

# 偏心圧縮負荷を受けるステンレス鋼製溝形断面柱の強度特性

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

## 1. はじめに

ステンレス鋼は炭素鋼に比べて高い耐食性を有するため、長期間供用が求められる土木構造物に用いることで、従来の炭素鋼性構造物に比べて構造物のライフサイクルコストの低減が可能となる。しかし、ステンレス鋼製土木構造物の実現には、ステンレス鋼部材の強度特性を明らかにするとともに、設計法の確立が必要不可欠である。本研究では、橋梁二次部材に用いることを想定した溝形断面を有するステンレス鋼製柱がガセット位置から偏心圧縮負荷を受ける際の強度特性を数値計算により明らかにする。

## 2. 数値計算方法

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 および二相系（リーン型）ステンレス鋼 SUS821L1 とする。また、比較用として、これらのステンレス鋼と同程度の降伏強度を示す構造用炭素鋼 SS400 および SM570 を用いる。表 1 は、これら対象鋼種の機械的性質<sup>1),2)</sup>を示す。ここで、表中の  $E$  はヤング係数を、 $\sigma_F$  はステンレス鋼が 0.2% 耐力を、炭素鋼が降伏応力を、 $\nu$  はポアソン比を示す。また、図 1 は対象鋼種の応力ひずみ関係を示す。数値解析に用いるステンレス鋼の応力ひずみ関係は、式(1)で表される 2 区間とした Ramberg-

Osgood 曲線<sup>3)</sup>とする。また、炭素鋼の応力ひずみ関係は、引張試験により得られた結果を用いる。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + K_1 \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{n_1} & (\sigma < \sigma_c) \\ \frac{\sigma}{E} + K_2 \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{n_2} & (\sigma \geq \sigma_c) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 対象鋼種の機械的性質<sup>1),2)</sup>

鋼種	$E$ (GPa)	$\sigma_F$ (MPa)	$\nu$
SUS304	183	260	0.287
SUS821L1	203	486	0.226
SS400	205	333	0.292
SM570	210	638	0.304

