

タイヤ充填式防波堤の水理特性に関する 数値解析法

A NUMERICAL METHOD FOR HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A VERTICALLY SLITTED PERMEABLE BREAKWATER FILLED WITH USED AUTOMOBILE TIRES

小島 治幸¹, 角田 誠²
Haruyuki Kojima and Makoto Sumita

¹正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科
²株式会社 テトラ, 大阪支店環境事業部

This paper presents wave transmission and reflection characteristics of a vertically slitted permeable breakwater filled with used automobile tires. A numerical model using the boundary element method is developed. Resistance coefficients for both the region filled with used tires and the slitted walls are determined through matching wave transmission and reflection coefficients obtained from hydraulic experiments with those from numerical computation. The numerical results agree reasonably well with the experimental ones.

Key Words: Permeable up-right breakwater, wave transmission, wave reflection, numerical method, boundary element method

1. はじめに

近年, 防波堤を取り巻く種々の情勢の変化により, 海域利用の高度化を実現するための海域制御構造物に求められる条件も変化してきた。単に波浪や漂砂を制御するだけでなく, 海水交換や集魚性など生物環境の改善および景観など, 周辺海域への配慮が重要となってきた。このために, 多くの透過性防波堤が開発され, その水理特性を明らかにする解析法が提案されてきている。例えば, 一様透過性堤体としては, Sollitt¹⁾やKondo²⁾, Madsen³⁾の研究があり, スリット式直立透過性防波堤に関しては, 榎木⁴⁾やKakuno⁵⁾, 小島⁶⁾, Isaacson⁷⁾の研究がある。これら透過性堤体のうちの一つとして縦スリット式消波ケーソン堤の遊水部に古タイヤを適宜充填した構造形式(タイヤ充填式防波堤)が考えられる。これにより, 古タイヤの再利用と波エネルギーの低減を期待するものである。

本研究は, この構造物における波浪に関する基本的な水理特性を明らかにするとともに境界要素法を用いた数値解析法を開発し, 計算結果と実験値を比べ, 計算式に含まれる抵抗係数を決定することを目的とする。

2. 数値解析法の概要

(1) 透過性堤体の領域外の流体運動

図-1 に示すように, 水深 h の海域にタイヤ充填式防波堤がある。座標系を, 静水面に原点 O , 水平と鉛直上方にそれぞれ x 軸, z 軸をとることにする。ここに, x 軸の正方向から角周波数 σ ($=2\pi/T$, T は周期), 振幅 ζ_0 の規則波が入射する場合の流体運動を考える。流体運動は, 非粘性, 非圧縮性, 渦なしの微小振幅波運動と仮定すると, その速度ポテンシャル $\Phi(x, z; t)$ は次式で表せる。

$$\Phi(x, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) e^{-i\sigma t} \quad (1)$$

ここで, g は重力加速度, $\phi(x, z)$ は次のラプラス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)である。

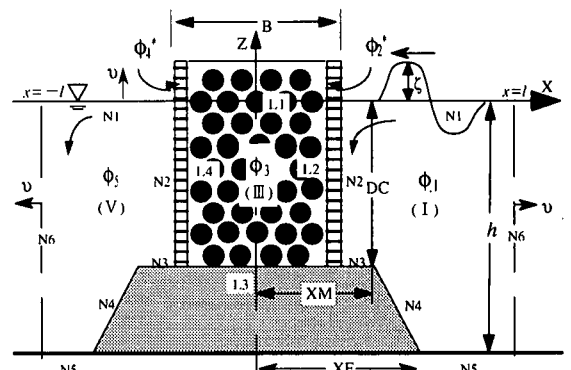


図-1 タイヤ充填式防波堤モデルの流体域と諸量の記号

$$\nabla^2 \phi(x, z) = 0 \quad (2)$$

自由表面を $\zeta(x, t)$ 、法線方向を v とすると、自由表面と不透過な固定境界面では次式が成り立つ。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma}{g} \phi(x, z) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial v} = 0 \quad (4)$$

