

ステンレス鋼圧縮板の設計基準強度に関する研究

A study on the design proof stress of stainless steel plates subjected to compression

三好 崇夫* 越智 内士** 森 省吾*** ○宮寄 靖大**** 奈良 敬*****
Takao MIYOSHI Nobuhito OCHI Shogo MORI Yasuhiro MIYAZAKI Satoshi NARA

ABSTRACT Structural materials with high resistance to corrosion improve durability and economization of the structures. In Japan, stainless steel is not used in bridge member because there are no design specifications for stainless steel structures. This study proposes ultimate compressive strength and ductility of simply supported austenitic stainless steel plate. At first, the ultimate strength of simply supported SUS304 and SUS304N2 plate under uniaxial compression is examined by numerical analysis. Secondary, these strength characteristics are compared with those of the plates of structural carbon steels. As a results, it is shown that ultimate strength of austenitic stainless steel plates has approximately equal to that of structural carbon steel plates.

Keywords: オーステナイト系ステンレス鋼, 設計基準強度, 終局強度, 変形性能

Austenitic stainless steel, Design standard strength, Ultimate strength, Ductility

1. まえがき

近年, 社会基盤施設のミニマムメンテナンス化, メンテナンスフリー化を目的とする構造物の超長寿命化や LCC の削減に期待が寄せられている。橋梁部材に使用されている軟鋼は経年劣化による腐食損傷事例が多く報告されている¹⁾。社会基盤施設は厳しい自然環境下に曝され続けるため, 構造物の耐久性を向上させる材料を活用することは, こうした課題に有効な対策として挙げられる。耐食性の優れたステンレス鋼の社会基盤施設への適用事例としては, 沿岸部における構造物の防食法や河川の水門などが挙げられる。我が国の橋梁部材への活用については, ステンレス鋼を対象とした設計基準類が整備されていないことから, 主部材への適用事例は無いのが現状である。本研究では, 橋梁の長寿命化と LCC 削減に向けて, 高耐食性を有するステンレス鋼を部材に取り入れるこ

とを考え, 部材レベルでの安全性能照査を行うことを目的とする。そこで, 一方向一様圧縮荷重を受ける周辺単純支持無補剛板の耐荷力性能を数値計算により照査する。対象とするステンレス鋼は, 我が国の建築分野²⁾等で幅広く活用されているオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 と SUS304N2 である。ステンレス鋼は, 軟鋼にみられるような明確な降伏棚と降伏応力が存在せず, その応力ひずみ関係はラウンドハウス型を呈することから, これらを適切に表現できる構成則³⁾を導入した数値計算により, 周辺単純支持無補剛板の耐荷力特性を照査する。SUS304 および SUS304N2 の局部座屈を考慮した無補剛板の耐荷力特性を調べるにあたり, 設計に利用する耐荷力曲線の形状を照査する目的から, 無補剛板の縦横比を 1 から 4, 幅厚比パラメータを 0.2 から 2 の範囲で変化させて数値計算を行う。また, 軟鋼

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

** 博士(工学) 明石工業高等専門学校講師 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

第2種正会員

*** 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** 工修 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

準会員(学生)

***** 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 材料定数

鋼種	E (GPa)	比例限界に対する応力 σ_p (MPa)	0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ (MPa)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	材料定数		σ_{10} (MPa)	ε_{10} (%)
					m	n		
SUS304	168	143	232	259	1.67	2.88	481	0.100
SUS304N2	173	253	360	402	1.79	3.93	680	0.100

との特性を比較するため、強度レベルが同程度の SUS304 に対して SM400, SUS304N2 に対して SM490Y による検証を行う。

2. 解析方法

本研究で扱う SUS304 および SUS304N2 製無補剛周辺単純支持板の耐荷力特性と変形性能を照査するにあたっての数値計算法について述べる。

2.1 ステンレス鋼の応力ひずみ関係

ステンレス鋼の応力ひずみ関係は炭素鋼に見られるような明確な降伏棚と降伏応力が発生しないラウンドハウス型を示すことが知られている。通常、このような応力ひずみ関係は、次式の Ramberg-Osgood 曲線により表現される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 ε : ひずみ, σ : 応力, E : 弾性係数, n : 材料パラメータ, $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力である。式(1)に含まれる材料パラメータを 0.2%耐力までの応力点から決定すると、0.2%耐力までの応力ひずみ関係は精度良く表現されるが、0.2%耐力を超える領域は曲線の外挿となり、応力を過大評価することが知られている。本研究では、図1に示すように比例限界を数値解析上の降伏応力と定義して線形弾性域を設定し、Ramberg-Osgood 曲線を修正した式やマルチリニア型のモデルを組み合わせた複合 Ramberg-Osgood 曲線⁹⁾を用いる。

