

I - A 234 外圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造の座屈強度について

愛媛大学工学部 正 員 大賀 水田生
愛媛大学大学院 学生員 ○中村 大 輔

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）が外圧を受ける場合の弾性非線形 FEM 解析を、初期不整の大きさを種々変化させて行い、初期不整が座屈耐力と荷重力および弾性非線形挙動に及ぼす影響を考察するとともに、Reduced Stiffness 法（RS法）を用いて得られた座屈強度（RS座屈強度）との比較を行った。

2. アイソパラメトリックシェル要素を導入したサンドイッチシェルの FEM 非線形解析

本研究で用いたアイソパラメトリックシェル要素を図-1 に示す。ところで、このアイソパラメトリックシェル要素は本来通常の断面を有する構造物に対して開発された要素であるが、要素剛性マトリックスが要素を層状分割し、それぞれの層に対する剛性を集成して得られることに注目し、サンドイッチ断面を上下の表面材と心材から成る層状断面と考えることにより、サンドイッチシェル構造に適用した（図-2）。本研究では表面材は面内力のみ、心材はせん断力のみに抵抗するものとし、表面材および心材に対する応力一ひずみマトリックス D_f 、 D_c をそれぞれ次のように定義している。

$$D_f = \frac{E_f}{1-\nu_f^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_f & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \nu_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (1-\nu_f)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_C \end{bmatrix}$$

ここで E_f : 表面材の弾性係数、 ν_f : 表面材のポアソン比、 G_C : 心材のせん断弾性係数である。

3. 表面材および心材の層分割数が解の精度に及ぼす影響

アイソパラメトリックシェル要素を導入した FEM 解析での表面材および心材の層分割数が解に及ぼす影響を検討するため、等分布荷重を受ける 4 辺単純支持サンドイッチ正方形板（ $E_f = 2.06 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, $\nu_f = 0.3$, $a = 100 \text{ cm}$, $V = E_f t_f / \{4(1-\nu_f^2)aG_C\} = 1.15, 0.23, 0.023$, $t_f = 0.1 \text{ cm}$, $t_c = 1.0 \text{ cm}$ ）の解析を、表面材の層分割数 n_f （1～4 層）および心材の層分割数 n_c （2～12 層）を種々変化させて行い、既往の解¹⁾との比較を行った。その結果、表面材分割層数 n_f についてはいずれのせん断剛性比においても $n_f = 2$ で解はほとんど収束した。また、心材分割層数 n_c については n_c に関係なく同一の解が得られ、 n_c は解の精度に影響を及ぼさないことが明らかになった。

4. 外圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造の耐荷力および非線形挙動

円筒サンドイッチシェル構造（図-3； $a = 100 \text{ cm}$, $t_f = 0.2 \text{ cm}$, $t_c = 1.2 \text{ cm}$, $E_f = 2.06 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, $V = 0.23, 1.15$, $L/a = 2$ ）が外圧を受ける場合の FEM 非線形耐荷力解析を初期不整の大きさを種々変化させて行った（図-4： $V = 0.23, w_0/t = 0.01 \sim 0.4$, 図-6： $V = 1.15, w_0/t = 0.01 \sim 0.2$, w_0 : 初期不整振幅, $t = 2t_f + t_c$: シェ

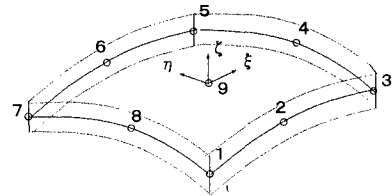


図-1 アイソパラメトリックシェル要素

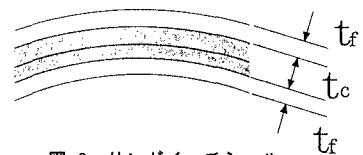


図-2 サンドイッチシェル

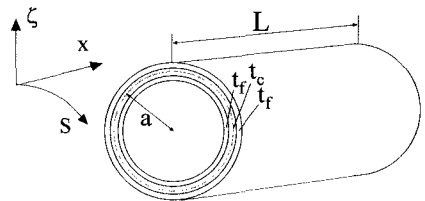


図-3 円筒サンドイッチシェル

ル厚). 本解析では, 解析モデルの対称性を考慮して, 部材軸方向については $L/2$ 部分を解析対象とし, さらに, 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(図-4). 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, 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 層とするとともに, 解析に導入した初期不整の形状は変分法により得られた線形座屈荷重に対する座屈モードを採用した(図-4).

