

室蘭工業大学 正員 岸 徳光
 松岡 健一
 北大 工学部 能町 純雄

1. まえがき

近年、土木、建築構造物においても衝撃荷重に対する安全性の検討が要求されるようになってきた。特に、電力施設構造物の場合はその重要性から世界各国で大規模の耐衝撃実験が行われているようである。米国におけるTornado ミサイル防護壁の耐衝撃実験はそのよい例である。我が国では、電力中央研究所において、種々の耐衝撃性の問題に対処すべく大型耐衝撃実験装置を設置して、電力関連RC構造物の関する系統的な実験が行われている。著者等は、これまで構造物の耐衝撃性に関する基礎的研究として、直線梁部材(複合合成梁を含む)や、円弧梁あるいはリブ付矩形板等に対する小型模型を用いた弾性衝撃に関する実験的研究や解析理論の妥当性について検討を行ってきた²⁾。

ここでは、クーリングタワーや各種容器構造物に代表される回転シェル構造物の耐衝撃性検討に有効と思われる円錐台形の要素を用いた有限帯板理論による解法を試みその妥当性を検討する。

2. 解析理論

回転対称シェルの帯板要素には母線を曲線とする方法もあるが、ここでは直線とする円錐台要素によって定式化することとする。定式化の方法は文献(3)の誘導過程に従って行った。以下にその概要を示す。

(1). 要素の変位仮定 円錐台要素において図-1のように変位成分を仮定する。任意点の変位分布を、面内変位 u , v に対して s の線形変化を、また、法線方向変位 w を3次放物線に仮定すると、 i, j 要素内の各変位は、

$$\left. \begin{aligned} u &= u^{(i)} u_i + u^{(j)} u_j, \quad v = v^{(i)} v_i + v^{(j)} v_j \\ w &= w^{(i)} w_i + w^{(j)} w_j + \rho^{(i)} \rho_i + \rho^{(j)} \rho_j \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし} \quad u^{(i)} &= v^{(i)} = 1 - \xi, \quad v^{(j)} = v^{(j)} = \xi \\ w^{(i)} &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, \quad w^{(j)} = 1(3\xi^2 + 3\xi^3) \\ \rho^{(i)} &= 3\xi^2 + 2\xi^3, \quad \rho^{(j)} = 1(-\xi^2 + \xi^3) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

である。

(2). 歪と変位の関係式 文献(3)に従って各歪成分を変位成分で示すと、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{\partial u}{\partial s}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{\partial v}{r \partial \theta} + \frac{1}{r} \{ u \sin \alpha + w \cos \alpha \}, \quad \gamma_{s\theta} = \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{\sin \alpha}{r} u + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \\ \chi_1 &= -\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}, \quad \chi_2 = -\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\cos \alpha}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial w}{\partial s} \end{aligned} \right\}$$

$$\tau_n = 2 \left\{ -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial s \partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\cos \alpha}{r} \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{r^2} v \right\} \dots (3)$$

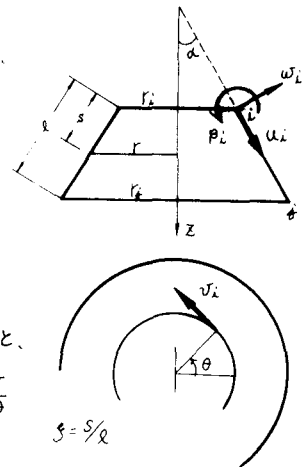


図-1. 円錐台要素の要素座標および変位成分

上式に式(1)を代入して整理すると歪ベクトルは変位の θ に関する2回の微分方程式として得られる。ここで、 θ 方向に有限Fourier変換を施して1次数を減じる。すなわち、 $\gamma_{s\theta}, \tau_n$ に関してはsine変換、他はcosine変換である。部分積分を施して整理すると、歪ベクトルの像関数ベクトルは下式(4)のように示される。ここで、 $\{\bar{C}_m[\cdot]\}$ は有限Fourier変換を意味する

$$\{\bar{C}_m[\varepsilon]\} = [B] \{\bar{C}_m[\delta]\} \dots (5)$$

(3). 断面力と歪の関係式 要素を等方性体と仮定すると、断面力ベクトルは歪成分を用いて容易に表わすことができる。式(5)と同様像関数を用いて示すと、

$$\{\bar{C}_m[F]\} = [D] \{\bar{C}_m[\varepsilon]\} \dots (6)$$

(4) 要素の剛性関係式. 仮想仕事の原理を用いて要素の剛性関係式を求めると, 単位ラジアン当りの要素においては $\{\bar{C}_m[f, r]\} = \int_0^L [B]^T [D] [B] r ds \cdot \{\bar{C}_m[\delta]\} + \int_0^L [N]^T [N] r ds \cdot \{\bar{C}_m[\delta']\}$... (7)

