

複列鉛直版潜堤による波の制御

吉田明徳*・木佐貫徹**・古賀諭志***・小島治幸****

1. まえがき

本研究は、不透過矩形潜堤をある間隔離して2個設置した所、それと同一の幅を有する単一の矩形潜堤とほぼ同等の防波効果が得られた事から、その極限として鉛直版を複列配置（構造的には最近港湾構造物にも用いられつつあるコンクリートと鋼の複合材料¹⁾を利用した1体構造を考える）する事によって、潜堤として有効な波の遮断効果を得るとともに、個々の鉛直版に作用する波力の位相差を利用する事によって、堤体に作用する全波力を著しく軽減しうる可能性に着目して研究を行ったものである^{2),3)}。

本研究に関連した研究として、清川・三俣⁴⁾が多重の没水鉛直壁と底版よりなる Resonant Duct の共振現象に着目して、その防波効果についての理論解析を行っている。ただし、渦によるエネルギー損失の影響は考慮されていないため理論解析は防波効果を著しく過小評価する結果を与えている。単一の鉛直版に関しても、いくつかの解析例が示されているが（例えば W.D. Gnan⁵⁾, D. V. Evans⁶⁾, 日野・山崎⁷⁾, C. Macaskill⁸⁾、これらの例からも知れるように、単一の鉛直版の波の遮断効果は極めて小さく、潜堤としての工学的な実用性はほとんどない。

本文では、複列の鉛直版潜堤による波の遮断効果と、堤体に作用する波力の特性を、微小振幅波運動の速度ポテンシャルに関する2次元境界問題として、グリーン公式を用いて解析する方法を示し、水槽実験を行って解析法の妥当なことを確かめるとともに複列鉛直版潜堤の効果について考察した。この際、鉛直版の上端近傍で渦により生じるエネルギー損失は、そこでの流速の2乗に比例（比例定数 f ）すると仮定して理論的に考慮し、非線項である流速の2乗項を、時間については Lorentz の等価仕事則⁹⁾による線形化を行い、さらに線形解（ $f =$

0）を1次近似とするくり返し計算を行って数値解を求めた。

2. 理論解析の概略

図-1 に示すように、一定水深 h の海底に固定された高さが d^+ , d^- の2個の鉛直板（任意の形状の曲面版を含む）が、距離 B だけ離して設置されており、これに対し、振幅 ζ_0 、角周波数 σ の微小振幅波が x の正の方向より入射する場合を考える。解析の便宜上、図-1 に示すように、仮想の境界 $AB, A'B', CD$ および $C'D'$ を設け、流体域を $(0), (1^+), (1^-), (2^+), (2^-)$ の5領域に分割する。

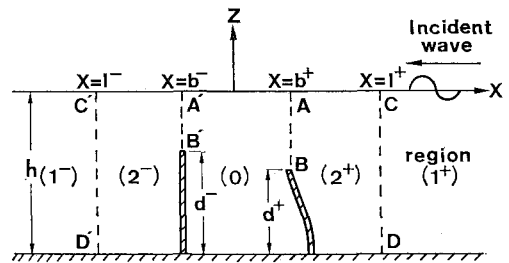


図-1 複列鉛直版潜堤

流体運動は非粘性・非圧縮性流体の無渦運動と仮定すると、流体運動の速度ポテンシャルが存在し、次の様に表わす事が出来る。

$$\phi(x, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) \exp(i\sigma t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

2.1 領域 $(1^+), (0), (2^+)$ のポテンシャル関数

領域 (1^+) におけるポテンシャル関数をそれぞれ ϕ_1^+ , ϕ_1^- とするとそれらは水底条件および微小振幅波の水面条件を満足するラプラスの式の解として次式で表わす事が出来る。

$$\begin{aligned} \phi_1^\pm(x, z) = & \delta^{(+)} \exp(k_0 x) Z^{(0)}(z) \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} C_n^\pm \exp(\mp k_n x) Z^{(n)}(z) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

* 正会員 工 博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

** 正会員 工 修 九州大学大学院 工学研究科

(現: 鹿島建設(株))

*** 正会員 九州大学助手 工学部水工土木学科

(現: 東京都)

**** 正会員 Engr. 九州大学助手 工学部水工土木学科

ただし、 $\phi_1^\pm, C_n^\pm \dots$ 等は領域(1⁺)における $\phi_1^\pm, C_n^\pm \dots$ と領域(1⁻)における $\phi_1^\pm, C_n^\pm \dots$ を意味する(複号同順). $\delta^{(+)}$ は領域(1⁺)において1を取り、領域(1⁻)では0を取る定数である.