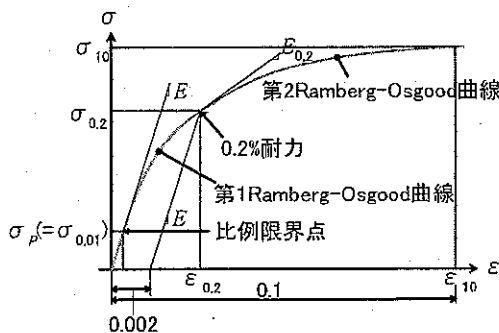


図1 複合 Ramberg-Osgood 曲線

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & (0 \leq \sigma < \sigma_p) \\ \frac{\sigma}{E} + 0.002 \frac{\sigma^n - \sigma_p^n}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_p^n} & (\sigma_p \leq \sigma < \sigma_{0.2}) \\ \frac{\sigma}{E} + \frac{0.002n\sigma_{0.2}^{n-1}}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_p^n} \sigma + \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \\ + \left(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}} \right)^m & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 σ_p : 比例限界に対する応力, $E_{0.2}$: 0.2%耐力時の接線弾性係数, n, m : 第1, 第2の曲線の曲率を表す硬化パラメータ, σ_{10} : 10%のひずみ時の応力, ε_{10} : 10%のひずみ(=0.1)である。

複合 Ramberg-Osgood 曲線の精度の確認のため、図2に SUS304 と SUS304N2 の引張試験結果と複合 Ramberg-Osgood 曲線を示す。同図より、複合 Ramberg-Osgood 曲線は試験結果を精度良く再現していることがわかる。ここで、式(2)に含まれる材料定数は引張試験から求め、これらを表1にまとめる。後述の数値計算にもこれらの値を利用することとする。

2.2 解析モデル

一様圧縮を受ける SUS304 および SUS304N2 製無補剛板の耐荷力特性を数値計算により照査するために使用した解析モデルを図3に示す。同図に示すように、 y 方向から一様圧縮を受ける周辺単純支持板を対象とし、変形モードの二軸対称性を考慮して、図中の色で示した 1/4 モデルを図4

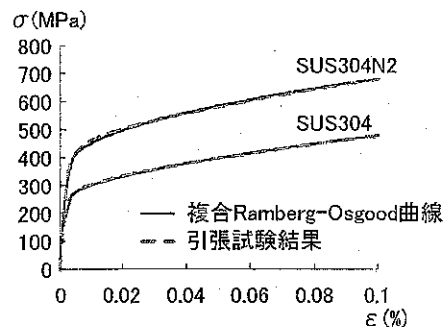


図2 SUS304 と SUS304N2 の応力ひずみ関係

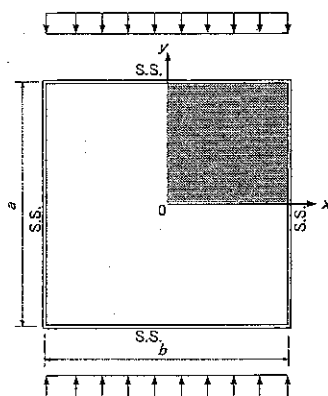


図3 一方向一様圧縮力を受ける無補剛周辺単純支持板

のように取り出して解析を実施する。同モデルを8節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて分割し、数値計算を行う。ステンレス鋼部材を溶接した断面の残留応力を測定したケースが少ないため、残留応力の正確なデータが得られていないのが現状である。そのため、本研究では初期不整として初期たわみのみを考慮することとする。与える初期たわみ w_0 は、道路橋示方書⁴⁾に示される許容誤差 $\overline{w_0}$ ($=b/150$) の最大値を用いて、次式により与える。

$$w_0 = \overline{w_0} \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{a}\right) \quad (3)$$

