

SUS304 および SUS821L1 製山形断面柱部材の圧縮強度特性

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○井崎 茜
長岡工業高等専門学校 正会員 宮寄 靖大
早稲田大学 正会員 小野 潔
長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の構造用炭素鋼に比べて高耐食性を示す．そのため、長期的な供用が必然である土木構造物にステンレス鋼を用いることで、従来の炭素鋼製構造物に比べてライフサイクルコストの低減が可能となる．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、橋梁の二次部材に使用することを想定したステンレス鋼製山形断面柱部材について、中心圧縮負荷または偏心圧縮負荷の 2 ケースでの強度特性を数値計算により明らかにする．

2. SUS304 および SUS821L1 製山形断面柱の数値計算モデル

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 SUS304、リーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1 の 2 鋼種とする．表 1 は、これら材料の機械的性質を示す^{1), 2)}．また、図 1 は、文献 3)による 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線を用いた応力ひずみ関係を示す．

図 2 は、本研究で対象とする山形断面柱の形状および寸法を示す．山形断面の寸法は、式(1)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を 0.2 から 2.0 まで 0.2 刻みで変化させて、柱長さ l を決定する．

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (1)$$

ここで、式中の r は断面二次半径($=\sqrt{I/A}$)、 I は断面 2 次モーメント、 A は断面積を意味する．

対象とする山形断面柱は、初期不整として残留応力および初期たわみを考慮する．まず、残留応力は、図 3 に示すように、文献 4)を参考にして自己平衡を保つ矩形分布とし、その大きさを圧縮側で $0.3\sigma_{0.2}$ 、引張側で $\sigma_{0.2}$ として与える．つぎに、初期たわみは、中心圧縮負荷を受ける数値計算モデルの固有値解析を行い、柱の全体座屈モードを採用するとともに、柱の側方たわみの最大値が $l/1000$ となるようにして与える．そして、数値計算モデルへの載荷方法は、山形断面の重心位置(丸にバツの点)または山形断面の片側の偏心位置(四角にバツの点)の 2 パターンとする．

