

SUS410L の応力-ひずみモデルとそれを用いた板の圧縮強度

A study on a stress-strain model of SUS410L and ultimate compressive strength of its plate

○三好 崇夫*

Takao MIYOSHI

宮寄 靖大**

Yasuhiro MIYAZAKI

奈良 敬***

Satoshi NARA

ABSTRACT Ferritic stainless steels show superior corrosion resistance to carbon steels. At present, application of the ferritic stainless steels to structural members is attractive. Therefore, this research is focused on the application of JIS SUS410L ferritic stainless steel to bridge members. At first, stress-strain diagrams of SUS410L are presented by coupon tests. Secondly, in order to introduce the diagrams to numerical strength analysis, applicability of an existing constitutive equation for stainless steels to SUS410L is clarified. Finally, in order to grasp effects of stress-strain relationship of SUS410L on the ultimate compressive strength of the plates, relationships between design strength of SUS410L and ultimate compressive strength of the plates are examined.

Keywords: フェライト系ステンレス鋼, 応力-ひずみ関係, 設計基準強度, 終局圧縮強度

Ferritic stainless steel, stress-strain model, design material strength, ultimate compressive strength

1. はじめに

今後建設される鋼橋は、維持管理費を削減し、超長寿命かつミニマムメンテナンス化を図ることが求められる。その手段の一つとして、特に腐食環境が厳しく、維持管理の困難な部材に耐食性に優れたステンレス鋼を適用することが考えられる。

ステンレス鋼は、その金属組織に応じて、数種類に分類される。このうち、構造用途に適するステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系ステンレス鋼、これらの中間的な金属組織を有する二相系ステンレス鋼である。オーステナイト系ステンレス鋼は、高耐食性を有するとともに、溶接性も良好であり、構造材料として多用されている。また、二相系ステンレス鋼は、高耐食性と高強度を兼ね備えており、近年、道路橋部材へも適用されている¹⁾。しかし、これらは、ニッケルの添加によって高耐食性を示すものの、ニッケルは希少元素で高価なため、材料コスト面で不利となる。

以上の背景から、近年、ニッケルを含有しない、フェライト系ステンレス鋼 SUS410L の構造部材

への適用が注目されている。SUS410L は、オーステナイト系や二相系ステンレス鋼に比べて耐食性には劣るものの安価で、通常の炭素鋼に比べて耐食性に優れる。また、フェライト組織で構成されるため、オーステナイト系ステンレス鋼のように、低温状態でのマルテンサイト変態や、塑性変形などの加工誘起によるマルテンサイト変態も生じない²⁾。しかし、SUS410L の応力-ひずみ関係や圧縮強度特性は、十分明確にされていない。そこで、本研究では、SUS410L の応力-ひずみ関係を材料試験で把握し、そのモデル化に際して、既往のオーステナイト系ステンレス鋼に対して考案された構成式³⁾の適用性を検討する。さらに、その構成式を数値解析に導入し、圧縮板の終局強度解析から、SUS410L の応力-ひずみ関係の特徴および設計基準強度と終局圧縮強度の関係についても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

材料試験では、図-1 に示す JIS5 号試験片を用

*第2種正会員 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)

**準会員(学生) 修士(工学) 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 年度土木学会関西支部年次学術講演会で発表済

いて引張試験を実施した。試験片は、圧延方向と圧延直角方向から、それぞれ4本ずつ切り出して製作した。引張試験はアムスラー型万能試験機を用いて、写真-1に示すように実施した。なお、現状では、SUS410Lの厚板は製造可能であるが、入手は困難なため、板厚6mmの薄板から試験片を製作した。

2.2 試験結果と考察

試験結果として、SUS410Lの圧延方向と圧延直角方向について、全試験片の応力-ひずみ関係を図-2(a)、およびSUS410Lの圧延方向試験片4と圧延直角方向試験片2について、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 と SUS304N2 (ともに圧延方向)、および炭素鋼 SM490Y の応力-ひずみ関係とともに比較して図-2(b)に示す。ただし、図-2(a)において、圧延方向試験片3は、ひずみ約0.02でひずみゲージが剥離したため、途中までの計測結果を示している。図-2(a)より、圧延方向の応力-ひずみ関係は試験片間で若干のばらつきが見られるもののその差異は小さく、圧延直角方向の応力-ひずみ関係は試験片間のばらつきは小さい。しかし、圧延方向と圧延直角方向の応力-ひずみ関係は明瞭な差異を呈することがわかる。

