

補剛材を有する薄肉シェル部材の座屈効果について

徳山高専	学生会員	○田中	沙知
	正会員	重松	恒美
徳山高専	正会員	原	隆
愛媛大学	学生会員	星出	紘規
愛媛大学	正会員	大賀	水田夫

1. はじめに

近年、建設分野でデッキプレートなどに薄板および薄肉シェル部材を用いた構造物が建設されている。通常これらの部材では補剛材を有しており、これらの構造は力学的にも優れており通常の板、シェル部材と比較すると非常に強度の高い構造形式である。補剛板については多くの研究がなされているが、補剛シェルについてはシェル自体が強度的にも優れており、補剛シェルの研究はあまりなされていないのが現状である。そこで本研究では薄肉シェルに補剛材を適用し補剛材の効果を明らかにしようとするものである。解析法として、伝達マトリックス法(固有値法)を用いた。伝達マトリックス法(固有値法)は梁や板および薄肉構造の座屈解析を容易に行うことができるが、これがシェルにも適用されることを確認した後、4辺単純支持されたシェルパネルについて座屈解析を行った。そして、補剛材を有する板とシェルの座屈強度及び座屈モードを求め、シェルへの補剛材の効果の確認を行った。

2. 解析理論

まず、シェルの微分方程式からシェルパネルに対する格間伝達マトリックス F を誘導し、連続するシェルパネルから求めた格点伝達マトリックス P を求める。これらを用いて、閉断面に対する伝達方程式を誘導する。図 - 1 の閉断面を有する補剛板の伝達方程式を考慮すると、まず Z_{MS2}^R までの伝達方程式は主板の Z_{MS0} と仮に考慮した片側の閉断面 Z_{B10}^R が節点 2 での変位と断面力の釣り合いから、

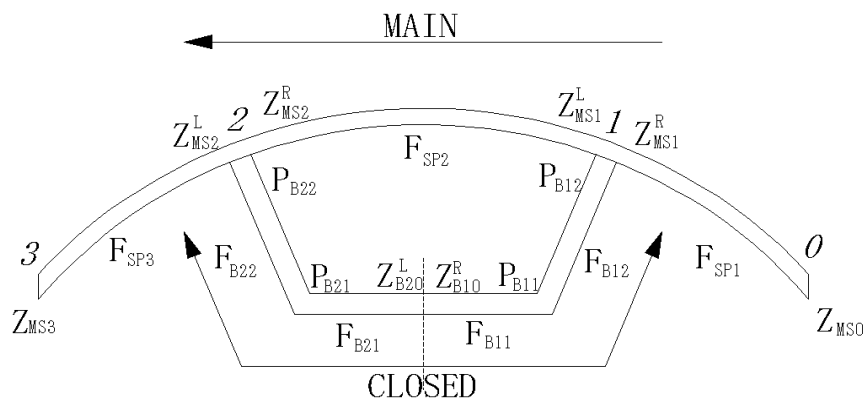


図 - 1 閉断面補剛材を有する薄肉シェル

$$\begin{bmatrix} Z_{MS2}^R \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{SP2} F_{SP1} & F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12} \\ \delta F_{SP1} & -P_{B12} \delta F_{B12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{MS0} \\ Z_{B10}^R \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる．ここで，右下付の MS と B はメインシエルパネルと板の開断面補剛材であり，左下付の δ と F はそれぞれ変位と断面力である．また，L と R は断面の左側と右側を示す．さらに， Z_{MS2}^L まで伝達するともう一方の開断面 Z_{B20}^L を加えて(2)のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} Z_{MS2}^L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{SP2} F_{SP1} & F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12} & P_{B22}^F F_{B22} \\ \delta F_{SP1} & -P_{B12} \delta F_{B12} & 0 \\ \delta [F_{SP2} F_{SP1}] & \delta [F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12}] & -P_{B22} \delta F_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{MS0} \\ Z_{B10}^R \\ Z_{B20}^L \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで，左右対称であることを考慮すると，

$$\delta Z_{B20}^L = \delta Z_{B10}^R, \quad F Z_{B20}^L = F Z_{B10}^R \quad (3)$$

