

# 水平板式透過性防波堤の波高伝達

服部 昌太郎\*

## 1. まえがき

有限または無限水深の水域を伝播する表面波が、水面または水中に置かれた物体によって、反射および透過する問題の理論的研究は、従来より多くの研究者によって行われている<sup>1)</sup>。しかし、これらの研究で水平板による波の反射・透過を取扱ったものは少なく、井島ら<sup>2)</sup>、口野ら<sup>3)</sup>、および Stoker<sup>4)</sup>の研究があるにすぎない。

本研究は、将来その利用が高まると考えられる、半潜水式と固定式とを組合せた、ハイブリッド方式の透過性防波堤の一形式として、単一または複数の不透過あるいは多孔の水平板よりなる防波堤を提案し、その波高伝達について検討するとともに、従来の理論との比較を行ったものである。

## 2. 実験装置およびその方法

実験は、長さ 50m、幅 1m、高さ 1m の片面ガラス張り 2 次元波動水槽を使用して行った。実験装置の全体的な配置は、図-1 に示される。図-1 に示すように、実験水槽の一端にはフラップ式造波装置 (12 IP)、また他端には消波用斜面が置れている。

実験には、不透過水平板よりなる模型 I と多孔板よりなる模型 II の 2 種類の模型を使用する。模型 I は、2 枚の水平板 (厚さ 15 mm、幅 0.98 m、長さ 1.2 m) と、その設置水深が任意に変えられるよう工夫されたパイプ枠よりなる堤体である。また模型 II は、図-2 に示すような位置にあらかじめ固定された、4 枚の多孔板よりなる

堤体である。多孔板は、直径 4.8 cm の孔が空隙率 10% となるようにあけられた、厚さ 5 mm のプラスチック板である。

浮遊型防波堤の消波効果は、堤体の係留方式にも関係するが、本研究では水平板による消波効果を検討することから、模型を実験水槽内に固定し実験を行う。

入射波および透過波の波高は、容量式波高計によって検出し、防波堤よりの反射波高は Healy の方法によって算出した。

水面に浮ぶ物体の消波効果により透過波高の減殺が有効に行われるためには、入射波長以上の浮体長を必要とすることが、従来の研究より認められる<sup>5)</sup>。そこで、本研究では相対平板長が  $1 < L/l < 3$  ( $L$ : 入射波長,  $l$ : 水平板長) 程度の範囲となる、周期が 1~2 sec の入射波を用いて実験を行った。

## 3. 実験結果

図-3~6 は、入射波波形勾配 ( $H_I/L$ ) と透過率  $K_T$  ( $=H_T/H_I$ ) および反射率  $K_R$  ( $=H_R/H_I$ ) との関係を示す、代表的な実験結果の例である。

不透過水平板 (模型 I) の実験結果は、図-3 の単一水平板の場合と図-4 の 2 枚の水平板 (ただし、1 枚は静水面に設置) の場合の 2 種類である。図-3 より、水平板が静水面にある場合  $d/h=0$  ( $d$ : 水平板設置水深,  $h$ : 水深) には、 $K_T$  は  $H_I/L$  の増大とともに若干増加し、 $H_I/L > 0.033$  で減少する傾向が認められる。水平板が水面下にある  $d/h=0.25$  では、 $K_T$  は入射波波形勾配