また、図-2(b)より、SUS410Lは、SUS304やSUS304N2と同様にラウンドハウス型の応力-ひずみ関係を呈することが分かる。しかし、比例限界直後の非線形性はSUS304やSUS304N2に比べて小さく、载荷初期からひずみ硬化領域までは圧延方向による異方性を示すが、ひずみ硬化領域ではその影響のないことも分かる。

表-1には、SUS410L、SUS304とSUS304N2の圧延方向と圧延直角方向の機械的特性値と物理定数の平均値を比較して示す。なお、本研究では、欧州のステンレス鋼構造物の設計基準⁴⁾に準拠して、ステンレス鋼の比例限界を0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ と定義した。また、表-1において、弾性係数 E 、0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の右下符号「L」は圧延方向、および「T」は圧延直角方向の値を示す。

表-1より、SUS410Lの引張強さと破断伸びは、SUS304やSUS304N2より小さいが、SUS410Lの弾性係数は、SUS304やSUS304N2よりも若干大きいことが分かる。また、0.01%耐力に対する0.1%耐力、0.2%耐力と引張強さの比($\sigma_{0.01}/\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.01}/\sigma_{0.2}$, $\sigma_{0.01}/\sigma_u$)は、いずれも圧延方向と無関係にSUS410LがSUS304やSUS304N2よりも大きいことが分かる。したがって、SUS410LはSUS304やSUS304N2

