

二相系ステンレス鋼板の極限圧縮強度特性

Ultimate Strength for Duplex Stainless Steel SUS329J3L Plate under Compressive Forces

三好 崇夫*, 宮寄 靖大**, 奈良 敬***

Takao Miyoshi, Yasuhiro Miyazaki, Satoshi Nara

*博士(工学), 大阪大学大学院助教, 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**修士(工学), 大阪大学大学院特任研究員, 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

This paper presents ultimate compressive strength of stainless steel plates made of duplex stainless steel "SUS329J3L". Because of higher strength of duplex stainless steel than ordinary austenitic one, duplex stainless steel is convenient for structural steel. At first, material properties of SUS329J3L are experimentally obtained, and stress-strain diagram is proposed. Secondly, ultimate compressive strength of two types of plates, that is, simply supported plates and outstanding ones made of SUS329J3L, is examined, and compared with that of SM570. Finally, ultimate compressive strength curves of the plates of SUS329J3L is discussed in comparison with the design curve for stainless steel plates specified by EN 1993-1-4.

Key Words: duplex stainless steel SUS329J3L, ultimate compressive strength, initial imperfection, ductility

キーワード: 二相系ステンレス鋼, SUS329J3L, 極限圧縮強度, 初期不整, 変形性能

1. まえがき

高度経済成長期に構築された我が国の社会基盤構造物は、2010 年以降、供用期間 50 年が経過し、維持管理に関する課題がさらに増加することが予測できることから、構造物の耐久性が重要になっている。

構造物を構成する鋼材に着目してみると、腐食に対する維持管理を軽減することを目的として開発された耐候性鋼¹⁾がある。また、我が国の建築構造用部材として、既に利用されているステンレス鋼²⁾が挙げられる。ステンレス鋼は、構造用炭素鋼に比べて、耐食性に優れると共に、その強度は炭素鋼と同等以上である。さらに、ステンレス鋼は多くの鋼種が開発されているため、様々な分野への使用実績がある³⁾。構造部材への利用に着目してみると、欧米等にてその設計規準類が整備されており、既にその使用実績が見られる⁴⁾。ステンレス鋼の中でも、一般的なオーステナイト系ステンレス鋼は、我が国の建築構造物の主部材への利用を目的として、設計基準⁵⁾が設けられて

いる。同鋼種を橋梁部材に利用することを目的として、松下ら^{6) 7) 8)}によって、炭素鋼よりも材料単価が高いステンレス鋼の初期コストを抑えるため、従来鋼と組み合わせた断面構成が提案され、その溶接性および初期不整が、実験と解析により明らかにされている。また、地球希少元素であるニッケルを含有しないフェライト系ステンレス鋼により構成される部材の強度特性や変形特性に関する研究も報告されている⁹⁾。オーステナイト系ステンレス鋼に比べて、ニッケルの含有量が少なく、強度と耐食性に優れたステンレス鋼として、二相系ステンレス鋼が挙げられる。我が国では、二相系ステンレス鋼として SUS329J3L が開発されている。既に二相系ステンレス鋼については、欧州において構造物に適用するための設計規準が整備されているものの、従来の構造用炭素鋼やオーステナイト系ステンレス鋼に準拠した規準のため、二相系ステンレス鋼が持つ特徴を有効に活用できる規準でないことが指摘されている¹⁰⁾。さらに、SUS329J3L を橋梁用構造部材に活用するに際しては、その強度特性

表-1 鋼材の化学成分

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS329J3L	0.006	0.55	1.8	0.025	0.001	5.77	22.46	3.09	0.17
SM570	0.18以下	0.55以下	1.60以下	0.035以下	0.035以下	—	—	—	—
SUS304	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	8.00～10.50	18.00～20.00	—	—
SUS304N2	0.08以下	1.00以下	2.50以下	0.045以下	0.030以下	7.50～10.50	18.00～20.00	—	0.15～0.30
SUS316	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	10.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	—
SUS410L	0.030以下	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.030以下	—	11.00～13.50	—	—

表-2 鋼材の機械的性質

鋼種	弾性係数 E (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	破断伸び δ (%)	ポアソン比 ν	0.2%耐力または降伏応力 $\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)	降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ or σ_y/σ_u
SUS329J3L	192000	746	48	0.215	528	0.71
SM570	205800	570	26	0.3	504	0.88
SUS304	178000	697	71	0.3	259	0.37
SUS304N2	180000	716	67	0.3	396	0.55
SUS316	179000	574	76	0.3	254	0.44
SUS410L	204000	487	39	0.3	361	0.74

に着目した研究は実施されていないのが現状である。

本研究では、二相系ステンレス鋼 SUS329J3L を構造部材に活用するための基本的な板要素の圧縮挙動と極限強度特性を明確にすることを目的として、数値計算により、SUS329J3L で構成される板の極限圧縮強度特性および変形性能を明らかにする。著者らは、既にステンレス鋼の構成式として、その応力-ひずみ関係を3区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線と称する構成式を提案し、数種類のステンレス鋼の引張試験結果を精度良く再現できることを確認している¹¹⁾。また、同構成式は、SUS329J3L への適用性も確認している¹²⁾。そこで、これらの構成式を導入した数値計算により、一方向一様圧縮力を受ける周辺単純支持板および3辺単純支持1辺自由とする境界条件を有する自由突出板を対象として、縦横比(=a/b)、幅厚比パラメータおよび残留応力の大きさをパラメータとして設定し、それらが圧縮挙動、極限圧縮強度や変形性能に及ぼす影響について、機械的性質が SUS329J3L と対応関係にある SM570 と比較する。これにより、SUS329J3L の圧縮挙動と極限強度特性について明確にするとともに、SUS329J3L を橋梁部材に適用するにあたっての有効性と問題点を明らかにする。

2. 機械的特性

表-1 および表-2 は、SUS329J3L の化学成分および既往の研究¹¹⁾で明らかにした機械的性質をまとめたものである。また、これらの表中には、比較のため SM570、SUS304、SUS304N2、SUS316 および SUS410L の機械的特性を示す^{13) 14) 15)}。さらに、表-2 のステンレス鋼の機械的性質については、著者らが行ってきた引張試験結果を基に、圧延方向および圧延直角方向の平均値の値を示している。

表-1 より、SUS329J3L は Mo と N を含有するため、

耐塩化物腐食性に優れることが知られている。また、表-2 より、構造用炭素鋼 SM570 に比べて、各種ステンレス鋼は、延性が優れ、降伏比は、14%以上小さいことがわかる。これらより、SUS329J3L は、塩化物環境下での耐食性が優れ、強度は SM570 と同等であるといえる。

3. 数値計算法の妥当性の検証¹¹⁾

本研究では、SUS329J3L および SM570 からなる周辺単純支持板、自由突出板の極限強度特性を数値計算により明らかにする。ここでは、使用する数値計算法とその妥当性について述べる。

3.1 数値計算法の概要

数値計算は、8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いた有限要素法を使用する。解析は、幾何学的非線形性に対して、更新 Lagrange 法に基づいて定式化し、有限回転の影響を考慮する。また、弾塑性問題に対しては、等方硬化則、関連流動則と von Mises の降伏関数を用いて定式化し、応力積分には、整合接線剛性を用いる。そして、非線形問題の解法には、増分法と反復法を使用する。

