

I-80

LYR鋼円筒シェルパネルの強度評価

新構造技術（株） 正員 宮城 聡
 琉球大学 正員 矢吹 哲哉
 琉球大学 正員 有住 康則

1. まえがき 近年、我国で高機能鋼の一つとして降伏後の塑性棚を有し、ひずみ硬化による強度の向上が期待できる低降伏比高張力鋼（LYR鋼）が開発され実用化への検討が望まれている。しかし、LYR鋼を用いた構造部材の終局強度特性に関しては、直線梁及び直板要素について二、三の研究例^{1) 2)}が見られるだけで、円筒シェルパネル要素に関する研究はほとんどなく本分野についてはまだ解明されていないのが現状である。そこで、本研究ではLYR鋼を用いた円筒シェルパネル要素の終局強度特性を明らかにするため、初期たわみ、残留応力度及びひずみ硬化を有する円筒シェルパネル要素に面内曲げと圧縮力が作用した場合の弾塑性有限変位解析を行い、その解析結果を用いて、実用に便ならしめるための終局強度簡易算定式の提案を行った。

2. 解析方法 解析では初期たわみ、残留応力度及びひずみ硬化の影響を同時に考慮して、図-1に示すような円筒シェルパネル要素の終局強度を解明するため、円筒シェルパネル要素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。アイソパラメトリックシェル要素では、厚板も対象とすることから、板厚面でせん断ひずみも考慮した。ただし、中央面法線方向の直ひずみ ϵ_z は無視した。幾何学的非線形挙動はUpdated Lagrangian法による増分理論を用いて評価した。材料非線形挙動はVon-Misesの降伏条件及びPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従い、解析対象の材料は等方等質材料で、ひずみ硬化則及び線形除荷則に従うものとした。

3. LYR鋼円筒シェルパネル要素の終局強度特性 本解析では純圧縮（ $\phi=0$ ）、純曲げ（ $\phi=2$ ）及び曲げと圧縮（ $\phi=1$ ）の3つの載荷ケースについて、LYR鋼の他に、比較の為SS41鋼及びHT80鋼の3鋼種円筒シェルパネル要素についてパラメトリック解析を行った。解析に用いたパラメーターは、降伏応力度 σ_y 、曲率パラメーター a/r 、応力勾配 ϕ 、幅厚比パラメーター R 、圧縮残留応力度比 σ_{rc}/σ_y 及び引張残留応力度比 σ_{rt}/σ_y の6個で、それぞれの解析パラメーター及びその変動範囲を表-1に示す。境界条件は、面外変形に対して周辺単純支持とし、非載荷辺の面内境界条件は自由とした。初期たわみは正弦一次波形とし、残留応力度分布は載荷方向及び板厚方向に一定値を持つ矩形分布として導入した。なお、相当応力-相当ひずみ関係は、図-2に示すような単軸試験結果から提案されたモデルを用いた。

図-3に解析結果の一例として、曲率パラメーター $a/r=0.025$ の場合の終局強度と幅厚比パラメーターの関係を、純圧縮を受ける各鋼種の円筒シェルパネル要素について示す。なお、幅厚比パラメーター R は次のように定義される。

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

ここで、 K は座屈係数である。LYR鋼円筒シェルパネル要素では、幅厚比パラメーターが小さい程SS41鋼と比較して強度の上昇がみられる。これは、LYR鋼円筒シェルパネル要素では、降伏後のおどり場が短く、従って厚板になるほどひずみ硬化の影響が顕著に現れることによると考えられる。

次に曲率パラメーター a/r を0.0、0.01、0.025、0.05と変化させた場合の終局強度と幅厚比パラメーターの関係を、純圧縮を受けるLYR鋼円筒シェルパネル要素の場合について図-4に示す。図から明らかなように、曲率パラメーターが大きくなるにつれ終局強度が低下している。なお、純曲げ及び曲げと圧縮を受ける場合についても同様な傾向を示した。

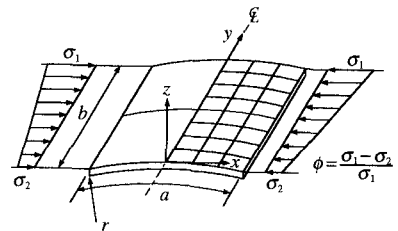


図-1 円筒シェルパネル要素の解析モデル

表-1 解析パラメーター及びその変動範囲

Parameter	Symbol	Range of values
Yield stress	σ_y	LYR
		SS41
		HT80
Shell curvature angle	a/r	0.0, 0.01, 0.025, 0.05
Stress inclination	ϕ	0, 1, 2
Modified panel slenderness	R	0.3, 0.4, 0.5, ..., 1.4, 1.5
Residual stress	σ_{rc}/σ_y	LYR 0.3
		SS41 0.4
		HT80 0.112
	σ_{rt}/σ_y	LYR 1.0
		SS41 1.0
		HT80 0.6
Aspect ratio	a/b	0.5
Initial imperfection	w_0	$b/150$

