

透過性没水水平板の波浪制御特性に関する基礎的研究

角 野 昇 八*・鍾 一 明**

1. 緒 言

大水深での波浪制御をめざした新しいタイプの海岸構造物として、水中に水平あるいは緩い傾斜角で固定された不透過板を基本構成要素とする、いわゆる没水平板が提案されている(たとえば、青山ほか, 1988)。没水平板は、入射波に対して水深を急減させた板上でエネルギーを一部透過・反射させるとともに、波を砕波あるいは分裂させることによって消波機能を発揮させようとするものである。また、没水平板は景観を壊すことがない点で、環境面からみた有利さも期待されている。

ところで、このような特性をもつ没水平板に多数の開口部を設けて透過性没水平板とすれば、没水平板と類似の形状ではあるものの、それにはみられないいくつかの優れた特性を期待することができよう。すなわち、透過板の上下で波動場を不連続とすることがないので周辺波動場への影響が小さく、その結果としてたとえば作用波力が小さくなること、板の開口部での渦の剝離にともなう波のエネルギー減衰が生じ、それによる反射率と透過率のさらなる低減化が図れること、さらに、開口部で出入する流れによる板周辺の水塊の鉛直混合拡散とそれにとりまわ曝気効果の促進などが期待できる。また、この構造を鉛直不透過壁などと組み合わせることで、別の新しいタイプの構造形式を考えることもできよう。

本研究では、このような特長をもつと期待される没水透過板について、その周辺波動場の基本的特性を解明するとともに、波浪制御特性を没水平板のそれと比較・検討することを目的として、理論的ならびに実験的に検討をくわえる。なお、水平透過板については、これまでに服部(1975)による若干の実験的研究がみられるにすぎない。

2. 理論解析

理論的取り扱いにおいては、没水透過板は水平に設置されているものとする。その長さ(波向き方向)は有限でも無限でも解析は可能であるが、本論文では有限長の

堤体を対象とすることにする(無限長の場合については角野・鍾, 1993を参照)。流体は非圧縮性・非粘性とし、水平透過板より上の領域と下の領域で波動特性は連続であって、両領域の波動は同じ波数と角振動数をもつものとする。理論展開には漸近展開接合法の手法(角野, 1987)と領域分割法(井島ほか, 1970)を併用するが、その際、内部解では板の厚みを考慮するが、外部解では考慮しない。さらに、構造物による減衰定常波成分は無視できるものとする。対象とする透過板は、その開口部の形状を問う必要はなく、孔あき板やスリット板など、透過性板であれば基本的にどのようなものでもよい。しかし、ここでは、その周辺の水利特性が十分に明らかになっていることから、角柱列などの柱体列を対象にして理論展開をすすめる。

(1) 問題の定式化

図-1に示すように、一定水深 h の水域に、水面から d の深さに長さ $2l$ の透過板が水平に設置されている状況を考える。水面上波の進行方向に x 軸をとり、板の中央から上向きに z 軸をとる。そして、全領域を4つの外部領域と1つの内部領域に分割する。外部領域Iは、板よりも沖側の全水深領域で、同じくIIとIVはそれぞれ板の上と下の領域、またVは板よりも岸側の全水深領域とする。さらに、IIIは内部領域として、板を挟む板の極く近傍の領域である。

支配方程式は、速度ポテンシャルに関する2次元ラプラスの式であり、境界条件として、自由表面での運動学的ならびに力学的境界条件および水底面での水粒子不透

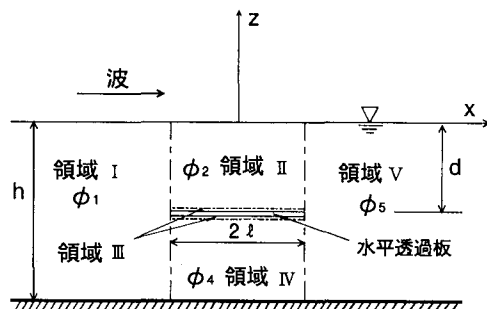


図-1 座標系と領域分割

* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 (株)修成建設コンサルタント

過の境界条件のほか、無限遠での放射条件と構造物表面での水粒子不透過の境界条件が課される。境界値問題としての解析は、基本的には領域分割法により、別個に求められた各領域の解を境界において接合することによって全領域での解を得るが、構造物表面での境界条件を詳細に満足する解を得て問題を解くことは困難である。このため、漸近展開接合法の手法をとり入れ、内部領域Ⅲでは柱体列を通過する流れの無限遠での漸近形(一様流)を解として用意する。