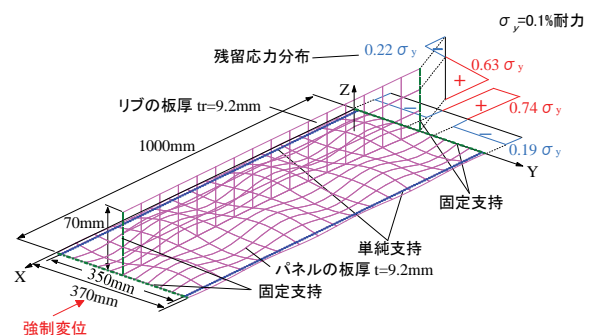


図-1 補剛板の解析モデル

表-3 SUS304N2A の複合 Ramberg-Osgood 曲線に含まれるパラメータ

弾性係数 E (N/mm ²)	比例限界 s_y (N/mm ²)	0.2% 耐力 $s_{0.2}$ (N/mm ²)	第1のRamberg-Osgood曲線の 硬化パラメータ n	0.2% 耐力 時ひずみ $e_{0.2}$	0.2% 耐力時 接線弾性係数 $E_{0.2}$ (N/mm ²)	参照 ひずみ e_{10}^{*1}	参照応力 s_{10}^{*2} (N/mm ²)	第2のRamberg-Osgood曲線の 硬化パラメータ m
183000	183	423	6.0	0.004311	29555	0.034000	609	1.1

注釈 *1: 微小ひずみ問題であるため、ひずみ3.4%時の値で e_{10} を代用
*2: ひずみ3.4%時の応力の値で s_{10} を代用

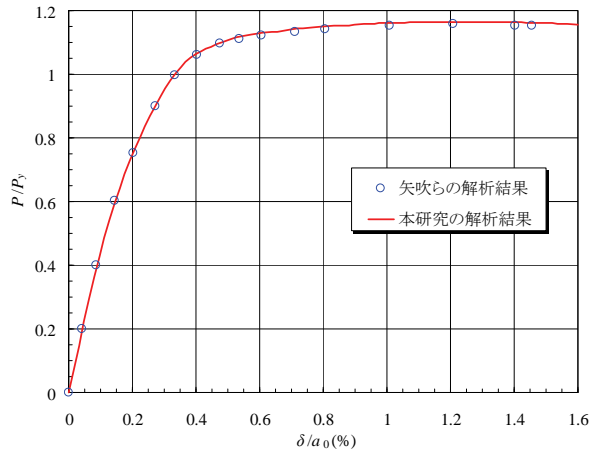


図-2 SUS304N2A 製補剛板の荷重と変位の関係

3.2 数値計算法の妥当性

数値計算の妥当性を検証するため、図-1 に示す SUS304N2A で構成される縦リブ一本を有する補剛板を対象に、その極限圧縮強度特性を調べた。妥当性を検証するための数値計算結果は、同補剛板の圧縮挙動の実験結果に対する妥当性が確認されているものである⁶⁾。また、比較対象とする数値計算における構成式は、マルチリニア型を採用していることから、本研究で使用する 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線に適用させるため、マルチリニア型の構成式を基に、複合 Ramberg-Osgood 曲線に含まれるパラメータを決定した。それらを表-3 にまとめる。

数値計算により得られた圧縮荷重 P を降伏軸力 P_y で無次元化した値と強制圧縮変位量 δ を補剛板の長さ a で無次元化した値の関係を図-2 に示す。同図より、実線で示す 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線を用いた結果は、点で示す既往の数値計算結果と良く一致していることが確認できる。これより、本研究で使用する数値計算法の妥当性が明確となった。したがって、SUS329J3L で構成される板の極限圧縮強度特性の把握にあたっては、同数値計算法を使用することとする。

4. 解析モデル

SUS329J3L で構成される周辺単純支持板および自由突出板が、一方向一様圧縮力を受ける場合の圧縮挙動と極限強度特性を、文献 11) の数値計算手法を用いて明らか

にするとともに、それらを SM570 と比較するため、以下に述べる構成式、圧縮板モデルと解析パラメータを用いた。

4.1 構成式

既に、著者らは、引張試験に基づいて、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 などの応力-ひずみ関係を精度良く表現できる複合 Ramberg-Osgood 曲線を提案している¹¹⁾。この曲線は次式で表される。

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

式(1)の第 3 式の係数 a, b, c は式(2)で表される。

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

ここに、 σ : 応力、 ε : ひずみ、 E : 弾性係数、 σ_p : 比例限界、 n : 0.2%耐力点までの第 1 の曲線の硬化パラメータ、 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力、 m : 0.2%耐力点以降の第 2 の曲線の硬化パラメータ、 $\varepsilon_{0.2}$: 0.2%耐力点での全ひずみ、 σ_{10} : 10% ひずみ時応力、 ε_{10} : 10%ひずみ、および $E_{0.2}$: 0.2%耐力時の接線弾性係数である。なお、本研究では、ステンレス鋼の比例限 σ_p は、欧州のステンレス鋼構造物の設計基準に従って 0.01%耐力とする。

この 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線の SUS329J3L への適用性を検証するため、引張試験結果¹⁶⁾と式(1)を比較して、図-3 に示す。図-3 より、式(1)と試験結果は良好に一致することが分かる。以上より、本研究における SUS329J3L の構成式としては、3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線を用いる。式(1)に含まれる材料定数は、引張試験結果の平均値として、表-4 にまとめる。また、SM570 の構成式については、既往の研究¹⁷⁾で用いられている次式の Bn 曲線で表現する。

表-4 3 区間複合 Ramberg-Osgood 曲線に含まれるパラメータ

E (MPa)	σ_p (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\varepsilon_{0.2}$	σ_{10} (MPa)	ε_{10}	n	m	$E_{0.2}$ (MPa)
19200	316	528	0.00476	789	0.0999	5.91	2.40	34800

表-5 B-n 曲線に含まれるパラメータ

E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y	ε_H	B	n
206000	504	0.00245	0.00909	0.865	0.115

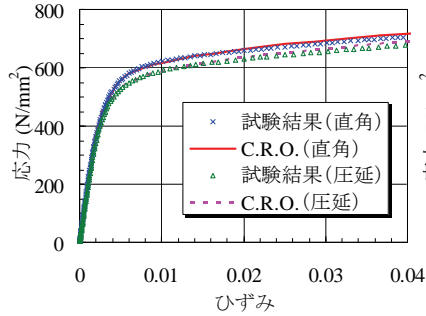


図-3 SUS329J3L の引張試験結果と構成式

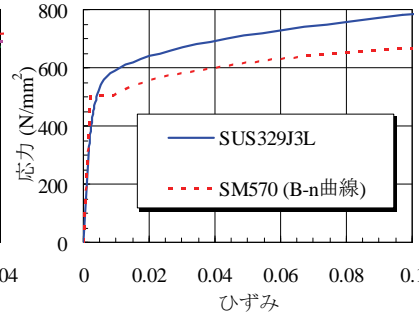


図-4 構成式

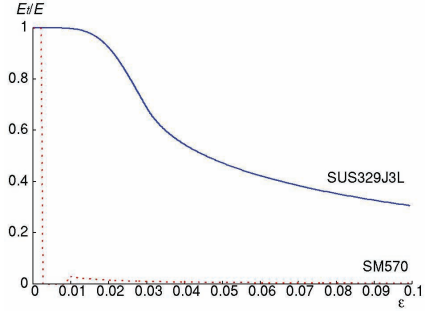


図-5 接線弾性係数とひずみの関係

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \begin{cases} \varepsilon/\varepsilon_y & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ 1.0 & (\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_H) \\ B(\varepsilon/\varepsilon_y)^n & (\varepsilon_H \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 σ_y : 降伏応力、 ε_y : 降伏ひずみ、 ε_H : ひずみ硬化開始点のひずみ、 B と n : ひずみ硬化領域を表す材料定数である。

