

透過性防波構造物の水理特性 (第2報)

近 藤 俣 郎*・藤 間 聡**

1. ま え が き

本文は第17回講演会において発表した同題名の論文¹⁾の続報である。前報では透過性防波構造のモデルとして、立体格子構造物および孔あきブロックの2種類について、その水理的な諸性質を実験的に調べ、また損失を伴う長波理論により伝達率、反射率を推定する算定式を示した。本文はそのうちの立体格子構造物について、さらに反射率、伝達率、内部波高分布ならびに抵抗係数等の広範囲にわたる実験を行なった結果を示す。

また scale effect, 半透過性構造物を対象とした若干の実験も行なった。一方、理論については構造物の前面、後面における流入、流出に伴う損失を再検討し計算方法も修正を行ない、半透過性構造物についても近似式を得た。

2. 実験設備と方法

実験水路は水路Ⅰ、水路Ⅱの2種類を用いて実験を行った。水路Ⅰは水深を大きくとる必要がある実験を行なうためのものであり長さ 18.5 m, 幅 0.4 m, 高さ 1.0 m の片面ガラス張鋼製二次元水路でこの水路にはフラップ式造波装置が付設されている。水路Ⅱは scale effect および抵抗係数測定、半透過性構造物等の比較的水深が小さい場合に使用する、長さ 12.0 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.3 m の両面および水路底ともガラス張鋼製水路である。この水路にも水路Ⅰと同様にフラップ式造波装置を付設した。

波高の測定は並行抵抗線式波高計を用いて、これを増幅器に接続し、6チャンネルのビジグラフおよびインク書オシログラフで記録した。波高計の設置台数は構造物前方水域に入射波高および反射波高の測定のために4台、後方水域に構造物背面から $L/4$, $L/2$ 点に2台、合計6台である。構造物内部には小型の波高計を作製し一定間隔に数台設置した。

3. 抵抗係数

定常流に対する格子構造物の抵抗係数の測定は、前述の水路Ⅱにおいて直径 $\phi 34$ mm, $\phi 11$ mm, $\phi 4$ mm の

3種類の塩化ビニール製パイプの格子構造物を用いて実験を行ない、実験の結果を Cohen de Lara の石積みの抵抗係数²⁾の実験値と同じ方法、すなわち空げき率の5乗法則で整理したものが図-1である。実験範囲では抵

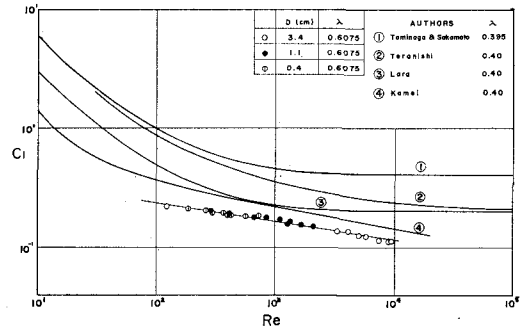


図-1 抵抗係数

抗係数 C_1 はレイノルズ数 Re に対し直線関係にあることを示しているが、これは層流項が乱流領域においても無視できないことを示している。十分に発達した乱流領域では抵抗係数 C_1 は 0.11 に接近する。この直線の式は $C_1 = 0.54(Re)^{-1/6}$ で表わされる。また石積などの粒状体に関しては現在種々の実験から抵抗係数を表わす実験式が発表されているが、表現方法が異なり即座に比較検討ができない。そこで空げき率のほぼ等しい4種のデータをやはり空げき率の5乗法則を用いて再整理したもの³⁾を同時に記載してある。これによれば石積みの場合の抵抗係数は、実験者によってかなり大きな範囲で変化しており、空げき率と粒径の他に形状、表面粗度の影響が大きいと推定される。

4. 構造物幅員の伝達率、反射率に与える効果

図-2 は水深が 50.0 cm, 25.0 cm における、幅が一定の構造物に対してそれぞれ4種類の周期 T について波高を変えて入射波を作用させた場合の伝達率 K_T と反射率 K_R の実験結果である。

