

水平板式透過性防波堤および護岸に関する実験的研究

小林 浩*・源波修一郎**・萩原 運弘***

1. ま え が き

船舶の大型化に伴う大水深の港湾・航路の必要性からコスト低減と性能向上を求めて、透過性消波堤が採用されるようになってきた。従来の防波堤や護岸は波を完全に遮断する壁体で、大水深化とともに建造コストが急上昇し、しかも入射波を完全に反射するので、その前面に発達する重複波のため、係船・操船上、あるいは洗掘等による堤体の安定上の問題が少なくない。諸外国やわが国においてもこれらに対処するための研究開発が活発に行われており、北海の貯油タンク周辺の孔あき消波壁や茨城県鹿島港の防波堤等、すでに施工されている例も多い。しかし、水平板式によるこれらの研究は井島ら¹⁾、日野ら²⁾、服部³⁾および Stoker⁴⁾が行っている程度である。本研究は、水平板を応用した低反射消波構造物として実用的な構造モデルを提案し、その消波特性について実験的検討を行うとともに、ジャラン孔あき消波堤との比較を行ったものである。

2. 構造モデル

水平板式透過性防波堤および護岸は、図-1、図-2に示すように、底面に設けた床版と千鳥配列の柱体を介して設けた天板間に所定間隔の複数の水平板を有するものである。この構造モデルは入射波を水平方向に整流し、波の鉛直方向の水粒子の円運動を規制して、位置エネルギーを運動エネルギーに変換し、柱体の間隙によって横方向に干渉擾乱させ、エネルギー損失をはかり、さらに後方の遊水部で位相差発生によるエネルギー相殺をはかるものである。

3. 実験装置および方法

(1) 造波水槽

実験に用いた造波水槽は、図-3に示すような長さ30m、幅0.9m、高さ1.0mの両面ガラス張り二次元水槽であり、造波機はフラップ式である。

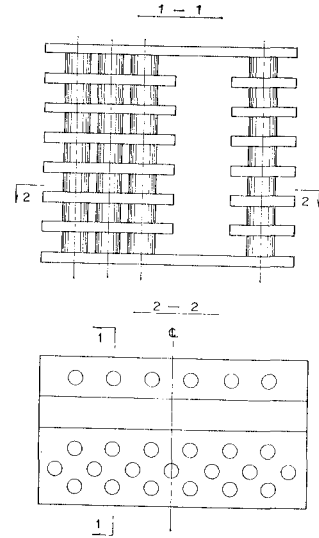


図-1 構造モデル (防波堤)

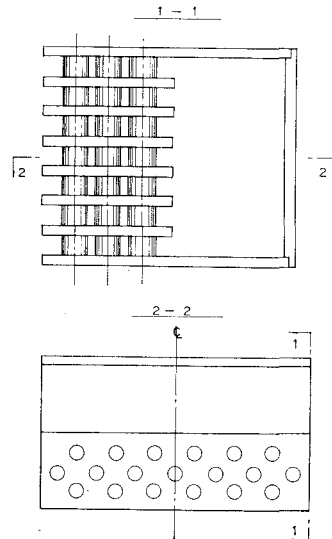


図-2 構造モデル (護岸)

本水槽の諸元は次のとおりである。

- ・発生波周期 0.5~5 秒
- ・最大発生波高 15 cm

* 正会員 清水建設(株)海洋開発部課長

** 正会員 清水建設(株)海洋開発部

*** 正会員 清水建設(株)研究所

- ・動力 5.5 kW
- ・ストローク ± 300 mm (最大)

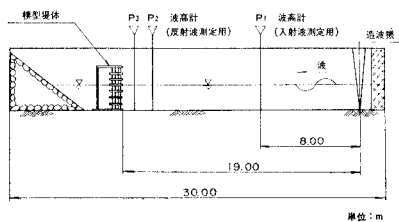


図-3 造波水槽

(2) 計測器

波高の測定には、容量線式波高計および増幅器を使用し、データ・レコーダーおよびペン書きオシロに記録させた。

(3) 模型

水平板式透過性護岸の模型は、遊水部間隔 240 cm (タイプⅠ), 340 cm (タイプⅡ), 440 cm (タイプⅢ) について円柱を千鳥に 3 列と 2 列に配置したものを製作した。それと比較のためジャラン孔あき消波堤の模型を加えた。

(4) 波の諸元

実験に用いた波の諸元は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験諸元

水 深 h (cm)	波 高 H (cm)	周 期 T (sec)
30.0	5.0	0.8
	7.0	1.0
	8.5	1.2
	10.0	1.5
	11.5	1.74