式(3)に含まれる材料定数は、表-5 に示すとおりである。

図-4 は、以上で述べた構成式(1)および(2)に、表-4 および表-5 の材料定数を代入して、グラフ化して表したものである。図-5 は、構成式(1)、(2)を接線係数 E_t とひずみ ε の関係として示したものであり、縦軸は弾性係数 E で無次元化している。これより、SUS329J3L の緩やかな剛性低下が構成式として表現されていることが確認できる。

4.2 圧縮板モデル

本研究では、SUS329J3L からなる板要素の基本的な圧縮挙動と極限強度特性を把握するため、周辺単純支持板および自由突出板を対象とする。以下に、それぞれのモデルについて説明する。

(1) 周辺単純支持板

トラスの圧縮部材、アーチ橋のアーチリブなどを構成する無補剛断面の各板パネルまたは補剛断面の補剛材およびダイヤフラムで囲まれる板パネル¹⁸⁾などへの SUS329J3L の適用を想定し、それらの基本的な圧縮挙動や極限強度特性に着目して、無補剛周辺単純支持板を解析対象とする。さらに、SUS329J3L で構成される周辺単純支持板の圧縮挙動や極限圧縮強度特性を調べた研

究は報告されていないため、本研究では、板の形状や初期不整が圧縮挙動や極限強度特性に及ぼす影響について、機械的性質がほぼ対応関係にある SM570 で構成される周辺単純支持板と比較しながら考察する。

周辺単純支持板は、図-6 に示すような、載荷辺幅 b 、側辺長 a の板で、変形の 2 軸対称性を考慮して、1/4 の領域を取り出し、8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いてモデル化する。

板の形状のうち板厚 t は、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ 毎に、板幅 b を一定として、次式により決定する。

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4)$$

ここに、 σ_F : 設計基準強度(SUS329J3L では 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ を、SM570 では降伏応力を意味する。)、 E : 弾性係数、 ν : ポアソン比 ($=0.3$)、および k : 座屈係数 ($=4$) である。本研究では、SUS329J3L の設計基準強度として、既に日本工業規格で規定されている 0.2% 耐力を採用する。これは、ステンレス鋼を構造部材に利用する際に、新たな基準強度の規定を設けることなく、環境または部材に適したステンレス鋼を有効的に利用できることを想定している。

面内圧縮力を受ける細長い板は、縦横比の値に近い整数個の横たわみ半波形が生じて極限状態に至ることから¹⁸⁾、安全性を考慮し、解析対象とする周辺単純支持板に導入する初期たわみは、次式で与える。式中の初期たわみの最大値 W_{0max} は、道路橋示方書¹⁹⁾の製作誤差の最大許容値として、 $b/150$ を採用する。

$$W_0 = W_{0max} \cos\left(\frac{\pi}{a} X\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} Y\right) \quad (5)$$

(2) 自由突出板

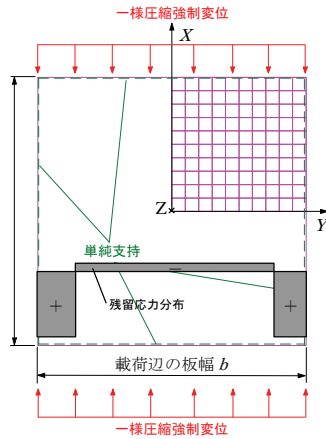


図-6 周辺単純支持板

プレートガーダーの圧縮フランジおよび圧縮補剛板の縦補剛材などの溶接組立て部材の自由突出板要素²⁰⁾への SUS329J3L の適用を想定し、自由突出板の圧縮挙動と極限圧縮強度特性を把握する。さらに、周辺単純支持板と同様に SM570 との比較も行う。

自由突出板は、図-7 に示すような、載荷幅 b 、側辺長 a の板で、変形の対称性を考慮し、 $1/2$ の領域を取り出し、8 節点アイソパラメトリックシェル要素にて等分割している。

解析モデルは、式(4)により決定する。ここで、式(4)の座屈係数 k は 0.425 を用いる。

解析対象とする自由突出板に導入する初期たわみは、式(6)で与えることとし、式中の初期たわみの最大値 W_{0max} は、道路橋示方書の製作誤差の最大許容値として、 $b/100$ を採用する。

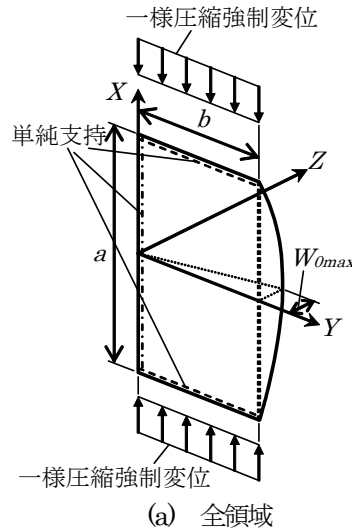
$$W_0 = W_{0max} \frac{Y}{b} \cos\left(\frac{\pi}{a} X\right) \quad (6)$$

4.3 解析パラメータ

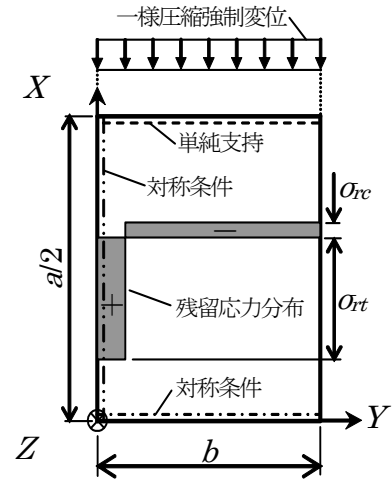
SUS329J3L で構成される周辺単純支持板および自由突出板の圧縮挙動や極限強度特性に関しては十分明確にされていない。そこで、本研究では、SUS329J3L からなる周辺単純支持板と自由突出板の圧縮挙動や極限強度特性に影響を及ぼすと考えられるパラメータを既往の炭素鋼に対する研究成果^{18) 20)}に基づいて設定し、さらに SM570 とを比較しながら考察する。本研究では、解析パラメータとして、以下に述べるように、縦横比 $\alpha (=a/b)$ 、幅厚比パラメータ λ_p 、残留応力分布に着目する。

(1) 周辺単純支持板

終局圧縮強度の極小値を把握するため、解析パラメータとして、縦横比は、0.25、0.5、0.75、1.0 の 4 パターン、幅厚比パラメータは、0.5、0.7、0.9、1.1 の 4 パターンを設定する。さらに、残留応力については、図-6 に示



(a) 全領域



(b) 解析対象領域

図-7 自由突出板

ような自己平衡を保つ矩形の応力分布を想

定し、圧縮残留応力を 0.2%耐力または降伏応力の 0.2 倍とし、引張残留応力を SUS329J3L では 0.2%耐力の 0.9 倍または 1.0 倍の 2 パターンを、SM570 では降伏応力の 0.9 倍を与える。SUS329J3L の残留応力分布をこのように設定した理由としては、残留応力の分布の計測結果はほとんど報告されておらず、SUS329J3L の金属組織や熱力学的材料特性は SM570 とオーステナイト系ステンレス鋼の中間的な値を示すと考えられるためであり、SM570²¹⁾ またはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304N2A²²⁾ に対する残留応力計測結果に基づいて考察されている残留応力分布を用いる。