(2) 透過性流体域の流体運動

図-1 に示すようにタイヤを充填した流体領域(III)を一様な空隙物体(透過性流体域)と仮定し、その空隙率を ε 、局所平均流速を u^* 、 w^* とする。なお、透過性流体域における流体運動の物理量には、 $*$ をつけて表すことにする。井島ら⁸⁾に従い流体運動に対する抵抗を相対速度と加速度とに比例するものとし、それぞれの抵抗係数を μ_1 、 μ_2 とすると、水平、鉛直方向の抵抗は、それぞれ次のように表わされる。

$$-\left(\mu_1 + \mu_2 \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{u^*}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$-\left(\mu_1 + \mu_2 \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{w^*}{\varepsilon} \quad (6)$$

流体圧力を p^* とすると、透過性堤体内の流体運動に対する連続と運動の方程式は、次のように書かれる。

$$\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial u^*}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} - \left(\mu_1 + \mu_2 \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{u^*}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial w^*}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial z} - \left(\mu_1 + \mu_2 \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{w^*}{\varepsilon} - g \quad (9)$$

この流体運動は速度ポテンシャル

$$\Phi^*(x, z, t) = \frac{g \zeta_o}{\sigma} \phi^*(x, z) e^{-i\sigma t} \quad (10)$$

を持つとすると、流速と圧力、自由表面を表わす式は、それぞれ次の式で与えられる。

$$u^* = \frac{\partial \phi^*}{\partial x}, \quad w^* = \frac{\partial \phi^*}{\partial z} \quad (11)$$

$$\frac{p^*}{\rho g \zeta_o} = -i(\alpha - i\beta) \phi^* e^{-i\sigma t} - \frac{g z}{\zeta_o} \quad (12)$$

$$\frac{\zeta^*}{\zeta_o} = i(\alpha + i\beta) \phi^* e^{-i\sigma t} \quad (13)$$

$$\text{ここに、} \alpha = \frac{1 + \mu_2}{\varepsilon}, \quad \beta = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\mu_1}{\sigma} \right) \quad (14)$$

また、スリット壁体をその長さ方向(波峰線方向)に一様な空隙物体(一様透過性壁体)と仮定すると、小島ら⁹⁾が示したように、上と同じ方法が適用可能となる。したがって、スリット壁体に対しても式(11)~(14)までと同じ形の式が成り立つ。

(3) グリーンの公式と数値積分方程式

各流体域の閉曲線 S で囲まれた領域の境界線に対する外向き法線を v とし、グリーンの公式を用いると、領域の任意点 (x, z) におけるポテンシャル関数は、次式で表すことができる。

$$\phi(x, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_S \left[\phi(\xi, \eta) \cdot \frac{\partial}{\partial v} (\log r) - \log r \cdot \frac{\partial}{\partial v} \phi(\xi, \eta) \right] ds \quad (15)$$

ここに、 (ξ, η) は境界線上の任意点を表し、 r は 2 点間の距離を表す。

境界 S を N 個の線分に分割し、線分の長さを ΔS_j ($j=1 \sim N$) とすると、式(15)は次の様に離散化される。

$$\phi(i) = -\sum_{j=1}^N \left[\bar{E}_{ij} \phi(j) - E_{ij} \bar{\phi}(j) \right] \quad (16)$$

ここに、 $\phi(i)$ 、 $\bar{\phi}(j)$ は境界線上のポテンシャル関数を表し、 $\bar{\phi}(j)$ は法線微分値を表している。 E_{ij} 、 $\bar{E}_{ij}$ は次式で与えられる線分 ΔS_j についての線積分である。

$$\left. \begin{aligned} E_{ij} &= \frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_j} \log r \, ds \\ \bar{E}_{ij} &= \frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_j} \frac{\partial}{\partial v} (\log r) \, ds \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(4) 境界条件

図-1 に示すように、流体域を $x = \pm \ell$ における仮想の境界面と堤体の境界面とにより 5 つの領域に分割し、それぞれの領域におけるポテンシャル関数を添字の数字で表すことにする。堤体より十分離れたところ ($x = +\infty$) では、散乱項(evanescent mode)を無視することができるので、そこでのポテンシャル関数 ϕ_0 は、入射波と反射波の和として次の式で表される。

$$\phi_0(x, z) = \left[e^{-i\lambda(x-\ell)} + K_R e^{i\lambda(x-\ell)} \right] A(\lambda z) \quad (18)$$

