

愛媛大学工学部 正員 大賀 水田生
若 築 建 設 正員 中村 大 輔
愛媛大学大学院 学生員 ○馬越 正 純

1. はじめに

本研究では、異方性心材を有する円筒サンドイッチシェル構造（異方性円筒サンドイッチシェル）が外圧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 RS 法に基づき理論的に求める方法を述べるとともに、得られた座屈強度を FEM 非線形解析による結果と比較することにより、誘導した方法の妥当性、有効性について検討するとともに、心材の異方性が円筒サンドイッチシェルの座屈強度に及ぼす影響について考察する。

2. 外圧を受ける異方性円筒サンドイッチシェルの RS 座屈強度

外圧を受ける円筒サンドイッチシェルの座屈時のトータルポテンシャルエネルギーは、

$$\Pi = \Pi_0 + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 \quad (1)$$

と表される。ここで、添字 0,1,... は座屈時の変位(図-1)に関する次数を表している。座屈開始時では変位は十分に小さいと仮定すると、式(1)に示すトータルポテンシャルエネルギーの 2 次の項 Π_2 のみが座屈荷重に関係する。この Π_2 の変分 $\delta \Pi_2$ に停留条件を適用することにより次式を得る。

$$U - qcU_E = 0, U = U_M + U_B + U_S \quad (2)$$

ここで、 U_M, U_B, U_S は面内、曲げおよびせん断ひずみエネルギー成分を表している。

RS 法では初期不整の影響によって容易に消失する面内ひずみエネルギー成分を予め削除し、座屈強度を求める。したがって、式(2)より RS 座屈強度は次式のように得られる。

$$q_{RS} = qc(U_B + U_S) / (U_M + U_B + U_S) \quad (3)$$

3. FEM 非線形解析結果との比較・検討

図-2 に種々の大きさの初期不整($w_0/t=0.01\sim 0.4$, w_0 :初期不整振幅, $t=2t_f+t_c$:板厚)を有する異方性円筒サンドイッチシェル(図-2: $a=100\text{cm}$, $a/t_f=500$, $t_c/t_f=6$, $L/a=2$, $E_f=2.06\times 10^5\text{MPa}$, $G_{cx}=196\text{MPa}$, $G_{cs}/G_{cx}=1.75$)が外圧を受ける場合の荷重-変位曲線を縦軸に荷重 q を線形座屈強度 qc で除した値を、横軸には面外変位 w を板厚 t で除した値をとり示している。初期不整としては変分法により求めた線形座屈荷重に対する座屈モードを用い(図-2), 部材軸方向 $L/2$ 部分を解析

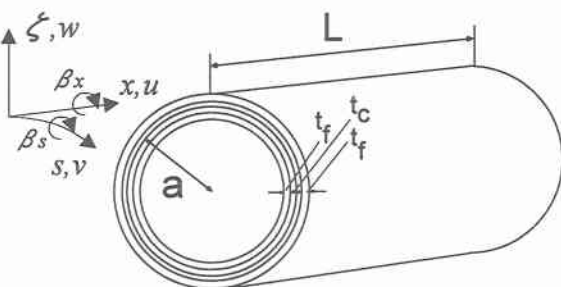


図-1 円筒サンドイッチシェル

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解析を行った。図-2 より明らかなように、荷重-変位曲線 A~C は、いずれの場合も極値(図-2: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いるのに対し、曲線 D, E にはその現象は見られない。したがって、曲線 D($w_0/t=0.30$)でのピーク値を座屈下限値とみなすこと

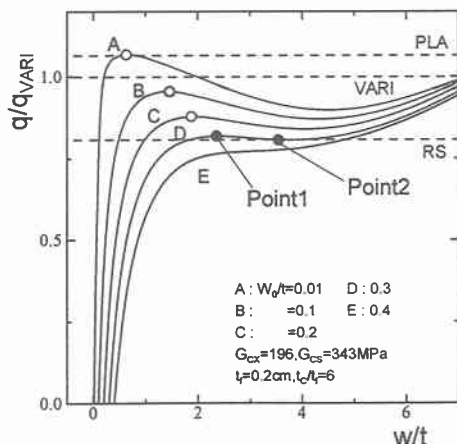
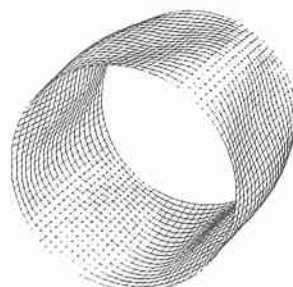