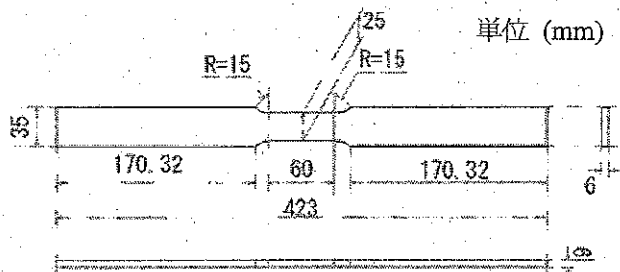


図-1 SUS410L の材料試験片

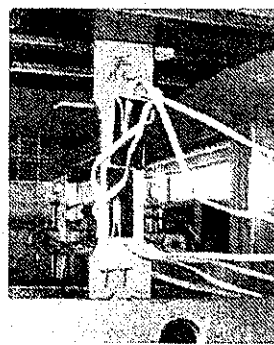


写真-1 引張試験状況

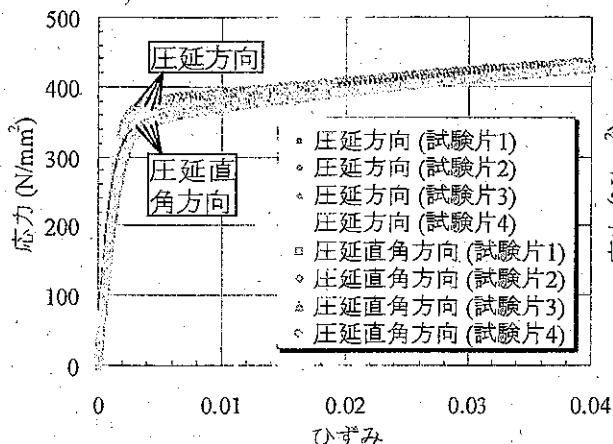


図-2(a) 全試験片の応力-ひずみ関係

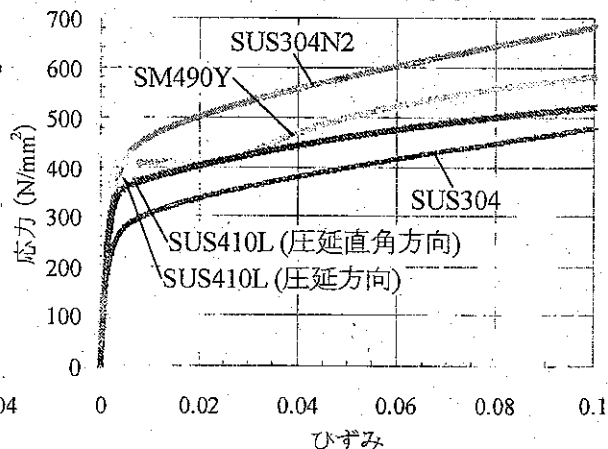


図-2(b) 応力-ひずみ関係の比較

表-1 各種ステンレス鋼の機械的特性値と物理定数の比較

| 鋼種 | SUS304 | | SUS304N2 | | SUS410L | |
|---|--------|--------|----------|--------|---------|--------|
| | 引張方向 | 圧延直角 | 引張方向 | 圧延直角 | 引張方向 | 圧延直角 |
| 引張強さ σ_u (N/mm ²) | 707 | 687 | 741 | 690 | 488 | 486 |
| 破断伸び (%) | 70 | 72 | 67 | 67 | 37 | 40 |
| 弾性係数 E (N/mm ²) | 175101 | 180375 | 174229 | 185633 | 208852 | 198922 |
| 0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (N/mm ²) | 144 | 141 | 232 | 217 | 306 | 234 |
| 0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ (N/mm ²) | 231 | 222 | 356 | 354 | 364 | 327 |
| 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²) | 262 | 255 | 409 | 382 | 374 | 347 |
| $\sigma_{0.01}/\sigma_{0.1}$ | 0.63 | 0.64 | 0.65 | 0.61 | 0.84 | 0.72 |
| $\sigma_{0.01}/\sigma_{0.2}$ | 0.55 | 0.55 | 0.57 | 0.57 | 0.82 | 0.67 |
| $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ | 0.20 | 0.21 | 0.31 | 0.31 | 0.63 | 0.48 |
| E_T/E_L | 1.03 | | 1.07 | | 0.95 | |
| $\sigma_{0.01,T}/\sigma_{0.01,L}$ | 0.98 | | 0.94 | | 0.77 | |
| $\sigma_{0.1,T}/\sigma_{0.1,L}$ | 0.96 | | 0.99 | | 0.90 | |
| $\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2,L}$ | 0.97 | | 0.93 | | 0.93 | |

に比べてひずみ硬化特性が小さいといえる。さらに、圧延直角方向と圧延方向の弾性係数、0.01%耐力、0.1%耐力と0.2%耐力の比 (E_T/E_L , $\sigma_{0.01,T}/\sigma_{0.01,L}$, $\sigma_{0.1,T}/\sigma_{0.1,L}$ と $\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2,L}$) を比較すると、 E_T/E_L , $\sigma_{0.1,T}/\sigma_{0.1,L}$ と $\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2,L}$ は有意な差はないものの、SUS410L の $\sigma_{0.01,T}/\sigma_{0.01,L}$ は SUS304 や SUS304N2 に比べて小さく、0.01%耐力の圧延方向による異方性が認められた。

3. 既往の構成式の SUS410L への適用性

ステンレス鋼の構成式は Ramberg-Osgood 曲線⁵⁾が多用されてきたが、この曲線は0.2%耐力以降での精度低下が指摘されている⁶⁾。そこで、図-3に示すように、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が提案されている²⁾。この曲線は次式で表される。

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

式(1)の第3式の係数 $a \sim c$ は次式で表される。

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

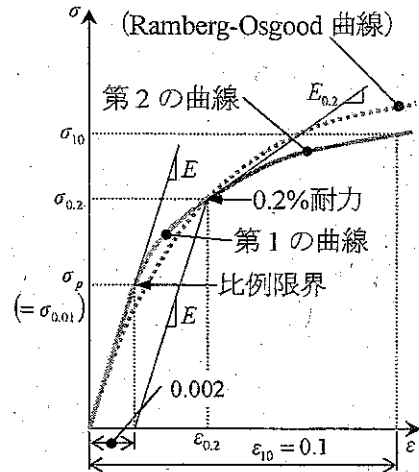


図-3 複合 Ramberg-Osgood 曲線の概略図

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、 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。

