

重り付浮屋根を設置した円筒タンクの地震波入力に対する応答

正会員 高 西 照 彦

九州産業大学 フェロー 水 田 洋 司

九州産業大学 博士前期課程 矢 野 健太郎

1. はじめに

著者らは前論¹⁾において、重り付浮屋根の弾性変形を考慮した場合について、それを設置した円筒タンク内容液の水平定常加振に対する振動解析を行い、数値計算によって得られた結果と模型実験によって得られた結果とを比較し、両者が比較的良く一致することを示した。

本論においては、加振入力として地震波を用いた場合について、前論で導いた理論式を用いて数値解析を行い、得られた結果を、模型を用いて行った振動実験から得られた結果と比較することによって、本論の解析法の妥当性に関する検討を行った。

2. 理論式及び解法

図-1に示すような円筒タンクが水平加振を受けた場合の内容液・浮屋根・単振り系に対する振動方程式は、それぞれ(a)振子に対する振動方程式 (b)内容液に対する振動方程式 (c)浮屋根に対する振動方程式を求めることによって得られ、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{X} = -\ddot{\delta}(t)\mathbf{C} \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{B}$ は質量、減衰、剛性の各行列であり、 $\mathbf{C}$ は入力地震波の加速度 $\ddot{\delta}(t)$ に対する係数ベクトルである。 $\mathbf{X}$ は未知変数ベクトルで

$$\mathbf{X} = (\psi \ W_s \ \xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_{N-2})^T \quad (2)$$

ここに、 ψ は振子の回転角、 W_s は浮屋根の点Oにおける回転角、 ξ_s ($s=1, 2, \dots, N-2$)は浮屋根の動的弾性変形を表すための基準座標である。また、 $N-2$ は採用した振動モードの数である。

本論では入力地震波 $\ddot{\delta}(t)$ が与えられた時、式(1)の連立方程式を解くのに、ニューマークの β 法を用いて数値積分を行うことによって、未知変数 $\mathbf{X}$ を求めた。すなわち、時間刻みを Δt とすれば、時刻 $m\Delta t$ と $(m+1)\Delta t$ における $\mathbf{X}_m, \mathbf{X}_{m+1}$ 等の間には次式

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{m+1} &= \dot{\mathbf{X}}_m + (\ddot{\mathbf{X}}_m + \ddot{\mathbf{X}}_{m+1})\Delta t/2 \\ \mathbf{X}_{m+1} &= \mathbf{X}_m + \dot{\mathbf{X}}_m\Delta t + (1/2 - \beta)\ddot{\mathbf{X}}_m\Delta t^2 + \beta\ddot{\mathbf{X}}_{m+1}\Delta t^2 \\ \ddot{\mathbf{X}}_{m+1} &= -\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\delta}_{m+1}\mathbf{C} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{X}}_{m+1} + \mathbf{B}\mathbf{X}_{m+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

が成り立つので、これより刻々の $\ddot{\mathbf{X}}_{m+1}, \dot{\mathbf{X}}_{m+1}, \mathbf{X}_{m+1}$ を求めればよい。初期条件は $\mathbf{X}_0 = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{X}}_0 = \mathbf{0}$ とした。なお、

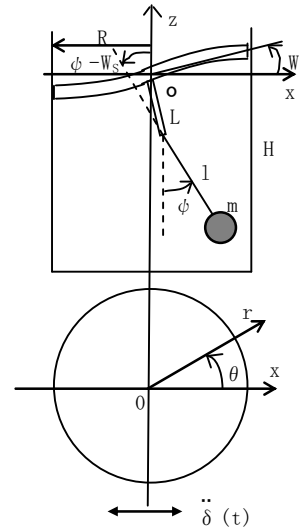


図-1 重り付浮き屋根を設定した円筒タンクと座標系

上式で β は1/6を採用した。

$\mathbf{X}$ が得られれば、円筒タンクに対する壁面動水圧は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} p_{Rm} &= -\rho R \ddot{\delta}_m - \rho R^2 \ddot{W}_s \sum_{l=1}^M \frac{2 \cosh k_l(z+H)}{k_l R(k_l^2 R^2 - 1) \sinh k_l H} \\ &\quad - \rho R \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{l=1}^M \frac{2 \cosh k_l(z+H)}{k_l R(k_l^2 R^2 - 1) \sinh k_l H} D_{lj} \ddot{\xi}_{jm} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 k_l は $J'_l(k_l R) = 0$ を満たす固有値、 D_{lj} はベッセル関数から構成される定数である。

3. 数値計算結果と実験値との比較

模型を用いた振動実験においては、内径58 cm、厚さ1 cm、高さ80 cmの亚克力製円筒容器に水深が50 cmになるように水を満たした後、浮屋根を浮べ、これに図-1に示すように単振りを取付けた上、この円筒容器を振動台の上に設置して、入力地震波として兵庫県南部地震で記録されたKobe EWを用いて加振し、加振方向の壁面動水圧と振動台加速度の時刻暦を計測した。振動台は必ずしも入力地震波を忠実に再現できるとは言い難いので、数値計算には計測によって得られた振動台加速度を擬似Kobe EWとして用いた。なお、このとき、原波形

