

杭・ヒンジ固定型浮防波堤の防波効果に関する解析的研究

九州大学工学部
九州大学工学部
運輸省第四港湾建設局

学生員〇三宅 司
正会員 吉田 明徳
正会員 和田 信

山岡 貴司

1. はじめに

没水水平板が、その板長や没水深を適切に設定してやることにより、比較的波長の長い波に対して消波効果があることはよく知られている。著者らは、沿岸域の高度で多様な利用に伴い、海水交換を妨げず海域を静穏にする消波構造物としてヒンジと杭によって水平板を係留する方式を考案した。この構造物が比較的良い波浪制御効果を有することが、山岡らの実験(1996)によって検証された。しかしながら、杭・ヒンジ固定型浮防波堤の波浪制御効果や作用波力は、浮体間隔、水平板の板長、没水深、及び入射波の周期等種々の条件によって異なるため、波浪制御や構造条件を実験的に検討するのは困難である。

そこで本研究では、グリーン公式によってポテンシャルを表示し、これと水平板の運動方程式とを連立して解く方法によってこの杭・ヒンジ固定型浮防波堤の防波効果、波力、波による動揺等の特性を解析的に調べることを目的とする。

2. 理論解析の概略

図1に示すような、一定水深 h の海域にある浮体構造物に x 軸の正の方向より、角周波数が σ 、振幅が ζ_0 の規則波が入射する場合を考える。構造物は2個の円柱浮体と1個の没水水平板からなり、円柱と水平板は互いに剛結されているものとする。

浮体はヒンジBで剛なアームABに連結され、アームはヒンジAを介して海底に固定された杭に連結されている。したがって、浮体にはB点周りとA点周りの回転運動が同時に生じることになる。

流体運動は非圧縮で非粘性の完全流体による無渦運動と仮定すると、流体運動には速度ポテンシャルが存在し、 $\Phi(x, z, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) e^{i\sigma t}$ と表せる。

図2に示すように、 $x = \pm l$ における水面から水底面までの仮想境界面、および $x = \pm b$ における水面から水平板の没水深 ($z = -h'$) までの鉛直仮想境界面と、没水深における水平仮想境界面によって、流体域を(0)、(1)、(2)、(3)の4領域に分割する。

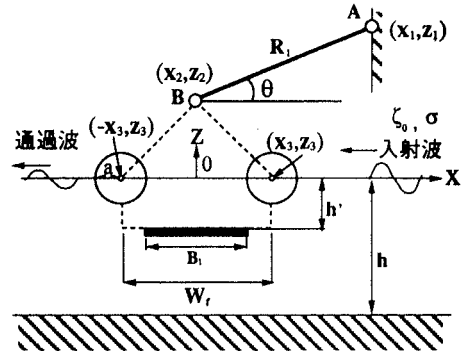


図1: 杭・ヒンジ固定型浮防波堤の概略

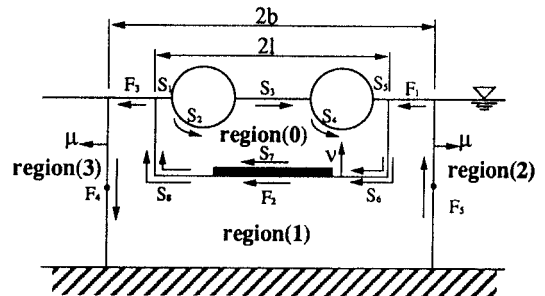


図2: 領域の分割

いま、仮想境界面 $x = \pm l$ を、浮体近傍の停止散乱波が十分減衰する位置まで離して設けると、開領域(2)には入射波と反射波、領域(3)には通過波の進行波のみが存在する。このとき、領域(2)、(3)のポテンシャル関数 $\phi(x, z)$ は、複素反射率 A と複素通過率 B を用いて解析的に表せる。

一方、ラプラス方程式を満足する調和関数に関するグリーンの定理より、閉領域(0)のポテンシャル関数 $\phi_0(x, z)$ と領域(1)のポテンシャル関数 $\phi_1(x, z)$ は、次のグリーンの公式によって表すことができる。

$$\phi(x) = \frac{1}{\alpha} \int_D \left\{ \phi(X_b) \frac{\partial}{\partial \nu} G(r) - G_0(r) \frac{\partial}{\partial \nu} \phi(X_b) \right\} ds \quad (1)$$

ヒンジAおよびヒンジB周りの回転運動の振幅と位相を表す複素振幅をそれぞれ、 ω_1 、 ω_2 とすると、任意時刻におけるアームと浮体の回転変位はそれぞれ $\omega_1 e^{i\sigma t}$ 、 $\omega_2 e^{i\sigma t}$ で表され、任意時刻における浮体表面の水粒子の速度 u 、 w は次式で表される。

$$u(x, z, t) = i\sigma \{-(z_1 - z_2)\omega_1 + (z - z_2)\omega_2\} e^{i\sigma t} \quad (2)$$

$$w(x, z, t) = i\sigma \{(x_1 - x_2)\omega_1 - (x - x_2)\omega_2\} e^{i\sigma t} \quad (3)$$

また各領域の境界条件は次式で与えられる。

●自由表面 S_1 , S_3 , S_5

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} = -\frac{\sigma^2}{g} \phi_0 \quad (4)$$

