

SUS329J3L から成る周辺単純支持板の終局圧縮挙動

Ultimate Compressive Behavior of Simply Supported Plates of Stainless Steel SUS329J3L

○三好 崇夫*
Takao MIYOSHI

宮寄 靖大**
Yasuhiro MIYAZAKI

奈良 敬***
Satoshi NARA

ABSTRACT Corrosion resistance and tensile strength of duplex stainless steels are higher than those of austenitic stainless steels for common use. Therefore, a supply of the duplex stainless steels to structural members is recently increasing, mainly in Europe. This research is focused on the application of JIS SUS329J3L duplex stainless steel to bridge members. At first, stress-strain diagrams of SUS329J3L and applicability of an existing constitutive equation to them are examined. Secondary, influences of residual stresses, stress-strain relationship, width-to-plate thickness ratio, and aspect ratio on the compression are presented by the numerical analysis. Finally, ultimate compressive strength and ductility of the plates are compared with those of JIS SM570 carbon steel plates.

Keywords: 二相系ステンレス鋼, 応力-ひずみ関係, 構成式, 終局圧縮強度

Duplex stainless steel, stress-strain relation, constitutive equation, ultimate compressive strength

1. はじめに

表-1 は、炭素鋼 SS400 とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の大気暴露試験¹⁾から得られた腐食減量を示しており、ステンレス鋼は炭素鋼よりも耐食性に優れていることがわかる。そこで、ステンレス鋼の土木構造物への活用によって超長寿命化やミニマムメンテナンス化を図ることが考えられる。実在する欧州のステンレス鉄筋が採用された道路橋と、主部材等にステンレス鋼が適用された海上石油プラットホームの歩道橋でのトータルライフサイクルコスト(総LCC)の試算事例^{2,3)}によれば、ステンレス鉄筋を用いた道路橋の総LCCは、通常の鉄筋を用いた場合の約0.88倍であること、ステンレス鋼を用いた歩道の総LCCは、全て炭素鋼を用いた場合の約0.55倍であることが示されている。

図-1 は、二相系ステンレス鋼 SUS329J4L および SUS304 と耐食性が同等のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304N2 の大気暴露試験から得られた標準写真による錆の評価結果⁴⁾を示しており、二相系ステンレス鋼はオーステナイト系ステン

ス鋼よりも耐食性に優れていることが示されている。以上の背景から、近年、構造成用で実績のある

表-1 大気暴露試験による腐食減量

大気暴露試験地点	暴露期間	鋼材	
		SS400	SUS304
つくば市 (田園都市環境)	3か月	144	1.67
	1年	215	1.00
	3年6か月	391	3.33
光市 (マイルドな海浜環境)	3か月	131	0.33
	1年	236	1.00
	3年6か月	406	1.00