図-4 に本解析により得られた円筒サンドイッチシェル ($V=0.23$) の荷重一変位曲線を示している. 荷重一変位曲線 A ~ D は, いずれの場合も外圧の小さい場合ではほとんど面外変位を生じていないが, 荷重の増大とともに変形が大きくなり, 耐荷力が極値(図-4: 白印)をとった後, 強度の減少とともに急激に面外変形が大きくなる座屈現象を示している. しかしながら, 曲線 E ではこの座屈現象は見られない. したがって, 曲線 D ($w_0/t=0.4$) でのピーク値を座屈下限値とみなすことができる. 図-4 には, 変分法により得られた古典的座屈強度 $q_c = 13.26 \text{ kgf/cm}^2$ ($m=1, n=10$, m, n : 部材軸方向および円周方向座屈モード) および RS 座屈強度 ($q_c^* = 0.821 q_c = 10.89 \text{ kgf/cm}^2$) も同時に示しているが, 座屈下限値(曲線 D) は RS 座屈強度と 2% 以内の誤差で一致している. 図-5 に曲線 D での座屈時 (point 1) および座屈後 (point 2) での変形性状を示しているが, いずれの場合も初期不整と同一のモードとなっている.

図-6 に $V=1.15$ の場合の荷重一変位曲線を示している. 図-4 同様, 荷重一変位曲線 A ~ C は座屈現象を示しているが, 曲線 D ではその現象は見られない. したがって, 曲線 C ($w_0/t=0.15$) でのピーク値を座屈下限値とみなすことができる. 図-6 には, 変分法により得られた古典的座屈強度 $q_c = 8.17 \text{ kgf/cm}^2$ ($m=1, n=12$, m, n : 部材軸方向および円周方向座屈モード) および RS 座屈強度 ($q_c^* = 0.892 q_c = 7.29 \text{ kgf/cm}^2$) も同時に示しているが, 座屈下限値(曲線 C) は RS 座屈強度と 3% 以内の誤差で一致している. 図-7 に曲線 C での座屈時 (point 1) および座屈後 (point 2) での変形性状を示しているが, いずれの場合も初期不整と同一のモードとなっている.

参考文献: 1) F.F.Plantema: Sandwich construction, John, Wiley & Sons, New York, 1966.

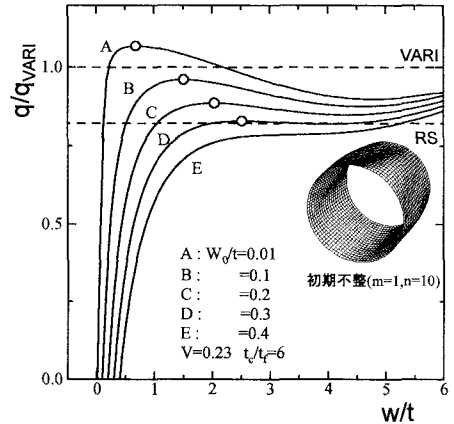


図-4 荷重変位曲線 ($V=0.23$)

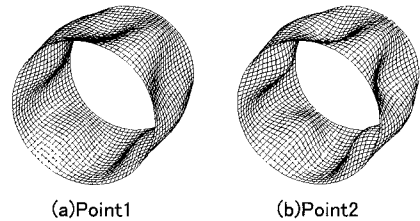


図-5 変形形状 ($V=0.23$)

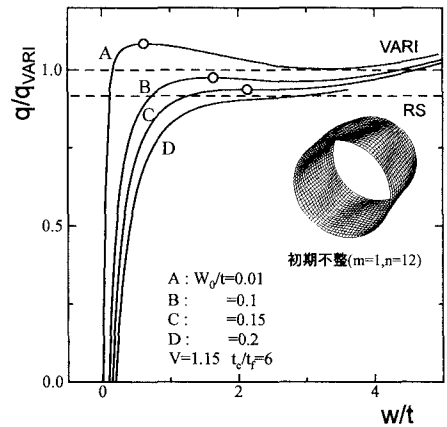


図-6 荷重変位曲線 ($V=1.15$)

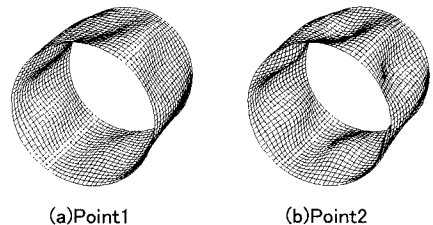


図-7 変形形状 ($V=1.15$)