

(株) 神戸製鋼所 正会員 西村 泰久  
 (株) 神戸製鋼所 正会員 頭井 洋  
 (株) 神戸製鋼所 正会員 新教 徹

1. まえがき 平底円筒形貯槽では、その構造的不連続性から、側板とアニミラプレートとの接合部（以下、隅底部と称する）に高い曲げ応力が生じる。また、低温二重殻貯槽のように剛なスラブ上に設置される貯槽では負荷がかかった時に側板直下近傍の底板が部分的に基礎から浮き上がり、接合問題としての取扱が必要となる。軸対称荷重を対象とした隅底部の解析方法は既に提案されているが<sup>1)</sup>、地震荷重のような非軸対称荷重を対象とした解析的手法はほとんど無く、一般には貯槽全体をモデル化し、FEM解析を用いた試行錯誤により浮き上がり長を求めている。本文では、剛基礎上の平底円筒貯槽に地震荷重が作用した場合を対象に、解析的手法による底板の浮き上りを考慮した隅底部応力計算方法を報告するものである。

2. 理 論 解析に用いた主要な仮定は以下の通りである。

- (1) 平底円筒形貯槽は軸対称円筒シエル、および円板から構成されるものとし、側板の板厚は最下段板厚で代表する。ただし、上端座板、ナックル部は十分に剛な円筒シエルに置換する。
- (2) 円筒シエル及び円板の変形は微小であり、線形理論が成り立つものとする。
- (3) 円筒シエル及び円板の微小要素に作用する断面力、座標系を図1のようにとる。
- (4) 底板は面外にのみ変形するものとし、側板下端の半径方向変位、底板の面内変位はいずれも零と置く。
- (5) 地震力による円筒シエル、円板の変形は軸対称成分及び周方向に  $\cos\theta$  分布する成分の重ね合せとして表わされるものとする。
- (6) 底板の浮き上がり範囲は側板下端から中心に向って、底板の鉛直変位、たわみ角および曲げモーメントの軸対称成分と周方向  $\cos\theta$  分布成分の和がいずれも零となる点までとする。

円筒シエルの解 Novozhilov の円筒シエル基礎方程式から、周方向フーリエ級数展開により、軸方向座標のみに関する正規形常微分方程式を導き、更に、これを变形して円筒シエルの8元の正規形常微分方程式が次式で表わされる。

$$\frac{dY_s^{(n)}}{dz} = A_s^{(n)} Y_s^{(n)} + P_s^{(n)} \dots (1), \quad Y_s^{(n)} = \{\bar{w}_s, \bar{u}_s, \bar{v}_s, \bar{N}_z, \bar{Q}_\theta, \bar{Q}_r, \bar{M}_z\}^{(n)T} \quad (n=0, 1)$$

ここで、 $Y_s^{(n)}$  = 未知関数ベクトル、 $A_s^{(n)}$  = 係数マトリックス、 $P_s^{(n)}$  = 荷重ベクトルである。

式(1)の境界値問題の一般解  $Y_s^{(n)}$  は係数マトリックス  $A_s^{(n)}$  の固有値解析に基づく数値計算法により、次式で表わされる<sup>2)</sup>。

$$Y_s^{(n)}(z) = R^{(n)} e^{D_s^{(n)} z} d_s^{(n)} + R^{(n)} e^{D_s^{(n)} z} \int_0^z e^{-D_s^{(n)} \xi} R^{(n)-1} P_s^{(n)}(\xi) d\xi \quad (n=0, 1) \quad \dots (3)$$

ここで、 $d_s^{(n)}$  = 任意の定数ベクトル、 $D_s^{(n)} = A_s^{(n)}$  の固有値を対角成分にもつ  $(8 \times 8)$  のマトリックス、 $R^{(n)} = D_s^{(n)}$  の固有値に対応する固有ベクトル及び主要ベクトルを列成分にもつ  $(8 \times 8)$  のマトリックス

式(1)の第1項は式(1)の同次解であり、第2項は特解で荷重分布  $P_s^{(n)}(\xi)$  がわかれば数値積分より計算される。これより、円筒シエルの変位、断面力が未知定数  $d_s^{(n)}$  を含む形で表示できる。

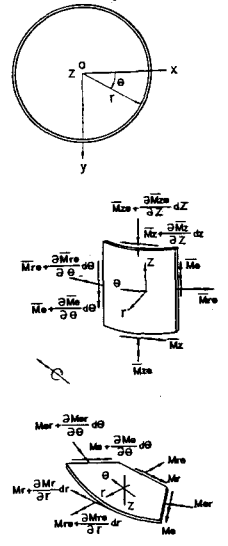


図1 円筒シエル、底円板の座標系と断面力

円板の解 円板の釣合式は弾性支承上（ウイング型の一様バネ支持）の場合も含めて、よく知られており、その一般解は $r \gg 1$ であることを考慮して次式で表わされる。

弾性支承上の解：

$$w_0 = \sum_{n=0}^{\infty} (B_n^1 e^{-\beta^n x} \cos \beta^n x + B_n^2 e^{-\beta^n x} \sin \beta^n x + B_n^3 e^{\beta^n x} \cos \beta^n x + B_n^4 e^{\beta^n x} \sin \beta^n x + P_n/k_B) \cos n\theta, \quad x = R_0 - r \quad \dots (4)$$

浮き上がり部分の解：

$$w_0 = (C_0^1 + C_0^2 r^2 + C_0^3 \log r + C_0^4 r^2 \log r + P_0 r^2/64D) + (C_1^1 r + C_1^2 r^3 + C_1^3/r + C_1^4 r \log r + P_1 r^4/45D) \cos \theta \quad \dots (5)$$

