

SUS304 および SM400 で構成されるハイブリッド補剛板の圧縮強度特性

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○数井 佑丞
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、一般的な炭素鋼に比べて優れた耐食性を有する。現在、我が国では、このようなステンレス鋼を土木構造物の主部材に活用するための設計基準類が整備されていない。そのため、ステンレス鋼構造部材の実現化に向けては、それらの強度特性を明確にしておく必要がある。そこで本研究では、一般的なステンレス鋼である SUS304 に着目し、SM400 とのハイブリッド補剛板の圧縮強度特性を、数値計算により明らかにする。対象とする補剛板は、1 本の縦補剛材を有する連続補剛板とする。ここでは、断面構成が異なるハイブリッド補剛板について、補剛板の縦横比および幅厚比パラメータを変化させたパラメトリック解析を実施し、SM400 のみの補剛板と比較しながらその強度特性を明らかにする。

2. 対象とする鋼種の材料特性

本研究は、表 1 に示すオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および SM400 を対象とする。ここで、比較用鋼種として SM400 を用いた理由は、SUS304 とほぼ同等の材料強度を示すためである。また、図 1 は、対象とする SUS304 および SM400 の応力塑性ひずみ関係を示す。表 1 および図 1 に示す結果は、材料試験のデータを表している¹⁾。図 1 より、SUS304 は、SM400 にて確認できる明確な降伏棚を持たず、塑性化の進行とともに、連続的かつ滑らかに応力が上昇するラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示すことがわかる。

3. 面内純圧縮負荷を受けるハイブリッド補剛板の数値計算法

図 2 は、単軸面内圧縮力を受ける 1 本の縦補剛材を有する連続補剛板を示す。このような補剛板の形状は、単リブモデルとし、補剛板の 2 辺を単純支持とする。また、連続補剛板の横補剛材は、十分剛であると仮定し、横補剛材部分を単純支持とする。このような補剛板の形状は、縦横比 $\alpha (=a/b)$ および式(1)で表される幅厚比パラメータ R を変化させて決定する。

表 1 対象とする鋼種の機械的性質¹⁾

鋼種	ポアソン比 μ	弾性係数 E (GPa)	0.2%耐力または 降伏応力 $\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)
SUS304	0.3	157	261
SM400	0.3	200	249

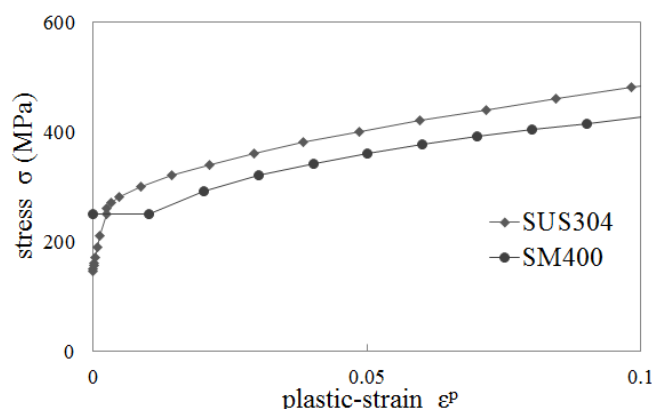
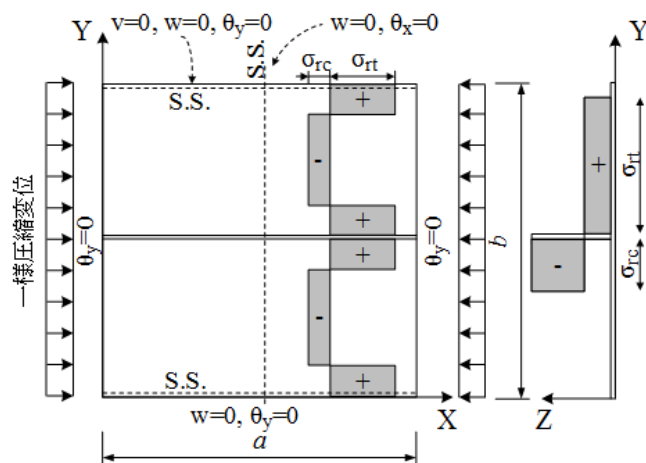
図 1 応力塑性ひずみ関係¹⁾