また $Z^{(n)}(z)=\cos k_n(z+h)/\cos k_n h$ で、 $k_n(n=0, 1, \dots)$ は、 $n=0$ のときは純虚数($k_0=ik$), $n \neq 0$ のときは実数として、次式の根で与えられる.

$\sigma^2 h/g=-k_n h \tan k_n h \dots\dots\dots (3)$

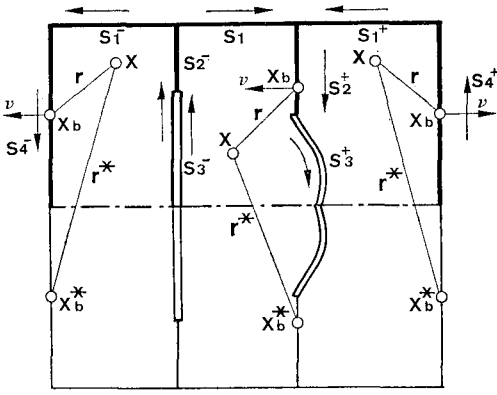


図-2 積分境界

図-2に示す様に、領域(0)と領域(2[±])の境界線を表わす事とし、境界線に対する法線 ν を領域(0)に関しては内向き、領域(2[±])に関しては外向きにするものとする。このとき、領域(0),(2[±])におけるポテンシャル関数は、グリーンの定理より、ラプラス方程式の基本解 $\log r$ を用いて次式で表わす事が出来る.

$$\phi_0(X)=\frac{-1}{\alpha} \int_D \left\{ \phi_0(X_b) \frac{\partial}{\partial \nu} G(r)-G(r) \frac{\partial}{\partial \nu} \phi_0(X_b) \right\} ds \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi_2^\pm(X)=\frac{1}{\alpha} \int_{D_2^\pm} \left\{ \phi_2^\pm(X_b) \frac{\partial}{\partial \nu} G(r)-G(r) \frac{\partial}{\partial \nu} \phi_2^\pm(X_b) \right\} ds \dots\dots\dots (5)$$

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 の鏡像点 x_b^* との間の距離である。 α は x が境界線上の点である場合は π 、境界線を除く領域内の点である場合は 2π を取る定数である。また、 $D, D_2^\pm$ は積分境界を意味し、それぞれ次の様である.

$$\left. \begin{aligned} D &= S_1 + S_2^+ + S_3^+ + S_3^- + S_2^- \quad (\text{時計まわり}) \\ D_2^+ &= S_1^+ + S_2^+ + S_3^+ + S_4^+ \quad (\text{反時計まわり}) \\ D_2^- &= S_1^- + S_4^- + S_3^- + S_2^- \quad (\text{反時計まわり}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

2.2 境界条件

各境界面における境界条件は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} &= -(\sigma^2/g)\phi_0 && \text{on } S_1 \dots\dots\dots (7-a) \\ \frac{\partial \phi_2^\pm}{\partial \nu} &= (\sigma^2/g)\phi_2^\pm && \text{on } S_1^\pm \dots\dots\dots (7-b) \\ \frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} &= 0, \quad \frac{\partial \phi_2^\pm}{\partial \nu} = 0 && \text{on } S_3^\pm \dots\dots\dots (7-c) \\ \phi_2^\pm &= \phi_1^\pm, \quad \frac{\partial \phi_2^\pm}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_1^\pm}{\partial \nu} && \text{on } S_2^\pm \dots\dots\dots (7-d) \end{aligned}$$

鉛直版上の仮想境界 $S_2^\pm$ では、鉛直板を横切る流れによって渦が生じ、流速の2乗に比例する圧力損失が生じるものと仮定し、この比例定数(損失係数)を f で表わすと、圧力の連続条件は次式のように書ける.

$$\mp \frac{1}{\rho} (P_2^\pm - P_0) = \frac{f}{2} |V_2^\pm|^2 \quad \text{on } S_2^\pm \dots\dots\dots (7-e)$$

ρ は流体密度で、 $P_2^\pm, P_0, V_2^\pm$ はそれぞれ境界 $S_2^\pm$ における領域(2[±]),(0)の流体圧および流速を意味する.

