

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

A study on effects of stress-strain models for austenitic stainless steel on ultimate strength of compressive plates

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

ABSTRACT JIS SUS304 and SUS304N2 of the austenitic stainless steels are used most widely as the structural stainless steel. However, Japan, has no design standards for stainless steel bridge structures. Since the stainless steels show the “round-house” shaped stress-strain relations unlike ordinary carbon steels, the effect of the stress-strain relations on the ultimate compressive strength of the plates has to be clarified in order to determine the design provisions. In this study, firstly, the accurate constitutive equation for these stainless steels is proposed. Secondly, the constitutive equation is introduced in the finite element analysis code, and the validity is confirmed in comparison with the existing numerical analytical result. Finally, to examine the modeling effect of stress-strain relations, simple constitutive equations for these stainless steels are proposed, and the numerical analysis is demonstrated.

Keywords: オーステナイト系ステンレス鋼, 複合 Ramberg-Osgood 曲線, 終局強度

Austenitic stainless steel, compound Ramberg-Osgood curve, ultimate strength

1. はじめに

炭素鋼構造物の長寿命化には、防食性能を維持することが重要なため、定期的な再塗装や長期安定な防食方法が必要である。一方で、今後、橋梁をはじめとする多くの鋼構造物の老朽化が進み、既設炭素鋼構造物の維持管理が深刻な問題になる。このような状況において、長寿命かつメンテナンスの省力化が期待できる、耐食性に優れたステンレス鋼を橋梁などの社会基盤鋼構造物に活用することが考えられる。我が国では、ステンレス鋼は腐食環境の厳しい水門構造物等への使用実績がある。しかし、ステンレス鋼を橋梁の主部材に適用するための設計基準は整備されていない。

以上の背景から、本研究では、ステンレス鋼のうち最も構造用途に適するとされている、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 と SUS304N2¹⁾に着目し、それらを橋梁などの社会基盤鋼構造物へ活用するための設計基準の策定に向けた基礎資料を得ることを目的として、一様圧縮を受ける周

辺単純支持板と自由突出版の終局強度を解析的に検討することとした。そこで、まず、SUS304 と SUS304N2 の応力-ひずみ関係を精度よく表現できる構成式を考案するとともに、数値解析に導入し、既往のステンレス鋼構造物の終局強度解析を対象とする再現解析から、数値解析の妥当性を検証した。さらに、一般的な材料規格に与えられている SUS304 や SUS304N2 の物理定数と機械的特性値から材料定数の決定できる構成式を用いた終局強度解析の適用性、および応力-ひずみ関係のモデル化が終局強度に及ぼす影響を明確にした。

2. ステンレス鋼の構成式

本研究では、SUS304 と SUS304N2 の材料試験を実施し²⁾、周知のように、ラウンドハウス型の応力-ひずみ関係を得ている。

このような応力-ひずみ関係をモデル化するため、海外の研究では、Ramberg-Osgood 曲線³⁾が多用されている^{4)~6)}。この曲線は、物理的な意味が

*大阪大学大学院 博士前期課程

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**第2種正会員 博(工) 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(工) 明石高等工業専門学校 講師

(〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

**準会員(学生) 修(工) 大阪大学大学院 博士後期課程

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***第2種正会員 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)

本論文の一部は、平成 19 年度土木学会全国大会年次学術講演会で発表予定

明確な弾性係数と 0.2%耐力に加えて、硬化パラメータを材料定数に含んでいる。しかし、0.2%耐力以降での精度低下が指摘されている⁷⁾。そこで、Mirambell ら⁸⁾、Rasmussen⁹⁾や Nethercot ら⁹⁾は、0.2%耐力を境に 2 つの Ramberg-Osgood 曲線が滑らかに接続するように修正した構成式を提案し、いずれも 0.2%耐力以降の応力-ひずみ関係が精度良く表現できることを示している。

一方、我が国では、ステンレス鋼の応力-ひずみ関係のモデル化に、Ramberg-Osgood 曲線を用いた研究は報告されていないが、様々な構成式が提案されている。中村ら¹⁰⁾は、ラウンドハウス型の応力-ひずみ関係を表現できる構成式を提案しているが、この式に含まれる材料定数は物理的な意味が不明確で、材料試験から決定せざるを得ない。また、矢吹ら¹¹⁾は、比例限界と 0.1%耐力を直線で結んだトリリニア型構成式を提案している。

以上から、2 つの Ramberg-Osgood 曲線を用いた構成式は、精度の観点のみならず、含まれる材料定数には物理的な意味が明確なものが多いため、実用的でもある⁷⁾。しかし、Ramberg-Osgood 曲線には降伏応力が存在せず、既往の研究^{8), 9), 12)}は、多直線近似により、有限要素法解析に導入しているが、近似精度が問題になると考える。そこで、本研究では、図-1 のように、比例限界までを線形弾性体、比例限界以降の 0.2%耐力点で 2 つの Ramberg-Osgood 曲線が滑らかに接続するように修正した、複合 Ramberg-Osgood 曲線と称する構成式を考案した。この曲線は次式で表される。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & (0 \leq \sigma < \sigma_p) \\ \frac{\sigma}{E} + 0.002 \frac{\sigma^n - \sigma_p^n}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_p^n} & (\sigma_p \leq \sigma < \sigma_{0.2}) \\ \frac{\sigma}{E} + a\sigma + b + c \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}} \right)^m & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (1)_{1 \sim 3}$$