図 2 対象とする補剛板

キーワード SUS304, SM400, ハイブリッド補剛板, 終局圧縮強度, 変形モード

連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 長岡工業高等専門学校 TEL .0258-34-9439 E-mail:y-miyazaki@nagaoka-ct.ac.jp

$$R = \frac{b_l}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここで、 b_l が縦補剛材間隔、 t が板パネルの板厚、 σ_y が降伏応力、 E がヤング係数、 μ がポアソン比(=0.3)、 k が座屈係数(=4)を意味する。まず、 α は、0.5および1.0、2.0の3パターンについて数値計算を行う。そして、これらの縦横比についての R は、0.3から1.5の範囲を0.2刻みで変化させる。なお、縦補剛材剛比 γ_l は、文献2)で規定される必要最小剛比 γ_{l-req} と等しくなる値とし、縦補剛材の幅厚比 h_r/t_r は局部座屈しないように7と定める³⁾。つぎに、初期不整は、初期たわみおよび残留応力を考慮する。まず、残留応力は、圧縮応力 σ_{rc} を $-0.3\sigma_{0.2}$ ($=-0.3\sigma_y$)、引張応力 σ_{rt} を $1.0\sigma_{0.2}$ ($=1.0\sigma_y$)とした自己平衡を保つ矩形分布とする。そして、初期たわみは式(2)で与える。

$$w_0 = \delta_0 \cos(\pi X/a) \sin(\pi Y/b_l) + w_{10} \cos(3\pi X/a) \sin(\pi Y/b_l) \quad (2)$$

ここで、 $\delta_0 = a/1000$ 、 $w_{10} = b_l/150$ とする。

表2は、本研究で対象とする補剛板の断面構成4パターンを表している。case1およびcase4はステンレス鋼のみおよび炭素鋼のみで構成し、case2およびcase3はステンレス鋼と炭素鋼で構成するハイブリッド補剛板としている。以上で述べた補剛板の数値計算は、汎用非線形有限要素解析プログラムMARC⁴⁾を用いて行う。

4. 数値計算結果

4.1. ハイブリッド補剛板の終局圧縮強度

図3は、板パネルをSUS304、補剛材をSM400としたcase2のハイブリッド補剛板について、幅厚比パラメータ R が0.3および0.7、1.1、1.5の場合の、終局圧縮強度と縦横比の関係を表す。同図の縦軸は、数値計算により得られた終局圧縮荷重 P_u を降伏荷重 P_y で無次元化した値を表している。同図より、 $R=1.5$ の場合にて、縦横比0.5で最小となるものの、その他の結果については、縦横比1.0で最小となることがわかる。この $R=1.5$ における最小値と縦横比1.0の場合の終局強度の差は約2%未満である。また、割愛するその他の解析ケースにおいても同じ傾向が見られたため、以降では、終局圧縮強度が最小となる縦横比1.0の結果について述べる。

図4は、幅厚比パラメータ R が0.3および0.7、

表2 補剛板を構成する材料の組み合わせ

case	板パネル	補剛材	R
1	SUS340	SUS304	0.3 - 1.5(0.2 刻み)
2	SUS304	SM400	
3	SM400	SUS304	
4	SM400	SM400	

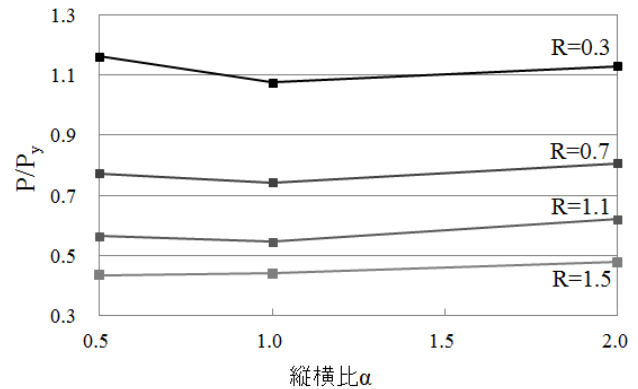


図3 縦横比と終局強度の関係(case2)

