

面内純曲げを受けるステンレス鋼板の強度特性
Strength Behavior for Stainless Steel Plate under in-plane bending

○宮寄 靖大*
Yasuhiro MIYAZAKI

奈良 敬**
Satoshi NARA

ABSTRACT This study clarifies ultimate strength behavior of simply supported stainless steel plates under in-plane bending. Firstly, material properties of promising stainless steels for civil structures are described. Secondly, a numerical model of the plates with initial imperfections for elasto-plastic analysis is explained. Thirdly, numerical analysis is demonstrated in order to show the validity of the numerical results, and to clarify the ultimate strength behavior. Finally, the ultimate strength of the plate is discussed in comparison with that of carbon steel plates.

Keywords: ステンレス鋼, 面内純曲げ, 周辺単純支持板, 終局強度

Stainless steel, in-plane bending, simply supported plate, ultimate strength

1. はじめに

ステンレス鋼は、土木構造物の維持管理性の観点から良好な材料である。ステンレス鋼は、既に欧米等での鋼構造物の規準類^{1), 2)}にてその設計法が整備されている。また、橋梁などの構造物の主部材への使用実績がある^{3), 4)}。我が国でも、建築分野においては、オーステナイト系ステンレス鋼を対象とした設計規準⁵⁾が整備されており、ステンレス鋼製建築構造物が実在する。

一般的に、材料強度が同程度のステンレス鋼と炭素鋼を比較した場合、ステンレス鋼は明確な降伏点が現れず、降伏点に相当する0.2%耐力時のひずみが炭素鋼に比べて大きくなる。前述した既往の設計規準類は、炭素鋼の設計法を基に、材料特性のみを考慮したパラメータの変化により、強度評価を行う形式を採用している。この点について、Mahmudら⁶⁾は、ステンレス鋼の応力ひずみ関係に基づき、既往の設計法に比べて精度が優れる終局強度評価法を提案している。このような評価法

は、既往の実験結果に基づいているものの、土木鋼構造物にみられる、鋼板を溶接組立てた断面のみに着目していないのが現状である。今後、土木構造物へのステンレス鋼活用には、鋼構造物の基本要素である板の強度特性を明らかにし、その強度評価法を明示する必要がある。

本研究は、面内純曲げ負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板を対象として、数値計算⁷⁾により、それらの強度特性を明らかにする。まず、これまでに、著者ら⁸⁾が明らかにしてきた数値計算に使用するステンレス鋼の材料特性を示す。つぎに、対象とするステンレス鋼周辺単純支持板および数値計算法について説明する。最後に、数値計算により得られた結果を用いて、面内純曲げ負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の強度特性を明らかにする。このようなステンレス鋼周辺単純支持板の面内曲げ強度特性は、対象とするステンレス鋼と同程度の材料強度で構成される炭素鋼板の強度特性と比較することで明らかにする。

*博士 (工学) 長岡工業高等専門学校環境都市工学科助教
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888) 準会員

**工博 大阪大学大学院工学研究科教授
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) 第2種正会員

表 1 対象鋼種の材料特性

Steel	E (GPa)	ν	$\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)
SUS304	157	0.3	261
SUS316	174	0.3	254
SUS304N2	173	0.3	402
SUS410L	199	0.3	350
SUS329J3L	202	0.3	533
SM400	200	0.3	249
SM490Y	200	0.3	388
SM570	206	0.3	504

2. 材料特性

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 の 5 鋼種である。これらのステンレス鋼に対応する炭素鋼は、材料強度に着目し、SUS304, SUS316 および SUS410L に SM400, SUS304N2 に SM490Y, SUS329J3L に SM570 として選定した。表 1 は、対象とする鋼種の機械的性質^{8), 9)}を示す。同表中の記号は、 E がヤング係数を、 μ がポアソン比を、 $\sigma_{0.2}$ および σ_y が 0.2%耐力および降伏応力を意味する。

数値計算に使用するステンレス鋼の応力ひずみ関係は、0.01%耐力点を塑性開始点とした応力塑性ひずみ関係を用い、図 1 に示すマルチリニア近似により表現する。同図中には、比較する炭素鋼の応力塑性ひずみ関係を同様に示している。

3. 数値計算法

3.1 板の形状および解析モデル

図 2 は、本研究で対象とする面内純曲げを受ける周辺単純支持板を示す。周辺単純支持板の形状は、縦横比 α を 0.3, 0.5, 2/3 および 0.75 の 4 パターンと非載荷辺の長さ a を変化させて決定し、各縦横比について式(1)の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を 0.3 から 1.3 まで 0.2 刻みで板厚 t を変化させて決定する。