式(1)の第 3 式の係数 $a \sim c$ は次式で表される。

$$\begin{cases} a = \frac{0.002n\sigma_{0.2}^{n-1}}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_p^n} \\ b = \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \\ c = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \end{cases} \quad (2)_{1 \sim 3}$$

ここに、 σ : 応力、 ε : ひずみ、 E : 弾性係数、 σ_p : 比例限界 (0.01%耐力)、 n : 第 1 の曲線の硬化パラメータ、 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力、 $E_{0.2}$: 0.2%耐力時接線

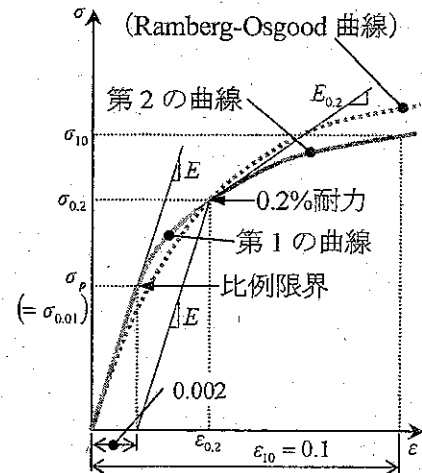


図-1 複合 Ramberg-Osgood 曲線の概略図

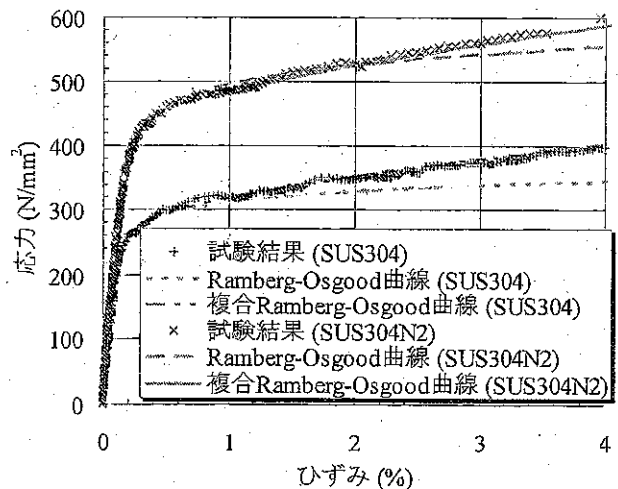


図-2 材料試験結果と構成式の比較

弾性係数、 $\varepsilon_{0.2}$: 0.2%耐力時ひずみ、 m : 第 2 の曲線の硬化パラメータ、 σ_{10} : 10%ひずみ時応力、および ε_{10} : 10%ひずみ ($=0.1$) である。

図-2 には、SUS304 と SUS304N2 の材料試験結果、Ramberg-Osgood 曲線と複合 Ramberg-Osgood 曲線を比較して示した。図-2 より、ひずみ硬化領域では、Ramberg-Osgood 曲線は試験結果との適合性が悪化するが、複合 Ramberg-Osgood 曲線は試験結果を良く表現することが分かる。

3. 数値解析による構成式の検証

本研究では、SUS304 と SUS304N2 の応力-ひずみ関係を忠実に反映した数値解析を実施するため、複合 Ramberg-Osgood 曲線を有限要素法解析コードに導入した。そして、その妥当性を検証するため、再現解析を実施した。

