

狭窄部を有するパイプ式透過堤の水理特性に関する研究

大阪市立大学工学部 正会員 小田 一紀
 日本大学理工学部 正会員 長尾 義三
 大阪市立大学大学院 学生員 大東 秀光
 久保田鉄工(株) 田中 彬夫

1. まえがき

近年、マリーナや都市港湾におけるウォータ・フロント開発が盛んになるに伴って、これらの閉鎖性水域内の水質保全対策が重要な課題になってきている。この対策として、防波堤などの外郭施設の配置を工夫して港湾内外の海水交流を高めようとする試みや、防波堤そのものを透過構造にして水域境界面からの海水交換を促進させようとする試みがなされている。

本研究で対象とする透過堤は上述の後者の試みに属し、狭窄部を有する円形パイプをコンクリートで矩型に巻いた消波管ブロックを整積して一体とした構造である。この消波機構は、波の軌道運動をパイプ内の水平往復運動に変換し、その際、狭窄部で生じる渦乱によってエネルギーを逸散させるものである。

また、パイプ内の流れと渦乱による移流・乱流拡散と水面付近のパイプ内に生じる気泡連行流によるエアレーション効果を水質保全に積極的に利用しようとするところが本透過堤の特徴の一つである。

以上のように本透過堤は複数の機能を有するが、本論文ではこれらのうち波の反射率、透過率などの水理特性と波力特性について報告する。はじめに、狭窄部の最適な位置と形状を決めるための2次元水槽における予備的な研究結果を、ついでこの消波管ブロックを実際の混成堤の直立部に用いた場合の平面水槽で得られた斜め入射波に対する水理特性、および2次元水槽で得られた波力特性の実験結果を述べる。最後に、直立堤断面を対象として水理特性に関する理論的解析を行い、実験値との比較によってその妥当性を検討する。

2. 予備的研究

2.1 実験設備と方法

実験は、長さ50 m、幅1.0 m、深さ1.5 mの片面ガラス張り2次元造波水槽を用いて行った。水槽のほぼ中央に堤体を、またそれから前後にそれぞれ5 m離れた位置に波高計を2台1組にして設置した。前方の2台の波高計で入射波と反射波の波高 H_I および H_R を、後方の波高計で透過波の波高 H_T を合田ら¹⁾の提案するFFT法に基づく入射分離推定法によって求め、反射率 $K_R = H_R / H_I$ 、透過率 $K_T = H_T / H_I$ およびエネルギー損失率 $K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2$ を算定した。

堤体模型は図-1に示すように、下部に高さ30 cm、開口率40%の鉄製箱型ケーソンを2段積み、その上部に直径10 cmの円形パイプ孔を有する1辺12.5 cmのコンクリート製矩形消波管ブロック(前面開口率50%)5段積で構成されている。堤体幅(パイプ長)は60 cmを基本とし、水理特性に及ぼす堤体幅の影響を調べるときは30 cmのものも用いた。

狭窄部は前述のコンクリート製ブロックの円形孔の中に後述の断面形状を有す

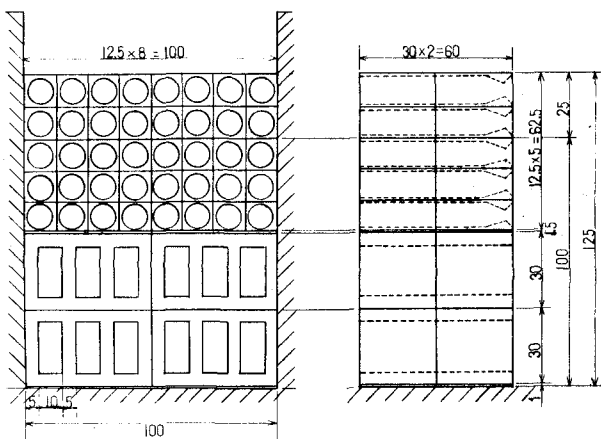


図-1 堤体模型の寸法 (単位: cm)

