

縦スリット式防波堤の消波特性

九州大学工学部 正会員 小島治幸、井島武士

学生員 田口陽一、安永達朗

1. まえがき 近年、港湾内の水質保全及び堤体前面での反射波の軽減等の見地から各種の透過性防波堤の必要性が高まっており、各地で建造され始めているが、一般的な断面構造や形状についての算定方法はいまだ確立しておらず、模型実験に委ねられている。本研究では、透過性防波堤の一種である縦スリット型防波堤の水理特性の算定方法を確立する第一段階として、それを決定する一要因である流体抵抗の係数を理論解析と模型実験より定め、この抵抗係数と理論解析により縦スリット壁2列の防波堤に関する消波特性を検討した。

2. 理論式の誘導 スリット壁体は、水平の断面形状が鉛直軸対称の柱状体が等間隔で直線上に並んでいるものと考えられるため、座標軸を図.1に示す様にとると、 $y = \pm W_0/2$, $\pm W/2$ および $x = \pm B/2$ に不透過壁をもうけた流体運動のみを考えればよい。いま、一定水深 h 、幅 W_0 の領域を角周波数 σ 、振幅 a_0 の規則波が $-x$ 方向に進行する場合、流体運動を微小振幅波運動と仮定すると、その速度ポテンシャル $\phi(x, y, z; t)$ は次式で表せる。

$$\phi(x, y, z; t) = ga_0 / \sigma \cdot \phi(x, y) \cdot Z(z) \cdot \exp(-i\sigma t) \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 $Z(z) = \cosh k(z+h) / \cosh kh$ で、 k は $\sigma^2 h / g = kh \cdot \tanh kh$ で与えられる入射波の波数である。 $\phi(x, y)$ は、Helmholtz の方程式を満足する無次元の関数（以後、ポテンシャル関数と呼ぶことにする）である。

解析の便宜上、図.1に示すように、 y 軸に平行な仮定の境界面 AB ($x=1$) と $A'B'$ ($x=-1$) および柱状体と縦スリットの前面と後面とによる境界 CD ($x=B/2$) と $C'D'$ ($x=-B/2$) によって流体域を、領域(0), (I), (II), (III)に分け、各領域における ϕ をそれぞれ $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_3$ と表すことにする。

2.1 未知数 ϕ_1, ϕ_2 の表示 領域(I)と領域(II)の境界線に対する外向き法線をそれぞれ ν と n とし、グリーンの公式を用いると、各領域の任意点 (x, y) における ϕ_1 と ϕ_2 は次式で表すことができる。

$$\phi_{1,2}(X) = -i/\kappa \int_{S_1, S_2} \{ \phi_{1,2}(X_b) \Delta H_0^{(1)}(kr) - H_0^{(1)}(kr) \Delta \phi_{1,2}(X_b) \} ds \quad (2)$$

ここで、 X と X_b はそれぞれ領域の任意点 (x, y) と境界線上の点 (ξ, η) を意味し、 Δ は法線微分で、 S_1 と S_2 はそれぞれ領域(I)と領域(II)を囲む閉曲線、 $H_0^{(1)}(kr)$ は0次の第一種ハンケル関数、 r は X と X_b 間の距離、 κ は X が境界上にある時は $\kappa=2$ 、領域内の点であるときは $\kappa=4$ とする定数である。

2.2 境界条件 仮定境界 AB と $A'B'$ は、スリット壁からの散乱波を無視することができるほど十分な距離をとることから、領域(I)における ϕ_0 は、入射波を表す $\exp\{-i \cdot k(x-1)\}$ と壁面からの反射波を表す $Kr \cdot \exp\{i \cdot k \cdot (x-1)\}$ の和として表すことができ、領域(III)では、通過波 ($\phi_3(x, y) = Kt \cdot \exp\{-i \cdot k \cdot (x+1)\}$) のみが存在する。ここで、 Kr と Kt はそれぞれ反射率と通過率を表わす。従って、仮定境界上 AB ($x=1$) と $A'B'$ ($x=-1$) 上での流体運動の連続条件より、そこでの境界条件として次式を得る。

$$\phi_1(1, y) = 1 + Kr, \quad \partial \phi_1 / \partial \nu = i \cdot k \cdot (-1 + Kr) \quad (3)$$

$$\phi_2(-1, y) = Kt, \quad \partial \phi_2 / \partial n = i \cdot k \cdot Kt \quad (4)$$