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

ここで、 k は板の座屈係数(=23.9)を表す。なお、炭素鋼では $\sigma_{0.2}$ を σ_y に置き換えて $\bar{\lambda}_p$ を算出する。数値計算に用いる解析モデルは、不完全系として

初期たわみおよび残留応力を考慮する。これらのステンレス鋼の初期不整は、これまでに明らかにしたステンレス鋼板の実験結果¹⁰⁾を基に、炭素鋼と同等として扱う。まず、初期たわみ W_0 は板中央部で最大たわみが生じる式(2)および純曲げ時の圧縮部の重心位置で最大たわみが生じる式(3)で与える。

$$W_0 = W_{0\max} \cos \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b} \quad (2)$$

$$W_0 = W_{0\max} \cos \frac{\pi X}{a} \left(c_2 \sin \frac{2\pi Y}{b} + c_4 \sin \frac{4\pi Y}{b} \right) \quad (3)$$

ここで、 $W_{0\max}$ は初期たわみの最大値(= $b/250$)を意味する。また、式(3)に含まれる c_2 および c_4 は 1 および 2 波の正弦波形を考慮する際に決定した係数である。図 3 は、本研究で考慮する式(3)による初期たわみ形状と奈良¹¹⁾の初期たわみ

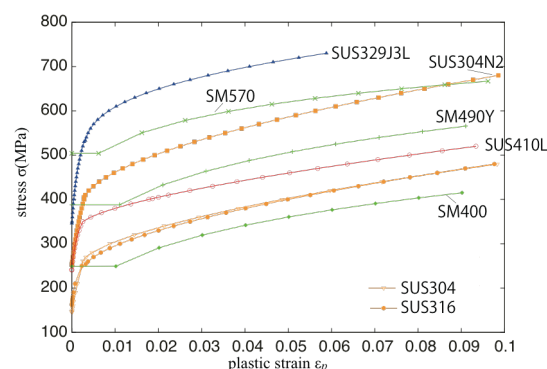


図 1 応力 σ 塑性ひずみ ε_p 関係

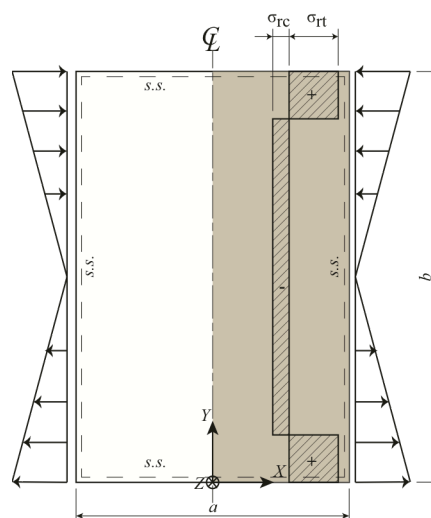


図 2 面内純曲げ負荷を受ける周辺単純支持板

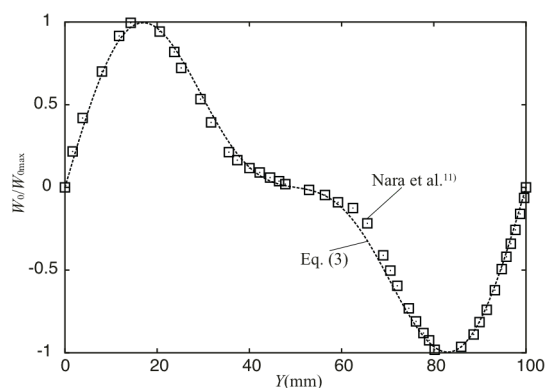


図3 初期たわみ形状

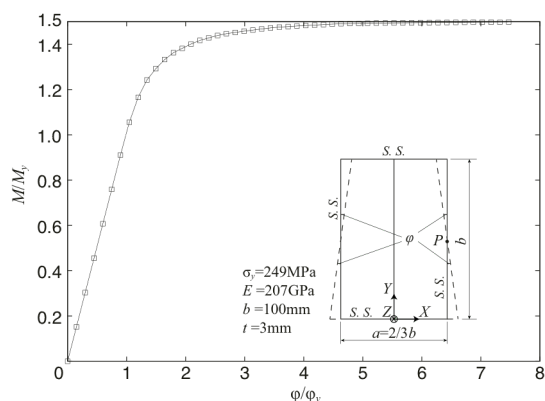


図4 曲げモーメントと回転角の関係

形状を比較して表している。同図の縦軸は図2の $X=0$ の軸に関する板の面外初期たわみ W_0 を W_{0max} で無次元化したものを、横軸は図2の Y 軸に関する座標値を表している。ここでは、奈良ら¹¹⁾のデータと一致させて式(3)を用いることとする。つぎに、残留応力は図2中に示すように、圧縮残留応力を $-0.3\sigma_{0.2}$ (炭素鋼では $-0.3\sigma_y$)、引張り残留応力を $\sigma_{0.2}$ (炭素鋼では σ_y) として自己平衡を保つ矩形分布で与える。解析モデルは、変形の対称性を考慮して板の長さ方向 $a/2$ を対象とし、有限要素による離散化は、8節点シェル要素(要素番号22⁷⁾)を使用する。数値計算は、面内純曲げ条件を満たすため、 $X=a/2$ にて剛性が十分大きい2節点はり要素を設け、 $Y=b/2$ 点に Z 軸まわりの強制回転角を漸増させた変位増分法を採用する。解析条件は、大変形大ひずみを考慮し、J2材料および比例負荷のため等方硬化に従う材料として仮定する。

