

ステンレス鋼板の面内純せん断強度特性および強度評価法 The Strength Estimation Method and Behavior of Simply Supported Stainless Steel Plates under In-plane Shearing

○宮寄 靖大* 奈良 敬**
Yasuhiro MIYAZAKI Satoshi NARA

ABSTRACT The stainless steels have high corrosion resistance. It is for this reason that stainless steels are valid to use in the structural member, when advantage over long in-service period in these structures. This paper investigates for ultimate strength behavior under shearing force. Firstly, It makes decision about numerical simulation model. Secondly, the ultimate strength of the simply supported plate under pure shearing was revealed to use for non-linear finite element analysis. Finally, this paper proposed ultimate shear strength curve of simply supported stainless steel plates.

Keywords: ステンレス鋼, 周辺単純支持板, 終局せん断強度, 初期たわみモード
Stainless steel, simply supported plate, ultimate shearing strength, initial deflection mode

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来から土木構造物に使用され続けている炭素鋼に比べて優れた耐食性を有する。また、ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、炭素鋼に見られる明確な降伏棚を有さないラウンドハウス型を示す。このようなステンレス鋼を橋梁等の土木構造物の主部材に活用するためには、炭素鋼と同様にしてその強度特性を明確にする必要がある。しかし、これまでに炭素鋼を対象として行われてきた実験と同じようにして、ステンレス鋼構造物の強度特性を照査することは重要であるものの、労力や時間等において得策でないことが明らかである。また、土木構造物主部材への活用を目的として、既往の炭素鋼と同程度の材料強度を有する種々のステンレス鋼を対象とした板の強度特性を詳細に

調べた研究例^{1)~5)}は僅かである。

そこで本研究では、数値計算⁶⁾により、面内純せん断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、同様にして形状を決定した炭素鋼板の力学的挙動と比較しながら明らかにする。また、本研究では、これらの結果に基づいたステンレス鋼周辺単純支持板の終局せん断強度評価法を提案する。

2. 数値計算方法

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 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4鋼種である。これらの鋼種と比較する炭素鋼は、材料強度に着目し、SUS304 および SUS410L に SM400、

*博士（工学）長岡工業高等専門学校環境都市工学科准教授

（〒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

SUS304N2にSM490Y, SUS329J3LにSM570を選定する. 表1は, 対象とする材料の機械的性質^{3),7)}を示す. 表中の記号は, E がヤング係数を, ν 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.

図1は, 本研究で対象とする材料の応力ひずみ関係を示す^{3),7)}. また, ステンレス鋼の応力ひずみ関係は, 数値計算にて 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たマルチリニア型近似により表現する. なお, 炭素鋼の応力ひずみ関係は, 降伏応力点を塑性開始点とした応力塑性ひずみ関係を用いたマルチリニア型近似で表す.

図2は, 本研究で対象とする面内純せん断負荷を受ける周辺単純支持板を示す. このような周辺単純支持板の形状は, 縦横比 α を 1.0, 1.2, 1.25 および 1.5 の 4 パターンで変化させる. また, 式(1)で表す板の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ は, 各縦横比について 0.3 から 2.1 まで 0.2 刻みで板厚 t を変化させて決定する.

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_\tau}} \quad (1)$$

ここで, k_τ は, 式(2)で表す板の座屈係数を意味する.

$$k_\tau = 5.34 + \frac{4.0}{\alpha^2} \quad (2)$$

なお, ステンレス鋼では, 式(1)中の σ_y を $\sigma_{0.2}$ に置き換えて $\bar{\lambda}_p$ を算出する.

