

日本鋼管㈱ 正会員 榊 信 昭
同上 岡 本 隆
同上 長 岡 弘 明

まえがき LPG等貯蔵用平底円筒形貯槽の耐震設計は修正震度法またはモード解析法等が用いられている。ここでは有限要素法によるモード解析法の精度検討を模型振動実験結果を用いて行ったので報告する。

解析手法 貯槽躯体は軸対称の弾性薄肉シェル，内部液体は4辺形4節点アイソパラメトリックリング要素でモデル化する。解析モデルは軸対称構造，非軸対称振動問題として扱い，円筒座標系で表わした変位・動液圧・荷重を円周方向にフーリエ展開し，2次元問題に帰着させている。ここでは液面動揺が問題になる振動数領域より高い振動数領域を対称とするものとして，液面波高は無視できるものとする。貯槽下端は剛な基礎に完全固定されているものとする。振動応答はモード解析を行い，1次モードのみを用いて求める。

貯槽と液体の運動方程式は有限要素法の定式化の方法を用いて次式で表わせる。

$$[M_s]\{\ddot{\delta}\} + [K_s]\{\delta\} = [B_s]\{P\} \quad (1), \quad [K_F]\{P\} = -[A_F]\{\ddot{\delta}\} \quad (2)$$

ここで $[M_s]$ ・ $[K_s]$ ・ $\{\delta\}$ ：貯槽の質量・剛性行列・節点ベクトル， $\{P\}$ ：自由液面上を除く領域の節点動液圧， $[B_s]$ ：動液圧を節点荷重に変換する行列， $[K_F]$ ：液体の運動に関する行列， $[A_F]$ ：液体が接している貯槽の加速度が液体に及ぼす影響を表わす行列である。(1)式の動液圧 P を(2)式を用いて消去すると次式が得られる。

$$[\tilde{M}]\{\ddot{\delta}\} + [K_s]\{\delta\} = 0 \quad (3)$$

ここで $[M] = [M_s] + [B_s][K_F]^{-1}[A_F]$ 水平地震動変位を $U_g(t)$ ，基礎に対する相対変位を $\{\tilde{\delta}\}$ とすると $\{\delta\} = \{\tilde{\delta}\} + \{a\}U_g(t)$ ($\{a\} = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots$) は入力方向を規定するベクトル)となり(3)式は次式となる。

$$[\tilde{M}]\{\ddot{\delta}\} + [K_s]\{\delta\} = -[\tilde{M}]\{a\} \cdot \ddot{U}_g(t),$$

$$[\tilde{M}] = \begin{bmatrix} \tilde{M}_i \\ \tilde{M}_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)式のサフィックス b は下端境界領域を示す。 $[\tilde{M}]$ ， $[K_s]$ の領域 b の自由度を省略し，(4)式の右边を零とおき，固有値解析を行って得られた1次固有円振動数・ベクトルを $\omega_1 \cdot \{\phi_1\}$ とし $\{\tilde{\delta}\} = [\phi_1 \phi_b]^T q_1$ ($\phi_b = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$)とおき，固有ベクトルを質量行列について正規化されているものとする

(4)式より次式が得られる。

$$\ddot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\{\phi_1\}^T [\tilde{M}_i]\{a\} \ddot{U}_g(t) \quad (5)$$

$q_1 = q_0 e^{i\omega t}$ ， $U_g(t) = U_{g0} e^{i\omega t}$ として定常振動応答を考え，1次振動モードに対する減衰率を ξ_1 とすると(5)式

表1 モデル諸元・材料定数

諸 元	数 値
タンク半径	816.5 mm
タンク高さ	2330 mm
最高液面高さ	1800 mm
側板板厚	8.5 mm
液単位体積重量	$1.0 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
側板単位体積重量	$0.92 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
側板ヤング係数	4677 Kg/cm ²
側板ポアソン比	0.35
材 料 減 衰	0.1

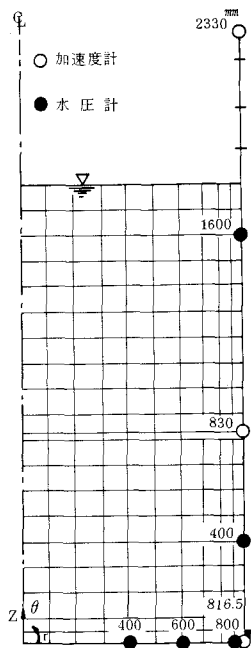


図1 有限要素分割

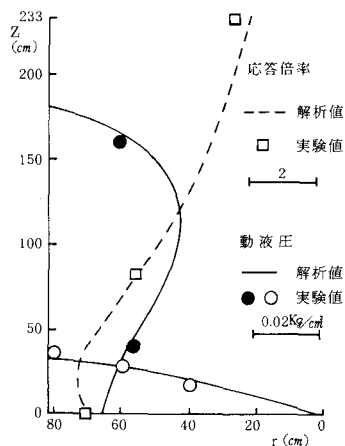


図2 応答倍率・動液圧

表2 固有振動数

実験モデル	実験値	解析値	備 考
その1	6.5	6.1	
	11.8	11.5	水深1000 mm
その2	23.30	23.33	
	14.50	14.39	側板厚1.02 mm 高さ1002.5 mm