3. 1 有限要素法解析コードの概要

有限要素法解析コードは、8 節点アイソパラメ

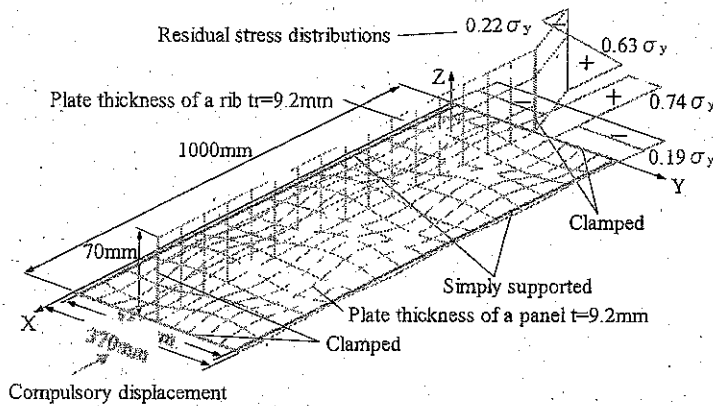


図-3 補剛板の解析モデル

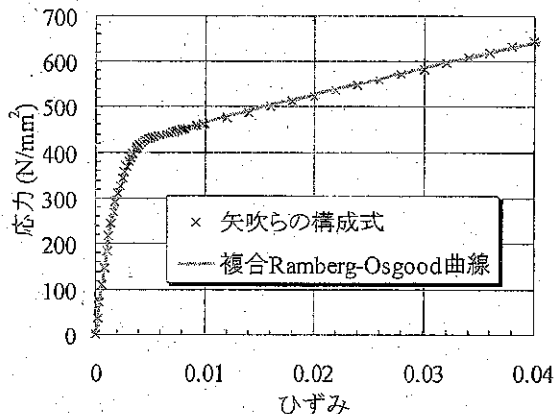


図-4 再現解析に用いた構成式の比較

トリックシェル要素を有するもので、幾何学的非線形性に対しては更新 Lagrange 法に基づいて定式化し、有限回転の影響も考慮した。また、弾塑性問題に対しては、等方硬化則、連合流れ則と von Mises の降伏関数を用いて定式化し、応力積分にはリターン・マッピング法¹³⁾、弾塑性構成式には整合接線剛性¹⁴⁾を用いた。そして、非線形問題の解法には、増分法と反復法を用いた。

3. 2 再現解析モデル

再現解析は、矢吹らによる、建築構造用オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304N2A を用いた補剛板の終局強度解析¹⁵⁾を対象とした。補剛板は、縦リブ1本を有するもので、終局強度解析結果は、実験結果との比較によって妥当性が検証されている。再現解析モデルは、図-3 のように設定し、初期たわみと残留応力も考慮した。なお、図-3 の残留応力分布において、降伏応力 σ_y は、矢吹らの解析と同様に 0.1% 耐力 399N/mm^2 を用いた。また、圧縮力は強制圧縮変位制御で導入した。

矢吹らの解析は中村らの構成式¹⁰⁾を用いており、材料試験からその材料定数が決定されている。本研究では、複合 Ramberg-Osgood 曲線の材料定数

表-1 再現解析に用いた材料定数

弾性係数 E (N/mm ²)	183000
比例限界 σ_p (N/mm ²)	183
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	423
第1の曲線の硬化パラメータ n	6.0
0.2%耐力時ひずみ $\epsilon_{0.2}$	0.004311
0.2%耐力時接線弾性係数 $E_{0.2}$ (N/mm ²)	29555
参照ひずみ ϵ_{10}^{*1}	0.034000
参照応力 σ_{10}^{*2} (N/mm ²)	609
第2の曲線の硬化パラメータ m	1.1

注釈 *1: ひずみ3.4%時の値で ϵ_{10} を代用

*2: ひずみ3.4%時の応力の値で σ_{10} を代用

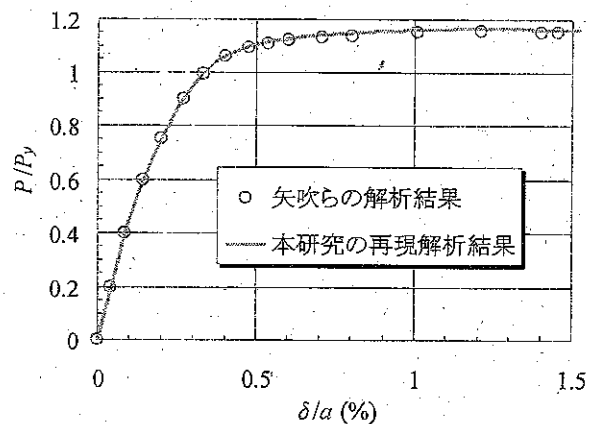


図-5 補剛板の終局強度解析結果の比較

は、矢吹らが用いた構成式から、表-1 のように決定した。各々の構成式を比較して図-4 に示す。

3. 3 再現解析結果

各々の解析結果を比較して図-5 に示す。図-5 の縦軸は圧縮荷重 P を降伏軸力 P_y で除したパラメータ、横軸は圧縮強制変位 δ を補剛板の長さ a (=1000mm) で除した平均圧縮ひずみを表す。

図-5 より、再現解析結果は、矢吹らの解析結果と一致しており、複合 Ramberg-Osgood 曲線を導入した本研究の解析コードは妥当と考える。

4. 応力-ひずみモデルが終局強度に及ぼす影響

考案した複合 Ramberg-Osgood 曲線は、SUS304 と SUS304N2 の応力-ひずみ関係を精度良く表すものの、6つの材料定数 (E , σ_p , n , $\sigma_{0.2}$, m と σ_{10}) が必要である。海外のステンレス鋼構造物の設計基準^{16)~19)}には、Ramberg-Osgood 曲線の材料定数を与えるものもあるが、ステンレス鋼の物理定数や機械的特性値としては、弾性係数(200GPa 程度)とポアソン比 (0.3)、および 0.2%耐力のみが一般的に与えられるため、複合 Ramberg-Osgood 曲線や複雑な構成式の材料定数は、材料試験によらな

