

回転変位許容型防波堤による波の制御

吉田明徳*・西内雄一**・村上啓介***
牛房幸光****・木原 力*****

1. ま え が き

現在、防波堤は波浪に対して変位を許容しないとの考えで設計がなされており、強大な波浪に耐え得るため、設置水深や設計波高が大きくなるに従い、防波堤は相対的に大きくかつ高価なものとならざるをえない。本研究は、従来の変位を許容しない防波堤と異なり、堤体に静止位置を中心とする Rocking 運動を積極的に許容した防波堤（回転変位許容型防波堤）を考える事によって、安定でかつ経済的な防波堤の可能性を検討する目的で行ったものである¹⁾。

堤体の Rocking 運動は、堤体に作用する波力に対して緩衝効果を持つが、逆に波の遮断という観点からは、Rocking 運動に伴う造波成分（通過波）が生じ、防波効果や作用波力の特性は堤体の種々の条件（堤体断面形状、堤体重量、堤体重心位置、慣性モーメント、ころがり抵抗等）によって大きく異なるものと考えられる。本文は、回転変位許容型防波堤の波力の緩衝効果、波の通過・反射等の基本的な水理特性を明らかにするため、その第一段階として、底面に円弧を有する不透過堤体が水平な固定床にある場合について、その水理特性を理論的に解析するための解析法を示し、解析法の妥当性を水槽実験によって検証するとともに、堤体の水理特性を理論解析により調べたものである。

2. 理論解析

図-1 に示すように、一定水深 h の海域に底面が曲率半径 R の円弧状をなす堤体があり、これに対し振幅 ζ_0 、各周波数 σ の微小振幅波が入射する場合を考える。堤体は滑らず、堤体の底面円弧の曲率中心 $C(x_c, z_c)$ に関する回転と、それに伴うころがり運動のみを行うものとし、任意時刻における回転角 θ を、 $\theta = \omega_2 \exp(i\sigma t)$ と表わす事とする。

流体運動を、非圧縮性完全流体の無渦運動と仮定すると、次の形の速度ポテンシャルが存在する。

$$\Phi(x, z; t) = (g\zeta_0/\sigma)\phi(x, z) \cdot \exp(i\sigma t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで g は重力加速度、 $i = \sqrt{-1}$ で、関数 $\phi(x, z)$ （ポテンシャル関数と呼ぶ）は、Laplace の方程式を満足すべき無次元の関数である。

図-1 に示すように、堤体の運動によって生じる散乱定常波が十分小さくなる位置まで離して、仮定の境界 $AB, A'B'$ を設け、流体域を領域 $(1^+), (1^-), (2^+), (2^-)$ に分割する。また、領域 (1^+) の境界線を、水面を S_1^+ 、堤体側面を S_2^+ 、仮想境界面を S_3^+ で表し、領域 (1^-) の境界線を領域 (1^+) と同様にそれぞれ、 S_1^-, S_2^-, S_3^- で表わすこととする。

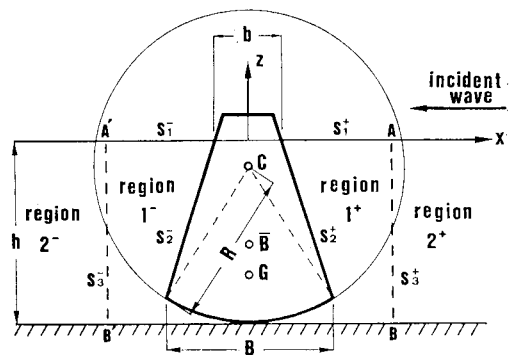


図-1 回転変位許容型防波堤と領域分割

2.1 堤体の運動方程式

堤体に作用する流体圧力によって生じる重心まわりの回転モーメントを $T \exp(i\sigma t)$ 、水平力と鉛直力をそれぞれ $P_x \exp(i\sigma t)$ 、 $P_z \exp(i\sigma t)$ とすると、 T, P_x および P_z は速度ポテンシャルにより次式で与えられる。

$$T = i\rho g \zeta_0 \left[\int_{S_2^+} \phi_1^+(x, z) \left\{ (x - x_g) \frac{dx}{ds} + (z - z_g) \frac{dz}{ds} \right\} ds \right] \quad \cdots \cdots (2)$$

$$P_x = i\rho g \zeta_0 \int_{S_2^+} \phi_1^+(x, z) dz \quad \cdots \cdots (3)$$

$$P_z = -i\rho g \zeta_0 \int_{S_2^+} \phi_1^+(x, z) dx \quad \cdots \cdots (4)$$