3.2 妥当性の検証

図4は、本研究に用いる数値計算法の妥当性を検証するため、同図中に示す周辺単純支持板が面内純曲げ負荷を受ける際の曲げモーメントと面内

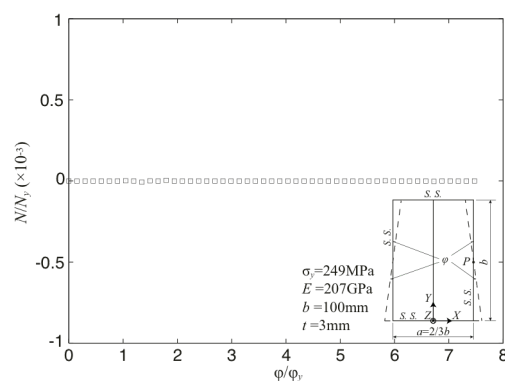


図5 X 座標軸に関する軸力と回転角の関係

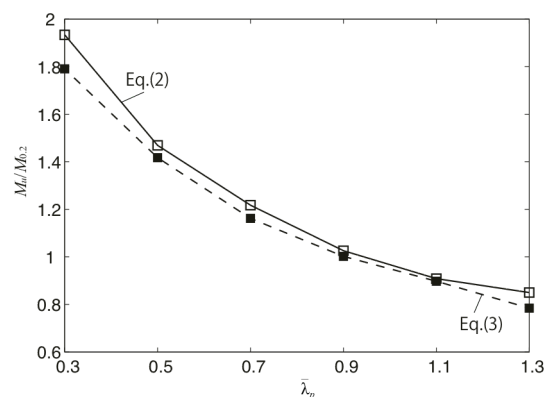


図6 初期たわみ形状による終局面内曲げ強度特性(SUS304)

回転角の関係を表す。検証した周辺単純支持板は、完全系として、十分な塑性化が進行する形状とし、その材料特性を弾完全塑性体として扱っている。同図の縦軸は計算により得られた点 $P(b/3, b/2)$ での曲げモーメント M を降伏時の曲げモーメント M_y で除した値を、横軸は点 P での作用回転角 ϕ を降伏時の回転角 ϕ_y で除した値を示している。同図の数値計算では、材料を弾完全塑性体として扱っているため、理論値において全塑性モーメントは $1.5M_y$ となる。プロットで表す数値計算結果は、 $1.0M_y$ 点まで、曲げモーメントと回転角の関係が線形で、その後断面が弾塑性状態となり、横軸の値が約7.5のとき、曲げモーメントが $1.498 M_y$ という結果を得た。また、図5は、前述と同じ数値計算で得られた X 軸方向の軸力と面内回転角の関係を示す。縦軸の軸力は $X=b/3$ の辺において、発生する軸力 N を断面降伏時の軸力 N_y で無次元化したものを表し、横軸の面内回転角は図4と同様である。図5より、数値計算の全ステップわたって、軸力が生じないことが確認できる。以上より、本研究で使用する解析モデルは、妥当であると判

断し、以降のステンレス鋼周辺単純支持板の面内純曲げ負荷時の強度特性を述べる。

4. 数値計算結果および考察

4.1 初期たわみ形状による比較

図6は、縦横比が2/3のSUS304製周辺単純支持板について、初期たわみ形状を式(2)および式(3)で与えた場合の終局面内曲げ強度と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を表している。縦軸の終局面内曲げ強度は、数値計算で得られた図2の(a/2, b/2)点での終局面内曲げモーメント M_u を0.2%耐力に相当する曲げモーメント $M_{0.2}$ で無次元化して表している。同図より、初期たわみ形状の違いによる終局面内曲げ強度は、式(3)で与える初期たわみ形状が全ての $\bar{\lambda}_p$ において、式(2)の結果に比べて小さくなることわかる。また、本研究で対象とした全てのステンレス鋼も同様の結果が得られ、式(3)を採用した場合の終局面内曲げ強度は、式(2)を採用した場合に比べて平均で約3%小さくなる結果を得た。そこで、以下の数値計算では、面内曲げが作用する際に、その圧縮部の重心位置近傍で最大面外たわみが発生する式(3)の初期たわみを考慮した結果について述べる。

