

第 I 部門 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

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○宮崎 靖大 大阪大学工学部 栗林 孝典  
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 三好 崇夫 大阪大学大学院工学研究科 正会員 奈良 敬

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例が見られる。オーステナイト系ステンレス鋼のうち SUS316 は、SUS304 よりも高い耐食性を有する鋼種として構造用途に多用され始めている。これらは、我が国の建築分野では、0.1%耐力と降伏比を規定した建築構造用ステンレス鋼材 SUS304A および SUS316A として JIS 規格化され、建築構造に適用するための設計基準<sup>1)</sup>も整備されているが、土木構造分野での設計基準は未整備の状況にある。本研究では、SUS316 を橋梁部材に適用するための設計基準の整備に向けて、SUS316 の応力-ひずみ特性を材料試験で把握し、既往のステンレス鋼に対する構成式<sup>2)</sup>の適用性を検討する。さらに、SUS316 でなる周辺単純支持板の弾塑性有限変位解析を実施し、その終局圧縮強度特性を明らかにし、機械的特性値が概ね対応する構造用炭素鋼 SM400 のそれと比較・検討する。

2. SUS316 の応力-ひずみ特性と構成式

材料試験は、板厚 20mm の SUS316 熱間圧延鋼板の圧延ならびに圧延直角方向から各 4 体の試験片を採取して実施した。得られた SUS316 の各方向の応力-ひずみ曲線を SUS304、フェライト系ステンレス鋼 SUS410L、および構造用炭素鋼 SS400 と比較して、図-1 に示す。図より、SUS316 の応力-ひずみ曲線は SUS304 とほぼ一致し、降伏点のないラウンドハウス型の曲線を呈することや、SUS410L に見られるようなひずみ硬化開始領域で圧延方向による異方性を示さないことがわかる。次に、SUS316、SUS304 と SUS410L について、材料試験から得た機械的特性値の平均を示す。表-1 より、SUS316 の引張強さは SUS304 よりも若干劣るものの破断伸びは大きく、弾性係数、0.01%耐力と 0.2%耐力はそれぞれ SUS304 のそれらとほぼ同等であることが分かる。なお、本研究では、0.01%耐力  $\sigma_{0.01}$  を SUS316 の比例限界と定義する。SUS316 の 0.01%耐力と 0.2%耐力の比  $\sigma_{0.01}/\sigma_{0.2}$ 、0.01%耐力と引張強さの比  $\sigma_{0.01}/\sigma_u$  および 0.2%耐力と引張強さの比  $\sigma_{0.2}/\sigma_u$  について SUS304 と比較すると、いずれも SUS304 より若干大きいものの、両鋼種のひずみ硬化特性はほぼ同等であるといえる。一方で、SUS410L と比較すると、SUS316 の機械的特性値が異なることは明白である。

上述の SUS316 の応力-ひずみ特性を踏まえて、SUS304 の構成式として採用実績のある、複合 Ramberg-Osgood 曲線<sup>2)</sup>の SUS316 への適用性について検討した。試験より得られた SUS316 の圧延直角方向の応力-ひずみ曲線と、あてはめた複合 Ramberg-Osgood 曲線を図-2 に示す。図より、複合 Ramberg-Osgood 曲線は試験結果と良好に一致し、その応力-ひずみ特性を精度良く表現できることがわかる。