(2) 開口部におけるエネルギー損失を考慮しない理論解析

まず、開口部での渦の剝離などにもなうエネルギー損失を考慮しない線形境界値問題としての理論展開をおこなう。

a) 各領域での速度ポテンシャル

水平板よりも沖側の領域Ⅰおよび岸側の領域Ⅴでは、支配方程式の解である速度ポテンシャルとして、水底の境界条件を満足する形である

$$\Phi_1 = (A_1 e^{ik_0 x} + B_1 e^{-ik_0 x}) \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{-i\sigma t}, \quad (x < -l) \cdots (1)$$

$$\Phi_5 = M_5 e^{ik_0 x} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{-i\sigma t}, \quad (x > l) \cdots (2)$$

を容易に得ることができる。ここに k_0 と σ はそれぞれ水深 h の水域に対応する波数と角振動数であり、水面における境界条件より、分散関係式

$$\sigma^2 = g k_0 \tanh k_0 h \cdots \cdots \cdots (3)$$

を満足する固有値である。 A_1 と B_1 はそれぞれ入射波と反射波の振幅相当の未知係数、 M_5 は透過波の振幅相当の未知係数である。 i は虚数単位である。

水平板よりも上側の領域Ⅱでは、一般解として、

$$\Phi_2 = (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) \cdot (E_2 \cosh kz + F_2 \sinh kz) e^{-i\sigma t} \cdots \cdots (4)$$

を得る。ここでの波数は入射波のそれと異なることに注意する必要がある。水平板よりも下側の領域Ⅳにおいては、領域ⅡとⅣにおいて波動性は連続であるという仮定の下、また水底の境界条件を満足させる形で

$$\Phi_4 = E_4 (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \cdots \cdots (5)$$

を得る。

水平板を挟む狭い領域Ⅲでは、既述のように、水平の柱体列の透過板を通過した流れの漸近形、すなわち透過板通過後の一様流を表す解(内部解)を用意する。このような解は

$$\phi'(z) = (z + d \pm C) U_w + Q' \cdots \cdots (6-a, b)$$

で表される。ここに正、負符号はそれぞれ板の上、下側

に対応し、 U_w は一様流部の流速振幅、 C は blockage coefficient (閉塞係数) とよばれる透過板の慣性抵抗を表す係数であり、透過板断面のみによって純理論的に決定される係数である。その具体的表現は角野(1987)に詳しい。 Q' は複素定数である。いま、水平透過板を含む上下の領域では、空間的、時間的に同じ運動をしているとの仮定を考慮すれば、領域Ⅲの内部解として

$$\phi(x, z, t) = (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) \cdot (z + d \pm C + Q) e^{-i\sigma t} \cdots \cdots (7-a, b)$$

を得る。

b) 板の上下における速度ポテンシャルの接続

各領域の速度ポテンシャルが求められたので、それらの接続操作によって式中の未知係数を順次決定することができる。

まず、 Φ_2 に対して水面における境界条件式を適用することにより、 Φ_2 の式中の E_2 と F_2 を

$$F_2 = (\sigma^2 / gk) E_2 \cdots \cdots (8)$$

のように関係づけることができる。さらに、その微分値(流速)と ϕ の微分値を $z = -d_+$ で接続させることにより、

$$E_2 = g / (\sigma^2 \cosh kd - gk \sinh kd) \cdots \cdots (9)$$

の関係を得る。以上より、領域Ⅱの速度ポテンシャル Φ_2 は

$$\Phi_2 = (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) \cdot g \frac{\cosh kz + (\sigma^2 / gk) \sinh kz}{\sigma^2 \cosh kd - gk \sinh kd} e^{-i\sigma t} \cdots \cdots (10)$$

