

# ステンレス鋼を用いた圧縮フランジ板の耐荷力評価

設計工学講座 池宮 真人

## 1. はじめに

近年、社会基盤施設に対してコスト縮減と耐久性向上を目指した構造物の構築が強く望まれている。特に橋梁構造物の場合、ライフサイクルコスト縮減を勘案した、ミニマムメンテナンス橋梁の実用化の要望が強まっている。その一方策として、ステンレス鋼板を橋梁主部材に用いた「ステンレス橋梁」が考えられる。ステンレス鋼は構造用鋼に比べ耐候性に優れているため、発錆による補修、再塗装等のメンテナンスコスト縮減が期待できる。しかし、ステンレス鋼の機械的性質は、比例限が低い、明確な降伏棚を持たない、ひずみ硬化が大きいなど構造用鋼とは異なる性質を有している。今後、ステンレスの実用化を促進するためには、ステンレス鋼を用いた溶接組立部材の強度特性を明らかにすることが必要となる。そこで本研究では、ステンレス鋼フランジ板に着目して圧縮耐荷力特性を検討した。まず本耐荷力を精度良く評価できる解析手法として、アイソパラメトリックシェル要素を用いた弾塑性有限変位理論に基づく数値解析手法を提案し、実験結果との比較を行い、本解析手法の妥当性の検討を行った。更に、本解析手法を用いてステンレス鋼フランジ板の幅厚比パラメータ、アスペクト比、初期たわみ波形モードを種々変化させてパラメトリック解析を行い、ステンレス鋼フランジ板の圧縮耐荷力特性について検討した。

## 2. 耐荷力解析

本解析では、圧縮フランジ板をアイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位理論に基づいた数値解析を行った。幾何学的非線形挙動は、Updated Lagrangian 法による増分理論を用いて評価し、材料非線形は、von Mises の降伏条件及び Prandtl-Reuss の塑性流れ理論に従うものとした。本解析では、接線剛性マトリックス等の積分を Gauss の数値積分で行ったが、板厚方向への塑性域の進展を考慮できるよう板圧方向に5層の積分点を設けた。また、ひずみ及び応力度の評価は各 Gauss 数値積分点にて行った。一方、非線形方程式の解は、変位増分法に Newton-Raphson 法を併用した逐次収斂計算によって算出した。なお、数値計算には MSN.MARC を使用した。

## 3. ステンレス鋼フランジ板の局部座屈耐荷力実験による検証

### 3.1 実験概要

実験供試体は、図1に示すような十字型断面柱で、長さ792mm、板厚6mmとし、使用鋼材は SUS304N2A 材、SS400 材の2種類を用い、突出幅bの異なる3種類の供試体をそれぞれ2体ずつ製作した。表1に供試体諸元を示す。

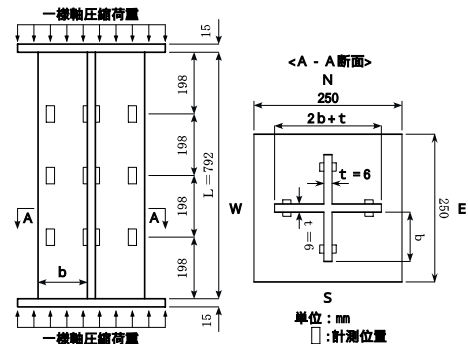


図1 供試体の構造

表1 供試体諸元

供試体名	使用鋼材	降伏応力度 <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	板厚 t (mm)	突出幅 b (mm)	b/t	幅厚比パラメータ R
SUS1-1	SUS304N2A	432	193000	6.21	96.3	15.5	1.18
SUS1-2				6.21	96.3	15.5	1.18
SUS2-1				6.19	66.5	10.7	0.82
SUS2-2				6.22	66.2	10.6	0.81
SUS3-1				6.22	47.5	7.6	0.58
SUS3-2				6.21	47.3	7.6	0.58
SM1-1	SM400	340	210000	6.03	96.1	15.9	1.03
SM1-2				6.06	96.3	15.9	1.03
SM2-1				6.05	77.4	12.8	0.83
SM2-2				6.05	77.3	12.8	0.83
SM3-1				6.06	54.0	8.9	0.58
SM3-2				6.10	54.3	8.9	0.58

