

純せん断を受けるステンレス鋼板の耐荷力特性について

琉球大学 正会員 有住 康則 琉球大学 フェロー 矢吹 哲哉
日立造船（株） 正会員 松下 裕明 日立造船（株） 正会員 岩田 節雄

1.はじめに 鋼橋のライフサイクルコスト削減の一方策として、耐候性に優れたステンレス鋼薄板を外膜材に用いたミニマムメンテナンス橋梁の開発¹⁾が進められている。ステンレス鋼は、一般の構造用鋼と比較して格段に耐食性に優れてはいるが、比例限が低く、降伏応力（0.1%耐力）より低い応力レベルより非線形性が現れる。更に、ひずみ硬化が大きく、降伏比が低い等の力学特性を有している為、ステンレス鋼部材の座屈挙動は普通鋼部材や高張力鋼部材とは異なると考えられ、ステンレス橋梁の実用化の為に、耐荷力特性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、ステンレス鋼薄板を外膜材に用いたミニマムメンテナンス橋梁開発の一貫として、ステンレス鋼板のせん断耐荷力特性を解明するため、せん断耐荷力に影響を及ぼすと考えられる因子を種々変化させて弾塑性有限変位理論に基づくパラメトリック解析を行い、純せん断応力を受けるステンレス鋼板の耐荷力特性について検討を行った。

2. 解析モデル及び解析法 本研究では、図-1に示す無補剛の周辺単純支持板（ステンレス鋼板及び普通鋼板）に純せん断応力が作用した場合について解析を行った。解析では、純せん断変形が得られるように $x=a, y=0$ の点を制御点とし、 y 方向の変位を単調増加する制御方式を用いた。境界条件は、面外変形に対して4辺単純支持とし、面内変位に対しては載荷点の変位増分に対して、各辺が直線性を保持しながら変形する拘束とした²⁾。ただし、各辺の伸びに対しては拘束を行わず、自由とした。解析では、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て数値解析³⁾を行った。幾何学的非線形挙動は、更新ラグランジュ法による増分理論を用いて評価し、材料非線形挙動は、von Misesの降伏条件及びPlandtl-Reussの塑性流れ理論に従うものとした。数値解析では、変位増分法にNewton-Raphson法を併用して逐次収斂計算を行った。なお、要素分割は 24×24 分割とした。解析に用いたステンレス鋼(SUS304N2A)及び普通鋼(SS400)の応力-ひずみ関係を図-2に示す。本解析では、ステンレス鋼の構成式は、材料試験より得られた結果に基づいて図-2に示すように比例限及び降伏点を直線で結んだトリニア型の応力-ひずみ曲線を採用することによって、材料試験結果の下限值を通る簡便式を採用した。なお、解析では、比例限の応力度は $\sigma_p=193\text{N/mm}^2$ を、降伏応力度（0.1%耐力）は $\sigma_y=325\text{N/mm}^2$ を、初期ヤング係数は $E_0=193000\text{N/mm}^2$ 、及び降伏点以後のヤング係数は $E'=E_0/43$ を用いた。初期たわみ形状は、既往の研究結果⁴⁾より次式を採用した。

$$w_0 = w_{0,\max} \{w_{11} \sin(\pi x / a) \sin(\pi y / b) + w_{22} \sin(2\pi x / a) \sin(2\pi y / b)\} \dots (1)$$

ここで、 $w_{0,\max}$ は最大初期たわみ量であり、本解析では道路橋示方書に規定されている製作誤差の最大許容値($b/150$)を用いた。なお、 w_{11} 及び w_{22} はアスペクト比によって定まる係数である⁴⁾。残留応力度は、 x 軸及び厚さ方向に一定値を持つ矩形分布で与え、引張残留応力度を $\sigma_{rx} = \sigma_y$ とし、圧縮残留応力度を $\sigma_{rc} = -0.2\sigma_y$ とした。本解析に用いたパラメータとその変動範囲を表-1に示す。なお、本解析手法の妥当性については、ステンレス鋼板のせん断耐荷力実験結果との比較により、実験結果の挙動を精度良く評価できることが既に確認されている⁵⁾。

3. 解析結果及び考察 幅厚比パラメータ(R)を変化させた場合について、解析で得られたせん断応力-せん断ひずみ関係をステンレス鋼板(SUS 304N2A)について図-3に、比較のため普通鋼板(SS400)について図-4にそれぞれ示す。図中縦軸は載荷辺のせん断応力度(τ)を降伏せん断応力度(τ_y)で無次元化し、横軸はせん断ひずみ($\gamma=\Delta/a$)

