

重り付浮屋根を設置した円筒タンクの水平加振に対する応答解析

正会員 ○高 西 照 彦

九州産業大学 フェロー 水 田 洋 司

新日鉄エンジニアリング 正会員 川 口 周 作

クラウンコンサルタント 正会員 松 浦 一 郎

1. はじめに

円筒タンクが地震を受けた場合にその内容液に生ずるスロッシング振動を低減するために、タンク内にバッフルプレートを取付けたり、液面に浮屋根を浮かべたりすることが考えられている。浮屋根に付いては、その円周回りに減衰材等を付加することによって制振作用を高めようとする試みがなされているようであるが、その効果はそれほど大きくはない様である。

本論では、浮屋根の制振作用をより大きくするために、これに1自由度の同調型振動系を取付けた場合について振動解析を行って、その制振機構を明らかにした。さらに、理論解析によって導いた解を用いて数値計算を行い、得られた結果を模型実験によって得られたそれと比較することによって、解析理論の有用性を示した。1自由度の同調型振動系としては種々の型の物が考えられるが、本論では実験の便宜を考慮して図-1に示すような単振子振動系(振子長を変えることによって容易にその固有振動数を変えることができる)を採用した。

2. 解析理論

図-1に示すような円筒タンクが水平振動を受けた場合、その内容液-浮屋根-単振子系の振動に対する厳密解を求めることは困難であるから、本論では以下に示すような仮定及び条件の下でその解析を近似的に行うことにした。

(a) 内容液は完全流体で、渦無し流れである。従って、流体は速度ポテンシャル ϕ を持ち、それはラプラスの式に支配される。

(b) 内容液と浮屋根との相互作用は厳密に考慮するが、振子の重りと内容液との相互作用については、内容液による動水圧が重りに及ぼす影響は考慮する(前論¹⁾ではこの点を考慮しなかった)が、重りが内容液の運動に及ぼす影響については微少であるとしてこれを無視する。

(c) 浮屋根の回転角 β と振子の振れ角 ψ は小さい。

(d) 浮屋根と振子の支点とを結ぶ連結部材である三角錐

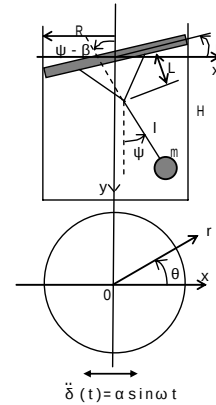


図-1 重り付浮屋根を設置した円筒容器と座標系

トラス(その部材は紡績糸)については、その弾性変形を考慮することにし、その変形量は e を比例係数として、

$$\delta = e(\psi - \beta) \quad \text{によって表される。}$$

(e) 実験においては浮屋根と振子の振れが同方向で、しかも振子の振れ角の方が大きいときは、浮屋根は回転振動に加えて水平方向の運動をも生ずるため、その縁がタンク内壁に当ることになる。このとき両者の間に生ずる摩擦によって浮屋根の振動エネルギーが消費される。本論ではこれを減衰定数の増加によって評価することにした。すなわち、初期減衰定数を $h_{\beta 0}$ 、比例係数を b とすれば、

$$h_{\beta} = h_{\beta 0}(1 + b|\psi - \beta|), \quad \psi\beta > 0, \quad |\psi| > |\beta| \quad (1)$$

上記の仮定及び条件の下で浮屋根と単振子に対する振動方程式を導けば、次式が得られる。

$$(m + \Delta m)\{l(1 + eL/l)\ddot{\psi} + L(1 - e)\ddot{\beta}\} + \bar{c}_{\beta}\dot{\beta} + c_{\psi}\dot{\psi} - F(\psi, \beta) + (m - \rho_w v)g\psi = -m\alpha \sin \omega t \quad (2)$$

$$J\ddot{\beta} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \{R\ddot{\beta} + k_m R \tanh k_m H(\alpha \sin \omega t + g\beta)\} + c_{\beta}\dot{\beta} - (m - \rho_w v)gL(1 - e)(\psi - \beta) = 0 \quad (3)$$

ここに、 R, H, ρ_w :タンクの内径、水深、内容液の密度。 l :振子長。 $a, v, m, \Delta m$:重りとして用いた鉄球の半径、体積、質量、球に対する内容液の付加質量で $0.5\rho_w v$ 。 L :三角錐

キーワード: 円筒タンク 重り付浮屋根 スロッシング振動 理論解析 制振

連絡先: 〒805-0035 北九州市八幡東区山路2丁目4-8 : 093-652-0994

トラスの高さ J : 浮屋根の慣性モーメント $\bar{c}_\beta, c_\beta, c_\psi$: 減衰係数. 単振子と浮屋根の固有振動数を n_ψ, n_β , 減衰定数を h_ψ, h_β としたとき,

$$\begin{aligned}\bar{c}_\beta &= 2h_\beta n_\beta (m + \Delta m)L \\ c_\beta &= 2h_\beta n_\beta \left(J + R \sum_{m=1}^{\infty} A_m \right) \\ c_\psi &= 2h_\psi n_\psi (m + \Delta m)l\end{aligned}\quad (4)$$

k_m は $J'_1(k_m R) = 0$ を満たす m 番目の根. また, $F(\psi, \beta)$ は内容液による動水圧が重りに及ぼす外力で,

$$F(\psi, \beta) = \Delta m \{ 3(L\beta + l\psi)/a + 2 \} (0.5R^2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} k_m d_m \ddot{\beta} \cosh k_m (H - L - l) + \alpha \sin \omega t) \quad (5)$$