単位: g/m²

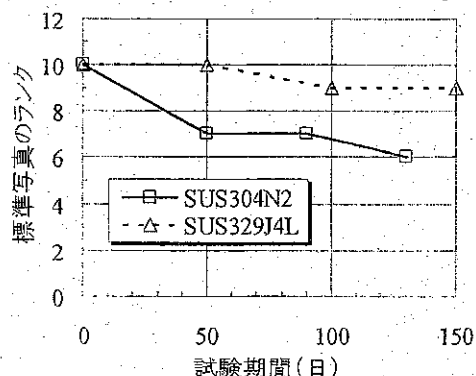


図-1 標準写真による錆の評価結果

*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

**修(工) 大阪大学大学院工学研究科 特任研究員 (〒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) 第2種正会員

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済

オーステナイト系ステンレス鋼よりも耐食性や強度にも優れた、二相系ステンレス鋼の土木構造物への活用に関心が集まっており、海外では、二相系ステンレス鋼を網羅した土木構造物の設計基準⁹⁾が整備され、既に道路橋主部材への適用事例⁹⁾も報告されている。一方で、我が国では、数種類の二相系ステンレス鋼が開発されているものの、その応力-ひずみ関係や板要素の圧縮挙動や終局圧縮強度は明確にされていない。そこで、本研究では、我が国で開発された二相系ステンレス鋼のうち SUS329J3L に着目し、土木構造物に SUS329J3L を活用するための設計基準の整備に際して必要となる、応力-ひずみ関係を材料試験によって把握し、数値解析に必要となる構成式の適用性を検討する。さらに、その構成式を用いて周辺単純支持板を対象とする終局強度解析を実施し、SUS329J3L と機械的特性が概ね対応するとされている炭素鋼 SM570 との比較に基づいて、残留応力や縦横比が圧縮挙動、終局圧縮強度や変形性能に及ぼす影響について明確にすることを目的とする。

2. 材料試験

2. 1 材料試験方法

SUS329J3L の応力-ひずみ関係を把握するため、板厚 20mm の熱間圧延鋼板から圧延・圧延直角方向にそれぞれ 4 体ずつ JIS5 号試験片を採取し、アムスラー型万能試験機による引張試験を実施した。

2. 2 試験結果と考察

SUS329J3L の圧延・圧延直角方向の代表的な試験片に対する応力-ひずみ関係について、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および構造用炭素鋼 SM570 と比較して図-2 に示す。図-2 より、SM570 は明瞭な降伏棚が現れるのに対して、SUS329J3L と SUS304 の応力-ひずみ関係はラウ

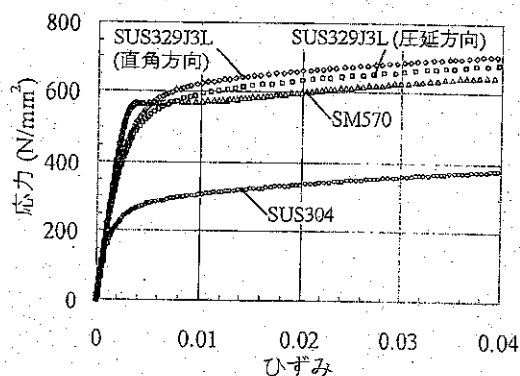


図-2 応力-ひずみ関係

ンドハウス型であり、SUS329J3L のひずみ硬化開始点は圧延方向による若干の異方性が見られるが、ひずみ硬化領域での圧延方向による接線弾性係数の差異は殆どないこともわかる。

SUS329J3L と SUS304 の圧延・圧延直角方向の機械的特性値の平均値を表-2 に示す。なお、本研究では、欧州のステンレス鋼構造物の設計基準⁹⁾に準拠して、0.01%耐力を比例限界とする。表-2 より、SUS329J3L は SUS304 よりも圧延方向による異方性の影響が若干大きいこと、SUS329J3L の終局強度、0.2%耐力と弾性係数は SUS304 よりも大きい、破断伸びは小さく延性に劣ることが分かる。0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ および 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と引張強度 σ_t の比 $\sigma_{0.01}/\sigma_t$ および $\sigma_{0.2}/\sigma_t$ に関しては、SUS329J3L はいずれも SUS304 よりも大きく、SUS329J3L は SUS304 に比べて比例限界や 0.2%耐力から引張強度までの応力の上昇が小さいことがわかる。このことと図-2 より、SUS329J3L の応力-ひずみ曲線は、SUS304 に比べて急な曲率でひずみ硬化領域に達するものと考えられる。

2. 3 構成式の適用性

試験結果に基づいて、ステンレス鋼に対して提案されている、複合 Ramberg-Osgood 曲線 (C.R.O. 曲線)⁷⁾と称する構成式の適用性を検討した。この構成式は、比例限界までを線形弾性、比例限界以降の 0.2%耐力点で 2 つの Ramberg-Osgood 曲線を滑らかに繋いだもので、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。

