

幅広潜堤における被覆ブロックの消波効果に関する数値計算

Numerical Analysis on Wave Dissipation using Armor Blocks over a Submerged Breakwater

奥蘭 英明* 岡本 弘司**

Hideaki Okuzono and Hiroshi Okamoto

Abstract

This paper shows the characteristics of transmission coefficients of submerged breakwaters covered by armor blocks at time of high tide in large tidal zones. The analysis was carried out numerically by means of a boundary integral method for small amplitude waves with a velocity potential in two-dimensional fluid motion, where two terms of fluid resistance at the porous layers are assumed to be proportional to the fluid velocity and acceleration, respectively. It was found that armor layer thickness was important to make the transmission coefficient small.

Keywords: Submerged breakwater, Armor block, Transmission coefficient

1. はしがき

周囲を海に囲まれた我国では、潜堤は高潮、波浪、侵食などの海岸災害防止に、また一般に海面下に位置するので景観を損なうことが無く、安全な人工レクリエーション空間の提供や、海水交換など優れた機能を発揮することにより高い評価を得てきた¹⁾。しかし潮位変化の大きい所では、満潮時に潜堤の天端上水深が大きくなり、十分な消波効果が得られない^{2), 3), 4)}。そこで、本研究では、大潮差海域において消波効果を発揮するように潜堤コア上に被覆ブロックを配置し、天端上水深が大きくなった場合にも伝達率を小さくできる潜堤を開発する事を目的として、グリーンの公式を用いた数値計算を行い、被覆ブロックの効果について検討した。

2. 潜堤の計算

2.1 潜堤の断面形状

図-1に示すように、静水面上に原点 $O(0, 0)$ 、水平および鉛直上方に X 軸、 Z 軸をとり、潜堤コア上に被覆ブロックを配列した潜堤を考える。 $F'E'D'DCC'B'A'$ を不透過面、 $E''E'B'B''$ を透過層の表面とする。流体は、非圧縮性、非粘性の無渦運動とし、入射波は非砕波として不透過面でのエネルギー損失は考慮していない。

$ABB'B''A'A$ を領域(Ⅰ)、 $B'B''C'CB'$ を領域(Ⅱ)、 $EBB'E'E$ を領域(Ⅲ)、 $B'E'DCB'$ を領域(Ⅳ)、 $E'DD'E''E'$ を領域(Ⅴ)、 $F'E''E'E'F'F'$ を領域(Ⅵ)として各領域の境界上のポテンシャルをそれぞれ添字1~18を付けて示す。また、流体と透過層境界との隣接部分は*を付けて区別をした。 $A-A'$ と $F-F'$ は原点 $O(0, 0)$ より十分離れた一様水深 h の場所にある仮想境界面であり、計算上は距離 $\overline{OA} = \overline{OF} = R$ は水深 h の10倍とした。なお、各領域の境界面での法線 ν は図示のような向きとした。

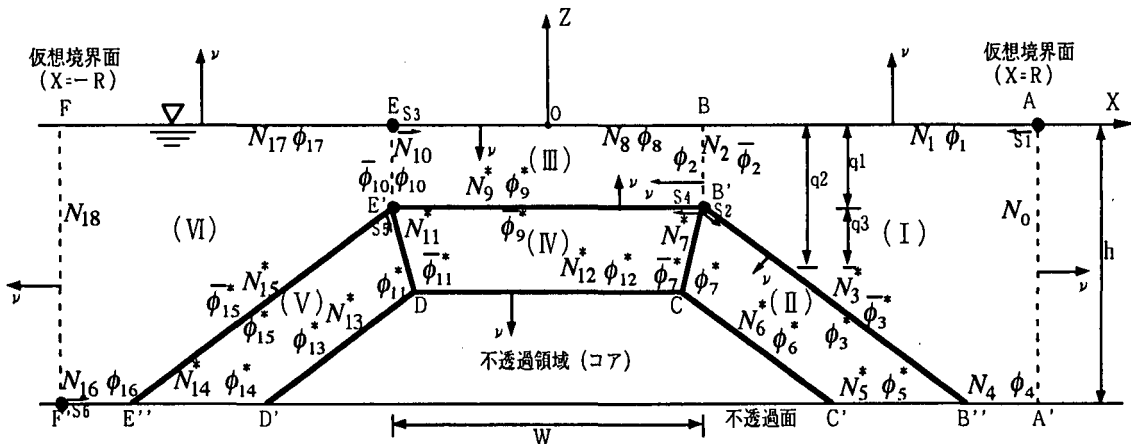


図 - 1 潜堤の各諸元

* 正会員 九州産業大学工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)
 ** 学生会員 九州産業大学工学研究科土木工学専攻