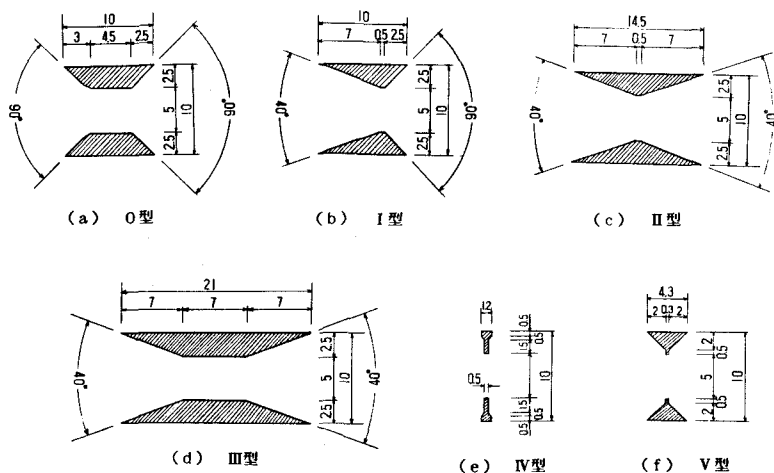


図-2 狭窄部の断面形状 (単位: cm)

表-1 狭窄部形状の分類

分類	狭窄部形状
漸拡・漸縮型	O型, I型, II型, III型
オリフィス型	IV型, V型

る狭窄部模型を組み込んだアクリル製円筒を差し込んで取り替えられるようにした。

狭窄部の断面形状として図-2に示すような6種類のものを用いた。これらは表-1に示すように、漸縮・漸拡型とオリフィス型に大別される。開口率は何れも12.5%と一定である。なお、水深は1.0 mと一定にした。

2.2 実験結果

1) 狭窄部の位置の影響

まず、O型狭窄部を用いてパイプ内におけるその位置を図-3に示すように沖側、中央および岸側の3種類に変化させ、反射率、透過率に及ぼすその位置の影響を調べた。ただし、波形勾配は $H/L = 0.02$ と一定にした。

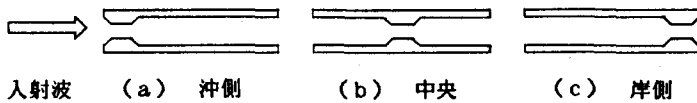


図-3 狭窄部の位置

その結果、図-4に示すように透過率は狭窄部の位置を変えてもほとんど変化は見られないが、反射率については、その位置が沖側端の時は他の場合より若干大きめの値を示している。これは、狭窄部が沖側にあるときは消波管ブロック前面付近の開口率が50%から12.5%に半減するためであると考えられ、反射率低減の観点から狭窄部の位置はパイプの中央から岸側の方が適当であるといえる。

2) 波形勾配の影響

O型狭窄部を岸側に付けて反射率、透過率およびエネルギー損失率に及ぼす入射波の波形勾配の影響を調べた結果が図-5(a)および(b)である。これらの図から、実験の範囲内では一般に同一相対水深(同一周期)の下では波形勾配が大きいほど反射率と透過率は小さく、したがって、エネルギー損失率は大きくなる傾向があることがわかる。これは、エネルギー損失量は一般に水粒子の速度の2乗に比例し、同一周期の下では波形勾配(波高)の大きい波ほどエネルギー損失量が相対的に大きくなるためであると考えられる。

3) 狭窄部の影響

本透過堤に用いるパイプは一様断面ではなくエネルギー損失量を大きくするため途中に狭窄部を設けているが、この狭窄部が水理特性にどのような影響を及ぼすかをI型狭窄部を岸側に設けた場合を例にとって示したものが図-6(a)および(b)である。ただし、波形勾配は $H/L = 0.02$ と一定である。これらの図から、反射率は狭窄部の有無でほとんど差がみられないが、透過率は相対水深が小さいほど(周期が長くなるほど)両者の差は大きくなり、したがって、エネルギー損失率の差も大きくなることがわかる。このことから、狭窄部の効果は一般に周期が長い波ほど大きいと言える。