●浮体表面 S_2 , S_4 , S_7 , F_2

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} = -\frac{\sigma^2}{g} \left\{ \frac{(x_1 - x_2)}{R_1} \frac{dx}{ds} + \frac{(z_1 - z_2)}{R_1} \frac{dz}{ds} \right\} \frac{\omega_1 R_1}{\zeta_0} - \frac{\sigma^2}{g} \left\{ \frac{(x - x_2)}{B_1} \frac{dx}{ds} + \frac{(z - z_2)}{B_1} \frac{dz}{ds} \right\} \frac{\omega_2 B_1}{\zeta_0} \quad (5)$$

●仮想境界面 S_6 , S_8

$$\phi_0 = \phi_1, \quad \frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_1}{\partial \mu} \quad (6)$$

●仮想境界面 F_5 , F_4

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \{e^{ikb} + Ae^{-ikb}\} Z(k, z) \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial \mu} &= ik \{e^{ikb} - Ae^{-ikb}\} Z(k, z) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \{Be^{-ikb}\} Z(k, z) \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial \mu} &= -ik \{Be^{-ikb}\} Z(k, z) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

運動方程式について

浮体に作用する波力は流体圧力 $P(x, z) e^{i\sigma t} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -i\rho g \zeta_0 \Phi(x, z) e^{i\sigma t}$ を堤体表面に沿って積分することによって求められる。浮体に作用する波力の水平合力を F_x 、鉛直合力を F_z とする。またA点周りの回転によって生じる浮体の鉛直変位を Δz とすると、これによる浮力は $F_{zs} e^{i\sigma t} = -2 \cdot \rho g 2a \Delta z = -4\rho g a (x_1 - x_2) \omega_1 e^{i\sigma t}$ である。したがって波力によって生じるA点周りの回転モーメント $M_1 e^{i\sigma t}$ 、静水圧変化による復元モーメント $M_1^s e^{i\sigma t}$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} M_1 &= F_z R_1 \sin \theta - F_x R_1 \cos \theta \\ &= -i\rho g \zeta_0 \left[\oint_{S_2} + \oint_{S_4} + \oint_{S_7} \right] R(x, z) \Phi_0(x, z) ds \\ &\quad + i\rho g \zeta_0 \oint_{F_2} R(x, z) \Phi_1(x, z) ds \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M_1^s &= F_{zs} \cdot (x_1 - x_2) \\ &= -4\rho g a (x_1 - x_2)^2 \omega_1 \end{aligned} \quad (10)$$

よって、A点周りの慣性モーメントを I_1 と表すと、運動方程式は次式で表される。

$$I_1 \frac{d^2}{dt^2} \{\omega_1 e^{i\sigma t}\} = M_1 e^{i\sigma t} + M_1^s e^{i\sigma t} \quad (11)$$

式(9)、(10)を代入して整理すると、結局A点周りの運動方程式として次式を得る。

$$\begin{aligned} -i \left[\oint_{S_2} + \oint_{S_4} + \oint_{S_7} \right] R(x, z) \Phi_0(x, z) ds \\ + i \oint_{F_2} R_A(x, z) \Phi_1(x, z) ds + G_1 \frac{\omega_1 R_1}{\zeta_0} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

同様にB点周りの運動方程式は、次式で表される。

$$\begin{aligned} -i \left[\oint_{S_2} + \oint_{S_4} + \oint_{S_7} \right] R_B(x, z) \Phi_0(x, z) ds \\ + i \oint_{F_2} R_B(x, z) \Phi_1(x, z) ds + G_2 \frac{\omega_2 B_1}{\zeta_0} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 G_1 、 G_2 は慣性モーメントとA点とB点の座標で決まる定数で、一方、 $R_A(x, z)$ 、 $R_B(x, z)$ は次式で表される。

$$R_A(x, z) = (x_1 - x_2) \frac{dx}{ds} + (z_1 - z_2) \frac{dz}{ds} \quad (14)$$

$$R_B(x, z) = (x_2 - x) \frac{dx}{ds} + (z_2 - z) \frac{dz}{ds} \quad (15)$$

離散化したグリーン式に境界条件を用いると、要素上のポテンシャル関数値と未知量、複素反射率A及び複素通過率Bに関する一次関係式が得られる。これと離散化した運動方程式を連立して解くことにより、境界上のポテンシャル値、反射波と通過波の未定係数A、Bおよび回転変位 $\frac{\omega_1 R_1}{\zeta_0}$ 、 $\frac{\omega_2 B_1}{\zeta_0}$ が決まる。浮体に作用する波力や、領域(0)(1)内の任意点におけるポテンシャル値は、これらの境界上のポテンシャル値を用いて算定される。

3. あとがき

現在、計算プログラムの作成検討を行っており、解析の結果は講演会で述べる予定である。

参考文献

- 1) 山岡 貴司 (1996) : 杭係留による浮遊式没水水平板の波浪制御効果に関する実験的研究: 第57回年次学術講演会論文集。
- 2) 村上 啓介 (1997) : グリーン公式を用いたストークス波と海岸構造物の非線形干渉解析法に関する研究: 九州大学学位論文。