(2) 自由突出板

極限圧縮強度の極小値を把握するため、縦横比は、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 の 6 パターン、幅厚比パラメータは、0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 の 5 パターンを設定する。さらに、残留応力については、周辺単純支持板と同様に、図-7(b) に示すような自己平衡を保つ矩形分布を仮定する。自由縁の残留応力について、ステンレス鋼の場合、Cr の含有量が 10%以上含まれるためガス溶断できない^{23) 24)}。したがって、切断はシア切断が用いられることが一般的であるため、自由縁の引張残留応力分布は考慮していない。また、SM570 ではガス溶断可能で、自由縁には引張残留応力を考慮すべきであるが、同一条件での極限圧縮強度特性を把握する目的から、SM570 についても SUS329J3L と同様に、シア切断などの熱影響を受けない切断法で製作された自由突出板を想定している。

5. 数値計算結果と考察

SUS329J3L からなる周辺単純支持板と自由突出板の圧縮挙動や極限圧縮強度におよぼす残留応力分布の影響、縦横比や幅厚比パラメータの影響について SM570 の場合と比較しながら考察する。

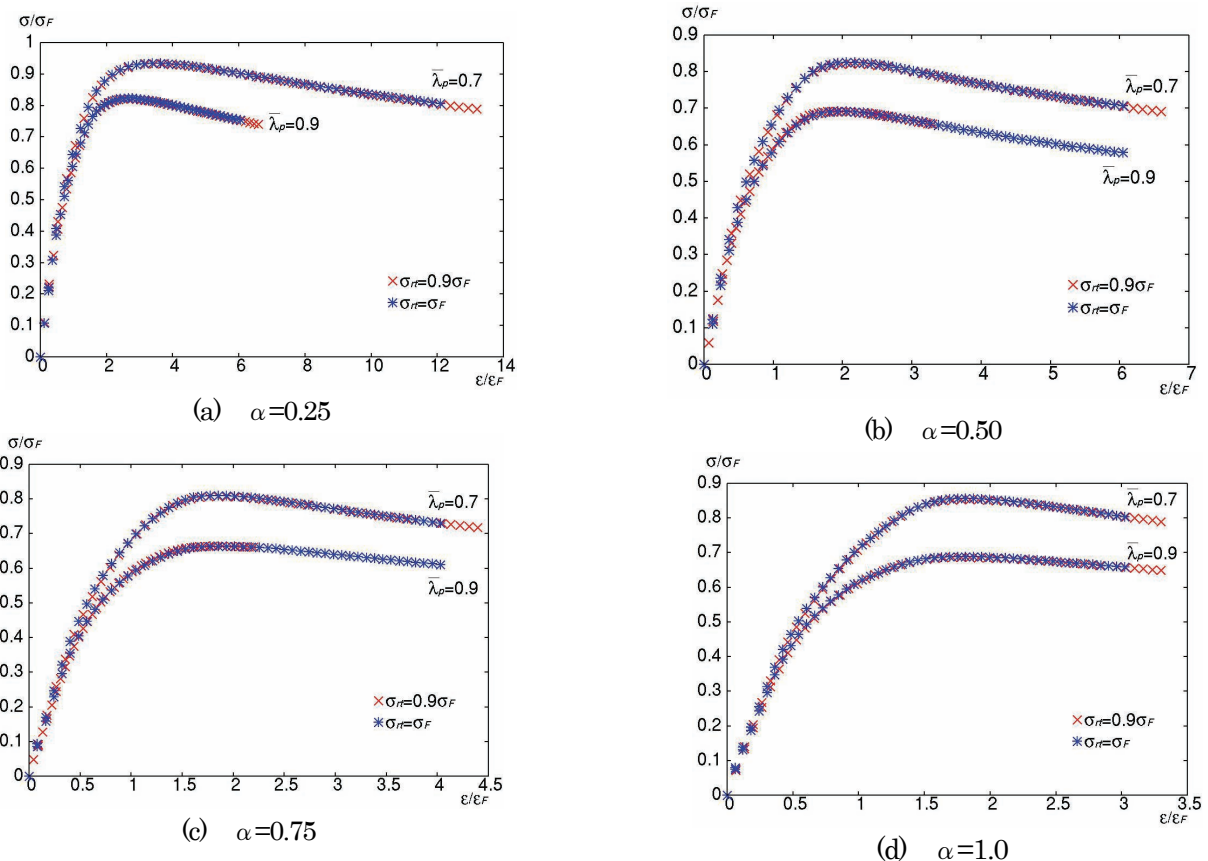


図-8 SUS329J3L からの周辺単純支持板の平均応力-平均ひずみの関係

5.1 残留応力の影響

SUS329J3L からの周辺単純支持板と自由突出板に導入した 2 種類の残留応力分布が圧縮挙動や極限圧縮挙動に及ぼす影響について、それぞれ周辺単純支持板と自由突出板に分けて述べる。

(1) 周辺単純支持板

SUS329J3L からの周辺単純支持板の残留応力を圧縮側で 0.2%耐力の 0.2 倍、引張側で 0.2%耐力の 0.9 倍および 1.0 倍としたときの、幅厚比パラメータが 0.7, 0.9 に対する平均応力と平均ひずみの関係を縦横比 ($\alpha = a/b$) 毎に図-8(a)~(d)に示す。ただし、縦軸は、圧縮力を載荷面積で除した応力 σ をさらに 0.2%耐力または降伏応力 σ_F で正規化した平均応力、横軸は、圧縮変位を載荷方向長さ a で除したひずみ ε をさらに SUS329J3L においては 0.2%耐力時のひずみ ε_E 、SM570 においては降伏応力時のひずみ ε_F で正規化した平均ひずみである。

同図より、各縦横比、幅厚比パラメータに対して、平均応力-平均ひずみ関係は、残留応力分布に関わらず一致していることがわかる。また、図中に示されていない $\lambda_p = 0.5$ と $\lambda_p = 1.1$ の場合も、残留応力分布の相違が平均応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響のないことは確認している。そこで以降では、SUS329J3L からの周辺単純支持板に導入する残留応力は、SM570 と同様に σ

$\sigma = -0.2\sigma_E$, $\sigma_F = 0.9\sigma_F$ とした場合について考察することにする。

(2) 自由突出板

SUS329J3L からの自由突出板の残留応力分布を $\sigma = -0.2\sigma_E$, $\sigma_F = 0.9\sigma_F$ とした場合、および $\sigma = -0.2\sigma_E$, $\sigma_F = 1.0\sigma_F$ とした場合の平均応力-平均ひずみ関係について、図-8 と同様に整理して、縦横比毎に図-9 に示す。なお、図中には、幅厚比パラメータ $\lambda_p = 0.9$ と 1.1 の場合について示している。 $\lambda_p = 0.5$, 0.7 と 1.1 の場合については、 $\lambda_p = 0.9$, 1.1 の場合と同様の傾向が得られているため、省略している。

