

ステンレス鋼を用いた圧縮補剛板の耐荷力解析について

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 近年,社会基盤施設に対して,建設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の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,益々強まっている.そこで本研究では,橋梁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ミニマムメンテナンス橋梁開発の一貫として,高耐候性材料としてのステンレス鋼薄板パネルに,経済性に配慮し同等の材料強度を有する普通構造用鋼材の補剛材を溶接した複合圧縮補剛板について耐荷力解析を行い,その耐荷力特性について検討を行った.一般に,ステンレス鋼は,普通鋼と比較して格段に耐食性に優れているが,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,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.そこで本研究では,先ず初めに材料試験結果に基づいてステンレス鋼の構成式を提示し,次に,補剛板構造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く耐荷力解析を行い,更に実験結果¹⁾と比較し,圧縮力を受ける複合補剛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1本の縦補剛材を有する補剛板を解析対象とし,表-1に示すように板パネルと補剛材に普通鋼(SS400)を用いた場合,ステンレス鋼(SUS304N2)を用いた場合,板パネルにステンレス鋼(SUS304N2)を補剛材にステンレス鋼と同等の降伏応力度を有する普通鋼(SM490Y)を用いた場合の3種類について解析を行った.なお,縦補剛材は,道路橋示方書の規定剛度を満足する断面とした.解析では,補剛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²⁾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.補剛板の境界条件は,実験条件¹⁾と同様に荷重辺を固定とし,非荷重辺から10mm内側に入ったライン上を単純支持とした.荷重は,荷重辺に相対強制変位を与えることによって補剛板に純圧縮力を導入した.材料試験より得られた応力-ひずみ関係を図-2に,材料特性値を表-2に示す.本解析では,ステンレス鋼の応力(σ)とひずみ(ϵ)の関係は次式のように仮定した.

$$\left. \begin{aligned} (\sigma / \sigma_p) &= (\epsilon / \epsilon_p), \quad E = E_0 & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_p \\ (\sigma / \sigma_p) &= a_1 \ln(\epsilon / \epsilon_p) + a_2 \sqrt{\epsilon / \epsilon_p} + a_3 (\epsilon / \epsilon_p) + a_4 & \epsilon_p \leq \epsilon \leq 5\epsilon_p \\ (\sigma / \sigma_p) &= (1/30)(\epsilon / \epsilon_p) + a_5, \quad E = E_0 / 30 & 5\epsilon_p \leq \epsilon \end{aligned} \right\} \quad \text{..(1)}$$

ここで, σ_p, ϵ_p は比例限の応力及びひずみの値, $a_1 \sim a_5$ は定数であり,それぞれの値を表-3に示す.なお,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関係を用いた.初期たわみ形状は板パネルのアスペクト比($a/0.5b=5.71$)

表-1 解析モデル名称, 鋼種, 板厚及び残留応力度の値

名 称	板パネル			補剛材		残留応力度値			
	鋼 種	板厚 mm	R	鋼 種	板厚 mm	σ_{Tf}/σ_Y	σ_{Tc}/σ_Y	$\sigma_{Tf,r}/\sigma_Y$	$\sigma_{Tc,r}/\sigma_Y$
CSM40MS	SS400	5.8	0.63	SS400	8.9	1.0	0.20	1.0	0.20
CSUN2US	SUS304N2	6.0	0.71	SUS304N2	9.1	1.0	0.19	1.0	0.17
CSM49US	SUS304N2	6.1	0.70	SM490Y	8.6	1.0	0.19	1.0	0.20

$$\text{幅厚比パラメータ: } R = \frac{(b/2)}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}, \quad k=4.0$$

補剛板, ステンレス鋼, 局部座屈, 弾塑性有限変位解析

〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 TEL 098-895-8664 FAX 098-895-8677