また，

$$Z_{B20}^L = T_{B0} \cdot Z_{B10}^R \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入することによって式(2)は次のように書き換えられる．

$$\begin{bmatrix} Z_{MS2}^L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{SP2} F_{SP1} & F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12} + P_{B22}^F F_{B22} T_{B0} \\ \delta F_{SP1} & -P_{B12} \delta F_{B12} \\ \delta [F_{SP2} F_{SP1}] & \delta [F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12}] - P_{B22} \delta F_{B22} T_{B0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{MS0} \\ Z_{B10}^R \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 点から 3 点まで伝達を実行すると初期ベクトル Z_{MS0} ， Z_{B10}^R と点 3 での Z_{MS3} 間の関係は以下のように得られる．

$$\begin{bmatrix} Z_{MS3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{SP3} F_{SP2} F_{SP1} & F_{SP3} [F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12}] + P_{B22}^F F_{B22} T_{B0} \\ \delta F_{SP1} & -P_{B12} \delta F_{B12} \\ \delta [F_{SP2} F_{SP1}] & \delta [F_{SP2} P_{B12}^F F_{B12}] - P_{B22} \delta F_{B22} T_{B0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{MS0} \\ Z_{B10}^R \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)式から境界条件を考慮した座屈方程式が得られる．同様に開断面補剛材についても得られる．

3. 解析結果

本法を用いて，軸方向圧縮力を作用させた種々の補剛材を有する薄肉断面部材の座屈強度および座屈モードについて検討し，その挙動を明らかにした．今回解析を行ったモデルの各諸定数を表 - 1 に示す．表 - 2 では板の曲率について示し，諸定数をこれらにそれぞれ適用するものとする．また，Model1 の解析結果を

図 - 2 に示し，Model3 の解析結果を図 - 3 に示しており，たて軸は座屈係数 ($k = \sigma_x b^2 T / \pi^2 D$)，横軸は形

状比(a/b)を対数表示としている．ここで曲げ剛性 D は， $D = Et^3 / 12(1 - \mu)^2$ で示す．解析を行うにあたって，

通常の板では座屈係数は $k=4.0$ を示し、理論解と合っていることを確認した。補剛材がないシェルでは、曲率が 0.005 の場合 $k=15.5$ を示し、曲率が 0.01 の場合には $k=23.5$ を示した。

図 - 2 は、開断面補剛材を 2 つ有する Model1 ($ts/t=2.0$) の座屈曲線である。曲線(a)では、最小座屈係数は形状比が小さい場合には $k=45.8$ 、大きい場合には $k=28.9$ を示し、形状比が $a/b=1.82$ まで補剛材を節とするような局部座屈がおきており、その時の座屈半波数は $m=6$ である。形状比が大きい場合には板自体の座屈変形が起きている。曲線(b)でも同様な傾向を示しており、最小座屈係数は形状比が小さい場合は $k=47.1$ 、大きい場合は $k=30.5$ を示し、形状比が $a/b=2.20$ まで補剛材を節とするような局部座屈がおきており、その時の座屈半波数は $m=8$ である。曲線(c)でも同様であり、最小座屈係数は形状比が小さい場合は $k=50.7$ 、大きい場合は $k=33.6$ を示し、形状比が $a/b=2.52$ まで補剛材を節とするような局部座屈がおきており、その時

表 - 1 解析モデルの諸定数

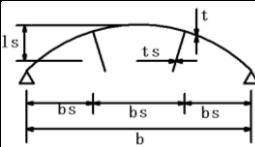
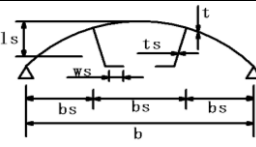
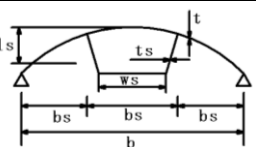
	Model 1	Model 2	Model 3
			
Width (b)	600(mm)	600(mm)	600(mm)
Thickness(t)	7.8(mm)	7.8(mm)	7.8(mm)
Length of stiffener (ls)	80(mm)		
Thickness of stiffener (ts)	5.9(mm), 7.8(mm), 12.0(mm), 23.4(mm)		
Distance of stiffener (bs)	200(mm)	200(mm)	200(mm)
Width of stiffener (ws)	-	53.3(mm)	190(mm)
Length-width radio (a/b)	0.1 ~ 10.0		
Young's modulus (E)	205.8(Gpa)		
Poasson's radio (μ)	0.3		

