

清水建設(株) 正員 小林 浩
清水建設(株) 正員 ○萩原 運弘

1. まえがき

海中あるいは海面付近の構造物により波の散乱や同時に作用する波力の問題は、速度ポテンシャルを仮定したラプラス方程式やグリーン関数の境界値問題として解くことができる。ここでは井島によってこの種の問題に適用されたポテンシャル続法を応用して、複数の水平板および柱体からなる護岸あるいは防波堤の消波特性と作用波力について数値解析を行った結果について述べる。

2. 理論式

図-1のように座標系をとり、各領域の速度ポテンシャルを $\Phi_m = \phi_m(x, z)e^{i\omega t}$ ($m=1, 2, 3$) の形で表わすと、 ϕ_m は各領域の境界条件を満たすラプラスの方程式の一般解として次のように求まる。

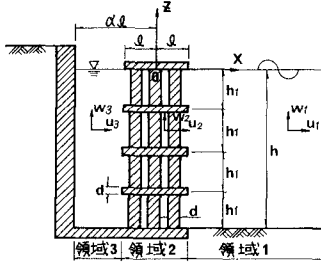


図-1 モデル

$$\phi_1(x, z) = (Ae^{ik(x-l)} + Be^{-ik(x-l)}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-kn(x-l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (1)$$

ここに k および k_n は次式より決まる波数である。

$$kh \tanh kh = -k_n h \tan k_n h = \omega^2 h / g \quad (2)$$

$$\phi_2^{(j)}(x, z) = \sum_{r=0}^{\infty} \left(D_r^{(j)} \frac{\cosh R_r x}{\cosh R_r l} + E_r^{(j)} \frac{\sinh R_r x}{\sinh R_r l} \right) \times \cos R_r(z+jh_1), \quad jh_1 < z < (j+1)h_1 \quad (3)$$

ここに j は領域2の水平板間の部分の細分表示で海面に近い方より $j=1, 2, 3, 4$ とする。また $R_r = \sqrt{k^2 - k_n^2}$ である。

$$\phi_3(x, z) = F \frac{\cos k(x+dl)}{\cos(d+1)k_n l} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \frac{\cosh k_n(x+dl)}{\cosh(d+1)k_n l} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (4)$$

防波堤の場合 ($\alpha l = -\infty$) には、上式は

$$\phi_3(x, z) = F e^{ik(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n e^{k_n(x+l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (5)$$

となる。

いま、領域2において空疎率を ε 、平均流速を u_2 , w_2 、流体圧力を P_2 、密度を ρ 、重力加速度を g 、また流速の2乗に比例する抵抗係数を μ およびそれを線形化した流速に比例する抵抗係数を μ' とすると、流体運動の連続および運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial w_2}{\partial z} &= 0 \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x} - \mu u_2^2 \doteq -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x} - \mu' u_2 \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial w_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial z} - g - \mu w_2^2 \doteq -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial z} - g - \mu' w_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

この領域では速度ポテンシャル Φ_2 をもつから、流速および圧力は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \partial \Phi_2 / \partial x, \quad w_2 = \partial \Phi_2 / \partial z \\ P_2 &= i\sigma \rho \beta \Phi_2 - \rho g z \\ \text{ただし } \beta &= (1 - i\varepsilon \mu' / \sigma) / \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また領域1, 3での流速および圧力は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \partial \Phi_m / \partial x, \quad w_m = \partial \Phi_m / \partial z \\ P_m &= -i\sigma \rho \Phi_m - \rho g z \quad (m=1, 3) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(1)(3)(4)あるいは(5)で示される速度ポテンシャルは $x = \pm l$ で連続する流体運動を表わし、その連続性は水平流速と圧力が等しいことで保証される。即ち次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} x=l \text{ で } \quad \partial \Phi_1 / \partial x &= \partial \Phi_2^{(j)} / \partial x, \quad \Phi_1 = \beta \Phi_2^{(j)} \\ x=-l \text{ で } \quad \partial \Phi_3 / \partial x &= \partial \Phi_2^{(j)} / \partial x, \quad \Phi_3 = \beta \Phi_2^{(j)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

($j=1, 2, 3, 4$)

式(9)に式(1)および式(3)~(5)を代入し、完全直交系の性質を利用して z について積分すると、速度ポテンシャルの係数に関する連立方程式が得られる。この方程式を解けば各領域の速度ポテンシャル Φ_m ($m=1, 2, 3$) が確定し、所要の物理量を求めることができる。

ここで式(6)において用いられる μ と μ' の関係は流速を $u_2 = u_0 e^{i\omega t}$ とおけば、次式のように表わされる。

$$\mu' = \frac{8}{3\pi} \frac{u_0}{\varepsilon} \mu \quad (10)$$

また、水平板および多列円柱の抵抗係数 μ としては次のものを用いる。

水平板；

$$\mu = C_0/2d, \quad C_0 = 0.455/\log(2\ell u_0/\nu)^{2.58} \quad \text{---(11)}$$

99列円柱；

$$\left. \begin{aligned} \mu &= 2C_0/(3\pi d'N) \\ C_0 &= 0.62 \cdot N(u_0 d'/\nu)^{0.031} \quad (1 \text{ 列目}) \\ C_0 &= 7.80 \cdot N(u_0 d'/\nu)^{0.29} \quad (2, 3 \text{ 列目}) \end{aligned} \right\} \quad \text{---(12)}$$

ここに、 ν ：動粘性係数、 N ：柱体の本数である。

計算に使用する μ は流速の関数であり、したがって実際の計算では、まず適当な堤体内流速 u_0 を仮定して μ を求め、この μ に対する堤体内流速が初め仮定した値と一致することを確認して計算を進めるものとする。

