

愛媛大学工学部 正 員 大賀 水田生
愛媛大学大学院 学正員 ○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について、座屈時のひずみエネルギーおよびその成分について検討するとともに、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(Reduced Stiffness 法)について述べる。

2. 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

1)円筒サンドイッチシェル構造の線形座屈強度 軸圧縮力 q を受ける円筒サンドイッチシェル構造の安定状態での応力およびひずみ成分は次のように与えられる。

$$(N_x^F, N_s^F, N_{xs}^F) = (-2\sigma_x t_f, 0, 0), (E_x^F, E_s^F, E_{xs}^F) = ((-\sigma_x/E), \nu\sigma_x/E, 0) \quad (1)$$

座屈時のトータルポテンシャルエネルギーは次のように表すことができる。

$$\Pi = \Pi_0 + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 + \dots \quad (2)$$

ここに、添字 0,1,...は座屈時の変位に関する次数を表している。座屈開始時での変位は十分に小さいと仮定すると、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2次のエネルギー成分は次のように表される。

$$\Pi_2 = U + W, \quad U = U_M + U_B + U_S, \quad W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (3)$$

ここに、 $U_M = U_{M1} + U_{M2} + U_{M3}$: 面内エネルギー成分、 $U_B = U_{B1} + U_{B2} + U_{B3}$:

曲げエネルギー成分、 $U_S = U_{S1} + U_{S2}$: せん断エネルギー成分、添字 1, 2, 3

はそれぞれ部材軸方向(x 方向)、円周方向(s 方向)および x - s 方向成分であることを示している。また、 $W = W_1 + W_2 + W_3$ は式(1)に示す安定状態における応力、ひずみ成分に関する成分であり次のように与えられる。

$$W_1 = (1/2) \iint (N_x^F \epsilon_x^F) ds dx = -(q/2) \iint (a w_{,x}^2) ds dx = q W_1^*, \quad W_2 = (1/2) \iint (n_s^F E_s^F) ds dx = -(q/2) \iint (D_f / 2t_f E) (w_{,x}^2 + w_{,s}^2) ds dx = q W_2^*$$

$$W_3 = (1/2) \iint (n_s^F E_s^F) ds dx = (q/2) \iint (\nu D_f / 2h_f E) (w_{,s}^2 + \nu w_{,x}^2) ds dx = q W_3^* \quad (4)$$

線形座屈強度の算定においては、式(4)での W_1 のみが考慮され、式(3)のトータルポテンシャルエネルギーの2次の項 Π_2 の停留条件より線形座屈荷重が次のように得られる。

$$q_c = U / W_1^* \quad (5)$$

2)円筒サンドイッチシェル構造のRS座屈強度 式(4)のエネルギー成分の中で W_3 は $W_{1,2}$ と異なり、正の成分であり、座屈に対して抵抗する成分である。RS 法では、このエネルギー成分は初期不整の影響により消失するであろうと考え、初期不整を考慮した座屈荷重(RS座屈強)を線形座屈荷重を用いて次のように与える。

$$q_c^* = \{U / (U + W_3)\} q_c \quad (6)$$

3. 軸圧縮力を受ける円筒サンドイッチシェル構造のひずみエネルギー

図-2 に円筒サンドイッチシェル構造(図-1 : $a=100\text{cm}$, $L/a=2$, $t_f/a=0.002$, $t_c/t_f=6$, 心材のせん断弾性比 $V=0.0, 0.2, 1.0$ ($V=E t_f / 4a G_c (1-\nu^2)$))が軸圧縮力を受ける場合の円周方向座屈モード n に対する全ひずみエ

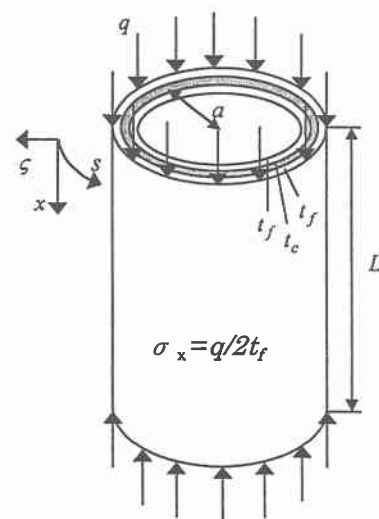


図-1 円筒サンドイッチ構造

エネルギー U および 8 種類のエネルギー成分 (式(3)) のスペクトルを示している。図-2(a) より明らかなように $V=1.0$ の場合、全ひずみエネルギー U は円周方向座屈モード n の増加とともに減少し、 $n=4$ 付近で最小値をとり、その後増大している。また部材軸方向 (x 方向) の面内ひずみエネルギー成分 $U_{M1,2,3}$ はいずれも n の増大とともに減少する傾向を示しており、特に U_{M2} は $n=2.5$ 付近でほぼ 0 となっている。一方、曲げひずみエネルギー $U_{B1,2,3}$ は、いずれのエネルギー成分も n の増大とともに増大する傾向を示しているが、部材軸方向 (x 方向) 成分 U_{B1} は非常に小さくほとんど認められないのに対し、円周方向 (s 方向) 成分 U_{B2} は他の 2 成分 (U_{B1} , U_{B3}) に比較して大きな値となっている。せん断ひずみエネルギーも、曲げひずみエネルギーの場合と同様、 n の増大とともに大きくなっているが、特に円周方向 (s 方向) 成分 U_{S2} の増加率が非常に大きく、 $n>6$ においては最も大きなエネルギー成分となっている。