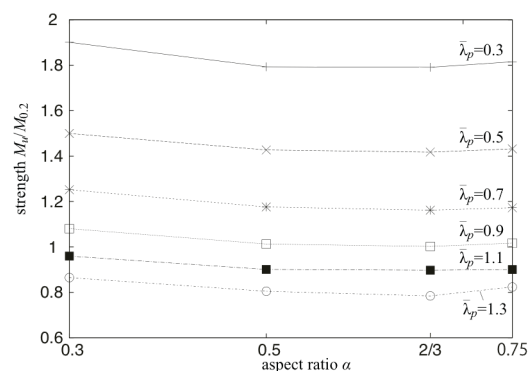
4.2 終局面内曲げ強度と縦横比

図7は、SUS304, SUS410L および SUS329J3L の終局面内曲げ強度と縦横比 α の関係を示す。縦軸の終局面内曲げ強度は図6と同様である。同図より、3鋼種の終局強度が最小となる α は、ほぼ全ての板において、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ が2/3であることがわかる。また、一部の結果において最小強度となる α が0.5または0.75の終局面内曲げ強度と α が2/3の終局強度を比較してみると、その差はいずれも約1%以下である。また、紙面の都合上割愛するSUS316およびSUS304N2についても、同様の結果を得ている。これらの結果より、本研究で対象とする最小強度を与える α は2/3として、以降の結果について記述する。

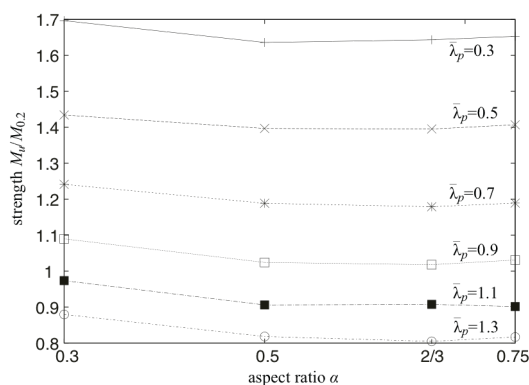
4.3 面内純曲げ挙動

図8は、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3, 0.7, 1.1の周辺単純支持板について、面内曲げモーメントとZ軸まわりの面内回転角の関係を示す。同図の縦軸の面内曲げモーメントは、数値計算で得られた図2の(a/2, b/2)点で

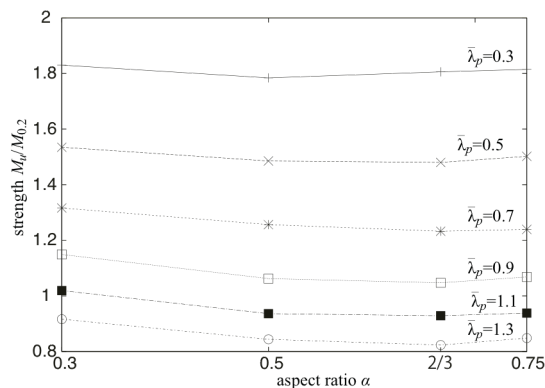
の面内曲げモーメント M を0.2%耐力に相当する曲げモーメント $M_{0.2}$ (炭素鋼の場合 M_y)で無次元化して表している。また、横軸は(a/2, b/2)点での作用回転角 φ を0.2%耐力に相当する回転角 $\varphi_{0.2}$ (炭素鋼の場合 φ_y)で除した値を示している。同図(a)より $\bar{\lambda}_p$ が0.3のSUS304およびSUS410Lの最大曲げモーメント点における回転角は、SM400に比べて小さくなることわかる。また、同図(b)および(c)のSUS304N2およびSUS329J3Lについてみると、最大曲げモーメント点が発生する面