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

** 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科修士課程
(現: 五洋建設(株))

*** 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士課程

**** 正会員 九州大学技官 工学部水工土木学科

***** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長
(現: 港湾技術研究所企画室長)

ただし積分 $\int_{S_2^+} \phi_1^+ dz$ は $\int_{S_2^+} \phi_1^+ dz + \int_{S_2^-} \phi_1^- dz$ を意味する。

図-2 に示すように、堤体重量を W 、堤体に作用する垂直反力を N 、浮力を U 、接線力を F_s で表わし、垂直反力の着点点は回転中心を通る垂直線より e だけ前方にあるとして、堤体のころがりに伴って生じる重心まわりの復元モーメント $T_s \exp(i\sigma t)$ を考えると、 T_s は次式で与えられる。

$$T_s \exp(i\sigma t) = -N(\overline{GC} \sin \theta + e) - U(\overline{BM} + \overline{GB}) \sin \theta + F_s(h + z_g) \quad \dots\dots (5)$$

点 M はメタセンターで、点 $G(x_g, z_g)$ と点 $\bar{B}(x_b, z_b)$ はそれぞれ堤体静止時の堤体重心と浮心である。

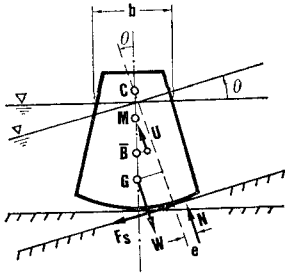


図-2 堤体に作用する重力、浮力、抗力、接線力

垂直反力 $N (=W - U - P_2)$ が回転中心 C と作る腕の長さ e は、堤体のころがりにともなって周期的に変動し堤体の回転変位と $\pi/2$ の位相差を持つはずである、純粋転動車輪におけるころがり抵抗係数と腕の長さとの関係²⁾ より、比例定数を μ として (μ をころがり抵抗係数と呼ぶ) 腕の長さ e は次式で表わされるものとする。

$$e = \mu R \cdot i\omega_2 \exp(i\sigma t) \quad \dots\dots (6)$$

さらに、没水部分体積 V および堤体重量 W 、堤体の質量 $\bar{M}$ 、重心まわりの慣性モーメント I_θ を、それぞれ係数 ν_0 , γ , ν_θ を用いて次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} V &= \nu_0 B h, & I_\theta &= \{\rho B^3 h^2 / 4\} \cdot \nu_\theta \\ W &= \gamma \nu_0 \rho g B h, & \bar{M} &= \gamma \nu_0 \rho B h \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (7)$$

このとき、堤体重心の水平運動および重心まわりの回転運動に関する運動方程式は次式の様に書ける。

$$\bar{M} \frac{d^2 \bar{x}_g}{dt^2} = P_x \exp(i\sigma t) - F_s \quad \dots\dots (8)$$

$$I_\theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \{T + T_s\} \exp(i\sigma t) \quad \dots\dots (9)$$

ただし $\bar{x}_g$ は任意時刻 t における堤体重心の x 座標で、回転変位 θ と $\bar{x}_g - x_g = (h + z_g)\theta$ の関係にある。(8), (9) 式に、(2), (3), (4), (5), (6), (7) 式を代入して2次のオーダーの量を無視し、両式より接線力 F_s を消去すると、堤体のころがり運動に関して次式を得る。

$$\int_{S_1^+} \phi_1^+(x, z) \{ (x - x_g) dx + (z + h) dz \} - \beta \cdot \Theta = 0 \quad \dots\dots (10)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\omega_2 B}{2 \zeta_0} \\ \beta &= i \left[\frac{\sigma^2 h}{g} \{ B h \nu_\theta / 2 + 2(h + z_g)^2 \gamma \nu_0 \} \right. \\ &\quad \left. - 2h \{ \gamma \nu_0 (z_0 - z_g) - \nu_0 (z_0 - z_b) + \frac{b^3}{12 B h} \} \right] \\ &\quad + 2h \nu_0 (\gamma - 1) R \mu \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