$$A_m = \pi \rho_w R^4 (2 \coth k_m H) / \{ k_m^3 R^3 (k_m^2 R^2 - 1) \} \quad (6)$$

$$d_m = 2 / \{ k_m R (k_m^2 R^2 - 1) J_1(k_m R) \sinh k_m H \} \quad (7)$$

入力の加速度振幅 α 及び加振円振動数 ω が与えられたとき, 式(2),(3)に示した微分方程式を同時に満足する解 β, ψ を求めれば, 加振方向の壁面波高の応答値は $\tilde{\eta} = R\beta$ によって得られ, タンクの内容液による加振方向の壁面動水圧は

$$p = -\rho_w \partial \phi / \partial t, \quad r = R, \quad \theta = 0 \quad (8)$$

によって求めることが出来る.

式(2)は式(5)に示すように非線形項 $F(\psi, \beta)$ を含んでいるので, 本論では式(2),(3)に摂動法を適用してこれを解くという方法に従ってその解を求めた.

3. 数値計算結果と実験結果との比較及び考察

模型を用いた振動実験においては, 内径 5.8 cm, 厚さ 1 cm, 高さ 8.0 cm のアクリル製円筒容器に水深が 5.0 cm になるように水を満たして浮屋根を浮べ, これに図 - 1 に示すように単振子を取付けた上, この円筒容器を振動台の上に設置して, 加振加速度を 2 Gal に設定して, 加振振動数を 1.15 Hz から 1.35 Hz まで 0.01 Hz 刻みで増加した場合についてそれぞれスポット加振を行い, 加振方向の最大壁面波高 $|\tilde{\eta}|_{\max}$ 及び加振方向の壁面動水圧 $|p|_{\max}$ を計測した.

浮屋根は直径 5.8 cm, 厚さ 1 cm, 質量 2.66 g の発泡スチロール製円板である. 単振子は錘の直径 4.96 cm, 質量 50.0 g の鉄球である. 振子の長さについては, これを 10 ~ 20 cm に渡っている変えた場合について実験を行った. 浮屋根と振子の支点を結ぶ三角錐トラスの高さは 6.4 cm とした.

壁面波高及び壁面動水圧の応答曲線について得られた結果の一例を図 - 2, 3 に示した. 図 - 2 は浮屋根だけを浮かせた場合である. ●印が波高を, ○印が水深 1.0 cm における動水圧を示している. 両者とも理論値と実験値

とはよく一致していることが分かる. 浮屋根の無い場合の最大波高は 6.7 cm であったことから, 浮屋根はそれ自身多少の制振性を有しているといえる. 図 - 3 は振子長が 12.7 cm の場合である. このとき, 波高と動水圧の応答曲線の形状は共に 2 峰になっており, それは同調型制振系の特徴を示している. 図 - 3 の場合, その振子長が最適振子長の理論値である 12.81 cm に近いことからみて, これは頷ける結果であろう. 図 - 3 から, 動水圧については理論値と実験値とは比較的良く一致しているが, 波高については理論値の方が多少大きくなっていることが分る. しかし, 全体として両者は比較的よく一致しているといっても差支えないであろう. このことから本論の有用性が示されたといえよう. また, 重り付き浮屋根を設置することによって, 波高の最大応答値が約 1/6 に低減されていることから, 重り付き浮屋根の制振装置としての有効性が示されたといえよう.

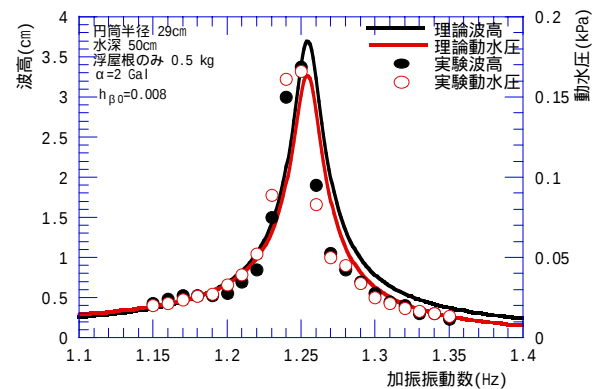


図 - 2 波高と動水圧の応答曲線 (浮屋根のみ)

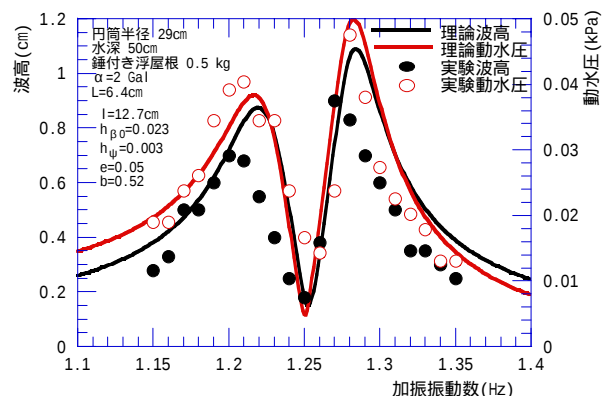


図 - 3 波高と動水圧の応答曲線 (重り付浮屋根)

- 1) 高西・水田・川口・松浦: 錘付浮屋根を設置した円筒容器内容液のスロッシング振動解析, 平成 18 年度土木学会西部支部講演発表会, 2007.3.