ここに、 $A(\lambda z)$ は $A(\lambda z) = \cosh \lambda(z+1) / \cosh \lambda$ で、 λ は次式で与えられる無次元波数である。

$$\lambda \tanh \lambda = \sigma^2 h / g = \Gamma \quad (19)$$

K_R は反射率と反射波の位相を表す複素数である。また、 $x = -\infty$ でのポテンシャル関数 ϕ_0 は、通過波のみが存在することから、複素数通過率を K_T とすると次式で表される。

$$\phi'_0(x, z) = K_T e^{-i\lambda(x+\ell)} A(\lambda z) \quad (20)$$

a) 仮想境界面における境界条件

仮想境界面を堤体より十分離すと、流体運動の連続条件より

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= \phi_1, & \bar{\phi}_0 &= \bar{\phi}_1 & (x = \ell) \\ \phi'_0 &= \phi_5, & \bar{\phi}'_0 &= \bar{\phi}_5 & (x = -\ell) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

が成り立つ。

b) 自由表面での条件

$$\bar{\phi} = \Gamma\phi, \quad \bar{\phi}^* = \Gamma\epsilon\gamma\phi^* \quad (22)$$

ここに、 $\gamma = \alpha + i\beta$ である。

c) 不透過面での条件

$$\bar{\phi} = \bar{\phi}^* = 0 \quad (23)$$

d) 透過性領域と外部流体域との境界条件

透過性領域と外部流体域の境界面では、流体圧力と流速の連続性により、次式が成立する。

$$\phi = \gamma\phi^*, \quad \bar{\phi} = \bar{\phi}^* \quad (24)$$

(5) スリット壁体のみの堤体における数値計算式

領域(Ⅲ)は、タイヤのない流体域となり、スリット壁体を一樣透過性領域と仮定して、そこでの抵抗係数を μ_3, μ_4 とすると、式(24)と同様の境界条件式が得られる。ただし、 γ は $\gamma' = (1 + \mu_4 + i\mu_3/\sigma)/\epsilon_2$ となり、 ϵ_2 はスリット壁体の開口率である。各領域において、式(16)に境界条件を適用することにより、次の数値計算式が得られる。

領域(Ⅰ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} - \Gamma E_{ij}\} \phi_1(j) + \sum_{j=1}^{N_2} \{F_{ij} \phi_1(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j)\} \\ & + \sum_{j=1}^{N_3, N_4, N_5} F_{ij} \phi_1(j) + K_R \sum_{j=1}^{N_6} \{(F_{ij} - i\lambda E_{ij}) A(\lambda z)\} \\ & = - \sum_{j=1}^{N_6} (F_{ij} + i\lambda E_{ij}) A(\lambda z) \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} - \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N) \end{aligned} \quad (25)$$

領域(Ⅱ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} + \Gamma \epsilon_2 \gamma E_{ij}\} \phi_2^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_2} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_1(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j) \right\} + \sum_{j=1}^{N_3} F_{ij} \phi_2^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_4} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j) \right\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} + \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N) \end{aligned} \quad (26)$$

領域(Ⅲ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{L_3} F_{ij} \phi_3(j) + \sum_{j=1}^{L_2} \{F_{ij} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j)\} + \sum_{j=1}^{L_1} \{F_{ij} \\ & - \Gamma E_{ij}\} \phi_3(j) + \sum_{j=1}^{L_4} \{F_{ij} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^*(j)\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} - \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim L) \end{aligned} \quad (27)$$

領域(Ⅳ)

$$\sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} + \Gamma \epsilon_2 \gamma E_{ij}\} \phi_4^*(j)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{j=1}^{N_2} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^*(j) \right\} + \sum_{j=1}^{N_3} F_{ij} \phi_4^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_4} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_5(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^*(j) \right\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} + \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N) \end{aligned} \quad (28)$$

領域(Ⅴ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} - \Gamma E_{ij}\} \phi_5(j) + K_T \sum_{j=1}^{N_6} \{F_{ij} - i\lambda E_{ij}\} A(\lambda z) \\ & + \sum_{j=1}^{N_3, N_4, N_5} \{F_{ij} \phi_5(j)\} + \sum_{j=1}^{N_2} \{F_{ij} \phi_5(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^*(j)\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} - \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N) \\ & \text{ここに、} \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