Lorentsの等価仕事則を用いて(7-e)式右辺の時間に関する非線型項を線型化すると、(7-h)式は結局次式の様に書ける.

$$\phi_2^\pm - \phi_0 = \beta \cdot \left| \frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} \right| \cdot \frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} \quad \text{on } S_2^\pm \dots\dots\dots (7-f)$$

ただし、

$$\beta = i \cdot \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\sigma^2 h/g} \cdot \frac{\zeta_0}{h} \dots\dots\dots (7-g)$$

また、

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_2^\pm}{\partial \nu} \quad \text{on } S_2^\pm \dots\dots\dots (7-h)$$

2.3 積分方程式の離散化と連立一次方程式

境界線 $S_1, S_1^\pm, S_2^\pm, S_3^\pm, S_4^\pm$ を、それぞれ数個の小要素 ΔS_j に分割し、(4)および(5)式の積分を点 x が境界線上にある場合について要素 ΔS_j に関して離散化して、(7-a)~(7-h)の境界条件を用いると $\phi_0(j), \partial \phi_0(j)/\partial \nu, \phi_2^\pm(j)$ および係数 $C_n^\pm$ に関する連立一次方程式を得る。ただし、式には、 $|\partial \phi_0(j)/\partial \nu| \partial \phi_0(j)/\partial \nu$ の非線型項が含まれるから、これを直接解く事は出来ない。そこで、まず $f=0$ の場合について解き、ついで、その解を第一近似として $|\partial \phi_0(j)/\partial \nu|$ に用いて解き、順次同様にして解が収束するまで、繰り返し計算を行うものとする。なお、鉛直版が任意形状の曲面版である場合は、版上の座標入力を変更するだけでよい。また、2列以上の場合についても(4)式を適用する領域が増えるのみで解析の手順は上述の2列の場合と同様である.

2.4 諸量の算定

水面波形を $\zeta(x)\exp(i\sigma t)$ と表わすと、各領域における $\zeta(x)$ は次式で与えられる.

$$\zeta(x)/\zeta_0 = i \left\{ \delta^{(+)} \exp(k_0 x) + \sum_{n=1}^\infty C_n^\pm \exp(\mp k_n x) \right\} \quad \text{領域}(1^\pm) \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta(x)/\zeta_0 &= i\phi_0(j) && \text{領域}(0) \\ &= i\phi_2^\pm(j) && \text{領域}(2^\pm) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

反射率 K_r および通過率 K_t は次式で与えられる.

$$K_r = |C_0^+|^2, \quad K_t = |C_0^-|^2 \dots\dots\dots (13)$$

鉛直版によって生じるエネルギー損失量 E_e の入射波のエネルギー E_i に対する割合は次式で与えられる.

$$E_e/E_i = 1 - (|C_0^+|^2 + |C_0^-|^2) \dots\dots\dots (14)$$

前後の鉛直板 ($x=b^\pm$) に作用する水平波力を $F_H^\pm$ 、鉛直波力を $F_V^\pm$ とするとそれらは次式の算定される.

$$\frac{F_H^+}{\rho g \zeta_0 h} = i \left\{ - \int_{S_3^+} \phi_0 dz + \int_{S_3^+} \phi_3^+ dz \right\} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{F_H^-}{\rho g \zeta_0 h} = i \left\{ \int_{S_3^-} \phi_0 dz - \int_{S_3^-} \phi_3^- dz \right\} \dots\dots\dots (16)$$