また、仮定境界面 $EF, E'F'$ に囲まれるスリット内の領域での流体は、仮定境界面に対して垂直方向に流速 $U(z, t)$ の水平運動をするものとする、そこで流体の運動方程式は、次のようになる。

$$\partial U / \partial t = -1/\rho \cdot \partial p / \partial x - \mu_1 U - \mu_2 \cdot \partial U / \partial t \quad (5)$$

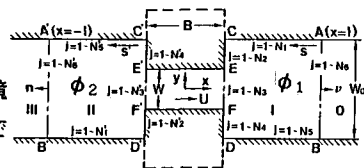


図.1 流体域の平面図

ただし、 μ_1 を流速に比例する抵抗係数、 μ_2 を加速度に比例する抵抗係数、 ρ を流体密度、 p を圧力とする。仮定境界面 $EF, E'F'$ での流体の連続性と圧力勾配 $\partial p / \partial x$ を境界面 EF と $E'F'$ 間の圧力差によって表されるものとして境界面 $EF, E'F'$ における次の境界条件を得る。

$$\partial \phi_1 / \partial \nu = R(\phi_2 - \phi_1), \quad \partial \phi_2 / \partial n = -R(\phi_2 - \phi_1), \quad R = 1/(\alpha + i\beta), \quad \alpha = B(1 + \mu_2), \quad \beta = B\mu_1/\sigma \quad (6)$$

各領域の不透過面では、 $\partial \phi_1 / \partial \nu = \partial \phi_2 / \partial n = 0$ なる境界条件を得る。

2.4 計算式 式(2)を離散化し、境界条件を適用すると、領域(I),(II)の計算式はそれぞれ次式となる。

$$\left(\sum_{j=1}^{N_1} + \sum_{j=1}^{N_2} + \sum_{j=1}^{N_3} + \sum_{j=1}^{N_4} + \sum_{j=1}^{N_5}\right) \cdot F_{1,j} \cdot \phi_1(j) + \sum_{j=1}^{N_2} F_{1,j} \cdot \phi_1(j) - \sum_{j=1}^{N_3} A_{1,j} \{R(\phi_2(j) - \phi_1(j))\} + Kt \cdot \sum_{j=1}^{N_4} (F_{1,j} - i \cdot k \cdot A_{1,j}) = - \sum_{j=1}^{N_5} (F_{1,j} + i \cdot k \cdot A_{1,j})$$

$$i=1-N_1, 1-N_2, 1-N_3, 1-N_4, 1-N_5, 1-N_6, \quad F_{1,j} = \bar{A}_{1,j} - \delta_{1,j}, \quad \delta_{1,j} = 0 (i \neq j), 1 (i=j) \quad (7)$$

$$\left(\sum_{j=1}^{N_1} + \sum_{j=1}^{N_2} + \sum_{j=1}^{N_3} + \sum_{j=1}^{N_4} + \sum_{j=1}^{N_5}\right) F_{1,j} \cdot \phi_2(j) + \sum_{j=1}^{N_2} F_{1,j} \cdot \phi_2(j) + \sum_{j=1}^{N_3} A_{1,j} \{R(\phi_2(j) - \phi_1(j))\} + Kt \cdot \sum_{j=1}^{N_4} (F_{1,j} - i \cdot k \cdot A_{1,j}) = 0$$

$$i=1-N_1', 1-N_2', 1-N_3', 1-N_4', 1-N_5', 1-N_6' \quad (8)$$

ここで、 $A_{1,j} = -i/2 \int_{-1/2}^{1/2} H_0^{(1)}(kr) ds$, $\bar{A}_{1,j} = -i/2 \int_{-1/2}^{1/2} \Delta \{H_0^{(1)}(kr)\} ds$ である。また、縦スリット壁体2列の場合は、それらによって囲まれる領域が増えるだけで、紙面の都合で計算式は示さぬが、同様に求めることができる。