(a) SUS304



(b) SUS410L



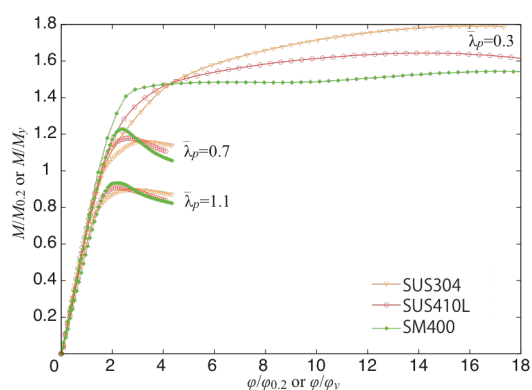
(c) SUS329J3L

図7 終局面内曲げ強度と縦横比の関係

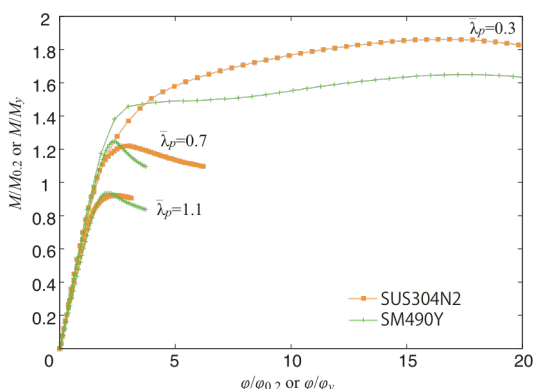
内回転角は、比較した SM490Y および SM570 とほぼ同様であり、最大曲げモーメントは炭素鋼に比べて約 13%および約 9%大きくなる。つぎに、同図のその他の $\bar{\lambda}_p$ を見ると、ステンレス鋼は最大曲げモーメント到達後の曲げモーメントの低下が炭素鋼の結果に比べて緩やかであることが確認できる。これは、ステンレス鋼が炭素鋼にみられる明確な降伏点を有さず、ラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示すことにより、0.2%耐力点通過後も緩やかなひずみ増分に伴う応力増加がみられる

ためであるといえる。すなわち、降伏棚を超えるような領域で最大曲げモーメント点に到達する $\bar{\lambda}_p$ が小さい板は、0.2%耐力後も応力上昇を示すステンレス鋼の強度が優れ、降伏応力とほぼ同等な点で極限を迎える板は、降伏点まで線形を保持する炭素鋼の強度が有利となる結果を意味している。

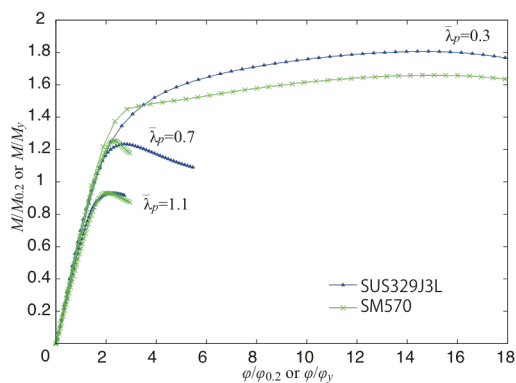
図9は、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3, 0.7, 1.1の周辺単純支持板について、面内曲げモーメントと図2(a/4,5b/6)点でのZ軸方向の面外たわみの関係を示す。同図の横軸の面外たわみ $(W+W_0)$ は、板厚 t で除して表して



