

清水建設研究所 正員 萩原 運弘

1. まえがき

海中に設置された構造物が地震動を受けて運動する場合、構造物周囲の水の影響を考慮に入れた取扱いを必要がある。この影響はいわゆる付加質量効果であり、これは流体中で運動する物体はその加速度に比例する抵抗を周囲の流体から受けるということに基づく見かけ上の効果であって、水平運動に対しては付加質量が、回転運動に対しては付加慣性モーメントが評価される。従来から、このような研究は船舶流体力学の分野で数多く行なわれてきたが、その主眼が海洋波浪に対する応答解析等に置かれているために、地震時の流体力に直接適用できるものは比較的少ない。本研究は、海中貯油タンクのように任意形状を有する海洋構造物の地震時の流体力について、グリーン関数法により無次元量としての付加質量係数、付加慣性モーメント係数および動水圧係数を求め、若干の考察を加えたものである。

2. グリーン関数による解法²⁾

図-1のように座標系を選び、代表長さ $\bar{a}$ の任意形状の海中構造物が軸方向に速度 $\mathbf{u}$ 、軸回転方向に角速度 $\mathbf{w}$ で微小振幅運動をする場合を考える。速度ポテンシャルを各運動成分の和として $\Phi(\mathbf{X};t) = \sum_{i=1}^6 \bar{w}_i(t) \phi_i(\mathbf{X})$ ($\bar{w}_i(t) = u_i(t)\bar{a}$, $\bar{w}_{i+3}(t) = \omega_i(t)\bar{a}^2$, $i=1,2,3$) で表わせば、 Φ はラプラスの方程式を満足し、 Φ に関する境界条件は次のようになり、

$$\left. \begin{aligned} \partial\Phi/\partial\bar{x}_2 &= 0 \text{ (海底面)}, \quad \partial\Phi/\partial\bar{x}_2 + \frac{1}{g} \cdot \partial^2\Phi/\partial\bar{x}_2^2 = 0 \text{ (自由表面)} \\ \partial\Phi/\partial\bar{n} &= \mathbf{V} \cdot \bar{\mathbf{n}} \text{ (物体表面)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに、 $\mathbf{V} = \mathbf{u} + \mathbf{w} \times \bar{\mathbf{r}}$ 、 $\bar{\mathbf{r}}$ は位置ベクトル、 $\bar{\mathbf{n}}$ は物体表面の外向単位法線ベクトルであり。こうした境界値問題はグリーン関数を持ちて解くことができ、source strength function を $f(\mathbf{S})$ とすれば、速度ポテンシャル $\Phi(\mathbf{X})$ は次のように表わされる。

$$\Phi(\mathbf{X}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S f_i(\mathbf{S}) G(\mathbf{X};\mathbf{S}) dS \dots\dots (2) \quad \text{ここに、} G(\mathbf{X};\mathbf{S}) \text{はグリーン関数、} \mathbf{S} \text{は物体表面上の点} \\ \mathbf{X} = \bar{\mathbf{x}}/\bar{h}, \quad dS = d\bar{S}/\bar{a}^2$$

グリーン関数の表示として、Garrisonらは次の無次元級数形を導いている。即ち、自由表面の境界条件が $\Phi(\mathbf{X}) = 0$ で表わされる場合

$$G(\mathbf{X};\mathbf{S}) = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \left(\frac{1}{R_{2n}} + \frac{1}{R_{4n}} \right) + (-1)^{n+1} \left(\frac{1}{R_{3n}} + \frac{1}{R_{5n}} \right) \right\} \dots\dots (3)$$

自由表面の境界条件が $\partial\Phi(\mathbf{X})/\partial\bar{x}_2 = 0$ で表わされる場合

$$G(\mathbf{X};\mathbf{S}) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{R_{2n}} + \frac{1}{R_{3n}} + \frac{1}{R_{4n}} + \frac{1}{R_{5n}} \right) \dots\dots (4)$$

ここに、 $\eta = \sqrt{(X_1 - \xi_1)^2 + (X_2 - \xi_2)^2}$, $R = \sqrt{\eta^2 + (X_2 - \xi_2)^2}$, $R_1 = \sqrt{\eta^2 + (X_2 + \xi_2)^2}$, $R_{2n} = \sqrt{\eta^2 + (X_2 - 2nh - \xi_2)^2}$, $R_{3n} = \sqrt{\eta^2 + (X_2 + 2nh + \xi_2)^2}$, $R_{4n} = \sqrt{\eta^2 + (X_2 + 2nh - \xi_2)^2}$, $R_{5n} = \sqrt{\eta^2 + (X_2 - 2nh + \xi_2)^2}$, $h = \bar{h}/\bar{a}$

また $f(\mathbf{S})$ は式(2)を物体表面の境界条件式に代入して得られる積分方程式を解くことにより求めることができる。速度ポテンシャル $\Phi(\mathbf{X};t)$ が計算できると、 i モードの物体運動するときの動水圧 P_i 、流体カベクトル $\mathbf{F}_i$ 、モーメントベクトル $\mathbf{M}_i$ は次のように求まる。

$$P_i = -\rho \frac{\partial\Phi_i(\mathbf{X};t)}{\partial t} = -\rho \bar{w}_i(t) \phi_i(\mathbf{X}), \quad \mathbf{F}_i = -\bar{a}^2 \iint_S P_i \bar{\mathbf{n}} dS, \quad \mathbf{M}_i = -\bar{a}^3 \iint_S P_i (\bar{\mathbf{r}} \times \bar{\mathbf{n}}) dS \dots\dots (5)$$