また、流体域の大きさを代表する長さを水深 h として、式 (1) により各領域での座標を決定し、無次元座標 (x, z) を用いると微小振幅波理論における各領域での境界条件を求めることができる。

$$x = X/h, \quad z = Z/h \quad (1)$$

2. 2 各断面での境界条件

1) 水面での自由表面条件

水面での速度ポテンシャル ϕ と、法線方向の微分値 $\bar{\phi}$ の関係は、入射波の角周波数を $\sigma (= 2\pi/T)$ として、式 (2) のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial v} = \Gamma \cdot \phi = \bar{\phi}, \quad \Gamma = \frac{\sigma^2 \cdot h}{g} \quad (2)$$

2) 不透過面での表面条件

不透過面での法線方向の流速は 0 なので次のようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial v} = 0 = \bar{\phi} \quad (3)$$

3) 流体と流体での境界条件

流体中の境界条件は、ポテンシャルが連続でなければならないので、図 - 1 に示すように ϕ, ϕ^* として区別すると、式 (4) のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial v} = \frac{\partial \phi^*}{\partial v} = \bar{\phi} \quad (4)$$

4) 仮想境界面での条件

仮想境界面では水深が一定であるから、水深 h での波長を L 、複素反射率を K_R とすると、ポテンシャル関数 $\phi_0(x, z)$ は、

$$r = R/h, \quad \lambda = \frac{2\pi h}{L}, \quad c(z_i) = \frac{\cosh \lambda(z_i + 1)}{\cosh \lambda} \quad (5)$$

として、仮想境界面 $x = r$ においては次式となる。

$$\phi_0(x=r) = (1+K_R)c(z_i), \quad \frac{\partial \phi_0}{\partial v}_{(r,r)} = i\lambda \cdot (1-K_R)c(z_i) = \bar{\phi}_0(r,r) \quad (6)$$

仮想境界面 $x = -r$ では、複素伝達率を K_T とすると、次式のように表される。

$$\phi_{18}(r,-r) = K_T \cdot c(z_i), \quad \frac{\partial \phi_{18}}{\partial v}_{(r,-r)} = i\lambda \cdot K_T \cdot c(z_i) = \bar{\phi}_{18}(r,-r) \quad (7)$$

5) 一般流体と透過領域での境界条件

潜堤コア上の領域 (II)、(IV)、(V) に、被覆ブロックによるエネルギー消費を次のように考慮する。

空隙率を V 、流速および加速度に比例する抵抗係数を μ_1, μ_2 とし、今回の計算では、 $V = 0.6$ 、 $\mu_1/\sigma = 1.0$ 、 $\mu_2 = 0.2$ とした⁵⁾。

透過領域内部の流体運動と外部の流体運動は、その境界面で連続でなければならない。この場合は流体圧力および境界面での流速の連続から、次の関係を得る。

$$\phi = (\alpha - i\beta) \cdot \phi^*, \quad \frac{\partial \phi}{\partial v} = \frac{\partial \phi^*}{\partial v} \quad (8)$$

$$\alpha = (1 + \mu_2)/V, \quad \beta = (\mu_1/\sigma)/V \quad (9)$$

2. 3 各領域の連立1次方程式

図-1に示すように、計算方向を各領域においてそれぞれ黒点を始点および終点として、矢印方向に各領域の境界面を分割する。分割数は $N_0, N_2, \dots, N_{18}$ とし、各領域に境界条件を考慮してグリーンの公式を離散化した次式を適用する。

