

水平板と潜堤からなる複合型防波堤の防波効果について*

香川高等専門学校専攻科 森澤海里

香川高等専門学校 鶴本良博

1. まえがき

我が国は島国であり、海岸線の形状が極めて複雑であるために、国土面積に対して海岸線の総延長が非常に長くなっている。加えて、台風の常襲地帯と地震の多発地帯に位置し、冬季には強い季節風が吹く。この厳しい自然条件とオホーツク海、太平洋、日本海、東シナ海の外海に海岸が直面し、沿岸域には高波、高潮、津波が来襲して種々の海岸災害が発生する確率が高い¹⁾。そのため、昔から台風による高潮や高波、波浪による海岸侵食、地震に伴う津波などの多くの被害を受けてきた。その対策として堤防や護岸などの海岸保全施設は必要不可欠であるが、防災の面で優れている不透過な海岸保全施設は海面上にあるため景観的に悪影響をもたらすとともに堤内の水質悪化を引き起こすという欠点を持ち、海岸環境保全が重要視されている最近では問題となる。一般に、海岸構造物は、その自重によって滑動や転倒に対する安定性を確保するため、大水深域では、高波浪による作用外力の増大に伴って構造物の断面は大規模化する傾向にある。しかし、近年では、水深が比較的浅い沿岸域では、水質交換や景観を考慮する目的から従来の海岸構造物に代えて、潜堤や没水平板などの海面下に没した没水型の波浪制御構造物の利用が望まれている²⁾。

そこで、透過機能を有する水平板と潜堤からなる複合型防波堤の防波効果を検討した。没水型透過性防波堤は防波堤に空隙を設けることで海水交換の促進を図り、港内の水質悪化を防ぐという効果が期待でき、この防波堤は水面下にあるため、環境上のみならず景観的にも優れている。本研究では、このような利点を有する没水型透過性防波堤がどれほどの防波効果を持つかを模型実験と数値解析により検討した。

2. 模型実験

図-1 は本研究の模型実験で用いた実験装置や器具の配置を示している。模型実験では、長さ 6m、幅 2m、高さ 0.8m の水槽を用い、水深 h を 0.4m と一定にした。透過性防波堤の模型は木板で作成し、波によって動かないように模型の両端と四隅を L 型鋼で固定した。また、図-1 に示すように消波装置を設置しているが、完全に反射波を防ぐことはできない。それゆえに、水槽の中央に透過性防波堤の模型を設置し、反射波が波高データに大きく影響を及ぼすことのないようにした。

波高計については水槽側面の摩擦による影響を考慮して図-1 の奥行き方向に対して中央に置いた。写真-1 は今回の実験で用いたプランジャー型造波装置、写真-2 は容量式波高計である。

前述のように設置した模型に周期の異なる波を造波装置より入射させ、入射部の波高計（図-1 中、右の波

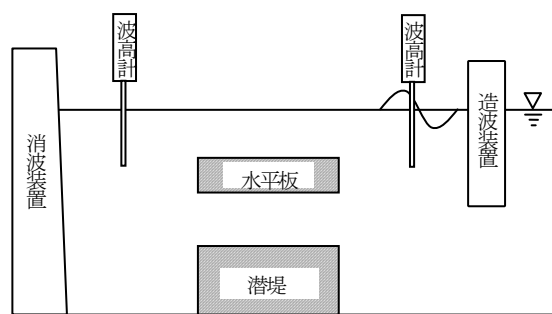


図-1 実験器具と模型の配置図

*Defensive effects of a breakwater combining submerged breakwater and horizontal plate

高計) と通過部の波高計 (図-1 中, 左の波高計) を用いて, 入射波と通過波の波高をそれぞれ測定した。波の周期は 0.7 秒から 0.1 秒ずつ増やしていき 1.6 秒まで変化させた。実際に入射する波の波長が 50~60m, 防波堤を水深 10m の箇所に設置することを想定すると, 波数 K ($=2\pi/L$, L : 波長) を水深 h で乗じ無次元化した Kh ($=2\pi h/L$) の値は 1.0 付近の値を示すため, Kh が 1.0 に近い値をとるように周期を設定した。そして, 入射波と通過波の波高の比 (式(1)) から波の通過率を求め, 防波効果の程度を調べた。