ここで、 a と b は図3の無補剛板の高さと幅を表したものである。

2.3 断面形状

無補剛周辺単純支持板の形状は、縦横比 α を1から4と1ずつ変化させ、幅厚比パラメータ λ_p を0.2から2.0と0.1ずつ変化させて決定している。幅厚比パラメータ λ_p は次式に示すとおりである。

$$\lambda_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4)$$

ここで、 b と t は図3に示す無補剛板の幅と厚さ、 σ_y : 降伏応力、 μ : ポアソン比($=0.3$)、 k : 座屈係数($=4$)である。幅厚比パラメータ λ_p の変化は、板厚 t を変化させることにより表現する。式(4)に含まれるステンレス鋼についての基準強度は、明確な降伏応力が表れないため、SUS304 及び SUS304N2 に対して表1で示した弾性限に対す

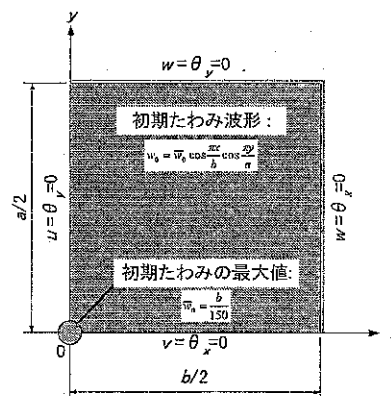


図4 解析モデル

る応力 σ_P 、0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ 、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の3つを用いて断面設計を行う。これらの3つの基準強度を仮定したオーステナイステンレス鋼製無補剛板の耐荷力および変形性能を、強度の面で同等な軟鋼製無補剛板との比較を行う。比較は、SUS304 に対して SM400、SUS304N2 に対して SM490Y により行う。

3. 解析結果および考察

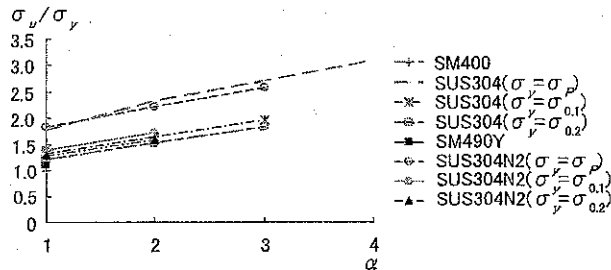
SUS304 および SUS304N2 製無補剛が一方向一様圧縮力を受ける場合の耐荷力特性および変形性能を照査するために、数値計算を実施し、断面形状決定の際に用いた3つの基準強度による特性と同程度の強度を有する軟鋼との比較を行った解析結果と考察を述べる。

3.1 耐荷力特性

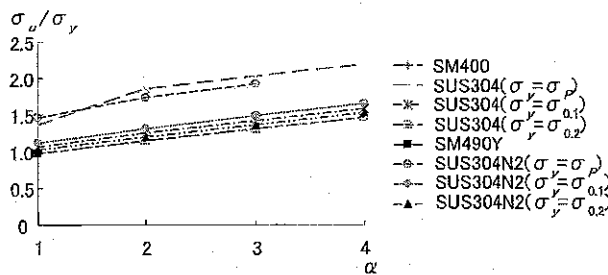
数値計算により得られた一方向一様圧縮を受ける SUS304 と SM400 および SUS304N2 と SM490Y について、幅厚比パラメータが0.3, 0.5, 0.7, 0.9 のときの終局強度と縦横比の関係を図5に示す。同図から、解析を行った全ての周辺単純支持板において、いずれの幅厚比パラメータに対しても縦横比が1の場合の終局強度が最も小さくなる事が分かる。

次に、本研究で対象とした縦横比が1から4の範囲で終局強度が最も小さくなる1の場合の平均応力 σ と平均ひずみ ε の関係を図6と図7に示す。図の縦軸に示す平均応力 σ は、荷重を断面積で除した値であり、横軸の平均ひずみ ε は強制変位量を板の長さ a で除した値である。0.1%耐力または

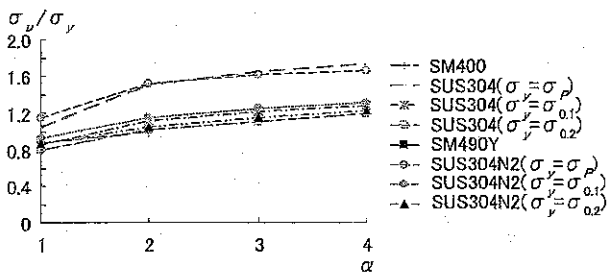
0.2%耐力を用いたステンレス鋼と軟鋼の極限強度は、両図(b)の幅厚比パラメータが1.0の場合において SUS304 が SM400 に対して 16%程度、SUS304N2 が SM490Y に対して 6%程度小さくなっているものの、いずれの幅厚比パラメータについてもステンレス鋼は軟鋼と同程度の強度を有