$$\sum_{j=1}^{N_1} [F_{ij} \phi(j) - E_{ij} \bar{\phi}(j)] = 0 \quad (10)$$

ここで、 F_{ij} 、 E_{ij} は領域の形だけで決まるものである⁵⁾。

領域(I)では仮想境界面A-A'での ϕ_0 および $\bar{\phi}_0$ は式(6)で与えられるから、方程式は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_1} [F_{ij} - \Gamma \cdot E_{ij}] \cdot \phi_1(j) + \sum_{j=1}^{N_2} [F_{ij} \phi_2(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2(j)] + \sum_{j=1}^{N_3} [(\alpha - i\beta) F_{ij} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_3(j)] + \sum_{j=1}^{N_4} F_{ij} \phi_4(j) \\ & + K_R \cdot \sum_{j=1}^{N_0} [F_{ij} + i\lambda \cdot E_{ij}] \cdot \frac{\cosh \lambda(zj+1)}{\cosh \lambda} = - \sum_{j=1}^{N_0} [F_{ij} - i\lambda \cdot E_{ij}] \cdot \frac{\cosh \lambda(zj+1)}{\cosh \lambda} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタであり、内向き法線では $F_{ij} = (+)\delta_{ij} \bar{E}_{ij}$ 、向き法線では $F_{ij} = (-)\delta_{ij} \bar{E}_{ij}$ となる。すなわち、領域(II)、(III)、(V)では $F_{ij} = +\delta_{ij} \bar{E}_{ij}$ であり、領域(I)、(IV)、(VI)では $F_{ij} = -\delta_{ij} \bar{E}_{ij}$ となる。境界A-A'上の分割数は N_0 とするが、未知数は反射率 K_R の1つである。

領域(II)では

$$\sum_{j=1}^{N_3} [F_{ij} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_3(j)] + \sum_{j=1}^{N_5} [F_{ij} \phi_5(j)] + \sum_{j=1}^{N_6} [F_{ij} \phi_6(j)] + \sum_{j=1}^{N_7} [F_{ij} \phi_7(j) - E_{ij} \bar{\phi}_7(j)] = 0 \quad (12)$$

領域(III)では

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_8} [F_{ij} + \Gamma \cdot E_{ij}] \cdot \phi_8(j) + \sum_{j=1}^{N_2} [F_{ij} \phi_2(j) - E_{ij} \bar{\phi}_2(j)] + \sum_{j=1}^{N_3} [(\alpha - i\beta) F_{ij} \phi_3(j) - E_{ij} \bar{\phi}_3(j)] + \\ & \sum_{j=1}^{N_{10}} [F_{ij} \phi_{10}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{10}(j)] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

領域(IV)では

$$\sum_{j=1}^{N_9} [F_{ij} \phi_9(j) - E_{ij} \bar{\phi}_9(j)] + \sum_{j=1}^{N_{11}} [F_{ij} \phi_{11}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{11}(j)] + \sum_{j=1}^{N_{12}} F_{ij} \phi_{12}(j) + \sum_{j=1}^{N_7} [F_{ij} \phi_7(j) - E_{ij} \bar{\phi}_7(j)] = 0 \quad (14)$$

領域(V)では

$$\sum_{j=1}^{N_{11}} [F_{ij} \phi_{11}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{11}(j)] + \sum_{j=1}^{N_{13}} F_{ij} \phi_{13}(j) + \sum_{j=1}^{N_{14}} F_{ij} \phi_{14}(j) + \sum_{j=1}^{N_{15}} [F_{ij} \phi_{15}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{15}(j)] = 0 \quad (15)$$

領域(VI)では、仮想境界面F-F'での ϕ_{18} および $\bar{\phi}_{18}$ は式(7)で与えられるので次のようになる。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_{16}} F_{ij} \phi_{16}(j) + \sum_{j=1}^{N_{15}} [(\alpha - i\beta) F_{ij} \phi_{15}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{15}(j)] + \sum_{j=1}^{N_{10}} [F_{ij} \phi_{10}(j) - E_{ij} \bar{\phi}_{10}(j)] + \\ & \sum_{j=1}^{N_{17}} [F_{ij} - \Gamma \cdot E_{ij}] \cdot \phi_{17}(j) + K_T \cdot \sum_{j=1}^{N_{18}} [F_{ij} + i\lambda \cdot E_{ij}] \cdot \frac{\cosh \lambda(zj+1)}{\cosh \lambda} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

