

一般財団法人 新潟県建設技術センター
令和元年度 研究助成事業報告書

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

令和2年3月

長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 宮寄 靖大

1. まえがき

新潟県における社会基盤構造物の塩害は、日本海沿岸部や冬季の凍結防止剤散布が要因であり、社会基盤構造物の維持管理の主たる課題として挙げられる。また、社会基盤構造物に関連する近年の経済情勢や技術者不足は、これまでに健全に供用されてきた構造物の永続的利用において最重要の課題であり、この解決が早急に求められている。そのためには、鋼橋等の鋼構造物における無塗装使用など、従来に比べて維持管理性能が優れた構造形式の採用が必要不可欠である。

本研究は、鋼橋を対象として、従来から使用され続けている炭素鋼に比べて高耐食性を有するステンレス鋼に着目し、塗装塗替え作業が困難な部材や腐食環境が厳しい部材をステンレス鋼に置換する手法を提案する。しかし、部分的なステンレス鋼の利用など、橋梁 2 次部材へのステンレス鋼利用に関する強度評価法等が明確にされていない。そこで、本研究では、これまでにステンレス鋼構造物を対象としてきた研究成果¹⁾⁵⁾などを活かし、等辺山形断面形状を有する柱部材の強度特性を数値計算により明らかにし、その設計法を提案する。

2. 研究方法

本研究では、橋梁の 2 次部材に使用することを想定したステンレス鋼製等辺山形断面柱部材について、断面の図心軸上または片方の辺をボルト接合した偏心軸上に圧縮荷荷を受ける 2 ケースの強度特性を非線形有限要素法による数値計算を用いて明らかにする。

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 SUS304、リーン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⁶⁾。また、図 1 は、文献 6) 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。そして、数値計算に用いる材料モデルは、図 1 に示した応力ひずみ関係を用いることとする。

表 1 対象材料の機械的性質⁶⁾

鋼種	ヤング係数 $E(\text{GPa})$	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}(\text{MPa})$	ポアソン比 ν
SUS304	183	268	0.280
SUS821L1	203	495	0.221