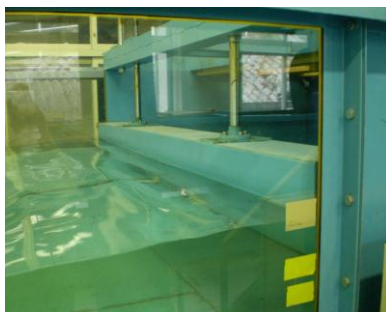


写真-1 造波装置



写真-2 波高計

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

ここで, K_t は波の通過率, H_t は通過波の波高, H_i は入射波の波高を表す。



写真-3 水平板と潜堤の模型 (造波装置側から撮影)

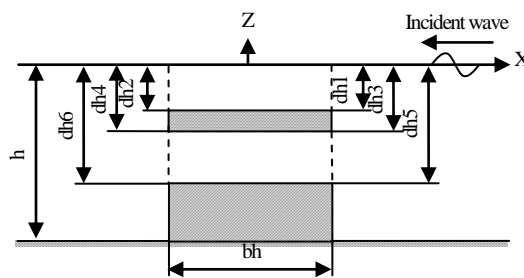


図-2 水平板と潜堤の断面図

3. 数値解析

数値解析では, 直交座標系の軸の設定として図-2, 3 のように波の進行方向とは逆向きに X 軸の正, 鉛直上向きに Z 軸の正をとり, 水平板と潜堤の幅を 1/2 に割る線と水面の交差する点を原点としている。そこに, 図-3 に破線で表したように仮想的に境界を設けることで4つの領域を作り解析した。

また, 基礎理論の考えを用いるために, 流体は非粘性, 非圧縮性の完全流体, 流れは2次元の渦なし流れとし, 水平板・潜堤上の仮想境界面でのみエネルギー損失が生じるものとする。

本研究の数値解析では有限要素法や差分法といった領域法に比べて計算量が少なく, 数値計算の精度が良い³⁾という利点を有する理由から境界要素法を用いて解析を行った。

3.1 速度ポテンシャル

グリーンの公式より境界上のポテンシャル関数は次式で表される。

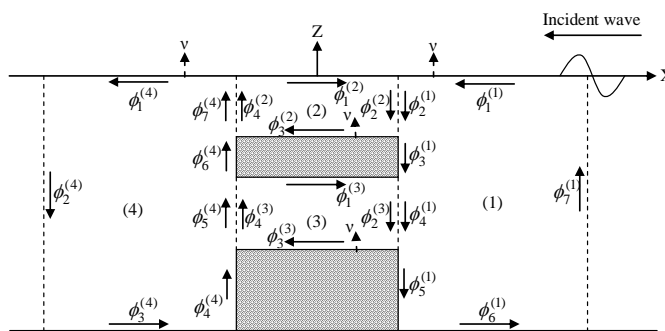


図-3 領域分割図

$$\phi = \frac{1}{\nu} \int_D \left(\frac{\partial \log r}{\partial \nu} \phi - \log r \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds \quad (2)$$

ここで、 D は閉領域を囲む積分境界、 r は求めるポテンシャル関数の位置する点と境界線上の点の間の距離、 ν は法線方向を表す。

(2)式を離散化すると(3)式が得られる。

$$\phi(i) = \sum_{j=1}^N \{ \bar{E}_{ij} \phi(j) - E_{ij} \bar{\phi}(j) \} \quad (3)$$

ここで、 N は境界分割数、 i は求めるポテンシャル関数の位置、 j は境界を分割したときの個々の位置、 $E = \frac{1}{\pi} \log r$ 、 \bar{E} と $\bar{\phi}$ はそれぞれ E 、 ϕ を法線微分したものである。

3.2 境界条件

(1) 水面

水面では微小振幅波の運動学および力学的条件より次式が成り立つ。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = \mp \frac{\sigma^2}{g} h \phi \quad (4)$$

ここで、 σ は波の周波数、 g は重力加速度である。

(2) 不透過面

不透過面では法線方向の流速が0であるため次式が成り立つ。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = 0 \quad (5)$$

(3) 入射部の仮想境界面

下式の第1項は入射の項、第2項は反射の項を表す。

$$\phi = e^{k_0 x} Z^{(0)}(z) + \sum_{n=0}^{\infty} C_n^{(1)} e^{-k_n x} Z^{(n)}(z) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = k_0 e^{k_0 x} Z^{(0)}(z) - \sum_{n=0}^{\infty} k_n C_n^{(1)} e^{-k_n x} Z^{(n)}(z) \quad (7)$$

ここで、 e は自然対数の底、 $C_n^{(1)}$ は入射部の仮想境界面上の点におけるポテンシャル関数、 x と z は直交座標における任意の点の座標、式中の $Z^{(n)}(z)$ 、 k_n はそれぞれ以下の式で表され、 i は純虚数 $i = \sqrt{-1}$ を表している。