表-2 機械的特性値の比較

鋼種	SUS329J3L		SUS304	
	圧延	直角	圧延	直角
引張強度 σ_t (MPa)	735	758	707	687
破断伸び δ (%)	52	44	70	72
弾性係数 E (MPa)	183816	199308	175101	180375
0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (MPa)	325.1	306.9	144.5	141.3
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	514.8	541.6	262.5	255.3
$\sigma_{0.01}/\sigma_t$	0.44	0.40	0.20	0.21
$\sigma_{0.2}/\sigma_t$	0.70	0.71	0.37	0.37

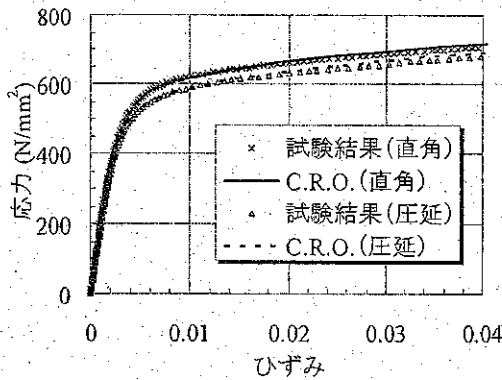


図-3 試験結果と構成式の比較

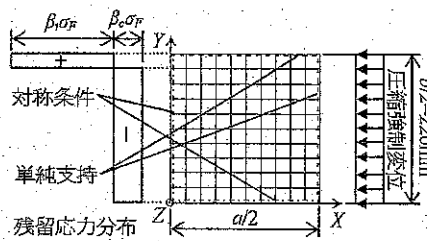


図-4 終局強度解析モデル

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

ここに、 σ : 応力、 ε : ひずみ、 E : 弾性係数、 σ_p : 比例限界、 n : 第1の曲線の硬化パラメータ、 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力、 $\varepsilon_{0.2}$: 0.2%耐力時の全ひずみ、 $E_{0.2}$: 0.2%耐力点での接線弾性係数、 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%ひずみである。

図-3は、SUS329J3Lの圧延・圧延直角方向について、それぞれC.R.O.曲線と試験結果を比較して示したものである。図-3より、C.R.O.曲線と試験結果は良好に一致しており、SUS329J3Lの構成式としてC.R.O.曲線を適用できると考えられる。

3. 終局強度解析

本研究では、SUS329J3Lから成る板要素の基本的な圧縮挙動、終局圧縮強度や変形性能に及ぼす、ラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線、残留応力、縦横比や幅厚比パラメータの影響について、SM570から成る板要素と比較して考察するため、一様な圧縮力を受ける周辺単純支持板を取り上げ、弾塑性有限変位解析を実施した。

表-3 C.R.O.曲線の材料定数

E (N/mm ²)	191562
σ_p (N/mm ²)	316
$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	528
$\varepsilon_{0.2}$	4.757×10^{-3}
σ_B (N/mm ²)	616
σ_{10} (N/mm ²)	789
ε_{10}	9.991×10^{-2}
n	5.9
m	2.4
$E_{0.2}$ (N/mm ²)	34817

表-4 B-n曲線の材料定数

E (N/mm ²)	205800
σ_y (N/mm ²)	504
ε_y	2.450×10^{-3}
ε_H	9.090×10^{-3}
B	0.8648
n	0.1152

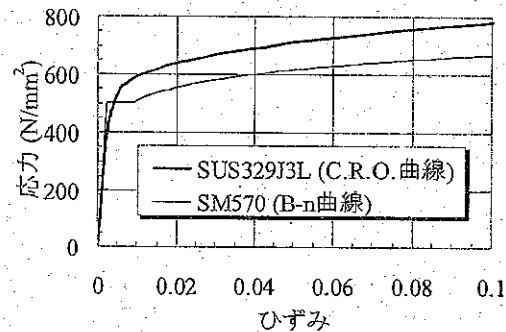


図-5 終局強度解析に用いた構成式

3. 1 解析モデル

解析モデルは、図-4に示すように、周辺単純支持板の対称性を考慮した1/4モデルとし、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した。板面内変位に対する境界条件については、本研究では無補剛板を想定し、面内横方向変位に対する拘束は自由と仮定した。