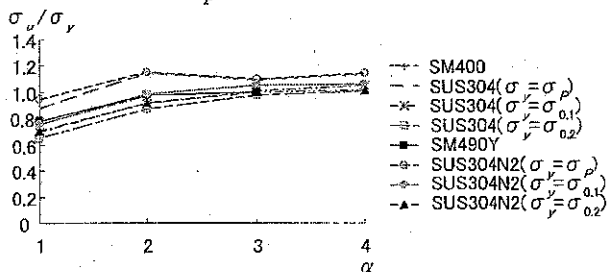
(a) $\lambda_p = 0.3$



(b) $\lambda_p = 0.5$



(c) $\lambda_p = 0.7$



(d) $\lambda_p = 0.9$

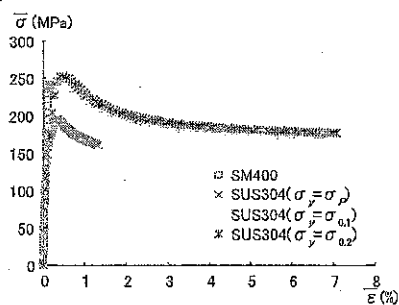
図5 終局強度と縦横比の関係

することが分かる。また、各幅厚比パラメータにおいて、SUS304 と SUS304N2 は SM400 と SM490Y に比べて極限強度を越えた後の強度の低下は緩やかであることが分かる。さらに、SUS304 および SUS304N2 は極限を向かえるひずみ量が SM400 及び SM490Y に比べ 2 から 5 倍程度大きくなっていることが分かる。これらのことから、オーステナイト系ステンレス鋼単純支持板は軟鋼と同程度の強度を持つとともに優れた靱性を有することが分かる。

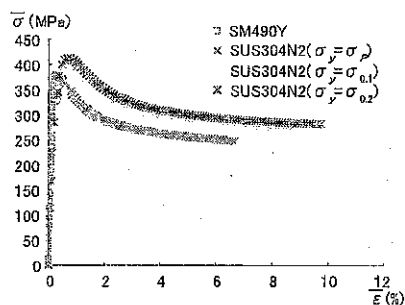
図8と図9に、縦横比が1の場合の SUS304、SM400 と SUS304N2、SM490Y の解析から得られた結果をまとめた耐荷力曲線を示す。図中には、比較のために Euler 曲線及び道路橋示方書の耐荷力曲線を示している。SUS304 と SUS304N2 の耐荷力曲線を SM400 と SM490Y で比較してみると、幅厚比パラメータが 0.5 以下の範囲では、3 つ全ての基準強度を用いたステンレス鋼の結果が軟鋼に比べて安全側であり、0.6 以上では 0.1% 耐力を基準強度に用いたステンレス鋼板と軟鋼の結果が近づいていることが分かる。本研究では縦横比が 1 から 4 の範囲での検討を行っているが、周辺単純支持板の終局強度が最も小さくなる 0.5 付近での強度特性等を調べる必要がある⁵⁾。

3.2 変形性能

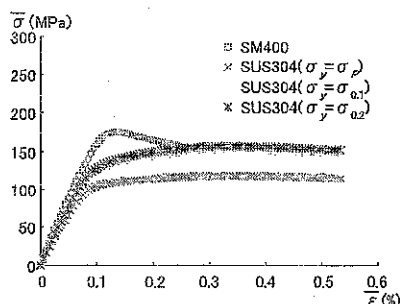
耐荷力が最も小さくなる縦横比が1の場合の一方向一様圧縮力を受ける周辺単純支持板の変形性能を調べた結果を図10と図11に示す。縦軸の変形性能は、極限強度を迎えるときの変位を全断面降伏時の変位で無地元化しており、横軸は幅厚比パラメータを表す。両図から、幅厚比パラメータがある程度大きくなるとその変形性能は一定になることが分かる。また両図ともに、軟鋼製無補剛板では、幅厚比パラメータの増大と共に直線的に変形性能が減少し、SM400 では幅厚比パラメータが 0.3、SM490Y では幅厚比パラメータが 0.4 以降一定となる。一方、ステンレス鋼については曲線的に変形性能が減少していることが分かる。また、変形性能の値がほぼ一定大きさは SUS304 及び SUS304N2 と SM400 及び SM490Y に比べていずれの基準強度を用いた無補剛板に対しても大きくなることが分かる。これらのことから、一様圧縮力を受けるオーステナイト系ステンレス鋼製