(Kobe EW) の最大加速度値 619.2 Gal を 57.01 Gal に、継続時間 50 秒をそれぞれ 20,30,40,50 秒の 4 通りに調整して、それらを振動台入力として採用した。

浮屋根は直径 58 cm, 厚さ 1 cm, 質量 266 g, 剛度 0.4125 Nm の発泡スチロール製円板である。単振子は重りの直径 4.96 cm, 質量 500 g の鉄球である。振子の長さについては、これを 11.6~13.6 cm に渡っていろいろ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支柱の長さは 5.3 cm とした。

図-2 に振動台入力加速度である擬似 Kobe EW (継続時間 30 秒) を示した。図-3 はそのフーリエスペクトルを、図-4 は減衰定数 0.05 の場合の加速度応答スペクトルを示したものである。振子長が 12~14 cm の場合、模型円筒タンク構造物の 1 次の固有振動数は 1.22~1.28 Hz の範囲にあるので、図-4 を参照すれば、擬似 Kobe EW を受けた場合には、当該構造物はその応答値が大きくなるという振動性状を有しているといえる。

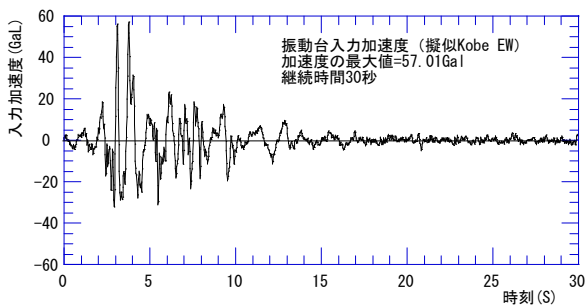


図-2 振動台入力加速度 (擬似 Kobe EW)

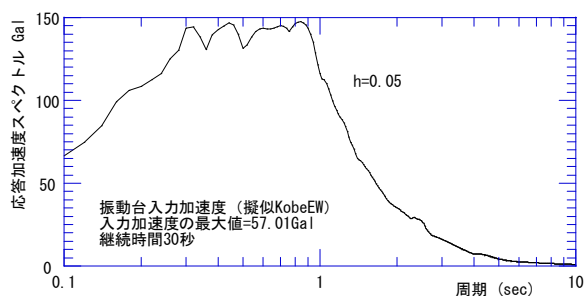


図-3 振動台入力加速度 (擬似 Kobe EW) のフーリエスペクトル

応答計算結果の一例を実験値と比較して図-5 に示した。応答計算ではその積分時間間隔 Δt は、採用した当該構造物の最大振動次数に対する固有周期の $1/3 \sim 1/5$ になるように定めた。また、振動台入力波は 0.02 秒間隔で記録されているので、計算に必要な時間点の加速度が記録されていない場合には、振動台入力波記録の加速度値を

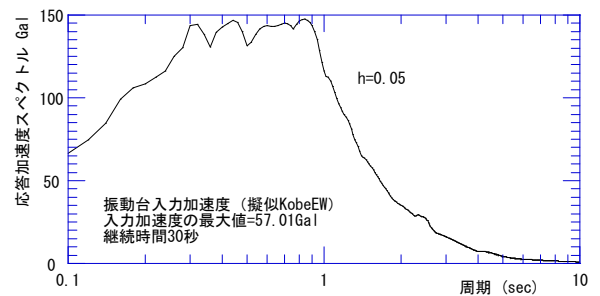


図-4 振動台入力加速度 (擬似 Kobe EW) の加速度応答スペクトル

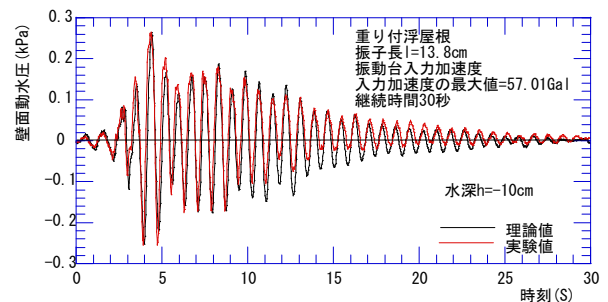


図-5 壁面動水圧の応答曲線

その時間間隔の間で線形補間を行うことによって、新たに得た値を用いた。

図-5 は振動方向の水深 10 cm における壁面動水圧の時刻歴応答を示したもので、黒実線が理論値を赤実線が実験値を表している。同図から、両者の結果は良く一致しているといえる。ただ、時間が 15 秒を経過して、入力加速度が急速に小さくなった所から後に、実験値は動水圧の正の方向に僅かにシフトしているが、ここではそれに対する補正は行わなかった。

なお、ここには示さなかったが、数値計算を行ったその他の実験条件の場合についても、得られた理論値と実験結果とは良く一致していたといってもよい。

これらのことから、著者らの導いた理論式は円筒タンクが定常入力加振を受けた場合及び不規則な地震波入力を受けた場合のいずれについても、当該構造物の応答を算出するのに用いて有用であることが示されたといえよう。

1) 高西・水田・川口：弾性を考慮した重り付浮屋根を設置した円筒タンクの振動解析，土木学会西部支部平成 19 年度研究発表会概要集，2008.3.