4) 狭窄部の形状の影響

狭窄部の形状を図-2に示したように6種類に変えてエネルギー損

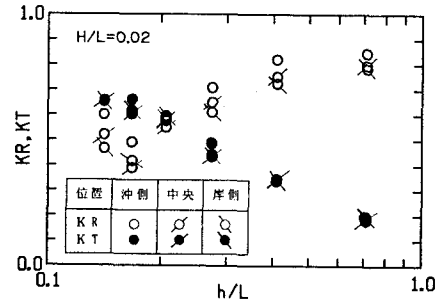


図-4 K_R , K_T に及ぼす狭窄部の位置の影響

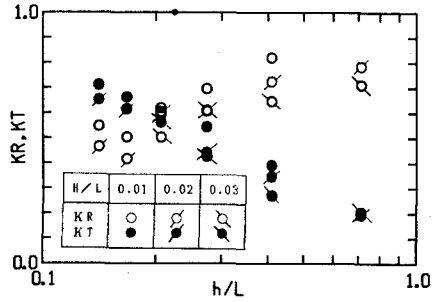


図-5(a) K_R , K_T に及ぼす波形勾配の影響

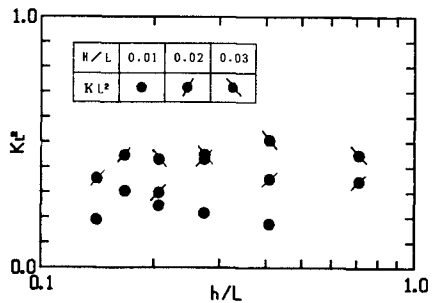


図-5(b) K_L^2 に及ぼす波形勾配の影響

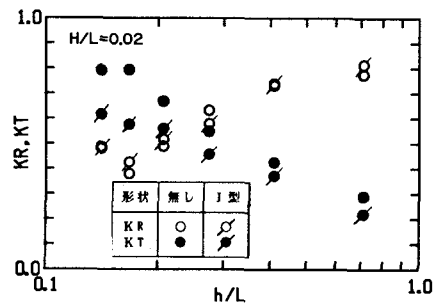


図-6(a) K_R , K_T に及ぼす狭窄部の影響

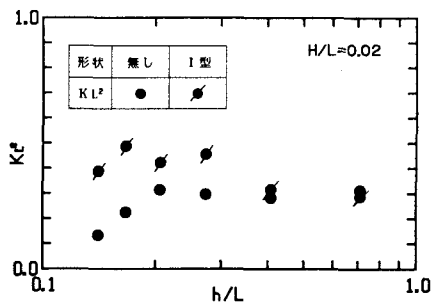


図-6(b) K_L^2 に及ぼす狭窄部の影響

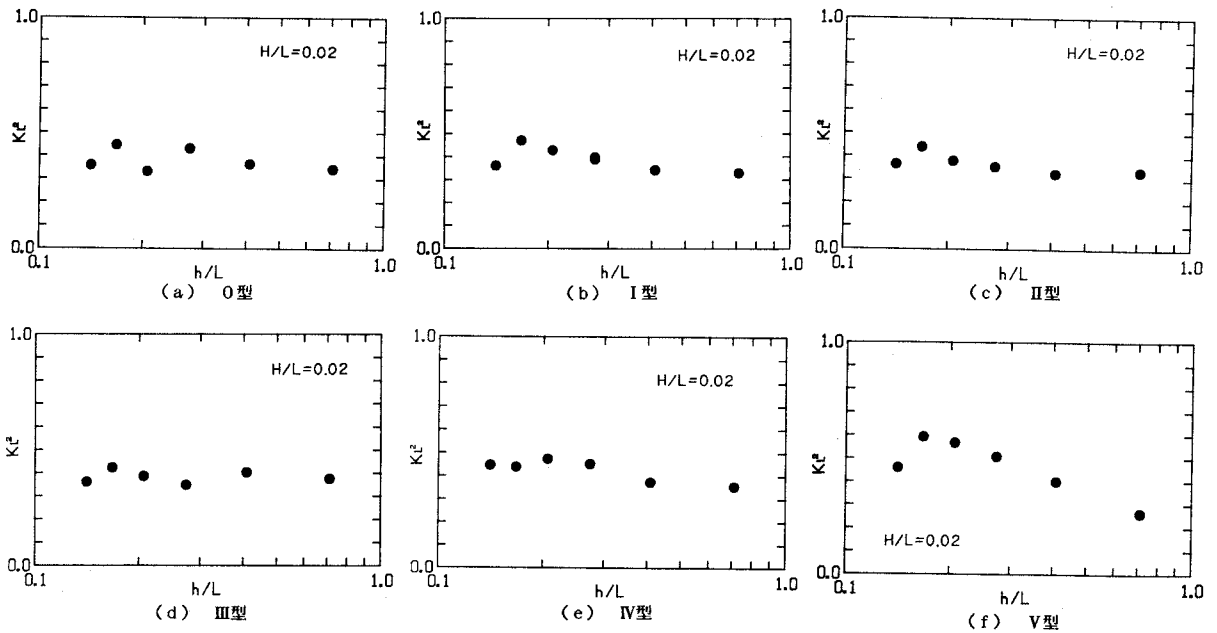


図-7 各狭窄部形状に対するエネルギー損失率

失率と相対水深の関係を調べたものがそれぞれ図-7(a)~(f)である。ただし狭窄部の位置は岸側端、波形勾配は $H/L = 0.02$ である。

これらの結果を比較すると、漸縮・漸拡型は何れもそれほど大きな差はないが、相対水深の大きな短周期波側でも比較的エネルギー損失率の高いIII型が優れている。漸縮・漸拡型に比べオリフィス型は相対水深の比較的広い範囲で高いエネルギー損失率を示しており、中でもV型は $h/L \approx 0.7$ 付近を除いて優れた消波効果を示している。