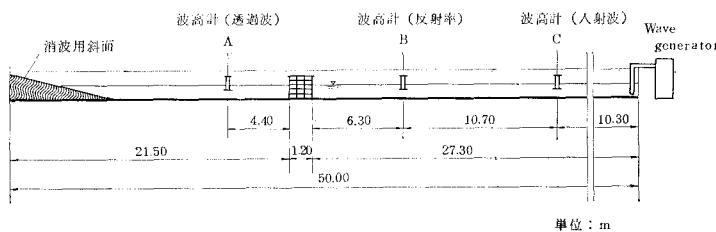


図-1 実験装置の全体的配置

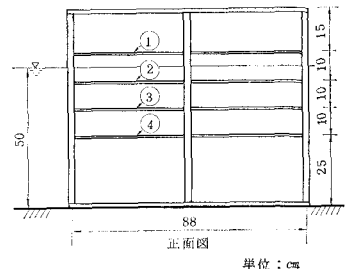


図-2 多孔水平板模型

\* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

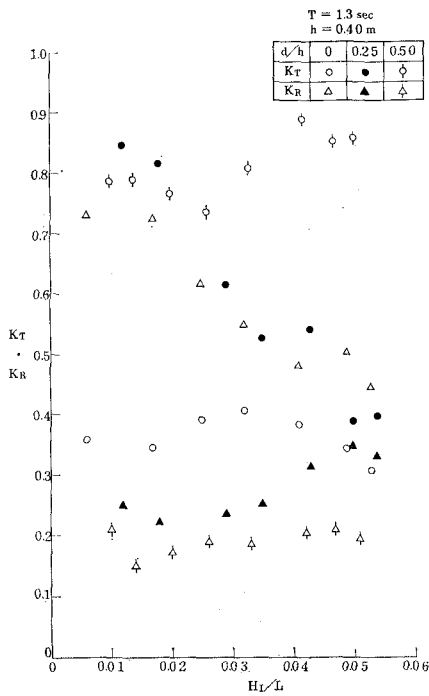


図-3 単一不透過水平板の消波効果  
( $h/L=0.185$ ,  $L/l=1.80$ )

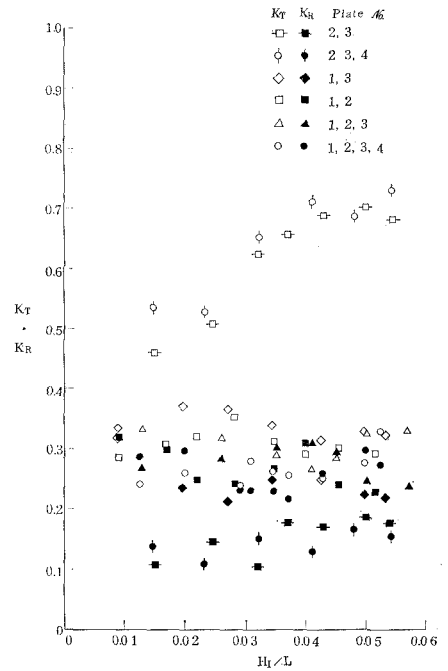


図-5 多孔水平板の消波効果 (T=1.3 sec,  
 $h/L=0.216$ ,  $L/l=1.93$ ,  $h=0.50$  m)

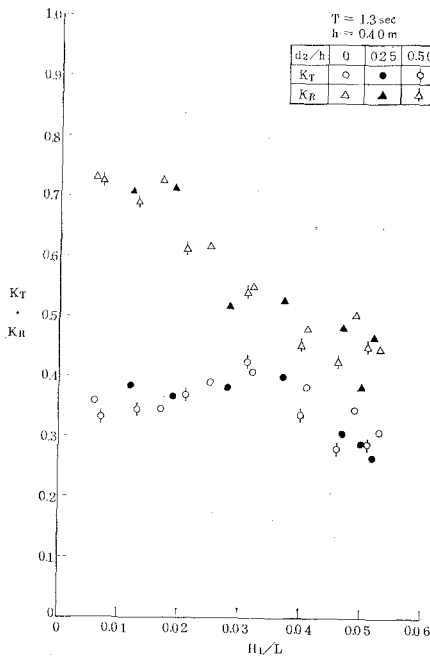


図-4 複数不透過水平板の消波効果  
( $h/L=0.185$ ,  $L/l=1.80$ )