以上のように、式(11)～(16)において未知量は、 $\phi_1, \bar{\phi}_2, \bar{\phi}_3, \phi_4, K_R, \phi_5, \phi_6, \phi_7, \phi_8, \phi_2, \phi_9, \phi_{10}, \bar{\phi}_9, \bar{\phi}_{11}, \phi_{12}, \bar{\phi}_7, \phi_{11}, \phi_{13}, \phi_{14}, \phi_{15}, \bar{\phi}_{15}, \bar{\phi}_{10}, \phi_{17}, K_T$ である。

仮想境界面A-A'、F-F'での未知数は、反射率 K_R と伝達率 K_T をそれぞれ1つ求めればよいから、未知数の合計は $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + 1 + N_3 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_2 + N_9 + N_{10} + N_9 + N_{11} + N_{12} + N_7 + N_{11} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{15} + N_{10} + N_{17} + 1$ 個である。この連立1次方程式をクラウト法により解いて、すべての未知量が求められる。

計算結果は、 h を潜堤設置水深、 W を天端幅、 q_1 を天端上水深、 q_3 を被覆ブロック層厚として示すが、 W 、

q_1 、 q_3 の値は水深 h により無次元化した値である。また、潜堤法面の勾配は $1 : 1.5$ とし、法面の被覆ブロック (Ⅱ)、(Ⅴ) の層厚は (Ⅳ) と同じにした。

3. 計算結果及び考察

3. 1 不透過潜堤との比較

図 - 2、3 は、縦軸に伝達率、横軸に周期を無次元化した $\sigma^2 h / g$ ($\sigma = 2 \pi / T$: 角周波数、 h : 水深) とし、天端上水深をそれぞれ $q_1 = 0.1$ 、 0.2 とした時の、不透過潜堤と被覆ブロック潜堤を比較したものである。潜堤天端幅は $W = 4$ 、被覆ブロックの層厚は $q_3 = 0.1$ である。

不透過潜堤の伝達率の値は、天端幅と入射波長の比の特定値によって $K_T = 1$ となっている。これは bragg scattering といわれ⁶⁾、入射波が潜堤上で共振を起こすために起こる現象である。被覆ブロック潜堤では、bragg scattering は少し残るが、不透過潜堤と比較して伝達率が大幅に減少していることが分かる。

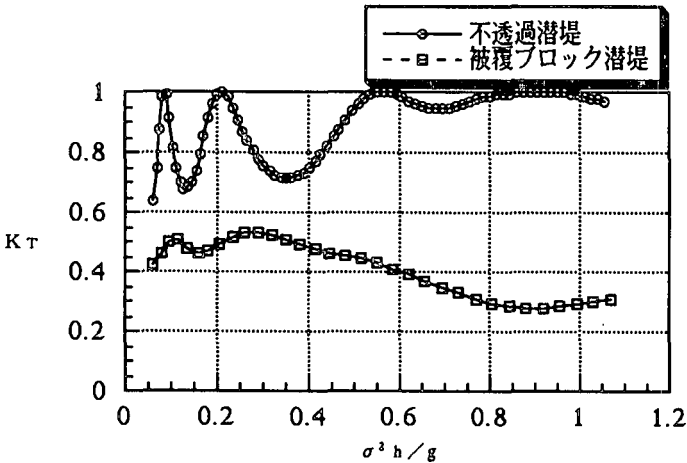


図 - 2 被覆ブロック潜堤と不透過潜堤の伝達率の比較
(天端幅 $W = 4$ 、天端上水深 $q_1 = 0.1$)

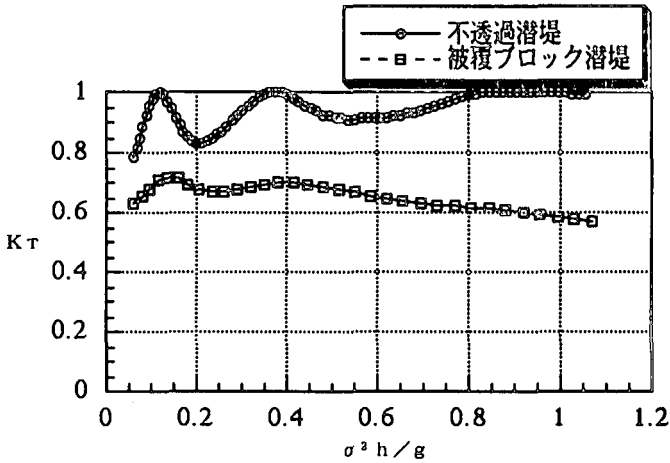


図 - 3 被覆ブロック潜堤と不透過潜堤の伝達率の比較
(天端幅 $W = 4$ 、天端上水深 $q_1 = 0.2$)