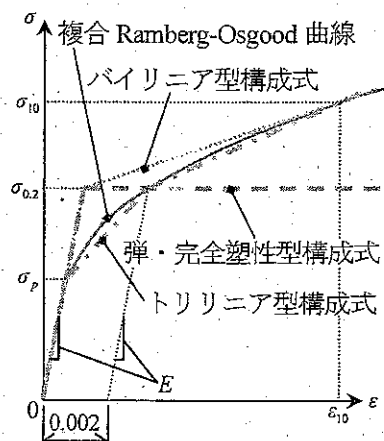


図-6 簡易な構成式の概略図

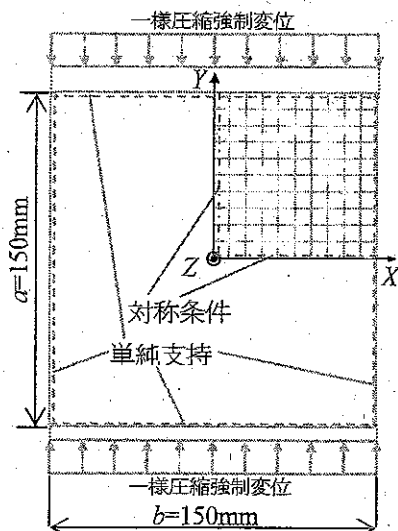


図-7 周辺単純支持板の解析モデル

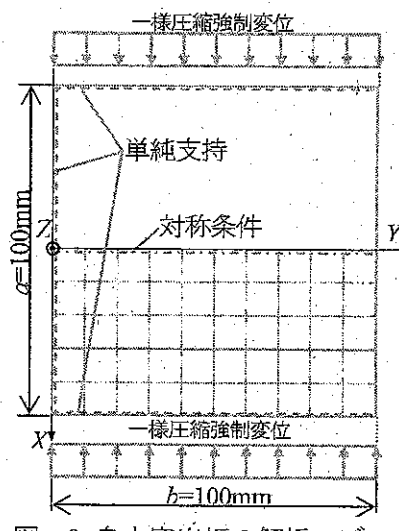


図-8 自由突出板の解析モデル

表-2 終局強度解析に用いた複合 Ramberg-Osgood 曲線の材料定数

鋼種	弾性係数 E (N/mm ²)	比例限界 (0.01%耐力) σ_p (N/mm ²)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	0.2%耐力 時ひずみ $\epsilon_{0.2}$	10%ひずみ 時応力 σ_{10} (N/mm ²)	複合 Ramberg-Osgood 曲線の硬化パラメータ n	0.2%耐力時接 線弾性係数 $E_{0.2}$ (N/mm ²)
SUS304	194313	214	284	0.003461	507	12.9	10158
SUS304N2	203206	361	440	0.004164	732	12.7	14771

ければ決定できない。

そこで、SUS304 や SUS304N2 の物理定数や機械的特性値として一般に与えられている弾性係数と 0.2%耐力から材料定数が決定できる、図-6 の弾・完全塑性型構成式と複合 Ramberg-Osgood 曲線を用いた終局強度解析との比較により、弾・完全塑性型構成式の終局強度解析への適用性を検討した。また、図-6 に示すように、0.2%耐力以降のひずみ硬化挙動が終局強度に及ぼす影響を検討するためのバイリニア型構成式、および比例限界以降の接線弾性係数の低下を考慮するためのトリリニア型構成式も設定した。なお、これらの構成式を用いた終局強度解析は、マルチリニア型構成式を有する有限要素解析コードで実施した。

4. 1 終局強度解析モデル

本研究では、アスペクト比 $\alpha(a/b)=1.0$ の一様圧縮を受ける周辺単純支持板と自由突出板の終局強度に着目した。解析モデルは、それぞれ図-7 および 8 に示すように、対称性を考慮した 1/4 および 1/2 モデルとした。また、複合 Ramberg-Osgood 曲線の材料定数は、材料試験結果²⁾の平均値として表-2 に示すものを用いた。また、3つの簡易な構成式の材料定数も、表-2 の値から決定した。

周辺単純支持板と自由突出板の幅厚比パラメー

タ R は 0.3~2.0 まで 0.1 刻みで変化させ、次式を用いて板厚 t を変化させることで考慮した。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (3)$$

ここに、 b : 板幅、 ν : ポアソン比 (0.3)、および k : 座屈係数 (周辺単純支持板は 4.0、自由突出板は 0.425) である。

初期不整のうち残留応力は、現状では溶接製作ステンレス鋼構造物の残留応力の計測結果は少なく、その分布性状や大きさは必ずしも明確でないため、本研究では考慮していない。また、初期たわみは、周辺単純支持板では、道路橋示方書²⁰⁾に規定されている、板の平面度の最大値として、図-7 の板中央点 ($X=Y=0$) での初期たわみが最大値 $w_{0max}=b/150$ を示すように次式で与えた。

$$w_0 = w_{0max} \cos(\pi X/b) \cos(\pi Y/a) \quad (4)$$

ここに、 a : 板要素の長さである。

また、自由突出板では、道路橋示方書²⁰⁾に規定されている、フランジと腹板の直角度に関する製作誤差の許容値として、図-8 の板の自由縁中央点 ($X=0, Y=b$) での初期たわみが最大値 $w_{0max}=b/100$ を示すように次式で与えた。

$$w_0 = w_{0max} Y/b \cos(\pi X/a) \quad (5)$$

4. 2 解析結果と考察

解析結果として、幅厚比パラメータ R が 0.5, 0.7 と 1.0 の周辺単純支持板と自由突出板について、平均応力 $\sigma/\sigma_{0.2}$ と平均ひずみ $\varepsilon/\varepsilon_y$ の関係をそれぞれ図-9 と図-10 に示す。なお、平均応力は、圧縮力を載荷辺の断面積と 0.2%耐力で正規化したもの、平均ひずみは一樣圧縮強制変位を設計上の降伏ひずみ $\varepsilon_y = \sigma_{0.2}/E$ と長さ a で正規化したものである。また、図中の $\sigma_p/\sigma_{0.2}$ は 0.2%耐力で正規化した比例限界、および $\varepsilon_p/\varepsilon_y$ は設計上の降伏ひずみで正規化した比例限界時ひずみである。