複合 Ramberg-Osgood 曲線は、SUS304 および SUS304N2 の0.2%耐力以降の応力-ひずみ関係を良好に表現することが示されている³⁾。そこで、本研究では、複合 Ramberg-Osgood 曲線の SUS410L への適用性について検討した。

図-4は、圧延方向と圧延直角方向について、SUS410L の材料試験による応力-ひずみ関係の計測結果、複合 Ramberg-Osgood 曲線、および比較として Ramberg-Osgood 曲線を示したものである。図-4より、複合 Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ硬化領域の材料試験結果を精度良く表現するのに対して、Ramberg-Osgood 曲線はひずみ硬化領域の精度が低下することが分かる。したがって、SUS410L の構成式として、複合 Ramberg-Osgood 曲線が適用できると考える。

4. SUS410L の設計基準強度と終局圧縮強度

材料試験結果から、SUS410L は比例限界付近からひずみ硬化領域の間で異方性を示すため、その圧縮終局強度を精度良く把握するためには、異方性塑性体としてのモデル化が必要である。しかし、ひずみ硬化を考慮した異方性塑性体の数値解析的な取り扱いには必ずしも容易ではない。また、鋼構造物の製作過程では、鋼板の圧延方向は不明であることが多く⁷⁾、実務設計において、圧延方向に

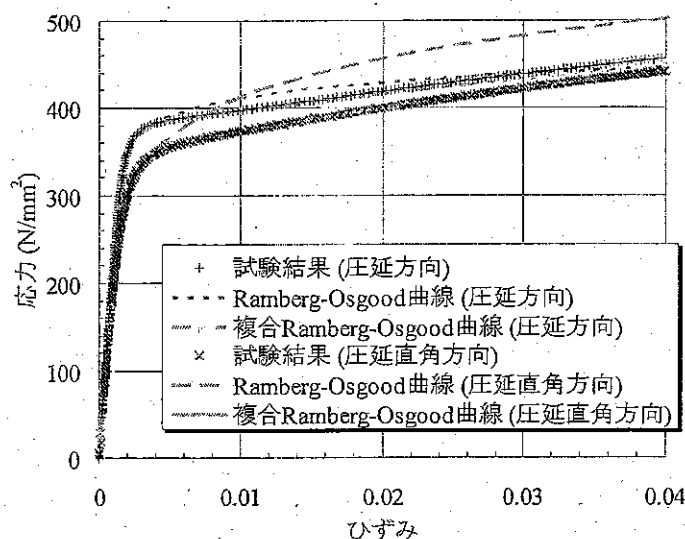


図-4 SUS410L の材料試験結果と構成式の比較

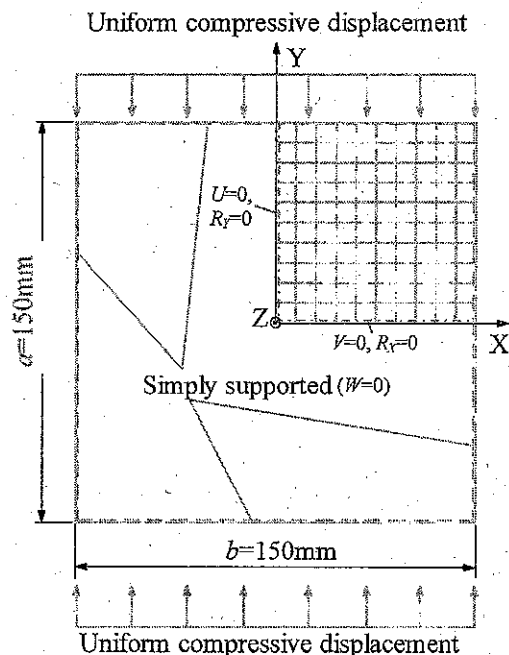


図-5 周辺単純支持板の解析モデル

よる異方性を考慮する意味は希薄であると考え、二相系ステンレス鋼 SUS329J3L は、SUS410L と同様に、応力-ひずみ関係に異方性を呈することが知られている。欧州のステンレス鋼構造物の設計基準⁴⁾は、SUS329J3L を適用可能鋼種として網羅するものの、上記の理由から、圧延方向と圧延直角方向のうち、安全側の抵抗を与える応力-ひずみ関係を用いて等方性体として設計基準強度を与えている。

