

# 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エネルギー吸収能

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○加藤 健太郎  
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、構造用炭素鋼に比べて、優れた耐食性を有する。そのため、ステンレス鋼を主部材に使用した土木構造物は、維持管理の観点から有効であり、耐久性の向上による超長期的な供用が可能となる。また、ステンレス鋼は、炭素鋼に比べて、低降伏比を示すことから、塑性化に伴うエネルギー吸収が期待できる。このような構造部材へのステンレス鋼の活用に向けては、繰返し荷重下におけるステンレス鋼部材の力学的挙動を明確にし、我が国を含む地震多発地域での使用を考慮した設計法の確立が不可欠である。

本研究では、準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板のエネルギー吸収能を数値計算<sup>1)</sup>により明らかにすることを目的とする。これらの結果は、同様にして数値計算を行う炭素鋼板の結果と比較しながら示す。

## 2. 数値計算法

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, SUS316 および SUS304N2, フェライト系ステンレス鋼 SUS410L, 二相系ステンレス鋼 SUS329J3L である。また、これらのステンレス鋼と比較する炭素鋼は、材料強度がほぼ等しい関係にある、SM400(SUS304, SUS316 および SUS410L と比較), SM490Y(SUS304N2 と比較), SM570(SUS329J3L と比較)を用いる。表 1 は、対象とする材料の機械的性質<sup>2), 3)</sup>を示す。表中の記号は、 $E$  が弾性係数を、 $\nu$  がポアソン比を、 $\sigma_{0.01}$  が 0.01% 耐力を、 $\sigma_{0.2}$  または  $\sigma_y$  が 0.2% 耐力または降伏応力を、 $\sigma_u$  が引張強度を、 $(\sigma_{0.2} \text{ or } \sigma_y) / \sigma_u$  が降伏比を表す。これらの材料は、数値計算において、図 1 に示すマルチリニア型の近似による応力塑性ひずみ関係を用いて表現する。なお、ステンレス鋼は、図 1 に示すように、炭素鋼に現れる明確な降伏点を持たず、初期弾性域から連続的に非線形領域に遷移するため、塑性開始

点を 0.01% 耐力点とする。さらに、数値計算に用いる材料モデルは、J2 流れ則に従い、式(1)に示す移動硬化率  $f_h$  を 0.5 とした複合硬化則を仮定する。

$$f_h = \frac{3 d\bar{\alpha}}{2 d\bar{\epsilon}^p} \quad (1)$$

ここで、 $d\bar{\alpha}$  は相当背応力増分を、 $d\bar{\epsilon}^p$  は相当塑性ひずみ増分を表す。

図 2 は、本研究で対象とする周辺単純支持板を示す。板の形状は、載荷辺長  $b$  を 150mm、縦横比  $\alpha (=ab)$  を 1.0 とする。また、板厚  $t$  は、式(2)に示す幅厚比パラメータ  $\bar{\lambda}_p$  を 0.3 から 1.3 まで 0.2 刻みで変化させて決定する。

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (2)$$

ここで、 $k$  は板の座屈係数(=4.0)を表す。なお、炭素鋼では、式中の  $\sigma_{0.2}$  を  $\sigma_y$  に置換する。対象とする周辺単純支持板は、初期不整として、残留応力および初期たわみを考慮する。初期不整の分布形状と大きさについては、文献 4) を参照されたい。

数値計算モデルは、変形の対称性を考慮して、図 2 に示す板の  $Y$  軸方向の  $b/2$  部分を対象とする。対象領域は、 $20 \times 8$  分割とし、8 節点シェル要素を用いて有限要素離散化を行う。同モデルに与える準静的負荷は、図 2 に示す板の  $X=a$  の載荷辺にて、図 3 に示すような圧縮変位を先行させた両振りの定振幅 6 サイクルの強制変位とする。これらの強制変位の大きさは、0.2% 耐力時の変位  $u_{0.2}$  または降伏応力時の変位  $u_y$  (以降、降伏変位とする)の整数倍で与え、図 3 中に示す  $n$  を 1, 2 または 3 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<sup>1)</sup>を用いて行う。