数値計算モデルは, 不完全系として初期たわみおよび残留応力を考慮する. まず, 残留応力は, 既往の研究⁸⁾と同様にして, 板の幅方向 b にのみ同図中に示すように, 圧縮残留応力 σ_{rc} を $-0.3\sigma_{0.2}$ (炭素鋼では $-0.3\sigma_y$), 引張り残留応力 σ_{rt} 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. つぎに, 初期たわみ W_0 は, 式(3)および前述した数値計算モデルと同様にしてメッシュ分割した完全系の周辺単純支持板を対象とした固有値解析により得られた 1 次モード形状の 2 形状を用いる.

$$W_0 = W_{0\max} \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b} \quad (3)$$

ここで, $W_{0\max}$ は初期たわみの最大値 ($=b/250$) を意味し, 固有値解析により得られた 1 次モー

表1 対象材料の機械的性質^{3),7)}

Material	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
SS400	207	0.3	249
SM490Y	200	0.3	388
SM570	206	0.3	504

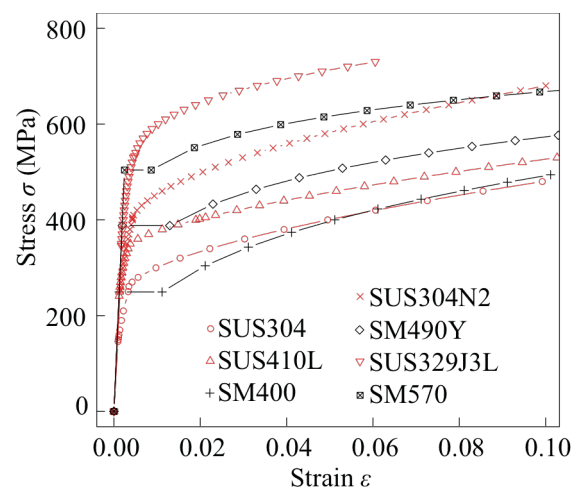


図1 材料の応力ひずみ関係^{3),7)}

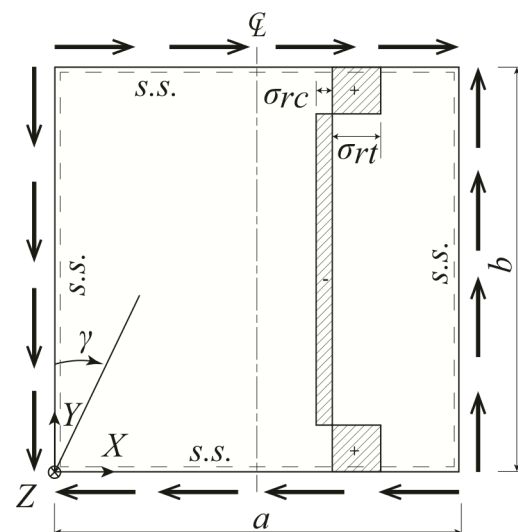


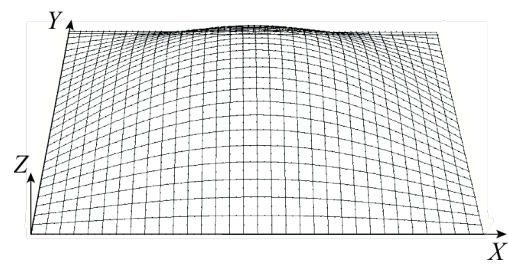
図2 純せん断負荷を受ける周辺単純支持

ドについてもその最大値を $W_{0\max}$ として、 Z 軸方向の節点座標値を全節点にて補正している。図3は、このようにして与える初期たわみ形状の概観を示す。そして、数値計算モデルは、対象とする周辺単純支持板全領域を8節点アイソパラメトリック厚肉シェル要素により有限要素離散化を行う。また、同モデルにおける境界条件は、 $Y=b$ の辺における全節点に、 X 軸方向の強制変位を与える。さらに、数値計算では、大変形大ひずみを仮定し、等方硬化および J2 流れ則に従う材料として仮定する。最後に、非線形計算による収束判定は修正 Newton-Raphson 法を、逐次計算は弧長法を用いる。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[®]を使用する。