2.2 領域 (1[±]) と領域 (2[±]) のポテンシャル関数

領域 (2⁺) では入射波と反射波のみが、領域 (2⁻) では通過波のみが存在し、反射率を K_r 通過率を K_t で表わすと、領域 (2[±]) のポテンシャル関数 $\phi_2^\pm$ はそれぞれ次式で表わされる。

$$\phi_2^+(x, z) = \{ \exp(ikx) + K_r \cdot \exp(-ikx) \} Z(z) \quad \dots\dots (12)$$

$$\phi_2^-(x, z) = K_t \cdot \exp(ikx) \cdot Z(z) \quad \dots\dots (13)$$

ただし、 $Z(z) = \cosh k(z + k) / \cosh kh$ で k は $\sigma^2 h / g = (kh) \tanh(kh)$ で与えられる入射波の波数である。

一方、領域 (1[±]) の境界線上における外向き法線を ν であらわすものとする、領域 (1[±]) のポテンシャル関数は次式で表わす事が出来る。

$$\begin{aligned} \phi_1^\pm(X) &= \frac{1}{\alpha} \int_{D^\pm} \left\{ \phi_1^\pm(X_b) \frac{\partial}{\partial \nu} G(r) \right. \\ &\quad \left. - G(r) \frac{\partial}{\partial \nu} \phi_1^\pm(X_b) \right\} ds \quad \dots\dots (14) \end{aligned}$$

ただし、 $G(r) = \log r + \log r^*$ で r は、領域内の任意点 X と境界上の点 X_b との間の距離で、 r^* は X と、 X_b の海底面に関する鏡像点 X_b^* 間の距離である。また α は X が境界線上にある場合は $\alpha = \pi$ を取り、境界線を除いた領域内の点である場合は $\alpha = 2\pi$ を取る定数で、積分は境界 ($D^\pm = S_1^\pm + S_2^\pm + S_3^\pm$) に沿う反時計まわりの積分である。

2.3 境界条件と数値計算法

領域 (1[±]) の境界面における境界条件は次式であたえられる。

$$\partial \phi_1^\pm / \partial \nu = (\sigma^2 / g) \phi_1^\pm \quad \text{水面 } S_1^\pm \quad \dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\partial \phi_1^\pm}{\partial \nu} &= -2i \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ \frac{(x - x_0)}{B} \cdot \frac{dx}{ds} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(z - z_0 + R)}{B} \cdot \frac{dz}{ds} \right\} \cdot \Theta \quad \text{堤体側面 } S_2^\pm \\ &\quad \dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_1^\pm &= \phi_2^\pm \\ \partial \phi_1^\pm / \partial \nu &= \partial \phi_2^\pm / \partial \nu \end{aligned} \right\} \quad \text{仮想境界面 } S_3^\pm \quad \dots\dots (17)$$

領域 (1[±]) の境界 $S_1^\pm$, $S_2^\pm$, $S_3^\pm$ をそれぞれ数個の小要素 ΔS_j に分割し、(14) 式の積分方程式と (10) 式の堤体の運動方程式を小要素 ΔS_j に関して離散化して、

(15)~(17)の境界条件式を用いると、境界 S_1^+ , S_2^+ の各要素に関する $\phi_1^+(j)$ および、反射率 K_r 、通過率 K_t 、回転変位 θ を未知量とする連立一次方程式を得る。したがって、これを解く事により境界要素上のポテンシャル関数値と反射率 K_r 、通過率 K_t および回転変位 θ が決まる事になる。また、堤体に作用する流体力は (2), (3), (4) 式より算定される。