表中の降伏応力度  $\sigma_y$ 、ヤング係数 E は材料引張試験結果の平均値である。なお、板パネルの幅厚比パラメータは次式で表される。

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

ここに、 $\sigma_y$  は材料試験結果から得られた降伏応力度 (SUS304N2A では 0.1% オフセット耐力)、 $\nu$  はポアソン比 (=0.3)、k は座屈係数 (=0.425)、E はヤング係数、t は板厚である。また、残留応力度分布を決定するため、供試体製作時に溶接による温度測定を行い、それに基づいて熱弾塑性解析を行った。初期たわみについては変位計を用いて計測した。表2に SUS 供試体の初期たわみの最大値を示す。

表2 初期たわみ最大値

供試体名	初期たわみ最大値 (mm)			
	W	N	E	S
SUS1-1	0.75	1.39	0.52	1.15
SUS1-2	0.84	1.39	1.87	1.15
SUS2-1	1.07	0.51	0.92	0.61
SUS2-2	0.41	0.69	1.63	0.57
SUS3-1	0.80	0.51	0.86	0.89
SUS3-2	1.08	0.95	0.70	0.55

### 3.2 弾塑性有限変位解析法の実験による検証

解析に用いたモデルは図2に示すように、実験供試体と同様の十字形断面柱モデルとし、板パネル1枚の要素分割(長さ) × (幅) を 32 × 4 としモデル化した。

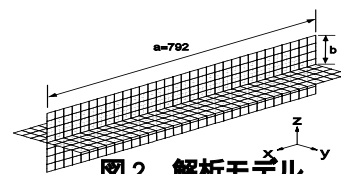


図2 解析モデル

境界条件は実験供試体と同様になるよう荷重辺は固定支持、非荷重辺は自由とした。荷重方法は一様な強制変位を与え、一様軸圧縮応力を導入した。

解析に用いる各鋼材の降伏応力度及びヤング係数は表3の材料特性を用い、ステンレス鋼の応力-ひずみ関係は文献1)を参考に次式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} (\sigma/\sigma_p) &= (\varepsilon/\varepsilon_p) & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ (\sigma/\sigma_p) &= a_1 \ln(\varepsilon/\varepsilon_p) + a_2 \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_p} \\ &\quad + a_3(\varepsilon/\varepsilon_p) + a_4 & \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq 5\varepsilon_p \\ (\sigma/\sigma_p) &= (1/30)(\varepsilon/\varepsilon_p) + a_5 & 5\varepsilon_p \leq \varepsilon \end{aligned} \right\} (2)$$

表3 各鋼材の材料特性値

鋼種	降伏応力度 <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	初期ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )
SUS304N2A	432	0.3	1.93 × 10 <sup>5</sup>
SS400	340	0.3	2.10 × 10 <sup>5</sup>

ここに、 $\sigma_p$ 及び $\varepsilon_p$ は比例限の応力度及びひずみ、 $a_1 \sim a_5$ は定数であり、それぞれ値は材料試験結果に基づき決定した。一方、普通鋼の応力-ひずみ関係は降伏棚を有し、ひずみ硬化域まで考慮した式を用いた。図3は、解析に用いた応力-ひずみ関係を、ひずみ < 1.0%で図化したものである。

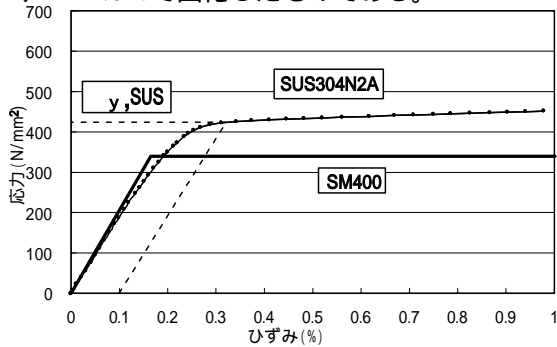


図3 解析に用いた応力-ひずみ関係

残留応力度分布は熱弾塑性解析結果に基づき、圧縮残留応力度  $c = -0.2 y$ 、引張残留応力度  $t = y$  とし、引張残留応力度の分布範囲( $b_1$ )及び圧縮残留応力度の分布範囲( $b_2$ )はそれぞれ自己平衡を保つように決定した。