## 3. 数値計算結果および考察

### 3. 1 荷重と変位の関係

図 4 から図 6 は、幅厚比パラメータ  $\bar{\lambda}_p$  が 0.3, 0.7

キーワード ステンレス鋼, 複合硬化則, 周辺単純支持板, 準静的負荷, エネルギー吸収能

表 1 対象鋼種の材料特性<sup>2), 3)</sup>

| 鋼種        | $E$<br>(GPa) | $\nu$ | $\sigma_{0.01}$<br>(MPa) | $\sigma_{0.2}$ or $\sigma_y$<br>(MPa) | $\sigma_u$<br>(MPa) | $(\sigma_{0.2} \text{ or } \sigma_y) / \sigma_u$ |
|-----------|--------------|-------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| SUS304    | 157          | 0.3   | 146                      | 261                                   | 697                 | 0.374                                            |
| SUS316    | 174          | 0.3   | 162                      | 254                                   | 561                 | 0.452                                            |
| SUS410L   | 199          | 0.3   | 241                      | 350                                   | 486                 | 0.720                                            |
| SUS304N2  | 173          | 0.3   | 253                      | 402                                   | 723                 | 0.557                                            |
| SUS329J3L | 202          | 0.3   | 346                      | 533                                   | 749                 | 0.712                                            |
| SM400     | 200          | 0.3   | —                        | 249                                   | 417                 | 0.597                                            |
| SM490Y    | 200          | 0.3   | —                        | 388                                   | 543                 | 0.715                                            |
| SM570     | 206          | 0.3   | —                        | 504                                   | 593                 | 0.850                                            |