5) 堤体幅(パイプ長)の影響

V型狭窄部の場合を例にとり、水深に対する堤体幅(パイプ長)の比 l/h (堤体幅水深比)を0.3と0.6に変えて、それらの水理特性の相違を調べた結果、図-8(a)および(b)を得た。これらの図から、一般に反射率と相対水深の関係は堤体幅水深比が大きくなる(堤体幅が大きくなる)と相対水深の小さい方(長周期側)にシフトし、逆に透過率は相対水深の大きい方(短周期側)にシフトすることがわかる。換言すれば、水深、周期一定の下では堤体幅が大きいほど反射率は大きく、透過率は小さくなると言える。しかし、エネルギー損失率については長周期側では顕著な差は認められないが、短周期側ではパイプ長の短い方($l/h = 0.3$ の方)が大きく、消波効果が高い。

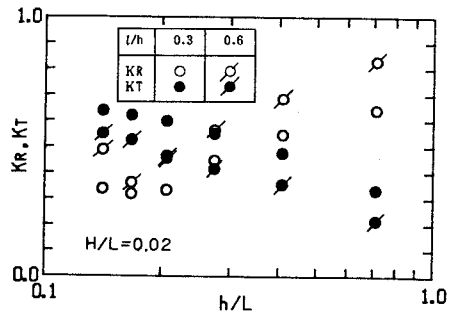


図-8(a) K_R , K_T に及ぼす堤体幅の影響

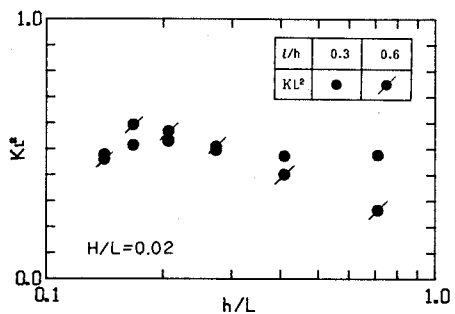


図-8(b) K_L^2 に及ぼす堤体幅の影響

3. 斜め入射波に対する水理特性

前述の予備的研究の結果から、狭窄部の最適位置として岸側端を、最適形状としてV型を選び、実際の混成堤断面に消波管ブロックを適用した場合の斜め入射波に対する水理特性を調べた。

3.1 実験設備と方法

実験は、縦26 m、横25 m、深さ1.2 mの平面水槽で行った。堤体断面は、図-9に示すように直立部の下部1段は箱型ケーソン、その上部3段は消波管ブロックで構成される実際の混成堤断面を想定し、その縮尺 1/30 の模型を長さ20 mにわたって木材で作し、水槽の側壁から十分に

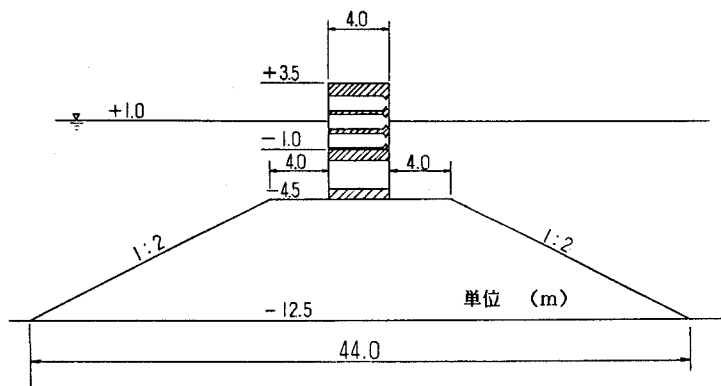


図-9 実験に用いた混成堤の断面形状

離して側壁に平行に設置した。入射角度(堤体法線の垂線に対する角度)は、長さ15 mの造波装置を移動させて15°おきに0°~75°まで変化させた。波高は、堤体の前後に堤体から1.5 m離れた位置に2台ずつ2組の波高計を設置して測定し、予備的研究の場合と同様に入反射分離推定法によって反射率、透過率を求めた。水深は45 cmと一定に、入射波の波形勾配も $h/L = 0.03$ と一定に保った。なお、水槽側壁には反射波を防止するため碎石を用いた消波装置を、堤体背後の水槽壁面にはしゅろ材(ステラシート)を用いた消波装置を設置し、また発生波の横方向への分散を防ぐため導波板を用いた。