以上を踏まえて、本研究では、SUS410L を等方性塑性体とみなすこととした。しかし、その設計基準強度の設定は依然として問題である。そこで、SUS410L の圧延方向と圧延直角方向の応力-ひずみ関係をそれぞれ構成式として用いるとともに、各方向の設計基準強度 σ_F を比例限界 σ_P 、我が国の建築分野のステンレス鋼構造物の設計基準⁸⁾で採用されている 0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ 、および一般的なステンレス鋼の機械的特性値である 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と変化させ、圧縮板の終局強度解析を実施した。そして、得られた終局圧縮強度と、設計基準などに与えられている圧縮強度曲線との比較から、SUS410L の応力-ひずみ関係や設計基準強度がその終局圧縮強度に及ぼす影響を考察した。

4. 1 解析モデル

本研究では、圧縮板として、アスペクト比 $\alpha=1.0$ の一様圧縮を受ける周辺単純支持板を取り上げ、対称性を考慮して 1/4 領域を図-5 のように 8 節

点シェル要素でモデル化した。なお、図-5 において、 U 、 V と W はそれぞれ X 、 Y と Z 方向の変位、 R_x と R_y はそれぞれ X と Y 軸まわりの回転変位を表す。また、式(1)と(2)の複合 Ramberg-Osgood 曲線に用いた材料定数は表-1 と表-2 に示す。

周辺単純支持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。

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

ここに、 b ：板幅 (=150mm)、 σ_F ：設計基準強度、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比 (0.3)、および k ：座屈係数 (周辺単純支持板では 4.0) である。

初期不整は、図-5 に示す、板中央点 ($X=Y=0$) のたわみが最大になるように、次式で表される正弦波形で初期たわみを与え、残留応力は無視した。

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

ここに、 a ：板要素の長さ、 $w_{0\max}$ ：初期たわみの最大値 (道路橋示方書⁹⁾の板の平面度の最大値として $b/150$) である。

4. 2 解析結果と考察

解析結果として、圧延方向と圧延直角方向の応力-ひずみ関係を用いて得られた、終局圧縮強度と幅厚比パラメータ R の関係について、それぞれ設計基準強度 σ_F を比例限界 σ_P 、0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ 、お

表-2 複合 Ramberg-Osgood 曲線の材料定数

| 方向 | 圧延方向 | 圧延直角方向 |
|--|-------|--------|
| 第1の曲線の硬化パラメータ n | 15.2 | 7.7 |
| 0.2%耐力時全ひずみ $\varepsilon_{0.2}$ | 0.004 | 0.004 |
| 0.2%耐力時接線弾性係数 $E_{0.2}$ (N/mm ²) | 11364 | 19578 |
| 参照応力 σ_B (N/mm ²) | 523 | 520 |
| 参照ひずみ ε_B | 0.101 | 0.094 |
| 第2の曲線の硬化パラメータ m | 1.2 | 1.5 |

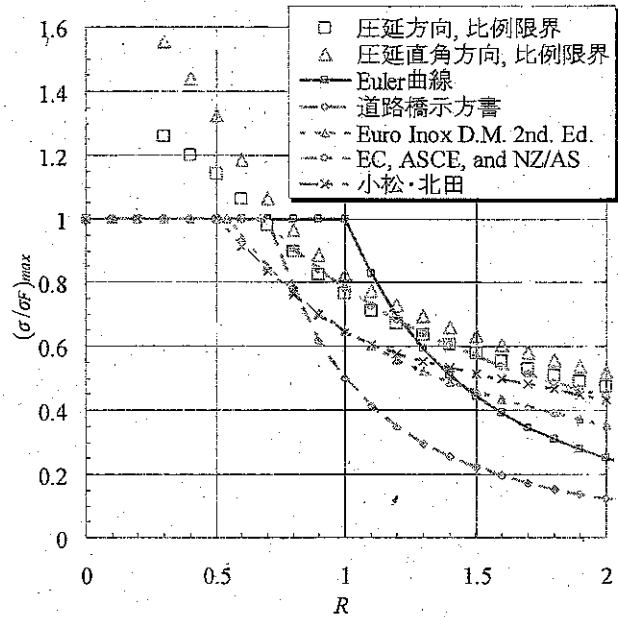


図-6(a) 圧縮強度曲線 ($\sigma_F = \sigma_P$)