(5) 実験方法

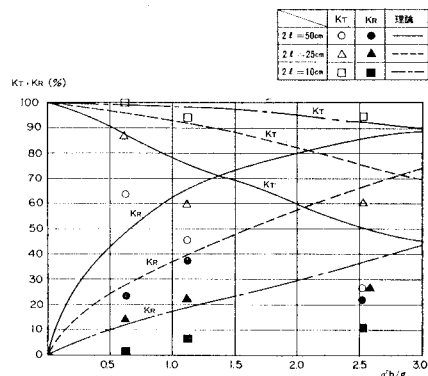
図-3 に示すように、入射波高は造波機から 8 m の位置で、反射波高は造波機から 19 m の位置に設けた透過性堤体の前面で測定した。波高は 10 波の平均値より決定した。各タイプの模型に対し、波高 5.0 cm と 8.5 cm については周期の変化に対する反射率を、周期 1.0 秒と 1.2 秒については波高の変化に対する反射率を求めた。

透過性堤体前面での反射率の測定方法は、現在確立されたものはないが、ここでは、微小振幅波の合成波に対して広く用いられている Healy の方法によることにした。

4. 実験結果と考察

水平板の消波に対する水理的效果は、波の上下運動を水平板によって遮断して流れに変えることにある。まず、水平板だけの効果についての消波特性の実験結果⁵⁾は、図-4 のようであり、水面と水底の間に均等に 4 枚

配置した水平板の板長 ($2l$) が 50 cm, 25 cm, 10 cm の場合の K_T , K_R と $\sigma^2 h/g$ との関係を後述の理論による計算値とともに示したものである。これによると、いずれの K_T , K_R と実験値は理論値よりも小さく板による摩擦や渦によるエネルギー損失が想定以上に大きいこ

図-4 4枚板の K_T , K_R と $\sigma^2 h/g$ の関係

とがわかる。また、静水面上の水平板に作用する波圧については理論値と実験値は板の前後で相違しているが、板の中央では比較的良好に一致する結果を得ている。

エネルギー損失を助長するため水平板の他に、円柱群を付加した構造モデル (護岸) およびジャラン孔あき消波堤の実験結果は次のようである。

(1) 水平板式透過性護岸

a) 円柱 3 列配置の場合

図-5 はタイプⅠ, ⅡおよびⅢについて周期 1.0 秒と 1.2 秒の時の波高変化に対する反射率の変化を示したも

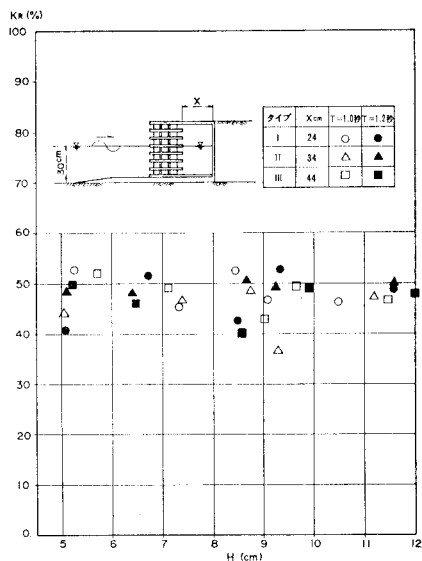


図-5 護岸の最大反射率 (円柱 3 列配置)

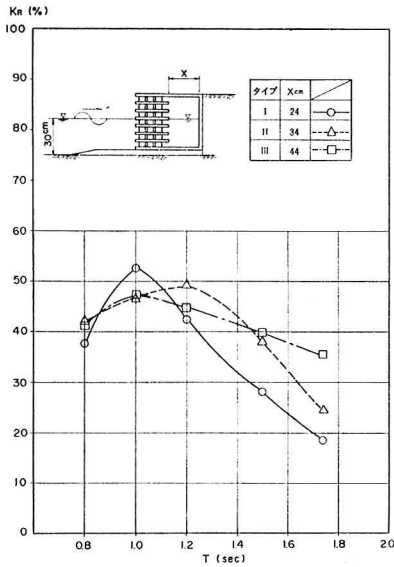


図-6 護岸の反射率 (円柱 3 列配置)