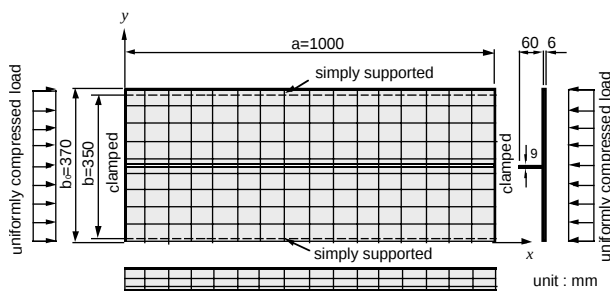


図-1 解析モデル

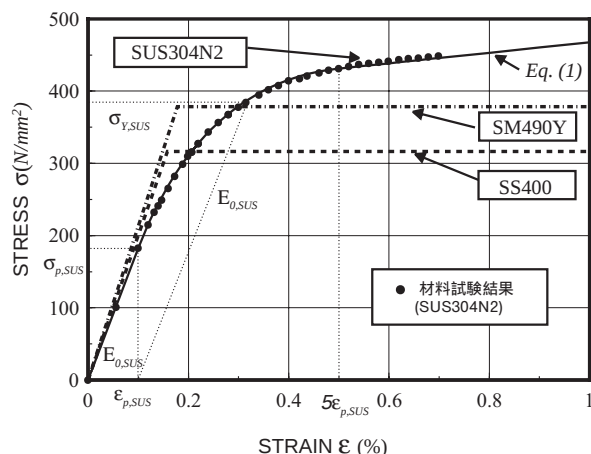


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

表-2 材料特性値

鋼 種	板厚 mm	降伏応力度* σ_Y N/mm²	引張強さ σ_u N/mm²	降伏比 %	ポアソン比 ν	初期ヤング係数 E_0 N/mm²
SUS304N2	6	389	778	0.50	0.3	183000
	9	399	771	0.52	0.3	183000
SM490Y	9	378	531	0.71	0.3	212000
SS400	6	316	456	0.69	0.3	200000
	9	303	448	0.68	0.3	200000

注) ステンレス鋼の降伏応力度は0.1%耐力を使用, 板厚及びポアソン比は公称値

を勘案し、次式のように仮定した。

$$w_0 = \delta_{0,\max} \sin(\pi x / a) \sin(\pi y / b) + w_{0,\max} \sin(6\pi x / a) \sin(2\pi y / b) \dots (2)$$

ここで、 $\delta_{0,\max}$ 、 $w_{0,\max}$ は補剛板部材全体の変形モード及び板パネルの局部変形モードの最大初期たわみ量であり、本解析では全体及び板パネル変形モードの最大初期たわみ量の和が実験の実測値と一致するようにした。なお、解析では、最大初期たわみ量の値は各モデルの実験供試体の平均値を用いた。残留応力度は、実測結果に基づいて、板パネルには図-3(a)に、補剛材には図-3(b)に示す残留応力度分布を導入し、最大残留応力度の値は表-1に示す値を用いた。なお、要素分割は板パネルを12x16分割、補剛材を3x16分割とした。

3. 解析結果及び考察 解析で得られた荷重-平均ひずみの関係を板パネルと補剛材に普通鋼SS400材を用いたCSM40MSモデルについて図-4に、板パネルと補剛材にステンレス鋼SUS304N2材を用いたCSUN2USモデルについて図-5に、及び板パネルにSUS304N2材を補剛材にSM490Y材を用いた複合補剛板CSM49USモデルについて図-6にそれぞれ示す。図中縦軸は載荷辺に作用している軸圧縮力を降伏軸力で無次元化し、横軸は軸方向の相対変位を部材長 a で除した平均ひずみを示している。なお、図には実験で得られた結果も併示してある。これらの図から明らかなように、本解析結果は、実験で得られた荷重-変位挙動を比較的良く把握していると考えられる。なお、CSUN2USモデルにおいて解析結果と実験結果に多少差が見られるが、これは、実験において載荷辺に回転が生じ、測定箇所の軸変位に誤差が生じたことに起因していると考えられる。次に、解析結果と実験結果の無次元最大荷重の比較を表-4に示す。表から明らかなように、本解析結果は無次元最大荷重について実験結果と実用上十分な精度で一致している。一方、板パネルにステンレス鋼を補剛材に普通鋼を用いた複合補剛板CSM49USモデルと板パネルと補剛材にステンレス鋼を用いたCSUN2USモデルの耐力は、板パネルと補剛材に普通鋼を用いたCSM40MSモデルのそれを上回っており、コスト削減のため補剛材にステンレス鋼材と同等の材料強度を有する普通鋼材を用いた複合補剛板についても、実用上十分な強度を有していると考えられる。

