

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  
四国管区警察局 正 員 村杉 直 樹

## 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構造物に適用した場合の解の特性を検討するとともに、本解析法を用いて外圧を受ける円筒サンドイッチシェル構造の非線形解析を初期不整を種々変化させて行い、部材の耐荷力およ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構造の 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示す。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に、心材はせん断力のみ抵抗するものとし、表面材およ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,  $\nu_f$ : 表面材のポアソン比,  $E_c$ : 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 ( $E_f=2.06 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ,  $\nu_f=0.3$ ,  $a=100\text{cm}$ ,  $V=E_f t_f / \{4(1-\nu_f^2)aG_c\}=1.15, 0.23, 0.023$ ,  $t_f=0.1\text{cm}$ ,  $t_c=1.0\text{cm}$ , 要素分割数  $N=10$ ) の解析を表面材の層分割数  $n_f$  (1~4 層: 図-3) および心材の層分割数  $n_c$  (2~12 層: 図-4) を種々変化させて行い、既往の解<sup>1)</sup>との比較を行った。図-3 より明らかなように、いずれのせん断剛性比においても表面材分割層数  $n_f$  の増大とともに両解析による解の誤差は大きくなる傾向を示しているが、いずれの場合も  $n_f=2$  で解はほとんど収束している。また、図-4 より明らかなようにいずれの場合

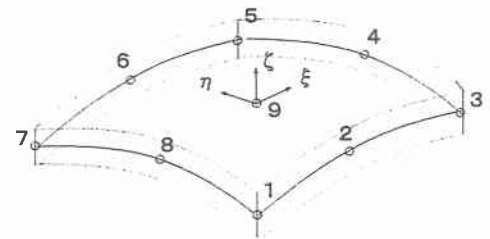


図-1 アイソパラメトリックシェル要素

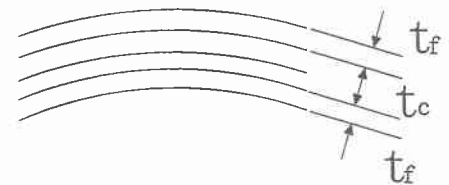


図-2 サンドイッチシェル

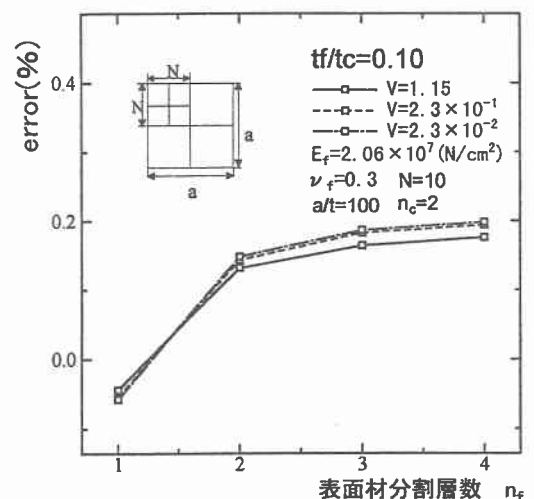


図-3 表面材分割層数が解の精度に及ぼす影響

の心材分割層数  $n_c$  においても同一の解が得られており、心材分割層数  $n_c$  が解の精度に及ぼす影響は認められない。

#### 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

本解析法を用いて、円筒サンドイッチシェル構造（図-5； $t_f=0.2\text{cm}$ ， $t_c=1.2\text{cm}$ ， $E_f=2.06\times10^7\text{N/cm}^2$ ， $V=0.23$ ， $a=100\text{cm}$ ， $L/a=2$ ）が外圧を受ける場合の弾性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（ $w_0/t=0.01\sim0.4$ ， $w_0$ :初期不整振幅、 $t=2t_f+t_c$ :シェル厚）。本解析では、解析モデルおよ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-6）。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座屈荷重に対する座屈モードを採用した（図-6）。

図-6 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～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-6: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ではその現象は見られない。したがって、曲線D（ $w_0/t=0.3$ ）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  $q_c=13.26\text{kgf/cm}^2$ （ $m=1, n=10$ ， $m, n$ : 部材方向および円周方向座屈モード）およびRS座屈強度<sup>2)</sup>（ $q_c^*=0.821 q_c=10.89\text{kgf/cm}^2$ ）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-7 に曲線Dでの座屈時（point 1）および座屈後のの（point 2）での変形状を示しているが、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 constrac tion, John,Wiley & Sons,New York,1966.  
2)山田聖志：シェル座屈解析における Reduced Stiffness 法,第1回シェル空間構造セミナー資料 pp25-32,1992.

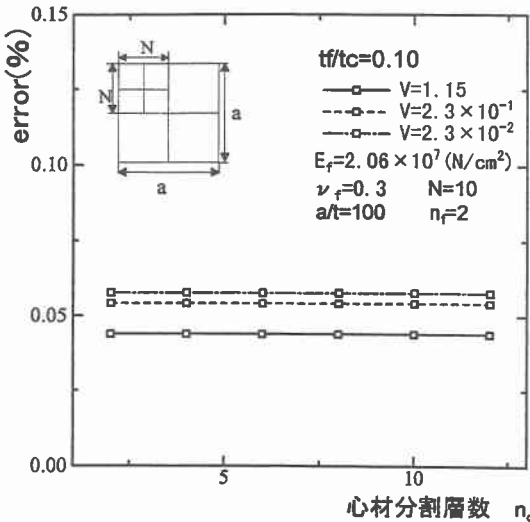


図-4 心材分割層数が解の精度に及ぼす影響

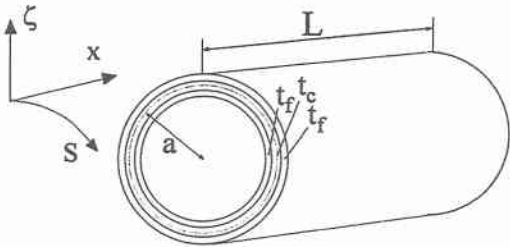


図-5 円筒サンドイッチシェル

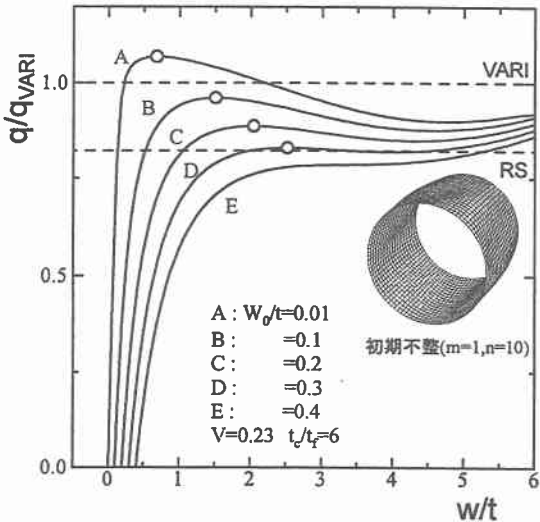


図-6 荷重変位曲線

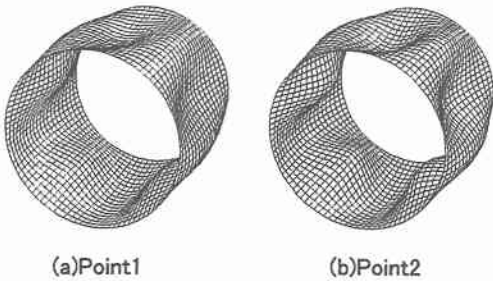


図-7 変形状