ここで、 $B_n^1 \sim B_n^4$ ,  $C_0^1 \sim C_0^4$ ,  $C_1^1 \sim C_1^4$  = 未知定数,  $4\beta^4 = k_B/D$ ,  $D = Et^3/12(1-\nu)$ ,  $k_B = \bar{b}^2$  定数

式(4), (5)を円板の断面力と変位の関係式に代入すれば、変位、断面力が未知定数を含む形で次式で表わされる。

$$Y_0^{(n)}(x) = A_0^{(n)}(x) d_0^{(n)} + P_0^{(n)}, \quad Y_0^{(n)} = \{w_0, w_\theta, M_r, Q_r\}^{(n)T}, \quad A_0^{(n)}(x) = \text{係数マトリックス}, \quad d_0^{(n)} = \text{未知定数ベクトル} \quad \dots (6)$$

### 隅底部の解析

図2に示す平底円筒形貯槽について、通常運転時の軸対称荷重成分と地震時の周方向  $\cos \theta$  分布荷重成分と重ね合わせた荷重に対して、地震力に対する隅底部応力解析を行うものとする。その際、隅底部の浮き上がりも考慮した支持条件として、図3に示す ④：張出し部先端がヒンジ支持となり、底板、張出し部共に浮き上がる場合、⑤：側板下端がピン支持され、張出し部は弾性支持され、浮き上がりは側板より内側底板のみ生ずる場合、⑥：張出し部は弾性支持され、側板下端は若干沈み込むが、それより内側底板は浮き上がりが生ずる場合の3ケースのモデルを設定する。すなわち、前述の内筒シェル、円板の解析解を以下の境界条件のもとで解き、未知定数  $d_0^{(n)}$ ,  $d_0^{(n)}$  を求め、これより側板、底板各部の変位、断面力を算定する。

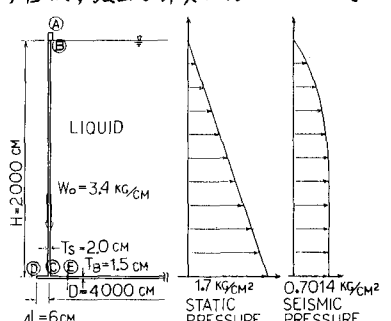


図2 平底円筒形貯槽計算モデル

境界条件： ④ 突(側板上端補剛部)：自由境界,  $\bar{N}_z = \bar{M}_z = \bar{Q}_\theta = \bar{Q}_z = 0$

⑤ 突(側板と補剛部の接続部)：変位, 断面力全てが連続

⑥ 突(側板下端)：  $w_0 = w_\theta = 0$ ,  $w_0^I = w_0^{II} = w_0^*$ ,  $M_r^I - M_r^{II} + M_z = 0$

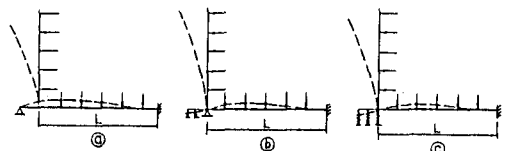
$\bar{U}_s = w_0^I = w_0^{II} = 0$  (⑤の支持条件の場合)

$-\bar{U}_s = w_0^I = w_0^{II}$ ,  $Q_r^I - \bar{N}_z - Q_r^{II} = 0$  (④, ⑥の支持条件の場合)

⑦ 突(張出し先端)：  $w_0^I = M_r^I = 0$  (④の支持条件の場合)

$M_r^I = Q_r^I = 0$  (⑤, ⑥の支持条件の場合)

⑧ 突(浮き上がり開始部)：  $w_0^I = w_0^{II} = M_r^I = 0$



Support condition

図3 隅底部支持条件モデル

ここで Suffix I, II は各々張出し部円板、内側円板の値を示す。また⑤突の条件  $M_r^I = 0$  を除く24個の境界条件は前述の内筒シェル、円板の未知定数に対応し、軸対称成分、周方向  $\cos \theta$  分布成分のいずれについても成り立つものとする。他に未知定数として浮き上がり長 $l$ があり、⑧突での曲げモーメントの和が零となる条件がこれに対応する。収束計算により、本条件を満足する浮き上がり長 $l$ を算定する。

3. 計算例 図2のモデルを対象として、本手法により実施した計算結果の一例を図4に示す。比較の為、FEMによる解(○印)を示した。前者は良く一致しており、本手法の妥当性が検証された。

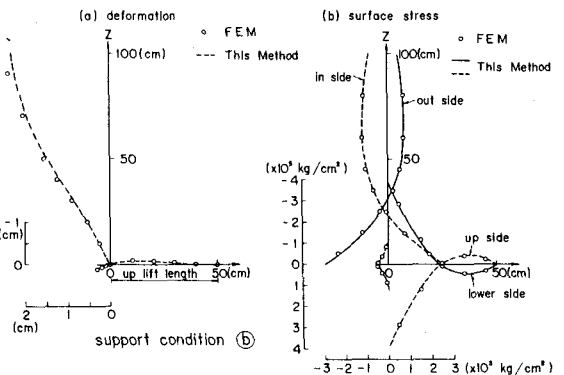


図4 地震荷重(第一設計地震動)による隅底部の変形と応力分布

参考文献 (1) 林健一「隅底部の応力解析」, INI技報, Vol.16, No.4, 1976 (2) 中村孝治「円筒形貯槽の管状シェルモデルの応力解析」, 土木学会論文集, 第271号, 1978