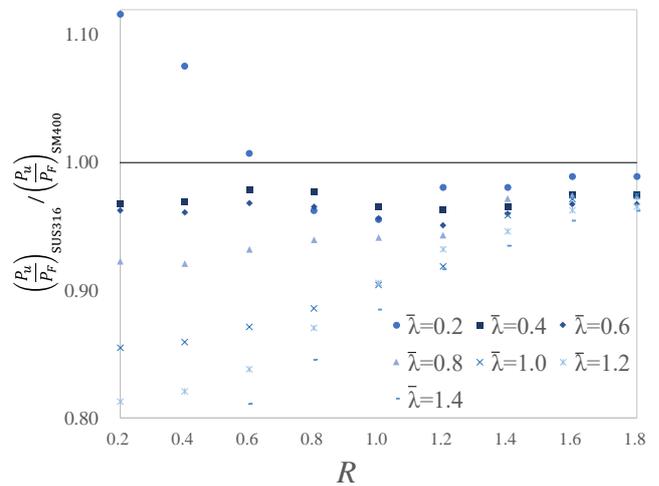
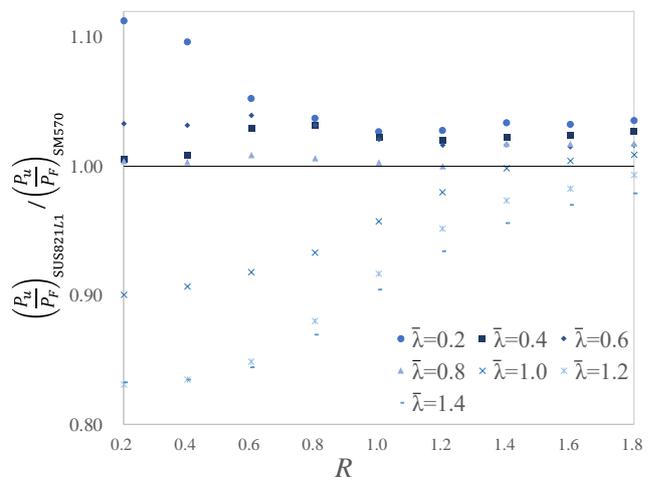


図4 座屈挙動の判別



(a) SUS316 と SM400 の比較



(b) SUS821L1 と SM570 の比較

図5 炭素鋼製柱に対するステンレス鋼製柱の終局圧縮強度比

同図中には、比較のため、道示および Eurocode で規定される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。同図より、ステンレス鋼製柱の終局圧縮強度は、道示による強度評価値に比べて、 R が 0.6 および 0.8 のとき、平均で 0.90 倍、 R が 1.0~1.8 のときに 1.70 倍となり、 R が大きい範囲における道示の強度評価は、過度に安全側の評価となることがわかる。また、Eurocode による強度評価値と比べてみると、最小で 0.90 倍、最大で 1.05 倍となることが確認できる。

図 8 は、前節にて連成座屈挙動が発現するとした柱の終局圧縮強度と道示で規定される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 を道示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。同図より、ステンレス鋼製柱の終局圧縮強度は、道示の連成座屈強度評価値に比べて、 R が 1.0~1.8 のとき、平均で 1.92 倍となり、過度な安全余裕度を有していることがわかる。これは、前述した道示の耐荷力評価において、 R が大きい範囲にて、低い応力度で面外たわみや剛性の低下が生じやすいことを考慮しているためである。

4. おわりに

本研究で得られた成果は以下の通りである。(1)本研究で対象とした $\bar{\lambda}=0.2$ かつ $R \leq 0.6$ のステンレス鋼製柱は、大きな変形能を有する。(2)本研究で対象としたステンレス鋼製柱は、炭素鋼製柱と同様の座屈挙動を示す。(3) R が大きい範囲における道示の耐荷力評価は、対象としたステンレス鋼製柱においても、過度な安全余裕度を有している。

参考文献

- 1) 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。
- 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) 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。
- 4) 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。
- 5) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC Software Corporation,2020。

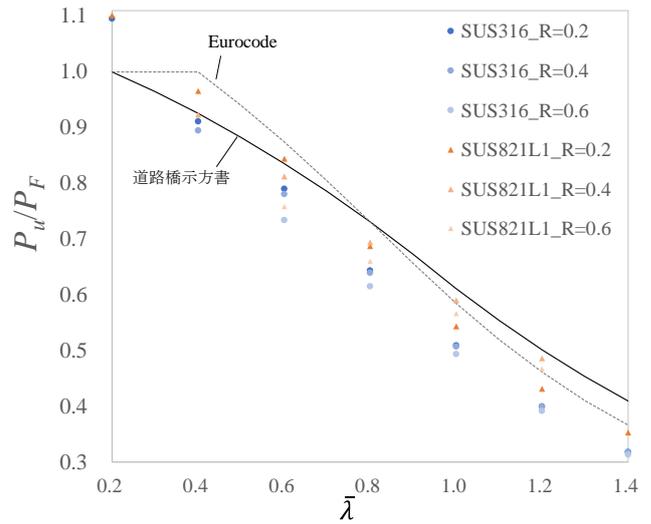


図 6 終局圧縮強度と $\bar{\lambda}$ の関係

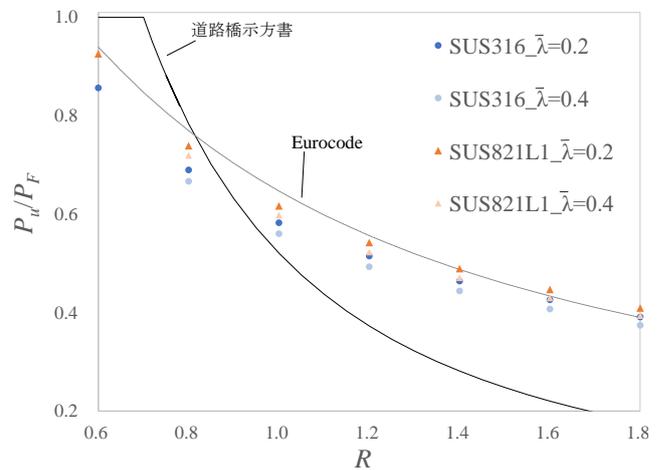


図 7 終局圧縮強度と R の関係

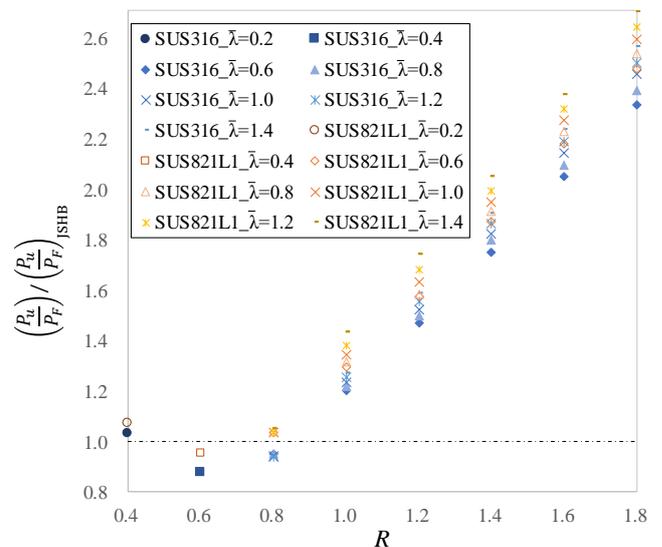


図 8 終局圧縮強度と道示の連成座屈強度評価値との比較