

BEMによる長方形同調液体ダンパーの地震応答解析

九州共立大学 工学部 正員	小坪 清真
九州工業大学 工学部 正員	高西 照彦
九州工業大学 工学部 正員	多田 浩
九州工業大学 工学部 学生会員	○古賀 律勝

1. まえがき 著者等が前論¹⁾で行ったBEM(境界要素法)による液体貯槽内容液の振動解析においては、水の自由表面における節点の変動方向は鉛直であり、その速度ポテンシャルは時間だけの関数であると仮定した。しかし、厳密には速度ポテンシャルは場所の関数でもあるので、この事を考慮して解析を行う必要がある²⁾。特に波高が高い場合や、貯槽形状が複雑な場合にはそれがぜひ必要である。そこで本論では、種々の形状を有する液体貯槽内容液に対する振動解析の精度を高めるために、長方形液体貯槽(同調液体ダンパー(TLD)として使われている)を取り上げて、自由表面上の速度ポテンシャルを時間と場所の関数として内容液の振動解析を行った。さらに、長方形TLDの模型を作成し、これを用いた振動実験を行って、得られた結果を理論解析結果と比較した。

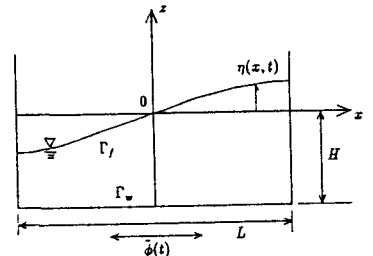


図-1 座標系

2. BEMによる解析理論 いま、図-1に示すようなTLDが強制変位phi(t)を受ける場合を考える。流体は完全流体であり、その運動は非回転であるとすれば、流体の運動を支配する離散化された基礎方程は次のように表される。

$$\frac{\alpha_j}{2\pi} \psi_j + \sum_{\Gamma_f + \Gamma_w} \hat{H}_{ij}^T \psi_j - \sum_{\Gamma_f} n_{yj} G_{ij}^T \dot{\eta}_j = 0 \quad (j = 1 \sim N) \quad (1)$$

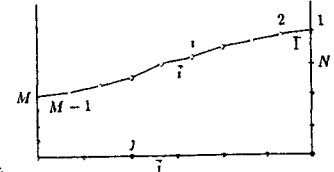


図-2 境界要素と節点

$$l_j F \dot{\psi}_j + \frac{1}{2} l_j n_{yj}^2 B_j \dot{\eta}_j + \frac{1}{2l_j} P \psi_j^T E \psi_j + l_j F \{ \ddot{\phi}(t) x_j + g \eta_j + \mu \psi_j \} = 0 \quad (j = 1 \sim M) \quad (2)$$

ここにphiは速度ポテンシャル、etaは自由液面変位、n_jは境界における外向き法線の方向余弦、gは重力の加速度である。また、

$$\psi_j = \begin{pmatrix} \psi_j \\ \psi_{j+1} \end{pmatrix}, \eta_j = \begin{pmatrix} \eta_j \\ \eta_{j+1} \end{pmatrix}, x_j = \begin{pmatrix} x_j \\ x_{j+1} \end{pmatrix} \quad (3) \text{ 上付添字 } \cdot \text{ は時間に関する微分を表す。}$$

いま、微小時間Delta tにおけるphiとetaの変化をそれぞれDelta phi、Delta etaとすれば、

$$\psi_j^1 = \psi_j^{-1} + \Delta \psi_j^1, \eta_j^1 = \eta_j^{-1} + \Delta \eta_j^1 \quad (4)$$

上付添字1,-1はそれぞれ時刻tおよびt-Delta tにおける物理量を示す。また、etaを時間tの関数、phiを時間tと指定方向変位z* (図-3参照)の関数とみなしTaylor展開を行い、O((Delta t)^2)以上の項を無視すれば、

$$\psi_j^1 = \frac{2}{\Delta t} \Delta \psi_j^1 - \psi_j^{-1} - \frac{2}{\Delta t} \Delta \eta_j^1 \left(\frac{\partial \psi}{\partial z^*} \right)_j^{-1} - \Delta t \dot{\eta}_j^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial z^*} \right)_j^{-1} + \dot{\eta}_j^{-1} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^{*2}} \right)_j^{-1} \right\} \quad (5)$$

$$\dot{\eta}_j^1 = \frac{2}{\Delta t} \Delta \eta_j^1 - \dot{\eta}_j^{-1} \quad (6)$$

ここでpartial phi / partial z*等の算定方法については、以下のとおりである。

$$\frac{\partial \psi}{\partial z^*} = \frac{\partial \psi}{\partial n} \cos(\beta - \theta) + \frac{\partial \psi}{\partial s} \sin(\beta - \theta), \frac{\partial \psi}{\partial n} = \dot{\eta} \cos(\beta - \theta) \quad (7)$$

$$\therefore \frac{\partial \psi}{\partial z^*} = \dot{\eta} \cos^2(\beta - \theta) + \frac{\partial \psi}{\partial s} \sin(\beta - \theta) \quad (8)$$