図-9 と 10 より、周辺単純支持板および自由突

出板とも、弾・完全塑性型構成式とバイリニア型構成式を用いた結果は、自由突出板で幅厚比パラメータが 0.5 の場合に終局強度が 1.0 を超過する点を除いては、両構成式による終局強度はほぼ一致しており、本研究でモデル化した 0.2%耐力以降のひずみ硬化挙動は終局強度に大きな影響を及ぼさないことがわかる。

図-9 より、幅厚比パラメータ 0.5 では、いずれの構成式を用いても比例限界到達以降に平均ひずみが急増しており、平均応力-平均ひずみ関係は、図-6 の応力-ひずみ関係の概略図と類似していることが分かる。また、終局強度は、トリリニア

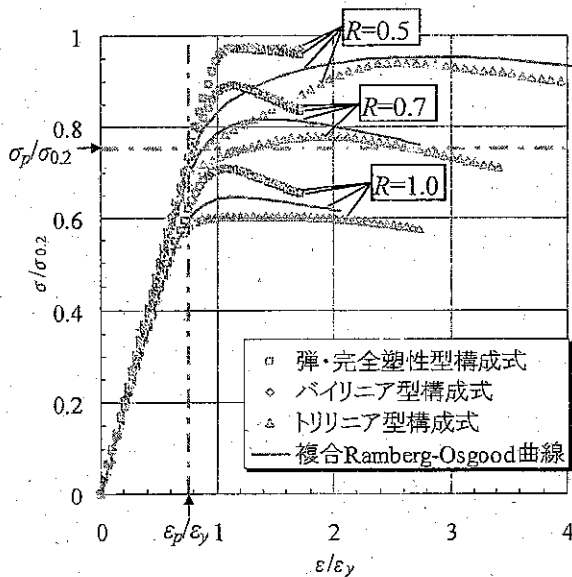


図-9(a) 平均応力と平均ひずみの関係
(SUS304, 周辺単純支持板)

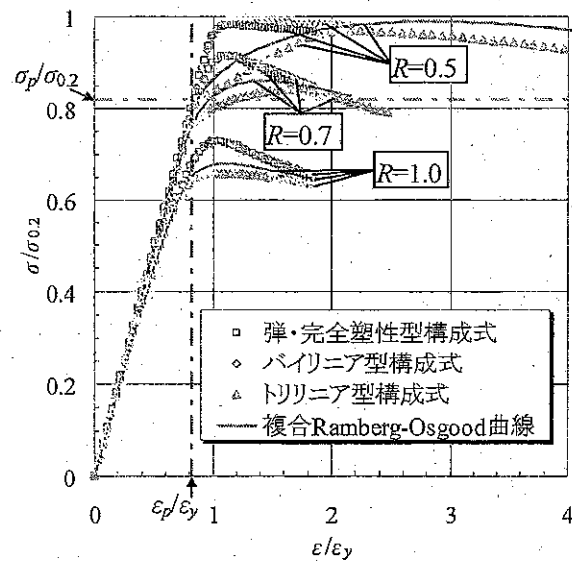


図-9(b) 平均応力と平均ひずみの関係
(SUS304N2, 周辺単純支持板)

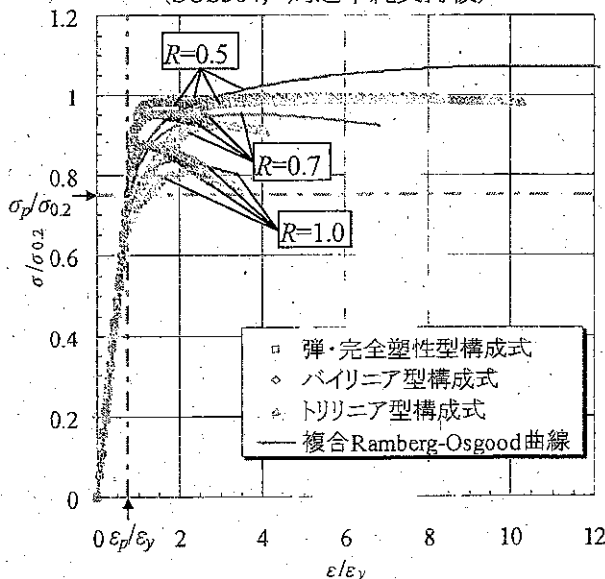


図-10(a) 平均応力と平均ひずみの関係
(SUS304, 自由突出板)