のように表される。

同様に、 Φ_4 の微分値と ϕ の微分値を $z = -d_-$ で接続させることにより、

$$E_4 = \cosh kh / (k \sinh k(h-d)) \cdots \cdots (11)$$

を得る。したがって、 Φ_4 を

$$\Phi_4 = \frac{1}{k} (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh k(h-d)} e^{-i\sigma t} \cdots \cdots (12)$$

の形に表すことができる。

c) 分散関係式の決定

一方、 Φ_2 および Φ_4 と ϕ を $z = -d$ において接続させ、式を整理すれば

$$\sigma^2 = gk \cdot \frac{\tanh kd + \tanh k(h-d) + 2kC \tanh kd \tanh k(h-d)}{1 + \tanh kd \tanh k(h-d) + 2kC \tanh k(h-d)} \cdots \cdots (13)$$

を得る。上式は σ と h , d , C から波数 k が決定されるような分散関係式となっている。全水深、没水深のほか、透過板の透過性の大小を表す C によっても波数は変わること注意到したい。また、上式において、 $h \rightarrow d$ となる場合、あるいは $C \rightarrow \infty$ となって水深 d に完全不透過板があ

ることに相当する場合には、水深 d に対応する分散関係式が得られ、 $C \rightarrow 0$ となって板が完全透過となる場合には水深 h に対応する分散関係式が得られる。

d) 板両端部の鉛直境界における速度ポテンシャルの接続

以上の操作によっても、 A_1, B_1, C_2, D_2, M_5 の振幅相当量はまだ未知のままであるが、これらは各領域の速度ポテンシャルおよびその x に関する微分値を板両端部 ($x = \pm l$) で接合させることによって確定させることができる。ただし、全水深中の任意の点で接合操作を完全に行うことは不可能であるため、全水深にわたる積分値を接合させるようにした。このことは、鉛直面全体で合圧力および合流量が連続となることを保証していることになる。

この操作により、 $B_1/A_1, C_2/A_1, D_2/A_1, M_5/A_1$ の4つの未知関数に関する4つの連立方程式を得るが、それらを解くことにより、結局、

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{e^{-2ik_0l}}{2k_0} \frac{(k_0^2 - k^2)(e^{-2ikl} - e^{2ikl})}{\Lambda} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{C_2}{A_1} = \frac{(k_0 + k)e^{-i(k_0 + k)l}}{\Lambda} \frac{\Gamma}{\Theta} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{D_2}{A_1} = \frac{(k - k_0)e^{-i(k - k)l}}{\Lambda} \frac{\Gamma}{\Theta} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{M_5}{A_1} = \frac{2ke^{-2ik_0l}}{\Lambda} \dots\dots\dots (17)$$

のように未知係数を確定することができる。ただしここに、

$$\Lambda = \{(k_0 + k)^2 e^{-2ikl} - (k_0 - k)^2 e^{2ikl}\} / 2k_0 \dots\dots\dots (18)$$

$$\Gamma = \tanh k_0 h / k_0 \dots\dots\dots (19)$$

$$\Theta = (\sigma^2 / k^2) / (\sigma^2 \cosh kd - gk \sinh kd) \dots\dots\dots (20)$$

である。このうち、 B_1/A_1 および M_5/A_1 は複素反射率と複素透過率であり、この構造物の反射率、透過率はそれらの絶対値をとることによって算定することができる。

e) 計算結果の例

図-2には、式(14)および式(17)による反射率と透過率の計算結果の例を示した。板の開口率を0.1とし、没水深を $d/h=0.1$ とした。透過板は正方形断面柱体列であり、その一辺長/水深比は $b/h=0.027$ である。図によれば、損失を考慮していないこの計算結果によれば、板長を水深の8倍にとっても波はほとんど透過してしまうことが示されている。

(3) 開口部におけるエネルギー損失を考慮した理論解析

a) 複素波数の導入

水域中にエネルギー減衰を生じさせるものが水平にあるとき、波高の減衰は波の進行とともに指数関数的に、
 $\exp(\pm k_i x) \dots\dots\dots (21)$