ここに、 $i = 1, 2, \dots, 6$

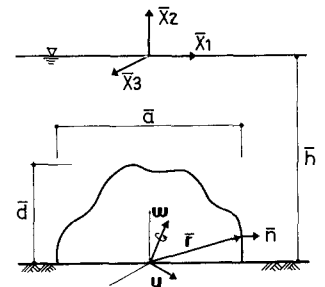


図-1 座標系

3. 計算結果と考察

図-2は円筒タンクの付加質量係数とタンク底版回りの付加慣性モーメント係数を自由表面境界条件の相違すなわち free surface を表わす式(3)および rigidboundary を表わす式(4)を用いて計算したものであり。

タンクが完没してない場合すなわち $\bar{d}/h=1.0$ の値は Garrison & Berkite の計算値をプロットした。図より明らかなように貯油タンクが海中に完没している場合、付加質量係数は式(3)および式(4)の計算値ともタンク直径が大きくなって形状が扁平になる程、小さくなる傾向を示している。またタンクの完没程度を表わす $\bar{d}/h$ による相違は $\bar{d}/a$ の小さい範囲で表われてくる。一方、タンク底版回りの付加慣性モーメント係数はタンクの扁平度が増すにつれ $\bar{d}/a=1.0$ 付近まで減少するが、それ以後は逆に増加する傾向を示している。またタンクの完没程度による相違はほとんど表われていない。図-3は矩形タンクの付加質量係数とタンク底版回りの付加慣性モーメント係数を図-2と同様2つの自由表面境界条件に対して計算したものであり。矩形タンクの付加質量係数および付加慣性モーメント係数は同円筒タンクの場合と類似な傾向を示している。図-4は完没した矩形タンクが水平運動および回転運動をする場合の動水圧係数の分布である。動水圧は断面設計用荷重として用いられるが、回転運動による動水圧は水平運動によるものに比較して、かなり小さい。また上田らは完没してない複数の矩形貯油タンクが矩形格子状に等間隔で設置された場合について、3次元有限要素法を用いて付加質量係数、付加慣性モーメント係数および動水圧係数を計算し、矩形タンクが単独に海中に設置された場合と比較している。その結果タンクの半辺の距離だけ離せばタンク相互の影響がなくなり単独に設置された場合と等しくなることを示している。タンクが完没している場合も動水圧分布から類似の傾向を示すものと思われる。一方海水は圧縮性を有するから、ある条件下では海中で振動する構造物にもその影響がおよぶものと考えられる。後藤⁴⁾から水中橋脚に対して図-5の関係を示している。貯油タンクが大水深地点に建設される可能性を考えれば、この影響を考慮した解析が必要となる。

参考文献 1) 松浦義一：船体振動と付加質量，土木学会水工学に関する夏期研修会講義集，1973

2) C.J. Garrison, R.B. Berkite: Hydrodynamic Loads Induced By Earthquakes, O.T.C., 1972

3) 上田真純他：海洋着底方式貯油タンクの地震時挙動に関する研究，建築学会学術講演梗概集，昭51

4) 後藤尚男，土岐憲三：水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究，土木学会論文集100号，昭38

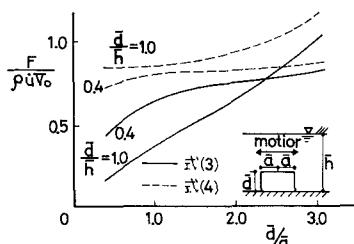


図-3 (a) 付加質量係数 (矩形タンク)

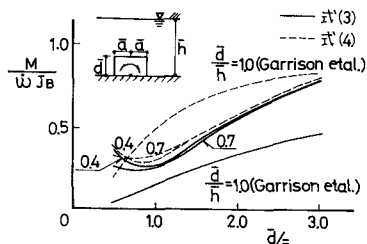


図-2 (b) 付加慣性モーメント係数 (円筒タンク)

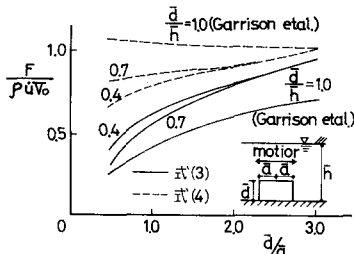


図-2 (a) 付加質量係数 (円筒タンク)

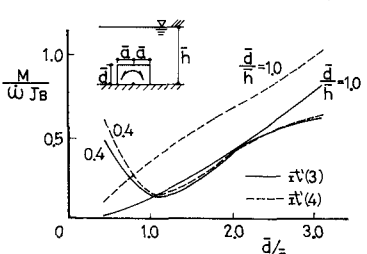


図-3 (b) 付加慣性モーメント係数 (矩形タンク)

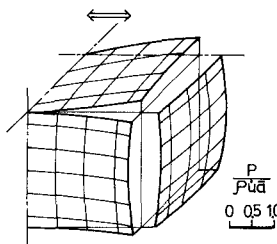


図-4 (a) 動水圧係数の分布 (水平運動)

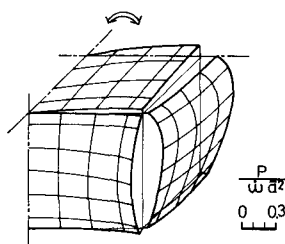


図-4 (b) 動水圧係数の分布 (回転運動)

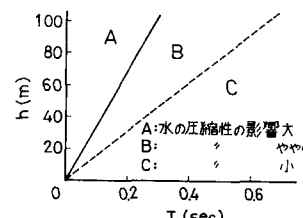


図-5 水の圧縮性の影響 (後藤・土岐)