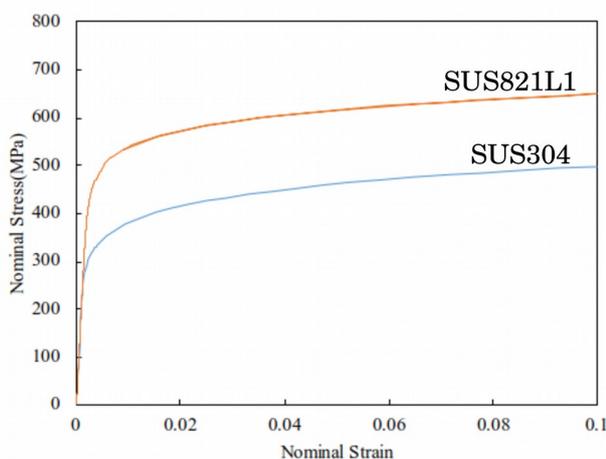


図 1 対象材料の応力ひずみ関係⁶⁾

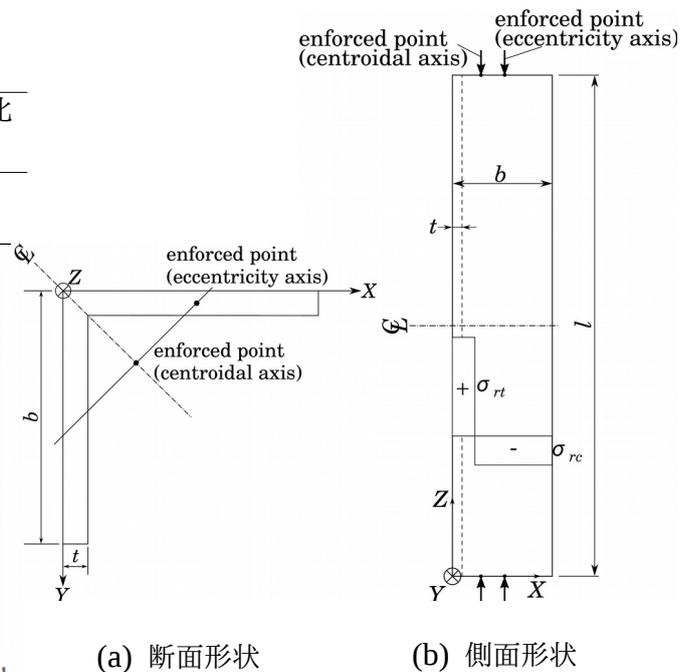


図 2 等辺山形断面柱

2. 2 ステンレス鋼製山形断面を有する柱部材のモデル化

図2は、本研究で対象とする等辺山形断面柱の形状を示す。同図の山形断面の寸法は、辺長 b を100mm および板厚 t を10mmと一定にし、柱長さ l を式(1)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を0.2から2.0まで0.2刻みで変化させて決定する。

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

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2(b)中に示すように、文献7)を参考にして自己平衡を保つ矩形分布とし、圧縮残留応力の値 σ_c を $-0.3\sigma_{0.2}$ 、引張残留応力の値 σ_t を $\sigma_{0.2}$ として与える。つぎに、初期たわみは、図心軸圧縮負荷を受ける柱に対する固有値解析を行い、柱の座屈形状が全体座屈モードになる際の固有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。

数値計算モデルの境界条件は、幾何学的境界条件として柱軸両端の等辺山形断面の図心位置に仮想節点を設けるとともに、その節点から断面を構成する節点とリンクさせることで両端ヒンジの拘束となるように与える。そして、力学的境界条件となる強制圧縮力は、 $Z=l$ の点にて、図心軸圧縮負荷または偏心軸圧縮負荷となる断面節点位置に与える。また、対象とする柱の数値計算モデルは、8節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて有限要素離散化する。

以上の数値計算は、材料および幾何学的非線形性を考慮した複合非線形有限要素法を用いて実施する。なお、数値計算では、材料はMisesの降伏条件および関連流れ則に従うものと仮定し、非線形問題の収束計算に修正Newton-Raphson法を用いることとする。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を用いて実施する。

3. ステンレス鋼製山形断面柱の圧縮強度特性

図3は、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が0.2から2.0まで0.6刻みの形状を有する対象としたステンレス鋼製山形断面柱について、(a)図心軸圧縮および(b)偏心軸圧縮の各負荷条件による数値計算で得られた圧縮方向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 Z 軸方向圧縮荷重 P を0.2%耐力