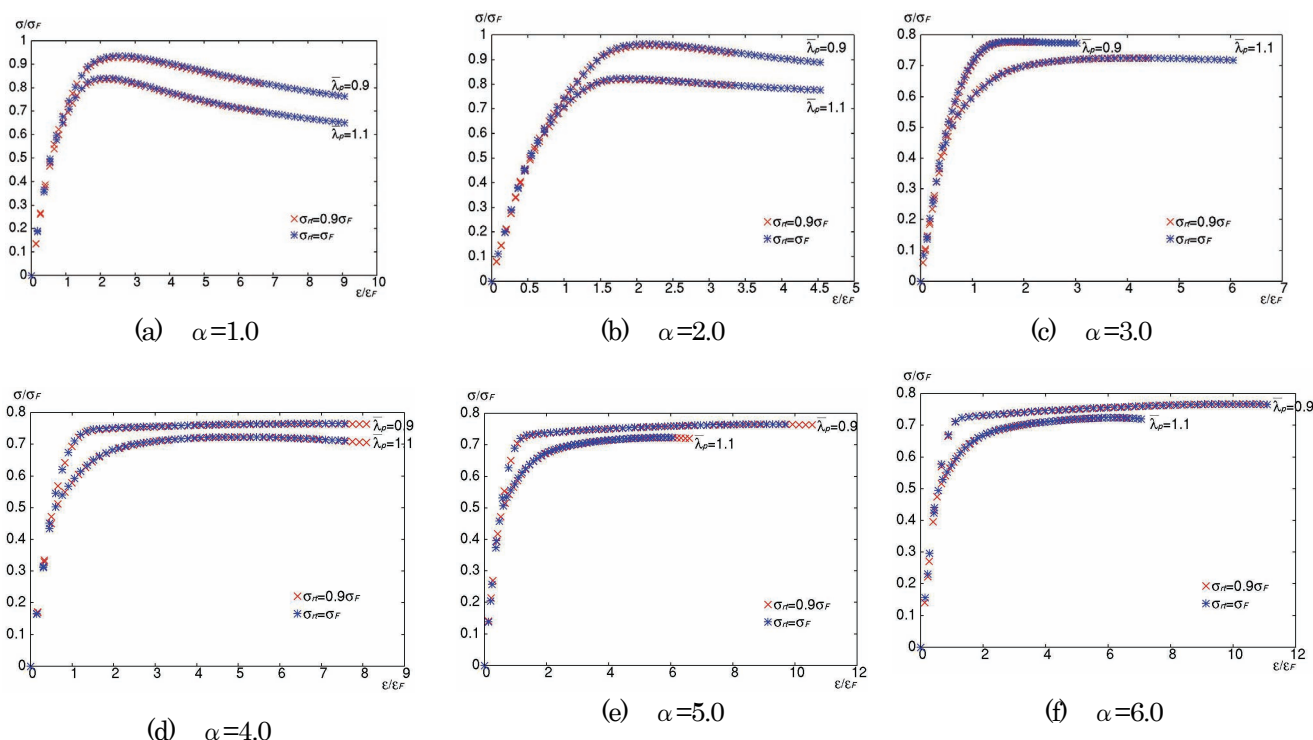
同図より、いずれの縦横比の場合も、周辺単純支持板と同様に、残留応力分布が平均応力-平均ひずみ関係、ひいては圧縮強度に及ぼす影響は、ほとんどないことがわかる。これより、以降では、自由突出板においても、SUS329J3L の残留応力分布は、SM570 と同様に、 $\sigma = -0.2\sigma_E$, $\sigma_F = 0.9\sigma_F$ とした場合について考察する。

5.2 SUS329J3L と SM570 の圧縮挙動の比較

一方向一様圧縮力を受ける SUS329J3L および SM570 からの周辺単純支持板および自由突出板の圧縮挙動を、平均応力-平均ひずみの関係と接線剛性ひずみの関係に着目して考察する。

縦横比が、1.0 の周辺単純支持板および3.0 の自由突出板の平均応力と平均ひずみの関係を図-10 および図-11 に示す。SUS329J3L 製周辺単純支持板と自由突出板で、幅厚比パラメータが 0.5 の場合に注目してみると、極限強度は0.2%耐力を上回るのに対して、幅厚比パラメータが0.5 のSM570の極限強度は、自由突出板のみが降伏応力よりも大きくなることわかる。両図の各幅厚比パラメータにおける、極限強度について、SUS329J3L とSM570を比較してみると、対象とした全ての幅厚比パラメータでのSUS329J3Lの極限強度は、SM570よりも大きくなることわかる。また、極限を向かえるまでの挙動に着目してみると、周辺単純支持板の場合、発生する応力が基準強度の0.4 から0.5 倍付近より、自由突出板の

準強度の0.4 から0.6 倍付近より、SUS329J3Lの剛性がSM570のそれに比べて小さくなること分かる。これは後述するように、SUS329J3Lの応力-ひずみ関係は、ラウンドハウス型を示すことから、比例限を超えた後、連続的に接線剛性が低下していくためであると考えられる。したがって、SUS329J3Lの比例限を超えた部分での剛性は、SM570に比べて小さくなること考えられる。つぎに、極限を向かえた後の挙動に着目してみると、周辺単純支持板、自由突出板とも、いずれの幅厚比パラメータにおいてもSUS329J3L強度の低下は、SM570に比べて緩やかであることがわかる。これらの結果は、降伏を迎えると同時に降伏棚が表れるSM570に対して、0.2%耐力通過後も引続き、ひずみ硬化に伴う応力上昇が発生する



場合、発生する応力が基準強度の0.4 から0.5 倍付近より、自由突出板の平均応力-平均ひずみの関係 図-9 SUS329J3L からなる自由突出板の平均応力-平均ひずみの関係