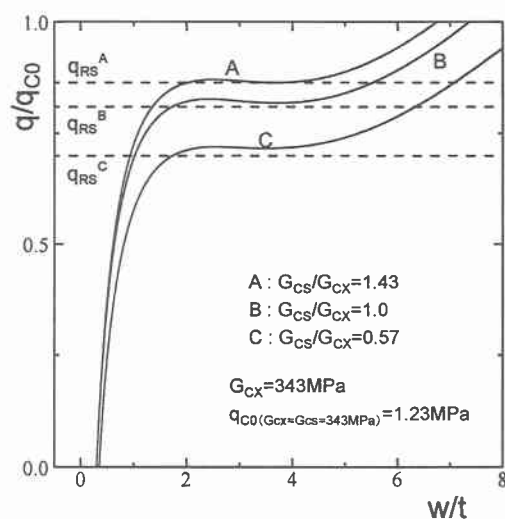
図-2 荷重—変位曲線



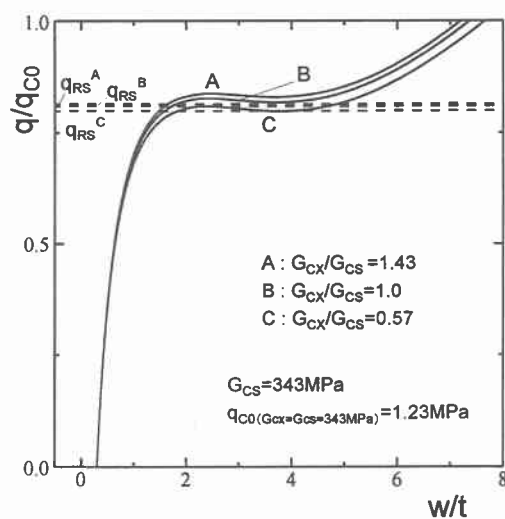
初期不整($m=1, n=10$)

表－1 異方性サンドイッチシェルの座屈強度

G_{CX} (MPa)	G_{CS} (MPa)	G_{CS}/G_{CX}	q_C (MPa)	q_{RS} (MPa)	q_{RS}/q_C	q_{FE} (MPa)	errors(%)
196	196	1.0	1.09	0.85	0.78	0.83	-2.35
	343	1.75	1.21	0.98	0.81	0.98	0.00
	490	2.50	1.28	1.05	0.82	1.04	-0.95
343	196	0.57	1.10	0.86	0.78	0.88	2.33
	343	1.0	1.23	0.99	0.80	1.0	1.01
	490	1.43	1.29	1.06	0.82	1.05	-0.94
490	196	0.40	1.10	0.86	0.78	0.90	4.65
	343	0.70	1.23	1.0	0.81	1.02	2.00
	490	1.0	1.30	1.07	0.82	1.06	-0.93

 $E_F=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$, $a=100\text{cm}$, $a/t_F=500$, $t_c/t_F=6$, $L/a=2$


図－3 荷重－変位曲線



図－4 荷重－変位曲線

ができ、この値は本解析法より得られた RS 座屈強度と 1%以内の誤差で一致している。表-1 に種々の心材を有する異方性円筒サンドイッチシェルの FEM 非線形解析結果による座屈下限値と RS 座屈強度の比較を示している。表-1 より明らかなように、RS 座屈強度は全体を通じて FEM 非線形解析による座屈下限値と 5%以内の誤差で一致している。

4. 心材の異方性が円筒サンドイッチシェルの RS 座屈強度に及ぼす影響

図-3 に心材の部材軸方向せん断弾性係数を $G_{CX}=343\text{MPa}$ と固定し、円周方向のせん断弾性係数を変化させた場合の異方性円筒サンドイッチシェル($E_F=2.06 \times 10^5\text{MPa}$, $a=100\text{cm}$, $a/t_F=500$, $t_c/t_F=6$, $L/a=2$)の RS 座屈強度および座屈下限値を与える場合の荷重－変位曲線を示している。なお、この場合の縦軸は荷重 q を等方性円筒サンドイッチシェル($G_{CX}=G_{CS}=343\text{MPa}$)の線形座屈強度 q_{C0} で除した値をとっている。図-3 から明らかなように、 $G_{CS}/G_{CX}=1.0, 1.43$ での RS 座屈強度は $G_{CS}/G_{CX}=0.57$ での値に対してそれぞれ 15%, 23%, また FEM による座屈下限値ではそれぞれ 14%, 19%大きくなっており、FEM による座屈下限値での心材の異方性の影響は RS 座屈強度に比較して小さくなっているが、いずれの場合も心材の円周方向せん断弾性係数の増加により座屈強度も大きく増大している。

図-4 に心材の円周方向せん断弾性係数を $G_{CS}=343\text{MPa}$ と固定し、部材軸方向のせん断弾性係数を変化させた場合($G_{CS}/G_{CX}=0.57, 1.0, 1.43$)の結果を示している。図-4 から明らかなように、 $G_{CS}/G_{CX}=1.0, 1.43$ での RS 座屈強度は $G_{CS}/G_{CX}=0.57$ での値に対してそれぞれ 1%, 2%, FEM による座屈下限値ではそれぞれ 2%, 4%増加しているのみであり、心材の部材軸方向せん断弾性係数の増加による座屈強度の増大はほとんど認められない。これらのことより、外圧を受ける異方性円筒サンドイッチシェルの RS 座屈強度に対して心材の円周方向せん断剛性は部材軸方向せん断剛性に比較してより大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

[参考文献]

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