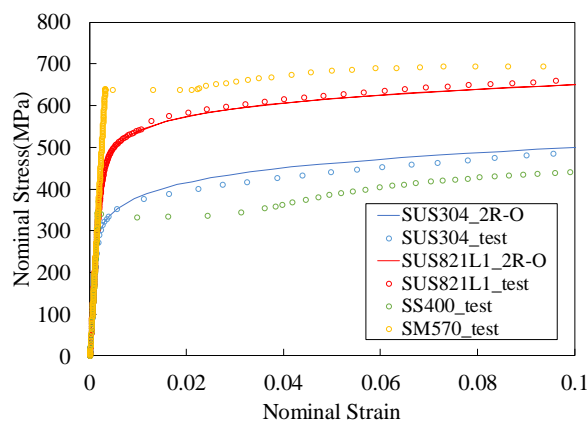


図 1 対象鋼種の応力ひずみ関係<sup>2),3)</sup>

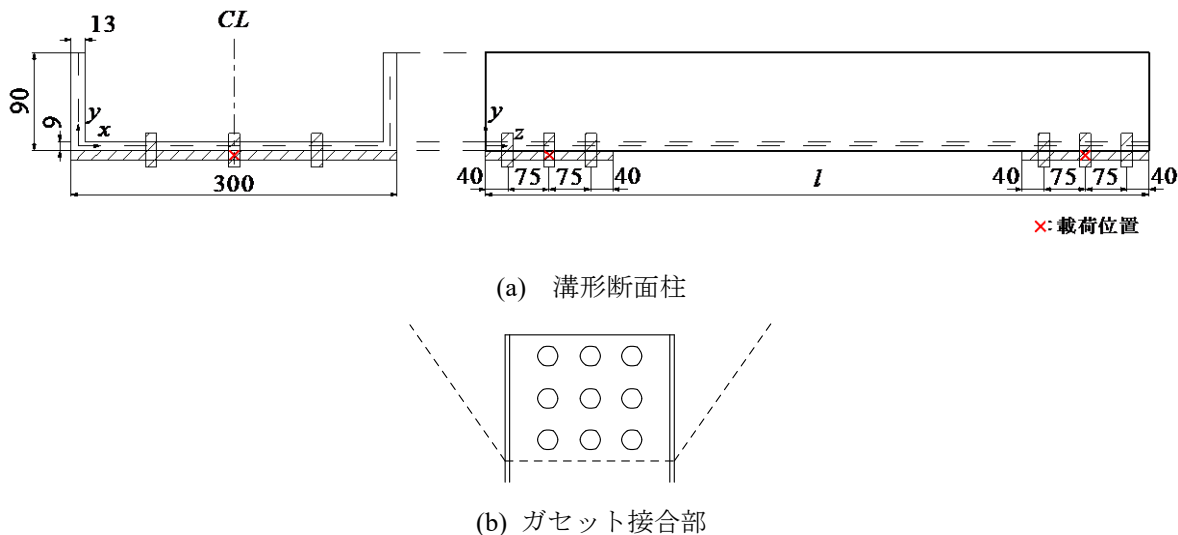


図 2 対象とする柱形状

図 2 は、本研究で対象とする溝形断面柱の形状および寸法を示す。柱の断面形状は、実橋での調査結果<sup>4,5)</sup>を参考に橋梁に最も用いられている形状寸法を採用する。同図の柱両端部のガセットとの接合については、道路橋示方書<sup>6)</sup>に従いガセットの板厚および高力ボルト本数を決定する。なお、これらの設計にあたっては、現道路橋示方書にてステンレス鋼を対象としていないため、0.2%耐力を降伏応力とした。

対象とする溝形断面柱の柱長さ  $l$  は、 $\bar{\lambda}$  が小さい場合には、図 2 に示すガセット先端部の高力ボルト同士が干渉する場合があるため、それらは除いた表 2 に示す範囲にて式(2)の細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  を 0.2 刻みで変化させて決定する。

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

数値計算では、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 に示す自己平衡を保つ矩形分布とし、引張側で  $\sigma_F$  および圧縮側で  $-0.3 \sigma_F$  とする。つぎに、初期たわみは、対象とする各柱モデルの固有値解析を行い、図 4 に示す柱全体座屈となる 1 次モードを採用し、その最大たわみ値  $V_{0-max}$  が  $l/1000$  となるようにして与える。

本研究で実施する数値計算では、8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いてウェブの引張残留応力部分を 2 分割、圧縮残留応力部分を 14 分割、フランジの圧縮残留応力部分を 4 分割、柱長さ方向の分割を各要素の縦横比が 1.0 程度となるようにして、有限要素離散化を行う。なお、本研究ではガセットプレートおよび高力ボルトのモデル化は行わない。また、これら数値計算モデルの幾何学的境界条件は、両端単純支持条件とし、負荷条件は、図 2 に示したガセット板厚および高力ボルト位置の中心に設けた仮想節点にて  $z$  軸方向への強制変位  $W$  として与える。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<sup>7)</sup>を用いる。

### 3. 数値計算結果

図 5 は、対象とした溝形断面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  $P$  を柱の全断面降伏荷重  $P_F$  で無次元化した値を、横軸は数値計算で与えた柱軸方向圧縮変位  $W$  を式(3)で定義する基準強度時の圧縮変位  $W_{F\_CS}$  で無次元化した値を意味する。なお、ステンレス鋼の