のである。これによると、各タイプとも波高変化に対して反射率はほぼ一定値 $K_R=40\sim53\%$ を示している。すなわち、波高に対する変化が 10% 前後であることからこれを平均して周期に対する反射率の変化を示すと図-6 のようになる。タイプ I では周期 0.8 秒から 1.0 秒にかけて反射率は上昇し、周期 1.0 秒でピーク値 $K_R=52\%$ を示した後、周期が大きくなるにつれて減少する。タイプ II では、タイプ I と同じような傾向を示すが、周期 1.2 秒でピーク値 $K_R=49\%$ を示し、周期の増大に伴う反射率の減少はゆるやかになっている。タイプ III では、同様にピーク値 $K_R=47\%$ を示すが、周期増大に伴う反射率の減少カーブはさらにゆるやかである。

水平板式透過性護岸 (円柱 3 列配置) の消波状況を写真-1 に示す。

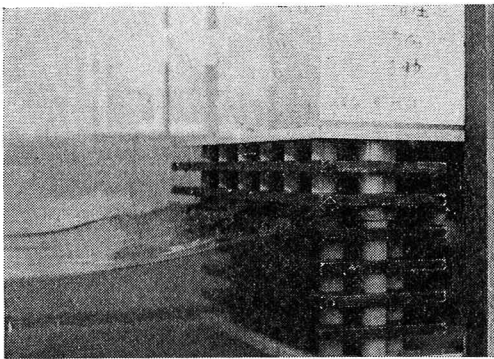


写真-1

b) 円柱 2 列配置の場合

周期固定に対する波高変化および波高に対する周期変化の反射率は、円柱 3 列配置と同様な傾向を示すが、タイプ I では、全体的に周期変化による反射率は、円柱 3

列配置のタイプ I より大きい値を示す。タイプ II およびタイプ III では、反射率の値、傾向とも差異はないが、タイプ I よりさらに大きな値を示す。

(2) ジャラン孔あき消波堤

水平板式透過性護岸と同様に、周期 1.0 秒と 1.2 秒の時の波高変化に対する反射率変化を図-7 に示す。波高変化に対して反射率は、ほぼ一定値 $K_R=52\sim59\%$ を示している。また、波高に対する周期変化の反射率は図-8 に示すように、周期 0.8 秒で $K_R=4\sim15\%$ で、周期 1.0~1.2 秒でピークを示し $K_R=52\sim59\%$ である。さらに周期が大きくなると反射率は減少する。

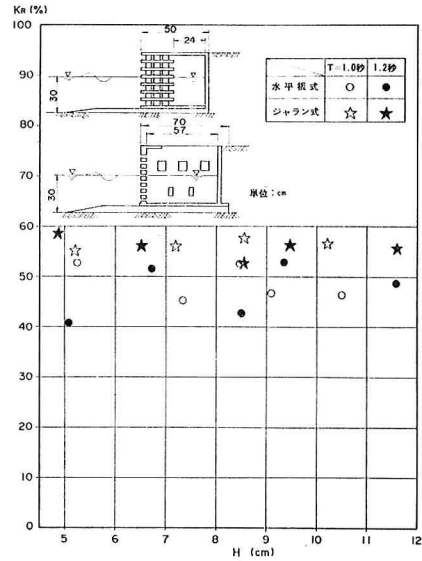


図-7 水平板式とジャラン式の最大反射率

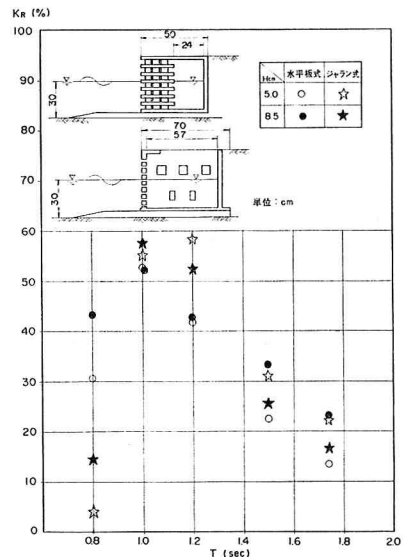


図-8 水平板式とジャラン式の反射率

(3) 水平板式透過性護岸とジャラン孔あき消波堤の比較

図-7 および図-8 に示す円柱3列配置(タイプI)の水平板式とジャラン式の反射率を比較すると、周期1.0秒および1.2秒の時の波高変化に対して、反射率は両者ともほぼ一定値を示すが、水平板式透過性護岸の方がわずかに小さい反射率を示している。また、波高5.0cm および8.5cmの時の周期変化に対する反射率は、両者とも同様な傾向であるものの、周期0.8秒ではジャラン孔あき消波堤はきわめて小さい反射率を示している。しかし、周期1.0秒および1.2秒では、水平板式透過性護岸の方が小さい反射率を示している。