図-3 は構造物の幅員 B の K_T , K_R に与える効果を表わしたもので、 K_T は B の増加に伴ってほぼ指数的に減少していることがわかる。一方 K_R は B の増加にともない増加していき $B/L=0.2$ 付近で極大値をとり、この点をすぎると減少し、 $B/L=0.4$ 付近で極小値をとる。それ以後はほぼ一定値となる。構造物内での波長の

*正会員 M.S. 室蘭工業大学助教授 土木工学科

**正会員 工修 室蘭工業大学助手 土木工学科

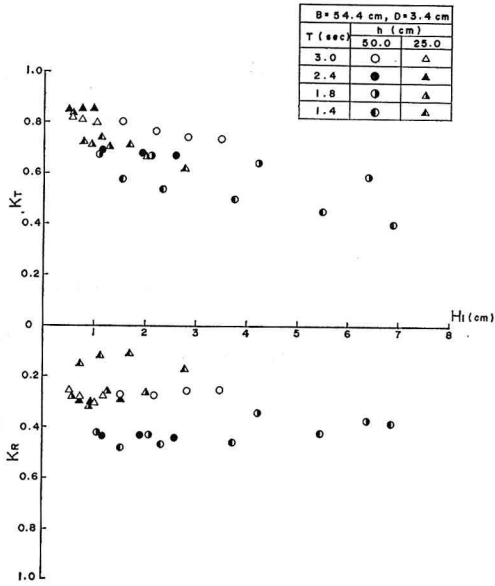
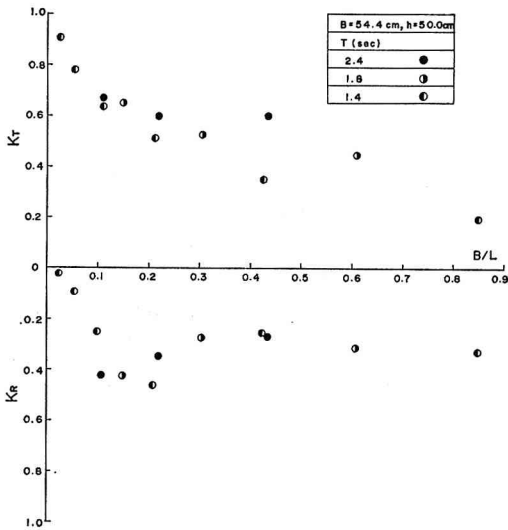
図-2 伝達率 K_T および反射率 K_R 

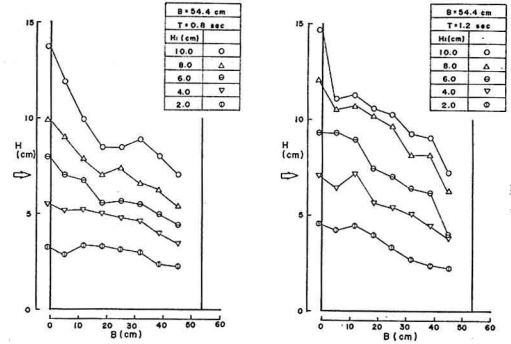
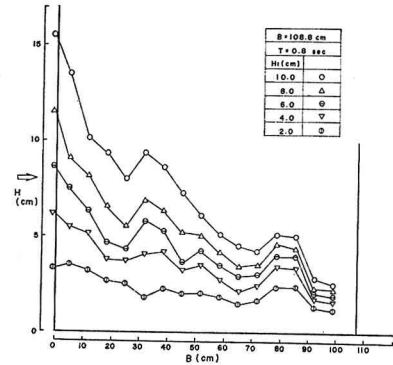
図-3 幅員が伝達率および反射率におよぼす効果

縮小があるから、構造物内での波長を L_P とすると、幅員がおおよそ $L_P/4$ になると反射率 K_R は最大となり、 $L_P/2$ で最小となると判断される。

5. 内部波高分布

内部波高分布は構造物内部に一定間隔に抵抗線式波高計を設置して測定した。図-4, 5 は水深 50.0 cm, 構造物幅員 $B=54.4$ cm および 108.8 cm において、4 種類の周期 T について波高を変えて入射波を作用させた場合の内部波高分布についての結果である。