表 2 対象鋼柱の細長比パラメータの範囲

鋼種	SUS304	SUS821L1	SS400	SM570
$\bar{\lambda}$	0.4~2.0	0.6~2.0	0.4~2.0	0.8~2.0

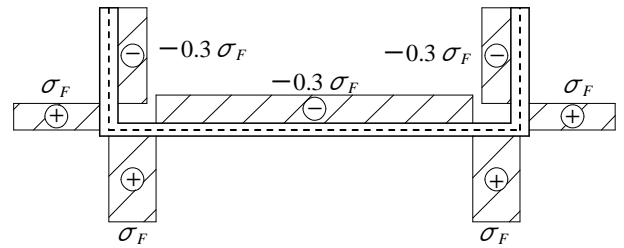


図 3 残留応力分布

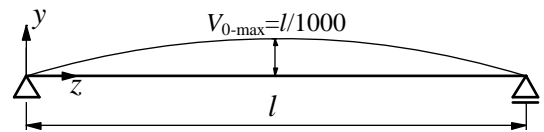


図 4 初期たわみ形状

表 3 基準耐力時の割線勾配比<sup>1)</sup>

鋼種	強度クラス	$E_{0.2}/E$ (%)
SUS304	$\sigma_{0.2}=205\text{MPa}$	43.7
SUS821L1	$\sigma_{0.2}=450\text{MPa}$	57.6

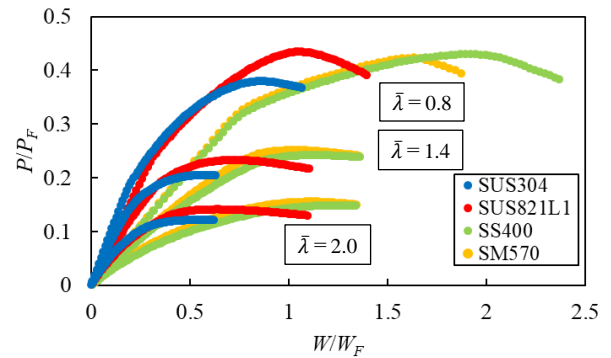


図 5 荷重変位関係

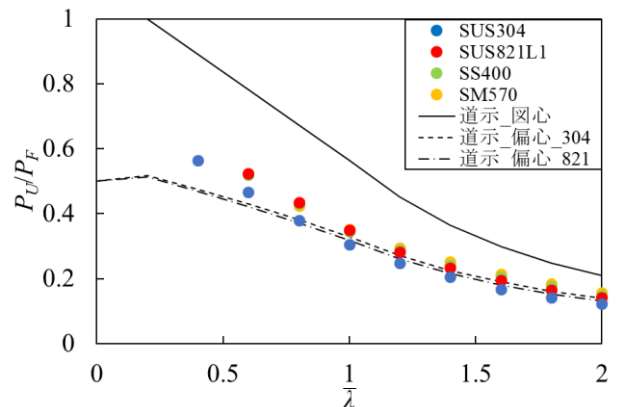


図 6 耐荷力曲線

場合は、応力ひずみ関係が図 1 に示した通りラウンドハウス型を示すため、表 3 に示す初期弾性係数  $E$  と、原点と 0.2%耐力点を結んだ直線の勾配との割線勾配比  $\lambda$  による補正を行った、式(4)で定義する  $W_{F\_SUS}$  とする。

$$W_{F\_CS} = \frac{\sigma_F l}{E} \quad (3)$$

$$W_{F\_SUS} = \frac{\sigma_F l}{E \frac{E_{0.2}}{E}} \quad (4)$$

同図より、SUS304 および SUS821L1 製溝形断面柱の結果は、同様の傾向がみられることがわかる。また、ステンレス鋼製柱の結果は、炭素鋼製柱の結果に比べて初期勾配が大きくなることがわかる。

図 6 は、対象とした溝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。ここで、同図の縦軸は数値計算により得られた最大圧縮荷重  $P_U$  を各柱の基準耐力時の荷重  $P_F$  で無次元化した値を意味する。なお、同図の実線は箱形断面以外の柱に関する道路橋示方書の耐荷力曲線を、破線および一点鎖線はそれぞれ SUS304 および SUS821L1 の材料特性値を代入した道路橋示方書の山形および T 形断面柱に関する偏心圧縮荷重を受ける場合の耐荷力曲線を表している。同図より、SUS304 製溝形断面柱の終局圧縮強度は偏心圧縮荷重を受ける柱に関する道路橋示方書の強度評価値に対して、 $\bar{\lambda}$  が 0.4 および 0.6 の場合に 1.08 倍から 1.19 倍、 $\bar{\lambda}$  が 0.8 以上の場合に 0.87 倍から 0.99 倍程度となる。SUS821L1 製溝形断面柱の終局圧縮強度は偏心圧縮荷重を受ける柱に関する道路橋示方書の強度評価値に対して、1.08 倍から 1.24 倍程度となる。また、ステンレス鋼製溝形断面柱の終局圧縮強度は、SUS821L1 の  $\bar{\lambda}$  が 0.8 の場合を除き、炭素鋼の結果の 0.81 倍から 0.99 倍程度となる。