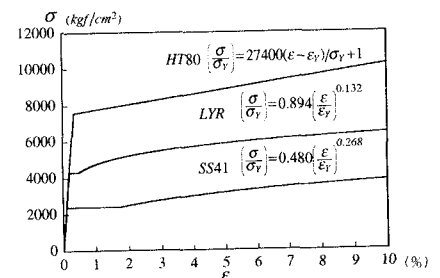


図-2 相当応力-相当ひずみ関係

4. 終局強度の簡易算定式の提案 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シェルパネルの終局強度簡易算定式の提案を行った。簡易算定式を誘導するにあたり、まず初めに純圧縮を受ける円筒シェルパネルについて、解析で得られた終局強度と幅厚比パラメーターの関係を最小二乗法を用いて近似曲線を求めた。解析結果を種々の関数を用いて近似した結果、べき乗近似でより精度の良い一致を得たので、本研究ではこれを近似曲線として採用した。次に、円筒シェルパネルの終局強度は曲率の増加に伴って低下するので、その影響は限界幅厚比パラメーターを曲率パラメーター a/r の関数で表すことにより考慮した。一方、応力勾配の強度に及ぼす影響は、応力勾配の有る場合の円筒シェル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。以上の考察より、ここで採用したパラメーターの範囲内で、残留応力度と初期たわみを有する円筒シェルパネルに種々の縁応力が作用した場合の終局強度簡易算定式として、次式を提案する。

$$\frac{\sigma_{\max,lt}}{\sigma_y} = \left(\frac{R_{cr}}{R} \right)^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $R_{cr} = f_0 R_{cr,c} \sqrt{\frac{4}{K}}$ $\dots\dots\dots (3)$

SS41鋼：

$$\left. \begin{aligned} n &= 0.6, \quad R_{cr,c} = 0.401 - 1.30(a/r) \\ f_0 &= 1 + 0.406\phi + 0.703\phi^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.a,b,c)$$

HT80鋼：

$$\left. \begin{aligned} n &= 0.6, \quad R_{cr,c} = 0.529 - 1.37(a/r) \\ f_0 &= 1 + 0.550\phi + 0.494\phi^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.a,b,c)$$

LYR鋼：

$$\left. \begin{aligned} n &= 0.67, \quad R_{cr,c} = 0.492 - 1.23(a/r) \\ f_0 &= 1 + 0.440\phi + 0.533\phi^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6.a,b,c)$$

$R_{cr,c}$ は純圧縮を受ける円筒シェルパネルの限界幅厚比パラメーターである。なお、終局強度簡易算定式の適用範囲は、 $\phi=0$ の場合は $0.6 \leq R \leq 1.5$ であり、 $\phi \neq 0$ の場合は $0.5 \leq R \leq 1.5$ とした。ここで提案した円筒シェルパネルの終局強度簡易算定式と解析結果との比較の一例を、曲率パラメーター $a/r=0.025$ のSS41鋼の場合について図-5に、及びLYR鋼の場合について図-6に、それぞれ示す。なお、応力勾配を有する場合の幅厚比パラメーターを、補正係数 f_0 を用いて純圧縮を受ける円筒シェルパネルに換算して示してある。これらの図からも明かなように、本簡易算定式は強度を適用範囲において精度良く評価していると言えよう。

5. あとがき 本研究では残留応力度及び初期たわみを有する円筒シェルパネルに種々の縁応力が作用した場合の材料のひずみ硬化を考慮した終局強度簡易算定式を提案した。今後は、突縁板等の強度評価を行う必要がある。

参考文献：1）下里哲弘・矢吹哲哉・有住康則：LYR鋼開断面の耐荷力特性について、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、平成5年9月

2）西村宣男：High Performance Steel in Structural Field, US-JAPAN Seminar, Osaka, 1991. 3）矢吹哲哉・有住康則・八代茂：Ultimate Strength and Its Practical Evaluation of Cylindrical Steel Shell Panels under Various Compressions, Proc. of JSCE, No.489, 1994.

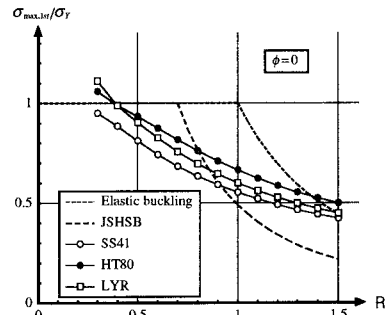


図-3 終局強度と幅厚比パラメーターの関係

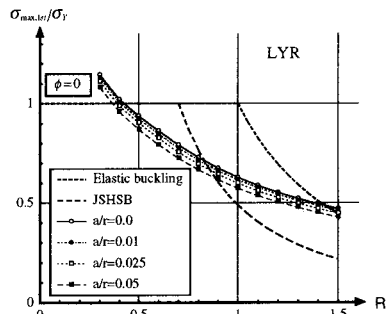


図-4 終局強度と幅厚比パラメーターの関係

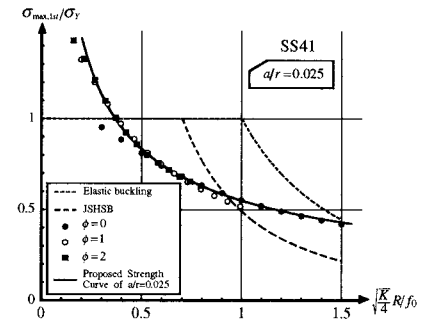


図-5 簡易算定式の結果と解析結果の比較

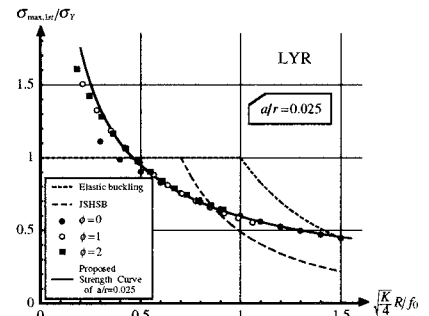


図-6 簡易算定式の結果と解析結果の比較