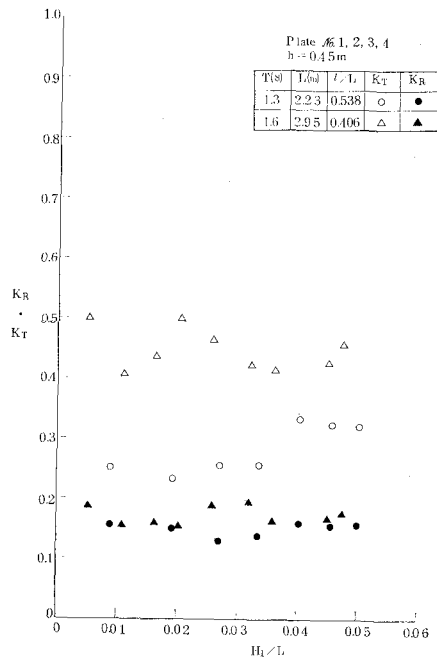


図-6 多孔水平板の消波効果

の増大とともに減少し、また  $d/h=0.50$  では入射波波形勾配とともに増大する傾向を示している。このような  $K_T$  の変化に対して、水平板の反射率  $K_R$  は、 $d/h=0$  では  $H_I/L$  の増大とともに減少、 $d/h=0.25$  では増大、そして  $d/h=0.50$  ではほぼ一定であることが認められる。

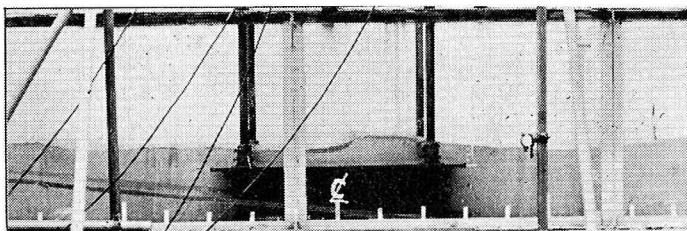


写真-1 水平板上での碎波状況 ( $T=1.3 \text{ sec}$ ,  $H_I=8.0 \text{ cm}$ ,  $d/h=0.25$ )

静水面位置と水面下に水平板を設置した場合の  $K_T$  と  $K_R$  は、図-4 に見られるように、静水面に設置した平板の効果は卓越し、同図中に比較のため示された  $d/h=0$  の  $K_T$  と  $K_R$  (図-3) とほとんど同一の変化を示している。

図-5 および 6 は、多孔平板 (模型 II) の実験結果である。図-5 は、多孔水平板の数と設置位置の  $K_T$  と  $K_R$  におよぼす効果を、また 図-6 は 図-3 と 4 の場合と同様に、最上段の多孔水平板位置が、静水面と一致する場合の結果をそれぞれ示したものである。

図-5 より、静水面付近に平板が存在する場合、 $K_T$  はほぼ一定の値を示し、水平下の水平板数が増加するにしたがって、 $K_T$  は若干減少することが認められる。反射率  $K_R$  は、実験値のばらつきはあるが、入射波波形勾配にあまり関係せず、各実験条件に対してほぼ一定の値を示している。同様な傾向は、図-6 にも認められる。

#### 4. 実験結果に対する考察

実験結果 (図-3) に見られるように、不透過水平板の設置水深によって、水平板の透過率と反射率の入射波波形勾配に対する変化が異なる。特に、 $K_T \sim H_I/L$  の関係で  $K_T$  に最大値が発生 (図-3 では  $H_I/L=0.32$  付近) することは、写真-1 に示すような静水面またはその付近に置かれた水平板上での入射波の碎波と、それともなう水面攪乱が関係するものと考えられる。

水平板上での碎波が透過率と反射率ともにもたらす影響を検討するため、水平板中心位置に波高計を設置し、水平板上での水面変動を記録した。そして、水平板中心での伝達波高と入射波高との比  $K_P (=H_P/H_I)$  を、 $K_T$  と  $K_R$  とともに入射波波形勾配との関係で示したものが、図-7 である。この実験結果によると、 $d/h=0$  の場合には  $K_P$  はほぼ一定値を示し、このことより水平板前端付近で碎波を生じていることがわかる。この結果、 $K_T$  はほぼ一定の値となるものと考えられる。 $d/h=0.25$  の場合には、 $H_I/L \approx 0.03$  付近で  $K_P$  値が急に減少している。このことは、入射波波形勾配が  $H_I/L > 0.03$  となると、水平板上で入射波が碎波することを意味し、 $K_P$  の変化に対応して  $K_T$  も急激に減少し、また  $K_R$  も若干減少する。

以上の事柄より、水平板上で碎波が発生すると、水平

板堤体部でのエネルギー損失率  $K_L^2 (=1-(K_T^2+K_R^2))$  が急増すること、すなわち碎波によるエネルギー損失は、水平板の消波効果にもたらす影響が大であることがわかる。