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-2 に示す 8 個のひずみエネルギー成分、面内 ($\sum U_{Mi}$)、曲げ ($\sum U_{Bi}$) およびせん断ひずみエネルギー ($\sum U_{Si}$) としてまとめたものを図-3 に示している。図-3(a) に示す $V=1.0$ の場合、面内ひずみエネルギー U_M は円周方向座屈モード n の増加とともに減少しているのに対し、曲げおよびせん断ひずみエネルギー U_B , U_S は n の増大とともに大きくなる傾向を示している。この場合、線形座屈係数 k_c ($k_c=(1-\nu^2)aq/aEt$ (一点鎖線)) は円周方向座屈モード $n=4.4$ で得られている ($k_c=0.975$)。この場合のひずみエネルギー成分は $U=128.78$, $W_3=358.32$ となっており、したがって RS 座屈係数は式(6)より q_σ , q_c^* を k_σ , k_c^* と置き換えることにより、次のように決定される。

$$k_c^* = k_c U / (U + W_3) = 0.264 k_c = 0.258 \tag{7}$$

なお、図-3 にはそれぞれの座屈モード n に対する RS 座屈係数 (二点鎖線) も同時に示しているが、せん断剛性比の減少すなわちせん断剛性の増大により線形および RS 座屈係数とも大きくなる傾向を示している。

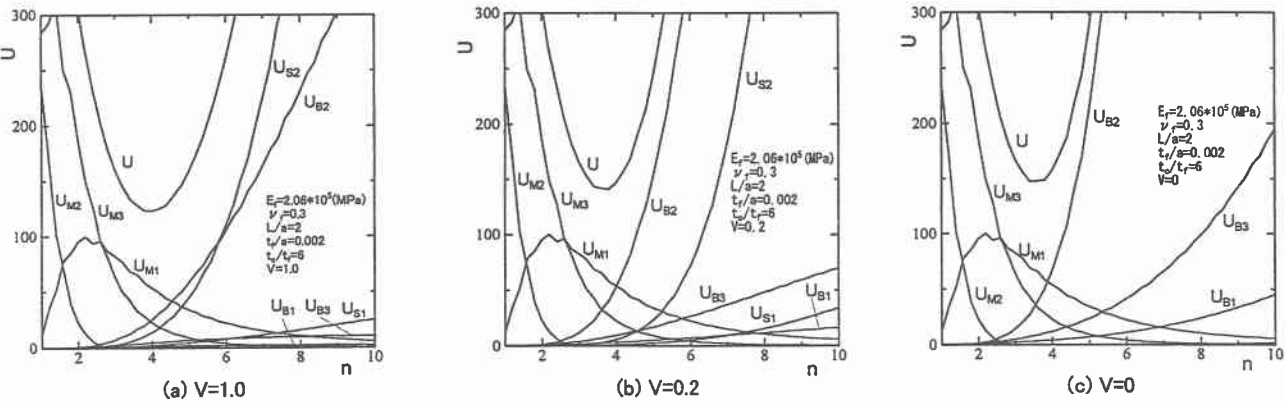


図-2 軸圧縮力を受ける円筒サンドイッチシェル構造のひずみエネルギー成分

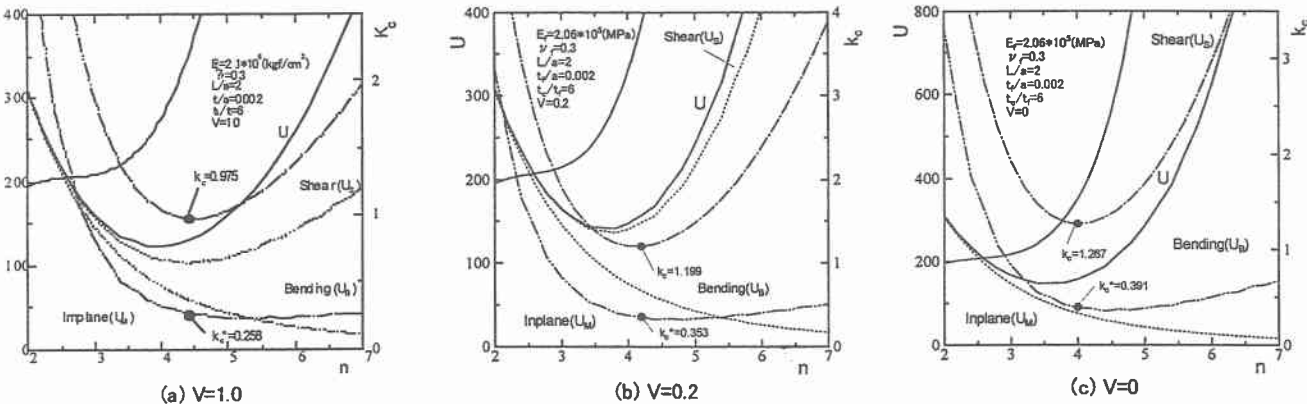


図-3 軸圧縮力を受ける円筒サンドイッチシェル構造の RS 座屈強度