(6) タイヤ充填式堤体の数値計算式

タイヤを充填した領域とスリット壁体との境界では、流体運動の連続条件より次の条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \gamma\phi_3^* = \gamma'\phi_2^*, \quad \bar{\phi}_3^* = \bar{\phi}_2^* \\ & \gamma\phi_3^* = \gamma'\phi_4^*, \quad \bar{\phi}_3^* = \bar{\phi}_4^* \end{aligned} \quad (30)$$

従って、領域(Ⅱ), (Ⅲ), (Ⅳ)においては、次の計算式が得られる。

領域(Ⅱ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} + \Gamma \epsilon_2 \gamma' E_{ij}\} \phi_2^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_2} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_1(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j) \right\} + \sum_{j=1}^{N_3} F_{ij} \phi_2^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_4} \left\{ F_{ij} \frac{\gamma}{\gamma'} \phi_3^*(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j) \right\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} + \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N) \end{aligned} \quad (31)$$

領域(Ⅲ)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{L_3} F_{ij} \phi_3^*(j) + \sum_{j=1}^{L_2} \{F_{ij} \phi_3^*(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2^*(j)\} \\ & + \sum_{j=1}^{L_1} \{F_{ij} - \Gamma \epsilon \gamma E_{ij}\} \phi_3^*(j) \\ & + \sum_{j=1}^{L_4} \{F_{ij} \phi_3^*(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^*(j)\} = 0 \\ & F_{ij} = \bar{E}_{ij} - \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim L) \end{aligned} \quad (32)$$

領域(Ⅳ)

$$\sum_{j=1}^{N_1} \{F_{ij} + \Gamma \epsilon_2 \gamma' E_{ij}\} \phi_4^*(j)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=1}^{N_2'} \left\{ F_{ij} \frac{\gamma}{\gamma'} \phi_3^*(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4(j) \right\} + \sum_{j=1}^{N_3'} F_{ij} \phi_4^*(j) \\
& + \sum_{j=1}^{N_4'} \left\{ F_{ij} \frac{1}{\gamma'} \phi_5(j) - E_{ij} \bar{\phi}_4^* \right\} = 0 \\
& F_{ij} = \bar{E}_{ij} + \delta_{ij}, \quad (i=1 \sim N^*)
\end{aligned} \quad (33)$$

これらの数値計算式は、未知量である K_R , K_T および $\phi(j)$ に関する複素係数連立一次方程式を与え、これを解くことにより反射率 K_R と通過率 K_T を算定することができる。

3. 水理実験の方法と条件

水理実験は、図-2に示すように、全長 30m、深さ 0.7m、幅 0.4m の2次元造波装置を用い、水槽の水深を $h=40\text{cm}$ に固定し、実験水槽の造波板から約 15.8mほど離れた位置に堤体を設置した。堤体の模型は、マウンドの高さを 12cm、マウンド上面から堤体上面までの高さを 48cm とし、堤体の前面から後面までの幅を 43.2cm とした。堤体は、前面、後面ともに壁厚 3.2cm で開口率 44.7% の縦スリット壁体を有し、中間にスリット壁を差し込める構造である。前壁と後壁のそれぞれの前面までの堤体幅は $B=40.0\text{cm}$ となる。充填するタイヤは、直径 4.2cm のプラモデルのものをを用いた。2つのタイヤを、片方がもう一方の中に入るように組み合わせて前後のスリット壁体の間に充填した。タイヤを充填したところの空隙率は 22.8% である。

水面波と構造物の干渉問題に関しては、フルードの相似則に従うが、タイヤに関しては、下記に示す要因によりその相似則が適用できない可能性がある。

- ・模型タイヤでは、タイヤの肉厚やデザイン等が実際のタイヤに対して相似系でない。

- ・模型タイヤと実際のタイヤでは、用いているゴム質が異なるため、力学的特性が相似ではない。

- ・ゴム材質の力学的相似則は、フルードの相似則とは異なると考えられる。

従って、厳密に言うとはタイヤ材の変形に起因するすべての現象、たとえば反射・伝達特性や堤体に作用する波力特性などが正確に評価できない可能性がある。しかし、実験を見る限りでは、個々のタイヤが変形す