前後の鉛直版に作用する波力の合成波力を E_H , F_V とするとそれらは次式で与えられる。

$$F_H = F_H^+ + F_H^-, \quad F_V = F_V^+ + F_V^- \dots\dots\dots (17)$$

3. 数値計算と実験

3.1 計算条件

仮想境界面 CD および $C'D'$ はそれぞれ、鉛直版上の仮想境界面 AB , $A'B'$ より h (水深) だけ離して取った。仮想境界 CD と $C'D'$ の堤体からの距離は理論上任意の値に取ってよい。一般に仮想境界の位置が堤体より離れるにしたがって、領域 ($1^\pm$) における停止散乱波の影響は指数関数的に小さくなる。水深の3倍程度離して取れば(2)式における停止散乱波の項はほぼ無視してさし支えない。ただし、逆に領域は大きくなるために、境界要素数は増大する事になり、全体の未知数はそれ程かわらない。参考文献(3)に仮想境界における級数項 $C_n^\pm e^{\mp k_n z}$ の値を、 $k=0.5$ と 1.5 について示しているが、10項程度取れば十分である。境界要素は $\Delta S_j/h = 0.1$ に固定して計算を行った。エネルギー損失係数 f の値は、 $f=0$ から 0.5 きざみで $f=2.0$ まで5通りについて計算した。 $f \neq 0$ の場合のくり返し計算における解の収束の判定は、通過率と反射率および波力の諸量に関して、 $(n+1)$ 回と n 回での差が 10^{-3} 以下であれば収

束したものとして計算を打ち切った。3列鉛直版の場合の通過率と前部鉛直版に作用する波力について、 $f=1.5$ の場合を例に、値の収束の様子を図-3に示しているが、大体4~5回程度で収束する。

3.2 実験条件

実験は、一端に波吸収式造波装置を有する2次元造波水路(幅 0.3 m, 深さ 0.5 m, 長さ 28 m)を用いて行った。水深は 0.35 m, 入射波の周期は $T=2.47$ 秒 ($kh=0.5$) から $T=0.86$ 秒 ($kh=2.0$) まで kh の値を 0.05 きざみに取り、入射波の波高はほぼ 4 cm に固定し、容量式波高計を用いて入射波高、通過波高を測定して通過率を算定した。また反射率の算定には、合田等が示した入・反射波の分離推定法¹⁰⁾を用いた。鉛直版は、コンクリート塊に埋め込んだ断面 2 cm $\times$ 2 cm の鋼棒に、厚さ 1 cm のアクリル板をボルトで固定して使用した。鉛直版に作用する水平波力の測定は森平ら¹¹⁾を参考に、鋼棒上のある間隔離れた2点の表(入射波側)と裏(通過波側)に歪ゲージをブリッジ回路をなすようにはり、2点の曲げモーメントの差に比例するブリッジの出力電圧から波力を算定した。また、前列と後列の鉛直版のブリッジの出力電圧を同時にストレージ・オシロスコープに記録して、前後の鉛直版の波力の位相差を読み取り、それを用いて鉛直版に作用する全波力を算定した。

3.3 理論値と実験値の比較

2列鉛直版潜堤について、通過率 K_t , 反射率 K_r , 前後の鉛直版に作用する波力の合成波力(全波力) F_H に関する理論値と実験値の比較を図-4(a)~図-4(c)に示す。ただし、波力は鉛直壁に作用する重複波の波力 $F_s = 2\rho g \zeta_0 h [\tanh kh/kh]$ に対する比で示している。図-4(a)の通過率について見ると、 $f=0$ の場合の理論値は実験値と大きく異なっており、エネルギー損失を考慮しない場合には鉛直版潜堤の波の遮断効果を著しく過小評価する事がわかる。ただし、全波力に関しては図-4(c)に見られるように、波長が長い場合(例えば $kh < 1.0$)を除けば f の値による全波力の差はほとんど生じない。