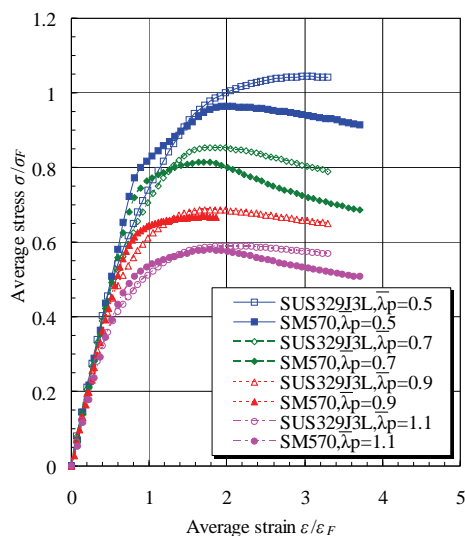


図-10 周辺単純支持板の圧縮挙動の比較

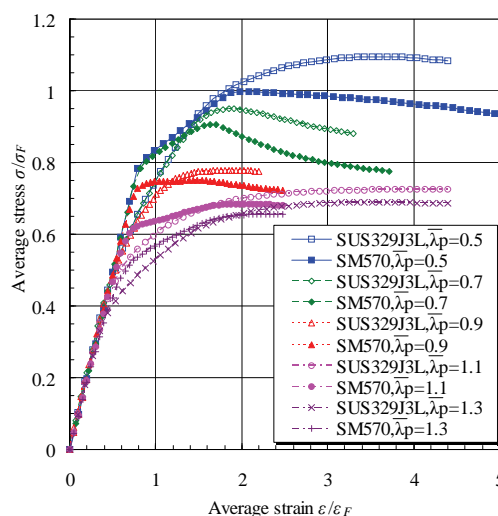


図-11 自由突出板の圧縮挙動の比較

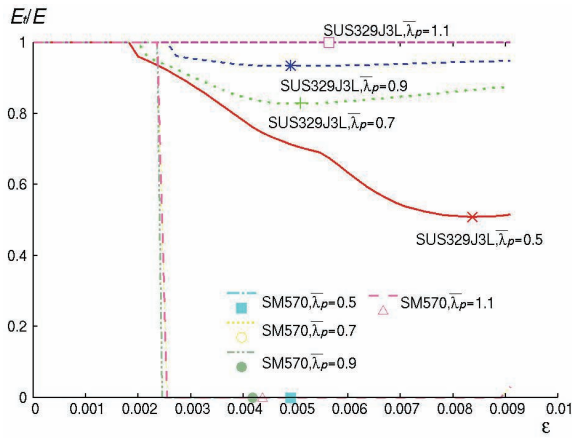


図-12 周辺単純支持板の接線剛性と平均ひずみの関係

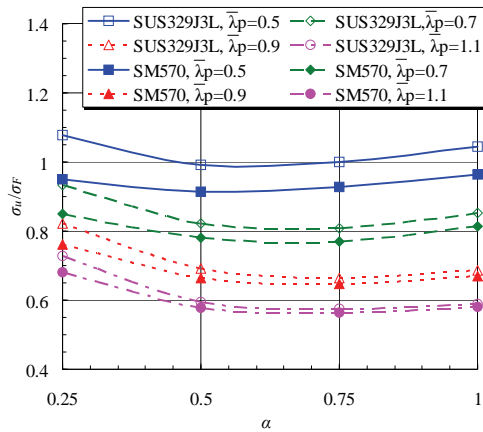


図-14 周辺単純支持板の極限圧縮強度と縦横比の関係

SUS329J3L の応力-ひずみ関係に依存した結果であるといえる。

図-12 および図-13 には、縦横比が 1.0 の周辺単純支持板および縦横比が 3.0 の自由突出板の平均ひずみの増加に伴う接線剛性 E_t の変化を初期剛性の弾性係数 E で無次元化した関係を示す。これら図中のプロットは、極限点を表す。両図より、降伏棚が存在しない SUS329J3L の接線剛性は、SM570 に比べて、ひずみの増加に伴う剛性の低下が緩やかであることがわかる。いずれの板とも、SUS329J3L の幅厚比パラメータが 0.9 以上では初期剛性からの剛性の低下量が 10% 以下となる範囲で極限を向かえ、弾性域に近い状態で極限を向かえることがわかる。一方、SM570 では、周辺単純支持板および自由突出板の全ての幅厚比パラメータの結果に対して、極限は降伏棚で迎えていることが、両図より読み取れる。以上のように、SUS329J3L で構成される周辺単純支持板および自由突出板は、SM570 に比べて、僅かなひずみで剛性が低くなるものの、極限時やその後の剛性は SM570 よりも高いことが明らかとなった。さらに、これらの圧縮挙動は、SUS329J3L の応力-ひずみ関係に依存した結果であることが明らかとなった。

5.3 縦横比の影響

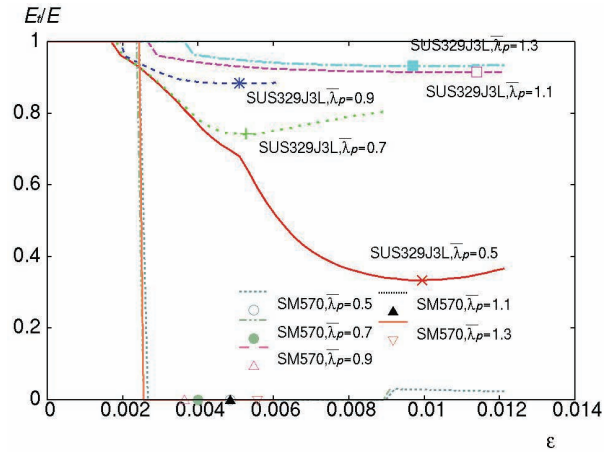


図-13 自由突出板の接線剛性と平均ひずみの関係

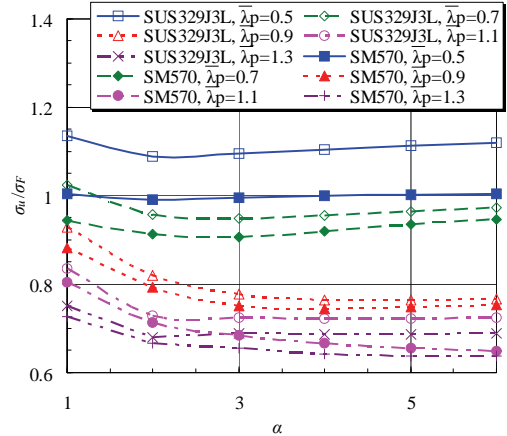


図-15 自由突出板の極限圧縮強度と縦横比の関係

SUS329J3L からなる周辺単純支持板および自由突出板の極限圧縮強度に及ぼす縦横比の影響について、SM570 と比較しながら考察する。

(1) 周辺単純支持板

極限圧縮強度 σ_u を設計基準強度 σ_F で除したパラメータと縦横比 α の関係を図-14 に示す。図-14 より、縦横比の変化に伴う SUS329J3L の極限強度は、幅厚比パラメータが 0.5 では、縦横比が 0.5 の場合に、それ以外の幅厚比パラメータでは、縦横比が 0.75 の場合に最小となることが分かる。また、SM570 についても同様の傾向を示すことがわかる。したがって、SUS329J3L からなる周辺単純支持板の縦横比の変化が極限圧縮強度に及ぼす影響は、SM570 と同様であると考えられる。

(2) 自由突出板

極限圧縮強度 σ_u を設計基準強度 σ_F で除したパラメータと縦横比 α の関係を図-15 に示す。同図より、SM570 で幅厚比パラメータが 1.1 および 1.3 の場合を除けば、SUS329J3L および SM570 とともに縦横比が 2 または 3、4 で極限強度が最小となることがわかる。また、幅厚比パラメータが 0.5、0.7、0.9 の場合には、SUS329J3L と SM570 の縦横比の変化に伴う極限強度の変化の傾向は一致していることがわかる。即ち、これらの範囲では、SUS329J3L からなる自由突出板の縦横比が極限強度に

及ぼす影響は SM570 からなる自由突出板と同様であるといえる。ところで、幅厚比パラメータが、1.1 および 1.3 の SM570 からなる自由突出板は、縦横比が 1 から 6 の範囲では極限圧縮強度が最小の値は見受けられなかったが、縦横比 6.0 では概ね一定値に収束している。これに対して、SUS329J3L で幅厚比パラメータ 1.1 と 1.3 の場合には、それぞれ縦横比 4.0 と 5.0 とで明確に終局強度が最小となっている。この理由は、その詳細が不明であるため、解析結果の分析とともに、実験による検証が必要であると考えられる。

5.4 極限圧縮強度と変形性能の相対比較

SUS329J3L の破断伸びは、表-2 に示したように、SM570 より大きく、その応力-ひずみ関係はラウンドハウス型で、緩やかに接線弾性係数が低下し、SM570 の降伏棚のように剛性が 0 となる機械的性質を有さないため、極限状態に到達するまでに大きな変形を生ずることが考えられる。そこで、本研究では、周辺単純支持板と自由突出板の変形性能を表す指標を極限状態における平均ひ

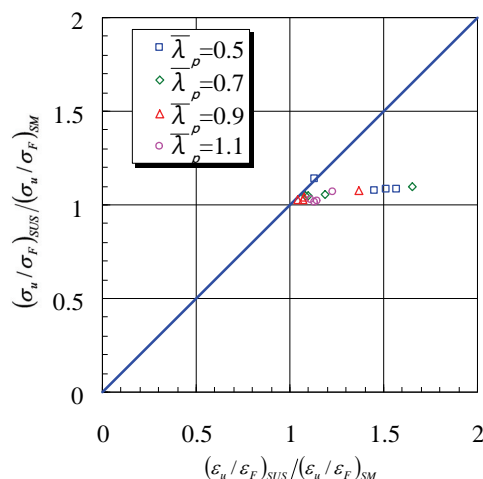


図-16 SUS329J3L の極限圧縮強度と変形性能の SM570 に対する比率(周辺単純支持板)