構造物幅員 $B=54.4$ cm の場合についてのおおのこの周期における B/L の値を求めると周期 $T=1.2$ 秒の場合 $B/L=0.27$ であり、 $T=0.8$ 秒のときは $B/L=0.546$ で

図-4 内部波高分布 ($B=54.4$ cm)図-5 内部波高分布 ($B=108.8$ cm)

ある。すなわち前者は構造物幅員と波長との比が、おおよそ $1/4$ 、後者は $1/2$ である。水理的にみれば構造物前面で腹を形成し、構造物後面では節になりやすい。構造物幅員が $L/4$ の時には境界条件が上述に合致しているので、内部波高分布は前面から後面に向って一様に減少している。一方構造物幅員が $L/2$ の時には上述の境界条件に合致しないので波高分布は一様でなく、前面から後面に向ってやや内部に最大値を生じ、内部に1個ずつ極小、極大を生じ後面で最小値をとる分布をなしている。

6. scale effect

$\phi 34$ mm 格子構造物を prototype とし、写真-1 に示す $\phi 18$ mm, $\phi 4$ mm を model として、フルード相

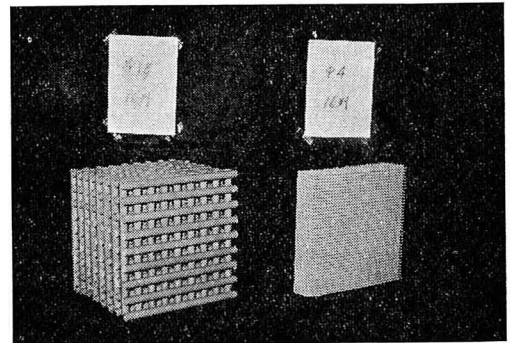


写真-1

似律を用いて伝達率、反射率におよぼす縮尺効果を調べた。この実験は現在まだ完了していないので、ここではその一部のみを報告する。

$\phi 34$ mm, $\phi 18$ mm, $\phi 4$ mm の幾何学寸法比は 1 : 1/1.89 : 1/8.5 である。一般的に伝達率 K_T はパイプの直径が小さくなるほど小さくなり、石積みの場合⁴⁾と同じ傾向があるが、反射率 K_R に関してはあまり変化がない。

$\phi 34$ mm の場合に水深を 50.0 cm にすると、 $\phi 18$ mm $\phi 4$ mm はそれぞれ 26.5 cm, 5.9 cm となる。 $\phi 34$ mm 構造物に作用させる入射波の周期 $T=1.8$ 秒では、 $\phi 18$ mm で $T=1.31$ 秒, $\phi 4$ mm で $T=0.617$ 秒となる。この結果を示した一例が 図-6 である。

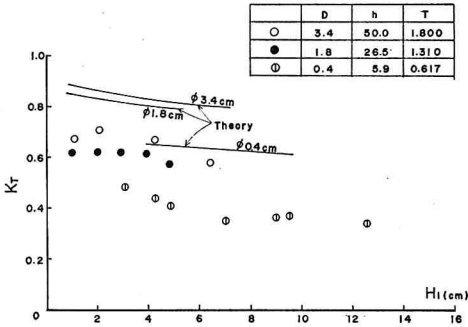


図-6 伝達率におよぼす縮尺効果

反射率 K_R については現在までのところ顕著な傾向がなくなお検討中である。伝達率 K_T は $\phi 34$, $\phi 18$, $\phi 4$ mm の順で小さくなるが、この理由として、空げき寸法が小さいほど空げき間の粘性が強いため波が構造物内に進行しづらく、また進入した後も構造物内で、構造物の形状により働く抵抗力のほか、粘性等による抵抗力のために伝達率 K_T は小さくなると思われる。

7. 半透過性構造物

半透過性構造物は上部構造が不透透性の垂直壁を有し、下部構造は $\phi 11$ mm の塩化ビニール製パイプの格子構造よりなり、水粒子の有するエネルギーは下部構造物からのみ後方水域に伝達される（写真-2）。実験から