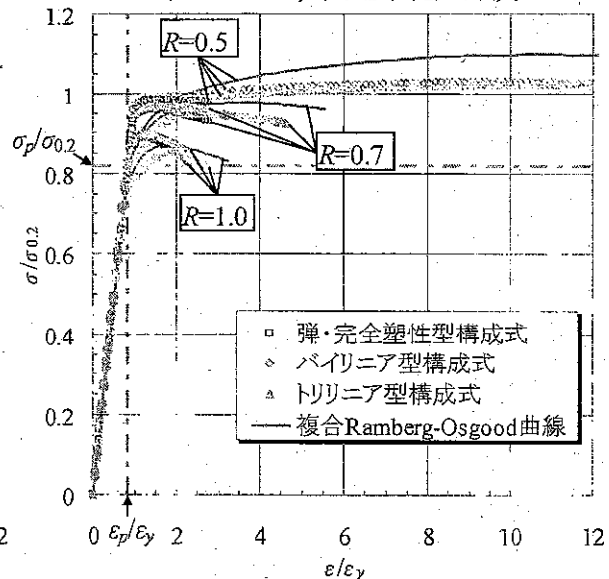


図-10(b) 平均応力と平均ひずみの関係
(SUS304N2, 自由突出板)

型構成式、複合 Ramberg-Osgood 曲線、弾・完全塑性型構成式とバイリニア型構成式の順に大きくなること分る。これは、図-6 に示すように、終局強度が比例限界以降の接線弾性係数の大きさに依存するためであると考え。即ち、弾・完全塑性型構成式やバイリニア型構成式では、比例限界から 0.2%耐力まで接線弾性係数の低下がないため、剛性の低下が小さく、結果的に最も大きな終局強度を示したと考える。幅厚比パラメータ 0.7 と 1.0 では、図-6 の応力-ひずみ関係の概略図との類似性は認められないが、終局強度の大小関係は同じである。したがって、SUS304 や SUS304N2 の終局強度は、比例限界以降の接線弾性係数の低下に大きく影響されると考える。さらに、図-10 より、この傾向は自由突出板も同じである。

次に、周辺単純支持板と自由突出板の終局強度 $(\sigma/\sigma_{0.2})_{max}$ と幅厚比パラメータ R の関係をそれぞれ図-11 と 12 に示す。同図中には、比較として、Euro Inox (Euro Inox D.M. 2nd. Ed.)¹⁶⁾、Eurocode (EC)¹⁷⁾、米国 (ASCE)¹⁸⁾ と豪州・ニュージーランド (NZ/AS)¹⁹⁾ のステンレス鋼構造物の設計基準に規定されている圧縮強度曲線も示す。なお、図-12 において、幅厚比パラメータ 0.3 と 0.4 に関しては、バイリニア型構成式とトリリニア型構成式を用いた解析結果の一部は、強度が上昇し続け、終局強度が現れなかったため省略している。また、欧米の設計基準は SUS304 は網羅するが、SUS304N2 は網羅していない。さらに、EC、ASCE と NZ/AS の圧縮強度曲線は同じである。

図-11 より、周辺単純支持板では、SUS304 および SUS304N2 と、幅厚比パラメータ 0.5 の終局強度はいずれの構成式を用いてもほぼ同じであり、幅厚比パラメータ 0.4 以下では弾・完全塑性型構成式が最も安全側の終局強度を与える。幅厚比パラメータ 0.6 以上では、弾・完全塑性型構成式を用いて得られた終局強度は、バイリニア型構成式を用いて得られた終局強度と一致するが、ともに複合 Ramberg-Osgood 曲線やトリリニア型構成式による終局強度よりも危険側、EC 等の圧縮強度曲線よりも安全側である。これは、EC 等の曲線が、弾・完全塑性型の応力-ひずみ関係を呈する、炭素鋼の圧縮強度曲線を準用している²¹⁾ためであると考え。一方で、Euro Inox の圧縮強度曲線は、EC 等の曲線が危険側であることを考慮して修正されており¹⁾、複合 Ramberg-Osgood 曲線を用いて得られた終局強度に比べて、幅厚比パラメータ 0.5~0.8 の範囲では危険側であるが、全般的に安全側である。したがって、本研究で検討した範囲では、幅厚比パラメータ 0.6 以上の SUS304 や SUS304N2 周辺単純支持板では、比例限界からの接線弾性係数の低下が終局強度に及ぼす影響を無視できないため、終局強度を解析的に把握するためには、弾性係数と 0.2%耐力に加えて、接線弾性係数の低下が表現できる機械的特性値が必要であると考え。