初期たわみの分布形状は各供試体について、計測結果を関数近似しそれぞれの板パネルに導入した。

図4、図5に荷重-軸方向変位関係について解析結果と実験結果の比較を示す。なお、図中の縦軸は荷重荷重  $P$  を全断面降伏荷重  $P_y$  にて除した平均荷重、横軸は軸のひずみを降伏ひずみ  $y (= y_p/E)$  で除した平均軸ひずみである。図4、図5はそれぞれ、SUS1-1、SUS2-1の結果である。これらの図から明らかな様に、本解析結果は実験結果を精度良く評価している。

実験及び解析から得られた最大荷重の比較を表4に示す。表より、本解析結果は無次元最大荷重 ( $P_{max}/P_y$ ) について、実験結果と実用上十分な精度で一致していることがわかる。

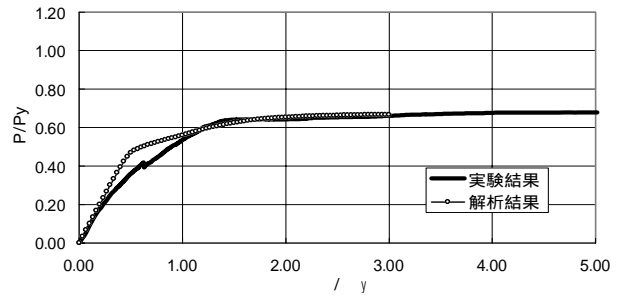


図4 荷重-軸方向変位関係

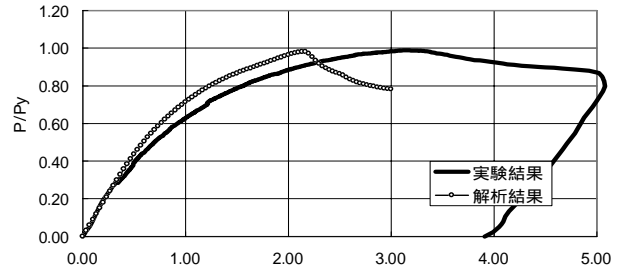


図5 荷重-軸方向変位関係

表4 最大荷重比較

供試体名	幅厚比/バ ラメータR	降伏荷重 Py (kN)	解析結果		実験結果	
			最大荷重 Pmax (kN)	Pmax/Py (1)	Pmax/Py (2)	(1)/(2)
SUS1-1	1.23	1066	711	0.67	0.68	0.98
SUS1-2	1.23	1066	708	0.66	0.71	0.94
SUS2-1	0.85	743	729	0.98	0.99	0.99
SUS2-2	0.85	744	690	0.93	1.00	0.93
SUS3-1	0.61	543	525	0.97	1.03	0.94
SUS3-2	0.61	540	533	0.99	1.05	0.94

以上の結果より、本解析手法は、圧縮フランジモデルの荷重-軸方向変位関係、最大荷重について実験結果を精度良く評価していると判断できる。

#### 4. パラメトリック解析

##### 4.1 解析モデル

本解析では図6に示すような開断面箱桁及びI型断面を構成する圧縮フランジ板の耐力特性を明らかにするため、板幅中央部が腹板で支持されたフランジ板全体を解析対象とし、フランジ板の対称性を考慮し、1/2部分を解析モデルとした。解析では、ステンレス鋼 SUS304N2A、普通鋼 SS400 の二つの鋼材について解析を行った。なお、x軸中央断面に関して対称性が確認できるモデルについては、対称性を考慮し1/4モデルとし解析を行った。

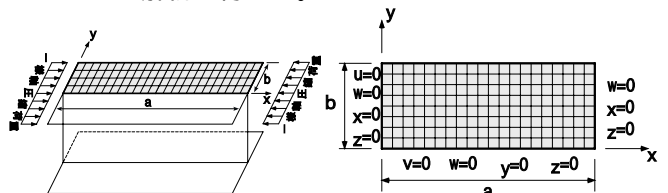


図6 解析モデル及び境界条件

境界条件は、図6に示すように、x軸方向に一様軸圧縮荷重を載荷することとし、荷重辺側( $x=0$ )と板幅中央部( $y=0$ )がそれぞれ鉛直補剛材と腹板で支持されているものとして単純支持、突出部( $y=b$ )を自由とした。荷重は、 $x=a$ の荷重辺上に一様な相対強制変位を与え、一様軸圧縮応力を導入した。