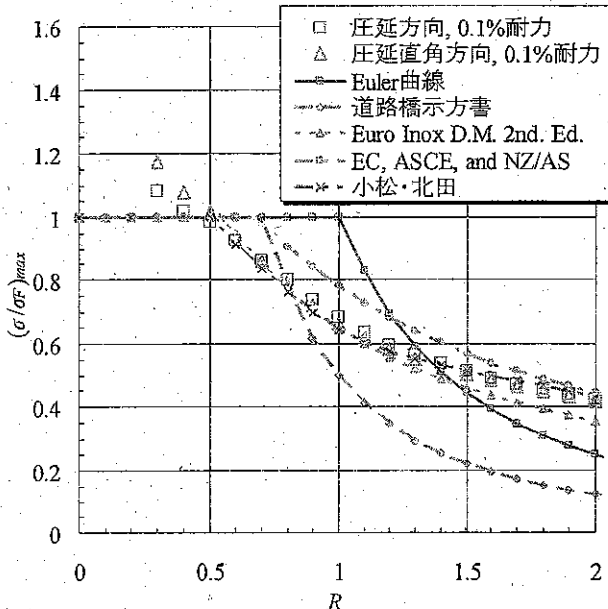


図-6(b) 圧縮強度曲線 ($\sigma_F = \sigma_{0.1}$)

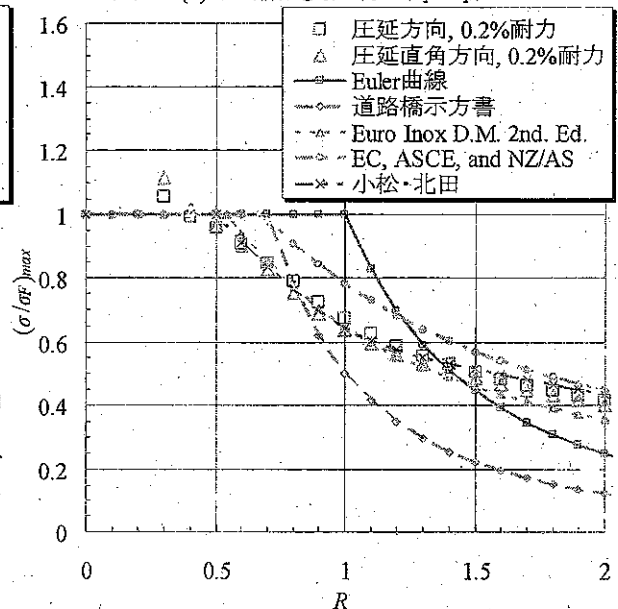


図-6(c) 圧縮強度曲線 ($\sigma_F = \sigma_{0.2}$)

よび0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と変化したケースごとに図-6(a)~(c)に示す。なお、終局圧縮強度 $(\sigma/\sigma_F)_{max}$ は、設計基準強度で正規化して表している。また、図中には、比較として、Euler 曲線、道路橋示方書の耐荷力曲線⁹⁾、小松・北田による炭素鋼の圧縮強度曲線¹⁰⁾、Euro Inox (Euro Inox D.M. 2nd. Ed.)⁴⁾、Eurocode (EC)¹¹⁾、米国 (ASCE)¹²⁾ と豪州・ニュージーランド (NZ/AS)¹³⁾ のステンレス鋼に関する設計基準に与えられている圧縮強度曲線も示す。ただし、これらの設計基準で SUS410L を網羅するものはない。また、EC、ASCE と NZ/AS の圧縮強度曲線は同じであり、この曲線が危険側である