(a) SUS304, SUS410L, SM400

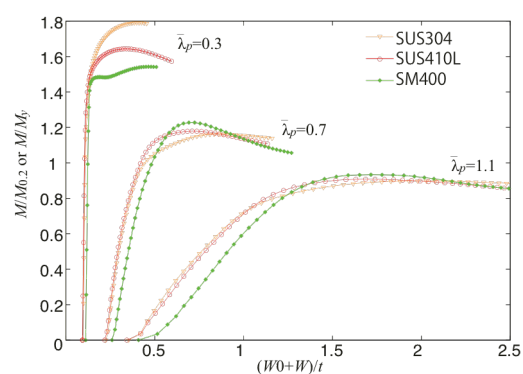


(b) SUS304N2, SM490Y

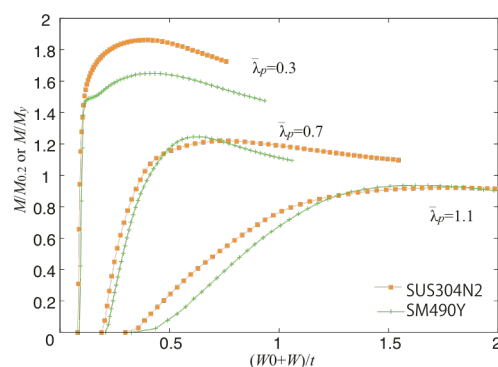


(c) SUS329J3L, SM570

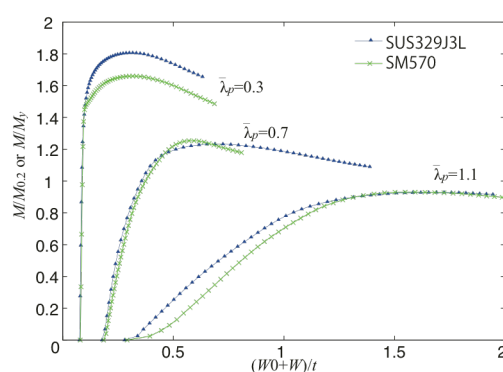
図8 曲げモーメントと回転角の関係



(a) SUS304, SUS410L, SM400



(b) SUS304N2, SM490Y



(c) SUS329J3L, SM570

図9 曲げモーメントと面外たわみの関係

いる。同図の $\bar{\lambda}_p$ が0.7の場合についてみると、初期の勾配はいずれのステンレス鋼も炭素鋼とほぼ同等であるが、その後の最大曲げモーメント点に至るまでのステンレス鋼の勾配は炭素鋼に比べて緩やかとなり、ステンレス鋼の面外たわみが炭素鋼に比べて約1.1から1.4倍発生した点であることがわかる。この結果についても、図8で述べた理由と同様であり、ステンレス鋼と炭素鋼の応力ひずみ関係によるものである。

以上の結果は、紙面の都合上割愛したSUS316も同様の結果を示す。

4. 4 終局面内純曲げ強度

図10は、対象とした鋼種の終局面内曲げ強度と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を表す。縦軸は数値計算で得られた図2の(a/2, b/2)点でのステンレス鋼または炭素鋼の終局面内曲げモーメント M_{u_SUS} または M_{u_S} を、0.2%耐力または降伏応力に相当する曲げモーメント $M_{0.2}$ または M_y で無次元化して表している。同図のSUS304, SUS316およびSUS304N2の終局強度に着目してみると、同じオーステナイト系ステンレス鋼であっても、 $\bar{\lambda}_p$ の変化による終局強度の差は、炭素鋼の鋼種の違いによる終局強度の差に比べて大きくなることが確認できる。つぎに、ステンレス鋼と炭素鋼の終局強度を比較してみると、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3および0.5において、ステンレス鋼の終局強度が炭素鋼の終局強度に比べて同等以上となることがわかる。これらのステンレス鋼と炭素鋼の終局強度の詳細な比較は、以降で記述する。

5. 炭素鋼板を基準としたステンレス板の面内純曲げ強度特性

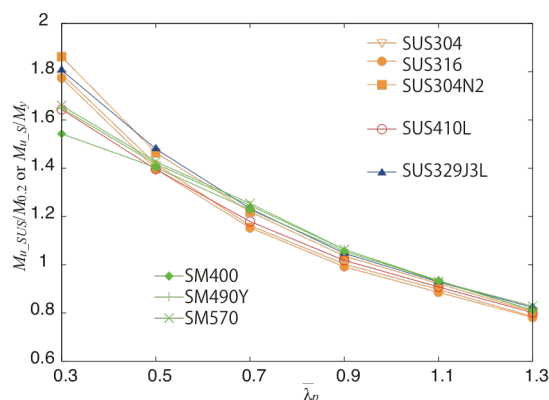


図10 終局面内曲げ強度特性

5. 1 終局面内純曲げ強度

図11は、無次元化した終局面内曲げモーメントについて、ステンレス鋼と炭素鋼を比較した結果を示す。同図の縦軸はステンレス鋼の無次元化した終局面内曲げ強度 $M_{u_SUS}/M_{0.2}$ を、対応する炭素鋼の無次元化終局面内曲げ強度 M_{u_S}/M_y で除した値を、横軸は幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を表している。同図の全てのステンレス鋼板の終局面内曲げ強度は、比較した炭素鋼の終局面内曲げ強度との差が16%以内になることがわかる。また、 $\bar{\lambda}_p$ の変化による終局面内曲げ強度の比較を見ると、 $\bar{\lambda}_p$ が0.7, 0.9および1.3の場合において、全てのステンレス鋼が炭素鋼の終局強度に比べて小さくなる。炭素鋼の終局強度に比べて最も小さくなる $\bar{\lambda}_p=0.9$ におけるSUS316の終局強度は、炭素鋼の終局強度の約94%になることがわかる。一方、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3および0.5の場合には、ステンレス鋼の終局強度が、炭素鋼の終局強度の約99%から116%になることがわかる。このように $\bar{\lambda}_p$ の小さい板は、塑性化の進行が十分進行した点において終局状態に至るため、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、降伏棚領域においてひずみ硬化が発生しない炭素鋼に比べて強度上昇が大きくなる。以上の結果より、ステンレス鋼周辺単純支持板の強度は、強度が同程度の構造用炭素鋼の終局面内曲げ強度の約94%の強度が確保できるとともに、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3および0.5の板については、炭素鋼の終局強度と同程度以上を確保できる。