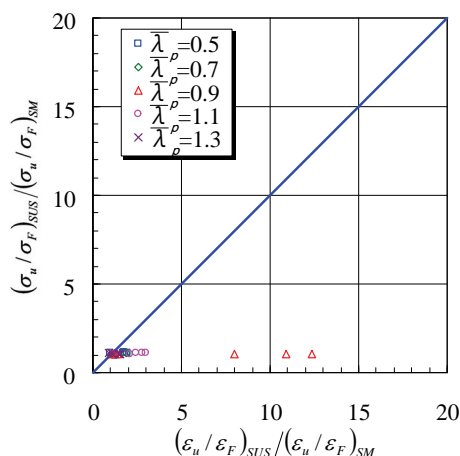


図-17 SUS329J3L の極限圧縮強度と変形性能の SM570 に対する比率(自由突出板)

ずみと定義し、SUS329J3L と SM570 の変形性能を定量的かつ相対的に比較する。

図-16 および図-17 は、それぞれ周辺単純支持板および自由突出板について、SUS329J3L の極限圧縮強度と変形性能の SM570 に対する比を示す。これらの図において縦軸は、SUS329J3L の設計基準強度で正規化した極限圧縮強度 $(\sigma_u/\sigma_F)_{SUS}$ をさらに SM570 のそれ $(\sigma_u/\sigma_F)_{SM}$ で正規化した値、横軸は SUS329J3L の ϵ_F で正規化した変形性能 $(\epsilon_u/\epsilon_F)_{SUS}$ をさらに SM570 のそれ $(\epsilon_u/\epsilon_F)_{SM}$ で正規化した値を表す。即ち、図上の直線は SUS329J3L と SM570 の極限強度と変形性能の比率が等価となる軸を表している。なお、図中のマークは、周辺単純支持板については 4 パターン、自由突出板については 5 パターンの幅厚比パラメータを有する解析モデルに対して設定した全ての縦横比に関してプロットしている。即ち、設定した縦横比の数だけ同形のマークがプロットしてある。

両図より、周辺単純支持板および自由突出板とも SUS329J3L の極限圧縮強度は幅厚比パラメータや縦横比に関わらず SM570 よりも大きく、最大で 1.15 倍程度大きくなることがわかる。また、図-16 より、周辺単純支持板の変形性能に関しては、SUS329J3L の変形性能は SM570 に比べて、大きいことがわかる。特に、幅厚比パラメータが小さくなると、SUS329J3L の変形性能は、SM570 の 1.5 倍程度の値を示す傾向が見受けられる。この理由としては、SUS329J3L のラウンドハウス型の応力-ひずみ関係により、比較的小さな変形で比例限を超え、ほぼ弾性域で極限を向かえる SM570 に対して、ひずみの発生量が大きくなるためである。次に、図-17 より、自由突出板の変形性能については、SUS329J3L に比べて、SM570 の変形性能は、幅厚比パラメータが 0.5 と 1.3 の一部を除いて、大きくなり、特に、幅厚比パラメータが 0.9~1.1 の場合には、SUS329J3L の変形性能は 3~12.5 倍に到達することがわかる。したがって、SUS329J3L からなる一様な方向圧縮を受ける周辺単純支持板と自由突出板については、引張試験結果と同様に、部材としての強度特性および変形性能は SM570 よりも優れることが明らかとなった。しかし、変形に制限が課せられる部材等への利用に向けては、検討の必要性も考えられる。

6. 数値計算結果による極限圧縮強度曲線と設計規準類における耐力曲線との比較

数値計算により得られた極限圧縮強度特性を示す強度曲線と既往の設計規準類における耐力曲線を比較する。

(1) 周辺単純支持板

SUS329J3L からなる周辺単純支持板では、図-14 の極限強度と縦横比の結果より、図-18 には、幅厚比パラメータ 0.7, 0.9, 1.1 で極限圧縮強度が最小となる値を取り出してプロットしている。同図中には、設計規準類で整備

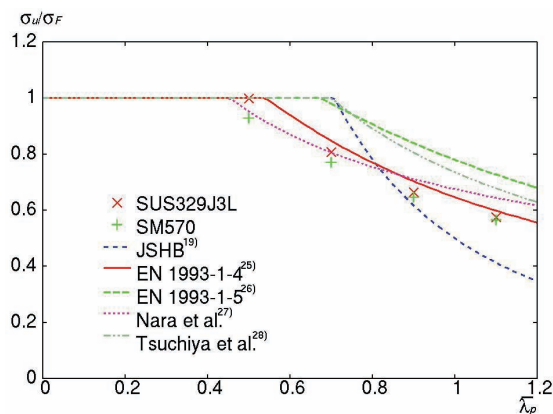


図-18 周辺単純支持板の極限圧縮強度特性

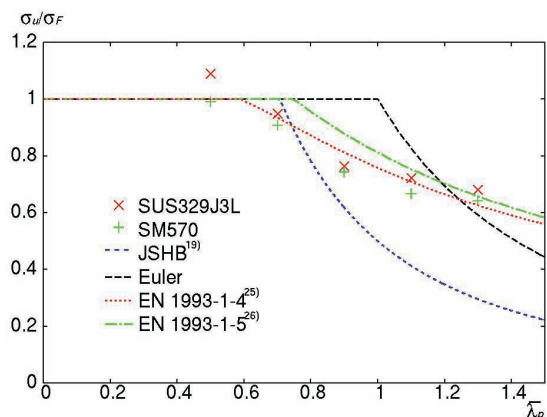


図-19 自由突出板の極限圧縮強度特性

されている耐荷力曲線^{19)・25)・26)}および既往の研究^{27)・28)}で構造用炭素鋼に対して提案されている耐荷力曲線を表示している。同図の SUS329J3L の結果を見ると、幅厚比パラメータが 0.5 および 0.7 に対しては、奈良ら²⁷⁾の耐荷力曲線のみが安全側に強度を評価することがわかる。一方、幅厚比パラメータが 0.9, 1.1 および SM570 の全ての幅厚比パラメータに対しては、いずれの耐荷力曲線も危険側に強度を評価することが分かる。しかしながら、SUS329J3L の極限圧縮強度と幅厚比パラメータの関係は EN 1993-1-4²⁵⁾と良く傾向が一致していることがわかる。本研究では、数値計算で得られた結果のみを対象として、これらの比較を実施しているため、今後、実構造物への利用に向けた残留応力および初期たわみの計測等、統計的なデータを基に SUS329J3L に対する耐荷力曲線について検討することも必要である。

(2) 自由突出板

SUS329J3L からなる自由突出板では、図-15 の極限圧縮強度と縦横比の関係から、極限強度が最小となるものを用いて、極限圧縮強度と幅厚比パラメータの関係を示すこととした。図-19 には、数値計算により得られた SUS329J3L および SM570 からなる自由突出板の極限圧縮強度と幅厚比パラメータの関係、既往の設計規準類に用いられている耐荷力曲線との比較を行うため、弾性座屈曲線、道路橋示方書¹⁹⁾および EN 1993-1-4²⁵⁾、EN 1993-1-5²⁶⁾で与えられている耐荷力曲線を表している。