通過率について理論値と実験値を比較すると、実験値はほぼ $f=1.0$ と $f=2.0$ の理論値の間にあり、また $f=1.0$ と $f=2.0$ では、理論値にそれ程大きな差はない事から、 $f=1.5$ 程度に取ればよいと思われる。図-4(b)の反射率を見ると、通過率は $f=1.5$ 程度に取ることによって理論値と実験値がよく合うのに対し、反射率は f の値にかかわらず実験値は理論値に較べて一様に 0.1 程度小さな値を取っている。これは日野ら⁷⁾が指摘している様に、鉛直版上端での渦の生じ方が、入射波側で同じではない事によると考えられるが、なぜ反射率の方で一様に小さくなるかについてはよくわからない。

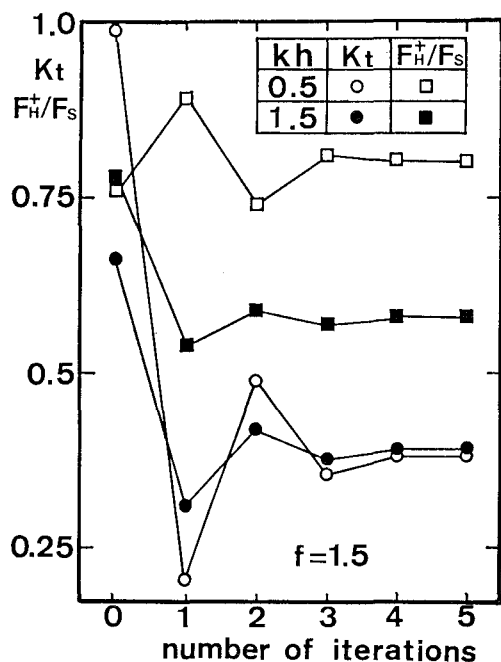


図-3 解の収束の様子 (3列鉛直版潜堤)

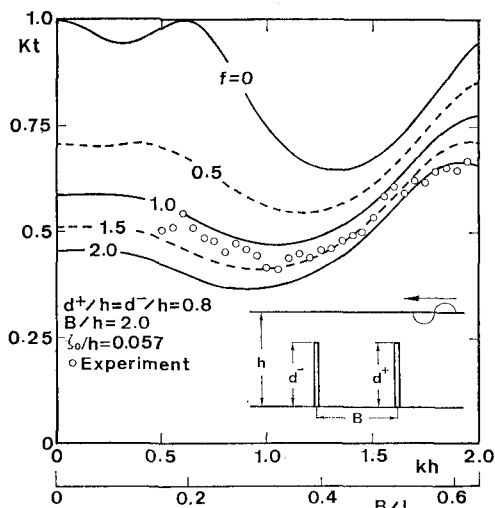


図-4 (a) 通過率 (2列鉛直版潜堤)

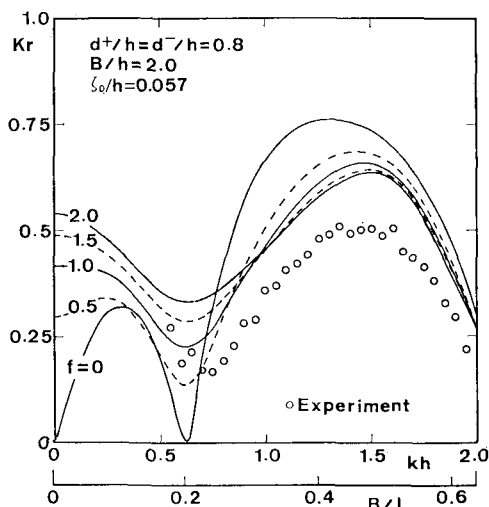


図-4 (b) 反射率 (2列鉛直版潜堤)

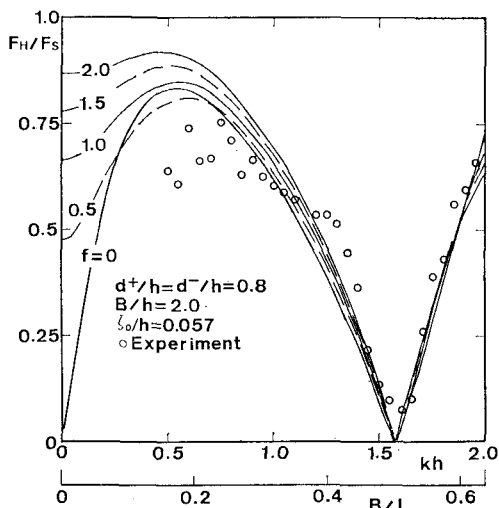


図-4 (c) 全波力 (2列鉛直版潜堤)