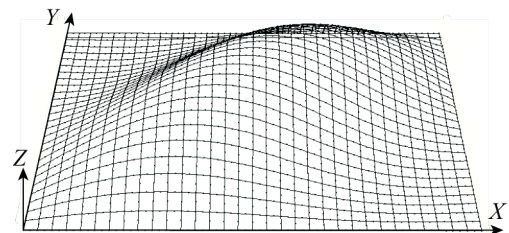
図4は、同図中に示す完全系の周辺単純支持板を対象として、前述の数値計算法で得られた座屈係数 k_τ と縦横比の関係を示す。同図より、使用した数値計算モデルは、実線で表す理論値⁹⁾に対して、平均で約4%の誤差となっており、その妥当性は良好であると判断する。

3. ステンレス鋼周辺単純支持板のせん断強度特性

図5は、SUS304 および SM400 の終局せん断強度と縦横比 α の関係を示す。縦軸の終局せん断強度は、図2中 $X=0$ の辺および $Y=b$ の辺にて、数値計算で得られた各辺に平行な節点力を2辺の断面積で除した最大せん断応力 τ_u を降伏せん断応力 $\tau_y(=(\sigma_y \text{ または } \sigma_{0.2})/\sqrt{3})$ で無次元化した値を表している。同図より、縦横比の違いによる終局せん断強度の変化は、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ により異なることがわかる。これらの変化は、ステンレス鋼で最大約2%、炭素鋼で最大約4%である。また、同図について、各縦横比における終局せん断強度を平均した場合の差は、1%以下の値となる。そのなかで、最小となる縦横比は、ステンレス鋼および炭素鋼で1.25および1.5である。



(a) 式(3)による形状



(b) 固有値解析による1次モード形状

図3 初期たわみ形状

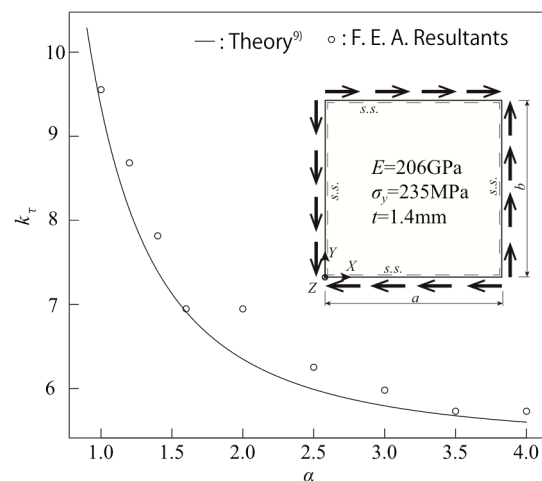


図4 数値計算法の妥当性の検証

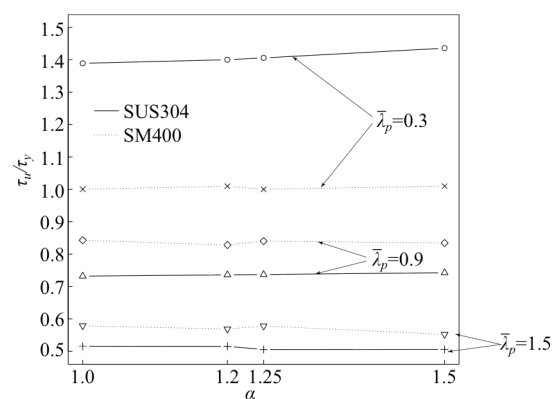


図5 終局せん断強度と縦横比の関係(初期たわみ形状として式(3)を導入)

図 6 は、図 3(b)の初期たわみ形状を導入した際の SUS304 および SM400 の終局せん断強度と縦横比 α の関係を示す。同図より、図 5 の結果と同様に、縦横比の違いによる終局せん断強度の変化は、 $\bar{\lambda}_p$ で異なることがわかる。また、これらの変化は、ステンレス鋼で最大約 2%、炭素鋼で最大約 1% である。そして、各縦横比にて終局せん断強度を平均した場合の差は、図 5 の結果と同様に 1% 以下と僅かである。また、その値が最小となる縦横比は、ステンレス鋼および炭素鋼で 1 および 1.25 である。

