

ステンレス鋼を用いた自由突出圧縮板の極限強度特性について

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、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のそれとは異なると思われる。ステンレス橋梁の実用化の為には、ステンレス鋼の材料特性を考慮して極限強度特性を明らかにする必要がある。そこで著者らは既に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極限強度特性¹⁾及びステンレス鋼板を用いたI形断面桁腹板のせん断耐荷力特性²⁾等について検討を行っている。本研究では、ミニマムメンテナンス橋梁開発の一貫として、ステンレス鋼板を用いたフランジ自由突出板の圧縮極限強度特性を解明するため、極限強度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、圧縮応力を受けるステンレス鋼自由突出板の極限強度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に示すプレートガーダーのフランジ自由突出板（ステンレス鋼板及び普通鋼板）に純圧縮応力が作用した場合について解析を行った。解析の境界条件は、載荷辺側と板幅中央部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面外変形に対して単純支持とし、非載荷辺は自由とした。解析では、対称・逆対称性を勘案して要素の1/4部分を解析対象とした。載荷方法は、載荷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。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、アスペクト比が $\alpha=2$ の場合の12x12分割を基準として、アスペクト比が大きく（或いは小さく）なるに従って分割数を増加させた。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値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。

$$w_0 = w_{0,\max} (y/b) \cos(\pi x/a) \dots\dots\dots (1)$$

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($b/100$)を用いた。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を与え、引張残留応力度を $\sigma_{rt} = \sigma_y$ 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。

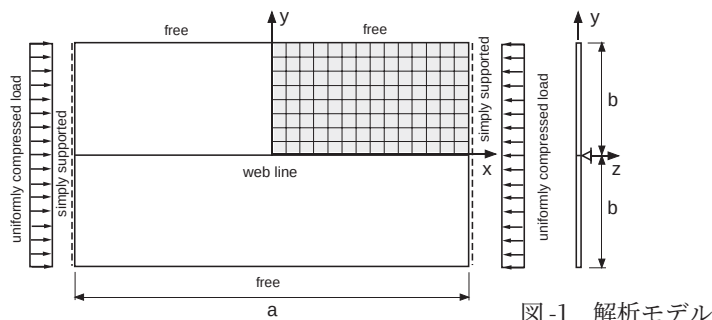


図-1 解析モデル

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	0.5 ~ 1.5
アスペクト比	$\alpha=a/b$	0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0
残留圧縮応力度	σ_{rc}/σ_y	0, 0.2

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{k\pi^2 E}}, \quad k=0.425$$

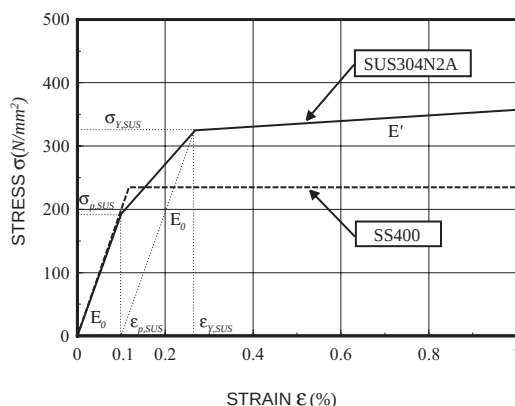


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

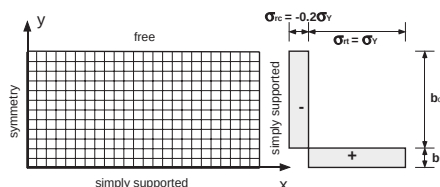


図-3 残留応力度分布

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、解析で得られた自由突出板の平均圧縮応力-平均ひずみ関係の一例をステンレス鋼板(SUS 304N2A)について図-4に、比較のため普通鋼板(SS400)について図-5にそれぞれ示す。なお、図には残留応力度が有る場合と無い場合についても示してある。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は一樣に低下しており、ステンレス鋼板の $R=0.5$ を除いて極限強度に到達した後は緩やかに強度が減少している。なお、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平均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、残留応力度が極限強度に及ぼす影響を検討するため、残留応力度を有する場合と無い場合の極限強度と幅厚比パラメータの関係を図-6に示す。図から明らかなように、ステンレス鋼自由突出板の場合、残留応力度が極限強度に及ぼす影響は普通鋼板に比較して小さい。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-7に示す。図から明らかなように、アスペクト比が極限強度に及ぼす影響は、ステンレス鋼板と普通鋼板では大きな差異は見られず、アスペクト比がほぼ $a/b < 4$ で極限強度が最小値に漸近し、その後の減少の割合は比較的小さい。最後に、残留応力度を有する自由突出板について、アスペクト比を変化させた場合の同じ幅厚比パラメータの極限強度の最小値を用いて示した極限強度と幅厚比パラメータの関係を図-8に示す。図から明らかなように、自由突出板では、ステンレス鋼と普通鋼の圧縮極限強度曲線に顕著な差は見られず、ステンレス鋼自由突出板は普通鋼板と同程度の強度を示し、実用上十分な圧縮極限強度を有していると考えられる。