図-4(c)をみると、 $kh=1.6$ 近傍で堤体に作用する全波力は著しく減少し、0となる場合がある。これは前列の鉛直版と後列の鉛直版に作用する波力の大きさがほぼ等しく、両者の位相差が、ほぼ逆位相となるためこのとき鉛直版の間隔は入射波長のほぼ半波長である。

通過率は $B/L=0.3$ 近傍の波長の波に対して最も遮断効果が大きい、合成波力が最小となる $B/L=0.5$ とは一致しない。そこで、図-5(a)中に示すようにさらに距離 h だけ離して鉛直版を設置した3列鉛直版潜堤について計算と実験を行った結果を、図-5(a)、図-5(b)に示す。数値計算上は3列以上でも容易に解析できるが、潜堤としての実用上は3列程度までと思われる。2列の場合に比べて、特に短波長($kh>1.4$)での波の遮断効果が増大しており、入射波の波長によらず通過率は

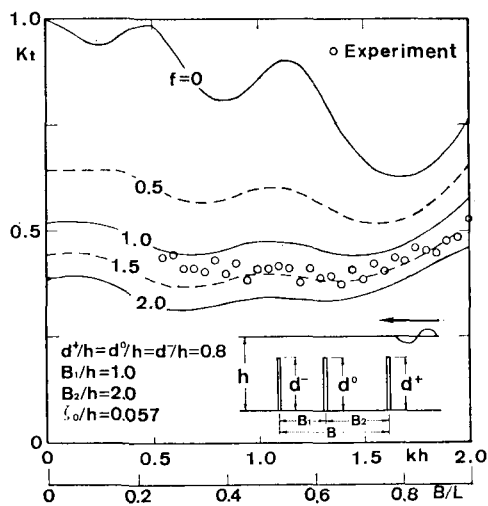


図-5 (a) 通過率 (3列鉛直版潜堤)

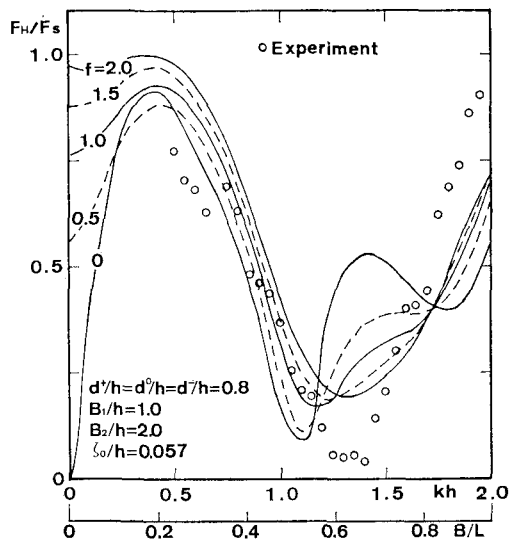


図-5 (b) 全波力 (3列鉛直版潜堤)

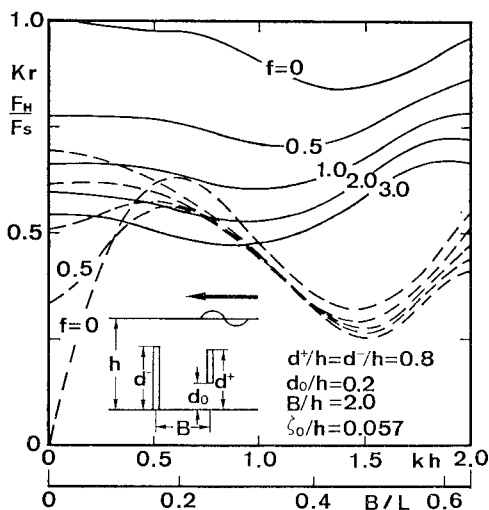


図-6 通過率と全波力 (3列鉛直版潜堤)