本解析に用いた残留応力は、実験結果を参照して圧縮残留応力度  $c = -0.2 \sigma_y$ 、引張残留応力度  $t = \sigma_y$  とした。残留応力分布形状を図 7 に示す。なお、残留応力分布は、載荷方向および厚さ方向に一定値を持つ矩形分布とし自己平衡を保つように導入した。

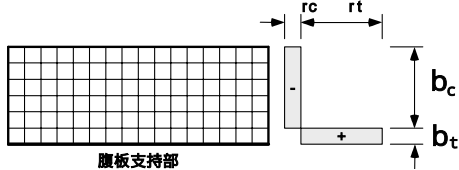


図 7 残留応力度分布

初期たわみ形状は、既往の研究結果より、幅方向に直線分布とし、長さ方向には種々のモードになるように式(2)で仮定した。

$$W_0 = \overline{W}_0 (y/b) \sin(n\pi x/a) \quad \dots (3)$$

式中の  $\overline{w}_0$  は最大初期たわみ量であり、道路橋示方書に規定されている製作誤差の最大許容値 ( $b/100$ ) を用いて解析を行った。また、式中の  $n$  は初期たわみの波形モード次数である。初期たわみの形状の一例をアスペクト比 4、モード 2 について図 8 に示す。図では初期たわみ量を 20 倍に拡大して示している。解析に用いた初期たわみの波形モード次数を表 5 に示す。

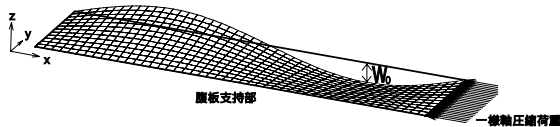


図 8 初期たわみ形状

表 6 要素分割

解析モデルの要素分割はアスペクト比別に表 6 の様に導入した。

鋼種	アスペクト比	要素分割(a × b)
SUS304N2A	0.5	6 × 24
	1.0	15 × 30
	2.0	12 × 12
	4.0	24 × 12
	6.0	36 × 12
	8.0	24 × 6

本解析ではフランジ板の耐荷力に影響を及ぼすと考えられるパラメータとして、既往の研究を参考にし、アスペクト比、幅厚比パラメータ、残留応力、初期たわみモードを採用した。その変動範囲を表 7 に示す。なお幅厚比パラメータは式(1)に示す通りである。

表 7 解析パラメータ

鋼種	SUS304N2A, SS400
アスペクト比	0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0
幅厚比パラメータ	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5
残留応力度	0, -0.2
初期たわみモード	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

#### 4.2 ステンレス鋼の応力 - ひずみ関係の定式化

ステンレス鋼の応力 - ひずみ関係の定式化に関する従来の研究は、定数が任意点の応力に依存しており、そのばらつきが応力 - ひずみ関係に直接影響を与えるので解析に用いる一般式としては適用が難しく<sup>1)</sup>、あるいは、降伏ひずみを大きく超えるひずみ領域で材料試験結果と一致するように定式化されており<sup>2)</sup>、

座屈耐荷力を求めるには適していない。そこで、本研究では、図 9 及び式(3)に示すように比例限と降伏点を直線で結んだトリリニア型の応力 - ひずみ曲線を

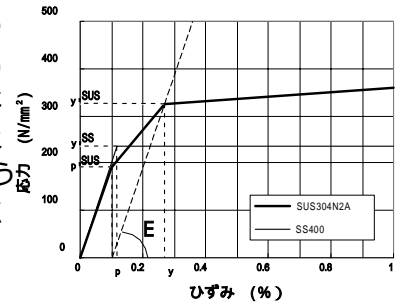


図 9 応力 - ひずみ関係

採用することにより、材料試験結果の下限値を通る簡潔な式を提案し用いた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_0 \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma &= \frac{\sigma_y - \sigma_p}{\varepsilon_y - \varepsilon_p} (\varepsilon - \varepsilon_p) + \sigma_p & \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= E' (\varepsilon - \varepsilon_y) \varepsilon + \sigma_y & \varepsilon_y < \varepsilon \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに  $E_0$ : 初期ヤング係数,  $\varepsilon_p$ : 比例限のひずみ,  $\sigma_p$ : 比例限の応力 ( $=\varepsilon_p \cdot E_0$ ),  $\sigma_y$ : 降伏点の応力,  $\varepsilon_y$ : 降伏点でのひずみ ( $=0.001 + \sigma_y/E_0$ ),  $E'$ :  $\varepsilon_y$  以降のヤング係数 ( $=E_0/43$ ) である。式(3)は SUS304N2A の材料試験結果及び表 8 に示すステンレス鋼の公称値を用いて定式化した。