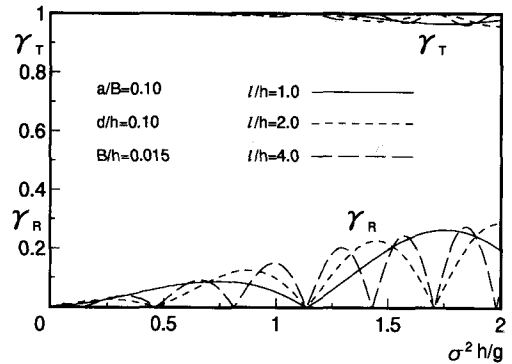


図-2 没水水平透過板の透過率と反射率

の形で減衰していくことがしばしば仮定される。ここに正負符号はそれぞれ x の負、正方向に進む波に対応し、 k_i は実定数。このように仮定できれば、波数は複素波数として

$$k_c = k_r + ik_i \dots\dots\dots (22)$$

のように置き換えることができることがよく知られている。ここに k_r は通常の波数である。本研究においてもこのような仮定において複素波数を導入することにする。ただし、板上で波高の減衰が始まるのは板の両端からであることを考慮して、板上の速度ポテンシャルの係数 C_2, D_2 も

$$C_2' = C_2 e^{-k_i l}, \quad D_2' = D_2 e^{-k_i l} \dots\dots\dots (23)$$

のように変換する必要があることに注意しなくてはならない。

b) 開口部におけるエネルギー損失量の評価

一般に、開口部における渦の剝離にともなう粘性減衰による抵抗、すなわち圧力差 Δp は、開口部通過の水粒子速度の2乗に比例する形で表されることがよく知られている。

$$\Delta p = (1/2) \rho f V_w^2 = (1/2) (B/a)^2 \rho f U_w^2 \dots\dots\dots (24)$$

ここに ρ は流体の密度、 f は損失係数、 V_w は開口部通過水粒子速度、 U_w は一様流部での流速であり、 a/B は柱体列の開口率を表す。したがって、この抵抗によって板全長にわたって単位幅、単位時間当りに損失される仕事量 W_1 は

$$W_1 = (1/T) \int_0^T \int_{-l}^l \Delta p U_w dx dt \\ = (f \rho / 2 T) (B/a)^2 \int_0^T \int_{-l}^l U_w^2 |U_w| dx dt \dots\dots\dots (25)$$

で表される。ただし、 T は波の周期。式中の U_w は、 ϕ_2 より

$$U_w = \Re e (C_2 e^{ikx} + D_2 e^{-ikx}) e^{-i\sigma t} \dots\dots\dots (26)$$

のように求めることができるが、エネルギー損失を考える場合には式中の k は k_c に、また C_2, D_2 は式(23)の

C_2, D_2 に置き換える必要がある (Ne は実部をとることを表す)。

c) 板両端におけるエネルギーフラックス差

板全体にわたる開口部でのエネルギー損失のために、板の両端でのエネルギーフラックスには差を生ずることになる。その差は容易に求められ、

$$W_2 = \frac{\rho \sigma^3 |A_1|^2}{4gk_0} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \left(1 - \left| \frac{B_1}{A_1} \right|^2 - \left| \frac{M_5}{A_1} \right|^2 \right) \dots\dots\dots (27)$$

である。

d) k_i の値の決定

板全体にわたる開口部での単位時間当たりエネルギー損失量 W_1 は板両端部でのエネルギーフラックスの差 W_2 に等しいはずであるので、両者を等値することができ、それより損失係数 f と複素波数の虚部 k_i を関係づけることができる。これによって、 f の値が知られれば k_i の値が決定され、さらに、エネルギー損失の影響を考慮した B_1/A_1 および M_5/A_1 の複素反射率と複素透過率が決定されることになる。