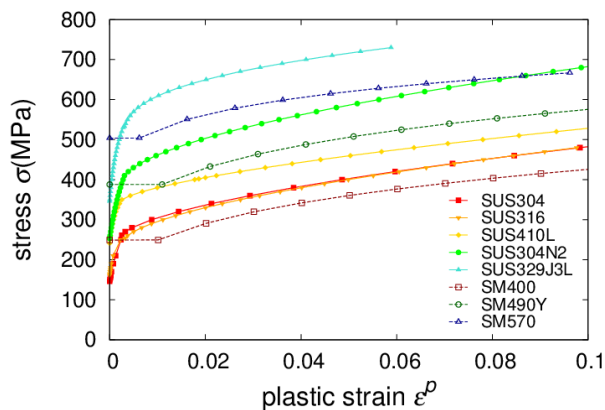


図 1 応力塑性ひずみ関係

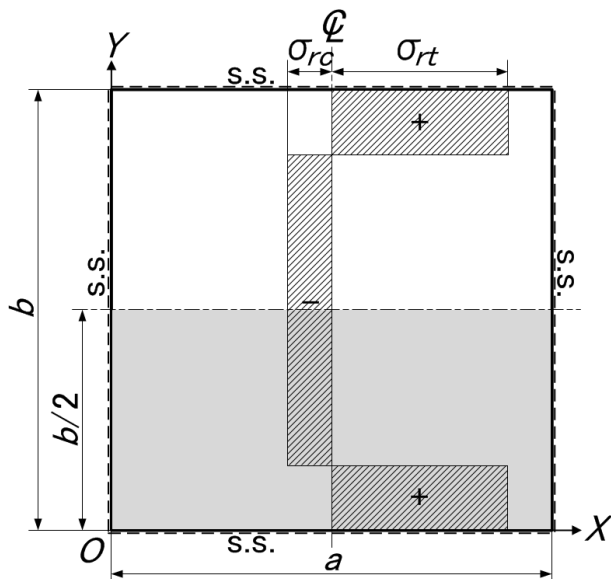


図 2 周辺単純支持板

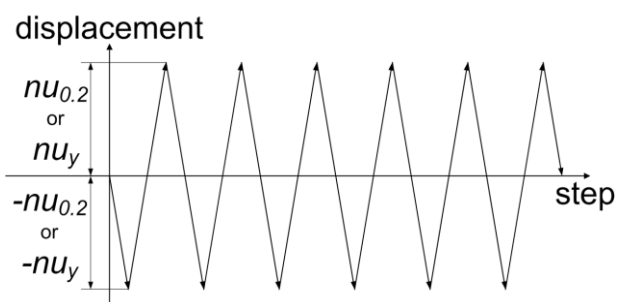


図 3 準静的負荷条件

および 1.1 の SUS304 と SM400 について、強制変位量を降伏変位の 1 から 3 倍とした場合の荷重と変位の関係を示す。これらの図の縦軸は数値計算で得られた載荷辺での荷重  $P$  を、横軸は強制変位量  $u$  を表す。これらの図より、対象としたステンレス鋼板の荷重と変位の関係は、比較した炭素鋼板に比べて、サイクル数増大に伴う塑性化の進行が大きいことがわかる。これは、ステンレス鋼が明確な降伏点を持たず、初期弾性域から連続的なひずみ硬化を発生するためである。つぎに、図 5 および図 6 に示す強制変位量を降伏変位の 2 および 3 倍とした場合の周辺単純支持板の荷重と変位の関係は、図 4 に示す強制変位量を降伏変位の 1 倍とした場合に比べて、十分な塑性化の進行が確認できる。また、幅厚比パラメータが 0.3 の周辺単純支持板の荷重と変位の関係は、それぞれの強制変位量を与えた場合において、幅厚比パラメータが 0.7 および 1.1 の板に比べて、サイクル数の増大に伴う応力上昇が大きくなることがわかる。これは、幅厚比パラメータが小さい板の強度が材料強度に大きく依存することを示している。なお、紙面の都合上割愛するその他の材料および幅厚比パラメータの場合についても、同様の結果を得る。

### 3. 2 ステンレス鋼周辺単純支持板のエネルギー吸収能

図 7 および図 8 は、強制変位量を降伏変位の 1 倍および 3 倍とした場合のステンレス鋼周辺単純支持板のエネルギー吸収能と幅厚比パラメータの関係を示す。これらの図の縦軸に示す吸収エネルギー  $E_{ab}$  は、図 4 から図 6 に示した荷重と変位の関係で囲まれる面積から算出している。まず、図 7 より、対象としたステンレス鋼の吸収エネルギーは、比較した炭素鋼に比べて、約 1.0 から 4.5 倍の大きさとなることがわかる。つぎに、図 8(a) より、対象としたステンレ

ス鋼の吸収エネルギーは、比較した炭素鋼に比べて、SUS304 が約 1.6 から 1.7 倍、SUS316 が約 1.3 倍、SUS410L が 2.3 から 2.4 倍の大きさとなることからわかる。また、図 8 (b) および (c) より、SUS304N2 および SUS329J3L の吸収エネルギーは、比較した炭素鋼に

比べて、約 1.4 倍および約 1.2 倍の大きさとなることからわかる。これらの結果は、ラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示すステンレス鋼が、降伏棚を有する炭素鋼に比べて、低降伏比を示し、連続した応力上昇を発生するためである。