図 5 および図 6 の初期たわみモードの違いによる終局せん断強度の変化は、同じ縦横比と比較した場合、ステンレス鋼および炭素鋼で平均約 4% および約 3% の値で、図 6 の結果が図 5 のそれに比べて小さくなる。以上の結果を精査し、1% の誤差を無視した場合、終局せん断強度が最小となる α の最頻値は 1.25 である。このため、以降で述べる数値計算結果は、 α が 1.25 かつ図 3(b)の初期たわみ形状を用いた場合を示す。

図 7 は、対象とした周辺単純支持板のせん断応力とせん断ひずみの関係を表す。縦軸は数値計算で得られたせん断応力 τ を各板の降伏せん断応力 τ_y で無次元化した値を、横軸は図 2 中の $Y=b$ 辺上の全節点で X 方向に与えた強制変位 U と板幅 b との関係で表されるせん断ひずみ

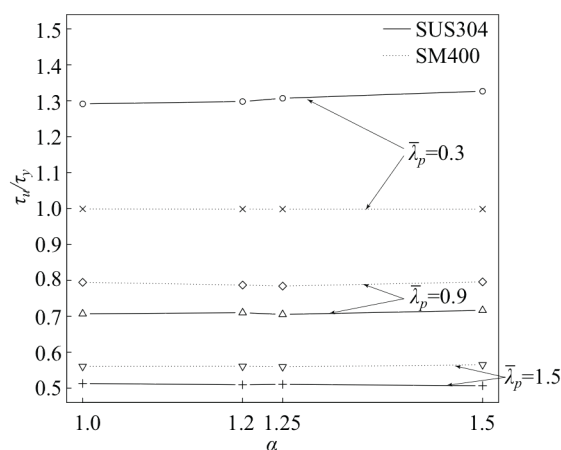
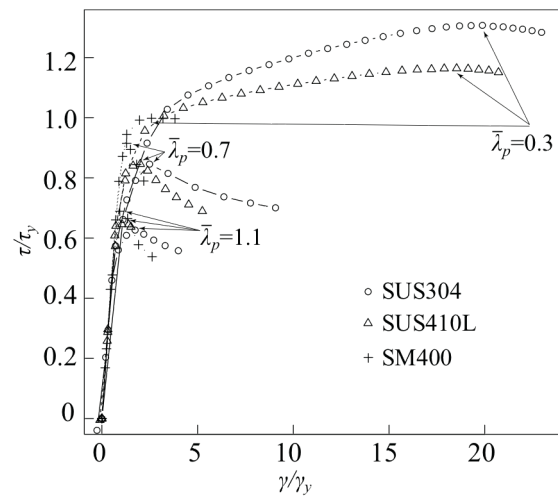
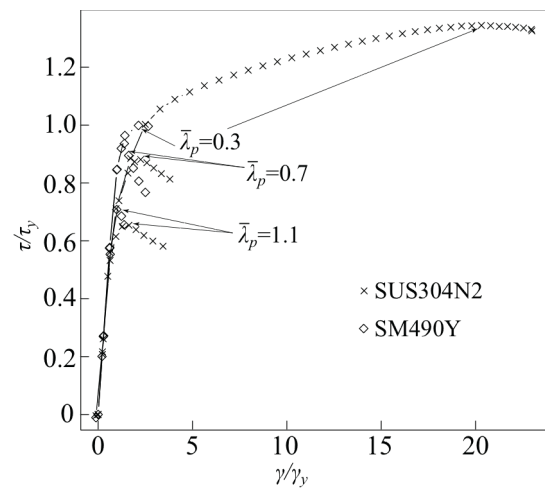