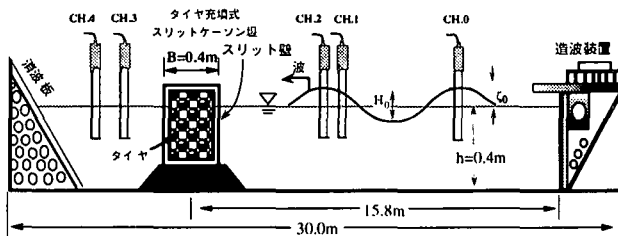


図-2 実験水槽図

ることはほとんどなく、消波特性に関してはこの問題について無視することができると考える。

実験は、消波特性に関して行い、堤体による反射率と通過率とを測定した。測定方法は、分離推定法を用い、波を入射波と反射波、通過波に分離し、それらの波高を用いて反射率と通過率を算定した。また反射率に関しては、ヒーリーの方法も用い、部分重複波の波の腹と節の波高を求め反射率を算定した。入射波は、規則波を用いた。入射波高を $H_0=4.0\text{cm}$ と 8.0cm とし、周期を $T=0.51$ 秒から 2.15 秒まで変化させ、27 種類の入射波を用いた。このとき相対水深は $h/L=0.10 \sim 1.00$ となり、波形勾配は $H'_0/L=0.01 \sim 0.11$ となる。実験ケースは、前後のスリット壁のみでタイヤの無い場合を case0、それにタイヤを充填した場合を case1 とした。

4. 結果と考察

(1) スリット壁体における数値計算と実験値の比較

数値計算に必要となる抵抗係数を決定するために、適当な係数値を用いた計算値と水理実験値との標準偏差を求め、その値が最小となる値を最適な抵抗係数とした。図-3 は、スリット壁体のみの場合における抵抗係数 μ_1 を 0.0, 0.5, 1.0 に固定して、 μ_3 を 0.0 ~ 3.0 まで変化させたときの通過率 K_T と反射率 K_R に関する計算値と実験値との標準偏差を示したものである。上図が入射波高 4 cm の、下図が 8 cm の結果である。この結果より K_T , K_R とも $\mu_1=0.0$ のときに他の値よりも標準偏差が小さくなり、 μ_3 を変化させるとそれが最小値となる抵抗係数が存在する。その値は、反射率、通過率ともほぼ同じ値で、 $\mu_3=0.8$ 程度である。そのときの標準偏差は反射率、通過率ともに 0.1 以下となった。また、入射波高が異なる場合でも標準偏差が最小となる抵抗係数はほぼ同じで、 $\mu_3=0.8$, $\mu_1=0.0$ となった。

図-4 は、スリット壁体のみの場合における最適抵抗係数である $\mu_1=0.0$ と $\mu_3=0.8$ および比較の意味で $\mu_3=0.0, 1.5$ における反射率と通過率の数値計算値と実験値を示したものである。図-3 と同様に、上図に入射波高 4 cm の、下図に 8 cm の結果を示した。最適値である $\mu_3=0.8$, $\mu_1=0.0$ における実験値と計算値の一致は、相対堤体長 B/L が短いところで違いがみられるが、その他の相対堤体長のところでは良好であった。これより、スリット壁体のみの場合、入射波高が変わっても μ_3 , μ_1 ともひとつの値でよく、また相対堤体長に対しても抵抗係数の値を変える必要がないことが分かった。

