

琉球大学 正員 有住 康則
 琉球大学 正員 矢吹 哲哉

1. まえがき 初期たわみ及び残留応力を有する鋼薄板で構成された鋼桁等の構造部材の終局挙動を、構成鋼板の局部座屈の影響を考慮して厳密に解析で求めることは非常に困難なことである。有限要素解析においてそれらの影響を厳密に評価するためには、構成鋼板を面内及び面外変形を考慮できるシェル要素等でモデル化し、種々の初期不整を考慮して弾塑性有限変位解析を行う必要があり、その場合未知数が増大し、膨大な計算時間を必要とする。そこで、鋼薄板構成部材の終局挙動を構成鋼板の局部座屈の影響を考慮して求める方策として、種々の近似解法が提案されている。近似解法としては、有効幅理論に基づく方法¹⁾の他に、純圧縮力が作用する構成鋼板要素の平均応力-平均ひずみ曲線を弾塑性有限変位解析であらかじめ求め、それを構成鋼板の応力-ひずみ曲線と見なし、これを用いて極限強度解析を行うことにより構成鋼板の局部座屈の影響を評価する方法^{2) 3)}がある。しかし、従来の近似解法では、応力勾配を有する構成鋼板(鋼桁腹板等)の取扱いが明確でなく、また、曲率を有する構成鋼曲板の構成式が与えられていない。そこで本研究では、初期たわみ及び残留応力を有する構成鋼板の弾塑性有限変位解析を行い、その解析結果に基づいて構成鋼板の局部座屈を考慮した構成式(修正応力-ひずみ関係)を提案し、応力勾配及び曲率の影響について考察を行う。

2. 解析法及び解析モデル 本研究では、初期たわみ及び残留応力を有する構成鋼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解析を行った。解析では、更新ラグランジ法による増分理論に基づいて定式化を行い、材料は等方等質性の完全弾塑性体とし、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。なお、数値解析では変位増分法を用い、Newton-Raphson法に基づく繰り返し計算を行い、解が十分に収束していることを確認した。

本研究で用いた解析モデルを図-1に示す。解析は構成鋼板の断面内に純圧縮力($\phi=0$)、純曲げ($\phi=2$)及び曲げと圧縮力($\phi=1$)が作用する場合の3つのケースについて行った。境界条件は面外変形に対して周辺単純支持とし、非載荷辺の面内変位は自由とした。初期たわみは正弦1次波形とし、最大初期たわみの値は道路橋示方書に規定されている製作誤差の許容値($b/150$)を用い、残留応力は載荷方向及び厚さ方向に一定値を持つ矩形分布として自己平衡となるよう導入した。なお、 $\phi=1, 2$ の場合は、残留応力が無い方が強度が小さかったため、残留応力は導入しなかった。一方、曲率は $a/r=0.0\sim 0.05$ の範囲で変化させ解析を行った。

本解析法の妥当性を検討するため、他で行われた解析結果と本解析結果との比較を行った。図-2に周辺単純支持正方形板に一軸方向面内圧縮力が作用した場合の平均応力-平均ひずみ曲線を示す。図中実線は本解析結果を、破線はLittle⁴⁾の解析結果を示す。図から明かなように、本解析結果はLittleの解析結果と良く一致しており、本解析法は十分信頼できるものと判断される。

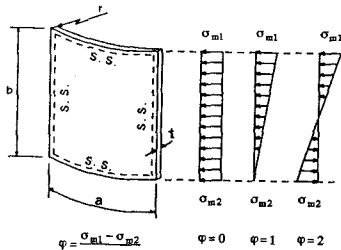


図-1 解析モデル

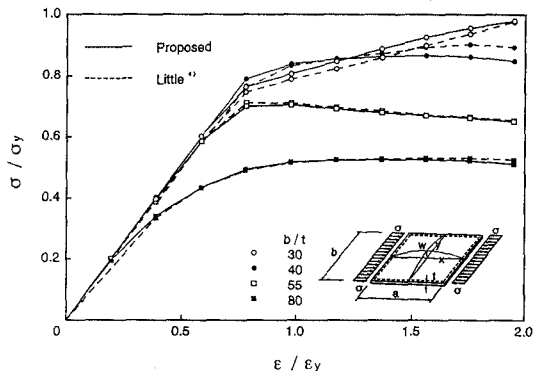


図-2 平均応力-平均ひずみ曲線

3. 局部座屈の影響を考慮した構成鋼板の構成式 本研究では局部座屈の影響を考慮した構成鋼板の修正応力-ひずみ曲線を、図-3に示すように局部座屈発生後は完全無剛性型とし、簡潔にbilinearで仮定する。すなわち、

- (a) $\varepsilon < 0$ (圧縮ひずみ領域において)
 - $\varepsilon_b \geq -\varepsilon_y$ の場合 $\varepsilon \geq \varepsilon_b$; $E_t = E$, $\varepsilon < \varepsilon_b$; $E_t = 0$.. (1)
 - $\varepsilon_b < -\varepsilon_y$ の場合 $\varepsilon \geq -\varepsilon_y$; $E_t = E$, $\varepsilon < -\varepsilon_y$; $E_t = 0$.. (2)
- (b) $\varepsilon \geq 0$ (引張りひずみ領域において)
 - $\varepsilon \leq \varepsilon_y$; $E_t = E$, $\varepsilon > \varepsilon_y$; $E_t = 0$ (3)