表 - 2 板の曲率

	(a)	(b)	(c)
Curvature (1/r)	0	0.005	0.01

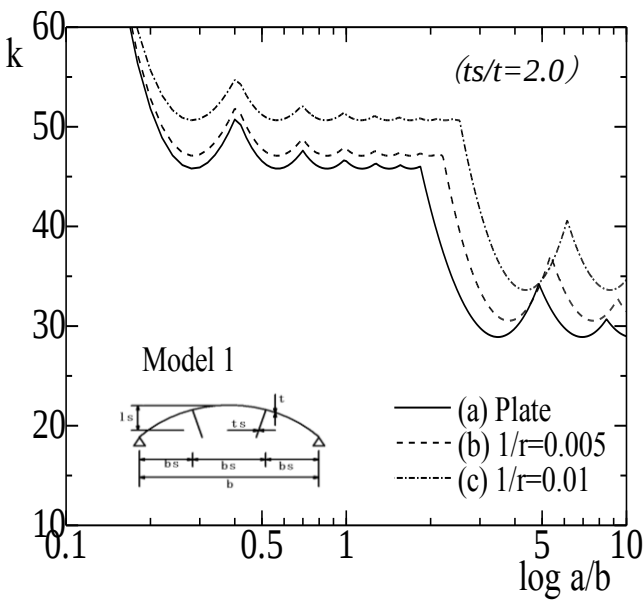


図 - 2 Model 1 の座屈曲線 ($ts/t=2.0$)

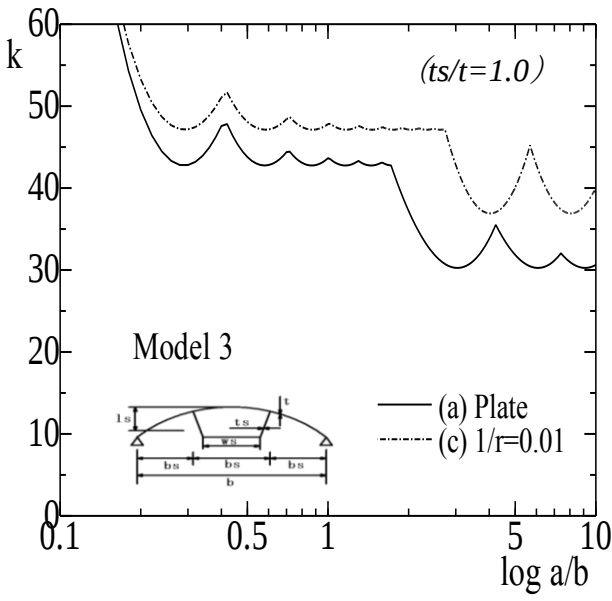


図 - 3 Model 3 の座屈曲線 ($ts/t=1.0$)