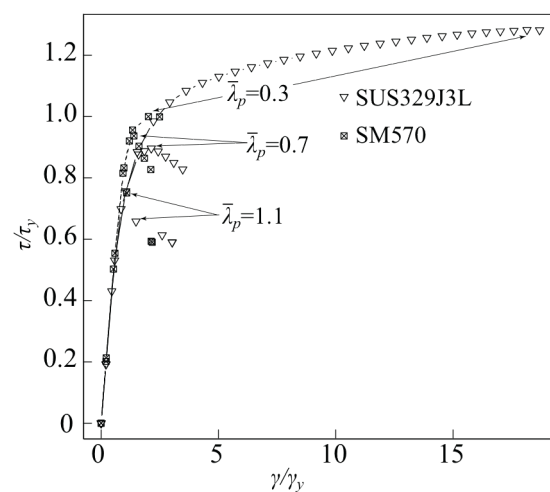
図 6 終局せん断強度と幅厚比パラメータの関係（固有値解析による 1 次モードの初期たわみを導入）



(a) SUS304, SUS410L および SM400



(b) SUS304N2 および SM490Y



(c) SUS329J3L および SM570

図 7 せん断応力とせん断ひずみの関係

$\gamma(=\tan(U/b))$ を各板の降伏せん断ひずみ γ_y で無次元化した値を表している。同図の $\bar{\lambda}_p=0.3$ の結果についてみると、対象としたいずれのステンレス鋼のせん断応力とせん断ひずみの関係は、炭素鋼の結果に比べて大きく傾向が異なることがわかる。この結果は、ステンレス鋼がラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示し、張力場発生時からの応力上昇が連続して発現するためである。一方、その他の $\bar{\lambda}_p$ については、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合のように顕著な差が見られず、図中の矢印が示す最大せん断応力点までは、ステンレス鋼と炭素鋼のせん断応力とせん断ひずみ関係がほぼ同様であることが確認できる。

図8は、本研究で対象とした全鋼種の終局せん断強度と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示す。同図より、 $\bar{\lambda}_p$ が0.5以下の対象とした全てのステンレス鋼の終局せん断強度は、降伏せん断強度よりも大きくなることわかる。一方、炭素鋼の終局せん断強度は、全ての $\bar{\lambda}_p$ において降伏せん断強度を上回らないことがわかる。これは、ステンレス鋼がラウンドハウス型の応力ひずみ関係を有することにより、降伏棚領域にて弾完全塑性型の応力ひずみ関係を示す炭素鋼の材料特性に対して連続的に応力上昇が発現することによる。つぎに、全てのステンレス鋼の終局せん断強度は、 $\bar{\lambda}_p$ が0.7から1.1の結果において、

比較した炭素鋼に比べて4から12%程度小さくなることわかる。この結果は、これまでの研究成果^{5),10)}と同様に、降伏点までヤング係数が一定の炭素鋼と比例限界点後連続してひずみ硬化勾配が変化するステンレス鋼の材料特性の違いが大きく影響する形状であることを意味している。

図9は、本研究で対象とした全鋼種の終局せん断強度時のせん断変形と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示す。同図の縦軸は、終局せん断強度時のせん断変形 γ_u を各鋼種の降伏せん断強度時のせん断変形 γ_y で無次元化した値を表している。同図より、 $\bar{\lambda}_p$ が0.3における全てのステンレス鋼のせん断変形は、比較した炭素鋼との違いがその他の $\bar{\lambda}_p$ の結果に比べて明確に現れている。この場合のステンレス鋼の無次元化したせん断変形は、炭素鋼のそれに比べて5から9倍程度となる。また、 $\bar{\lambda}_p$ が0.5の場合にはステンレス鋼の無次元化したせん断変形が比較した炭素鋼の2倍程度となり、 $\bar{\lambda}_p$ が0.7以上では平均で約1.2倍から1.7倍程度ステンレス鋼が炭素鋼に比べて大きく発生している。このように、ステンレス鋼は、変形が進行するとともに強度が発現することから、終局せん断強度時におけるせん断変形の大きさは炭素鋼に比べて大きくなることに注意すべきである。