3. 2 実験結果

図-10(a)は入射波の相対水深が $h/L = 0.542$ のときの反射率、透過率と入射角度との関係、同図(b)は同じく $h/L = 0.205$ のときのそれらの関係を示したものである。これらの図によると、 $h/L = 0.542$ の場合は入射角度による多少の変動は見られるが、全体的にみて反射率、透過率は入射角度によってほとんど変化しないと言える。また、0.205の場合も変動は大きいが全体的にみて反射率、透過率ともに入射角度との一定な関係は認められない。 $\theta = 60^\circ$ で反射率、透過率ともに他の角度のときより小さな値を示しているが、この理由については現在のところ不明である。反射率、透過率が入射角度によってあまり変化しない理由については、基礎マウンドの影響が考えられるが、これも正確なことはわからない。今後さらに基礎マウンドのない直立断面の場合と比較検討するなどして調べる必要がある。

4. 波力特性

4. 1 実験設備と方法

実験は、長さ50 m、幅2.5 m、深さ1.5 mのコンクリート製2次元造波水槽で行った。堤体模型は図-9に示した混成堤断面とほぼ同じものを縮尺 1/10 で、基礎マウンドは鉄の骨組と木材で不透透に、直立部の下部箱型ケーソンは鉄材で、上部消波管ブロックはコンクリートで、パイプおよび狭窄部はアクリル材で製作した。波力は、堤体中央の、幅が消波管ブロック1個分の直立部を一体としたものを供試体として、これに働く水平波力、鉛直波力およびモーメントを歪ゲージ式6分力計(BLオートテック社製)で測定した。波力の実験値として波を与えてからほぼ定常な値を示す範囲における連続5波分の平均値を採用した。なお水深は1.25 mである。直立部の消波管ブロックの前面開口率は25 %、狭窄部の形状はV型で、その開口率は12.5 %、下部の矩形ケーソンの開口率は50 %である。

4. 2 実験結果

前述の6分力計で測定された直立部供試体に働く水平波力(P_H)_{exp} および鉛直波力(P_V)_{exp} を直立部が不透透な鉛直壁と仮定して合田の波圧算定式より求めた水平波力(P_H)_{Goda} および鉛直波力(P_V)_{Goda} との比(P_H)_{exp} / (P_H)_{Goda} および(P_V)_{exp} / ($P_V)_{Goda} の値を実物換算波高を横座標にとって表したものが図-11および図-12である。$

図-11によると、図-9に示す混成堤の透過性直立部に働く水平波力の実験値はこれを鉛直不透透壁として取り扱ったときの合田式による水平波力に比べて一般に小さく、実験の範囲内では最大60 %程度低減する。その低減率は一般に周期が長いほど大きくなるが、波高の増大とともに減少する傾向が見られる。

一方図-12から、鉛直波力については合田式から算定される値より一般に大きくなり、その増大率は周期の長い

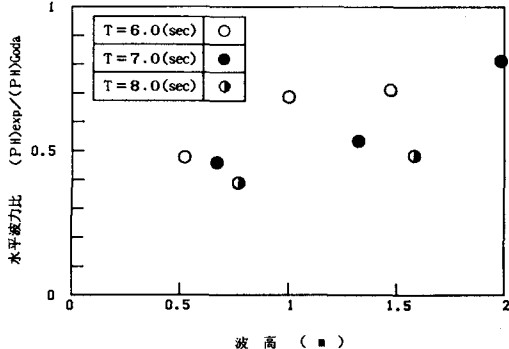
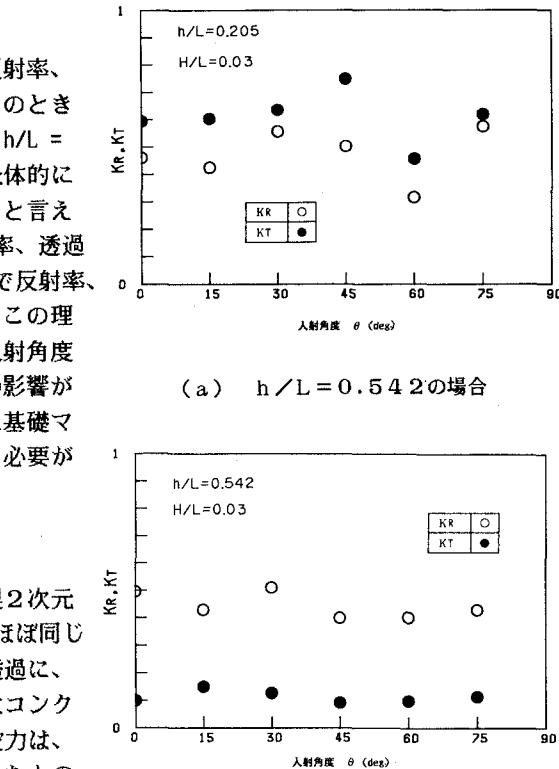
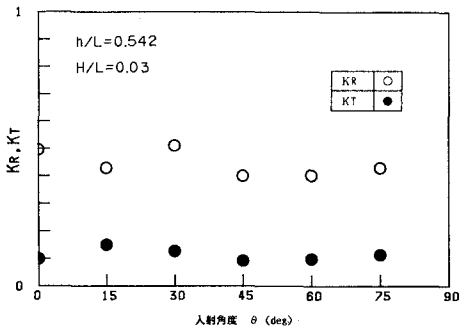