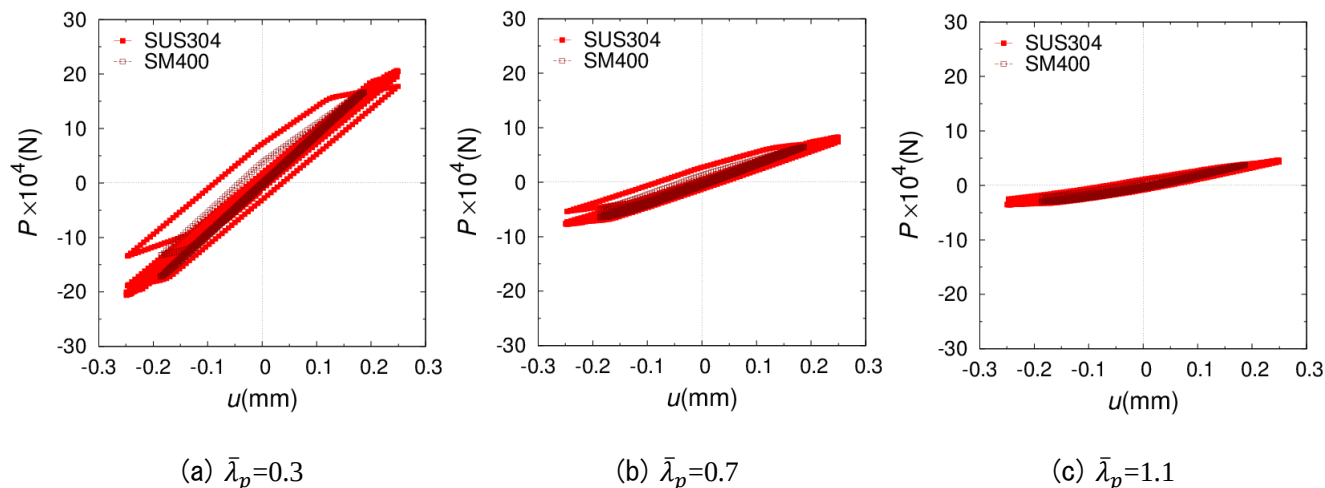


図 4 強制変位量 =  $(\pm u_{0.2} \text{ or } \pm u_y)$  を与えた場合の荷重と変位の関係

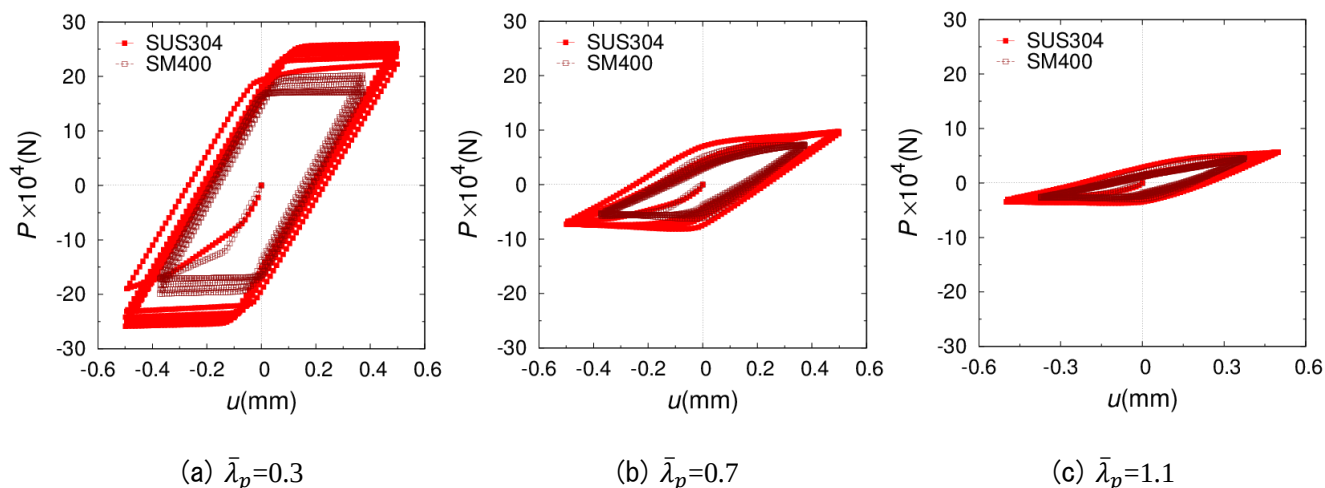