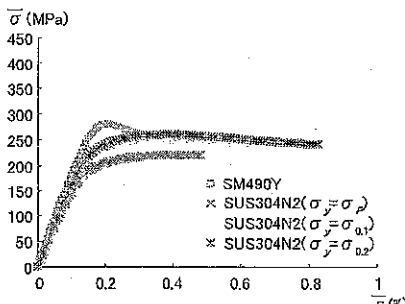
(a) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=0.5$



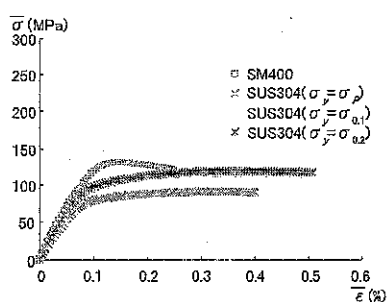
(a) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=0.5$



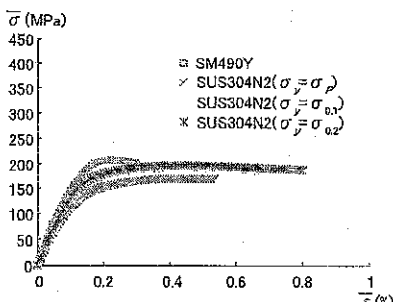
(b) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=1.0$



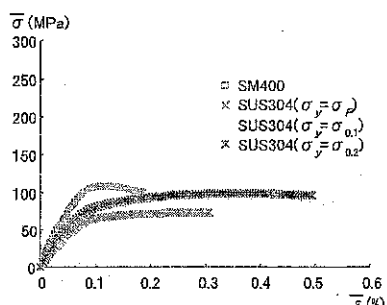
(b) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=1.0$



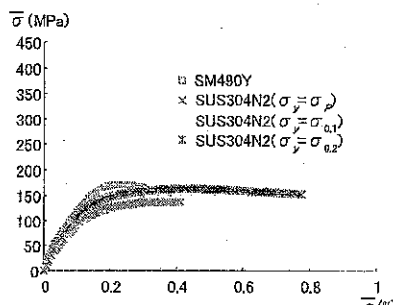
(c) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=1.5$



(c) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=1.5$



(d) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=2.0$



(d) $\alpha=1, \bar{\lambda}_p=2.0$

図6 SUS304およびSM400の平均応力-平均ひずみ関係

図7 SUS304N2およびSM490Yの平均応力-平均ひずみ関係

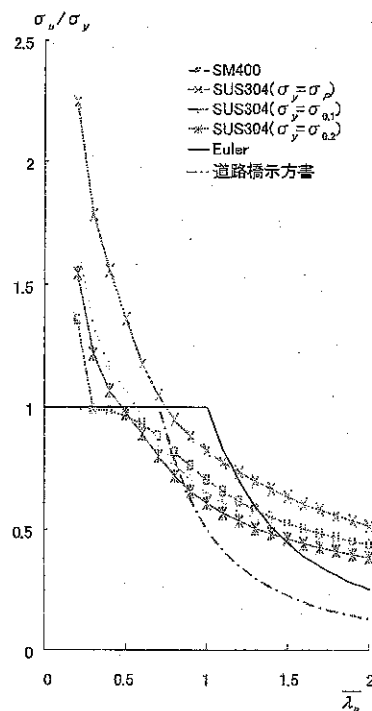


図8 SUS304およびSM400の耐荷力曲線($\alpha=1$)

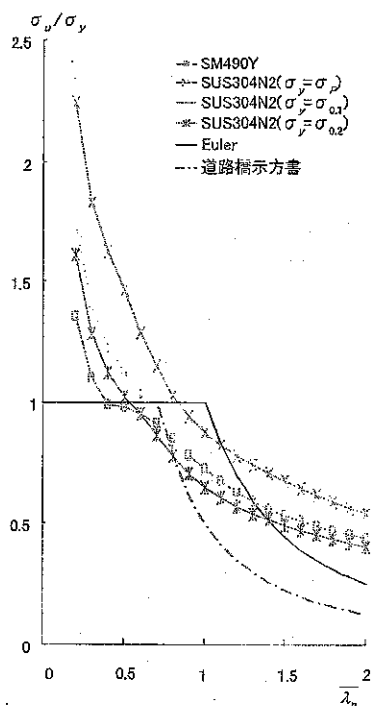


図9 SUS304N2およびSM490Yの耐荷力曲線($\alpha=1$)