5. 理論的考察

水平板と柱体からなる透過性護岸を図-9 のようにモ

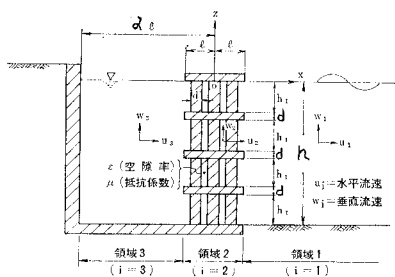


図-9 透過性護岸概略図

デル化する。すなわち静水面上に原点、水平方向および鉛直上方にそれぞれ x 軸、 z 軸をとり、一定水深 h の海域に幅 $2l$ 、厚さ d の4枚の水平板が等間隔 h_1 になるように直径 d' の柱体で支持され、 $x = -\alpha l$ に不透過鉛直壁が設置されている場合を考える。流体域を領域I, II, IIIに分け、各領域の速度ポテンシャルを $\phi_i(x, z; t)$ $= \phi_i(x, z)e^{i\omega t}$ ($i=1, 2, 3$) の形で表わすと、 ϕ_i は各領域の水面条件および水底条件を満足する Laplace の方程式の一般解として次のように求められる。

(i) 領域I ($l \leq x < \infty$)

$$\begin{aligned} \phi_1(x, z) = & (Ae^{ik(x-l)} + Be^{-ik(x-l)}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_n(x-l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 k および k_n は次式により決まる波数である。

$$\begin{aligned} kh \tanh kh = & -k_n h \tan k_n h = \sigma^2 h / g \\ (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

(ii) 領域II ($|x| \leq l$)

$$\begin{aligned} \phi_2^{(j)}(x, z) = & \sum_{r=0}^{\infty} \left(D_r^{(j)} \frac{\cosh Rx}{\cosh Rl} + E_r^{(j)} \frac{\sinh Rx}{\sinh Rl} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \cos R\{z+jh_1+(j-1)d\} \\ & -jh_1-(j-1)d < z < -(j-1)(h_1+d) \\ & (j=1, 2, 3, 4) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $R=r\pi/h_1$ (r は整数) で、 $h=4h_1+3d$ の関係にある。

(iii) 領域III ($-\alpha l \leq x \leq -l$)

$$\begin{aligned} \phi_3(x, z) = & F \frac{\cos k(x+\alpha l)}{\cos \alpha' k l} \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} G_n \frac{\cosh k_n(x+\alpha l)}{\cosh \alpha' k_n l} \cdot \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\ & \alpha' = \alpha - 1 \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

また防波堤 ($-\infty < x \leq -l$) の場合には、速度ポテンシャルは次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \phi_3(x, z) = & F e^{ik(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} G_n e^{k_n(x+l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

さて式(1)および式(3)~(5)に含まれる速度ポテンシャルの係数は境界面 $x = \pm l$ での力学的な連続条件から求められる。すなわち水平流速および圧力が連続であるべきことで表わされる。

いま領域IIにおいて空隙率を ε 、平均流速をそれぞれ u_2, w_2 、流体圧力を P_2 、密度を ρ 、重力の加速度を g 、また流速の2乗に比例する抵抗係数およびそれを線形化した流速に比例する抵抗係数をそれぞれ μ, μ' とすると、この領域内の流体運動の質量および運動量保存式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \left. \begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial w_2}{\partial z} &= 0 \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x} - \mu u_2^2 \doteq -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x} - \mu' u_2 \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial w_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial z} - g - \mu w_2^2 \\ &\doteq -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial z} - g - \mu' w_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

この運動は前述の速度ポテンシャル $\phi_2(x, z; t)$ をもち、流速および圧力は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} u_2 = & \partial \phi_2 / \partial x, \quad w_2 = \partial \phi_2 / \partial z \\ P_2 = & -i\sigma\rho\beta\phi_2 - \rho g z \end{aligned} \quad (7)$$

ただし

$$\beta = (1 - i\varepsilon\mu'/\sigma) / \varepsilon \dots \dots \dots (8)$$

また領域I, IIIでは $\varepsilon=1, \mu=\mu'=0$ であるから、流速および圧力は次のようになる。

$$\begin{aligned} u_i = & \partial \phi_i / \partial x, \quad w_i = \partial \phi_i / \partial z \\ P_i = & -i\sigma\rho\phi_i - \rho g z \quad (i=1, 3) \end{aligned} \quad (9)$$