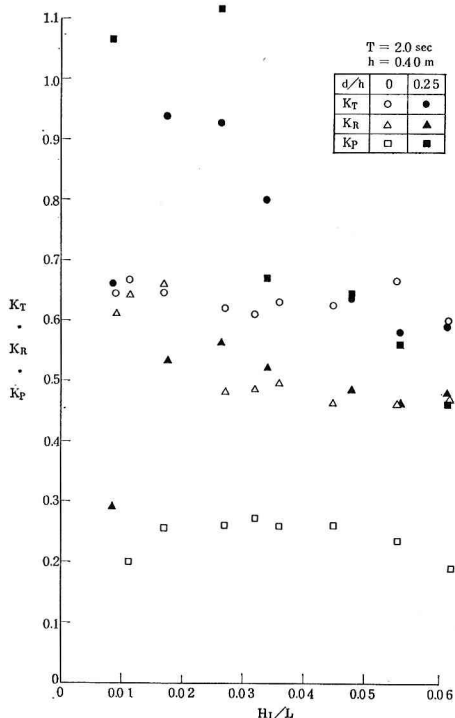


図-7 水平板上での碎波と消波効果 (単一・不透過  $h/L=0.108$ ,  $L/l=3.08$ )

図-8 は、静水面におかれた水平板の透過率と反射率の井島ら<sup>2)</sup>と Stoker<sup>4)</sup>の理論値と実験値との比較を行ったものである。 $K_T$  の実験値は、理論値よりも小さい値を示し、入射波の静水面上部分の碎波などによるエネルギー損失の効果が大きいことを示している。 $K_R$  は、図-3 の実験結果にも見られるように、入射波の波形勾配が増大するとともに減少するので、実験を行った最小の  $H_I/L$  の場合の  $K_R$  値を、参考のため記入してある。なお、図中の数字は、実験を行った相対水深  $h/L$  の値

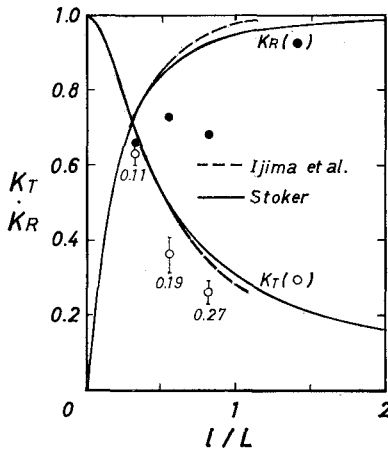


図-8 透過率と反射率の理論と実験との比較

である。

模型 I と II との間には、水平板の数、その設置水深などの実験条件が異なるため、消波効果に関して両者間の比較は単純には行えない。しかし、静水面付近にある多孔水平板の消波におよぼす効果は、不透過板の場合と同様にきわめて大きく、これに対し水面下にある水平板の効果は小さい。多孔水平板の消波効果の特徴は、水平板の数が多いにもかかわらず不透過板に比べて反射率が小さく、また入射波の波形勾配に関係なくほぼ一定となることである。このことは、図-4 と 6 との比較によっても明らかで、水平板間に入射波が通過する際に生ずる多孔部でのエネルギー損失が、消波効果に有効に寄与していることを示している。

5. 水平板上での碎波条件

水平板が静水面付近に設置された場合、水平板上を通過する入射波のエネルギーは、水深の急変によって引きこされる碎波によって、その相当部分が消散される。この現象は、図-7 の実験結果にも明瞭に認められる。そこで、水平板上での碎波条件を簡単な理論解析によって導くこととする。

図-9 に示す一様水深  $h$  の水域で、水深  $d$  の所に不透過な水平板が設置され、これに波が直に入射する場合を考える。水平板の影響を受けない沖側の断面を断面 I、そして水平板前端を断面 II とし、この間でのエネルギー損失は無視する。断面 I を通過する単位幅当りの入

