

愛媛大学工学部 正 員 大賀 水田生
不 動 建 設 正 員 山田 勝 己
大阪工大大学院 学生員 ○福田 拓 二

1. はじめに

本研究では、アイソパラメトリックシェル要素を用いた FEM 非線形解析法をサンドイッチ断面を有する円筒シェル(円筒サンドイッチシェル)に適用し、外圧を受ける円筒サンドイッチシェルの非線形解析を初期不整を種々変化させて行い、部材の耐荷力及び非線形挙動について理論的な考察を行うとともに、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 非線形解析法

図-1 に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に適用した(図-2)。本研究では表面材は面内力のみに、心材はせん断力のみに抵抗するものとし、表面材及び心材に対する応力-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。

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

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. 表面材及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 耐荷力解析での表面材及び心材の層分割数が解に及ぼす影響を検討するため、等分布横荷重を受ける 4 辺単純支持サンドイッチ正方形板 ($E_f=2,100,000\text{kgf/cm}^2$, $\nu_f=0.3$, $G_c=5000\text{kgf/cm}^2$, $t_f=0.1\text{cm}$, $t_c=0.8\text{cm}$) の解析を表面材 (1~4 層) および心材の層分割数 (6~12 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、いずれの分割数においても FEM 耐荷力解析により得られた板中央での面外変位は既往の解と 0.3% 以内の誤差で一致した。

4. 外圧を受ける円筒サンドイッチシェルの耐荷力及び非線形挙動

円筒サンドイッチシェル (図-3 ; $t_f=0.2\text{cm}$, $t_c=1.2\text{cm}$, $E_f=2100000\text{kgf/cm}^2$, $G_c=1000\text{kgf/cm}^2$, $a=100\text{cm}$, $L/a=2$) 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 ($w_0/t=0. \sim 0.5$, w_0 : 初期不整振幅、 $t=2t_f+t_c$: シ

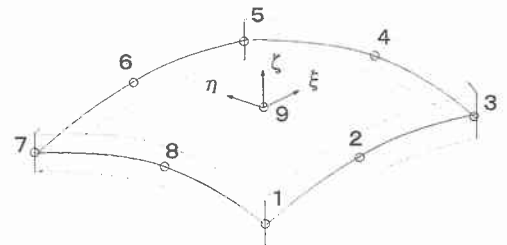


図-1 アイソパラメトリックシェル要素

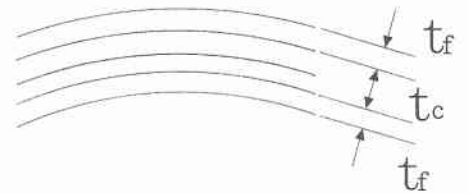


図-2 サンドイッチシェル

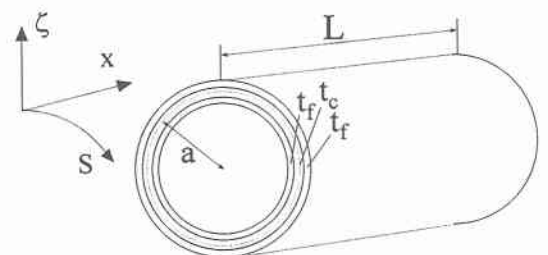


図-3 円筒サンドイッチシェル

エル厚)。本解析では、解析モデル及び座屈モードの対称性を考慮して、部材軸方向については $L/2$ 部分を、円周方向については座屈モード3波形部分を解析対象とし、さらに、この解析対象を100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分法を用い、

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1層、心材6層の計8層とするとともに、初期不整の形状は変分法により得られた座屈モードを採用した(図-5)。図-5に本解析により得られた円筒サンドイッチシェルの荷重-変位曲線を示している。荷重-変位曲線A~Eは、いずれの場合も外圧の小さい場合に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-5: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Fではその現象は見られない。したがって、曲線E($w_0/t=0.4$)でのピーク値を座屈下限値とみなすことができる。図-5には、変分法により得られた古典的座屈強度 $q_c=8.17\text{kgf/cm}^2$ ($m=1, n=12.0, m, n$: 部材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E)はRS座屈強度と4%以内の誤差で一致している。図-6に曲線Eでの座屈時 (point 1) および座屈後の (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。

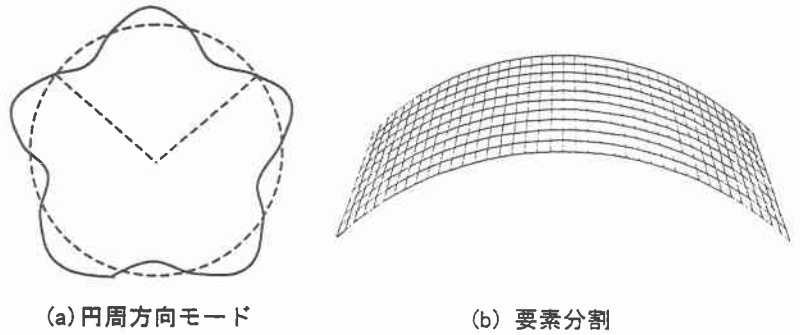


図-4 解析モデル

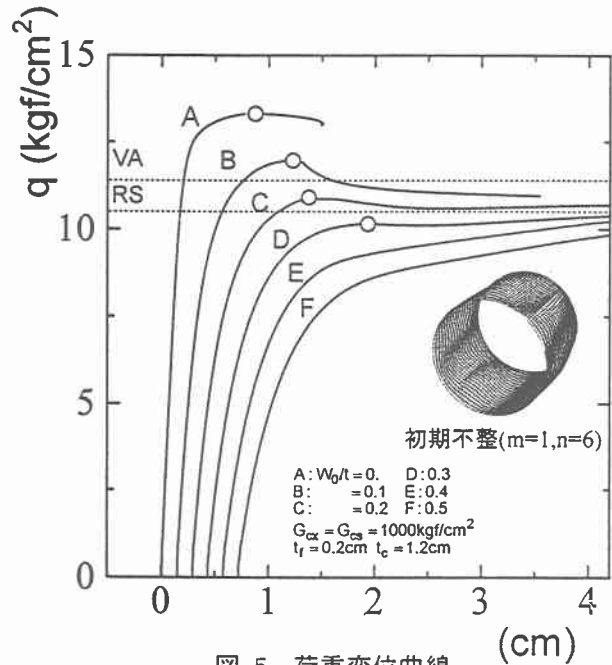


図-5 荷重変位曲線

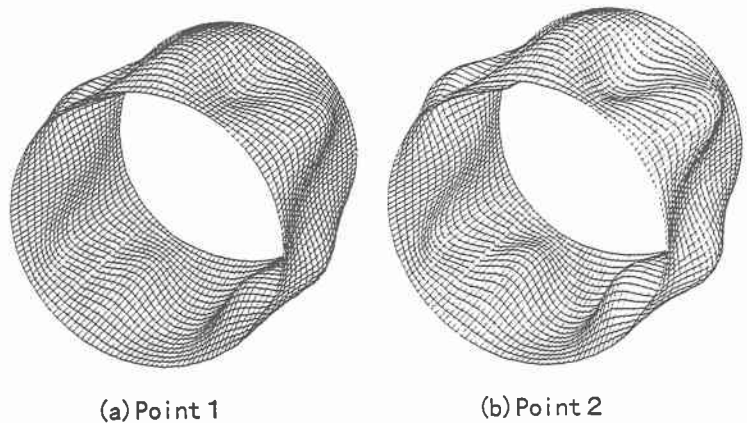


図-6 変形形状

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