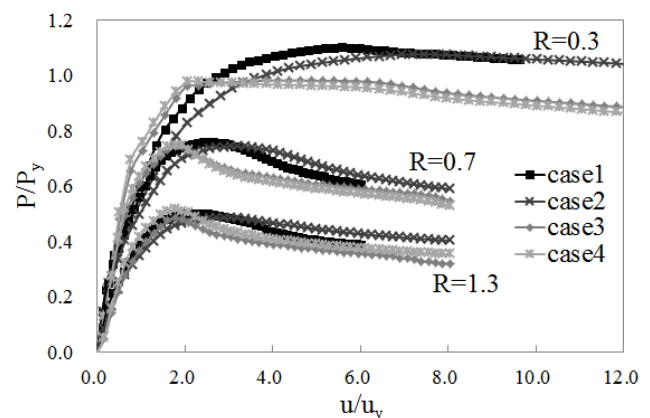


図4 対象とした補剛板の圧縮荷重と圧縮変位の関係

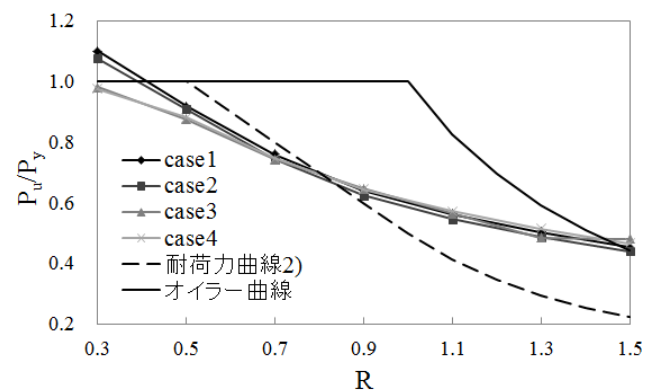


図5 対象とした補剛板の終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

1.3 の場合の圧縮荷重と圧縮変位の関係を示す。縦軸は、数値計算により得られた荷重 P を降伏荷重 P_y で無次元化した値を、横軸は数値計算で与えた圧縮変位 u を降伏変位 u_y で無次元化した値を表している。同図より、荷重と変位の関係は、いずれの R においても、断面を構成する板パネルの材料の違いにより、傾向が異なることがわかる。このような変化は、 R が小さいほど顕著に表れ、特に $R=0.3$ の場合に、はっきりとその違いが読み取れる。これは、補剛板の断面占有率が大きい板パネルを SUS304 とした場合、板パネルを SM400 とした結果に比べて変位の増加とともに荷重が大きくなることを表している。このような結果は、補剛板の断面占有率が大きい板パネルにステンレス鋼を用いると、比例限界点後にひずみの増加とともに、連続的な応力上昇を示すラウンドハウス型の応力ひずみ関係を有することによる。

図 5 は、各ケースの終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、数値計算により得られた終局圧縮荷重 P_u を降伏荷重 P_y で無次元化した値を表している。また、同図中には、比較のため、補剛板の耐力曲線²⁾および弾性座屈曲線を表している。同図より、 $R=0.3$ から $R=0.5$ の case1 および case2 の終局圧縮強度は、case3 および case4 に比べて、4%から 11%程度大きくなることわかる。

一方、 $R=0.7$ 以上の case1 および case2 と case3 および case4 の終局圧縮強度の差は、約 0.7%から 5.8%の値となり、板パネルの材料の違いによる明確な違いは読み取れない。つぎに、同図に示した耐力曲線と対象とした補剛板の終局強度を比較してみると、 R が 0.5 および 0.7 の結果は、耐力曲線に比べ約 13%小さくなるものの、同様にして数値計算を行った SM400 のみの補剛板と同等以上の終局圧縮強度を示すことがわかる。