なお、 ε_b の値は解析において最大圧縮ひずみが降伏ひずみの3倍の領域まで計算を行い、それより得られた応力-ひずみ曲線を用いてひずみエネルギーが等価になるように定めた。

解析結果の一例として純圧縮力が作用する平板の幅厚比を変化させた場合の応力とひずみの関係を図-4に示す。図中にはここで提案した修正応力-ひずみ曲線も併示してある。次に、弾塑性有限変位解析結果に基づいて定義された $\varepsilon'_b = \varepsilon_b / \varepsilon_y$ の値をそれぞれのケースについて表-1に示す。表から明らかかなように曲率が增大すると $|\varepsilon'_b|$ の値も強度の低下と共に小さくなっている。 ε'_b と幅厚比 (b/t) の関係を、表-1に示した結果に基づいて最小二乗法を用いて一次式で近似を行うことにより精度良い結果が得られた。近似式を次式に示す。
 $\varepsilon'_b = \varepsilon_b / \varepsilon_y = c_1 + c_2(b/t)$ (4)

それぞれの応力勾配における近似式の係数 c_1, c_2 を表-2に示す。式(4)を用いることによって、任意の幅厚比に対する ε'_b の値を計算することができる。

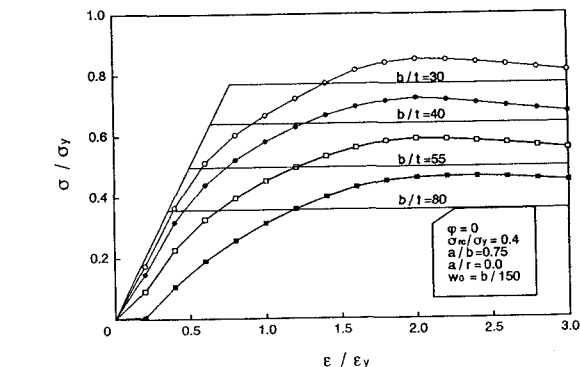


図-4 応力-ひずみ曲線

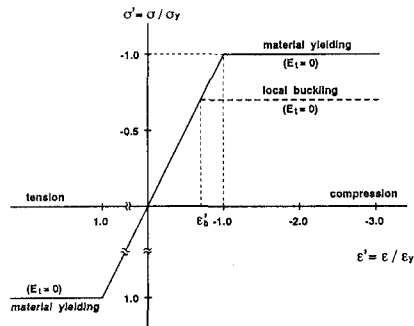


図-3 修正応力-ひずみ曲線

表-1 $\varepsilon'_b = \varepsilon_b / \varepsilon_y$ の値

(a) $\varphi = 0$				
	b/t = 30	b/t = 40	b/t = 55	b/t = 80
a/r = 0.000	-0.770	-0.640	-0.498	-0.358
a/r = 0.010	-0.746	-0.617	-0.478	-0.343
a/r = 0.025	-0.711	-0.583	-0.449	-0.324
a/r = 0.050	-0.657	-0.532	-0.406	-0.289
(b) $\varphi = 1$				
	b/t = 40	b/t = 55	b/t = 80	b/t = 110
a/r = 0.000	-1.158	-0.953	-0.738	-0.579
a/r = 0.010	-1.103	-0.918	-0.711	-0.557
a/r = 0.025	-1.044	-0.872	-0.672	-0.526
a/r = 0.050	-0.969	-0.805	-0.616	-0.482
(c) $\varphi = 2$				
	b/t = 60	b/t = 90	b/t = 120	b/t = 160
a/r = 0.000	-1.271	-1.059	-0.884	-0.739
a/r = 0.010	-1.241	-1.025	-0.856	-0.717
a/r = 0.025	-1.196	-0.977	-0.817	-0.686
a/r = 0.050	-1.122	-0.905	-0.758	-0.638

表-2 近似式の係数

		a/b = 0.000	a/b = 0.010	a/b = 0.025	a/b = 0.050
$\varphi = 0$	c_1	-0.97840	-0.94841	-0.90214	-0.83639
	c_2	0.00804	0.00785	0.00752	0.00713
$\varphi = 1$	c_1	-1.43280	-1.36780	-1.29750	-1.20570
	c_2	0.00808	0.00766	0.00728	0.00685
$\varphi = 2$	c_1	-1.55880	-1.52020	-1.46250	-1.36940
	c_2	0.00531	0.00521	0.00506	0.00478

c_1, c_2 ; coefficient defined as $\varepsilon_b / \varepsilon_y = c_1 + c_2(b/t)$

参考文献

- 1) Usami, T.: Post-Buckling of Plates in Compression and Bending, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. ST3, 1987.
- 2) Little, G.H.: The Strength of Square Steel Box Columns - Design Curves and their Theoretical Basis, The Structural Engineer, Vol. 57A, No. 2, 1979.
- 3) Chan, S.L. et al.: Elasto-Plastic Analysis of Box-Beam-Columns Including Local Buckling Effects, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol. 117, No. 7, 1991.
- 4) Little, G.H.: Rapid Analysis of Plate Collapse by Live-Energy Minimisation, Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, 1977.