4. あとがき 本研究では、耐候性に優れたステンレス鋼材を用いた補剛板の極限強度解析法を示し、実験結果との比較により本解析法は十分な精度が得られることを示した。また、板パネルにステンレス鋼を補剛材にステンレス鋼と同等の降伏応力度を有する普通鋼を用いた複合補剛板の無次元耐力は、普通鋼材を用いた補剛板のそれを上回っており、本研究で用いた構造諸元では実用上十分な強度を有していることを示した。今後の課題として、ステンレス鋼補剛板の構造諸元を種々変化させてパラメトリック解析を行い、耐力特性を解明する必要がある。

表-4 最大荷重の比較

名 称	P_y kN	最大荷重 P_u/P_y		(2)/(1)
		解析結果 (1)	実験結果 (平均) (2)	
CSM40MS	841	0.940	0.942	1.00
CSUN2US	1079	1.087	1.031	0.95
CSM49US	1069	0.997	1.027	1.03

参考文献 1) 松下, 岩田, 矢吹, 有住: ステンレス鋼板を炭素鋼で補剛したハイブリッド材の軸圧縮耐力実験, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 2002(投稿中)。2) 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。3) 中村 他: ステンレス鋼H形断面部材の横座屈耐力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39B, 1993。

表-3 σ_p , ε_p , $a_1 \sim a_5$ の値

鋼 種	板厚 mm	σ_p N/mm ²	ε_p (%)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
SUS304N2	6, 9	183	0.1	-0.23	2.04	-0.85	-2.25	2.19

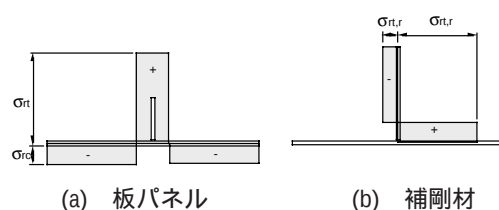


図-3 残留応力度分布

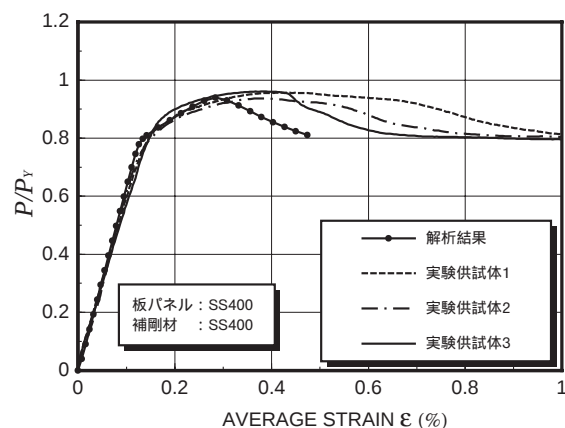


図-4 荷重-平均ひずみ曲線 (CSM40MS モデル)

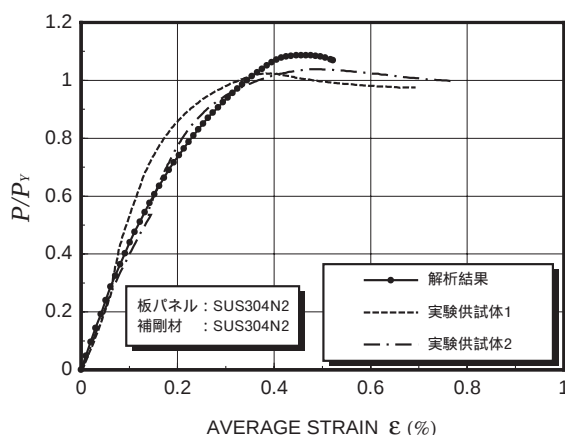


図-5 荷重-平均ひずみ曲線 (CSUN2US モデル)

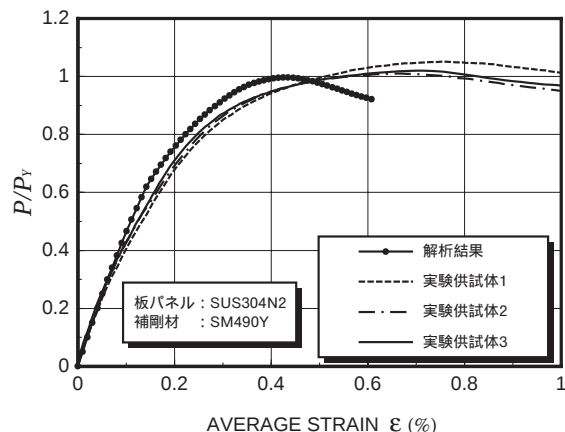


図-6 荷重-平均ひずみ曲線 (CSM49US モデル)