4. あとがき 本研究では、圧縮応力を受けるステンレス鋼自由突出板の極限強度特性を解明するため、極限強度に影響を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) 残留応力度が、ステンレス鋼自由突出板の圧縮極限強度に及ぼす影響は小さい。(2) ステンレス鋼と普通鋼を用いた自由突出板では、アスペクト比がほぼ $a/b < 4$ で極限強度が最小値に漸近し、その後の減少の割合は比較的小さい。(3) ステンレス鋼自由突出板の圧縮極限強度曲線と普通鋼のそれと顕著な差は見られず、ステンレス鋼を用いた自由突出板は実用上十分な強度特性及び変形特性を有している。

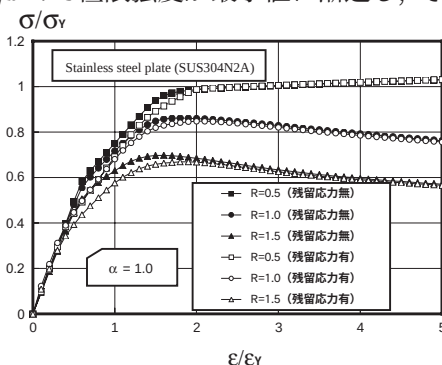


図-4 平均圧縮応力-平均ひずみ関係 (ステンレス鋼板)

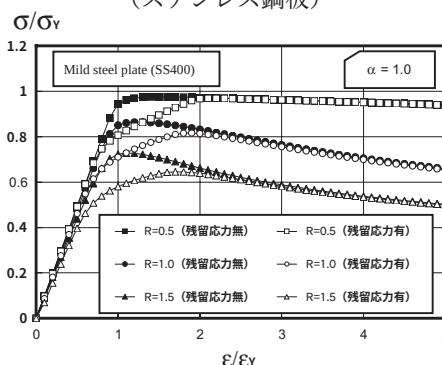


図-5 平均圧縮応力-平均ひずみ関係 (普通鋼板)

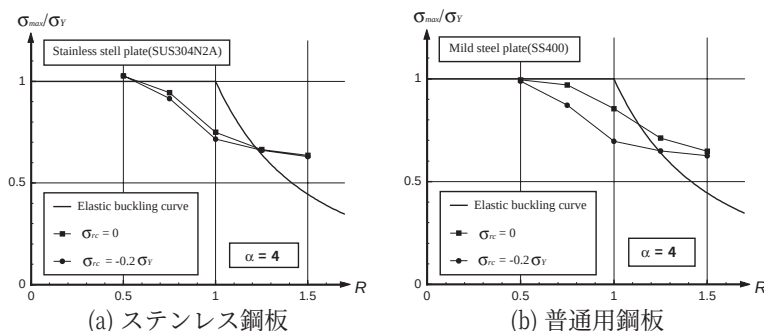


図-6 極限強度と残留応力度の関係

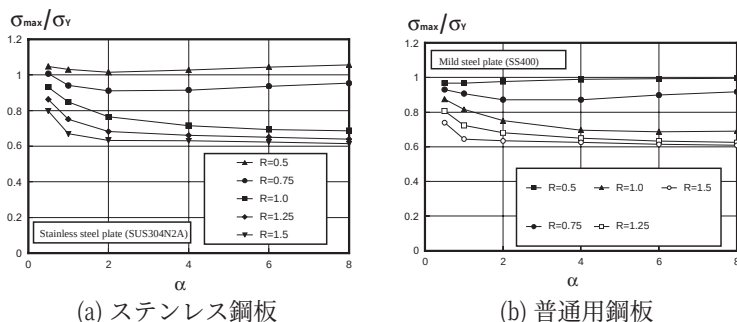


図-7 極限強度とアスペクト比の関係

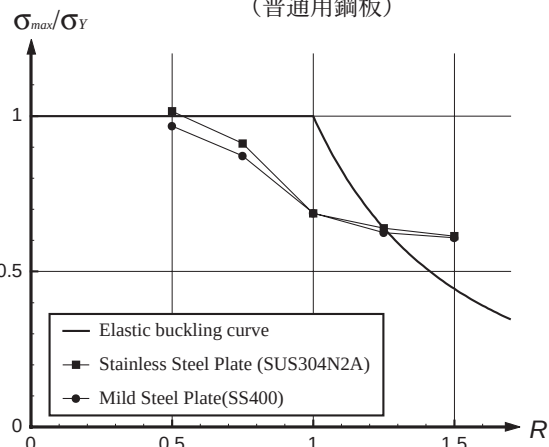


図-8 極限強度と幅厚比パラメータの関係 (残留応力度有)

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) 松下, 矢吹, 有住, 岩田: ステンレス鋼板を用いたI形断面桁腹板のせん断耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004. 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) 小松, 北田: 初期不整を含む自由突出圧縮板の極限強度特性について, 土木学会論文報告集, No.314, 1981.