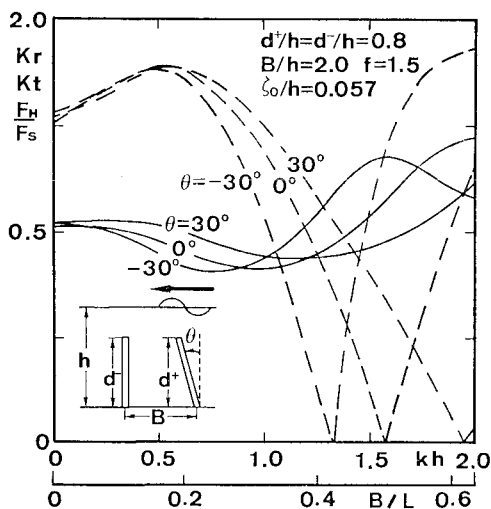


図-7 通過率と全波力 (2列鉛直版潜堤)

0.4~0.5 程度と小さくなっている。また、堤体に作用する全波力も $kh=0.9\sim 1.8$ で重複波力の50%以下と、比較的幅広い波長の波に対して全波力の軽減効果が生じている。これらの事から、鉛直版の高さや形状および鉛直版の間隔を適当に選ぶことによって、波の遮断効果が大きくかつ安定な潜堤としての可能性が考えられる。

図-9は前列鉛直版の下端と海底面とが $d_0/h=0.2$ だけ開いている場合の通過率と全波力である。図-4(a), (c)と比較すると通過率は若干増大し、全波力が0とな

る点はなくなくなるものの、入射波の波長に対する通過率、全波力の変動はゆるやかとなる傾向にある。また図-7は2列鉛直版潜堤の前列の鉛直版に 30° 傾斜を持たせた場合の通過率と全波力を示している。

4. あとがき

本解析法は、鉛直版が任意の曲面版であってもそのまま適用でき、版の下端と海底面との間が開いている様な場合にも容易に拡張できる。これらの場合を含め、防波効果が大きくかつ全波力ができるだけ小さくなるような、複列鉛直版潜堤の最適条件の検討を行っている。また今回の実験では入射波の波高は $\zeta_0/h=0.057$ についてのみ行なったが、入射波の波高に対する解の適用性についても検討を行うつもりで、これらについては、別の機会に述べたい。

参考文献

- 1) 例えば、阿部 久・鈴木栄一郎・田中征登・若菜弘之・野沢栄造：横須賀港（久里浜地区）防波堤築造工事——鋼とコンクリートのハイブリッド港湾構造物——，土木施工27巻，第6号，1986年5月。
- 2) 日野 昇・木佐貫徹・古賀諭志・吉田明徳：複列鉛直版による波の制御効果，昭和61年度 土木学会西部支部研究発表会講演概要集，1987年3月。
- 3) 吉田明徳・木佐貫徹・古賀諭志・小島治幸：複列鉛直版潜堤による波の制御の解析法，九州大学工学集報，第61巻，第2号，1988年3月。
- 4) 清川哲志・三保正和：Resonant Duct による形の透過特性，土木学会第42回年次学術講演会講演集，1987年9月。
- 5) Dean, W. R.: On the reflexion of surface waves by a submerged plane barrier, Proc. Camb. Phil. Soc. 41, pp. 231~238, 1945.
- 6) Evans, D. V.: Diffraction of water waves by a submerged vertical plate, J. Fluid Mech., Vol. 40, Part 3, pp. 433~451, 1970.
- 7) 日野幹雄・山崎文夫：垂直板による波の反射率・透過率およびエネルギー損失，土木学会論文報告集，第190号，pp. 75~80, 1971.
- 8) Macaskill, C.: Reflexion of water waves by a permeable barrier, J. Fluid Mech., Vol. 95, Part 1, pp. 141~157.
- 9) Dean, R. G. and R. A. Dalrymple: Water wave mechanics for Engineers and Scientists, Prentice-Hall, Inc., pp. 146~147, 1984.
- 10) 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.
- 11) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実：カーテン防波堤とその特性について，港湾技術研究所報告，第3巻1号，pp. 1~27, 1964.