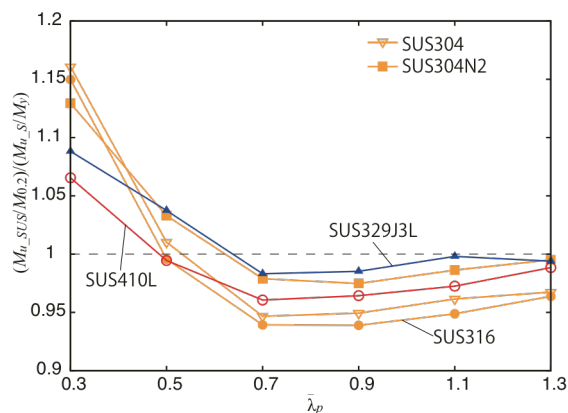


図11 ステンレス鋼と炭素鋼の終局面内曲げ強度の比較

5. 2 終局面内純曲げ時の変形性能

図 12 は、無次元化した終局時の面内回転角について、ステンレス鋼と炭素鋼を比較した結果を示す。同図の縦軸はステンレス鋼の終局時無次元化面内回転角 $\varphi_{u,SUS}/\varphi_{0.2}$ を、対応する炭素鋼の終局時無次元化面内回転角 $\varphi_{u,S}/\varphi_y$ で除した値を、横軸は幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を表している。同図より、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.3 の場合において、ステンレス鋼の終局時の面内回転角は、炭素鋼に比べて 0.84 倍から 1.02 倍の結果となる。また、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 から 1.1 の範囲では、全体的にステンレス鋼の面内回転角が炭素鋼に比べて大きくなり、最大で約 53%の差が生じている。そして、 $\bar{\lambda}_p$ が 1.3 の場合には、SUS304N2 を除いたステンレス鋼の面内回転角は、炭素鋼の結果に比べて約 1%から約 13%小さくなることを確認できる。一方、SUS304N2 の面内回転角は、SM490Y の約 1.07 倍となり、 $\bar{\lambda}_p$ が 1.1 の結果に比べて 10%程度小さくなっている。このように、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.3 の場合には、図 11 で示したように、ステンレス鋼周辺単純支持板の終局面内曲げ強度が炭素鋼板に比べて大きくなるとともに、面内回転角が炭素鋼に比べて小さくなる。このことから、このような形状の炭素鋼板をステンレス鋼板に置き換えると、ステンレス鋼の材料特性を有効に活用できる。他方、その他の $\bar{\lambda}_p$ では、ステンレス鋼板の面内回転角が炭素鋼に比べて大きく発生しているが、面内回転角の絶対量としては、炭素鋼の降伏応力相当の面内回転角で無次元化したもので除しているため、微小である。

図 13 は、無次元化した終局時の面外たわみについて、ステンレス鋼と炭素鋼を比較した結果を示す。同図の縦軸はステンレス鋼の終局時無次元化

面外たわみ $(W_0+W_{SUS})/t_{SUS}$ を、対応する炭素鋼の終局時無次元化面外たわみ $(W_0+W_S)/t_S$ で除した値を、横軸は $\bar{\lambda}_p$ を表している。同図より、ステンレス鋼の終局時の面外たわみは、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.3 において、炭素鋼の 0.73 から 1.01 倍程度となり、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 から 1.1 の範囲ではSUS410Lを除いたステンレス鋼の面外たわみが炭素鋼に比べて 6%から 46%程度大きくなる。一方、SUS410L は、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 から 1.1 の範囲において、SM400 との面外たわみの差が最大で約 12%となり、その他のステンレス鋼に比較して炭素鋼に近い結果を得ている。これは、SUS410L が対象としたステンレス鋼の中でも、比較的炭素鋼に近い応力ひずみ関係を示すことに起因している。つぎに、 $\bar{\lambda}_p$ が 1.3 の場合の結果をみると、図 12 と同様に SUS304N2 を除くステンレス鋼の面外たわみが、炭素鋼面外たわみの約 87%から約 97%の値となっている。また、 $\bar{\lambda}_p$ が 1.3 の SUS304N2 の面外たわみは、SM490Y の 1.03 倍程度であり、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 から 1.1 の結果に比べて十分小さくなっている。このように、比較的弾性域に近い領域で極限を向かえるステンレス鋼板の変形は、炭素鋼とほぼ同程度以下となり、材料による変化がほとんどなくなることを示している。これらの結果より、全てのステンレス鋼の面外たわみは炭素鋼のそれに比べて、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 の場合に最大となるものの、そのときの絶対量は板厚の約 53%以下となる。