こと⁷⁾を踏まえて修正されたのが Euro Inox の圧縮強度曲線である。

図-6(a)より、設計基準強度を比例限界とすると、幅厚比パラメータに関わらず、圧延方向に比べて圧延直角方向の応力-ひずみ関係から求めた終局圧縮強度が大きいことがわかる。この原因として、設計基準強度を比例限界にすると、図-2と表-1に示すように、圧延方向の比例限界以降のひずみ硬化は、圧延直角方向に比べて小さく、比例限界以降の接線弾性係数が急激に低下することが考えられる。また、圧延方向の応力-ひずみ関係を用いると、EC、ASCE と NZ/AS の圧縮強

度曲線と概ね適合し、道路橋示方書の耐力曲線、小松・北田や Euro Inox の圧縮強度曲線は安全側であることがわかる。

図-6(b)より、設計基準強度を 0.1%耐力とすると、幅厚比パラメータ 0.7 以上では、圧延方向と圧延直角方向の応力-ひずみ関係から求めた終局圧縮強度はほぼ等しいことがわかる。また、幅厚比パラメータ 0.5 以上では、小松・北田の圧縮強度曲線と概ね適合し、Euro Inox の圧縮強度曲線は安全側である。しかし、EC、ASCE と NZ/AS の圧縮強度曲線は危険側となることがわかる。

図-6(c)より、設計基準強度を 0.2%耐力とすると、幅厚比パラメータ 0.5 以上では、圧延方向に比べて圧延直角方向の応力-ひずみ関係から求めた終局圧縮強度が小さくなる。また、圧延直角方向では、幅厚比パラメータ 0.5~1.0 の範囲では、小松・北田や Euro Inox の圧縮強度曲線に比べて終局圧縮強度が若干低下することがわかる。

5. 結論

本研究では、材料試験により、フェライト系ステンレス鋼 SUS410L の応力-ひずみ関係を把握するとともに、その関係を用いて圧縮板の終局強度解析も実施した。その結果得られた知見は、以下のようである。

- 1) SUS410L はラウンドハウス型の応力-ひずみ関係を示し、比例限界からひずみ硬化開始域で圧延方向による異方性を示す。
- 2) SUS410L のひずみ硬化特性や破断伸びは、SUS304 や SUS304N2 に比べて小さい。
- 3) 複合 Ramberg-Osgood 曲線は、SUS410L の圧延方向と圧延直角方向の応力-ひずみ関係を精度よく表現できる。
- 4) SUS410L を等方性塑性体とみなし、それぞれ圧延方向と圧延直角方向の 0.1%耐力を設計基準強度として求めた周辺単純支持一様圧縮板の終局強度もほぼ等しい。
- 5) 0.1%耐力を用いて求めた SUS410L 周辺単純支持一様圧縮板の終局強度は、炭素鋼に対する小松・北田による圧縮強度曲線とよく適合し、Euro Inox の圧縮強度曲線は安全側となる。

謝辞 本研究では、材料試験片の製作にあたって、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 SUS410L 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) J. A. Sobrino : Stainless Steel Road Bridge in Menorca, Spain, Structural Engineering International, pp.96-100, 2006.
- 2) 日本規格協会編: JIS 使い方シリーズ ステンレス鋼の選び方・使い方, 1994.
- 3) 森 省吾, 宮寄靖大, 三好崇夫, 奈良 敬 : ステンレス鋼 (SUS304, SUS304N2) を用いた周辺単純支持板の圧縮強度について, 土木学会全国大会第 62 回年次学術講演会概要集, 2007.
- 4) Design Manual for Structural Stainless Steel, Second Edition, Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2002.
- 5) Ramberg, W. and Osgood, W. R. : Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note, No.902, 1943.
- 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) Baddoo, N. R. : A Comparison of Structural Stainless Steel Design Standards, The Steel Construction Institute, pp.131-150, 2003.
- 8) 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【第2版】, 2001.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2000.
- 10) 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.17-30, 1978.
- 11) ENV 1993-1-4: 1996 Eurocode 3 : Design of Steel Structures. General Rules. Supplementary rules for stainless steels, CEN, 1996.
- 12) 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.
- 13) AS/NZS 4673: 2001, Cold formed stainless steel structures, 2001