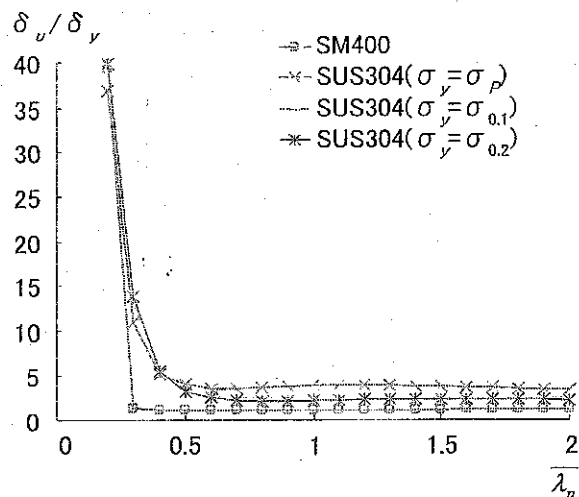


図 10 SUS304 および SM400 の変形性能

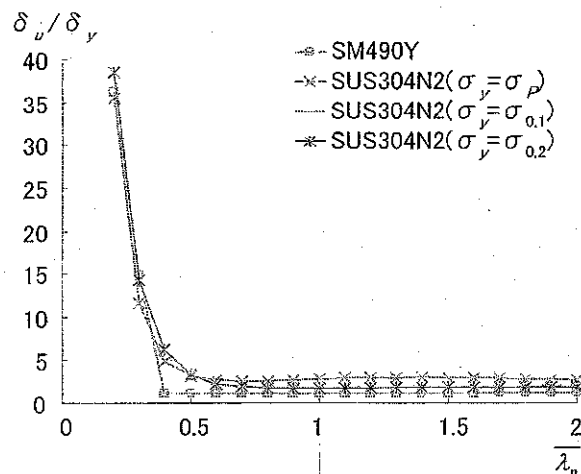


図 11 SUS304N2 および SM490Y の変形性能

単純支持板の変形性能は、軟鋼製と同程度以上の特性を持つことが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、軟鋼に比べて優れた耐食性を有するオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 及び SUS304N2 を橋梁部材に活用することを目的として、その応力ひずみ関係を精度よく表現できる構成モデルを導入した数値計算により、一様圧縮を受ける無補剛周辺単純支持板の耐力性能および変形性能を照査した。以下に、本研究で得られた内容をまとめる。

- (1) 一様圧縮を受ける $\alpha \geq 1$ の無補剛周辺単純支持板では、鋼種によらず縦横比が 1 の場合に最も危険であることが明らかとなった。
- (2) SUS304 および SUS304N2 において、明確な降伏点がないことから、弾性限に対する応力、0.1%耐力、0.2%耐力の 3 つの降伏応力を仮定して耐力特性を照査した結果 0.2%耐力、0.1%耐力、弾性限に対する応力の順に強度が大きくなることが明らかとなった。
- (3) また、両ステンレス鋼と軟鋼との強度特性の比較を実施したところ、両ステンレス鋼共に 0.1%耐力を用いて設計した断面が軟鋼の結果に近い挙動を示すことが明らかとなった。
- (4) 周辺単純支持板の変形性能は、実際的な幅厚比パラメータ $0.3 \leq \lambda_p \leq 0.7$ の範囲であるステンレス鋼が軟鋼に比べて優れていることが明らかとなった。

謝辞

本研究の実施に当たっては、社団法人日本鋼構造協会より、鋼構造研究グループ助成(「ステンレス鋼を用いた圧縮板の終局強度特性に関する研究」、代表者: 明石高等工業専門学校 越智内土)の助成金を受けた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No. 668/I-54, pp. 299-311, 2001.1.
- 2) ステンレス構造建築協会: ステンレス建築構造設計基準・同解説, 技報堂出版, 2001.5.
- 3) 森省吾, 三好崇夫, 越智内土, 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼の応力ひずみモデルが終局強度に及ぼす影響について, 鋼構造年次論文報告集第 15 巻, 日本鋼構造協会, 2007.11.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II. 鋼橋編, 丸善, 2002.3.
- 5) 小松定夫, 北田俊行: 初期不整を有する圧縮板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文報告集, No.270, pp.1-14, 1978.2.