

I-63

純せん断応力を受ける鋼板の極限強度曲線について

大 阪 市 正 員 出 口 恭 司
岐阜大学工学部 正 員 奈 良 敬
大阪大学工学部 正 員 福 本 晴 士

1. まえがき 一般にせん断応力が作用する薄板については斜め張力場の発生により後座屈強度が期待できると考えられており、極限強度特性に関する研究は主として張力場理論により塑性解析の立場から実施されてきた。道路橋示方書では、純せん断応力を受ける板の座屈照査は弾性座屈理論に基づいている。本研究は、面内組合せ応力を受ける鋼板の極限強度評価法の確立を目標とした調査研究の一環として、初期たわみと残留応力を同時に考慮できる弾塑性有限変位理論に基づき、有限要素法を適用して、純せん断応力を受ける鋼板の極限強度を算出し、その特性について考察を行ってきた¹⁾。今回は、それらの結果をとりまとめ極限強度曲線について報告する。

2. 解析法 Hybrid displacement model に基づく有限要素法²⁾により定式化した弾塑性有限変位解析法を拡張している³⁾。本解析法は von Mises の降伏条件ならびに Prandtl-Reuss の塑性流れ則に従う完全弾塑性材料を対象とする。

3. 解析モデル せん断変形の導入に際し図 図-1 載荷棒と自由度

-1に示すように解析モデルの板要素周辺に曲げ剛性無限大の載荷棒を取り付け、境界条件、板要素境界上の変位を工夫して純せん断応力状態を得た⁴⁾。板の断面寸法に関するパラメータとしては、表-1に示すように①縦横比 $\alpha (=a/b)$ ②幅厚比 b/t があげられる。①に対しては残留応力の有無にかかわらず解析の対象として $\alpha \geq 1.0$ として良いことが認められるので¹⁾、これに従った。②に対しては鋼種による影響も考慮できるように座屈係数に4.0を用いた式(1)に示す幅厚比パラメータ R_c を考える。また①の関数形で与えられる純せん断応力状態に対する座屈係数 k_τ を用いた式(2)に示す幅厚比パラメータ R_τ を併せて考える。残留応力は文献⁵⁾に従った。初期不整については表-2に示す通りである。最大初期たわみ量は道路橋示方書の許容値 $b/150$ を採用し、初期たわみ波形については式(3)に示す $W_{0,22}$ で与えた⁴⁾。要素分割と精度について調べた結果、要素分割は 8×8 とした。

4. 計算結果と考察 表-1に示すように縦横比 α と幅厚比パラメータ R_c の値を変化させて極限強度を算定した。

a. たわみ波形 図-2にはたわみ波形を式(4)に示す $W_{11} \sim W_{44}$ の16波形に分解した結果得られた主な3波形と平均せん断応力 τ との関係を示す。いずれも初期たわみ波形に相似な波形 W_{22} と W_{11} が卓越しており、お互いに逆方向の値を採り大きく成長して破壊に至る挙動が特に顕著である。図-3には極限状態でのたわみ波形を板厚で無次元化して示す。ここで W_{11} と W_{22} の両たわみ波形の重ね合わせが斜め張力場の形成に大きく関与しているものと思われる。

b. 極限強度曲線 横軸に α をとったものを図-4、 R_c をとったものを図-5、 R_τ をとったものを図-6に示す。(1) 縦横比の影響 図-4より、いずれの値の R_c に対しても $\alpha = 1.2$ 付近で極限強度は最低となるが、その低下量は約2~3%であり、断面寸法に関するパラメータで極限強度に

表-1 パラメータとその値	
①縦横比: $\alpha (=a/b)$; 1.0, 1.2, 1.3, 1.5	
②幅厚比: b/t ,	
幅厚比パラメータ: $R_c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y/12(1-\nu^2)}{E \pi^2 k_c}}$ (1)	
	; 0.9, 1.8, 2.6, 3.5
幅厚比パラメータ: $R_\tau = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_y/12(1-\nu^2)}{E \pi^2 k_\tau}}$ (2)	
但し $k_c = 4.0$, $k_\tau = \begin{cases} 5.34 + 4.0/\alpha^2 & (\alpha \geq 1) \\ 4.0 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1) \end{cases}$	
$\sigma_y = 2400 \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \tau_y = \sigma_y/\sqrt{3}$,	
$\nu = 0.3$, $E = 2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	

表-2 初期不整

①残留応力:	
引張残留応力度: $\sigma_{11}/\sigma_y = 1.0$	
圧縮残留応力度: $\sigma_{22}/\sigma_y = -0.3$	
②初期たわみ:	
$W_{0,11}(x, y) = W_{0,22} \dots$	
$\sin(1\pi x/a) \sin(j\pi y/b)$ (3)	
$W_{0,22} = b/150$	

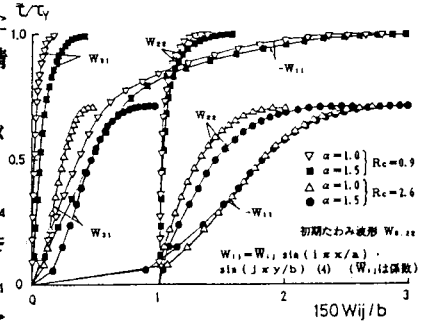


図-2 平均せん断応力—一般化変位曲線

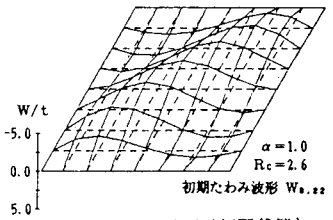


図-3 たわみ波形(極限状態)