3. 2 解析に用いた構成式

終局強度解析では、SUS329J3Lの構成式として、式(1)と(2)のC.R.O.曲線、SM570の構成式として、次式で表わされるB-n曲線を用いた。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \begin{cases} \varepsilon/\varepsilon_y & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ 1.0 & (\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_H) \\ B(\varepsilon/\varepsilon_y)^n & (\varepsilon_H \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (3)_{1 \sim 3}$$

ここに、 E : 弾性係数、 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。

C.R.O.曲線に用いた材料定数は、圧延・圧延直角方向の材料試験から得た材料定数の平均値として、表-3に示す値を用いた。また、SM570の材料定数は、表-4に示すように、既往の文献⁹⁾に報告されている値を用いた。これらの材料定数を用いて得られる構成式を図-5に比較して示す。

3. 3 初期たわみ

縦横比が1.0より大きい炭素鋼板パネル面内に

一様な圧縮力が作用すると、板パネルは縦横比の値に近い整数個の面外たわみ波形を生じて終局状態に至ると考えられ、初期たわみ波形としては面外たわみ波形と同じものを考えるのが安全側である⁹⁾。そこで、本研究では、載荷方向長さ a 、載荷辺の幅 b として、次式で表される半波形の初期たわみを仮定した。

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

ここに、 X, Y : それぞれ、図-4 に示すように、周辺単純支持板の中心を原点とする直交直線座標系、 w_{0max} : 板中央に生ずる初期たわみの最大値であり、道路橋示方書¹⁰⁾の製作規定の限界値である $w_{0max}=b/150$ とした。

3. 4 解析パラメータ

本研究では、残留応力の有無、縦横比、幅厚比パラメータをパラメトリックに変化させ、それらが圧縮挙動、終局圧縮強度や変形性能に及ぼす影響について考察した。

3. 4. 1 残留応力

現状では、SUS329J3L を用いた溶接製作構造物の残留応力の計測結果は報告されていない。一方で、SM570 を用いた溶接製作構造物の残留応力に関しては、工場製作レベルの部材を用いた実測結果に基づき、その分布モデルも提案されている¹¹⁾。そこで、本研究では、SM570 と SUS329J3L の機械的特性が概ね対応することから、この分布モデルに従い、図-4 において、 $\beta_c=0.2$, $\beta_t=0.9$ とし、SM570 では σ_F を降伏応力、SUS329J3L では σ_F を 0.2% 耐力とした矩形分布でモデル化した。

3. 4. 2 縦横比

縦横比 $\alpha=a/b$ は、一様な圧縮力を受ける炭素鋼周

辺単純支持板の終局強度に関する研究¹¹⁾に準拠して、0.25, 0.5, 0.75, 1.0 と 1.25 とした。

3. 4. 3 幅厚比パラメータ

幅厚比パラメータ R は、縦横比 $\alpha=1.0$ については、0.3~2.0 まで 0.1 刻みで変化させ、このほかの縦横比については、 R は 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 とした。ただし、幅厚比パラメータは、次式により、板厚 t を変化させて考慮した。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5)$$

ここに、 σ_F : 設計基準強度で SUS329J3L は 0.2% 耐力、SM570 は降伏応力、 E : 弾性係数、 ν : ポアソン比 (0.3)、および k : 座屈係数 (=4.0) である。

4. 解析結果と考察

4. 1 残留応力の影響

圧縮挙動に及ぼす残留応力の影響について調べるため、縦横比 α を 1.0、幅厚比パラメータ R を 0.5, 1.0 とした場合について、圧縮力を載荷辺の面積で除した平均応力 σ と、圧縮強制変位を載荷辺の長さ a で除した平均ひずみ ε の関係をそれぞれ図-6(a), (b) に示す。なお、図-6 では、鋼材の機械的性質の相違を考慮するため、平均応力は設計基準強度 σ_F 、平均ひずみは設計基準強度時ひずみ ε_F で無次元化している。図-6 より、残留応力による終局圧縮強度の低下は SUS329J3L よりも SM570 が大きく、残留応力を無視した場合の終局後の剛性低下も、SUS329J3L よりも SM570 が急激である。この原因として、SM570 には降伏棚が存在し、降伏後の接線弾性係数がほぼ 0 となるのに対して、SUS329J3L は降伏棚が存在せず、緩や