3. 2 天端上水深を変化した時の伝達率

図 - 4 は、天端幅を $W = 4$ 、被覆ブロック層厚を $q_3 = 0.1$ と一定とし、天端上水深を $q_1 = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 と変化した時の伝達率を示す。天端上水深が小さいほど、伝達率も減少していることが分かる。

図 - 5 は、横軸に天端上水深 q_1 をとり、天端幅を $W = 4$ 、被覆ブロック層厚を $q_3 = 0.1$ と一定とし、 $\sigma^2 h / g = 0.2 \sim 1.2$ と 0.2 きざみに変化した時の伝達率を示す。周期によらず、天端上水深が大きくなるに従って、伝達率も大きくなる。また周期が長いほど伝達率は大きくなる傾向にある。

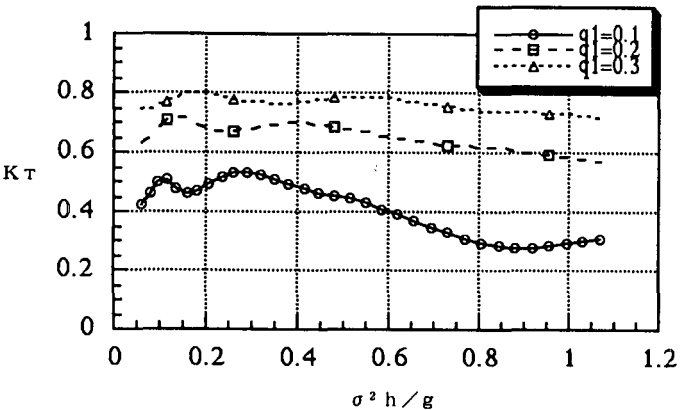


図 - 4 天端上水深を変化した時の伝達率
(天端幅 $W = 4$ 、被覆ブロック層厚 $q_3 = 0.1$)

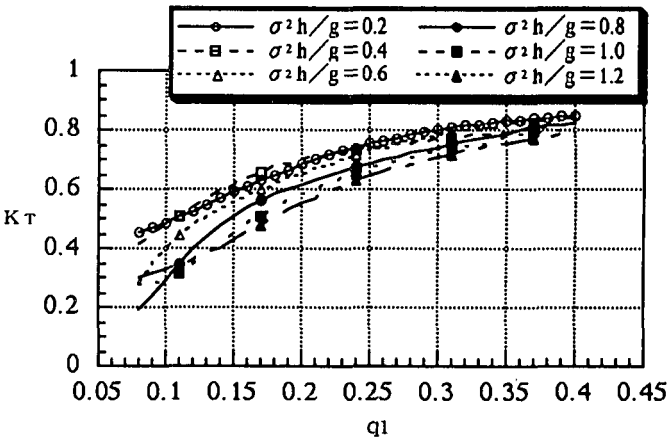


図 - 5 天端上水深を変化した時の伝達率
(天端幅 $W = 4$ 、被覆ブロック層厚 $q_3 = 0.1$)

3. 3 天端幅を変化した時の伝達率

図 - 6、7、8 は、被覆ブロック層厚を一定値 $q_3 = 0.1$ 、天端上水深をそれぞれ $q_1 = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 とし、天端幅を $W = 3$ 、 4 、 5 、 6 と変化したときの伝達率を示す。