3. 水槽実験による理論解の検証と数値実験

水槽実験および数値実験の対象とした堤体の断面形状の概略を図-3に示す。実験は、2次元造波水路(幅0.3 m, 深さ0.5 m, 長さ29 m)を用い、水深を0.35 m, 入射波高はほぼ4 cm程度に取り、水路のほぼ中央(水路底面はガラス板)に堤体を設置して、容量式波高計により、入射波高・通過波高を測定して通過率を算定し、反射率は合田等が示した入反射波の分離推定法³⁾により求めた。堤体の運動は変位計を用いて回転中心の変位を測定して回転角を算定した。堤体は底部をコンクリートモルタルで、その他はアクリル板を用いて作製し、5 cm角の鋼棒を堤体内に固定して堤体重量を調整した。

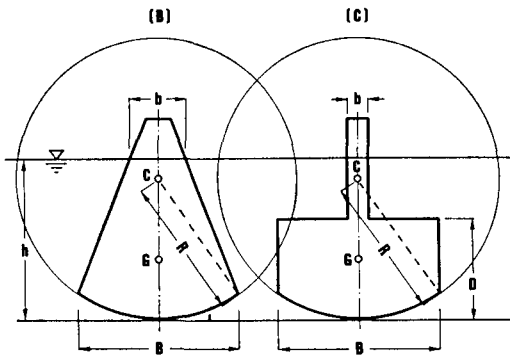


図-3 堤体断面形状

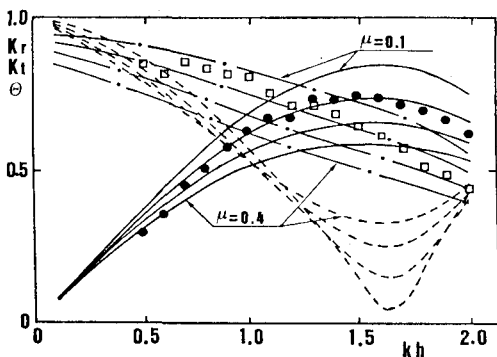


図-4 実験値 (● K_t , □ θ) と理論値 (--- K_r , — K_t , - · - θ) の比較。 $B/h=1.14$, $R/h=1.43$, $b/B=0.44$, $z_0/h=-0.656$, $\nu_0=0.815$, $\gamma=1.65$ (B型)

3.1 実験値と理論値の比較

通過率 K_t 、反射率 K_r および回転変位 θ について実験値と理論値 ($\mu=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) を比較した結果を図-4~図-6に示す。堤体の断面形状および堤体条件によって両者の一致の程度にばらつきはあるが、通過率および回転変位に関しては理論解と実験値の周波数特性はだいたいにおいて良く一致しており、解析法は妥当なものと考えられる。ただし反射率に関しては、理論値が実験値に比べて一様に小さく現れる傾向がある。これらの実験値と理論値との比較より、ころがり抵抗係数 μ の値を推定すると $\mu=0.1\sim0.3$ 程度である。参考文献(1)において実験値と理論値解との比較より推定した μ の値は $0.3\sim0.4$ 程度と若干大きい、これは堤体底面をアクリル板で作製したため、堤体底面がたわみを生じていた事による。

3.2 数値実験例と考察

堤体条件としては、堤体幅 B 、底面曲率半径 R 、堤体水線幅 b 、堤体上面高 D 、堤体重量係数 γ 、堤体重心

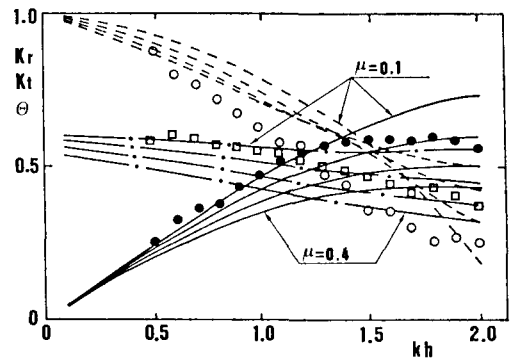


図-5 実験値 (○ K_r , ● K_t , □ θ) と理論値 (--- K_r , — K_t , - · - θ) の比較。 $B/h=1.14$, $R/h=1.43$, $b/B=0.44$, $z_0/h=-0.648$, $\nu_0=0.801$, $\gamma=2.10$ (B型)