(2) タイヤ充填式防波堤における数値計算値と実験値の比較

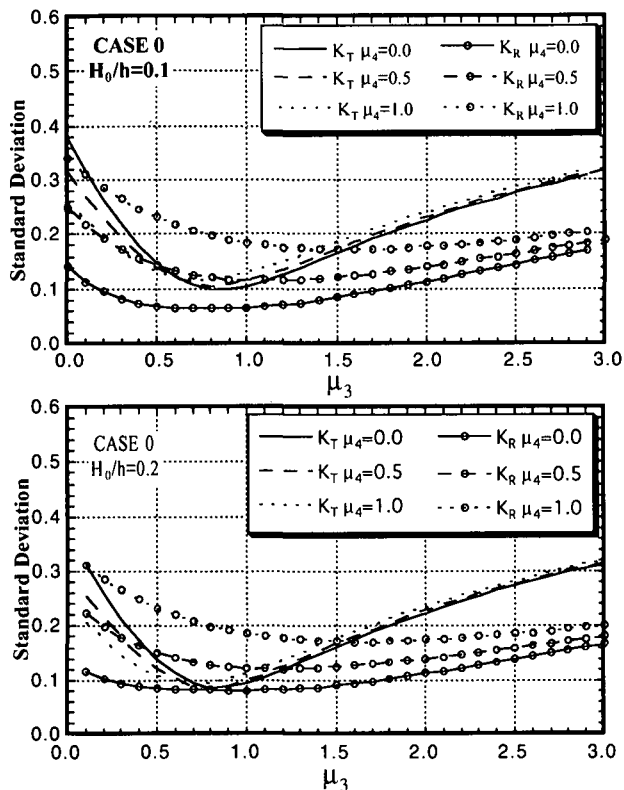


図-3 スリット壁体における通過率と反射率に関する計算値と実験値の標準偏差

図-5は、スリットケーソン式堤体の遊水部にタイヤを充填した場合（タイヤ充填式防波堤）における通過率 K_T と反射率 K_R に関する計算値と実験値との標準偏差を示したものである。上図に入射波高4cmの、下図に8cmの結果を示した。スリット壁体の抵抗係数をスリット壁体だけの場合において求めた最適値 $\mu_3=0.8$, $\mu_4=0.0$ と固定し、タイヤ充填部の抵抗係数 μ_1 と μ_2 を変化させたときの結果である。 μ_2 に関しては K_R において偏差に違いがでて $\mu_2=0.0$ で標準偏差が最も小さくなったが、 K_T ではあまり違いがなかった。 μ_1 の値は、通過率 K_T と反射率 K_R において標準偏差が最小になる値はほぼ同じで、 $\mu_1=0.7$ 程度である。そのときの標準偏差は通過率 K_T は0.1以下であったが、反射率 K_R は0.2以上の値となった。

図-6はタイヤ充填式防波堤における最適抵抗係数値を用いたときの数値計算値と実験値を比べたものである。図中には、比較するために $\mu_1=0.0$ と1.5の結果も示している。タイヤを充填した場合も最適な抵抗係数である $\mu_1=0.7$, $\mu_3=0.8$, $\mu_2=\mu_4=0.0$ を用いると通過率 K_T においては計算値と実験値は非常に良い一致がみられた。しかし、反射率 K_R においては、定性的に合っているものの、計算値が実験値よりも全体的に大きい結果となった。また、抵抗係数が $\mu_1=\mu_2=0.0$ のときは、波長 L の変化により通過率、反射率とも大きく変化する。しかし、 μ_1 が零よりも大きくなると、通過率は相対堤体長に対して一様に減少し、 $B/L=0.2$ 以上では $K_T=0.2$ 以下になり、非常によい

