

琉球大学 正員 有住 康則
 琉球大学 正員 矢吹 哲哉
 (株)横河ブリッジ 正員 八代 茂

1. まえがき 近年、曲線桁橋やアーチ橋等の様な薄肉曲線部材を用いた橋梁が多く用いられ実際に架設されている。薄肉構造部材を構成する鋼板の強度については、平板については多くの実験的及び解析的研究が行われ、極限強度算定式も提案されている¹⁾。しかしながら、曲線部材を構成する円筒パネル等の極限強度に関する研究は少なく、極限強度把握のための十分な基礎的資料は整っていないのが現状である。そこで本研究では、初期たわみと残留応力を有する円筒パネルに面内圧縮力と曲げが作用した場合の極限強度特性を解明するため、円筒パネル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。先ず初めに円筒パネルの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い、極限強度特性について検討し、次にパラメトリック解析結果に基づいて面内圧縮力及び曲げを受ける円筒パネルの極限強度評価法に関する実用算定式の提案を行った。

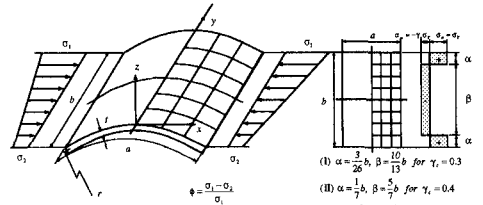
2. 解析法及び解析モデル 本研究では、初期たわみ及び残留応力を有する円筒パネルをアイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位解析を行った。解析では、更新ラグランジ法による増分理論に基づいて定式化を行い、材料は等方等質性の完全弾塑性体とし、Von Misesの降伏条件及びPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従うものとした。なお、数値解析では変位増分法を用い、Newton-Raphson法に基づく繰返し計算を行い、解が十分に収束していることを確認した²⁾。解析に用いたモデルは、図-1に示す曲線構造部材の構成要素である一定曲率を有する円筒パネル要素であり、境界条件は面外変形に対して4辺単純支持とし、面内変形に対しては載荷辺で単純支持、非載荷辺で自由とした。初期たわみは正弦1次波形とし、残留応力度は図-1(b)に示すように載荷方向及び厚さ方向に一定値を持つ矩形分布として導入した。解析に用いたパラメーター及びそれらの変動範囲を表-1に示す。

3. 終局強度特性 パラメトリック解析結果の一例を表-2に示す。同表には最大初期たわみ $w_0 = b/150$ 及び曲率パラメーター $a/r = 0.025$ を有する円筒パネルの残留応力度の大きさを種々変化させた場合の極限強度の値を示している。表-2から明らかなように、純圧縮を受ける残留応力を有する円筒パネルの極限強度は残留応力が無い場合と比較して低下しているが、圧縮残留応力度の大きさの違いによる差はさほど見られない。一方、 $\phi = 1, 2$ の場合は残留応力が極限強度に及ぼす影響は小さい。次に、圧縮残留応力度 $\sigma_{rc} / \sigma_Y = -0.4$ 及び最大初期たわみ $w_0 = b/150$ を有する円筒パネルについて、曲率パラメーターを種々変化させた場合の極限強度と幅厚比パラメーター R の関係を、 $\phi = 1$ について図-2に示す。なお、幅厚比パラメーター R は次のように定義される。

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{K}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \frac{b}{t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K は座屈係数である。図-2から明らかなように、曲率パラメーターが増大するに従い極限強度が低下している。なお、その傾向は $\phi = 0, 2$ の場合も同じであった。