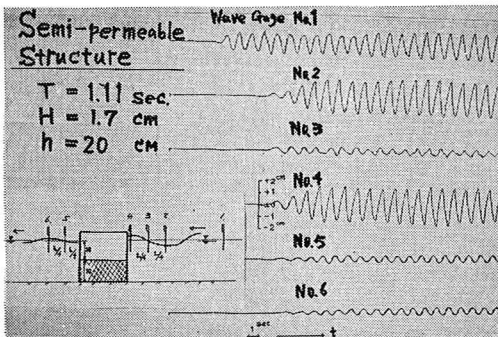


写真-2

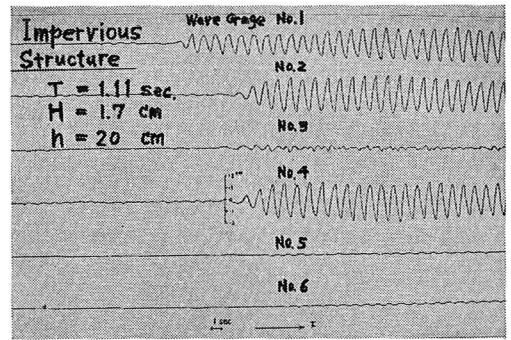


写真-3

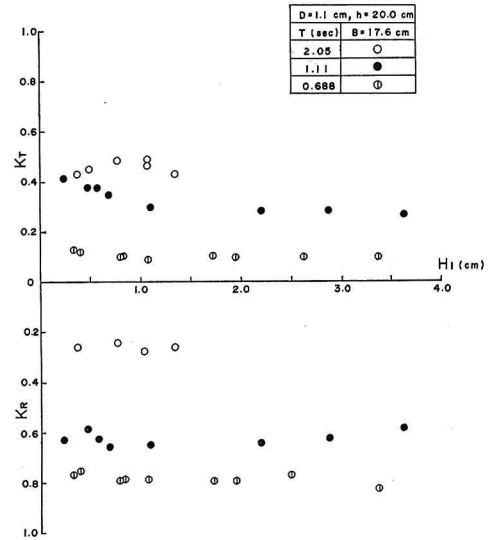


図-7 半透過性構造物における伝達率および反射率

得た伝達率、反射率の例を図-7 に示す。

この図-7 から伝達率 K_T および反射率 K_R ともに入射波高による変化は非常に小さく、反面入射波の周期 T による影響が大きいといえる。これは周期 T が小さい場合、運動エネルギーが水面付近に集中しており、垂直面でエネルギーの大半が反射され、その結果伝達率 K_T が小さくなる。一方周期が大きくなると長波性に近くなり、流速分布が一様化するので下部構造を通して後方にかんりの量のエネルギーが伝達され、伝達率 K_T は増大することを示している。

8. 伝達率および反射率の理論と計算

前報において発表した長波理論の中の境界面におけるエネルギー損失係数 j について検討を加え次のように修正を行なう。

始めに前面における損失係数 j_f を考える。

境界面で単位時間に単位幅について損失する平均エネルギー量は

$$\bar{W}_{\text{loss}} = \frac{1}{(T/2)} \int_t^{t+T/2} \int_{-h}^0 f \cdot w_0 \frac{u^2}{2g} u dx dt \dots (1)$$

ここで

$$u' = \frac{u}{\lambda},$$

$$u = \frac{\lambda \sigma H_{tf}}{2h \sqrt{m_f^2 + n_f^2}} \sin(\sigma t - mx + \delta) \quad \cdots (2)$$

である。

(1) 式に (2) 式を代入して積分すると

$$\begin{aligned} \bar{W}_{\text{loss}} &= \frac{w_0 \cdot f \cdot h}{\lambda^2 g T} \times \frac{8 T}{3 \pi} \times \frac{\lambda^3 \sigma^3 H_{tf}^3}{8 h^3 (m_f^2 + n_f^2)^{3/2}} \\ &= \frac{\lambda w_0 f \sigma^3 H_{tf}^3}{3 \pi g h^2 (m_f^2 + n_f^2)^{3/2}} \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

$$\bar{W}_{\text{loss}} = j_f W_{tf} \quad \cdots (4)$$

$$W_{tf} = \frac{w_0 \lambda \sigma m_f H_{tf}^2}{8 (m_f^2 + n_f^2)} \quad \cdots (5)$$

$$\begin{aligned} j_f &= \frac{8 f \sigma^2 H_{tf}}{3 \pi g h^2 (m_f^2 + n_f^2)^{1/2} m_f} \\ &= \left(\frac{8 f H_{tf}}{3 \pi \tau h} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 + F_f^2} + \sqrt{1 + F_b^2}} \quad \cdots (6) \end{aligned}$$