表 8 ステンレス鋼及び普通鋼の公称値

鋼材	降伏点 <sup>*</sup> ( $N/mm^2$ )	引張強さ <sup>u</sup> ( $N/mm^2$ )	ポアソン比	初期ヤング係数 $E_0$ ( $N/mm^2$ )
SUS304N2A	325	520	0.3	$1.93 \times 10^5$
SS400	235	400	0.3	$2.0 \times 10^5$

\* SUS304N2Aの降伏点は設計基準強度 (0.1%耐力を用いる)

#### 4.3 提案式の妥当性の検討

提案構成式の妥当性を検討するため、前章の解析と同一の解析モデル、初期たわみ及び残留応力を用い、応力 - ひずみ関係を本章で提案するトリリニア型で導入し解析を行った。載荷荷重と平均軸ひずみの関係について、実験結果および前章の解析結果と提案式による解析結果を SUS1-2 について図 10 に示す。

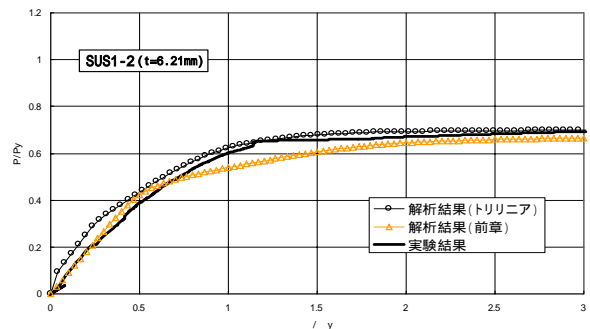


図 10 荷重 - 軸方向変位関係

前章の解析結果と本提案式による解析結果はほぼ一致していることがわかる。よって、以下の検討では構成式として、本提案式を用いた。

#### 5. 耐荷力特性

アスペクト比 =4、残留応力有り、初期たわみ 1 次モードの平均荷重 - 平均荷重関係を図 11 に示す。



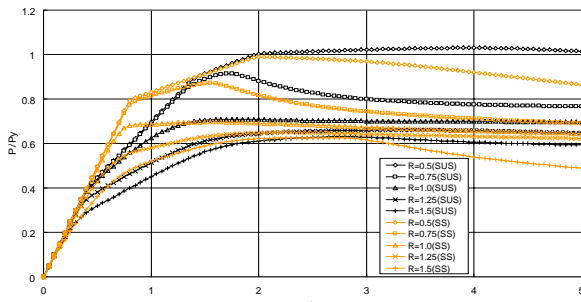


図 11 平均荷重 - 平均ひずみ関係

ステンレス鋼フランジ板、普通鋼フランジ板ともに幅厚比パラメータが大きくなるにつれ、極限強度が低下していることが分かる。これはアスペクト比、初期たわみモード、鋼材の違いによらず同様の傾向が見られた。ステンレス鋼フランジ板は普通鋼フランジ板に比べ低い荷重で線形性を失い、極限強度に到達するまでの軸ひずみは大きかった。

次に、初期たわみ 1 次モード、残留応力有りにおける極限強度とアスペクト比との関係を図 12 に示す。

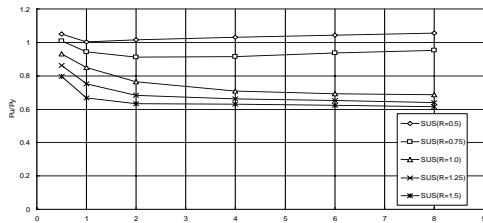


図 12 極限強度 - アスペクト比関係

幅厚比パラメータが R=0.5、0.75 では、アスペクト比 =1.0、2.0 の場合に最小の極限強度を示し、その後アスペクト比が大きくなるにつれ極限強度も僅かではあるが上昇している。しかし、幅厚比パラメータ R=1.0、1.25、1.5 の場合はアスペクト比 =4 以降は、ほぼ一定の極限強度を示し、極限強度の上昇は見られない。

図 13 に、ステンレス鋼フランジ板の幅厚比パラメータ R=1.0 の場合の、アスペクト比、極限強度と初期たわみ波形モード次数の関係を示す。幅厚比パラメータ R=1.0 の場合は、どのアスペクト比においても、初期たわみモードが大きいほど、極限強度が大きくなっている。また、どのアスペクト比においても、初期たわみ波形 1 次モードが最も低い極限強度を示している。