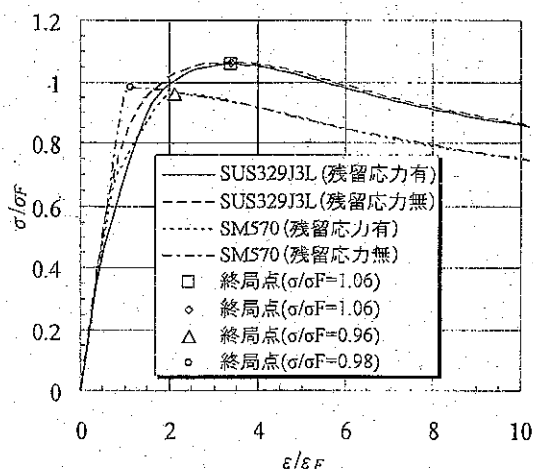


図-6(a) 平均応力-ひずみ関係 ($\alpha=1.0, R=0.5$)

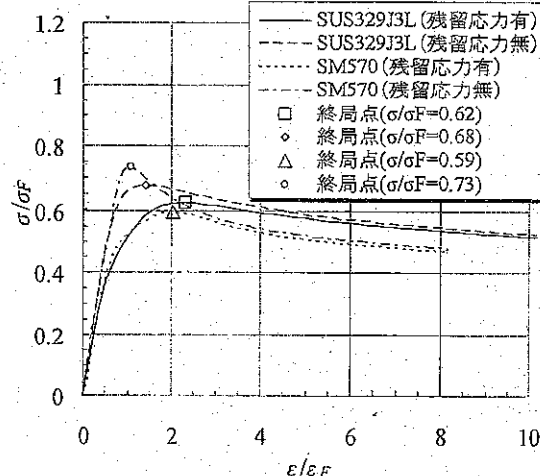


図-6(b) 平均応力-ひずみ関係 ($\alpha=1.0, R=1.0$)