図 7 は、対象とした溝形断面柱の終局圧縮強度時の軸方向圧縮変位と細長比パラメータの関係を示す。ここで、同図の縦軸は数値計算で得られた終局圧縮強度時の軸方向圧縮変位  $W_U$  を式(3)および式(4)で定義した基準耐力時の圧縮変位  $W_F$  で無次元化した値を意味する。同図より、細長比パラメータの増加に伴い、ステンレス鋼製溝形断面柱の終局強度時の軸方向圧縮変位は減少する傾向がみられる。また、炭素鋼製柱の結果と比較すると、SUS304 で 0.44 倍から 0.56 倍程度、SUS821L1 で 0.57 から 0.70 倍程度となる。

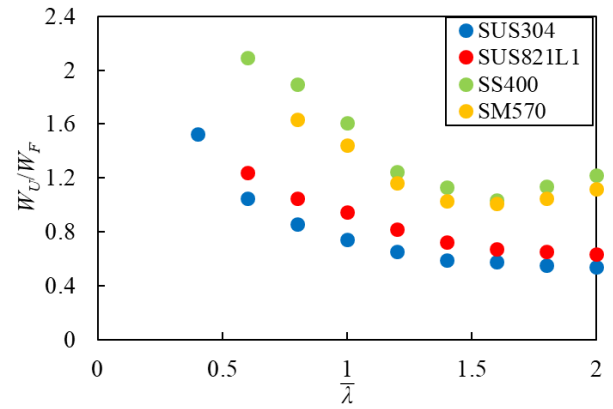


図 7 終局強度時の軸方向圧縮変位

#### 4. おわりに

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本研究で対象としたステンレス鋼製溝形断面柱の荷重と変位の関係は、SUS304 と SUS821L1 で同様の傾向を示す。
- (2) 本研究で対象とした SUS304 製溝形断面柱の終局圧縮強度は、偏心圧縮荷重を受ける柱に関する道路橋示方書の強度評価値に対して、 $\bar{\lambda}$  が 0.4 および 0.6 の場合に 1.08 倍から 1.19 倍程度となる。
- (3) 本研究で対象とした SUS821L1 製溝形断面柱の終局圧縮強度は、偏心圧縮荷重を受ける柱に関する道路橋示方書の強度評価値に対して、1.08 倍から 1.24 倍程度となる。
- (4) 本研究で対象としたステンレス鋼製溝形断面柱の終局圧縮強度は、SUS821L1 の  $\bar{\lambda}$  が 0.8 の場合を除き、炭素鋼の結果の 0.81 倍から 0.99 倍程度となる。
- (5) 本研究で対象としたステンレス鋼製溝形断面柱の終局強度時の軸方向圧縮変位は、炭素鋼製柱の結果と比較すると、SUS304 で 0.44 倍から 0.56 倍程度、SUS821L1 で 0.57 から 0.70 倍程度となる。

#### 謝辞

本研究は、土木研究所、日本鋼構造協会、日本橋梁建設協会、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。関係の皆様深く感謝いたします。

## 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.
- 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き合わ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.
- 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) 松尾淳史, スタピットシラネー, 澁谷敦, 志村保美, 小林裕輔, 小野潔: ガセットプレートを有するステンレス長柱の耐荷力実験, 鋼構造年次論文報告集, 27 巻, pp.278-284, 2019.
- 5) A.MATSUO , S.STHAPIT , A.SHIBUYA , Y.SHIMURA , Y.KOBAYASHI , K.ONO : AN EXPERIMENTAL STUDY ON BUCKLING STRENGTH OF STAINLESS STEEL COLUMNS WITH GUSSET PLATES, 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 2019.
- 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) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC Software Corporation, 2022.