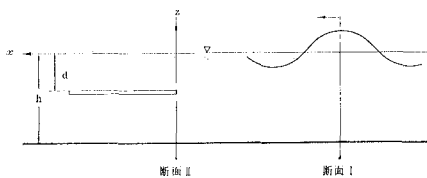


図-9 記号説明図

射波によるエネルギー伝達率は、微小振幅波理論を用いると式 (1) のように表わされる。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} \Big|_I &= \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_{-h}^0 \rho u dz \\ &= \frac{\rho}{T} \int_0^T dt \int_{-h}^0 \frac{k_1 H_1^2 g^2}{4\sigma} \frac{\cosh^2 k_1(h+z)}{\cosh^2 k_1 h} \\ &\quad \times \sin^2(k_1 x - \sigma t) dz \\ &= \frac{\rho g H_1^2}{8} \frac{C_1}{2} \frac{1}{\sinh 2 k_1 h} \\ &\quad \times (2 k_1 h + \sinh 2 k_1 h) \dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 $k$ : 波数、 $\sigma$ : 周波数、 $H$ : 波高、 $T$ : 周期、 $C$ : 波速、 $g$ : 重力の加速度、 $t$ : 時間、添字 1 は断面 I での量を示す。

断面 II では、水平板下での圧力、流速がともに断面 I のものと同じであると仮定すると、水平板下を通過する入射波のエネルギー伝達率は、式 (1) と同様に次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} \Big|_{II \text{ below}} &= \frac{\rho g H_1^2}{8} \frac{C_1}{2} \frac{1}{\sinh^2 k_1 h} \\ &\quad \times [2 k_1(h-d) + \sinh 2 k_1(h-d)] \dots\dots (2) \end{aligned}$$

水平板上を通過するエネルギーの伝達率は、入射波周期と同一周期で波高  $H_2$  の波が水深  $d$  の所を通過する場合の、エネルギー伝達率と等価なものとする。したがって、

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} \Big|_{II \text{ above}} &= \frac{\rho g H_2^2}{8} \frac{C_2}{2} \frac{1}{\sinh k_2 d} \\ &\quad \times (2 k_2 d + \sinh 2 k_2 d) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、添字 2 は水平板上での量を示す。また、

$$L_1/L_2 = \tanh k_1 h / \tanh k_2 d \dots\dots\dots (4)$$

断面 I ~ II 間と水平板上でのエネルギーの連続条件より、

$$\frac{dE}{dt} \Big|_{II \text{ above}} = \frac{dE}{dt} \Big|_I - \frac{dE}{dt} \Big|_{II \text{ below}} \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) を式 (1) ~ (3) を用いて書直すと、

$$\begin{aligned} H_2^2 C_{G2} &= H_1^2 C_{G1} \\ &\quad \times \left[ 1 - \frac{2 k_1(h-d) + \sinh 2 k_1(h-d)}{2 k_1 h + \sinh 2 k_1 h} \right] \dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、 $C_G$ : 群速度

水平板上での碎波条件として、浜田の式<sup>6)</sup>を用いる。

$$(H_2/L_2)_0 = 0.142 \tanh k_2 d \dots\dots\dots (7)$$

入射波が水平板上で強制碎波する、入射波の限界波形勾配  $(H_1/L_1)_{crit}$  は、式 (6) と (7) および式 (4) の関係を用いると、次式で与えられる。すなわち、

$$\begin{aligned} \left( \frac{H_1}{L_1} \right)_{crit} &= 0.142 \frac{\tanh^2 k_2 d}{\tanh k_1 h} \left[ \frac{C_{G1}}{C_{G2}} \right. \\ &\quad \times \left. \left\{ 1 - \frac{2 k_1 h(1-d/h) + \sinh 2 k_1 h(1-d/h)}{2 k_1 h + \sinh 2 k_1 h} \right\}^{-1/2} \right] \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

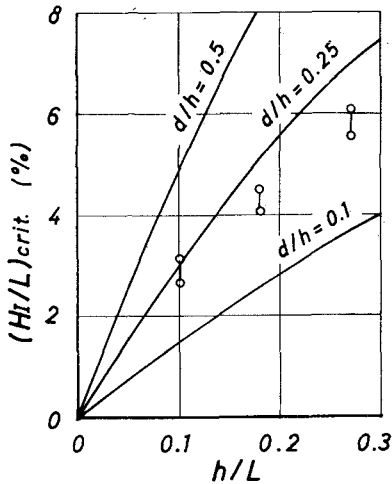


図-10 水平板上での碎波限界 (理論と実験)