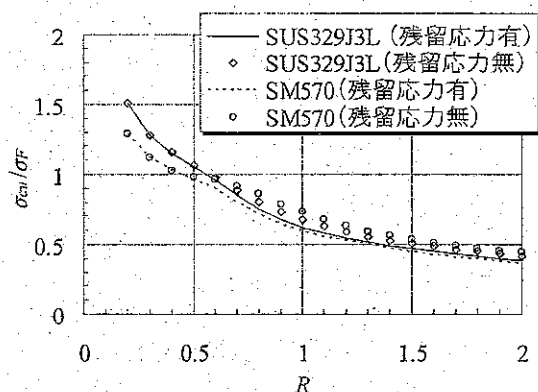


図-7 終局強度と幅厚比パラメータの関係

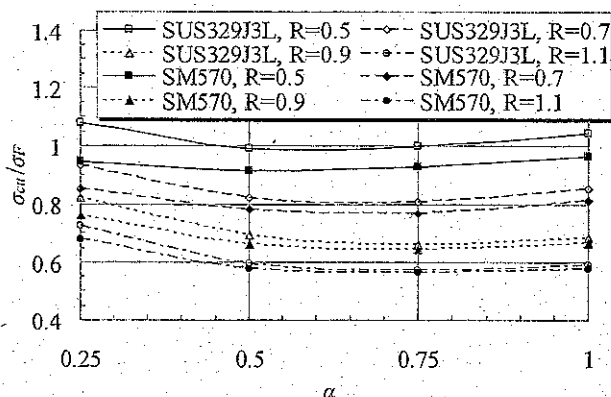


図-8 終局強度と縦横比の関係

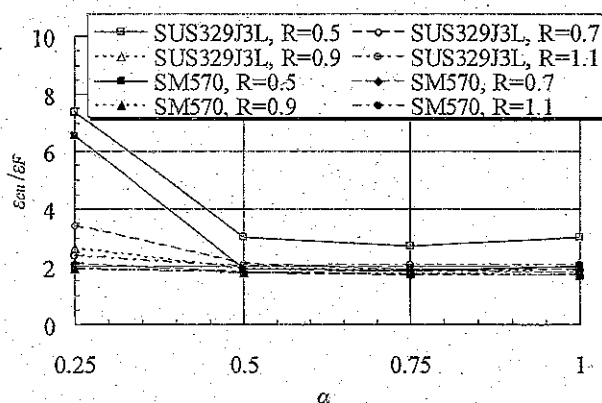


図-9 終局強度時ひずみと縦横比の関係

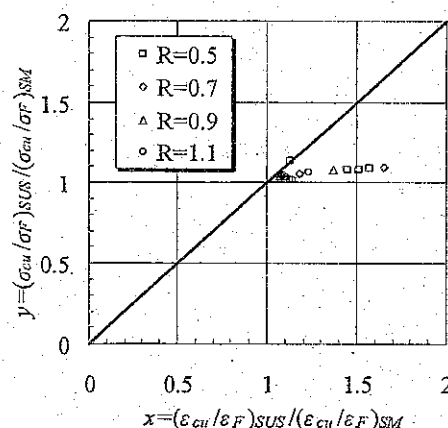


図-10 SUS329J3LとSM570の終局圧縮強度と変形性能の相対的な比較

かに接線弾性係数が低下しつつひずみ硬化領域に達することが考えられる。実際に、図-6においても、SM570で残留応力を無視した場合には、終局点は $\varepsilon/\varepsilon_F=1.0$ 付近に現れている。逆に、終局時の平均ひずみについては、SUS329J3Lは設計基準強度に達するまでに接線弾性係数が低下するため、SM570よりもSUS329J3Lが大きい。

次に、終局圧縮強度を設計基準強度で正規化したパラメータ σ_{cu}/σ_F と幅厚比パラメータ R の関係を図-7に示す。図-7より、残留応力による終局圧縮強度の低下は、SUS329J3Lでは $R=0.6$ 以上、SM570では $R=0.5$ 以上で生じ、残留応力による終局圧縮強度の低下は、幅厚比パラメータに関わらず、SM570よりもSUS329J3Lが小さいことがわかる。しかし、通常の溶接製作鋼構造物では、残留応力は不可避免的に存在し、それが終局圧縮強度に及ぼす影響は無視できないことから、以降の検討では、全て残留応力の影響を考慮している。

4. 2 縦横比の影響

縦横比による終局圧縮強度の変動について考察するため、終局圧縮強度を設計基準強度で正規化

したパラメータ σ_{cu}/σ_F と縦横比 α の関係を図-8に示す。図-8より、 σ_{cu}/σ_F はSUS329J3LとSM570とで大きさの差異はあるものの、 σ_{cu}/σ_F と α の関係は同様の傾向を示しており、 σ_{cu}/σ_F が極小値を示すのは、幅厚比パラメータ $R=0.5$ の場合は $\alpha=0.5$ 、 $R=0.7, 0.9, 1.1$ の場合は $\alpha=0.75$ であった。

縦横比が変形性能に及ぼす影響について考察するため、終局時の平均ひずみを設計基準強度時のひずみで正規化したパラメータ $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F$ と縦横比 α の関係を図-9に示す。図-9より、幅厚比パラメータ $R=0.5$ と $\alpha=0.25$ の場合を除いては、SUS329J3LとSM570の $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F$ には有意差はないが、 $R=0.5$ と $\alpha=0.25$ の場合には、SUS329J3Lの $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F$ は、ラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線により、徐々に接線弾性係数が低下するため、SM570よりも大きくなることが分かる。