支配的なものは R_c であることが認められる。(2) 幅厚比の影響 R_c を用 τ_{max}/τ_y

いて計算結果をプロットした図-5には α に応じて弾性座屈曲線も併せて描いた。極限強度は、いずれの計算結果においても R_c の小さい領域では弾性座屈曲線より低い値となる一方、 R_c の大きい領域では高い値となる。この領域では後座屈強度が期待できる様子で R_c の増加に伴い後座屈強度が上昇する傾向がわかる。計算結果と弾性座屈曲線の交点については、 $\alpha = 1.0$ の場合、 $R_c = 2.4$ 、 $\alpha = 1.2, 1.3, 1.5$ で $R_c = 2.2, 2.1, 2.0$ の値をとる。また極限強度の α の

値による相違は、上述の様に約2~3%であり、 $\alpha = 1.2, 1.3$ の曲線が低い値を示した。パラメータ α を考慮出来る R_c を用いて計算結果をプロットした図-6では、弾性座屈曲線は1本で表現出来る。 $\alpha = 1.5$ の計算結果を除いて図-5に見られる α の値による極限強度の相違は顕著でなく、計算結果と弾性座屈曲線の交点についてはいずれの場合も $R_c = 1.15$ となった。また極限強度は一本の曲線で表現できるようである。ここで最小自乗法により図中の実線で示す式(5)を得た。(3) 残留応力の影響

極限強度に与える残留応力の影響は無視し得る程小さいことが認められるが¹⁾、幅厚比の小さな鋼板では残留応力の存在により極限強度が上昇する様子が図-6より認められる。

5. 現行示方書との比較

図-6には α に応じてBS5400⁶⁾およびDAST Ri-012⁷⁾の基準耐力曲線を一点鎖線、二点鎖線で示した。計算結果に基づく極限強度曲線は両示方書の基準耐力曲線とはかなり異なった様子であり、交点については、DASTに対しては $R_c = 1.05$ 、BS5400に対しては α に応じて個々に求めると、 $\alpha = 1.0, 1.2, 1.3, 1.5$ で $R_c = 1.35, 1.30, 1.30, 1.20$ となった。また計算結果に基づく両示方書とも交点より $R_c = 0.45$ までは危険側、交点より大きい値の R_c では安全側の耐力評価となった。図-7は計算結果に基づき示方書の基準耐力曲線の安全性について考察したものである。DASTの場合、主荷重に対する所要安全率は $\text{erf} \nu_s(\tau) = 1.32$ 、BS5400の場合、極限状態に対する所要抵抗係数は $\gamma_m \gamma_{rs} = 1.32$ であり、また弾性座屈曲線に対しては所要安全率は $\nu = 1.7$ とした。これらに対していずれも R_c が0.7~1.0で実安全率 ν^* は最低値をとり、DASTで1.20、BS5400で1.15($\alpha = 1.0$)、弾性座屈曲線で1.37となった。

参考文献

- 1) 奈良・出口・福本：昭和62年度関西支部年次学術講演会，I-21，1987年4月。
- 2) F. Kikuchi and Y. Ando, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.31, No.1, 1973.
- 3) 小松・奈良・山口：昭和58年度関西支部年次学術講演会，I-32，1983年5月。
- 4) 奈良・小松：土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，I-88，1983年9月。
- 5) 小松・牛尾・北田：土木学会論文報告集，第265号，1977年。
- 6) BS5400：Part3，BSI，1982。
- 7) Deutscher Ausschuss für Stahlbau Richtlinien：DAST Ri-012，1978。

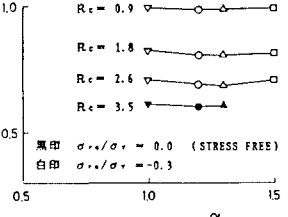


図-4 極限強度曲線(α)

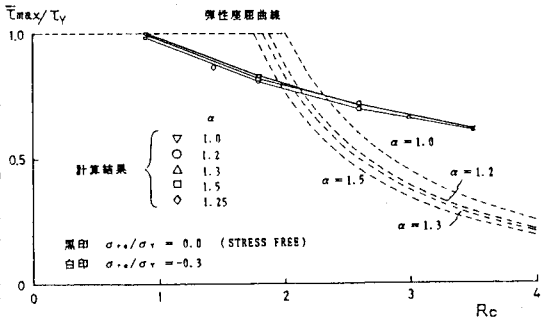


図-5 極限強度曲線(R_c)

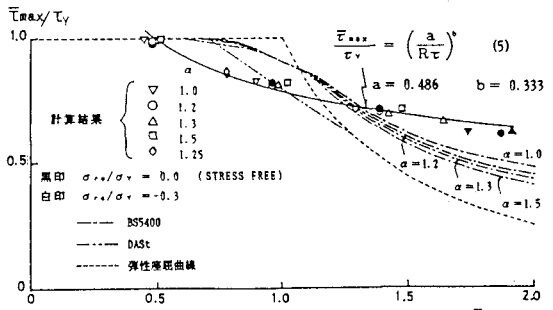


図-6 極限強度曲線(R_c)と基準耐力曲線

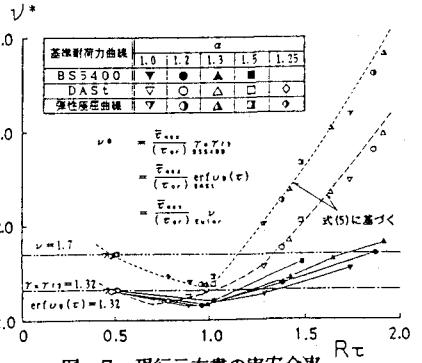


図-7 現行示方書の実安全率