図-10 は、式 (8) より計算される  $(H_t/L)_{crit}$  と  $h/L$  との関係、水平板の相対設置水深  $d/h$  をパラメータとして示したものである。同図中には、図-7 に示される  $K_T$  と  $K_R$  の変化より推定される、 $d/h=0.25$  の場合の入射波の限界波形勾配の実験値をプロットしてある。

図-10 に見られるように、 $h/L$  が増大するにしたがって計算値と実験値との差が若干大きくなる。これは水平板上での摩擦などの効果によって、強制碎波が計算値より小さい入射波波形勾配でも発生することに起因すると考えられる。理論計算は比較的単純なモデルによっているが、理論は実験結果を良く説明している。また本実験の範囲内では、 $d/h=0.50$  の場合に水平板上での碎波を発生しないことが、図-10 より認められる。

実験と計算の結果により、水平板の設置水深が  $0 \leq d/h < 0.2$  程度であれば、水平板上での碎波によるエネルギー損失の効果を期待でき、透過率を低下しうることが認められる。

### 6. 結 論

不透過または多孔の水平板よりなる、固定式透過性防波堤の波高伝達について検討を行った。本研究の範囲内で認められた主なる事柄は、以下のようである。

(1) 水平板による消波効果は、水平板の設置水深が増大するにつれて低下する。水平板上での強制碎波の発生により、静水面あるいは静水面近くにおかれる水平板は、効果的な消波機能を有する。

(2) 複数水平板の消波効果は、水平板数の増加に伴いわずかながら単一水平板の場合より増大するが、その消波効果の大部分は静水面付近の水平板によるものである。

(3) 静水面に置れた単一水平板の透過率は、水平板上での碎波により入射波の波形勾配に対してほぼ一定となり、実験値は井島らおよび Stoker の理論値と類似の傾向を示す。また図-8 より、この種の問題には波の有限振幅の効果をも十分考慮する必要があることが認められる。

(4) 多孔水平板の透過率は、不透過板の場合と同様な傾向を示す。これに対し反射率は、入射波の波形勾配による変化も非常にわずかであり、不透過板の場合に比べて反射率は低下している。このことは、多孔部でのエネルギー損失が水平板の消波効果に、有効に働いていることを意味する。

(5) 水平板上で碎波が発生する入射波の波形勾配は、エネルギーの連続条件と進行波の碎波条件を与える浜田の式とにより、式 (8) で与えられる。水平板の摩擦などの効果により、入射波の限界波形勾配の実験値は理論値より若干小さい値を示すが、両者の一致は比較的良好である。理論と実験とより、有効な消波効果が期待しうる水平板の設置水深は、 $0 \leq d/h < 0.2$  程度であると考えられる。

### 7. あとがき

水平板式透過性防波堤の今後の研究課題として、多孔水平板の使用による消波効果の増加、堤体に働く波力の減少などの効果の検討と同時に、多孔部でのエネルギー消散機構の解明を行う必要がある。

本研究にあたり、有益なご意見をいただいた中央大学首藤伸夫教授、また実験を行った同大学学生西原口 隆、宇佐美 淳の両君に謝辞を表します。また、本研究の一部は、消波システム研究会の協力の下に行った。

### 引用文献

- 1) たとえば、井島武士：最近の波浪理論における境界値問題の解法，土木学会，1971 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B-1。
- 2) 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，昭和 45 年。
- 3) 日野幹雄・山崎丈夫：水平板列による波の反射および透過に関する理論，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 9，pp. 89~97，昭和 45 年。
- 4) Stoker, J.J.: Water Waves, Interscience Publishers Inc., New York, pp. 430~436, 1957.
- 5) 建設省土木研究所：浮防波堤に関する調査報告書，昭和 48 年。
- 6) 浜田徳一：Breakers and beach erosions, Rept. of Transportation Technical Research Institute, No. 1, 1951.