

耐候性に優れた新しい橋梁構造物の開発
- ステンレス鋼を用いた圧縮フランジ板の耐荷力評価について -

琉球大学 矢吹 哲哉
琉球大学 有住 康則
琉球大学大学院理工学研究科 池宮 真人

1. はじめに

沖縄県は、亜熱帯気候に属し、高温多湿で、周囲を海に囲まれており、海塩粒子の飛散等により鋼材の腐食しやすい環境にある。そのような厳しい環境下において、橋梁構造物の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開発の要望が強まっている。そこで、鋼橋のライフサイクルコスト縮減の一方策として、耐候性に優れたステンレス鋼薄板を外膜材に用いたステンレス橋梁の開発研究が進められている。しかし、ステンレス鋼は構造用鋼とは異なる機械的性質を有しており、今後、橋構造用ステンレス鋼桁の実用化を促進するためには、ステンレス鋼板の座屈挙動を含めた耐荷力特性の解明が重要である。著者らは、これまでにステンレス鋼を用いた圧縮補剛板、及びせん断を受ける腹板の耐荷力特性に関する研究を行ってきている。本研究ではステンレス鋼を用いた圧縮フランジ板の耐荷力について解析法の実験検証及びパラメトリック解析により検討を行う。

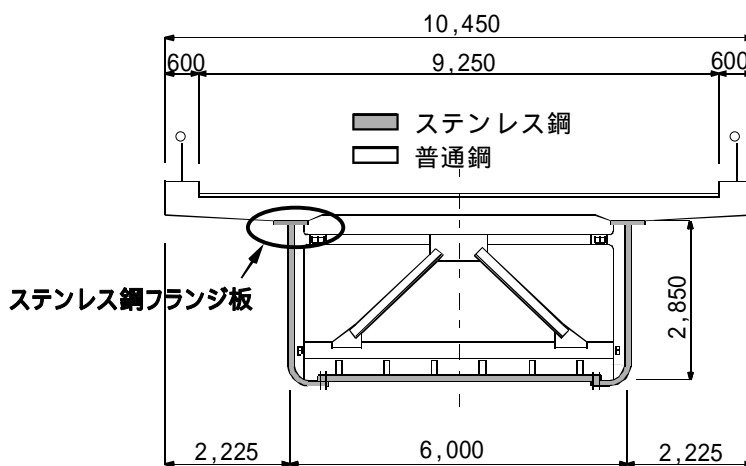


図1 ステンレス橋梁の一例

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うことにより、耐荷力を検討した。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に板厚方向に 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 数値積分点で行った。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. 実験による検証

3.1 実験概要

実験供試体は、図 2 に示すような十字型断面柱で、長さ 792mm、板厚 6mm とし、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。使用ステンレス鋼材は SUS304N2A とし、さらに比較のため SS400 材柱も製作した。表 1 に供試体諸元を示す。表中の降伏応力度 σ_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 (1) 式で表される。

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

ここに、 σ_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)、 ν 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。

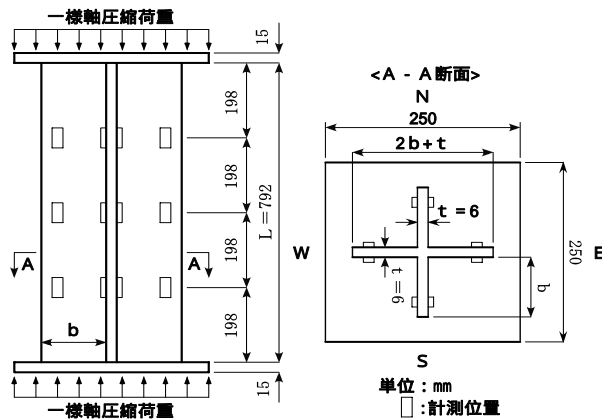


図 2 供試体の構造

表 1 供試体諸元

供試体名	使用鋼材	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	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

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。



写真 1 供試体設置状況



写真 2 変位計設置状況

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、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。境界条件は実験供試体と同様になるよう載荷辺は固定支持、非載荷辺は自由とした。載荷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材料試験結果を参考に決定し、ステンレス鋼の応力 - ひずみ関係は既往の研究を参考に近似した。

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 - ひずみ関係を示したものである。

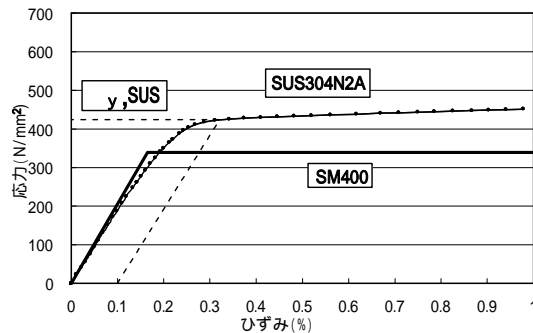


図 3 解析に用いた応力 - ひずみ関係

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 $\sigma_c = -0.2 \sigma_y$ 、引張残留応力度 $\sigma_t = \sigma_y$ とし、引張残留応力度の分布範囲(b_t)及び圧縮残留応力度の分布範囲(b_c)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、図中の縦軸は載荷荷重 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 ϵ を降伏ひずみ $\epsilon_y (= \sigma_y/E)$ 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ように、本解析結果は実験結果を精度良く評価している。