したがって $x = \pm l$ での水平流速と圧力の連続条件は

$$\partial \phi_i / \partial x = \partial \phi_2^{(j)} / \partial x, \quad \phi_i = \beta \phi_2^{(j)} \quad (10)$$

のように求まる。

式 (10) に式 (1) および式 (3)~(5) を代入し、完全直交関数系の性質を利用して計算を行えば、最終的に速度ポテンシャルの係数に関する連立方程式を得る。この連立方程式を解けば各領域の速度ポテンシャルが確定し、護岸の反射率および堤体に作用する波力を求めることができる。

実際の理論計算においては式 (6) で線形化するため、抗力が流速の 2 乗に比例するとした抵抗係数 μ と流速に比例すると仮定した抵抗係数 μ' との関係を見出す必要がある。これは波の一周期にわたる損失エネルギーが非線形の場合と線形の場合とで等しいという条件より、次のように求められる。

$$\mu' = (8/3\pi\epsilon) \cdot u_0 \mu \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $u_2 = u_0 e^{i\omega t}$ で表わされる。

抵抗係数 μ に関しては流れに平行な平板の抗力係数および流れに直角な多列円柱の抗力係数の和として次のものを用いる。ただし平板の抗力⁶⁾は上下の水平板の面による抗力を考え、多列柱体の抗力⁷⁾は 1 本当りの抗力に本数を乗じたものとする。

i) 水平板;

$$\mu = \frac{C_D}{2d}, \quad C_D = \frac{0.455}{\log(2lu_0/\nu)^{2.58}} \dots\dots\dots (12)$$

ii) 多列円柱 (千鳥配列);

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{2C_D}{3\pi d' n} \\ C_D &= 0.62 n (u_0 d' / \nu)^{0.031} \quad (1 \text{ 列目}) \\ C_D &= 7.80 n (u_0 d' / \nu)^{-0.29} \quad (2, 3 \text{ 列目}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

ここに、 ν : 動粘性係数 ($=0.0131 \text{ cm}^2/\text{s}$, 10°C), n : 一列の柱体本数である。

6. 結 論

ここに提案した水平板式透過性護岸は、現在実用化されているジャラン孔あき消波堤と比較しても、水理特性 (反射率) の面から十分実用化しうるものと考えられる。また、理論については、その概念を示したにすぎないが今後数値解析を行い、さらに実験値と比較検討することにより確立をはかるつもりである。

この水平板式透過性護岸の施工性の面からは、ジャラン孔あき消波堤のようにケーソンタイプとしての施工はもとより、杭式タイプにも使用可能である。すなわち、軟弱地盤では、ケーソンタイプの時マウンド施工にあたり、地盤改良などを余儀なくされるが、杭式タイプは支持層に貫入、もしくは摩擦でもたせるなどの方法によって、経済性のメリットをもたせうるし、また、洗掘などの影響も少なくなると考えられる。

7. あとがき

不規則な自然条件変化、重複波から碎波にまで効率よく対応でき、施工性・経済性を考慮されたものであることが望まれる護岸として、この水平板式透過性護岸は、構造をブロック化することで、床版・水平板等を適宜に建設ヤードでプレキャストの後組立てることが可能となる。同じくプレキャストする円柱体を空洞化すればフロート搬送・曳航等が可能となり、また、クレーン船にて吊上げ施工上も有利となろう。

最後に本実験研究に協力して頂いた東海大学工学部水工研究室の諸先生に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰: 水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究 (2), 土木学会第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 97~106, 1970.
- 2) 日野幹雄・藤崎治男: 固定された海上構造物による波の反射と透過, 土木学会第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 101~106, 1973.
- 3) 服部昌太郎: 水平板式透過性防波堤の波高伝達, 土木学会第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 513~517, 1975.
- 4) Stoker, J.J.: Water Waves, Interscience Publishers Inc., New York, pp. 430~436, 1957.
- 5) 小林 浩・源波修一郎・萩原運弘: 透過性構造物に関する実験について, 土木学会第 30 回年次学術講演会講演概要集, pp. 53~54, 1975.
- 6) 石原藤次郎・本間 仁編: 応用水理学 (上), 丸善, pp. 60~62, 1957.
- 7) 沼知福三郎・本間 仁監修: 水工学便覧, 森北出版, p. 139, 1966.