図 5 強制変位量 =  $(\pm 2u_{0.2} \text{ or } \pm 2u_y)$  を与えた場合の荷重と変位の関係

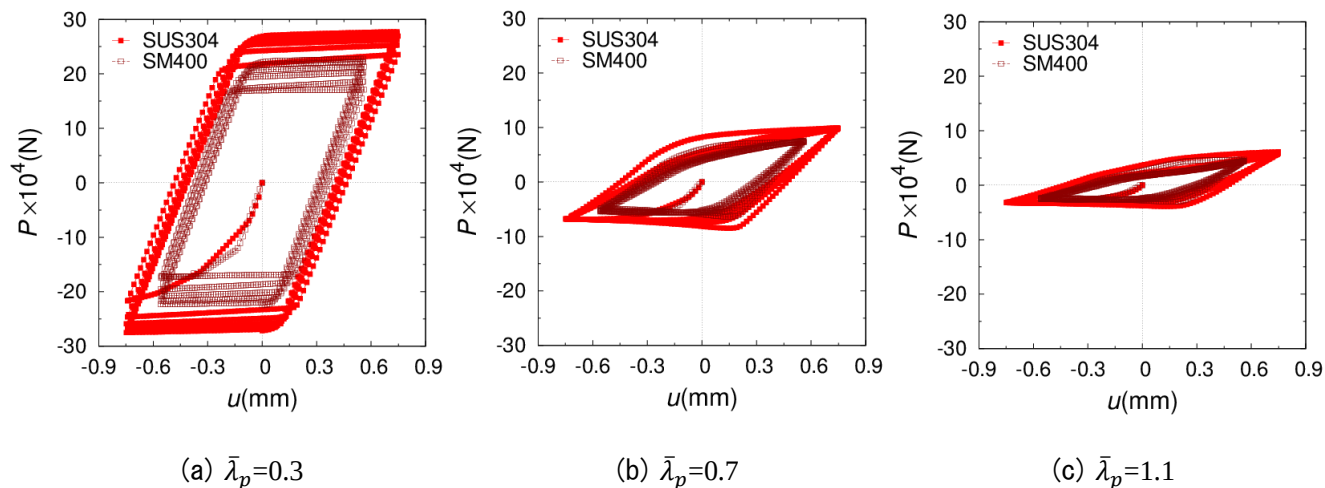
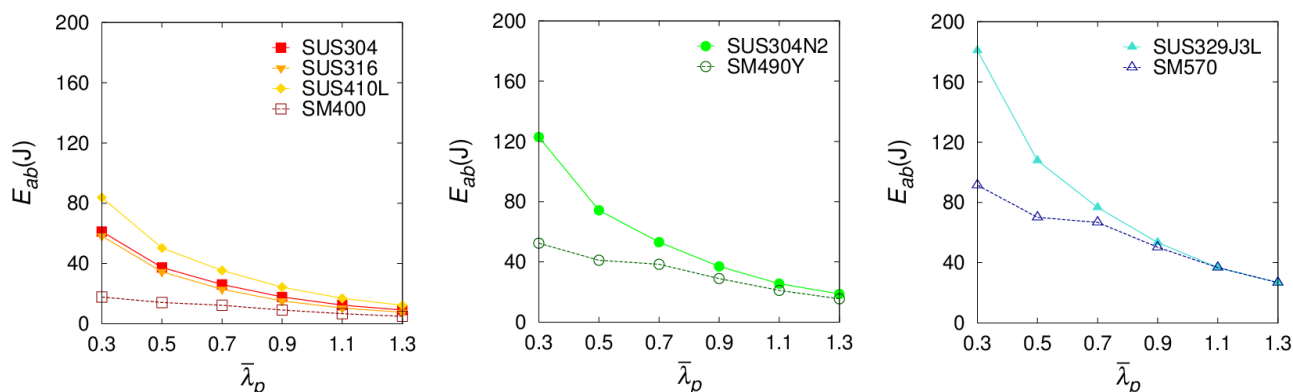
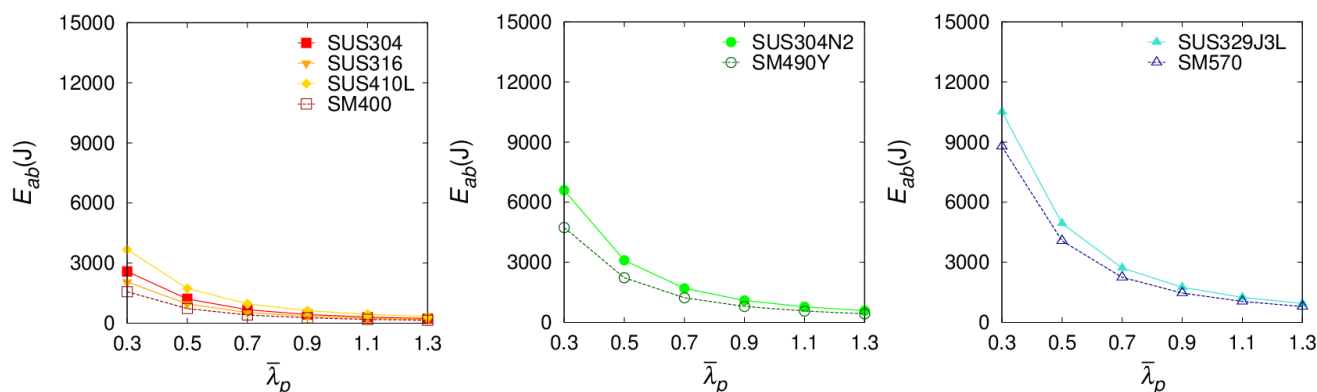