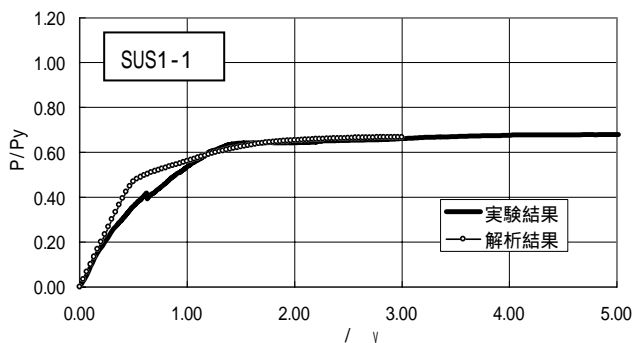


図 4 荷重 - 軸方向変位関係 (SUS1-1)

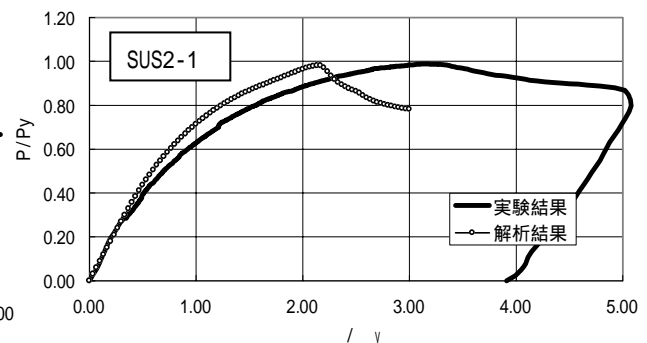


図 5 荷重 - 軸方向変位関係 (SUS2-1)

4. パラメトリック解析

4.1 解析モデル

座屈強度特性を把握するために 480 ケースについてパラメトリック解析を行った。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荷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。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。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。

境界条件は、図 6 に示すように、 x 軸方向に一樣軸圧縮荷重を載荷することとし、載荷辺側($x=0, a$)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。載荷は、 $x=a$ の載荷辺上に一樣な相対強制変位を与え、一樣軸圧縮応力を導入した。

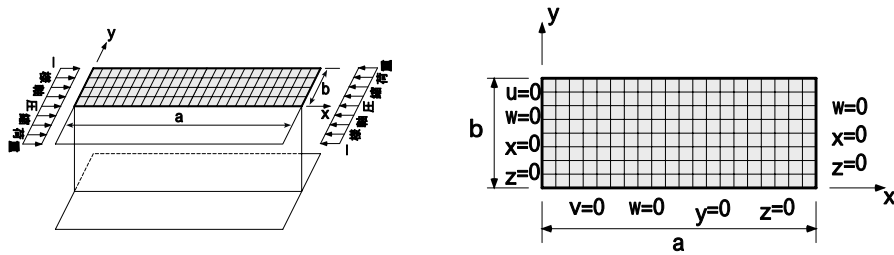


図6 解析モデル及び境界条件

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。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。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。

$$W_0 = \overline{W}_0 (y/b) \sin(n\pi x/a) \quad \dots (2)$$

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。

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て、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2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2 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、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、局部座屈耐荷力を求めるのには適していない。そこで、本研究では、図7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。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_0 \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma &= \frac{\sigma_y - \sigma_p}{\varepsilon_y - \varepsilon_p} (\varepsilon - \varepsilon_p) + \sigma_p & \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= E' (\varepsilon - \varepsilon_y) \varepsilon + \sigma_y & \varepsilon_y < \varepsilon \end{aligned} \right\} (3)$$

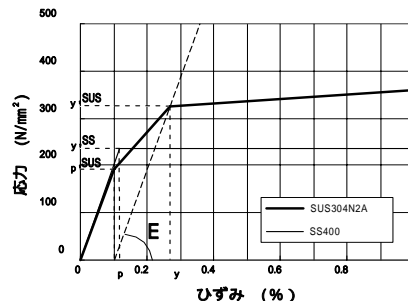


図7 応力 ひずみ関係

ここに E_0 : 初期ヤング係数, ε_p : 比例限のひずみ, σ_p : 比例限の応力 ($=\varepsilon_p \cdot E_0$), σ_y : 降伏点の応力, ε_y : 降伏点でのひずみ ($=0.001 + \sigma_y/E_0$), E : ε_y 以降のヤング係数 ($=E_0/43$) である。なお、本提案式の検証については既に報告されている。