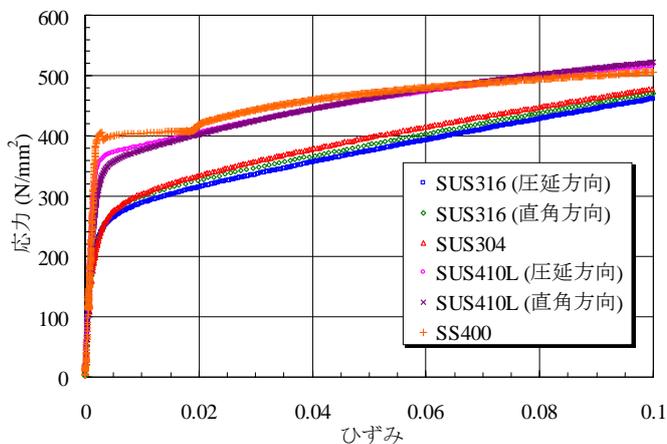


図-1 応力-ひずみ関係とその比較

表-1 機械的特性値の比較

鋼種	SUS316		SUS304		SUS410L	
	圧延	直角	圧延	直角	圧延	直角
引張強さ $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	571	577	707	687	488	486
破断伸び $\delta$ (%)	76	75	70	72	37	40
弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	187461	171282	175101	180375	208852	198922
0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (N/mm <sup>2</sup> )	157	143	144	141	306	234
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	253	254	262	255	374	347
$\sigma_{0.01}/\sigma_{0.2}$	0.63	0.55	0.55	0.55	0.82	0.67
$\sigma_{0.01}/\sigma_u$	0.28	0.25	0.20	0.21	0.63	0.48
$\sigma_{0.2}/\sigma_u$	0.44	0.44	0.37	0.37	0.77	0.72

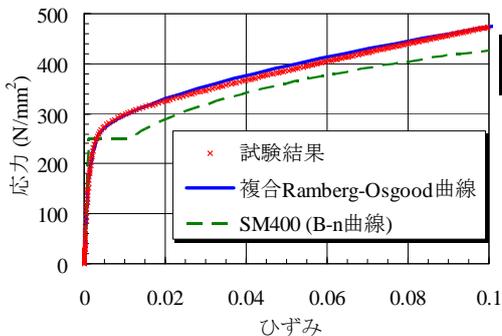


図-2 試験結果と構成式の比較

表-2 B-n 曲線の材料定数

E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	B	n	$\epsilon_y/\epsilon_H$
205.8	249.4	0.5815	0.2449	9.25

$$\sigma = \begin{cases} \epsilon/\epsilon_y & (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y) \\ 1.0 & (\epsilon_y \leq \epsilon \leq \epsilon_H) \\ B(\epsilon/\epsilon_y)^n & (\epsilon_H \leq \epsilon) \end{cases}$$

$\sigma$ : 応力,  $\sigma_y$ : 降伏応力,  
 $\epsilon$ : ひずみ,  $\epsilon_y$ : 降伏ひずみ,  
 $\epsilon_H$ : ひずみ硬化開始ひずみ,  
 $B, n$ : 材料定数

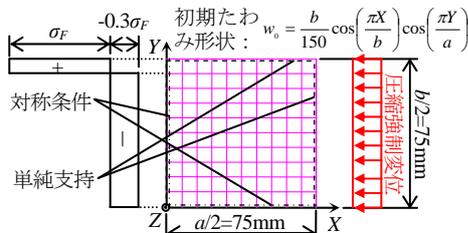


図-3 周辺単純支持板の解析モデル

表-3 複合 Ramberg-Osgood 曲線の材料定数

E (GPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	$\epsilon_{0.2}$	$E_{0.2}$ (GPa)	$\sigma_{10}$ (MPa)	m
177.1	155.0	254.1	6.3	0.0034	17.8	469.4	1.8

$\sigma$ : 応力,  $\epsilon$ : ひずみ, E: 弾性係数,  
 $\sigma_p$ : 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,  
 $\sigma_{10}$ : 10%ひずみ時応力,  $\epsilon_{10}$ : 10%ひずみ, および  $E_{0.2}$ : 0.2%耐力時の接線弾性係数