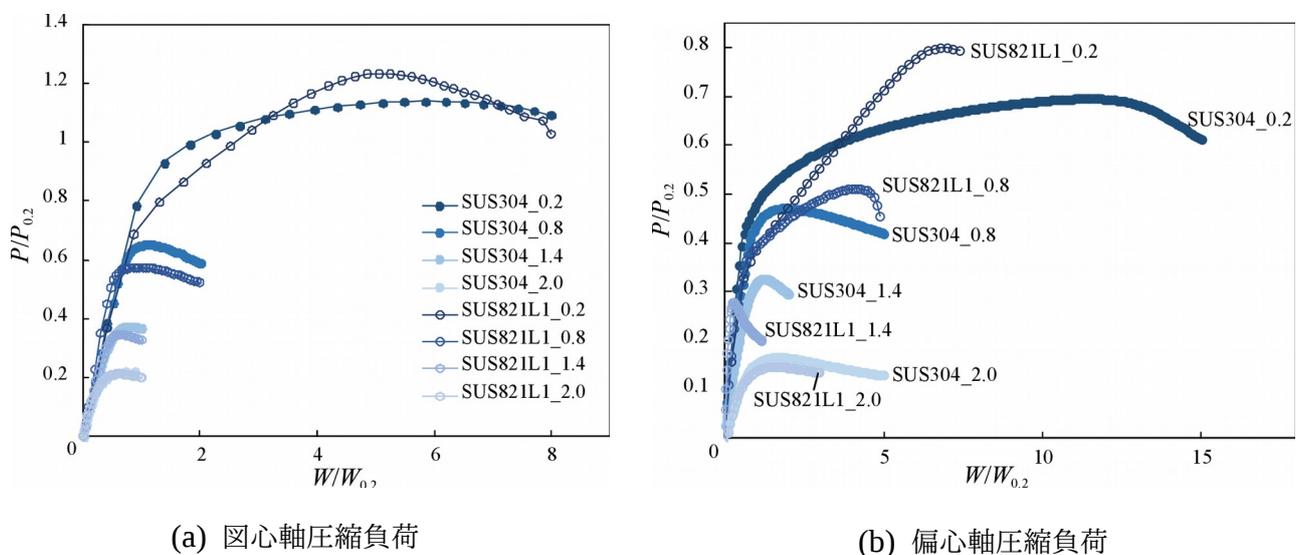


図3 圧縮方向荷重と変位の関係

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 Z 軸方向圧縮変位 W を山形断面柱の 0.2%耐力時の変位 $W_{0.2}$ で正規化した値を表している。同図の $\bar{\lambda}$ が 0.2 の結果について見ると、SUS304 製山形断面柱の荷重と変位の関係における勾配は、荷重の増加に伴い、初期勾配からほぼ連続的に緩やかに変化し、最大荷重に至ることがわかる。一方、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 の SUS821L1 製山形断面柱では、荷重が約 $0.5P_{0.2}$ を超える領域からの勾配の変化が SUS304 の結果に比べて明確に表れることが確認できる。これは、図 1 に示した対象としたステンレス鋼の応力ひずみ関係について、表 2 各種ステンレス鋼の割線勾配比とひずみ⁸⁾

強度クラス	$E_{0.2}/E$
$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\varepsilon_{0.2}/\varepsilon_{0.2H}$
205	43.7
345	51.7
400	56.0
450	57.7

SUS821L1 が SUS304 に比べて、塑性開始点とした 0.01%耐力からの勾配の変化が大きいことによる材料特性に依存した結果である。

図 4 は、対象としたステンレス鋼製山形断面柱について、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 W_u を 0.2%耐力時の変位 $W_{0.2}$ で正規化した値を意味する。また、ステンレス鋼は、図 1 で示したようにラウンドハウス型

