

I-11 軸圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度について

愛媛大学工学部 正 員 大賀 水田生
 株式会社コンサルツ 正 員 ○馬越 正 純

1. はじめに

本研究では、サンドイッチ断面を有する円筒シェル構造（円筒サンドイッチシェル構造）が軸圧縮力を受ける場合の初期不整によるばらつきを考慮した座屈強度すなわち座屈下限値を理論的に推察する方法をRS法に基づき開発するとともに、軸圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度について基本的な考察を行った。

2. 軸圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度算定式

本研究で誘導した軸圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造の線形およびRS座屈強度解析式は変分法に基づいている。まず、軸圧を受ける円筒サンドイッチシェルのトータルポテンシャルエネルギーの2次の項 Π_2 を示し、その Π_2 の変分式に円筒サンドイッチシェル構造の変位—ひずみおよび応力—ひずみ関係式を導入し、Total Potential Energyの停留条件を適用して得られる釣合方程式に、境界条件を満足する変位関数を代入することにより円筒サンドイッチシェル構造の軸圧に対する線形座屈強度 q_c が求められる。さらに座屈時のひずみエネルギー成分(面内 U_M 、曲げ U_B 、せん断 U_S)および外力によるひずみエネルギー成分(軸方向 V^x 、円周方向 V^s)において、初期不整の影響により容易に消失するであろう軸方向面内ひずみエネルギー成分 U_{M1} および外力による円周方向ひずみエネルギー成分 V^s を削除(Reduced)することによりRS座屈係数 k^* が求められる。

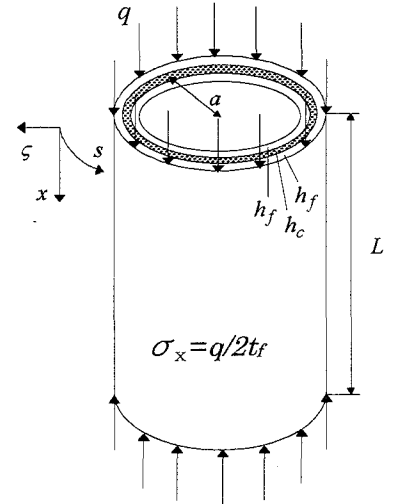


図-1 円筒サンドイッチ構造

$$k^* = \left(\frac{U_{M2} + U_{M3} + U_B + U_S}{U_M + U_B + U_S} \right) \left(\frac{\bar{V}_x + \bar{V}_s}{\bar{V}_x} \right) k, k = q_c / 2E_f h_f \quad (1)$$

3. 軸圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度の算定

円筒サンドイッチシェル構造が軸圧を受ける場合のひずみエネルギー成分をRS座屈強度の算定式(1)の4項(第1項： $U_M + U_B + U_S$ 、第2項： $U_{M2} + U_{M3} + U_B + U_S$ 、第3項： V^x 、第4項： $V^x + V^s$)にまとめたものを図-2に示している。なお、ここでの軸方向モードは $m=1$ としている。たとえば円周方向モード $n=4$ での第1-4項の絶対値はそれぞれ151.72, 98.01, 297.31 および 140.35、線形座屈係数は $k(=q_c / 2E_f h_f) = 1.354 \times 10^{-2}$ になっており、これらの値を式(1)に代入すること

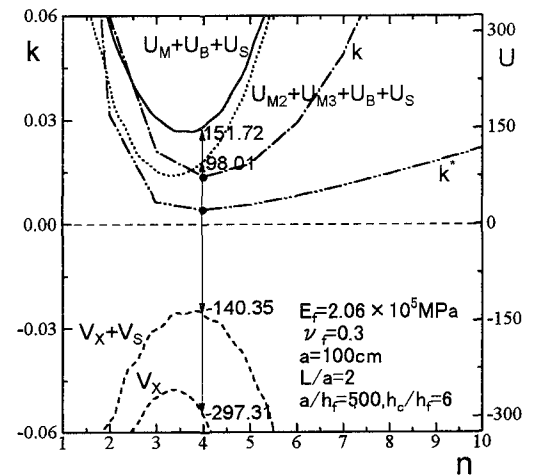


図-2 RS座屈強度の算定

によりRS座屈強度が、 $k^* = 0.646 \times 0.472k = 0.305k = 4.13 \times 10^{-3}$ と求まる。したがって、この場合のRS座屈強度は線形座屈強度に比較して69.5%低下している。図-2にはそれぞれの円周方向モード n に対する線形座屈係数(一点鎖線)およびRS座屈係数(二点鎖線)も同時に示しているが、いずれも $n=4$ でピーク値をとっており、この値が線形およびRS座屈強度として採用される。