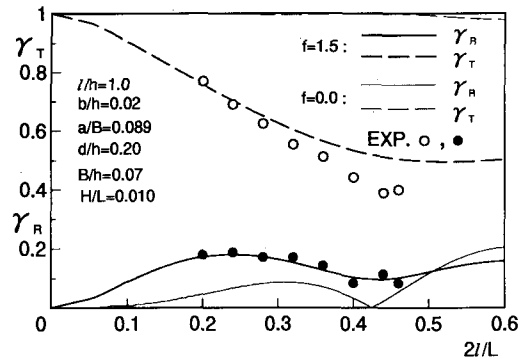
3. 理論の実験的検証

(1) 実験設備と実験条件

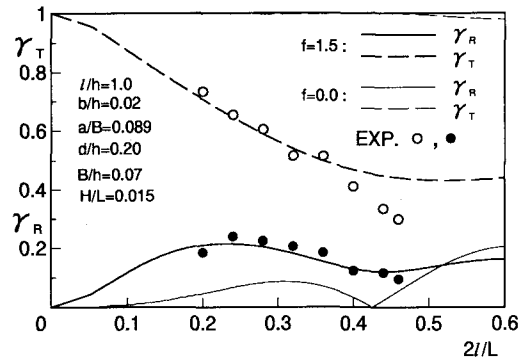
理論の検証のために、水平透過板の透過率と反射率を求めるための実験を行った。実験は、長さ 20 m、幅 50 cm、高さ 60 cm の造波水槽で規則波を用いて行った。透過率と反射率は、容量式波高計から得られたデータから入反射波分離法によって測定・算定した。水深は 30 cm とし、水平透過板を水面下 6 cm、造波板から 10 m の位置に固定した。柱列の透過板は、幅 38 mm、厚み 6 mm の鉄板で製作し、その開口率は $a/B=0.089$ 、長さ $2l=60$ cm、隣接柱体中心間隔 $2B=4.2$ cm である。波の周期は $T=0.98$ s から 1.85 s まで変化させ、波形勾配を $H/L=0.01, 0.015, 0.02$ に変化させた。

(2) 理論値と実験値の比較

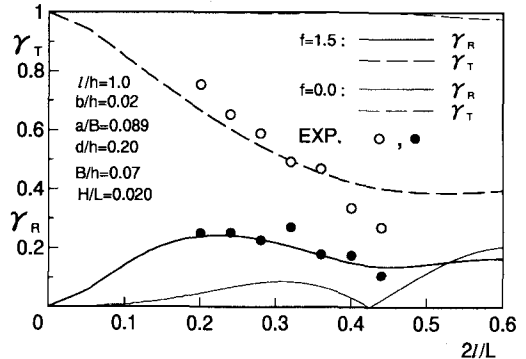
理論計算に必要な損失係数 f の値は、これまでに柱列や直立消波工の透過率や反射率、波力の算定に用いてきたのと同じ $f=1.5$ をここでも用いた。実験結果と比較の結果を図-3 に示す。エネルギー損失の影響を考慮した理論値と実験値とはほぼ全般によく一致しており、理論の妥当性ととも、板の上下では波動場は連続しているとの仮定、および本理論でのエネルギー損失のメカニズムのモデル化の妥当性、さらには鉛直柱列に対する損失係数の値を水平柱列に対して用いることの妥当性が確認できる。また、図示のように、この条件でのエネルギー損失の影響は透過率において極めて大きく、開口部の存在のためにほぼ完全透過であった透過率は、損失の影響のために大きく低減しているのが認められ



(a) ($H/L=0.010$)



(b) ($H/L=0.015$)



(c) ($H/L=0.020$)

図-3 理論値と実験値の比較

る。反射率は逆に、損失の影響でやや増加している。

4. 考 察

(1) 没水(不透過)平板の特性との比較

没水不透過板の透過・反射特性と比較するために、その実験値(青山ほか, 1988)と同条件下にある水平透過板(開口率=0.1)の理論値と比較した。図-4 に比較の1例を示すが、透過板の透過率は不透過板のそれに比べて特性が異なっていると同時に、全般にかなり下回ることがわかる。また、反射率でも特性は異なっており、特