4. 極限強度実用算定式の提案 ここではパラメトリック解析結果に基づいて種々の縁応力を受ける円筒パネルの極限強度の実用算定式



(a) 解析モデル及び載荷方法

(b) 残留応力分布の仮定

図-1 円筒パネルモデル

表-1 解析パラメーター及びその変動範囲

Item (1)	Symbol (2)	Range of values (3)
Aspect ratio	a/b	0.5, 0.75, 1.00, 1.25
Width-to-thickness ratio	b/t	$\phi = 0$; 30, 40, 55, 80 $\phi = 1$; 40, 55, 80, 110 $\phi = 2$; 60, 90, 120, 160
Initial imperfection	w_0	0.0, b/150
Yield stress parameter	E / σ_Y	875, 656
Residual compressive stress	σ_{rc} / σ_Y	0.0, 0.3, 0.4, 0.5
Shell curvature angle	a/r	0.0, 0.01, 0.025, 0.05
Stress inclination	ϕ	0, 1, 2

表-2 極限強度に及ぼす残留応力の影響

ϕ	σ_{rc} / σ_Y			
	0	-0.3	-0.4	-0.5
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0	0.619	0.570	0.562	0.553
1	0.705	0.703	0.691	0.693
2	0.891	0.906	0.908	0.914

b/t = 55 for $\phi = 0$; b/t = 80 for $\phi = 1$; b/t = 120 for $\phi = 2$;
 a/b = 0.5, $w_0 = b/150$, a/r = 0.025

の提案を行う。まず初めに純圧縮を受ける円筒パネルについて、解析で得られた極限強度と幅厚比パラメータの関係を図にプロットし、最小二乗法を用いて近似曲線を求めた。極限強度と幅厚比パラメータの関係の一例を図-3に示す。解析結果を種々の関数を用いて近似した結果、次式に示すようにべき乗近似がより精度良い一致が得られたので、本研究ではこれを近似曲線として採用した。なお、 $0.2 \leq R \leq 0.6$ の範囲は一次関数で近似した。

$$\frac{\sigma_{\max, \text{ref}}}{\sigma_Y} = \left(\frac{R_{cr,c}}{R} \right)^{0.592} ; R \geq 0.6 \quad \dots\dots(2.a)$$

$$\frac{\sigma_{\max, \text{ref}}}{\sigma_Y} = 2.5(\bar{\sigma}_{0.6} - 1)R - 0.5\bar{\sigma}_{0.6} + 1.5 ; 0.2 \leq R \leq 0.6 \quad \dots\dots(2.b)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{0.6} = (R_{cr,c} / 0.6)^{0.592}$ 、また、 $R_{cr,c}$ は純圧縮を受ける円筒パネルの限界幅厚比パラメータであり、直板の場合はcurve fittingの結果 $R_{cr,c} = 0.395$ なる結果を得た。次に、曲率の影響は、図-4に示す近似曲線より得られた限界幅厚比パラメータ $R_{cr,c}$ と曲率パラメータ a/r の関係を次式に示すように一次関数で補間することによって考慮することにした。

$$R_{cr,c} = 0.395 - 1.08a/r \quad \dots\dots(3)$$

一方、応力勾配の強度に及ぼす影響は、鋼構造設計指針と同様の手法を用いて、応力勾配の有る場合の円筒パネルの幅厚比を応力勾配が $\phi=0$ の場合と比較して $f_0 = (R_{cr} / R_{cr,c})\sqrt{K/K_c}$ 倍できるものと見なして考慮することにした。曲率パラメータを変化させた場合の補正係数 f_0 と応力勾配 ϕ の関係を図-5に示す。図-5に示した結果に最小二乗法を適用すると、補正係数 f_0 は次式に示すように二次放物線で補間することができる。

$$f_0 = 1 + 0.514\phi + 0.719\phi^2 \quad \dots\dots(4)$$

以上の結果を整理して、残留応力と初期たわみを有する円筒パネルに種々の緑応力が作用した場合の極限強度算定式として次式を提案する。

$$\frac{\sigma_{\max, \text{ref}}}{\sigma_Y} = \left(\frac{R_{cr}}{R} \right)^{0.592} ;$$

$$R_{cr} = f_0 \cdot R_{cr,c} \cdot \frac{2}{\sqrt{K}} ; R_{cr,c} = 0.395 - 1.08a/r ; f_0 = 1 + 0.514\phi + 0.719\phi^2 \quad \dots\dots(5.a, b, c, d)$$