図 13 極限強度 - 初期たわみモード関係

図 14、図 15 に、アスペクト比 =4、幅厚比パラメータ R=1.0、初期たわみ 1 次モードにおける、残留応力有りと残留応力無しの場合の耐力曲線をステンレス鋼フランジ板、普通鋼フランジ板それぞれについて示す。図中、縦軸は最大荷重 P を全断面降伏荷重 P<sub>y</sub> で除して無次元化した値で、横軸は幅厚比パラメータを示している。

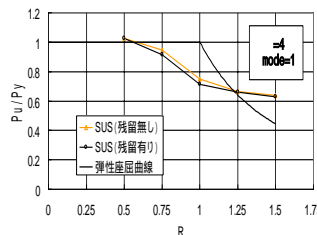


図 14 ステンレス鋼

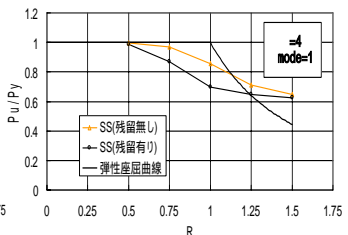


図 15 普通鋼

図 14 と図 15 を比較して明らかなように、ステンレス鋼フランジ板では、普通鋼フランジ板に比べ、残留応力が、極限強度におよぼす影響は少ない。

次にアスペクト比 =4、残留応力有り、初期たわみ 1 次モードの場合の耐力力曲線を図 16 に示す。

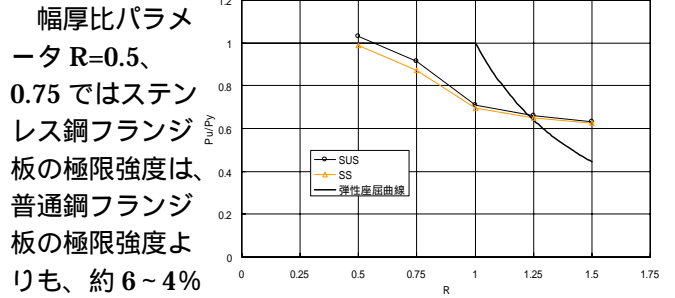


図 16 耐力力曲線

幅厚比パラメータ R=0.5、0.75 ではステンレス鋼フランジ板の極限強度は、普通鋼フランジ板の極限強度よりも、約 6~4% を大きい値を示してあり、幅厚比パラメータ R=1.0、1.25、1.5 ではほぼ同等の極限強度を示している。

## 6. 結論

本研究により得られたステンレス鋼フランジ板の主な結論を以下にまとめる。

ステンレス鋼フランジ板は普通鋼フランジ板に比べ低い応力レベルで線形性を失い、極限強度に到達するまでの軸ひずみは大きかった。これは、ステンレス鋼が普通鋼に比べ比例限が低く、初期非弾性から非線形挙動を示すことによるものと考えられる。

幅厚比パラメータが R=0.5 では =1.0、R=0.75 では =2.0 の場合に最小の極限強度を示し、その後アスペクト比が大きくなるにつれ極限強度も僅かではあるが上昇した。しかし、幅厚比パラメータ R=1.0、1.25、1.5 の場合はアスペクト比 =4 で、ほぼ最小値に漸近し、極限強度の上昇は見られなかった。

ステンレス鋼フランジ板では、普通鋼フランジ板に比べ残留応力が極限強度に及ぼす影響は小さい。ステンレス鋼フランジ板の圧縮極限強度曲線と普通鋼のそれとで顕著な差は見られず、ステンレス鋼を用いたフランジ板は実用上十分な強度特性を有している。

## 参考文献

- 1) 中務尚美, 中村武: 金属系新素材・新材料の利用技術の開発 (建設省プログラム・新素材) その 27 SUS304 ステンレス H 形断面材の座屈耐力に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演要旨概集, 1991.9
- 2) 今中伸朗, 山内泰之, 福田俊文: 金属系新素材・新材料の利用技術の開発 (建設省プログラム・新素材) その 25 ステンレス鋼(SUS304N2,SUS316) の応力 - ひずみ関係, 日本建築学会学術講演要旨概集, 1991.9