3. 流体抵抗の係数の決定

理論計算を行う場合、前記の理論式(6)内の未知量である μ_1/σ と μ_2 を既知量としておく必要がある。ここでは、模型実験によって得られる通過率、反射率の値と適当な抵抗係数を与えた理論計算からのそれらの値との差の分散が最小となるように係数をかえて最適な抵抗係数を求めた。表.1に示すように、スリットの開口率(ε)とスリット幅(W)、壁体の厚さ(B)を変えて12ケースの模型実験と理論計算を行った。実験では、長さ29.0m、幅0.30m、深さ0.50mの規則波造波水路を使用し、模型を造波板より16.0mに設置し、波高測定には容量式波高計を使用した。反射率は合田らによる分離推定法⁽¹⁾によって算出した。各ケースとも水深を0.35mに一定とし、無次元波長 h/L を、0.08より0.02毎に0.32まで変えてそれぞれにおける通過率、反射率を求めた。

表.1 実験と計算の条件

CASE	$\varepsilon = W/W_0$	W (cm)	B (cm)
1	0.1	3.0	4.0
2			6.0
3			2.0
4			4.0
5	0.2	6.0	4.0
6			6.0
7			2.0
8			4.0
9	0.3	9.0	4.0
10			6.0
11			2.0
12			4.0

図.2に、実験と理論計算からの通過率と反射率の一例を示す。横軸は、無次元

波長の h/L で、図中の曲線が最適な抵抗係数を与えた時の理論値である。これから波長が変わっても抵抗係数を変える必要はなくほぼ一つの係数でよいことがわかる。また、加速度に比例する抵抗係数 μ_2 は、実験を行った範囲内では零でよいという結果が得られた。図.3は、同じ開口率における抵抗係数(μ_1/σ)とスリット幅と壁体厚の比(W/B)の関係を示すもので、 μ_1/σ とW/Bとはほぼ直線関係にある。従って、スリット幅と壁体厚の比がわかればこの図より抵抗係数を求めることができる。

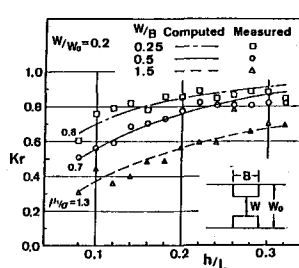
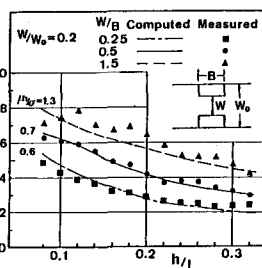


図.2 開口率0.2における実験と計算の通過率と反射率

4. スリット壁体2列の防波堤

実際の防波堤を想定して縦スリット壁体を2列並べた実験と計算を行った。図.4に示す

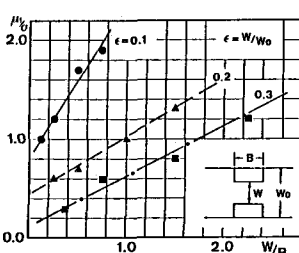


図.3 μ_1/σ とW/Bの関係

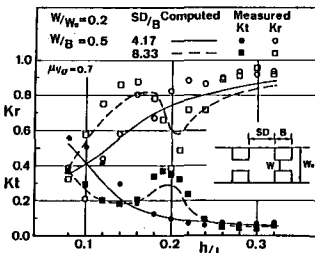


図.4 スリット壁2列のKtとKr

ように上記で得られた抵抗係数を用いた理論値と実験値とはほぼ一致しており、2列の場合もスリットが同一形状であれば1列のスリットと同じ抵抗係数を用いればよい事が示された。また、スリット壁体間の距離(SD)を長くすると、反射率、通過率に1つのピークが現われるが、波長の長い波に対しては通過率の減少に効果がある傾向を示した。

5. あとがき

今後は、水深変化やマウンドをも考慮に入れることができる解析法を検討して、縦スリット型透過防波堤の水理特性を算定できる方法を確立していく予定である。

参考文献：(1)合田ら、不規則波実験における入・反射率の分離推定法、技研資料、No.248, Dec. 1976