から q_1 が次式で表わされる。

$$q_1 = (\{\phi_1\}^T [\tilde{M}_i] \{a\} \omega^2 / (-\omega^2 + 2\xi_1 \omega i + \omega_1^2)) \cdot U g_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

動液圧を求める加速度ベクトルは $\{\ddot{\delta}\} = [L \phi_1 \phi_b]^T \ddot{q}_1 + \{a\} \ddot{U} g(t)$ となり、動液圧は (2) 式より次式で求められる。
 $\{P\} = -[K_F]^{-1} [A_F] \{\ddot{\delta}\} \quad (7)$

模型振動実験及び解析 (その 1) 振動実験は表 1 に示す諸元と材料定数をもつポリエチレン模型貯槽をボルトで固定し、水を入れて水平に加振して、動液圧と加速度を測定した。表 1 の減衰定数は振動台の加振を止めた後の自由減衰振動の対数減衰率から求めた。貯槽は下端から 5 cm の高さまで外周を厚さ 3 mm の鋼板で外側から固定されている。図 1 に加速度計 (歪ゲージ型 AS-2C, 5C)・水圧計 (歪ゲージ型 PML-200GC) の取付位置と有限要素分割を示す。加振方向を $\theta = 0^\circ$ とすると水圧は $\theta = 0^\circ$, 加速度は $\theta = 90^\circ$ の位置の円周方向成分を測定している。1 次固有振動数を実験値と解析値を比較して表 2 に示す。加振振動数 6.67 Hz 時の加速度応答倍率と動液圧分布を図 2 に実験値と解析値を比較して示す。
 (その 2) ここでは文献 2) の模型振動実験結果を用いて、固有振動数・応答倍率・動液圧分布について解析値と比較している。塩化ビニール製の模型貯槽の諸元・材料定数を表 3 に示す。有限要素分割を図 3 に示す。実験値と解析値を比較して、固有振動数を表 2 に、貯槽上端の半径方向 ($\theta = 0$) 加速度応答倍率と位相おくれ角を図 4 に、20 Hz 加振時の動液圧分布を図 5 に示す。動液圧は減衰定数 $\xi_1 = 3\%$ の他 5%, 10% の場合の計算値も同時に示している。同図から適切な減衰定数をとればより精度の良い解析値が得られるものと思われる。

あとがき フレキシブルな側壁をもつ平底円筒形貯槽の振動応答解析方法の精度の検証を固有振動数、応答倍率、動液圧分布について、模型振動実験結果と比較して行い、よい解析精度が得られることを確認した。平底円筒形貯槽の地震時挙動については、ここで示したモード解析結果に対して、時刻歴応答との差、高次モードの影響、基礎の影響等不明な点も多いが、これらは今後の課題としたい。

〔参考文献〕

- 1) J.H.Percy, T.H.H.Pian, S.Klein and D.R.Navaratna (1965): Application of Matrix Displacement Method to Linear Elastic Analysis of Shells of Revolution.
AIAA J., Vol.3, No.11, pp. 2138-2145
- 2) 坂井藤一 (1979) 石油タンクの耐震設計法-API改訂案に関連して, 川崎重工技報, 71号 pp.52-59.

表 3 モデル諸元・材料定数

諸 元	数 値
タンク半径	500 mm
タンク高さ	1001.5 mm
液面高さ	700 mm
側板板厚	1.6 mm
側板ヤング係数	$3.25 \times 10^8 \text{ Kg/cm}^2$
側板単位体積重量	$1.41 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
側板ポアソン比	0.36
液体単位体積重量	$1.00 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
材 料 減 衰	0.03
入 力 加 速 度	98 GAL

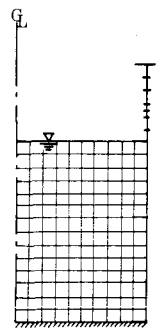


図 3 有限要素分割

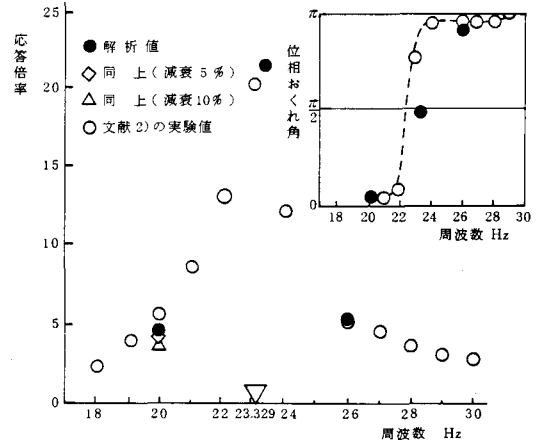


図 4 加速度応答曲線

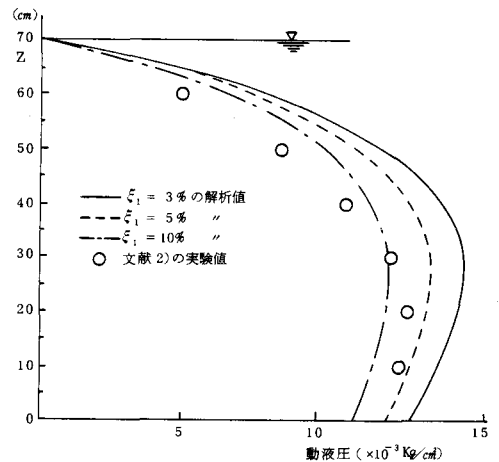


図 5 動液圧分布