図-12 より、自由突出板においては、SUS304 と SUS304N2 と、幅厚比パラメータ 0.6 以上では、弾・完全塑性型構成式とバイリニア型構成式

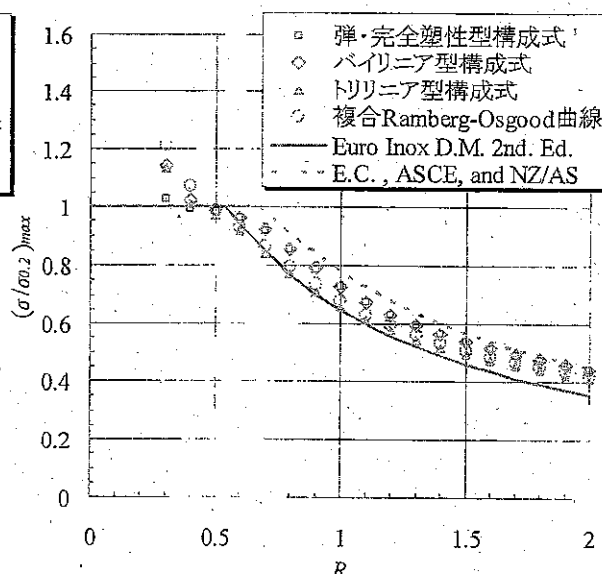
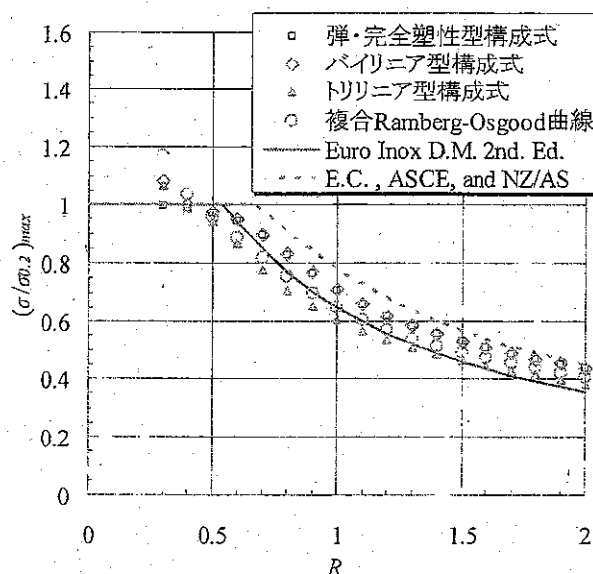


図-11(a) 終局強度 (SUS304, 周辺単純支持板) 図-11(b) 終局強度 (SUS304N2, 周辺単純支持板)

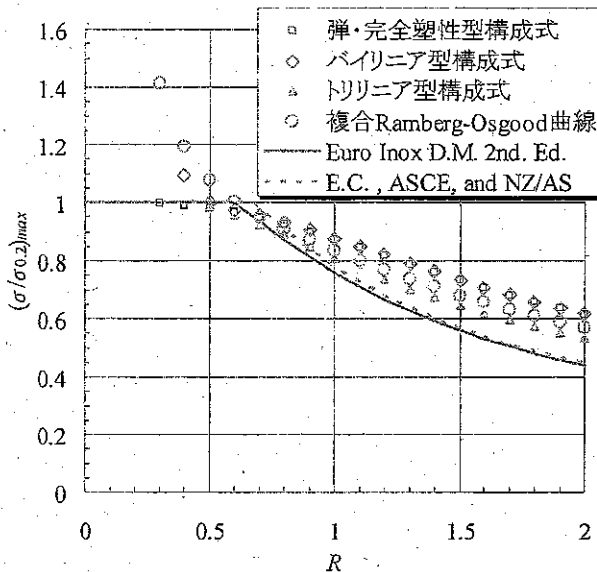


図-12(a) 終局強度 (SUS304, 自由突出版)

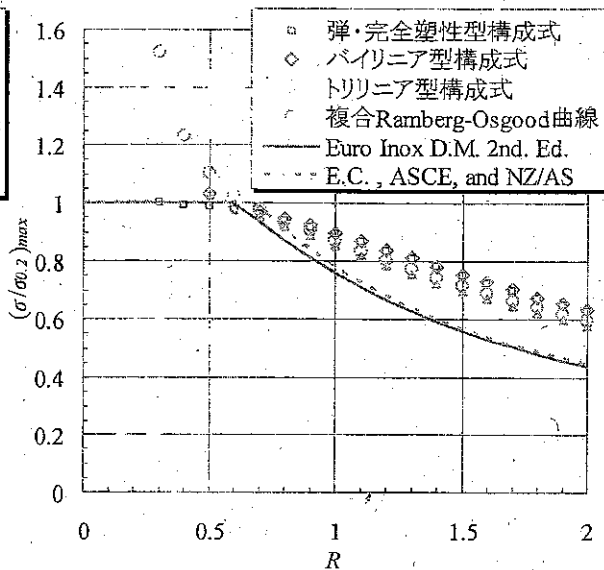


図-12(b) 終局強度 (SUS304N2, 自由突出版)

による終局強度は一致し、幅厚比パラメータ 0.5 以下では、弾・完全塑性型構成式による終局強度が最も安全側、幅厚比パラメータ 0.9 以上では、弾・完全塑性型構成式やバイリニア型構成式による終局強度は、複合 Ramberg-Osgood 曲線やトリリニア型構成式による終局強度に比べて危険側である。しかし、幅厚比パラメータ 0.8 以上では、複合 Ramberg-Osgood 曲線やトリリニア型構成式による終局強度も、Euro Inox や EC 等の圧縮強度曲線に比べると危険側である。これは、本研究の自由突出板のアスペクト比が、終局強度の大きい 1.0 であるためと考える。したがって、今後、アスペクト比の大きい自由突出板を対象とした検討が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 と SUS304N2 の応力-ひずみ関係を精度良く表現できる構成式を考案するとともに、それを数値解析に導入し、既往の研究成果との比較から妥当性を検証した。また、アスペクト比 1.0 の一様圧縮を受ける周辺単純支持板と自由突出板の終局強度に着目して、材料規格等と与えられている物理定数や機械的特性値から材料定数の決定できる簡易な構成式の適用性、および応力-ひずみ関係のモデル化の影響についても検討した。その結果、以下知見が得られた。