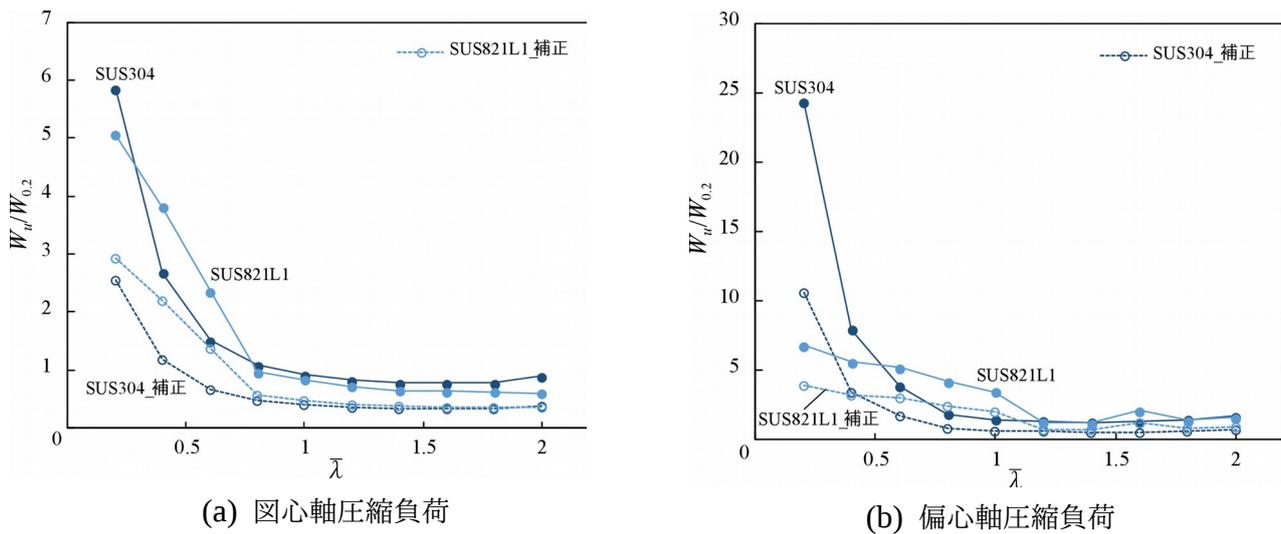


図 4 終局圧縮強度時の圧縮方向変位

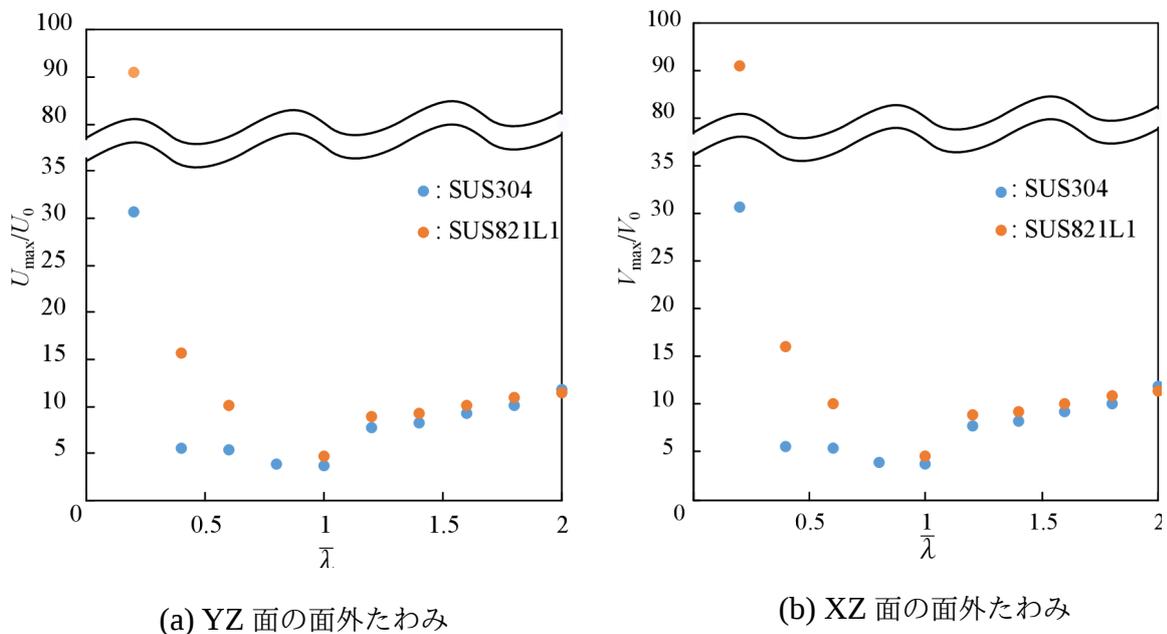


図 5 終局強度時の最大面外たわみ（図心軸圧縮負荷）

の応力ひずみ関係を有するため、フックの法則から算出した 0.2%耐力時の変位を用いて評価した場合、実際の応力ひずみ関係から得られるひずみの値より算出した変位に比べて小さくなる⁸⁾ことから、同図縦軸の評価が過大となる。そこで、表 2 に示す材料のヤング係数 E に対する 0.2%耐力点の割線勾配比を用いて算出した 0.2%耐力時の圧縮変位による補正值の結果を、図 4 中の白抜きプロットに示す。なお、表 2 中の記号は、 $E_{0.2}$ が 0.2%耐力点の割線勾配、 $\varepsilon_{0.2}$ が 0.2%耐力点でのひずみおよび $\varepsilon_{0.2H}$ がフックの法則を用いて算出した 0.2%耐力点でのひずみを意味する。図 4 の $\bar{\lambda}$ が 0.2 の SUS304 についてみると、同図(b)の偏心圧縮負荷の結果は、同図(a)の図心軸圧縮負荷の結果に比べて約 4.2 倍となる。この結果より、十分な塑性変形が生じた後に終局状態となる $\bar{\lambda}$ が 0.2 の柱では、材料特性の影響が大きくなり、偏心軸圧縮負荷の場合に終局圧縮強度時の圧縮変位が大きくなる。つぎに、図 4 における $\bar{\lambda}$ が 0.5 を超える全ての結果についてみると、SUS821L1 の $\bar{\lambda}$ が 0.6, 0.8 および 1.0 の結果を除いて、図心軸圧縮負荷と偏心軸圧縮負荷ほぼ同様の値となることが確認できる。