表 3 は、図 5 の結果を、SM400 のみの補剛板である case4 を基準とした case1 から 3 の終局圧縮強度の比を表している。また、同表(b)には、比較のため、SM570 のみの補剛板を基準とした、SUS329J3L および SM570 で構成されるハイブリッド補剛板の終局圧縮強度比⁵⁾を表している。同表(a)より、case2 のハイブリッド補剛板の強度が SM400 のみの結果に比べて最大で 6%低下していることがわかる。この結果を除くと、対象とした補剛板の終局圧縮強度は、炭素鋼のみの補剛板と 5%以内の強度の差に収まることわかる。また、SUS304 および SM400 で構成されるハイブリッド補剛板について、各ケースの終局圧縮強度比を見ると、case1 および case2 については幅厚比パラメータが小さいほど圧縮強度比が上昇することがわかる。これは、前述のとおり、塑性化が十分に進行した後に終局強度に至る補剛板の板パネルをステンレス鋼にすることで、ひずみ硬化による応力上昇が炭素鋼のそれに比べて大きくなることによる。そして、case3 については、 R が 1.5 の場合に終局圧縮強度比が最大で 3%上昇する。これは、板パネルの板厚が薄い場合、補剛材にステンレス鋼のような変形が十分進行した領域においても応力が上昇し続ける材料を使用することで、変形による強度の低下が小さくなることによる。このような結果は、比較に示した同表(b)の SUS329J3L および SM570 で構成されるハイブリ

表 3 case4 を基準とした終局圧縮強度比(%)

(a)SUS304 および SM400 で構成する場合

	R=0.3	R=0.5	R=0.7	R=1.1	R=1.5
case1/case4	113	104	102	98	97
case2/case4	110	103	99	95	94
case3/case4	100	99	99	99	103

(b)SUS329J3L および SM570 で構成する場合⁵⁾

	R=0.3	R=0.5	R=0.7	R=1.1	R=1.5
case1/case4	110	105	102	102	102
case2/case4	107	102	101	99	98
case3/case4	102	102	103	104	105