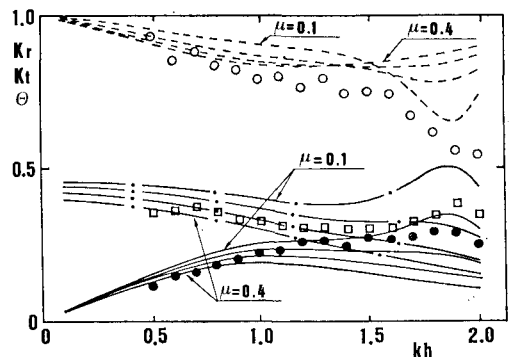


図-6 実験値 (○ K_r , ● K_t , □ θ) と理論値 (--- K_r , — K_t , - · - θ) の比較。 $B/h=1.14$, $R/h=1.43$, $b/B=0.44$, $D/h=0.571$, $z_0/h=-0.638$, $\nu_0=0.878$, $\gamma=3.14$ (C型)

z_0 , 慣性モーメント係数 ν_0 , ころがり抵抗係数 μ がありこれらは相互に関連して堤体の防波効果や波力特性に大きく影響するが, 本文ではページ数の関係でいくつかの堤体条件についての計算結果について示すにとどめる.

図-7(a) は図-3 に示す B 型堤体について, 反射率・通過率特性の堤体重量係数 γ による変化を示したものである. 堤体重量係数 γ は (7) 式で定義したように, 堤体重量 W , 堤体に作用する浮力 $\rho g V$ と, $W = \gamma \rho g V$ の関係にある. 従って, 静水面上にある堤体部分の重量が堤体の総重量に対して小さい場合には, γ はほぼ堤体の比重を表わす. 従来施工されてきた, コンクリートと中詰砂より成るケーソン堤の比重は, ほぼ 2.0~2.5 程度であることから, γ の値は, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 について計算を行った. γ が 1.5~2.5 の変化による反射率・通過率の変化は大きく, γ が大きくなるに従い通過率の極大値が生ずる kh の値が大きいく方に移り, かつ通過率が減少して波の遮断効果が増大する. しかし $\gamma > 2.5$ では γ の変化に対する反射率・通過率の変化は小さくな

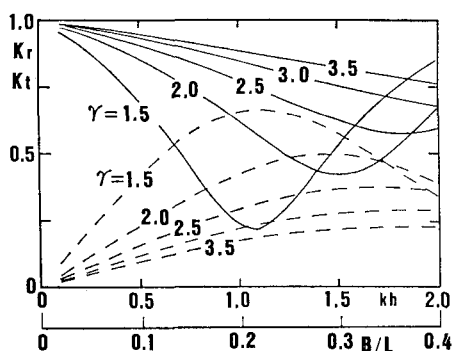


図-7 (a) 堤体重量係数 γ による反射率 K_r (—) と通過率 K_t (---) の変化. $B/h=1.25$, $R/h=1.5$, $b/B=0.4$, $z_0/h=-0.6$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (B 型)

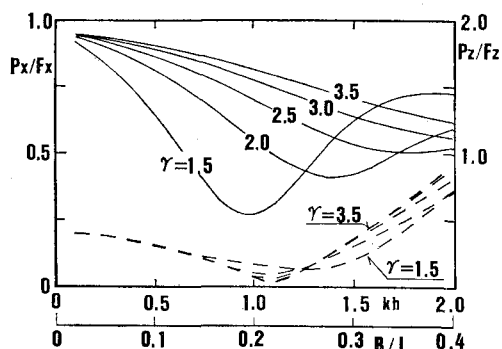


図-7 (b) 堤体重量係数 γ による水平波力 P_x (—) と鉛直波力 P_z (---) の変化. $B/h=1.25$, $R/h=1.5$, $b/B=0.4$, $z_0/h=-0.6$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (B 型)

り, γ を必要以上に大きくしても波の遮断効果はあまり増大しない.