以上により求められた護岸および防波堤の諸量は次のようになる。

1) 反射率 K_R 、透過率 K_T

$$K_R = |B/A|, \quad K_T = |F/A| \quad \text{---(13)}$$

2) 透過性堤体に作用する水平力 $P_H^{(1)}$

$$\frac{P_H^{(1)}}{\rho g a h} = 2 \frac{h}{\lambda} \left(\beta^{(1)} \frac{E_0^{(1)}}{A} + \beta^{(2)} \frac{E_0^{(2)}}{A} + \beta^{(3)} \frac{E_0^{(3)}}{A} + \beta^{(4)} \frac{E_0^{(4)}}{A} \right) \quad \text{---(14)}$$

護岸の場合には遊水部鉛直壁面にも水平力 $P_H^{(2)}$ が作用

$$\text{する。} \quad \frac{P_H^{(2)}}{\rho g a h} = \frac{\sigma^2 h}{g} \left[\frac{1}{\lambda_0^2 \cos(\lambda_0 \ell)} \frac{F}{A} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2 \cosh(\lambda_n \ell)} \frac{G_n}{A} \right] e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad \text{---(15)}$$

ここに $\lambda_0 = k h$, $\lambda_n = k_n h$, a は入射波振幅である。

したがって護岸全体に作用する全水平力は

$$\frac{P_H}{\rho g a h} = \frac{P_H^{(1)}}{\rho g a h} + \frac{P_H^{(2)}}{\rho g a h} \quad \text{---(16)}$$

3) 透過性堤体に作用する鉛直力 P_V

水面の板には揚圧力 $P_V^{(1)}$ が作用するが、水中の板に対しては板の上下面に作用する波圧の合力として $P_V^{(2)}$ が作用する。

$$\frac{P_V^{(1)}}{2\rho g a \ell} = \beta^{(1)} \left[\frac{D_0^{(1)}}{A} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{D_n^{(1)}}{A} \frac{\tanh R \ell}{R \ell} \right] e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad \text{---(17)}$$

$$\frac{P_V^{(2)}}{2\rho g a \ell} = \beta^{(2)} \left[\frac{D_0^{(2)}}{A} - \frac{D_0^{(3)}}{A} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{D_n^{(2)}}{A} \frac{\tanh R \ell}{R \ell} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n^{(3)}}{A} \frac{\tanh R \ell}{R \ell} \right] e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad (\bar{j}=2, 3, 4) \quad \text{---(18)}$$

透過堤体と後部鉛直壁が底部床板により一体化された護岸では三角分布の揚圧力 $P_V^{(3)}$ が上向きに作用すると考

$$\text{える。} \quad \frac{P_V^{(3)}}{\rho g a (d+1)\ell} = \frac{1}{2} \beta^{(4)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{D_n^{(4)}}{A} + \frac{E_n^{(4)}}{A} \right) e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad \text{---(19)}$$

故に護岸全体に作用する全揚圧力 P_V は式(18)~(20)の和として表わされる。

3. 数値計算例

図-2は反射率 K_R に対する透過堤体幅 B_1 と遊水部幅 B_2 の関係を示したものであり、遊水部がない場合には、背後の不透過壁と水平板による内部

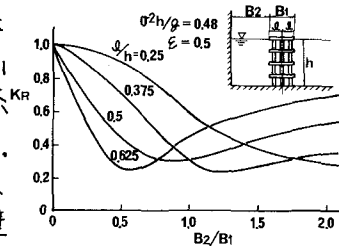


図-2 反射率

での水の運動に伴うエネルギーの損失のみが反射率に影響するが図-2の条件では反射率は1.0に近い。しかし、遊水部をもうけると反射率を最小にする遊水部幅が存在するようになる。次に式(14)~(16)で表わされる水平力

の時間変化

を図-3に示

す。 $P_H^{(1)}$ の極

大は $\sigma t = 300^\circ$

で現われて

おり、また

$P_H^{(2)}$ の極大は

$\sigma t = 90^\circ$ で

おこっている。

したがって、

両者の位相差は

約 150° になり、

これらの合成力である

P_H はこの位相差

のために互いに打ち消し合うように作用し、

$\sigma t = 20^\circ$ で

極大を示す。

$P_H^{(1)}$ と $P_H^{(2)}$ の極大値を位相差を考慮しないで

加えたものに比べて、

その値は約 $1/2$ に減少している。

図-4は護岸全体

に作用する全揚

圧力 P_V の最大値

を示したもので

あり、全揚圧力

は遊水部を大き

くすることによ

り減少し、一定値に

漸近している。特に

遊水部幅が狭い

ときには透過堤体幅

が小さい方が大きな

揚圧力を受けてい

る。この傾向は水平

力の場合も同様にな

っており、透過堤体

幅と遊水部幅を適当

にとることにより護

岸全体に作用する揚

圧力、水平力を小さ

くできることがわ

かる。

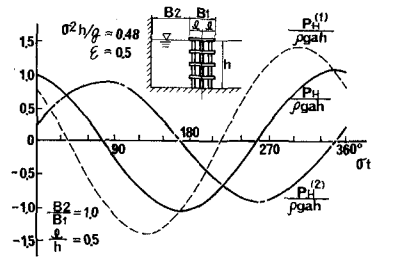


図-3 水平力の時間的変化

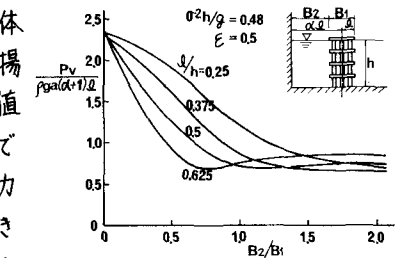


図-4 揚圧力