同様に後面における損失係数 j_b は,

$$j_b = \left(\frac{8 f H_{ib}}{3 \pi \tau h} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 + F_b^2} + \sqrt{1 + F_f^2}} \quad \cdots (7)$$

となる。

前報の長波理論の j を (6) 式, (7) 式で与え, 抵抗係数 $c_1=0.11$, $f=0.25$, $\tau=1.0$ として計算を行なった理論値と実験値を対応させたものが図-9 である。なお, この計算は, 乱流域における透水係数を求めるための最大流速は構造物中央の流速 U を用い, U と j_f , j_b に初期値を与えこれと (6), (7) 式および

$$U = \frac{\lambda \sigma H_1 K_{tf} \cdot e^{-nB/2}}{2h \sqrt{m^2 + n^2}} \quad \cdots (8)$$

との差が1%以下になるまで繰返し計算を行なって, 伝達率, 反射率を求めたものである。

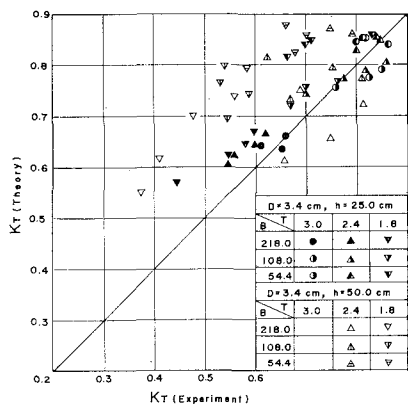


図-8 伝達率の理論値と実験値

伝達率 K_T は周期 T が大きいほど, また水深が小さいほど, 理論値と実験値が一致する傾向がある。構造物幅員 B の効果はこの図から明白な傾向がつかめないが, B が小さくなると一致してくる。反射率 K_R は理論値が

大体一定値をとるが全体からみるとよく一致している。

また前報で発表した理論値の伝達率, 反射率を求める際の計算の中でミスがあり, 次のように理論値と実験値

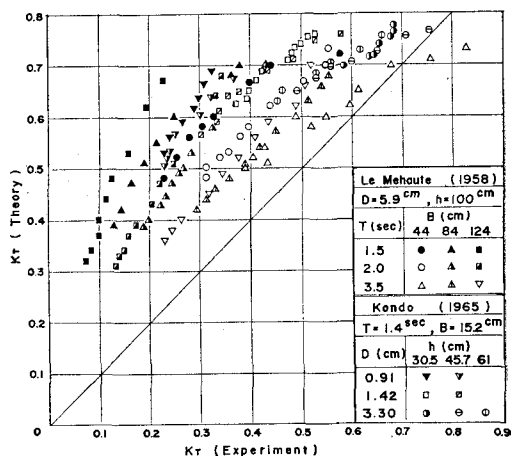


図-9 伝達率の理論値と実験値 (石積堤)

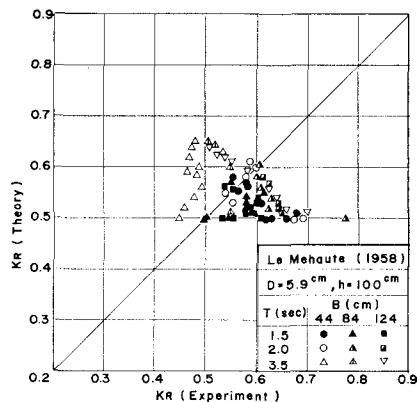


図-10 反射率の理論値と実験値 (石積堤)