図 6 強制変位量 =  $(\pm 3u_{0.2} \text{ or } \pm 3u_y)$  を与えた場合の荷重と変位の関係



(a) SUS304, SUS316, SUS410L と SM400 (b) SUS304N2 と SM490Y (c) SUS329J3L と SM570

図 7 強制変位量=  $(\pm u_{0.2}$  or  $\pm u_y$ )を与えた場合のエネルギー吸収能と幅厚比パラメータの関係



(a) SUS304, SUS316, SUS410L と SM400 (b) SUS304N2 と SM490Y (c) SUS329J3L と SM570

図 8 強制変位量=  $(\pm 3u_{0.2}$  or  $\pm 3u_y$ )を与えた場合のエネルギー吸収能と幅厚比パラメータの関係

以上の結果は、繰返し荷重下において、塑性化後のひずみの増加に伴う応力上昇が大きいステンレス鋼板のエネルギー吸収能が炭素鋼のそれに比べて、優れる結果を示している。

#### 4. おわりに

本研究で得られた内容は、つぎの通りである。

- (1) 準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の荷重と変位の関係は、材料強度が同等の炭素鋼に比べて、繰返し数増大に伴う塑性化の進行が大きくなる。
- (2) 準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板のエネルギー吸収能は、降伏変位と同等の強制変位量を与えた場合、比較した炭素鋼のエネルギー吸収能に比べて、約 1.0 から 4.5 倍大きくなる。
- (3) 準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板のエネルギー吸収能は、降伏変位の 2 または 3 倍の強制変位量を与えた場合、比較した炭素鋼のエネルギー吸収能に比べて、約 1.1 から 2.4 倍大きくなる。

#### 参考文献

- 1) MSC. Software Co.: Marc : User's Guide, MSC. Software Corporation, 2010.
- 2) 奈良敬, 出口恭司, 小松定夫: ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.141-150, 1987.
- 3) 宮寄靖大, 奈良敬: 無補剛ステンレス圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.122-134, 2010.
- 4) 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板の強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp.131-138, 2013.