表-1 解析パラメータ及びその変動範囲

パラメータ	記号	変動範囲
幅厚比パラメータ	R_t	0.5 ~ 2.0
アスペクト比	α	1.00, 1.25, 1.5
残留圧縮応力度	σ_{rc}	0, 0.2
$R_t = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_r \pi^2} \frac{\tau_y}{E}}, \quad k_r = \begin{cases} 5.34 + 4.0/\alpha^2 & (\alpha \geq 1) \\ 4.0 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha \leq 1) \end{cases}$		

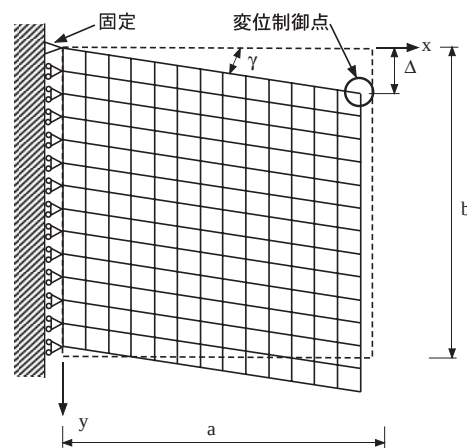


図-1 解析モデル

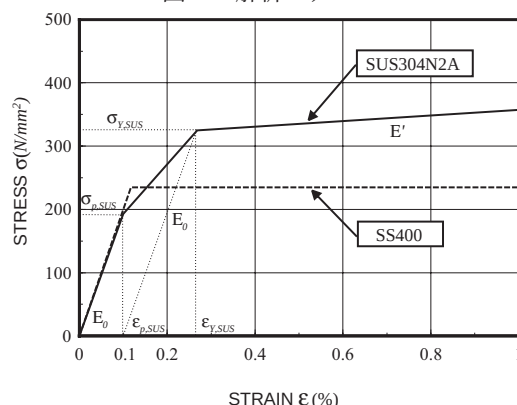


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

を降伏せん断ひずみ(γ_v)で無次元化して示してある。なお、図には残留応力度が有る場合と無い場合について示してある。これらの図から明らかなように、幅厚比パラメータの増加に従って極限強度（最大せん断応力度）は一様に低下しており、極限強度に到達した後は緩やかに強度が減少している。一方、幅厚比パラメータが $R=0.5$ の場合に着目すると、ステンレス鋼板は普通鋼板と比較して比較的低い応力度段階で線形性を失い、極限強度に至るまでのせん断ひずみは普通鋼板と比較して大きな値を示している。これは、図-2に示したように、ステンレス鋼が普通鋼と比較して比例限が低く、初期の段階から接線剛性が低下することに起因していると考えられる。次に、残留応力度が有る場合は、無い場合と比較して低い荷重で剛性が低下しており、極限荷重到達時のせん断ひずみが増加している。残留応力度が有る場合の極限強度は、無い場合と比較して普通鋼板の場合は2～4%低下しているが、ステンレス鋼板では残留応力度が極限強度に及ぼす影響は小さい。ステンレス鋼板の場合について、アスペクト比を変化させた場合の極限強度とアスペクト比の関係を図-5に示す。図から明らかなように、幅厚比パラメータによって極限強度が最小となるアスペクト比は異なっているが、アスペクト比による極限強度の変化量は5%以下であった。なお、アスペクト比が極限強度に及ぼす影響については、ステンレス鋼板と普通鋼板では大きな差異は見られなかった。次に、終局時の変形モードの一例を図-6に示す。図から明らかなように、圧縮主応力方向にせん断座屈変形が生じており、変形量は幅厚比パラメータが大きくなるに従って増大している。最後に、極限強度と幅厚比パラメータの関係を図-7に示す。図から明らかなように、ステンレス鋼板と普通鋼板の極限強度曲線に顕著な差は見られず、ステンレス鋼板は普通鋼板と同程度のせん断強度を示し、実用上十分なせん断耐荷力を有していると考えられる。

4. あとがき 本研究では、純せん断応力を受けるステンレス鋼板の耐荷力特性を解明するため、極限強度に及ぼすと考えられる因子を種々変化させてパラメトリック解析を行った。本研究より得られた主な結論は、以下の通りである。；(1) 残留応力度及びアスペクト比が、ステンレス鋼板のせん断耐荷力に及ぼす影響は小さい。(2) ステンレス鋼板と普通鋼板のせん断極限強度曲線に顕著な差は見られず、ステンレス鋼板は実用上十分なせん断耐荷力を有している。