以上の数値計算は、8 節点シェル要素を用いて有限要素離散化を行い、汎用非線形有限要素解析プログラム MARC を用いる．

表 1 対象ステンレス鋼の機械的性質^{1), 2)}

鋼種	ヤング係数	0.2%耐力	ポアソン比
	(GPa)	(MPa)	ν
SUS304	183	268	0.280
SUS821L1	203	495	0.221

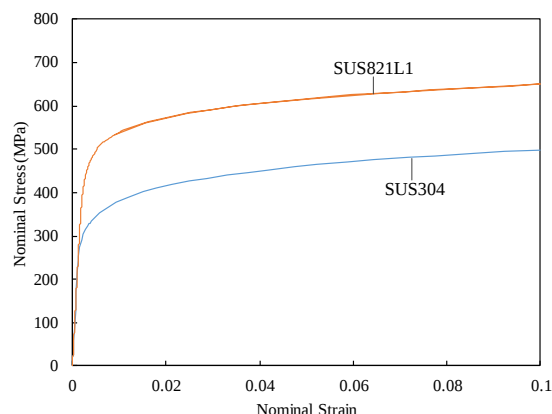


図 1 数値計算に用いたステンレス鋼の応力ひずみ関係³⁾

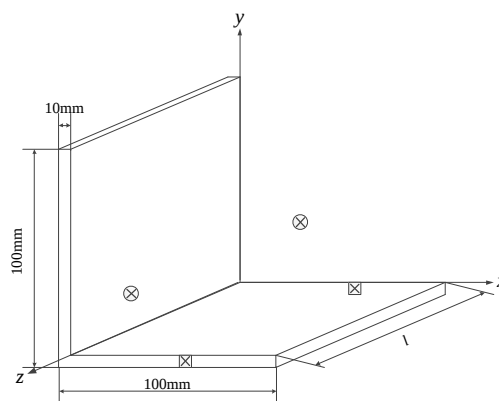


図 2 対象とした山形断面柱

3. 数値解析結果

図4は、(a)中心圧縮および(b)偏心圧縮の各負荷条件による数値計算で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荷重 P を0.2%耐力時の荷重 $P_{0.2}$ で正規化した値を、横軸は数値計算で与えた変位 U を山形断面柱の0.2%耐力時の変位 $U_{0.2}$ で正規化した値を表している。同図より、 $\bar{\lambda}=0.2$ のとき、SUS304 製山形断面柱は、荷重の増加に伴い初期勾配から緩やかに最大荷重まで上昇することがわかる。一方、SUS821L1 製山形断面柱は、初期勾配からの変化が SUS304 の結果に比べて明確に表れていることが確認できる。

図5は、(a)中心圧縮および(b)偏心圧縮の負荷条件について、終局強度時の圧縮変位と細長比パラメータの関係を表す。ここで、同図の縦軸は、終局強度時の圧縮変位 U_u を0.2%耐力時の変位 $U_{0.2}$ で正規化した値を意味する。ステンレス鋼は、明確な降伏点を持たないラウンドハウス型の応力ひずみ関係を有するため、0.2%耐力時の変位をフックの法則から算出した値を用いて変位を評価すると過大となる。そこで、図5の白抜きのプロットに示すように、表2のヤング係数 E の補正值⁵⁾による変位 $U_{0.2}$ を用いて評価した結果も同時に示している。図5より、SUS304 の結果は、SUS821L1 に比べて $\bar{\lambda}=0.2$ において1.15倍の変位となり、細長比パラメータの小さいモデルで終局強度時の圧縮変位が大きくなることをわかる。

図6および図7は、山形断面を構成する2辺の板について図2に示した y および z 方向の面外変位 V および W を、初期たわみの大きさ V_0 および W_0 で正規化した値と細長比パラメータの関係を示す。図6より、対象とした2種類のステンレス鋼製山形断面柱の面外変位は、 $\bar{\lambda}=0.2$ の場合、他の $\bar{\lambda}$ に比べて顕著に発生することが確認できる。これは、 $\bar{\lambda}=0.2$ の柱では、断面を構成する板の局部座屈が先行することによる結果を表している。

図8は、数値解析により得られた対象としたステンレス鋼製山形断面柱の終局圧縮強度と細長比パラメータの関係を表す。同図の縦軸は終局強度 P_u を0.2%耐力時の強度 $P_{0.2}$ で正規化した値を意味する。また、同図のプロットは数値計算結果を、点線はEuler曲線を、

表2 強度クラスごとの基準耐力時の割線勾配およびひずみの比⁵⁾

強度クラス	$E_{0.1}/E(\%)$	$E_{0.2}/E(\%)$	$\varepsilon_{0.1}/\varepsilon_{0.1H}$	$\varepsilon_{0.2}/\varepsilon_{0.2H}$
$\sigma_{0.2}=205\text{MPa}$	58.7	43.7	1.71	2.30
$\sigma_{0.2}=345\text{MPa}$	65.9	51.7	1.52	1.94
$\sigma_{0.2}=450\text{MPa}$	71.1	57.7	1.41	1.74
$\sigma_{0.2}=400\text{MPa}$	70.6	56.0	1.42	1.79