- 1) 複合 Ramberg-Osgood 曲線は、SUS304N2 と

SUS304 のひずみ硬化領域での応力-ひずみ関係をも精度よく表現できる。

- 2) 複合 Ramberg-Osgood 曲線を導入した有限要素解析コードは、既往のステンレス鋼補剛板の終局強度解析結果を再現できるため、妥当である。
- 3) 周辺単純支持板および自由突出板の終局強度は、0.2%耐力以降のひずみ硬化特性よりも、比例限界以降の接線弾性係数の低下に大きく左右される。
- 4) 幅厚比パラメータが、周辺単純支持板で 0.5 以下、自由突出板で 0.6 以下であるものについては、弾・完全塑性型構成式を用いて安全側に終局強度を予測できる可能性がある。
- 5) Eurocode 等に与えられている、周辺単純支持板の圧縮強度曲線が危険側であることが、本研究での検討によっても示された。

なお、本研究の SUS304 や SUS304N2 の終局強度解析では、残留応力の影響を無視したが、今後実験等を通して残留応力の分布性状や大きさなどについて明確にする必要がある。また、設計基準の策定に際しては、本研究では 0.2%耐力として扱った設計上の基準強度をどのように設定するのか明確にする必要があると考える。

謝辞 本研究の実施にあたっては、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 越智内士)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) Design Manual for Structural Stainless Steel -Commentary-, Second Edition, Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2002.
- 2) 森 省吾, 奈良 敬, 宮寄靖大, 三好崇夫: ステンレス鋼 (SUS304, SUS304N2) の繰り返し載荷時における材料特性, 平成 18 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-30, 2006.
- 3) Ramberg, W. and Osgood, W. R. : Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note, No.902, 1943.
- 4) Johnson, A. L. and Winter, G. : Behaviour of Stainless Steel Columns and Beams, Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, ST5, pp.97-118, 1966.
- 5) K. J. R. Rasmussen, and G. J. Hancock : Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members. I : Columns, Journal. of Structural Engineering, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 119 (8), pp.2349-2367, 1993.
- 6) K. J. R. Rasmussen, and G. J. Hancock : Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members. II : Beams, Journal. of Structural Engineering, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 119 (8), pp.2368-2386, 1993.
- 7) K. J. R. Rasmussen : Full-Range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys, The University of Sydney, Department of Civil Engineering, Sydney, NSW 2006, AUSTRALIA, Research Report No R811, November 2001.
- 8) Mirambell, E. and Real, E. : On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation, Journal of Constructional Steel Research, Vol 54, Elsevier, pp109-133, 2000.
- 9) L. Gardener and D. A. Nethercot : Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components - A Consistent Approach, Journal of Structural Engineering, Proceedings of American Society of Civil Engineers, pp.1586-1601, 2004.
- 10) 中務尚美, 中村 武: 金属系新素材・新材料の利用技術の開発 (その 27) SUS304 ステンレス鋼 H 形弾面材の座屈耐力に関する実験的研究 その 1 圧縮材の座屈耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991.
- 11) 松下裕明, 岩田節雄, 矢吹哲哉, 有住康則: ステンレス鋼材の応力-ひずみモデルの設定と強度評価, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, I-520, pp.1037-1038, 2004.
- 12) K. J. R. Rasmussen, T. Burns, P. Bezkorovainy, and M. R. Bambach : Local Buckling of Cold-formed Stainless Steel Sections, The Steel Construction Institute, pp.1-19, 2003.
- 13) Simo, J. C. and Taylor, R. L. : A Return Mapping Algorithm for Plane Stress Elastoplasticity, Int. J. for Num. Meth. In Engng., Vol.22, pp.649-670, 1986.
- 14) Simo, J. C. and Taylor, R. L. : Consistent Tangent Operators for Rate-dependent Elastoplasticity, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engng., Vol.48, pp.101-118, 1985.
- 15) 松下裕明, 岩田節雄, 有住康則, 矢吹哲哉: ステンレス鋼を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐荷力特性, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.833-844, 2003.
- 16) Design Manual for Structural Stainless Steel, Second Edition, Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2002.
- 17) ENV 1993-1-4: 1996 Eurocode 3 : Design of Steel Structures. General Rules. Supplementary rules for stainless steels, CEN, 1996.
- 18) Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural members (SEI/ASCE 8-02) (Standards No. 02-008), American Society of Civil Engineers, 2002.
- 19) AS/NZS 4673: 2001, Cold formed stainless steel structures, 2001
- 20) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編および II 鋼橋編, 2002.
- 21) Baddoo, N. R. : A Comparison of Structural Stainless Steel Design Standards, The Steel Construction Institute, pp.131-150, 2003.