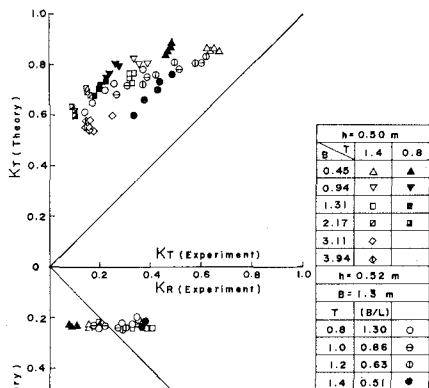


図-11 伝達率および反射率の理論値と実験値 (立体格子)

の比較図を訂正する。この訂正された結果についても上述の傾向が明らかである。

9. 半透過性構造物の反射率, 伝達率の一推定法

7. で実験結果を示した半透過性構造物は, 実用面では混成防波堤のモデルになるし, また新しい形式の防波構造物にもなり得るので今後さらに実験的に研究する所存である。ここでは前報で得た透過性構造物の反射率, 伝達率の推定法を応用して, 図-12 に示すような理想

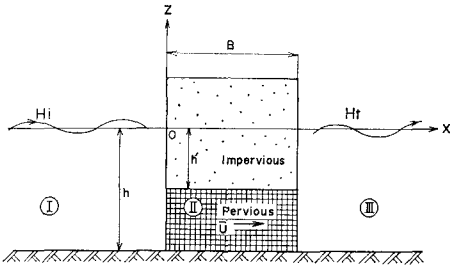


図-12 半透過性構造物

化された半透過性構造物による反射率, 伝達率を推定する方法を考案してみた。

下部の透過性部分における水粒子運動は, 長波を対象とすると次式にしたがうことができる。

$$\frac{1}{\lambda g} \frac{d\bar{u}}{dt} + \frac{1}{\rho g} \frac{(\eta_{m,B} - \eta_{l,0})}{B} + \frac{\bar{u}}{k} = 0 \quad \dots (1)$$

ここで, λ : 空げき率, ρ : 密度, B : 構造物幅員, k :

透水係数, g : 重力加速度。また η_1, η_m はそれぞれ領域①, ②における水面を示し, それぞれ次のように表現する。

$$\eta_1 = \eta_i + \eta_s + \eta_p \quad \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_i &= \frac{H_i}{2} \sin(\sigma t - kx) \\ \eta_s &= \frac{H_s}{2} \sin(\sigma t + kx) \\ \eta_p &= \frac{H_p}{2} \sin(\sigma t + kx + \alpha_p) \end{aligned} \right\} \quad \dots (3)$$

$$\eta_m = \eta_t = \frac{H_t}{2} \sin(\sigma t - kx + \delta) \quad \dots (4)$$

ただし, $\sigma = 2\pi/T$, T : 波の周期。

入射波, 不透過部分からの反射波, 透過部分からの反射波, 後方水域の伝達波をそれぞれ subscript i, s, p, t で表現している。

次に境界条件は質量とエネルギー保存則から, 前面 ($x=0$) では下の2式が成立する必要がある。

$$h(u_i + u_s + u_p) = (h - h')\bar{u}, \quad x=0 \quad \dots (5)$$

$$W_{if} = W_s + W_p + \bar{W}_{tf}, \quad x=0 \quad \dots (6)$$

同様に後面においては,

$$(h - h')\bar{u} = hu_t, \quad x=B \quad \dots (7)$$

$$\bar{W}_{ib} = W_t \quad \dots (8)$$

ただし—は下部構造物内の値を示し, また W は単位時間当りの平均エネルギー輸送量である。

以上の式から下部反射率 $K_{rp} = H_p/H_i$, 伝達率 $K_t = H_t/H_i$ は, 上部反射率 $r_s = H_s/H_i$ が知れると次のように求められる。

$$K_{rp} = \frac{+8(P+Q) - \sqrt{64(P+Q)^2 - 4\{4(1+Q^2) - (P+Q)^2\}[4(1-r_s^2) + (P+r_sQ)^2] - (P+Q)^2(1-r_s^2)^2}}{2\{4(1+Q^2) - (P+Q)^2\}} \quad \dots (9)$$