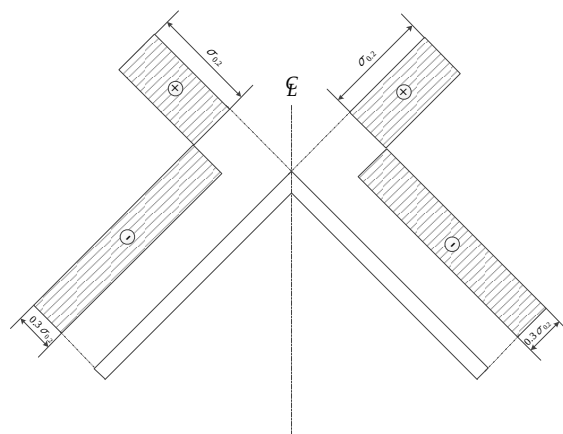
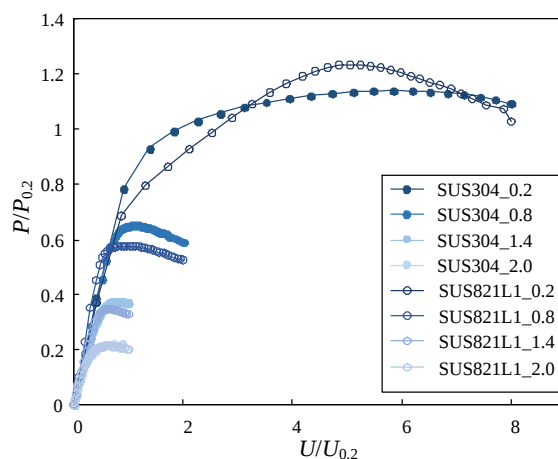
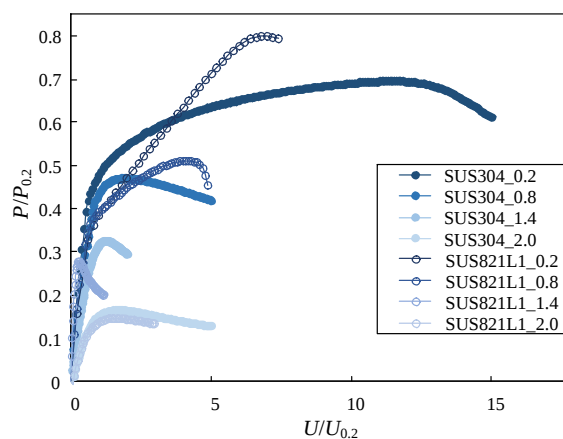