図-7(b) は堤体に作用する水平波力 P_x と鉛直波力 P_z の γ による変化を示したもので, それぞれ直立堤に作用する重複波の水平波力 $F_x = 2\rho g \zeta_0 [\tanh(kh)/kh]$ と三角形分布を仮定した鉛直波力 (揚力) $F_z = \rho g \zeta_0 B / \cosh(kh)$ (堤体幅 B) に対する比で示している. これより Rocking 運動によって堤体に作用する波力が著しく減少することがわかる. $\gamma=2.0$ の場合を例にとると $kh=0.8\sim 1.4$ において水平波力 P_x は重複波力 F_x の 6~4 割程度と著しく小さくなっている. さらに鉛直波力 P_z も揚力 F_z の 10~50% 程度と小さく (接地圧が大), これらの波力特性から堤体が滑動に対して著しく安定となることが理解される.

図-8 (a) に図-7 の堤体重量係数 $\gamma=2.5$ の場合について, 底面曲率半径 R による反射率・通過率特性の変化を示した. 一般に曲率半径が大きくなる程, 通過率が最大となる kh の値が大きいく方へ移り, かつ通過率が減少し波の遮断効果は増大する. ただし底面曲率半径 R

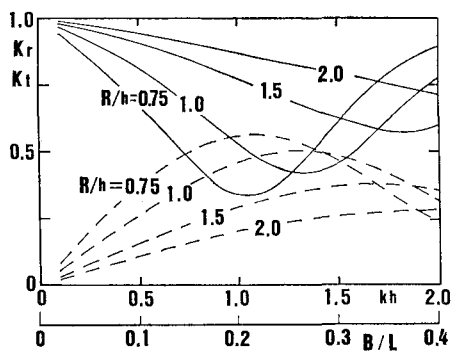


図-8 (a) 底面曲率半径 R による反射率 K_r (—) と通過率 K_t (---) の変化. $B/h=1.25$, $b/B=0.4$, $z_0/h=-0.6$, $\gamma=2.5$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (B 型)

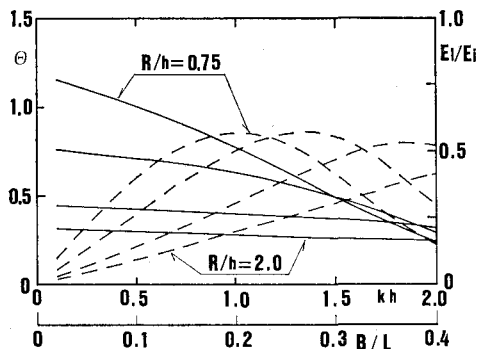


図-8 (b) 底面曲率半径 R による回転変位 θ (—) とエネルギー損失の割合 E_i/E_i (---) の変化. $B/h=1.25$, $b/B=0.4$, $z_0/h=-0.6$, $\gamma=2.5$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (B 型)

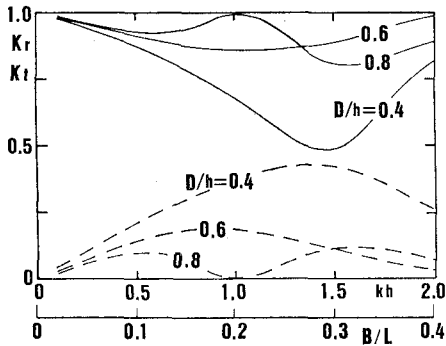


図-9(a) 堤体上面高 D による反射率 K_r (—) と通過率 K_t (---) の変化. $B/h=1.25$, $b/B=0$, $R/h=1.5$, $z_0/h=-(1-D/2)$, $\gamma=2.5$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (C型)