図 5 および図 6 は、対象としたステンレス鋼製等辺山形断面を構成する 2 辺の板について、図 2 に示した X 軸および Y 軸方向の面外変位が最大となる節点位置での終局強度時のたわみ U_{\max} および V_{\max} を、その点における初期たわみの大きさ U_0 および V_0 で正規化した値と細長比パラメータの関係を示す。図 5 および図 6 より、 $\bar{\lambda}$ が 0.2 のステンレス鋼製山形断面柱は、いずれの結果においても初期たわみの 10 倍以上の面外たわみが発生することがわかる。つぎに、図 5 の図心軸圧縮負荷の結果についてみると、 YZ 面および XZ 面の面外たわみは全ての細長比パラメータにおいて、ほぼ同一の結果となることが確認できる。これより、図心軸圧縮負荷時の終局強度時の変形形状は、山形断面を構成する板同士の角度が初期の直角状態から鋭角になることがわかる。そして、図 6 の偏心軸圧縮負荷の結果についてみると、SUS304 製山形断面柱の面外たわみは 2 辺における傾向の違いは見られないものの、SUS821L1 製の結果については細長比パラメータが 1.0 以下のモデルにおいて面外たわみの発生方向が 2 辺で逆転していることが確認できる。また、圧縮負荷を与える図 6(b)の XZ 面の面外たわみは、細長比パラメータが小さい領域にて同図(a)の結果に比べて大きくなり、細長比パラメータが大きい領域にて同図(a)の結果に比べて小さくなることを確認できる。この結果より、細長比パラメータが大きくなることで断面を

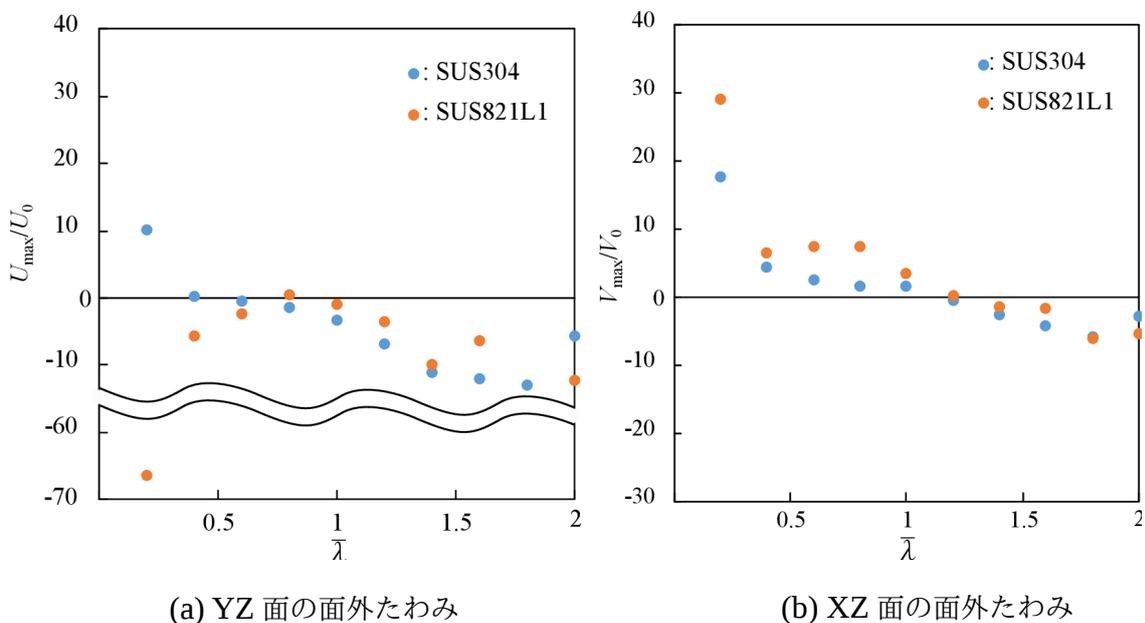


図 6 終局強度時の最大面外たわみ（偏心軸圧縮負荷）

構成する板の縦横比も大きくなり，図心位置に圧縮負荷を受ける側の辺では変形が発生しにくく，もう一方の辺では偏心の影響が顕著となり変形が大きく発生するといえる。

4. ステンレス鋼製山形断面柱の座屈照査法

図7は，数値解析により得られた対象としたステンレス鋼製等辺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，破線は道路橋示方書⁹⁾の耐荷力曲線を，一点鎖線は Eurocode¹⁰⁾におけるステンレス鋼の耐荷力曲線を表す。