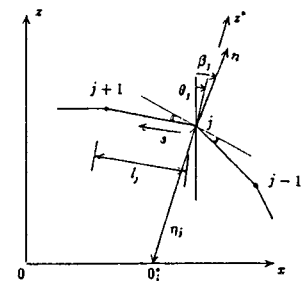


図-3 局所座標系

上式において、 β_j は図-3に示すように、鉛直軸と節点jにおける法線とのなす角である。法線は次のようにして定めた。節点j上の接線は、j点においてその両側の各境界線と求める接線とのなす角がそれぞれ等しくなるように定め、法線はこれに直交するように取った。なお、 θ については、例えば長方形TL Dに対しては、自由表面上の節点は鉛直方向のみに移動を行うと仮定して、 $\theta=0$ としてよい。また、 $\partial\phi/\partial z^*$ の時間1ステップあたりの増分を $\Delta(\partial\phi/\partial z^*)$ とすれば、それはTaylor展開によって、

$$\Delta\left(\frac{\partial\psi}{\partial z^*}\right)_j = \Delta t \left\{ \left(\frac{\partial\psi}{\partial z^*}\right)_j^{-1} + \dot{\eta}_j^{-1} \left(\frac{\partial^2\psi}{\partial z^{*2}}\right)_j^{-1} \right\} + \dots \quad (9)$$

したがって式(5)は

$$\dot{\psi}_j^1 = \frac{2}{\Delta t} \Delta\psi_j^1 - \dot{\psi}_j^{-1} - \frac{2}{\Delta t} \Delta\eta_j^1 \left(\frac{\partial\psi}{\partial z^*}\right)_j^{-1} - \dot{\eta}_j^{-1} \Delta\left(\frac{\partial\psi}{\partial z^*}\right)_j^1 \quad (10)$$

式(3)~(10)の関係式(1)、(2)に代入すれば、 $\Delta\phi_j$ 、 $\Delta\eta_j$ に関する非線形連立方程式が得られる。各時間ステップ毎にこの非線形連立方程式を解くための繰返し計算を行うことによって、式(1)、(2)から $\Delta\phi_j$ 、 $\Delta\eta_j$ を求めることができる。したがって、式(4)より ϕ_j^1 、 η_j^1 の時刻歴応答を得ることができる。

3. 振動実験 実験は、振動台上に長方形TL Dの模型を設置し、正弦波および不規則波で加振して、加速度、水圧、液面変位を測定した。図-4に実験で用いた模型を示す。図中 p_1 は水圧計の取り付け位置を示す。加振加速度は振動台上に取り付けた加速度計で、液面変位は容量式波高計を用いて、水圧は共和電業製PGM-02KGにより計測した。なお、入力波は、正弦波については振動台内蔵のものをを用い、不規則波については日本海中部地震の秋田港における記録(EW成分)を採用した。

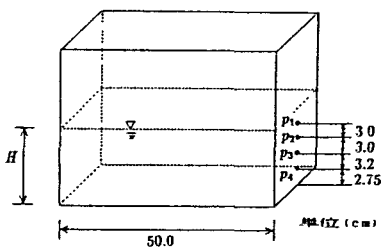
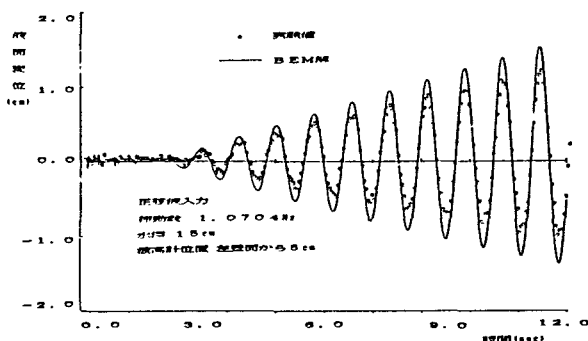


図-4 実験に用いた模型

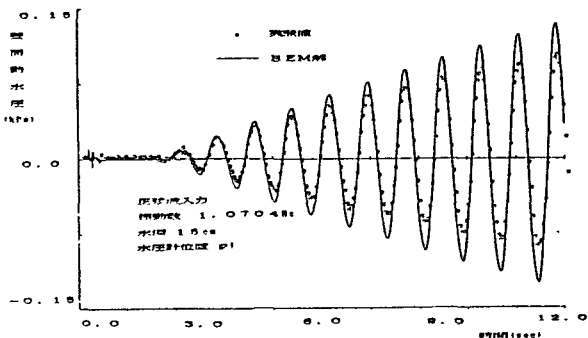
4. 結果および考察

BEMによる計算ではそれぞれ自由表面を50、両側壁をそれぞれ10、底面を25の要素に分割した。BEMによって算出した正弦波入力に対する壁面動水圧および液面変位の時刻歴応答を実験値と比較して図-5に示した。理論計算においても波高が発達すると、液面変位、壁面動水圧はいずれも極大値の方が極小値の絶対値よりも大きくなるという非線形性が表れ、その点に関しては実験値と理論値とはその傾向がよく合っているといえる。しかし、極値における絶対値については、理論値の方が実験値より2割から3割程度大きくなっている。その原因の1つとして、理論計算において側壁の摩擦による影響が全く考慮されていないことが挙げられよう。

- 1) 小坪・高西・多田：境界要素法による液体貯槽の動的応答解析，土木学会西部支部研究発表会，講演論文集，1988.3.
- 2) 大山巧：クノイド波の斜面遡上の境界要素解析，土木学会論文集 第381号/II-7，1987.5.



(a) 液面変位



(b) 壁面動水圧

図-5 BEM解と実験値(正弦波入力)