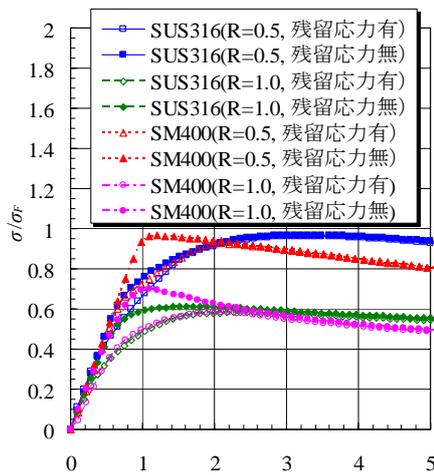


図-4 平均応力-平均ひずみ関係

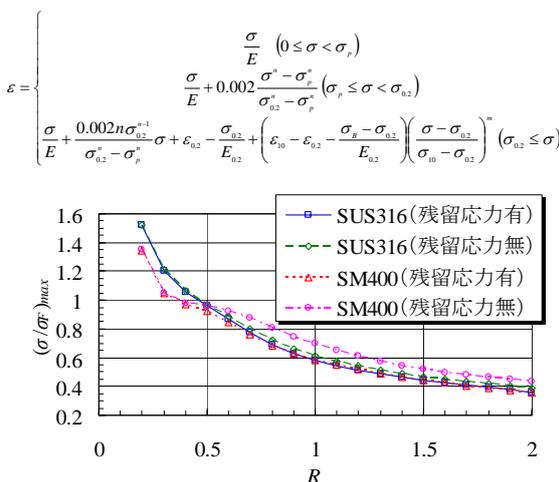


図-5 終局強度と幅厚比パラメータの関係

表-4 強度低下率(%)

R	SUS316	SM400
0.5	0.5	4.0
1.0	4.9	15.9
1.5	8.7	16.3
2.0	10.3	22.0

### 3. SUS316 である周辺単純支持圧縮板の終局挙動

一様圧縮の作用するアスペクト比 1.0 の周辺単純支持板を対象として, SUS316 の応力-ひずみ特性がその終局挙動に及ぼす影響を検討するため, 終局強度解析を実施し, SM400 の場合と比較した. SM400 の場合は図-2 に示される B-n 曲線<sup>3)</sup>, SUS316 の場合は材料試験から得られた材料定数の平均値を用いて表した複合 Ramberg-Osgood 曲線を材料構成式に用いた. 各構成式と材料定数をそれぞれ表-2 および表-3 に示す. また, 解析モデルは, 図-3 に示すように, 対称性を考慮して, 8 節点シェル要素からなる 1/4 モデルとし, 残留応力分布と図-3 中の式で表わされる初期たわみを持つ. さらに, 幅厚比パラメータ R については, 板厚を変化させて, 0.2~2.0 の範囲を 0.1 間隔で変動させた. ただし, 設計基準強度  $\sigma_F$  は SUS316 に対しては 0.2%耐力, SM400 に対しては降伏応力  $\sigma_y$  とした. 解析結果の一例として, R=0.5 と 1.0 に対する SUS316 と SM400 の設計基準強度で無次元化した平均圧縮応力  $\sigma/\sigma_F$  と設計基準強度時ひずみ ( $\epsilon_F = \sigma_F/E$ ) で正規化した平均ひずみ  $\epsilon/\epsilon_F$  の関係を図-4 に示す. なお, 平均圧縮応力  $\sigma$  は圧縮力を載荷辺の断面積で除したもので, 平均ひずみ  $\epsilon$  は圧縮変位を板の長さ a で除したものである. これより, SUS316 の場合は比例限界から 0.2%耐力に至るまでの接線剛性の緩やかな低下という材料特性により, SM400 の場合に比して早期に圧縮変位が増加するものの, 降伏棚を有する SM400 に比して残留応力による終局強度の低下は小さいと考えられる. SUS316 と SM400 について, 終局圧縮強度 ( $\sigma/\sigma_F$  の最大値) と幅厚比パラメータ R の関係を図-5, および R=0.5, 1.0, 1.5 と 2.0 の場合について, 残留応力による終局強度の低下率を表-4 に示す. SUS316 の圧縮版では, 残留応力による終局強度の低下は SM400 の場合に比較して小さく, 1/3 から 1/2 程度であることが分かる.

### 4. まとめ

SUS316 の応力-ひずみ特性は SUS304 とほぼ同様であり, その構成式としては複合 Ramberg-Osgood 曲線の適用が可能である. また, 降伏棚を有さず徐々に接線係数が低下し, ひずみ硬化も持続するため, SUS316 からなる周辺単純支持圧縮板は, SM400 の場合と比較して, 塑性変形能が高く, 残留応力による強度低下は小さい.

【参考文献】 1) (社) 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), 技報堂, 2004. 2) 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, pp.645-652, 2007. 3) 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.140-150, 1987.