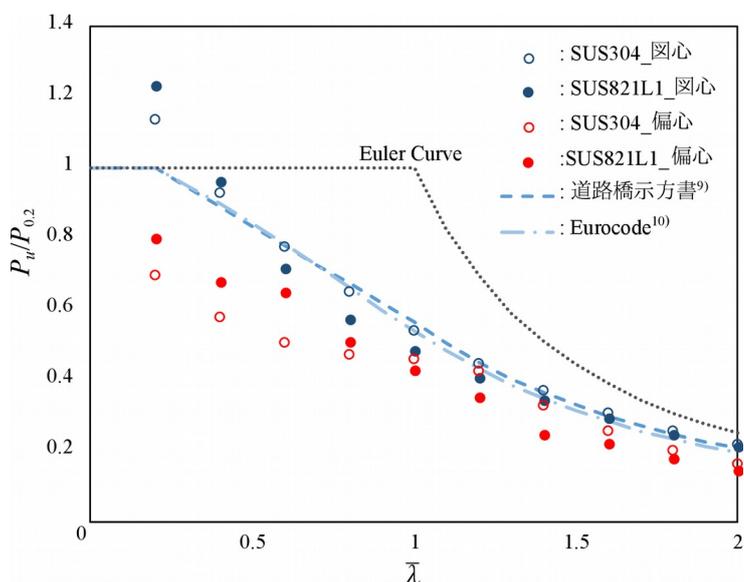


図7 ステンレス鋼製等辺山形断面柱の終局圧縮強度特性

同図より，本研究で対象とした図心軸圧縮負荷条件のステンレス鋼製山形断面柱の終局圧縮強度は，SUS304 で細長比パラメータが0.6から1.2の場合で最大約5%， SUS821L1 で細長比パラメータが0.6から1.8の場合で最大約17%，道路橋示方書の耐荷力曲線に比べて小さくなるのがわかる。また，偏心軸圧縮負荷条件の結果については，SUS304 および SUS821L1 の全てにおいて，道路橋示方書および Eurocode の耐荷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。この偏心軸圧縮負荷の終局圧縮強度評価については，偏心による低減率を考慮した耐荷力式に対する検証が必要である。

5. あとがき

本研究は，高機能橋梁の実現化に向けたステンレス鋼を2次部材使用することを目標として，基本となるステンレス鋼製等辺山形断面柱の圧縮強度特性を数値計算により明らかにするとともに，既往の設計法で示されている耐荷力曲線との比較を行った。本研究で得られた成果は，つぎの通りである。

- (1) 十分な塑性変形が生じた後に終局状態となる $\bar{\lambda}$ が0.2の柱では，材料特性の影響が大きくなり，偏心軸圧縮負荷の場合に終局圧縮強度時の圧縮変位が大きくなる。
- (2) 細長比パラメータが大きくなることで断面を構成する板の縦横比も大きくなり，図心位置に圧縮負荷を受ける側の辺では変形が発生しにくく，もう一方の辺では偏心の影響が顕著となり変形が大きく発生する。
- (3) SUS304 で細長比パラメータが0.6から1.2の場合で最大約5%， SUS821L1 で細長比パラメータが0.6から1.8の場合で最大約17%，道路橋示方書の耐荷力曲線に比べて小さくなる。

今後は，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。また，橋梁2次部材に使用されるT形，H形および溝形断面を有する柱の強度特性を，同様にして明らかにするとともに，ボルト接合による偏心負荷状態を考慮した耐荷力照査法の提案を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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, pp.122-134, 2010.
- 2) 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, Vol.20, No.79, pp.67-80, 2013.
- 3) 加藤健太郎, 宮寄靖大, 奈良敬: 単軸面内準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の圧縮強度特性と極限圧縮強度評価法, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.49-61, 2015.
- 4) 和田勇輝, 宮寄靖大: ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成される I 形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.92-105, 2017.
- 5) 井比亨, 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼と炭素鋼で構成される圧縮補剛板の強度評価法, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.78-91, 2017.
- 6) 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.
- 7) 宇佐美勉, 福本透士: ブ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.
- 8) 佐藤信輔, 宮寄靖大: 材料試験結果に基づくステンレス鋼の基準耐力時の弾性係数およびひずみ, 第 35 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp.26-27, 2017.11.
- 9) 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.
- 10) 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.