なお、純圧縮が作用する場合で、 $0.2 \leq R \leq 0.6$ ならば：

$$\frac{\sigma_{\max, \text{ref}}}{\sigma_Y} = 2.5(\bar{\sigma}_{0.6} - 1)R - 0.5\bar{\sigma}_{0.6} + 1.5 ; \bar{\sigma}_{0.6} = (R_{cr,c} / 0.6)^{0.592} \quad \dots\dots(6.a, b)$$

ここで提案した円筒パネルの極限強度算定式と本弾塑性有限変位解析結果との比較を図-6に示す。なお、図-6では応力勾配を有する場合の幅厚比パラメータを補正係数 f_0 を用いて純圧縮を受ける円筒パネルに換算して示してある。図-6から明らかなように、本提案式と解析結果とは実用上十分の精度で一致している。

5.あとがき 本研究では残留応力及び初期たわみを有する円筒パネルについて弾塑性有限変位解析を行い、その解析結果に基づいて種々の緑応力が作用した場合の極限強度実用算定式を提案した。

参考文献：1) 小松，北田，宮崎：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析，土木学会論文報告集，No.244, 1975.

2) 有住，矢吹：鋼桁構成板強度の構成式評価に関する一考察，土木学会年次学術講演概要集，1992.

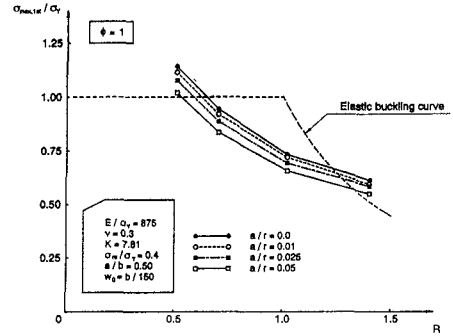


図-2 極限強度と幅厚比パラメータの関係（曲率の影響）

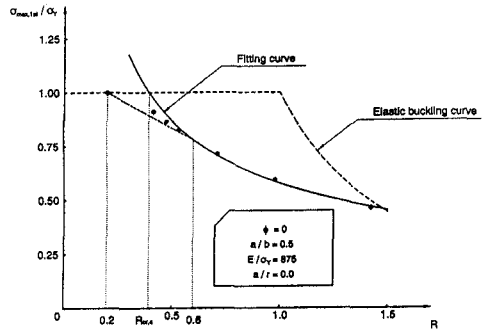


図-3 極限強度-幅厚比パラメータ近似曲線

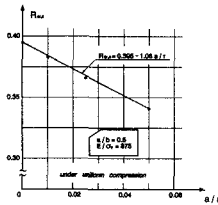


図-4 $R_{cr,c}$ - a/r の関係

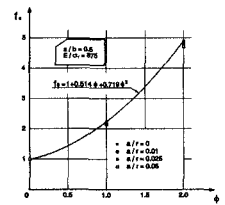


図-5 f_0 - ϕ の関係

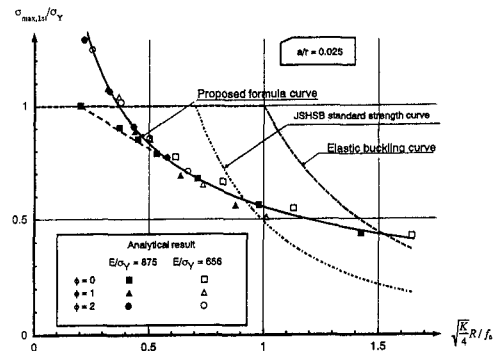


図-6 実用算定式の結果と解析結果の比較