天端幅を広くするほど伝達率は減少するが、図 - 4 で示した天端上水深 q_1 の値による変化と比較して、減少幅はさほど大きくない。

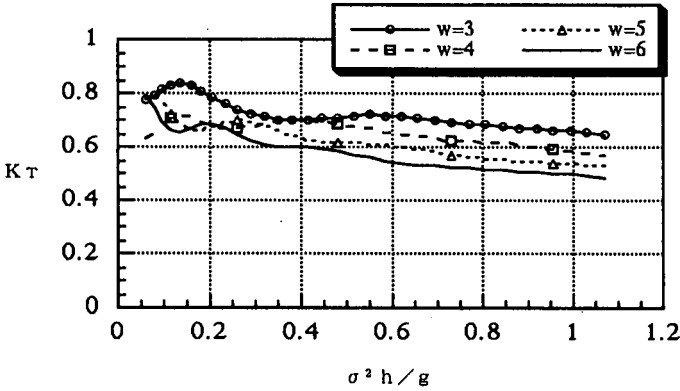


図 - 7 天端幅を変化した時の伝達率
(天端上水深 $q_1 = 0.2$ 、被覆ブロック層厚 $q_3 = 0.1$)

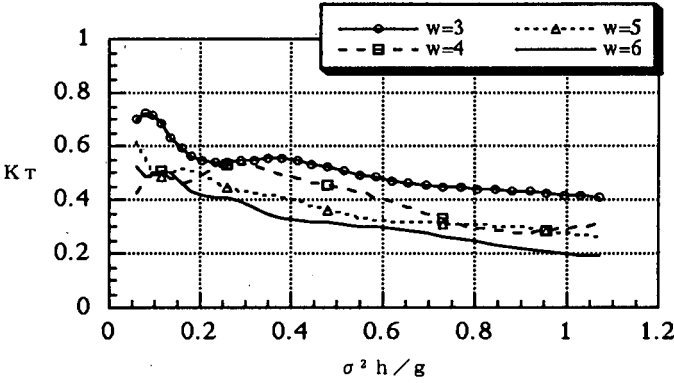


図 - 6 天端幅を変化した時の伝達率
(天端上水深 $q_1 = 0.1$ 、被覆ブロック層厚 $q_3 = 0.1$)

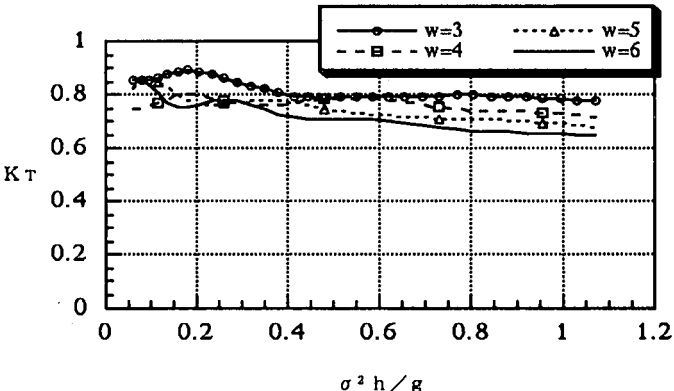


図 - 8 天端幅を変化した時の伝達率
(天端上水深 $q_1 = 0.3$ 、被覆ブロック層厚 $q_3 = 0.1$)

3. 4 被覆ブロック層厚を変化した時の伝達率

図 - 9、10、11 は、横軸に被覆ブロック層厚 q_3 をとり、天端幅を一定値 $W = 4$ 、 $\sigma^2 h / g$ をそれぞれ 0.4 、 0.8 、 1.2 とし、天端上水深を 0.1 、 0.2 、 0.3 と変化したときの伝達率を示す。

天端上水深によらず、被覆ブロック層厚を増加するに従って、伝達率は減少する。しかし、特に $q_1 = 0.1$ では、 $q_3 = 0.3$ 以上としても伝達率はさほど変化しない。

また、天端上水深が $q_1 = 0.3$ 、 0.2 、 0.1 と小さくなるに従って、伝達率は大幅に小さくなり、周期が短いほどこの傾向が強く表れる。

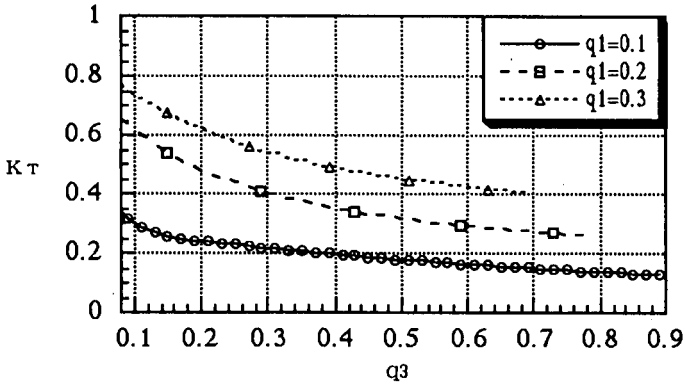


図 - 10 被覆ブロック層厚を変化した時の伝達率
(天端幅 $W = 4$ 、 $\sigma^2 h / g = 0.8$)