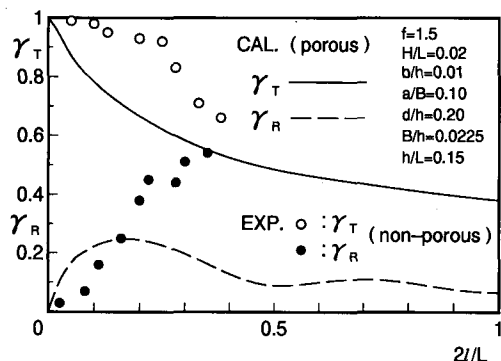


図-4 没水不透過板の特性との比較

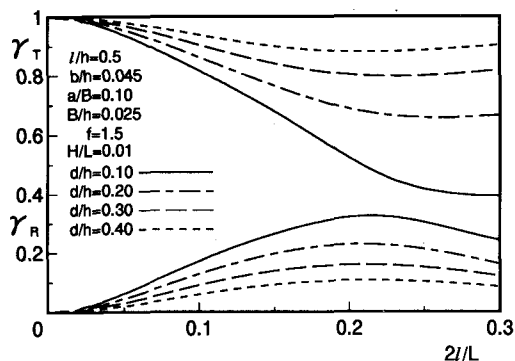


図-6 没水深の影響

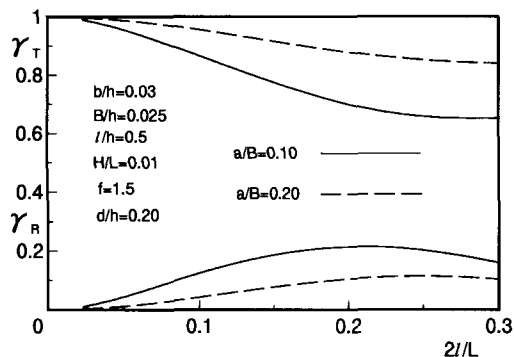


図-5 開口率の影響

に大きな堤体長の条件下ではかなり小さな値となること
がわかる。このことより、両者は形状的には多くの類似
点があるものの、その水理特性は大きく異なっているこ
とが結論づけられる。

(2) 開口率の影響について

図-5 は、没水深を $d/h=0.2$ 、波形勾配を $H/L=0.01$
で一定とした条件下で、正方形断面角柱列（一辺長は水
深の 0.03 倍）の透過板の開口率を $a/B=0.1$ と 0.2 に変
化させたときの透過率と反射率の計算値を示したもので
ある。両開口率を比較した場合、0.1 の開口率では反射率
はやや大きくなるものの透過率がかなり小さくなること
がわかる。これより、開口率は 0.1 程度が望ましいように
思われる。

(3) 没水深の影響について

図-6 は、開口率を 0.1 とし、正方形一辺長を水深の

0.045 倍とした以外は図-5 と同じ条件で、没水深を
 $d/h=0.1 \sim 0.4$ まで変化させた結果を示したものであ
る。没水深を浅くすればするほど損失の効果が特に透過
率に大きく現れることがわかる。

5. 結 言

透過性没水水平板の透過・反射特性について、線形理
論展開とともに開口部での非線形損失エネルギーにかか
わるメカニズムをモデル化して理論展開を行った。その
妥当性を実験的に確認するとともに、水平透過板の水理
特性を理論的ならびに実験的に確認した。また、没水平
板の特性と比較することにより、その透過率・反射率か
らみた優位性を明らかにした。

参 考 文 献

- 青山哲也・泉宮尊司・磯部雅彦・渡辺 晃 (1988): 没水平板に
よる波浪制御法に関する基礎的研究, 第 35 回海講論文集,
pp. 507-511.
- 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰 (1970): 水平板によ
る防波堤と岸壁に関する理論的研究(2), 第 17 回海講論文
集, pp. 97-106.
- 角野昇八(1987): 漸近展開接合法の海岸工学への応用, 第 23 回
水工学に関する夏期研修会講義集, 87-B-3.
- 角野昇八・鍾 一明 (1993): 没水水平透過板の波浪制御特性,
平成 5 年度土木学会関西支部年講演概要, pp. II-77-1-II-
77-2.
- 服部昌太郎(1975): 水平板式透過性防波堤の波高伝達, 第 22 回
海講論文集, pp. 513-517.