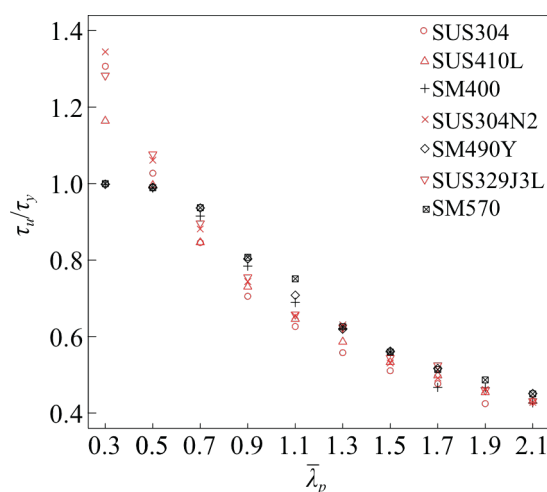


図8 終局せん断強度と幅厚比パラメータの関係

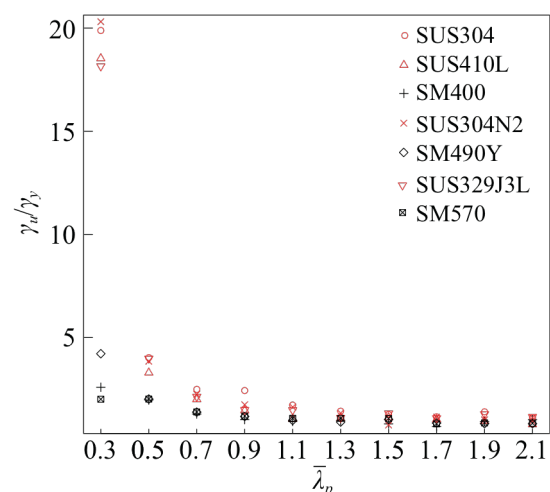


図9 終局せん断強度時のせん断変形と幅厚比パラメータの関係

4. ステンレス鋼周辺単純支持板の終局せん断強度評価法

図 10 は、図 8 で示したステンレス鋼と炭素鋼の数値計算結果をプロットでまとめた終局せん断強度と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を表している。また、図 10 中には、本研究で提案する式(4)で表す周辺単純支持板の終局せん断強度評価曲線とともに、既往の終局せん断評価曲線 8),11),12)を表している。

$$\frac{\tau_u}{\tau_y} = \begin{cases} 1 & (\bar{\lambda}_p \leq a) \\ \left(\frac{a}{\bar{\lambda}_p}\right)^b & (a < \bar{\lambda}_p) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 a および b は、表 2 に示す係数を表す。なお、これらの値は、3. で明らかにした数値計算結果に対する式(4)による最小二乗法を用いた回帰計算により算出している。図 10 より、式(4)で表現するステンレス鋼の終局せん断強度評価曲線は、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.5 を超えたあたりから 1.9 付近まで同じ式(4)の炭素鋼の曲線に比べて安全側になることが確認できる。一方、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.3 のステンレス鋼の強度評価については、式(4)が十分な安全側となり、ステンレス鋼板の終局せん断強度を有効に活用できない点も見受けられる。つぎに、既往の終局せん断強度評価曲線についてみると、文献 11)で示されている耐力力曲線が炭素鋼の結果に対して最もその傾向を適切に評価していることがわかる。一方、式(4)の曲線は、文献 12)および奈良ら 8)の曲線に比べて $\bar{\lambda}_p$ が大きい領域において、かなり小さく評