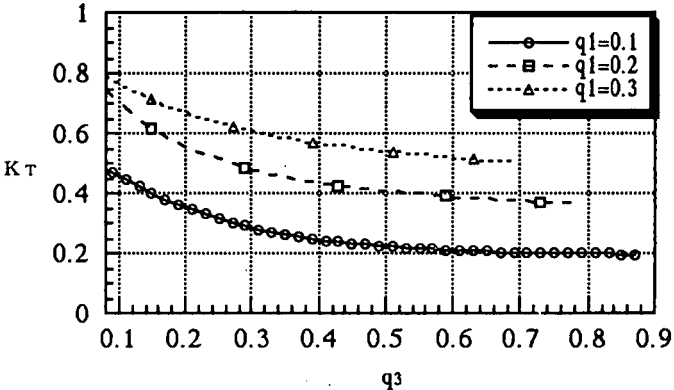


図 - 9 被覆ブロック層厚を変化した時の伝達率
(天端幅 $W = 4$ 、 $\sigma^2 h / g = 0.4$)

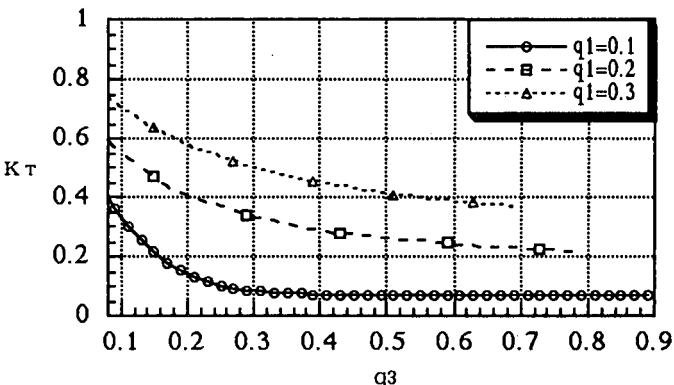


図 - 11 被覆ブロック層厚を変化した時の伝達率
(天端幅 $W = 4$ 、 $\sigma^2 h / g = 1.2$)

4. むすび

本研究では、被覆ブロック潜堤の数値計算を行い、伝達率の検討を行ったが、結果をまとめると以下のようになる。

- ① 周期によらず、天端上水深が小さいほど、伝達率は小さくなる。
- ② 天端幅を広くするほど、伝達率は減少するが、天端上水深に比べると影響が少ない。
- ③ 周期が短いほど伝達率は小さくなる。
- ④ 被覆ブロック層厚が厚いほど伝達率は減少するが、層厚を設置水深の0.3倍以上としても、伝達率はさほど変化しない。

今後は、実際の現地を想定した実験を行うとともに、計算値との比較が必要であると考える。

参考文献

- 1) (社) 全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き，pp.1～94, 1992.
- 2) 奥藺英明・高橋克佳・阿部孝行・前田建・我原弘昭：環境保全型潜堤に関する実験的研究，海洋開発論文集, Vol.12, pp.497～502, 1996.
- 3) 奥藺英明・阿部孝行・矢島昭弘・我原弘昭：大潮差海域における幅広潜堤に用いる被覆ブロックの開発，海洋開発論文集，Vol.13, pp.1～5, 1997.
- 4) 岡本弘司・奥藺英明：潜堤天端高さ選定と潮位変動について，海洋開発論文集，Vol.13, pp.7～12, 1997.
- 5) 井島武士・奥藺英明：遊水部をもつ棚式直立消波構造物の理論解析と消波特性，土木学会論文報告集，第327号，pp.87～97, 1982.
- 6) CHIANG C.MEI, TETSU HARA AND MAMOUN NACIRI: Note on bragg scattering of water waves by parallel bars on the seabed, J.Fluid Mech., Vol.186, pp.147～162, 1988.