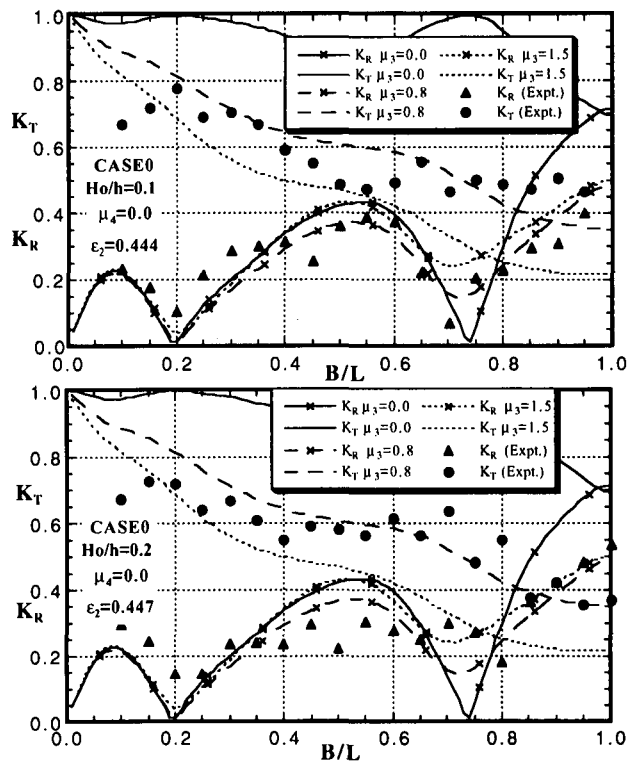


図-4 スリット壁体における通過率と反射率に関する計算値と実験値の比較

消波効果が得られる。一方、反射率は、 $B/L=0.125$ 付近で最大となり、相対堤体長がそれよりも大きくなると、緩やかに減少する傾向がみられる。

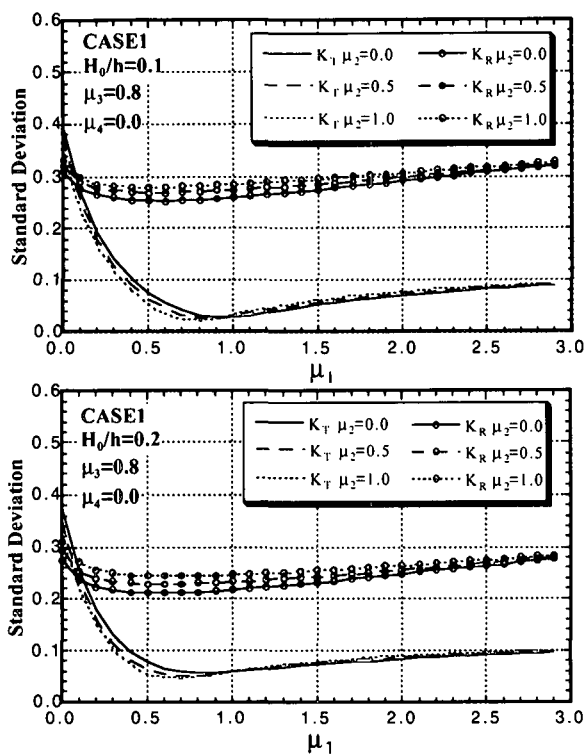
図-7は、タイヤ充填式防波堤におけるスリット壁体の厚さを変えた場合（上図）とタイヤ充填部の幅を変えた場合（下図）の反射率と通過率の計算値を表している。スリット壁体の厚さを広げていくと相対堤体長が大きいほど反射率 K_R が小さくなるが、通過率はほとんど変化がない。タイヤ充填部の幅を広げていくと全堤体長で通過率 K_T が小さくなるが、反射率はそのピークのところで若干の変化がみられるだけであり変化がない。

5. 結 語

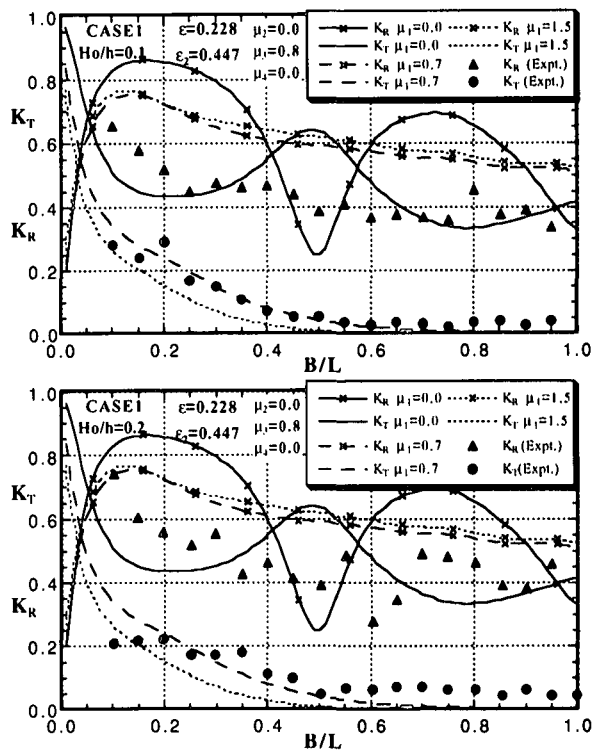
本研究により次のことが明らかとなった。

(1) スリット壁体のみにおいては、実験値と数値計算の標準偏差の最小値が、反射率、通過率ともに同じ抵抗係数の値となり、最適な抵抗係数は $\mu_3=0.8$, $\mu_4=0.0$ である。この抵抗係数値を用いることにより、計算値と実験値との一致は良好である。