$$\alpha_p = \frac{\pi}{2} \quad \dots (10)$$

$$K_T = \left[(1-r_s)^2 + \left\{ \frac{+8(P+Q) - \sqrt{64(P+Q)^2 - 4\{4(1+Q^2) - (P+Q)^2\}[4(1-r_s^2) + (P+r_sQ)^2] - (P+Q)^2(1-r_s^2)^2}}{4\{4(1+Q^2) - (P+Q)^2\}^2} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad \dots (11)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{h-h'}{h} \times \frac{\lambda \sqrt{gh}}{\sigma B} - \frac{\lambda g}{\sigma k} \\ Q &= \frac{h-h'}{h} \times \frac{\lambda \sqrt{gh}}{\sigma B} + \frac{\lambda g}{\sigma k} \end{aligned} \right\} \quad \dots (12)$$

r_s は下部透過性構造がない上部のみの値を取ることとし, たとえば Wiegel の理論値⁵⁾ が使用できるであろう。

10. 結 論

(1) 立体格子構造物の抵抗係数 C_1 は実験範囲ではレイノルズ数 Re が大きくなると直線的に減少する。 Re

$>10^4$ では 0.11 に近づく。

(2) 立体格子構造物の場合, 反射率 K_R , 伝達率 K_T とも入射波の諸元の影響が大きく, K_T は周期 T が大きくなると大きくなり, 構造物幅員が大きくなると指数的に減少する。 K_R は B が $L/4$ まで増大していき $L/4$ で極大値をとり漸次減少し $L/2$ 付近で極小値となる。それ以後は一定値をとる。

(3) 内部波高分布は構造物幅員と波長の比 (B/L) により支配され, $B/L=1/4$ の場合は前面で最大値があらわれ後面の節に向って漸次減少し, $B/L>1/4$ の場合には構造物内部に極小値, 極大値が生じ, 構造物内部の

波高は前面を腹、後面を節となるような固有振動型の波高分布をなす。

(4) 半透過性構造物の場合、入射波高による影響が小さく、入射波の周期 T が反射率、伝達率に支配的である。伝達率は T が大きいほど大きく、一方、反射率は T が小さいほど大きくなる。 T による伝達率、反射率に与える影響は透過性構造物より顕著に現われている。

(5) 波の反射率、伝達率を長波理論を用いて計算した結果、構造物幅員 B が小さいほど、また水深が小さく、入射波高が小さくおよび周期が大きいほど理論値と実験値とはよい合致がみられ、波の変形を理論的に推定するものとして、有効なものと考えられる。

本研究は文部省特定研究「海岸災害の防止対策に関する研究」(代表者 北大 尾崎 晃教授)によってその一部が行なわれたことを付記し、ご指導下さった同教授に厚く感謝いたします。

本研究は室蘭工業大学河海工学研究室にて行なわれたもので、ご支援下さった境 隆雄教授、協力された加納

隆一技術員、大学院生小堀共生君に感謝いたします。また、実験の一部は 46 年度卒業生、山田 進(室蘭市役所)、秋山俊一(道帯広土木現業所)、梶原繁実(道路工業(株))ら諸君の協力を得たことを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 近藤徹郎・藤間 聡：透過性防波構造物の水理特性，第 17 回海岸工学講演集，昭 45.11，pp. 155-162.
- 2) Le Mehaute, B. : Permeabilite des digues en enrochements aux ondes de gravite Periodiques, La Houille Blanche, No. 6, 1957 et No. 2, No. 3, 1958.
- 3) 近藤徹郎・藤間 聡：透過性構造物の防波機能におよぼす抵抗係数と空げき率の効果，土木学会北海道支部論文集(昭和 45 年度)，pp. 155-159, 1971.
- 4) Johnson, J.W., H. Kondo, and R. Wallihan : Scale Effects in Wave Action through Porous Structures, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 1022-1024, September 1966.
- 5) Wiegel, R.L. : Transmission of Waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, Jr. of Waterways Harbors Div., Proc. ASCE, Paper 2413 vol. 86, pp. 1-12, March 1960.