6. 結論

本研究では、土木鋼構造物の主部材にステンレス鋼材を活用することを目的として、その基本要素であるステンレス鋼周辺単純支持板を対象に、

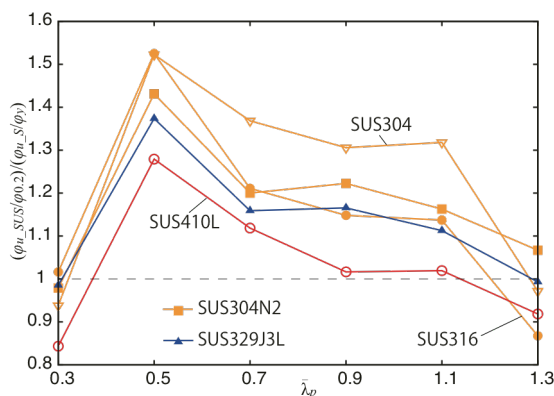


図 12 ステンレス鋼と炭素鋼の終局強度時面内曲げ回転角の比較

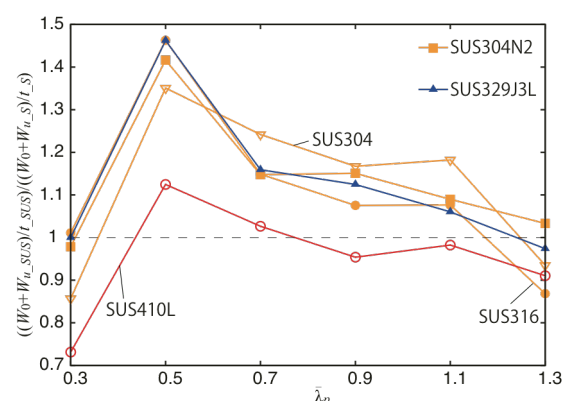


図 13 ステンレス鋼と炭素鋼の終局強度時面外たわみの比較

面内純曲げ負荷時の強度特性を数値計算により明らかにした。本研究で得られた内容は、以下の通りである。

- (1) 同一の系であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316 および SUS304N2 の面内純曲げ終局強度と幅厚比パラメータの関係は、炭素鋼 SM400, SM490Y および SM570 に比べて鋼種の違いによる差が明確となる。
- (2) 面内純曲げを受けるステンレス鋼板の終局強度は、材料強度に対応関係がある炭素鋼板に比べてその差が約 16%以内となり、最小値が炭素鋼の終局面内曲げ強度の約 94%となる。
- (3) ステンレス鋼板の終局強度時の面内回転角は、幅厚比パラメータが 0.3 の場合で、炭素鋼に比べて 0.84 倍から 1.02 倍程度の大きさとなり、幅厚比パラメータが 0.5 から 1.1 の範囲では最大で炭素鋼の約 1.53 倍となる。
- (4) ステンレス鋼板の終局強度時の面外たわみは、幅厚比パラメータが 0.3 の場合で、炭素鋼板に比べて 0.73 倍から 1.01 倍程度の大きさとなり、幅厚比パラメータが 0.5 から 1.1 の範囲では SUS410L を除くステンレス鋼の面外たわみが炭素鋼に比べて 6%から 46%程度大きくなる。

・謝辞

本研究は、社団法人日本鋼構造協会（平成 23 年度鋼構造研究助成）の助成を得て実施したものである。記してここに謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 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, 2006.
- 2) American Society of Civil Engineers: Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, SEI/ASCE 8-20, 2002.
- 3) 山根薫：香港ストーンカッターズ斜張橋のステンレス部材, JSSC, No.73, pp.14-15, 2009.
- 4) Euro Inox: Bridge in Cala Galdana on Menorca, Euro Inox, 2007.
- 5) ステンレス建築構造設計規準作成委員会：ステンレス建築構造設計規準・同解説(第 2 版),

ステンレス構造建築協会, 1995.

- 6) Mahmud Ashraf, Leroy Gardner, David A. Nethercot: Structural stainless steel design – Resistance based on deformation capacity, Journal of Structural Engineering, Vol. 134, pp. 402-411, 2008.
- 7) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2010.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 宮寄靖大, 上谷明夫, 奈良敬：溶接組立てされたステンレス鋼箱形短柱の終局強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp.367-374, 2009.
- 11) 奈良敬, 小島治雄, 津田真, 小松定夫：面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 386 号, I-8, pp.275-283, 1987.