(2) タイヤを充填した場合においては、タイヤ充填部での最適な抵抗係数は $\mu_1=0.7$, $\mu_2=0.0$ となった。スリット壁体のみの場合と同様に、入射波波が変わっても係数値を変える必要はない。計算値との一致は、通過率 K_T は満足行く結果となったものの、反射率 K_R は計算値が実験値より全体的に大きくなる結果



図一五 タイヤ充填式防波堤における通過率と反射率に関する計算値と実験値の標準偏差



図一六 タイヤ充填式防波堤における通過率と反射率に関する計算値と実験値の比較

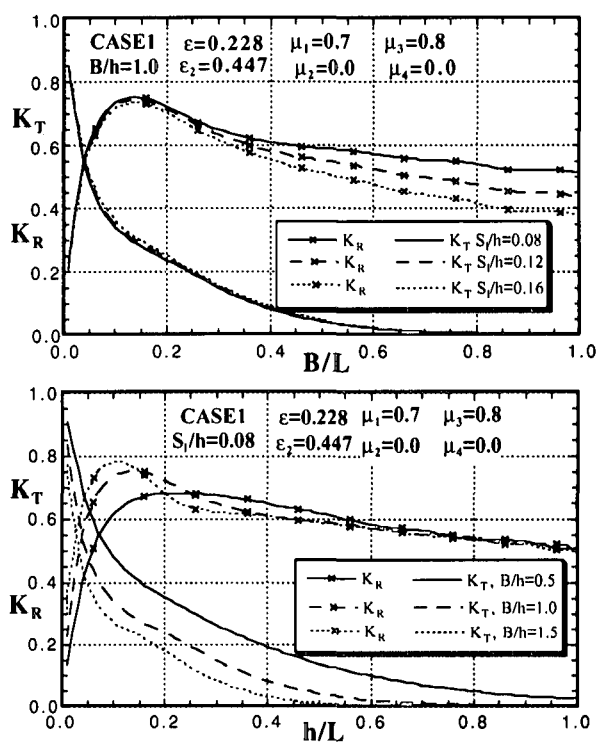
となった。

(3) タイヤ充填式透過性防波堤の消波特性は、相対堤体長が 0.2 以上のところで、通過率が $K_T=0.2$ 以下になり、通過率・反射率とともに一様に減少する。また、スリット壁体の厚さを広げていくと反射率が小さくなり、タイヤ充填部の幅を広げていくと通過率が小さくなる。

謝辞：元九州共立大学学部学生瀬戸耕一君と谷川俊康君には、水理実験と数値計算に関して多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Solliitt, C.K. and R.H. Cross: Wave Transmission of Waves through Permeable Breakwaters, Proc. of 13th Int'l Conf. on Coastal Eng., pp.1827-1845, 1972
- 2) Kondo, S and S. Toma: Reflection and Transmission for Porus Structures, Proc. of 13th Int'l Conf. on Coastal Eng., pp. 1847-1866, 1972.
- 3) Madsen, O.S.: Wave Transmission through Porus Structures, Proc. ASCE, Vol. 100, WW3, pp.169-188, 1974.
- 4) 榎木亭, 岩田一郎: 横スリット型防波堤の消波効果と現地への適用条件について, 土木学会論文報告集, 第 237 号, pp.63-74, 1975.
- 5) Kakuno, S.: Reflection and Transmission of Waves through Vertical Slit Type Structures, Proc. Coastal Structures 83, pp.939-952, 1984.
- 6) 小島治幸, 井島武士, 田口陽一, 安永達朗: 縦スリット式防波堤の水理特性の算定法に関する研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp.402-406, 1986.
- 7) Isaacson, M., S. Premasiri, and G. Yang: Wave Interactions with vertical Slotted Breakwater, J. of Waterway, Port, Coastal and



図一七 スリット壁体の厚さとタイヤ充填部の幅による通過率と反射率の計算値

Ocean Engineering, ASCE, pp. 118-125, 1998.

- 8) 井島武士, 周宗仁, 吉田明徳: グリーンの公式による有限水深の波の 2 次元境界値問題の解法, 九大工学集報, 第 48 巻, 6 号, pp.767-774, 1975.