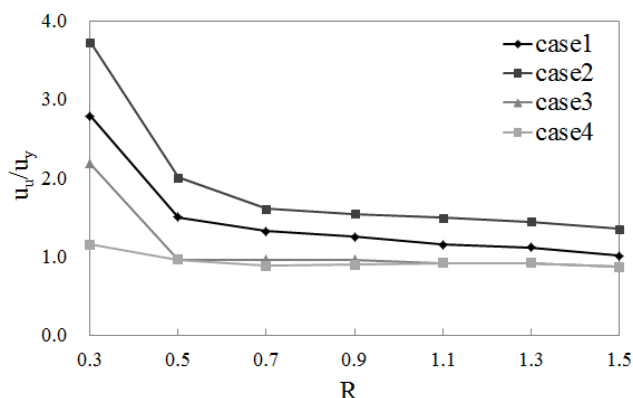


図 6 ハイブリッド補剛板の圧縮変位と幅厚比パラメータの関係

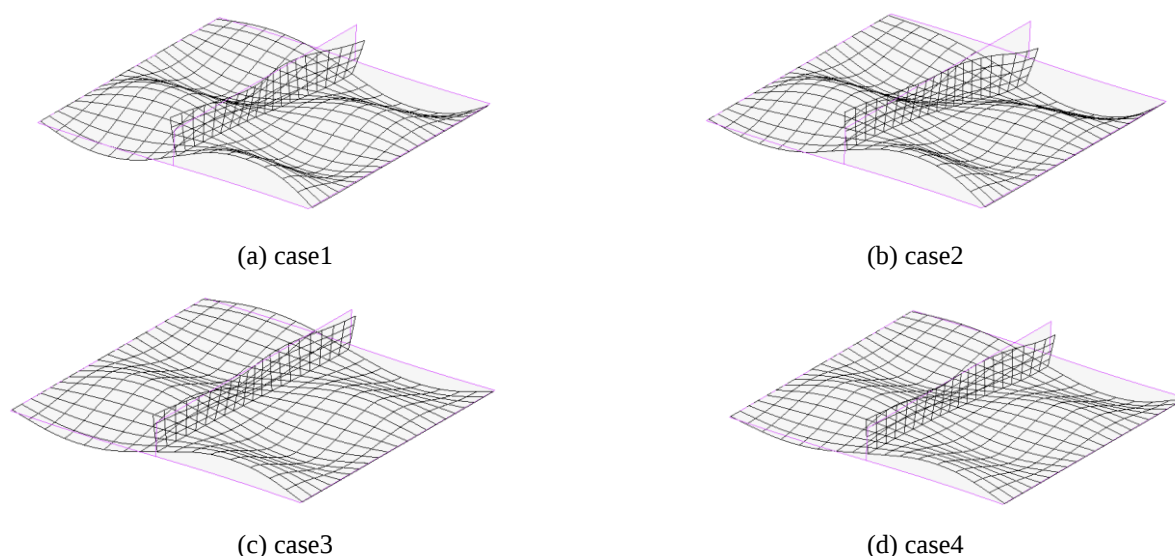


図7 終局圧縮強度時の変形モード($R=0.7$) (変形倍率7倍)

ッド補剛板の結果と同様の傾向を示すことがわかる。

4.2 ハイブリッド補剛板の終局圧縮強度時の変形特性

図6は、対象とした補剛板の終局圧縮強度時の圧縮変位と幅厚比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、終局圧縮強度時の変位 u_u を降伏変位 u_y で無次元化した値を表している。同図より、いずれの R においても、case2 の補剛板の圧縮変位が最大となり、炭素鋼のみの補剛板に比べて約1.5倍から3倍大きくなることがわかる。また、 R が0.5以下の場合、case1 および case2 の圧縮変位は、case3 および case4 に比べて約1.8倍から約1.9倍大きくなることがわかる。一方、 R が0.5より大きくなる補剛板では、case1 および2の圧縮変位と case3 と4の圧縮変位の差は、最大で約59%となる。このように、case1 と2が case3 と4の結果に比べて大きくなる理由は、前述のとおり、塑性化の進行とともに強度上昇が発現するステンレス鋼を板パネルに使用したためである。

図7は、 $R=0.7$ の場合の各ケースの終局圧縮強度時の変形モードを示す。なお、これらの変形モードの倍率は全て統一して表している。同図より、いずれのケースにおいても、補剛板の変形モードはほぼ同様の形状を示すことがわかる。また、同図(a)および(b)と(c)および(d)を比較してみると、板パネルに SUS304 を使用した補剛板の方が、SM400 を使用した場合に比べ変形形状が大きくなることがわかる。これらより、ハイブリッド補剛板の変形特性は、使用する板パネルに依存する。

5. まとめ

本研究で得られた結果は、次のとおりである。

(1)本研究で対象とした面内純圧縮負荷を受ける単リブハイブリッド補剛板は、縦横比 α が1.0の場合に最小の終局圧縮強度となる。(2)SUS304 と SM400 で構成されるハイブリッド補剛板の荷重と変位の関係および変形特性は、補剛板の断面占有率が大きい板パネルの使用材料によりその傾向が異なる。(3)対象としたハイブリッド補剛板の終局圧縮強度は、SM400 のみの補剛板に比べて最大10%大きくなる。(4) R が0.5以下の板パネルを SUS304 とした補剛板の終局圧縮強度時の圧縮変位は、板パネルを SM400 とした補剛板に比べて最大で約3倍大きくなる。

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, 2010.3. 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 2012.3. 3)北田 俊行, 中井 博, 越智 内士: 高張力鋼を用いた圧縮板・圧縮補剛板の終局強度に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.179-190, 2000.3. 4)MSC.software Co.: Marc User's Guide, Software Corporation, 2010. 5)数井 佑丞, 宮寄 靖大: SUS329J3L および SM570 で構成されるハイブリッド補剛板の圧縮強度特性, 第31回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp.90-93, 2013.11.