図-11 混成堤直立部に働く水平波力特性



(a) $h/L = 0.542$ の場合



(b) $h/L = 0.205$ の場合

図-10 K_R , K_T に及ぼす入射角度の影響

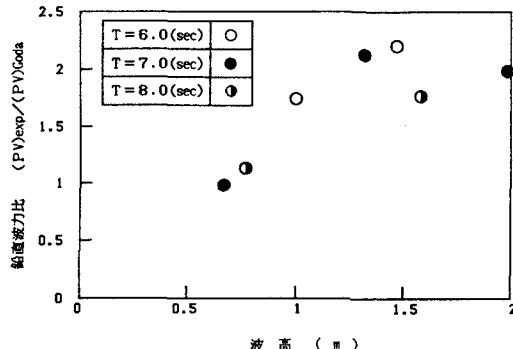


図-12 混成堤直立部に働く鉛直波力特性

ほど小さく、波高の増加とともに大きくなる傾向が見られる。このように鉛直波力が合田式による算定値より大きくなるのは水面付近の消波管ブロックのパイプ孔内上面に働く揚圧力に起因するものと考えられ、今後パイプ内の局部的波圧強度を測定してその詳しい実態を調べる必要がある。

5. 理論的解析

断面全体が消波管ブロックで構成されている直立堤を対象としてポテンシャル理論によってこの種のパイプ式透過堤の基本的な水理特性に関する理論的解析を試みた。

5. 1 ポテンシャル理論

水深 h の一様な水域に消波管ブロックで水底から静水面上まで立上がった直立堤を想定し、その座標系を図-13 のようにとる。理論の展開法として堀口ら²⁾の両面多孔壁防波堤の水理解析に適用した方法を準用する。領域を図-13に示すように入射波と反射波の共存する領域Ⅰ、水平往復流の存在する領域Ⅱ、そして透過波のみが存在する領域Ⅲに分割する。

領域Ⅰの速度ポテンシャル Φ_1 は微小振幅波理論に従えば式(1)のように表される：

$$\Phi_1 = \frac{g}{\sigma} \{a \cos(kx - \sigma t) + b \cos(kx + \sigma t + \theta_1)\} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (1)$$

同様に、領域Ⅲでは

$$\Phi_3 = \frac{g}{\sigma} \{c \cos(k(x-l) - \sigma t + \theta_2)\} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (2)$$

ここに、 a, b, c ：それぞれ入射波、反射波および透過波の振幅、 θ_1, θ_2 ：入射波に対する反射波および透過波の位相差、 $\sigma = 2\pi/T$ ：入射波の角周波数、 $k = 2\pi/L$ ：入射波の波数、 T ：波の周期、 L ：波長。

この Φ_1 と Φ_3 の間には任意の z において次の連続条件式が成り立たなければならない：

$$\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \Phi_3}{\partial x}\right)_{x=l} \quad (3)$$

次に、領域Ⅱにおけるパイプ内の流体の運動方程式として管路の非定常運動のそれを適用すると

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{p}{\rho} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{v^2}{2} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \{g H_f\} = 0 \quad (4)$$

ここで、 v ：パイプ内流速、 p ：パイプ内圧力、 ρ ：水の密度、 H_f ：損失水頭。

パイプ内の狭窄部を図-14に示すようにモデル化すると、パイプ内の流速 v は断面の広い部分と狭い部分に分けて式(5)のように表される。

$$v = \begin{cases} v_p = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)_{x=0} & (0 < x < l_1, l_1 + l_2 < x < l) \\ v_s = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)_{x=0} & (l_1 < x < l_1 + l_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中、 v_p, v_s ：直径 D_1 部分および D_2 部分の流速、 γ ：消波管正面の開口率。