(4) 通過部の仮想境界面

通過部の仮想境界面における速度ポテンシャルは式(8)で表される。

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} D_n^{(4)} e^{k_n x} Z^{(n)}(z) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = \sum_{n=0}^{\infty} k_n D_n^{(4)} e^{k_n x} Z^{(n)}(z) \quad (9)$$

ここで、 $D_n^{(4)}$ は通過部の仮想境界面上の点におけるポテンシャル関数である。

(5) 水平板・潜堤上の仮想境界面

この仮想境界面では連続の条件より流速は等しい。また、この仮想境界面では渦が発生し流速の2乗に比例する抵抗があると仮定する。

$$\frac{\partial \phi_A}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_B}{\partial \nu} = V \quad (10)$$

$$\phi_A - \phi_B = \beta |V| V \quad (11)$$

ここで、 ϕ_A と ϕ_B は水平板・潜堤上の仮想境界面を挟んで隣り合う速度ポテンシャルを表す。式中の β は以下の式で表され、 i は純虚数 $i = \sqrt{-1}$ 、 ζ_0 は波の振幅、 f は抵抗係数である。

$$\beta = i \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\sigma^2 h / g} \frac{\zeta_0}{h} f \quad (12)$$

3.3 各領域のポテンシャル関数

離散化した式(3)に境界条件を代入して、下記の連立方程式を得る。この連立方程式を解くことにより境界上のポテンシャル関数を算出し、式(13)より通過率 K_t を求める。

$$K_t = \left| D_0^{(4)} \right| \quad (13)$$

(1) 領域(1)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_{11}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} - E_{ij} \frac{\sigma^2}{g} h \right\} \phi_1^{(1)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{12}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_2^{(2)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{12}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) \beta \left| \bar{\phi}_2^{(2)}(j) \right| - E_{ij} \right\} \bar{\phi}_2^{(2)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{13}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_3^{(1)}(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{14}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_2^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{14}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) \beta \left| \bar{\phi}_2^{(3)}(j) \right| - E_{ij} \right\} \bar{\phi}_2^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{15}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_5^{(1)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{16}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_6^{(1)}(j) \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_{17}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) + k_n E_{ij} \right\} e^{-k_n x} Z^{(n)}(j) C_n^{(1)} = -e^{k_0 x} \sum_{j=1}^{N_{17}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) - k_0 E_{ij} \right\} Z^{(0)}(j) \end{aligned} \quad (14)$$

(2) 領域(2)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_{21}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} + E_{ij} \frac{\sigma^2}{g} h \right\} \phi_1^{(2)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{22}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_2^{(2)}(j) - \sum_{j=1}^{N_{22}} E_{ij} \bar{\phi}_2^{(2)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{23}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_3^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{24}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_4^{(2)}(j) - \sum_{j=1}^{N_{24}} E_{ij} \bar{\phi}_4^{(2)}(j) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

(3) 領域(3)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_{31}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_1^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{32}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_2^{(3)}(j) - \sum_{j=1}^{N_{32}} E_{ij} \bar{\phi}_2^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{33}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_3^{(3)}(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{34}} \left\{ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} \right\} \phi_4^{(3)}(j) - \sum_{j=1}^{N_{34}} E_{ij} \bar{\phi}_4^{(3)}(j) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

(4) 領域(4)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_{41}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} - E_{ij} \frac{\sigma^2}{g} h \right\} \phi_1^{(4)}(j) + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_{42}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) + k_n E_{ij} \right\} e^{k_n x} Z^{(n)}(j) D_n^{(4)} + \sum_{j=1}^{N_{43}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_3^{(4)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{44}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_4^{(4)}(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{45}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_4^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{45}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) \beta \left| \bar{\phi}_4^{(3)}(j) \right| - E_{ij} \right\} \bar{\phi}_4^{(3)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{46}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_6^{(4)}(j) + \sum_{j=1}^{N_{47}} \left\{ \bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right\} \phi_4^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{47}} \left\{ \left(\bar{E}_{ij} - \delta_{ij} \right) \beta \left| \bar{\phi}_4^{(2)}(j) \right| - E_{ij} \right\} \bar{\phi}_4^{(2)}(j) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、**図-4**に示すように N は各境界の分割数、 N の添え字は境界の位置を表す。例えば、 N_{11} は領域(1)内の水面における境界分割数を、 N_{16} は領域(1)内の水底における境界分割数を表す。