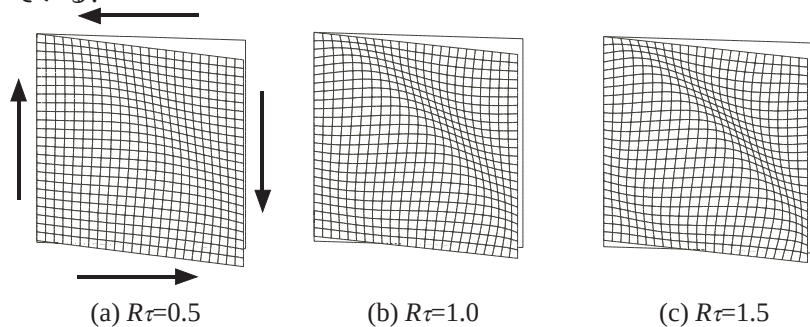


図-6 終局時の変形モード（ステンレス鋼板）

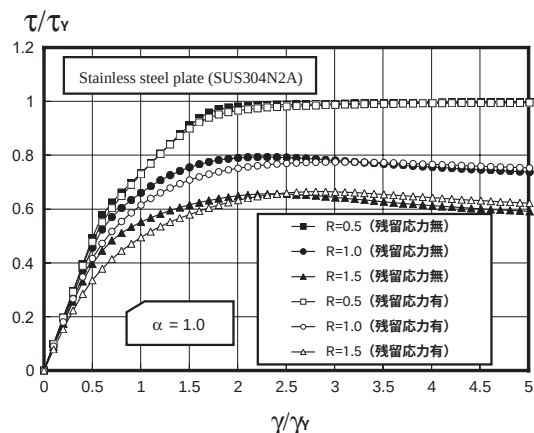


図-3 せん断応力-せん断ひずみ関係
(ステンレス鋼板)

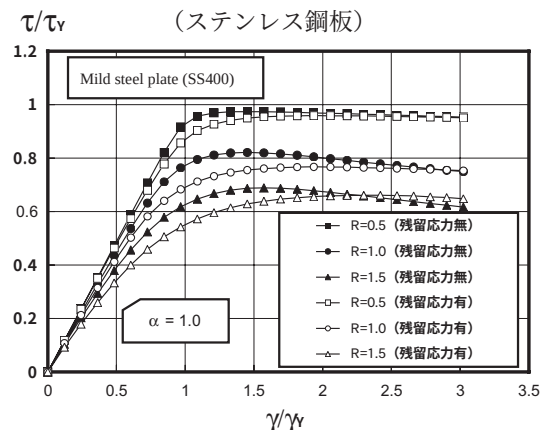


図-4 せん断応力-せん断ひずみ関係
(普通鋼板)

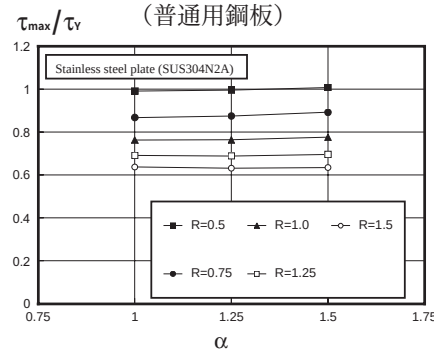


図-5 極限強度とアスペクト比の関係
(ステンレス鋼板)

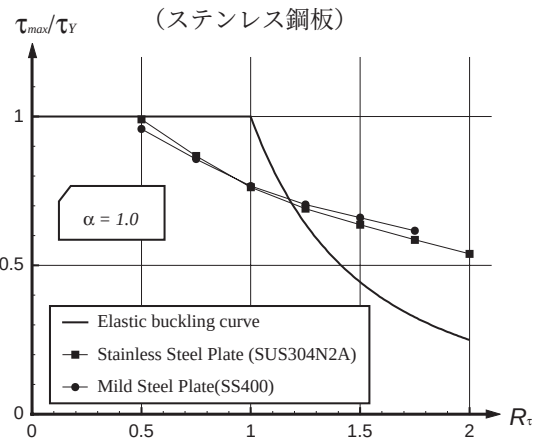


図-7 極限強度と幅厚比パラメータの関係

参考文献 1) 松下, 岩田, 有住, 矢吹: ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐荷力特性, 構造工学論文集, Vol.49A, 2003. 2) 葛西, 渡辺, 宇佐美, Chuslip: せん断力を受ける無補剛箱形断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, No.703/I, 2002. 3) Yabuki, T., Arizumi, Y. and Yashiro, S.: Ultimate Strength and Its Practical Evaluation of Cylindrical Steel Shell Panels under Various Compressions, Journal of Structural Mech. and Earthquake Eng., JSCE, No.489/I-27, 1994. 4) 奈良, 出口, 福本: 純せん断応力を受ける鋼板の極限特性に関する研究, 土木学会論文集, No.392/I, 1988. 5) 松下, 矢吹, 有住, 岩田: ステンレス鋼板を用いたI形腹板のせん断耐荷力, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.