ここで右辺第1項目 積分部分が剛性マトリックス[K], 第2項目が質量マトリックス[M]として示される。

(5) 構造全体の運動方程式. 式(7)を全体座標系へ変換し, カの釣合いと変位の適合条件を考慮して重ね合せを行い, 構造全体の剛性関係式(8)を得る. $[K_{st}]\{\bar{C}_m[\Delta_{st}]\} + [M_{st}]\{\bar{C}_m[\ddot{\Delta}_{st}]\} = \{r\bar{C}_m[P]\}$... (8)

さらに固有値, 固有ベクトルを求め, 直交性を考慮して非連成一次元運動方程式に変換する. Duhamel 積分を施して係関数の基準関数ベクトルを求め, これをθ方向に逆変換することによって真の動的変位が求まる。従って, 歪, 断面力も容易に求めることができる。

(6) 分割による精度の検討(固有値) 半径2.5cm, 厚さ1cm, 長さ2mの鋼製円筒体を用いて, 固有値に関する精度の検討を行った。表-1に円周方向モード次数m=1, スパン中央部に關して対称な変形モードの場合について示している。軸方向モード1のときの理論解は, V=0.0457である。表より, 分割数の増加により, 上方より収束していることが明かである。ただし, Nはハスパンの分割数であり, 数値積分はガウスの求積法を用い, n=5としている。また, 数値はスパンを半波長とする位相速度で示している。

Mode N	2	4	8	16	20
1	0.6266	0.1931	0.0750	0.0507	0.0484
2	3.5242	1.4950	0.6659	0.4529	0.4313
3	25.5178	3.7546	1.8202	1.2415	1.1760

Table 1 Convergence of phase velocity
for M=1 (V=C/Cs)

3. 数値解の例およびまとめ

図-2に半径14.5cm, 長さ1mのアクリル円筒体模型にW=1.9kgの落錐

によって衝撃荷重を載荷した場合の実験値と理論結果(板要素を適用して円を折線近似した方法と, 本文で示した円錐台シェル要素を用いる方法)を示している。理論解析結果は両者ともほぼ同様の分布を示している。実験結果と比較すると, 多少理論値が大きい値を示しているが, 定性的にはほぼ等しいものと考えられる。板要素を用いる方法は, 円筒体の解析に限定されるが, 円錐台要素を用いる場合は構造体も忠実に解析することが可能であり, 特にクーリングタワーや各種容器構造物の解析に非常に有効な方法であると考えらる。

4. 参考文献

- 1) 4th Smirt session 7. (1977)
- 2) H. Takano et al. J.N.C.T.M. Vol.28 (1980) (培風館)
- 3) 川股重也 著「シェル構造解析」
- 4) 岸 徳光 et al. 年譜 1982

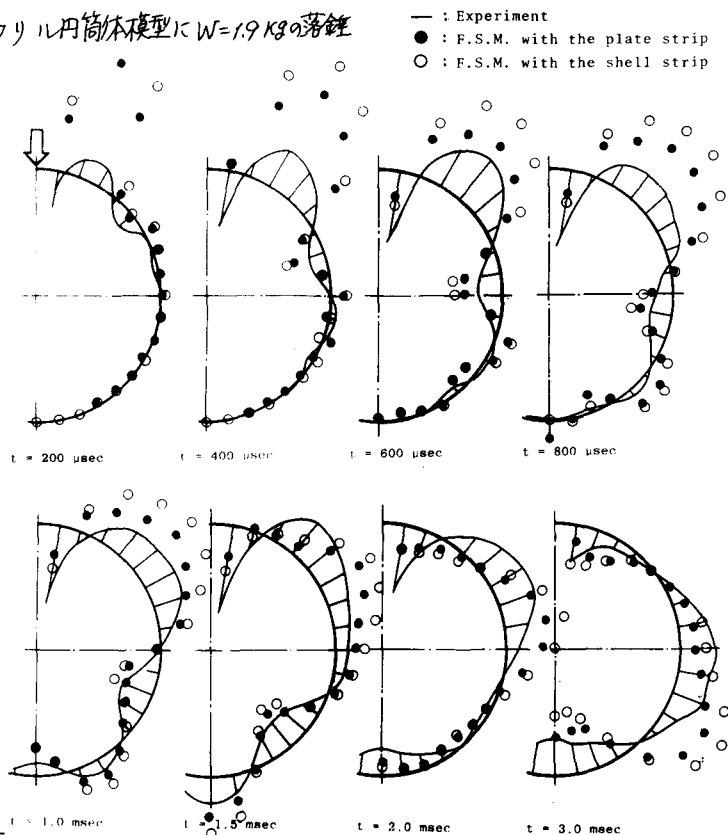


図-2. スパン中央部周方向歪分布の実験結果と理論解析結果との比較