また、 δ_{ij} は

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 1 (i = j) \\ \delta_{ij} = 0 (i \neq j) \end{cases}$$

であり、 i は求めるポテンシャル関数の位置、 j は境界を分割したときの個々の位置を表す。

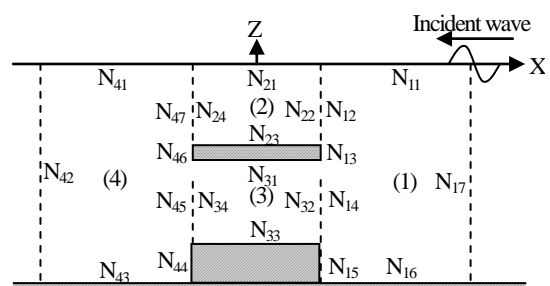


図-4 境界分割数

4. 結果

この章に示す図は、横軸に波数 $K (=2\pi/L, L: \text{波長})$ を水深 h で乗じ無次元化した $Kh (=2\pi h/L)$ を、縦軸に波の通過率(=通過波の波高/入射波の波高)をとったものである。横軸 Kh は波の周期や波長に關係するので波のパターンを表し、縦軸の通過率は防波堤の防波効果の程度を表す。波の通過率が大きいほど入射波に対して通過波の波高が大きいので防波堤の防波効果は低く、逆に波の通過率が小さいほど防波効果は高い。本研究では波の通過率を指標として防波堤の防波効果の大小

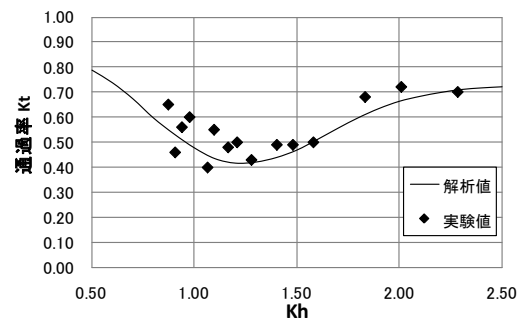


図-5 実験値と解析値の相関

を評価する。**図-5**には、模型実験において反射波に十分に留意し各周期の波に対して通過率を算定し得た結果を示している。模型の設置条件は水平板・潜堤幅 $bh/h=1.000$ 、水平板設置位置 $dh1/h=dh2/h=0.125$ 、水平板厚 $(dh3-dh1)/h=(dh2-dh4)/h=0.1875$ 、潜堤高さ $(h-dh5)/h=(h-dh6)/h=0.400$ である。**図-5**には実験値に加えて模型実験と同じ条件で水平板を設置した場合の解析結果も示している。この解析値算出にあたっては、実験値と比較することにより抵抗係数 f を0.7としている。**図-5**に示す実験値と解析値のグラフを比較すると、多少のばらつきが見られるが、相関係数は0.82であることから実験値と解析値の間には強い相関関係があり、解析値が有効であるといえる。**図-6**は水平板位置 $(dh1/h=dh2/h=0.125)$ 、水平板厚 $((dh3-dh1)/h=(dh2-dh4)/h=0.125)$ 、潜堤高さ $((h-dh5)/h=(h-dh6)/h=0.375)$ を一定とし、水平板・潜堤幅のみを変化させたときの通過率の変化を表した図である。グラフの傾向としては、幅を広げるほど極小部分の通過率と Kh はともに小さくなっている。ただし、潜堤があることで通過率の極小値は大きくなっている。**図-7**は水平板幅 $(bh/h=1.000)$ 、水平板厚 $((dh3-dh1)/h=(dh2-dh4)/h=0.125)$ 、潜堤高さ $((h-dh5)/h=(h-dh6)/h=0.375)$ を固定し、水平板位置のみを変化させたときの通過率の変化を表す。水平板幅を変化させたときと同様、極小値と極小値における Kh に差が見られるが、特に通過率が大きく変化している。**図-8**は水平板幅 $(bh/h=1.000)$ 、水平板位置 $(dh1/h=dh2/h=0.125)$ 、潜堤高さ $((h-dh5)/h=(h-dh6)/h=0.375)$ を固定し、水平板厚のみを変化させたときの図である。この図を見ると $Kh=0.9$ 付近を境にして通過率の傾向は異なる。 Kh が0.9より小さいとき水平板厚が大きいほど通過率は小さく、0.9より大きいときには水平板厚が大きいほど通過率は大きくなっている。よって、防波堤を考えた時、 Kh が0.9より小さいときには水平板厚を大きくした方が良く、0.9より大きいときには水平板厚を小さくした