式(4)中の圧力勾配は、近似的にパイプ両端における圧力差による平均勾配に等しいと仮定すると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho} \right) = \frac{1}{l} \left\{ \left(-\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} \right)_{x=l} - \left(-\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right)_{x=0} \right\} \quad (6)$$

損失勾配は図-14の各部に分けて表すと、

$$\frac{\partial}{\partial x} (H_f) = \begin{cases} \frac{1}{l_1} (f_o + f' \frac{l_1}{R_1}) \frac{|v_p| v_p}{2g} & (0 < x < l_1) \\ \frac{1}{l_2} (f_{s_o} + f' \frac{l_2}{R_2} + f_{s_e}) \frac{|v_s| v_s}{2g} & (l_1 < x < l_1 + l_2) \\ \frac{1}{l_3} (f_o + f' \frac{l_3}{R_1}) \frac{|v_p| v_p}{2g} & (l_1 + l_2 < x < l) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 f_o, f_e ：パイプの入口および出口の損失係数、 f_{s_o}, f_{s_e} ：急縮、急拡の損失係数、 f', f'' ：直径 D_1 部分および D_2 部分の摩擦損失係数、 R_1, R_2 ：直径 D_1 部分および D_2 部分の径深、 l_1, l_2, l_3 ：各部の長さ。

式(5)~(7)を考慮して式(4)を $x = 0 \sim l$ まで積分し、さらに式(1), (2)を代入し、且つローレンツの等価仕事の原理に基づいて非線形項を線形化して $z = -h \sim 0$ まで積分すると式(8)を得る。

$$\begin{aligned} & \beta C_0 B \{ (1 - K_r \cos \theta_1) \cos \sigma t + K_r \sin \theta_1 \sin \sigma t \} \\ & - \frac{B}{kl} \{ (1 + K_r \cos \theta_1 - K_t \cos \theta_2) \sin \sigma t + (K_r \sin \theta_1 - K_t \sin \theta_2) \cos \sigma t \} \\ & + \frac{1}{2} \beta^2 f' A \frac{8}{3\pi} \{ (1 - K_r \cos \theta_1)^2 + (K_r \sin \theta_1)^2 \} \{ \cos \theta' \sin \sigma t + \sin \theta' \cos \sigma t \} = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、

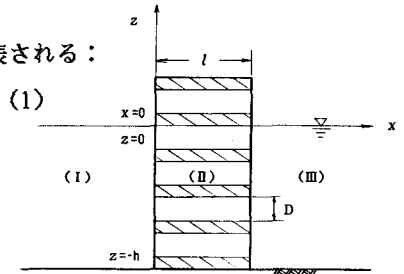


図-13 座標系

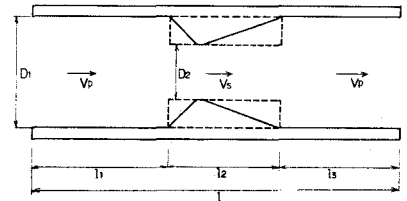


図-14 狭窄部のモデル化

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a}{l}, B = \frac{2\sinh^2 kh}{kh + \sinh kh \cdot \cosh kh}, C_0 = \frac{1}{l} \{ (l-l_2) + (-\frac{D_1}{D_2})^2 l_2 \}, \beta = \frac{1}{\gamma} \\ \theta' &= \tan^{-1} \frac{-K_r \sin \theta_1}{1 - K_r \cos \theta_1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

K_r, K_t : 反射率、透過率

また、式(3)に式(1),(2)を代入すると、

$$\{ (1 - K_r \cos \theta_1 - K_t \cos \theta_2) \sin \sigma t - (K_r \sin \theta_1 + K_t \sin \theta_2) \cos \sigma t \} = 0 \quad (10)$$

以上の式(8)および(10)を連立で解くと、反射率、透過率が求められる。

5. 2 理論値と実験値の比較

前述のポテンシャル理論から得られた反射率、透過率の理論値を実験値と比較して示した一例が図-15(a),(b)である。

実験は予備的研究で用いたものと同じ片面ガラス張り2次元造波水槽で行った。実験条件は、水深1.0 m、 $l = 60$ cm、 $D_1 = 10$ cm、 $D_2 = 5$ cm、 $\gamma = 0.503$ 、狭窄部の位置は岸側端、形状はI型($l_2 = 10$ cm)である。また、理論値の計算における諸定数の値として、 $f_0 = 0.5$ 、 $f_0 = 1.0$ 、 $f_{s0} = 0.43$ 、 $f_{s0} = 0.56$ 、 $f' = 0.08$ 、 $f'' = 0.005$ を用いた。