図3 残留応力分布



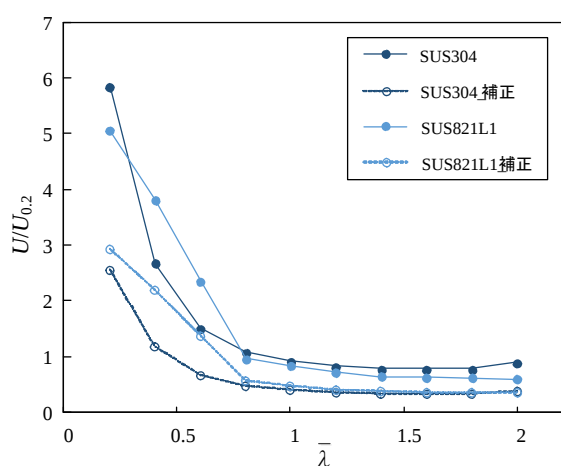
(a) 中心軸圧縮



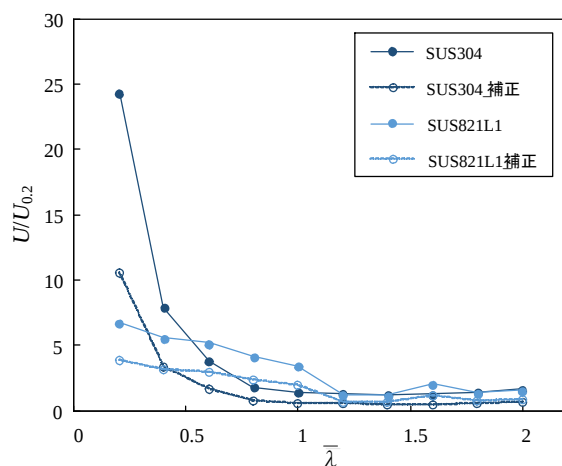
(b) 偏心圧縮

図4 荷重と変位の関係

破線は道路橋示方書⁶⁾の耐力力曲線を，一点鎖線は Eurocode⁷⁾におけるステンレス鋼の耐力力曲線を表す．同

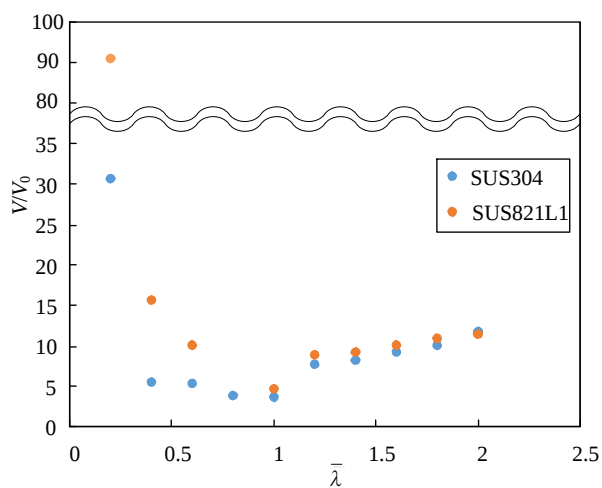


(a) 中心軸圧縮

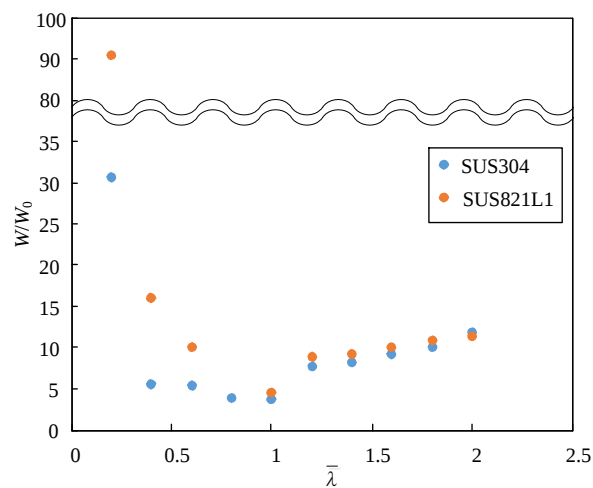


(b) 偏心圧縮

図5 変位と細長比パラメータの関係

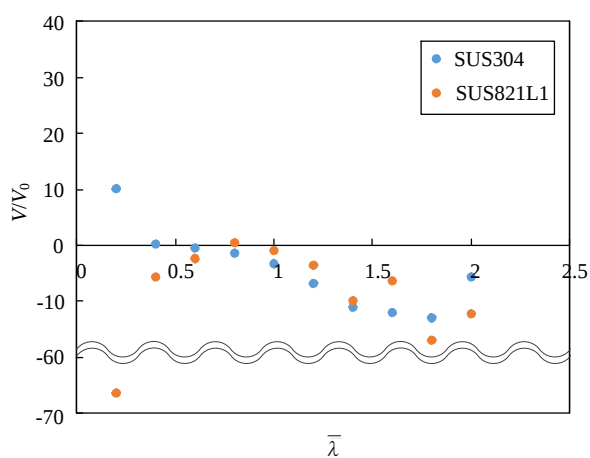


(a) V 方向

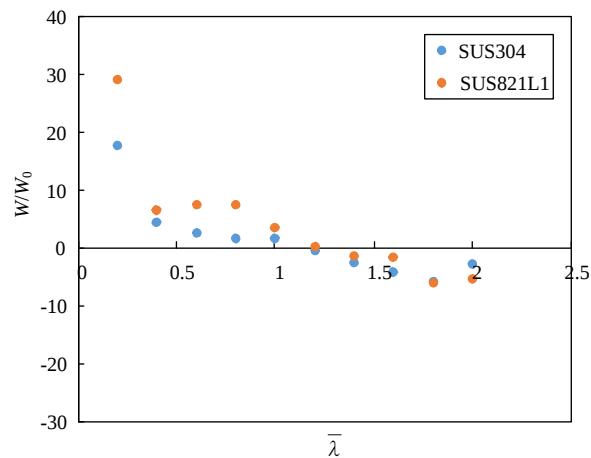


(b) W 方向

図6 中心軸圧縮の面外変位と細長比パラメータの関係



(a) V 方向



(b) W 方向

図7 偏心圧縮の面外変位と細長比パラメータの関係

図より、本研究で対象とした中心圧縮条件のステンレス鋼製山形断面柱の終局圧縮強度は、SUS304 で $\bar{\lambda}=0.6$ から 1.2 の場合、SUS821L1 で $\bar{\lambda}=0.6$ から 1.8 の場合、道路橋示方書の耐力曲線に比べて小さくなる。また、偏心圧縮負荷条件の結果については、SUS304 および SUS821L1 の全 $\bar{\lambda}$ において、道路橋示方書および Eurocode の耐力曲線に比べて終局圧縮強度が小さくなることが確認できる。

4. おわりに

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1)対象としたステンレス鋼製山形断面柱の終局圧縮強度は、中心圧縮負荷条件の場合、SUS304 で $\bar{\lambda}=0.6$ から 1.2, SUS821L1 で $\bar{\lambda}=0.6$ から 1.8 において、道路橋示方書の耐力曲線に比べて小さくなる。

(2)対象としたステンレス鋼製山形断面柱の終局圧縮強度は、偏心圧縮負荷の場合、SUS304 および SUS821L1 の全細長比パラメータにおいて、道路橋示方書および Eurocode の耐力曲線に比べて小さくなる。

今後、本研究で対象としたステンレス鋼製山形断面柱の初期不整に関するデータの収集および実験結果との比較による妥当性の確認を行う必要がある。

謝辞