方が良いということを示している。図-9は水平板幅 ($bh/h=1.000$), 水平板位置 ($dh1/h=dh2/h=0.125$), 水平板厚 ($(dh3-dh1)/h=(dh2-dh4)/h=0.125$) を固定し, 潜堤高さのみを変化させたときの図を示している。傾向は水平板厚を変化させたときと似ており, グラフが重なる Kh の値は同じ 0.9 である。しかし, 異なる点が数多く存在する。まず, 水平板厚を変化させた場合は Kh が 0.9 より小さいとき水平板厚が大きいほど通過率は小さく, 0.9 より大きいときには水平板厚が大きいほど通過率は大きくなっているのに対し, 潜堤高さを変化させた場合は Kh が 0.9 より小さいとき潜堤高さが大きいほど通過率は大きく, 0.9 より大きいときには水平板厚が大きいほど通過率は小さくなっており逆の傾向を示している。また, 厚さの変化は 0.125 と同じ値であるがそれに対する通過率の変化量は比較的小さく, このことから潜堤の防波効果に対する寄与が小さいことが分かる。加えて, 極小値に対する Kh の値に変化が見られないということも水平板厚を変化させた場合と異なり特徴的である。潜堤を高くする利点としては, 潜堤を高くするほど曲線が緩やかであるから広範囲の Kh に対して通過率が小さくなるということである。

以上より, 水平板は潜堤と比べて大きな防波効果を発揮すること, 潜堤高さや水平板厚が大きいほど防波効果が高いとは一概には言えず防波効果が小さくなることもあることが結論として得られた。

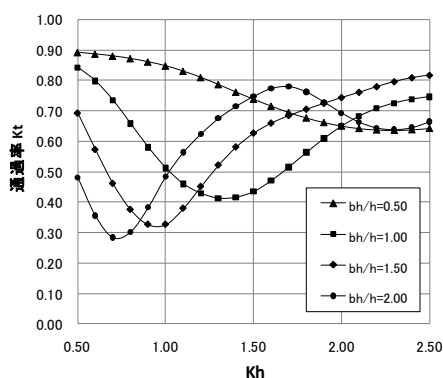


図-6 水平板・潜堤幅による通過率の変化

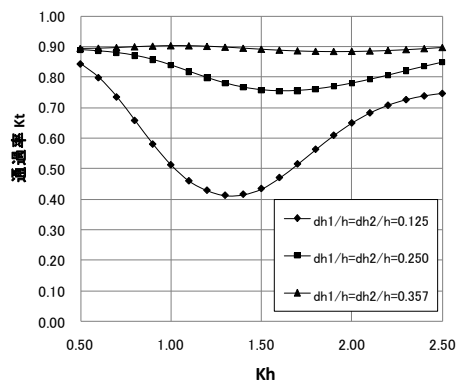


図-7 水平板の没水深による通過率の変化

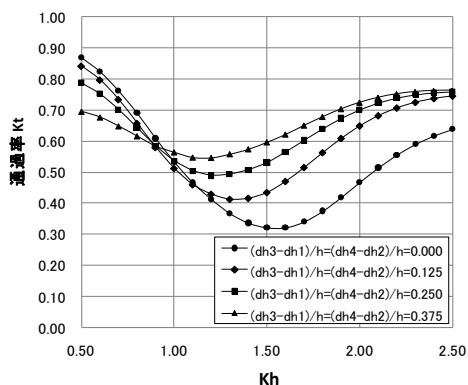


図-8 水平板厚による通過率の変化

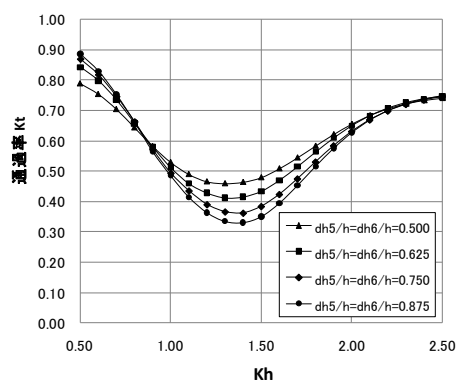


図-9 潜堤高さによる通過率の変化

参考文献

- 1) 服部昌太郎：土木系 大学講義シリーズ 13 海岸工学, コロナ社, pp.1~2, 1987.
- 2) 村上啓介：グリーン公式を用いたストークス波と海岸構造物の非線形干渉解析法に関する研究, 1995.
- 3) C・A・ブレビア：境界要素法入門, 培風館, 1980.