図-15(a)および(b)は狭窄部がない場合の理論値と実験値の比較を表し、(a)は $H/L = 0.01$ の場合、(b)は $H/L = 0.02$ の場合である。また、図-16(a)および(b)は狭窄部を設けた場合の比較を表している。これらの図から、透過率については狭窄部が有る場合も無い場合も両者はよく一致しているが、反射率については何れの場合も理論値は実験値より大きめの値を与え、その差は狭窄部が有る場合の方が大きく、且つ波形勾配が大きくなるほど大きくなる傾向が認められる。この不一致の原因として、狭窄部のモデル化にも問題があるようにも思われるが、実験では堤体沖側面における水面付近の僅かな境界条件の違いが反射率に比較的大きな変動を引き起こすことが確認されているので、波の有限振幅性も原因として考えられる。しかし、全般的に見て理論値は実験値をよく説明しており、直立透過堤の水理特性の予測には本理論は有用であると考えられる。

6. むすび

本研究によって得られた主な結論は以下の如くである。

1) パイプ内の狭窄部の位置は透過率にはほとんど影響を及ぼさないが、それが沖側端に位置すると反射率を大きくするので低反射の観点からは中央より岸側寄りが多い。

2) 合計6種類の狭窄部形状についてエネルギー損失率を比較した結果、オリフィス型のV型が相対水深の幅広い範囲の波に対して消波効果が最も高いことが見出された。

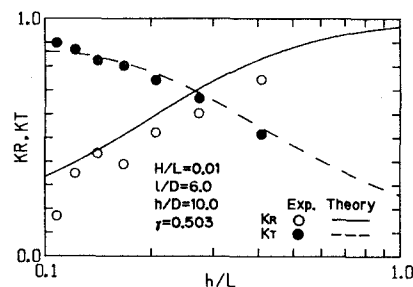
3) V型狭窄部を有する消波管ブロックを直立部に組み込んだ混成堤の反射率、透過率は波の入射角度によって余り変化しないことが見出された。また、これに働く水平波力は鉛直不透壁として合田式より算定される値より一般に小さく、実験の範囲内では最大60%程度低減する。

4) 直立堤に対してポテンシャル理論から得られた計算値は、反射率については実験値より若干大きめの値を与えたが、透過率についてはよく一致し、全般的には直立堤の水理特性はポテンシャル理論によってほぼ予測できることが検証された。

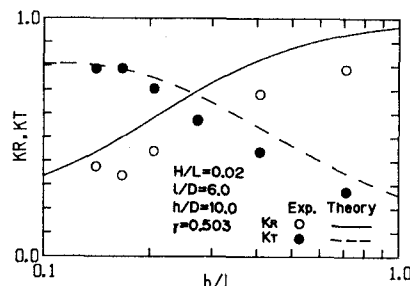
なお、本研究の遂行において本学大学院の志村友行君、学生の山中悟君、小笠原哲也君、並びに久保田鉄工(株)の永井義郎氏に多大のご協力を戴いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 合田良実他：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, pp.1~24, 1976.
- 2) 堀口孝夫他：両面多孔壁防波堤の水理解析、第24回海岸工学講演会論文集、pp.276~280, 1977.

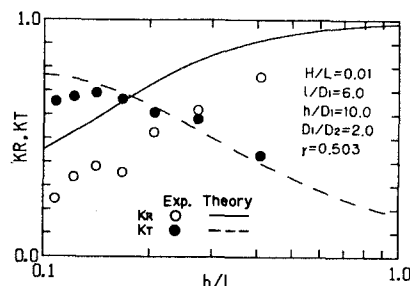


(a) $H/L = 0.01$ の場合

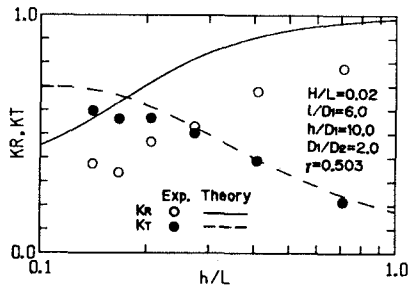


(b) $H/L = 0.02$ の場合

図-15 理論値と実験値との比較(狭窄部無し)



(a) $H/L = 0.01$ の場合



(b) $H/L = 0.02$ の場合

図-16 理論値と実験値との比較(狭窄部有り)