4. 3 終局圧縮強度と変形性能の相対比較

SUS329J3LとSM570の終局圧縮強度と変形性能について、相対的に比較するため、縦横比 $\alpha=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ 、幅厚比パラメータ $R=0.5, 0.7, 0.9, 1.1$ の場合について、SUS329J3Lの終局

圧縮強度を設計基準強度で正規化したパラメータ σ_{cu}/σ_F をさらに SM570 のそれで正規化したパラメータ $y=(\sigma_{cu}/\sigma_F)_{SUS}/(\sigma_{cu}/\sigma_F)_{SM}$ と、SUS329J3L の終局時ひずみを設計基準強度時ひずみで正規化したパラメータ $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F$ をさらに SM570 のそれで正規化したパラメータ $x=(\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F)_{SUS}/(\varepsilon_{cu}/\varepsilon_F)_{SM}$ の関係を図-10 に示す。図-10 より、パラメータ x , y とも 1.0 以上であり、終局圧縮強度および終局時の平均ひずみとも、SUS329J3L は SM570 よりも大きいことがわかる。SUS329J3L の終局時の平均ひずみは、主に幅厚比パラメータ $R=0.5$, 0.7 の場合には、SM570 の 1.5 倍前後に至るため、エネルギー吸収の面でも有利であるが、変位制限が課される場合には注意が必要である。

5. 結論

本研究では、材料試験により、二相系ステンレス鋼 SUS329J3L の応力-ひずみ関係を把握するとともに構成式の適用性について検討し、構成式を用いて一様な圧縮力を受ける周辺単純支持板の終局強度解析を実施した。その結果得られた主な知見は、以下の通りである。

- 1) SUS329J3L はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に比べて、比例限界からひずみ硬化領域までの接線弾性係数の低下が急激である。
- 2) 複合 Ramberg-Osgood 曲線は、SUS329J3L の応力-ひずみ関係を精度よく表現できる。
- 3) SUS329J3L の応力-ひずみ曲線は緩やかに接線弾性係数が低下するため、降伏棚を有する SM570 よりも残留応力による終局圧縮強度の低下が小さい。
- 4) 縦横比による終局圧縮強度の変化は、SUS329J3L と SM570 とで同じである。
- 5) SUS329J3L の終局圧縮強度と終局時の平均ひずみは SM570 よりも大きいが、終局時の平均ひずみは、幅厚比パラメータ 0.5 や縦横比 0.25 の場合には、SM570 の 1.5 倍前後に至ることがある。

謝辞 本研究では、材料試験にあたって、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 SUS329J3L 鋼板を提供頂いた。

また、材料試験と数値解析の実施にあたっては、当時研究室 4 年生（現在、国土交通省勤務）の栗林孝典君の多大なご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 社団法人 ステンレス構造建築協会：軽量ステンレス構造デザインマニュアル，2005。
- 2) ステンレス建築協会：LCC の概念とステンレス鋼の用途先における事例紹介（LCC シリーズ・その 2）－EURO INOX 資料から－，ステンレス建築，No.12，pp.19-22，1998。
- 3) ステンレス建築協会：LCC の概念とステンレス鋼の用途先における事例紹介（LCC シリーズ・その 3）－EURO INOX 資料から－，ステンレス建築，No.13，pp.17-20，1998。
- 4) 楠 和憲，友野 裕，松下裕明，矢吹哲也：ステンレス橋梁用候補材の耐候性評価暴露試験，土木学会第 57 回年次学術講演会，1-676，pp.1351-1352，2002。
- 5) Design Manual for Structural Stainless Steel, Second Edition, Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2002。
- 6) J. A. Sobrino: Stainless Steel Road Bridge in Menorca, Spain, Structural Engineering International, pp.96-100, 2006。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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，第 270 号，pp.1-14，1978。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2000。
- 11) 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，第 265 号，pp.25-35，1977。