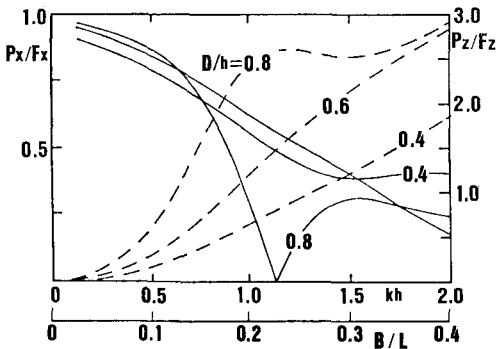


図-9(b) 堤体上面高 D による水平波力 P_x (—) と鉛直波力 P_z (---) の変化. $B/h=1.25$, $R/h=1.5$, $b/B=0.4$, $z_0/h=-(1-D/2)$, $\gamma=2.5$, $\nu_0=1.0$, $\mu=0.3$ (C型)

による水理特性の変化は、堤体重心位置や断面形状によって大きく異なっており、ここには示していないがC型ではB型と異なり、 kh がある値以上(断面形状で決まる)では、曲率半径 R による水理特性の差はほとんど生じなくなる。

なお堤体自体は不透過でスリット壁等の消波壁は有していないが、堤体のところがり抵抗によって入射波のエネルギー損失が生じるため、一般に $K_r^2 + K_t^2 < 1.0$ である。図-8(a)の場合を例に、入射波のエネルギー E_i に対するエネルギー損失の割合 E_t/E_i を回転変位とともに図-8(b)に示している。この場合、エネルギー損失は、最大で入射波のエネルギーの60%近くにもなる事がわかる。堤体の回転変位には、浮体運動に見られるような共振は生じず、堤体条件によらず kh が大きくなるとともに、B型とC型とも回転変位は単調に減少する周波特性を示す。

C型堤体について堤体上面高 D の変化による影響を

図-9(a)と図-9(b)に示す。 D が水深の6割程度あれば通過率は最大でも0.2程度におさえ得る事がわかる。堤体は不透過であるから、堤内への通過波は堤体のRocking運動による造波成分のみである。従って通過率を小さくするには出来るだけ造波効率の悪い断面形状の堤体を選ぶ事が考えられる。図-7(a)と図-9(a)の比較よりも見られるように、計算例では一般にC型堤体の方がB型に比べて波の遮断効果が良い。これは、C型堤体では堤体のRocking運動に伴う、鉛直板部分の変位による造波成分と、堤体上面部分の変位による造波成分が、ちょうど逆位相に近い関係になるため、互いに相殺する事によると考えられる。図-7(a)より、C型堤体では D が大きくなるにつれて通過率が0(回転変位が0)となり波を完全に遮断するような kh の点が生じている。その近傍で水平力は急激に減少するが、逆に鉛直力は大きくなっており、図-7(b)のB型堤体の場合と比較すると、堤体断面形状の違いが波力特性に大きく影響することがわかる。

4. あとがき

Rocking運動を積極的に許容する回転変位許容型防波堤を考え、その防波効果や作用波力等の水理特性を究明するための解析法を示した。堤体条件を種々変化させた計算を行って、回転変位許容型防波堤の水理特性について調べた結果、水理特性は堤体条件によって大きく変化するものの、一般にRocking運動によって、堤体に作用する水平波力は著しく減少することがわかった。このため、Rocking運動により生じる波の通過をある程度許容できる場合には、堤体断面形状や底面曲率等の最適堤体条件を選ぶことによって、回転変位許容型防波堤は従来の変位を許容しない防波堤に比べて、滑動に対して極めて安定となる事が期待される。

なお、本文は運輸省第四港湾建設局よりの受託研究成果⁴⁾の一部である。研究に際して便宜を計っていただいた(前)運輸省第四港湾建設局建設専門官吉本靖俊氏に謝意を表す。また、水槽実験に際しては、本学科学学生山下泰司君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 吉田明徳・西内雄一・牛房幸光・木原 力: 回転変位許容型防波堤の水理特性解析, 九州大学工学集報, 第60巻, 第6号, 1987.
- 2) 近藤政市: 基礎自動車工学, 養賢堂, 1965.
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976.
- 4) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所・九州大学工学部水工土木学科: 回転変位許容型防波堤水理特性解析研究報告書, 1988.