5. 耐荷力特性

アスペクト比 $\lambda = 4$ 、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 8** に示す。

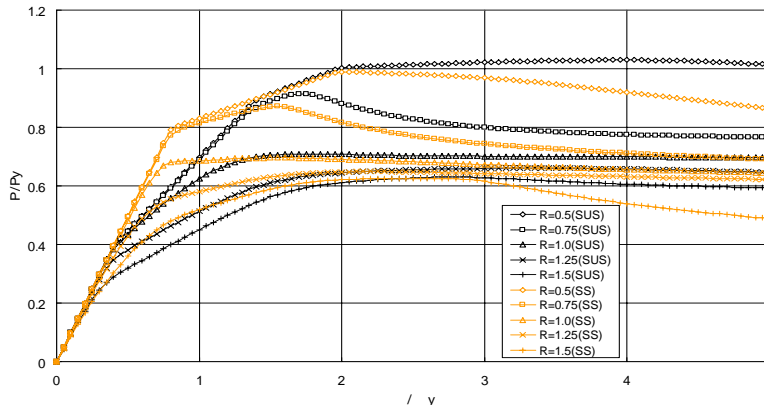


図 8 平均荷重 - 平均ひずみ関係

図から明らかなように、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。これはアスペクト比 λ 、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 λ との関係を **図 9** に示す。幅厚比パラメータが $R=0.5, 0.75$ では、アスペクト比 $\lambda = 1.0, 2.0$ 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 $\lambda = 4$ 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 10 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。

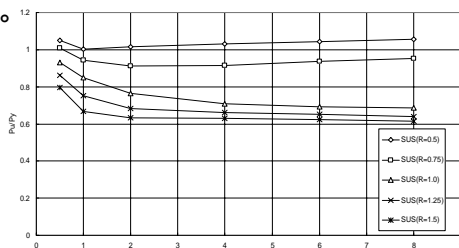


図 9 極限強度 - アスペクト比関係

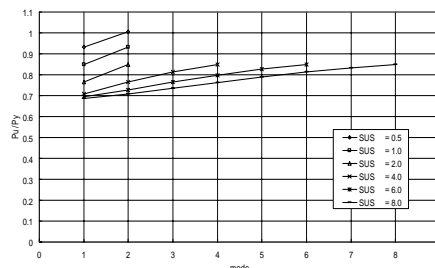


図 10 極限強度 - 初期たわみモード関係

図 11、**図 12** に、アスペクト比 $\lambda = 4$ 、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荷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_y 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 11** と **図 12** 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。



図 11 ステンレス鋼

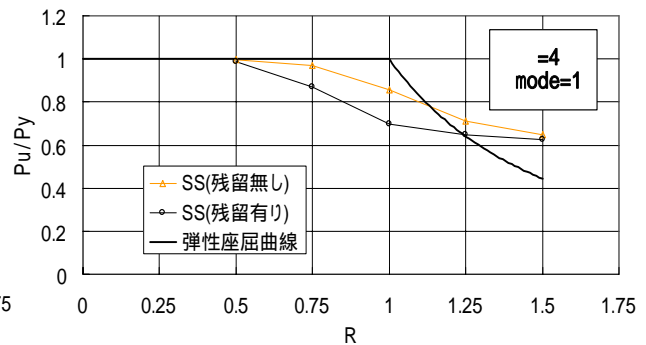


図 12 普通鋼

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荷力曲線を図 13 に示す。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おり、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。

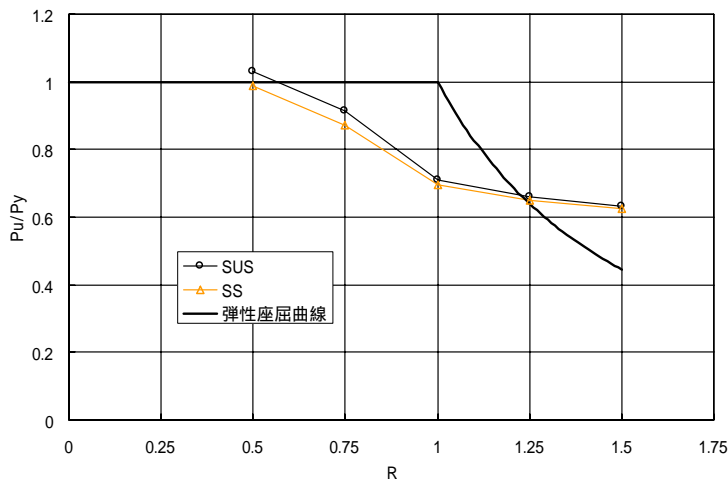


図 13 耐荷力曲線

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座屈強度特性の主なものを以下にまとめる。

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、初期段階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 $\lambda = 1.0$ 、 $R=0.75$ では $\lambda = 2.0$ 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 $\lambda = 4$ 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。