本研究は、平成 31 年度新潟県建設技術センター研究助成「腐食損傷部材への高耐久性材料活用による高機能鋼橋の設計法の提案に関する事業」により実施したものです。また、土木研究所、日本鋼構造協会、日本橋梁建設協会、長岡技術科学大学、長岡工業高等専門学校、早稲田大学、本州四国連絡高速道路との共同研究「耐久性向上のための高性能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」にて実施したものです。関係の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 井崎茜, 宮寄靖大, 佐藤信輔, 小野潔, 宮下剛: 板材および山形鋼から採取したステンレス鋼の材料特性, 平成 30 年度土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会, I-571, 2018.
- 2) 井崎茜, 宮寄靖大, 宮下剛, 小野潔: 板材および山形鋼より採取した Cr-Ni 系ステンレス鋼の材料特性, 第 36 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp.30-31, 2018.
- 3) 井崎茜, 宮寄靖大, 小野潔, 宮下剛: Cr-Ni 系ステンレス鋼への 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線の適応性の検証, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, I-019, 2019.
- 4) 宇佐美勉, 福本嘯士: プレーシング材としての山形および T 形鋼部材の圧縮強度と設計, 土木学会論文報告集, 第 201 号, pp.43-50, 1972.
- 5) 佐藤信輔: 速度依存性を考慮したステンレス鋼の材料特性および単軸漸増負荷下における材料モデルの提案, 環境都市工学専攻特別研究論文, 長岡工業高等専門学校, 2017.
- 6) 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.
- 7) European Committee for Standardization and CEN. -133Eurocode 3: -Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels. EN 1993-1-4. CEN, 2006.

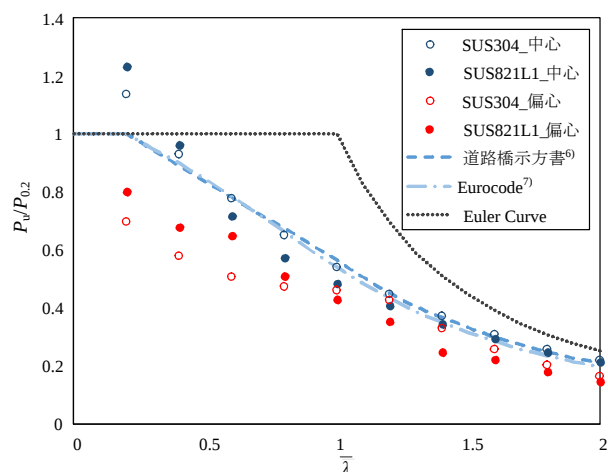


図 8 耐力曲線