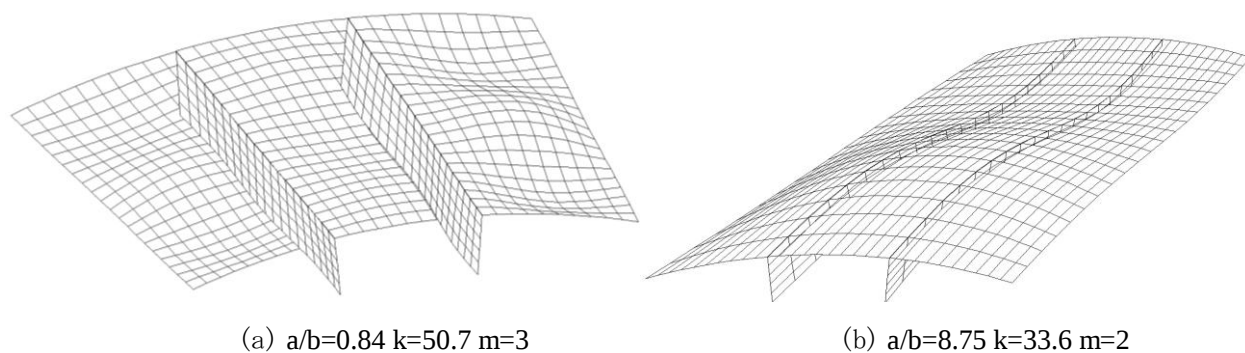


図 - 4 (a), (b) Model 1 (曲率 0.01, 板厚比 $t_s/t=2.0$) の座屈変形図

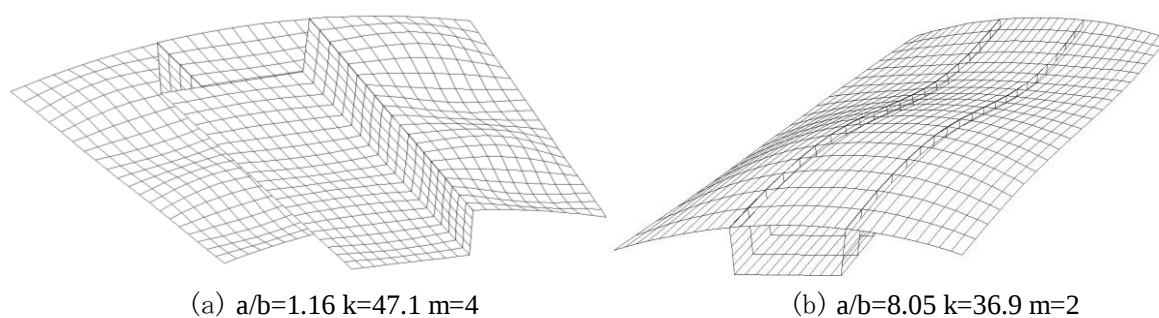


図 - 5 (a), (b) Model 3 (曲率 0.01, 板厚比 $t_s/t=1.0$) の座屈変形図

の座屈半波数は $m=9$ である。図 - 3 は、閉断面補剛材を有する Model3 ($t_s/t=1.0$) の座屈曲線である。曲線(a)では、最小座屈係数は形状比が小さい場合には $k=42.7$ ，大きい場合には $k=30.2$ を示し，形状比が $a/b=1.72$ まで補剛材を節とするような局部座屈がおきており，その時の座屈半波数は $m=6$ である。形状比が大きい場合には板自体の座屈変形が起きている。曲線(c)でも同様であり，最小座屈係数は形状比が小さい場合は $k=47.1$ ，大きい場合は $k=36.9$ を示し，形状比が $a/b=2.72$ まで補剛材を節とするような局部座屈がおきており，その時の座屈半波数は $m=9$ である。

図 - 4(a)(b)は，Model1(曲率 0.01, $t_s/t=2.0$)の座屈変形図である。(a)は形状比が $a/b=0.84$ で座屈係数は $k=50.7$ を示し，座屈半波数は $m=3$ である。(b)は形状比が $a/b=8.75$ で座屈係数は $k=33.6$ を示し，座屈半波数は $m=2$ である。図 - 5(a)(b)は，Model4 (曲率 0.01, $t_s/t=1.0$) の座屈変形図である。(a)は形状比が $a/b=1.16$ で座屈係数は $k=47.1$ を示し，座屈半波数は $m=4$ である。(b)は形状比が $a/b=8.05$ で座屈係数は $k=36.9$ を示し，座屈半波数は $m=2$ である。

4. 結論

本研究では，補剛材を有する薄肉シェルについて伝達マトリックス法を用いて座屈解析を行った。今回の解析結果より，全てのモデルで，補剛材を有していないものより座屈係数は大きくなっており，補剛効果を確認することができた。しかしながら，通常の補剛材とデッキプレートとの比 t_s/t は 0.5~0.8 程度であるが，シェルのデッキプレートではシェル自体の座屈強度が大きいために， t_s/t が小さいと補剛材自身の座屈により，座屈強度が低下する結果も現れた。また，曲率が大きいくほど，板よりも座屈係数は大きく， t_s/t 比により補剛材を節とするような局部座屈（1次局部座屈）が起こる範囲は長くなっており，より補剛効果を確認することができた。これらにより，補剛材を有するシェルが補剛材を有する板より大きな補剛材効果を得るためには，補剛材と主板との板厚比，さらに曲率を考慮しなければならないことが明らかになった。