SUS329J3L と SM570 の結果を比較してみると、SUS329J3L の極限圧縮強度特性と幅厚比パラメータの関係は SM570 とよく対応することが確認できる。次に、本研究で得られた極限圧縮強度特性と設計基準類の耐荷力曲線を比較すると、道路橋示方書における耐荷力曲線に対して SUS329J3L の極限圧縮強度は、幅厚比パラメータが 0.7 の場合に危険となるものの、幅厚比パラメータが 0.9 以上では常に安全側であることが分かる。また、EN 1993-1-4 のステンレス鋼に対する耐荷力曲線と SUS329J3L の結果を比較すると、幅厚比パラメータが 0.9 では、同耐荷力曲線を下回るものの、その他の幅厚比パラメータでは、同耐荷力曲線よりも 1 から 8%程度強度が高くなることがわかる。さらに、EN 1993-1-4 の耐荷力曲線は、構造用炭素鋼に対する道路橋示方書や EN 1993-1-5 の耐荷力曲線に比べて、本研究で得られた極限圧縮強度に対しては安全側であることがわかる。これより、一方向一様圧縮曲を受ける SUS329J3L からなる自由突出板に対する耐荷力曲線として、道路橋示方書の耐荷力曲線に比べて EN 1993-1-4 の耐荷力曲線は、その極限圧縮強度特性を良く再現したものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、二相系ステンレス鋼 SUS329J3L を橋梁部材に活用するための基本的な板要素の圧縮挙動と極限強度特性を明確にすることを目的として、材料試験により、その機械的特性を把握するとともに、数値解析に用いる構成式の適用性を検証した。そして、構成式が導入された数値解析法の妥当性を示した上で、一方向一様圧縮力を受ける SUS329J3L からなる周辺単純支持板および自由突出板を対象に数値計算を実施した。また、機械的性質がほぼ対応関係にある構造用炭素鋼 SM570 からなる板との力学的挙動の相違を比較した。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) SUS329J3L および SM570 からなる周辺単純支持板と自由突出板において、それらが基準強度以上で極限を向かえる際の圧縮挙動は、両鋼種の応力-ひずみ関係に大きく依存する。
- (2) SUS329J3L で構成される周辺単純支持板および自由突出板の残留応力を、それぞれ SUS304N2A および SM570 と同等と仮定しても、いずれの残留応力分布がもたらす極限強度低下の影響は同じである。
- (3) SUS329J3L からなる周辺単純支持板は、幅厚比パラメータが 0.5 の場合、縦横比が 0.5 で、その他の幅厚比パラメータの場合、縦横比が 0.75 で極限強度が最小となる。
- (4) SUS329J3L で構成される自由突出板は、縦横比 2.0 から 4.0 の場合に最小の極限強度を与える。
- (5) SUS329J3L からなる周辺単純支持板と自由突出板の極限時の強度および変形と SM570 からなる周辺単純支

持板と自由突出板の極限時の強度と変形とを相対的に比較することにより、いずれの圧縮板の強度および変形とも SUS329J3L が SM570 に比べて大きいことが示された。

(6)(5)の比較では、とりわけ極限状態の変形は、周辺単純支持板では、SUS329J3L が SM570 の最大約 1.7 倍、自由突出板では、SUS329J3L が SM570 の最大約 12.5 倍となり、顕著な差異を呈した。

(7)数値計算により得られた SUS329J3L からなる周辺単純支持板と自由突出板の極限圧縮強度は、既往のステンレス鋼に対する設計規準²⁵⁾の耐力力曲線に概ね適合する。

本研究で得られた解析結果について、より詳細にその強度特性などを明確にするためには、実験による初期不整の計測などを行う必要がある。

謝辞

本研究では、数値計算の実施にあたって、当時研究室 4 年生(現在、国土交通省勤務)の栗林孝典君、研究室 4 年生上谷明夫君に多大なご協力を得た。また、SUS329J3L の試験片については、新日鐵住金ステンレス株式会社・商品技術部商品技術室の天藤雅之博士より鋼板を提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)日本工業標準調査会：JIS G 3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材，日本規格協会，2004.
- 2)日本工業標準調査会：JIS G 4321 建築構造用ステンレス鋼材，日本規格協会，2000.
- 3)日本規格協会：JIS 使い方シリーズ ステンレス鋼の選び方・使い方，日本規格協会，2004.5.
- 4)Martina Helzel, Ingrid Munich: Pedestrian Bridges in Stainless Steel, Euro Inox, 2004.
- 5)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.
- 6)松下裕明，岩田節雄，有住康則，矢吹哲哉：ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐力特性，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp. 833-844，2003.3.
- 7)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力に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.50A，pp. 799-808，2004.3.
- 8)松下裕明，矢吹哲哉，有住康則，岩田節雄：せん断を受けるステンレス鋼板の耐力力性能，構造工学論文集，土木学会，Vol.52A，pp. 865-874，2006.3.
- 9)桑村仁，加藤太一：クロム系ステンレス鋼圧縮材の局部座屈 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 5，日本建築学会構造系論文集，日本建築学会，No.582，pp.

163-170，2004.8.

10)B.A. Burgan, N.R. Baddoo, K.A. Gilsenan : Structural design of stainless steel members — comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and test results Journal of Constructional Steel Research, Science Direct, Vol. 54, pp. 51-73, 2000.

11)森省吾，三好崇夫，越智内士，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，pp.645-652，2007.11.

12)宮寄靖大，栗林孝典，三好崇夫，奈良敬：ステンレス鋼 SUS316 の応力-ひずみ特性と周辺単純支持板の終局圧縮強度について，土木学会，平成 20 年度関西支部年次学術講演会，2008.5.

13)日本工業標準調査会：JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材，日本規格協会，2004.3.

14)日本工業標準調査会：JIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯，日本規格協会，2005.12.

15)三好崇夫，宮寄靖大，奈良敬：SUS410L の応力-ひずみモデルとそれを用いた板の圧縮強度，鋼構造年次論文報告集，第 15 巻，pp.633-638，2007.11.

16)宮寄靖大，栗林孝典，三好崇夫，奈良敬：ステンレス鋼 SUS329J3L の応力-ひずみ関係と極限圧縮強度特性，土木学会，第 63 回年次学術講演会，I-355,CD-ROM,2008.9.

17)奈良敬，梅村哲男，服部松利，森脇良一：鋼材特性を考慮した圧縮補剛板の極限強度と変形性能，構造工学論文集，Vol.39A，pp.125-132，1993.3.

18)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，土木学会，No. 270，pp. 1-14，1978.2.

19)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，日本道路協会，2002.3.

20)小松定夫，北田俊行：初期不整を含む自由突出圧縮鋼板の極限強度特性について，土木学会論文報告集，土木学会，No. 314，pp. 15-27，1981.10.

21)小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文報告集，土木学会，No. 265，pp. 25-35，1977.9.

22)中谷光良，松下裕明，矢吹哲哉，有住康則：ステンレス鋼を用いた自由突出板試験体の溶接残留応力の推定，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，土木学会，pp. 913-914，2005.9.

23)ステンレス協会：ステンレス鋼便覧，日刊工業新聞社，1995.1.

24)向井喜彦：ステンレス鋼の溶接，日刊工業新聞社，1999. 7.

25)European Committee for Standardization, CEN. Eurocode 3: – Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless

steels, CEN, European Standard, EN 1993-1-4, 2006.10.

26) European Committee for Standardization, CEN. Eurocode 3: – Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements, CEN, European Standard, EN 1993-1-5, 2006.1.

27) 奈良敬, 津田真, 福本秀士: 面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度の評価法に関する研究, 土木学会論文集, 土木学会, No. 392/I-9, pp. 259-264, 1988.4.

28) 土屋義浩, 奈良敬, 森脇良一: 圧縮板の耐荷力曲線の統一化への試み, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, I-107, pp. 268-269, 1988.10.

(2008年9月18日受付)