4. 軸圧縮力を受ける円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度

図-3 に円筒サンドイッチシェル構造(図-1, 表面材弾性係数: $E_f = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, 表面材ポアソン比: $\nu_f = 0.3$, $a/h_f = 500$, $h_c/h_f = 6, 12, 20, \dots = 0.0001, 0.05, 0.1$, せん断剛性比: $V(=E_f h_f / 4a G_c (1-\nu_f^2))$, G_c : 心材のせん断弾性係数) が軸圧を受ける場合の線形座屈強度および RS 座屈強度と部材長半径比 L/a の関係を示している。図-3 より明らかなように、線形座屈強度がせん断剛性の低下にともない部材長半径比 L/a の小さい範囲において、ほぼ一定の値をとる傾向を示しているのに対し、RS 座屈強度はいずれのせん断剛性比 V においても部材長半径比 L/a の増大とともに減少している。RS 座屈強度の線形座屈強度に対する減少率は部材長半径比 L/a が増大するほど小さくなる傾向を示している。線形座屈モードでは、部材軸方向モード $m=1$ 以外のモードが支配的になっている場合が存在するのに対し、RS 座屈モードでは部材軸方向モードはいずれの場合も $m=1$ となっている。一方、円周方向モード n は L/a の増大にともない逆に減少する傾向にある。また心材のせん断弾性係数が RS 座屈強度に及ぼす影響は部材長半径比 L/a の増大とともに減少している。

5. 非線形 FEM 耐荷力解析結果との比較・検討

円筒サンドイッチシェル構造が軸圧を受ける場合の非線形 FEM 耐荷力解析を初期不整の大きさを種々変化させて行い、得られた耐荷力と RS 座屈強度および線形座屈強度の比較を図-4 に示している。なお、FEM 耐荷力解析では解析モデルの部材軸方向の対称性を考慮して、 $L/2$ 部分を解析対象とし、この解析対象を 240 個のアイソパラメトリックシェル要素に分割した。また円筒サンドイッチシェル両端の境界条件は単純支持 ($v=w=0$) と仮定し解析を行った。なお、アイソパラメトリックシェル要素の層分割数は、表面板 2 層、心材 2 層の計 6 層としている。本研究の非線形計算は増分法に基づいており、最大耐荷力付近までは荷重増荷法を用い、それ以降は変位制御法により計算を行った。なお、図-4 には初期不整の大きさ W_0 を断面厚 $h(=2h_r+h_c)$ で除した値をとり示すとともに、変分法による線形座屈強度(VARI)、RS 座屈強度(RS)および既往の解析法による結果(Plantema: PLA)も同時に示している。図-4 に示す荷重—変位曲線において、曲線 A~E は、いずれの場合も極値(図-4: 白印)をとった後、強度の減少とともに急激に面外変位が大きくなる座屈現象を示しており、曲線 F にはその現象は見られない。したがって、曲線 E ($W_0/h = 7.5$) でのピーク値(Point 1)を座屈下限値とみなすことができる。この座屈下限値の線形座屈強度に対する減少率(72.4%)は RS 座屈強度の線形座屈強度に対する減少率(86.1%)に比較して小さくなっており、RS 座屈強度では初期不整の影響をより大きく評価した結果となっている。

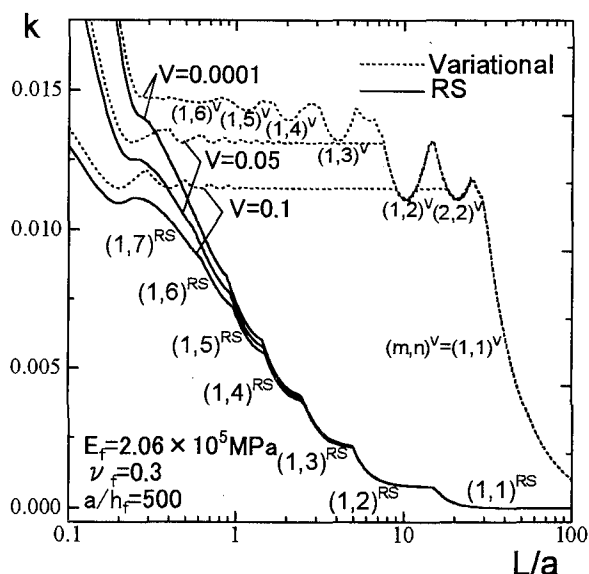


図-3 RS 座屈強度曲線 ($h_c/h_f=6$)

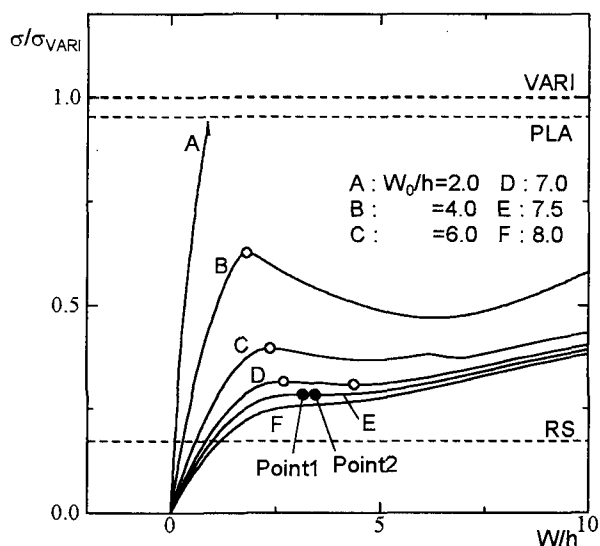


図-4 荷重—変位曲線 ($L/a=2, V=0.1$)