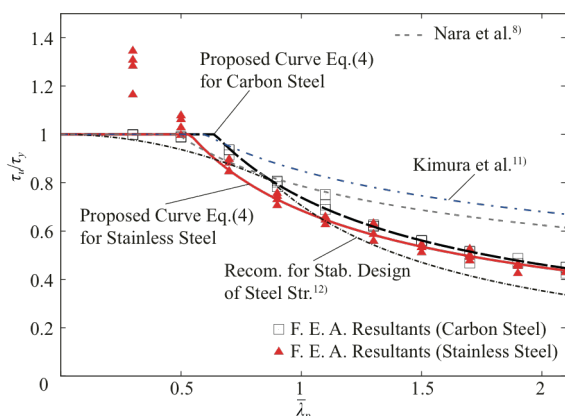


図 10 周辺単純支持板の耐力力曲線

表 2 式(4)に含まれるパラメータ

Material	a	b
Stainless steel	0.54	0.61
Carbon steel	0.64	0.68

価することがわかる。この結果は、本研究で想定した初期不整として、固有値解析により算出した 1 次モードの初期たわみ形状を採用したため、終局せん断強度がより小さくなることによる。

5. おわりに

本研究は、対象としたステンレス鋼で構成される周辺単純支持板が純せん断負荷を受ける際の強度特性を数値計算により調べた。また、これらの結果は、材料強度がほぼ等しい関係にある炭素鋼板との変化を調べた。以下では、本研究で得られた内容をまとめる。

- (1)対象としたステンレス鋼および炭素鋼周辺単純支持板の終局せん断強度は、初期たわみ形状を固有値解析による 1 次モードを与えた結果が正弦半波を与えた結果に比べて平均で約 4% および 3%小さくなる。
- (2)対象としたステンレス鋼および炭素鋼の縦横比の違いによる終局せん断強度は、考慮した 2 つの初期たわみモードにおいて 1%の差を無視すると、1.25 で最小となる頻度が最も高くなる。
- (3)幅厚比パラメータが 0.5 以下のステンレス鋼周辺単純支持板の終局せん断強度は、降伏せん断強度と同等以上となり、比較した炭素鋼板よりも優れた強度を有する。
- (4)一方、幅厚比パラメータが 0.7 から 1.1 のステンレス鋼周辺単純支持板の終局せん断強度は、比較した炭素鋼板の 88%から 96%程度の大きさとなる。
- (5)幅厚比パラメータが 0.5 以下のステンレス鋼周辺単純支持板の終局せん断強度時の無次元化したせん断変形の大きさは、比較した炭素鋼板に比べて 2 倍以上となり、最大で約 9 倍程度となる。

(6)対象としたステンレス鋼および炭素鋼周辺単純支持板の数値計算結果に基づいて、終局せん断強度評価式を提案した。

今後、ステンレス鋼板の土木構造物主部材への活用に向けて、これらの部材強度の結果に加えて材料特性を有効に利用できる設計法の提案が期待される。

【参考文献】

- 1) L. Gardner, D. A. Nethercot: Structural stainless steel design: a new approach, The Structural Engineer, Vol. 82, No.21, pp.21-28, 2004.
- 2) 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則, 岩田節雄: ステンレス鋼板を用いた I 形断面桁腹板のせん断耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp.799-808, 2004.
- 3) 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.
- 4) 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則, 下里哲弘: ステンレス鋼-構造用鋼ハイブリッド圧縮補剛板の耐荷力評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 69, No. 1, pp.121-132, 2013.
- 5) 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.
- 6) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2013.
- 7) 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.
- 8) 奈良敬, 出口恭司, 福本湧士: 純せん断応力を受ける鋼板の極限圧縮強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 392 号, I-9, pp.265-271, 1988.
- 9) S. P. Timoshenko, J. M. Gere: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1963.
- 10) 宮寄靖大, 奈良敬: 面内純曲げ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 20 巻, pp.261-268, 2012.

11) 木村衛, 井上哲郎, 谷口元, 橋村徹, 小松健: 薄板の座屈後耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号, pp.135-140, 2001.

12) 土木学会鋼構造委員会鋼・合成構造標準小委員会: 鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 丸善, 2007.