

低天端堤の波高伝達率の新しい推定法 について

Derivation of New Formulas for Wave Transmission Coefficient of
Low-Crested Structures

合田良実¹・吉田秀樹²・蜂須賀和吉³・黒木敬司⁴

Yoshimi GODA, Hideki YOSHIDA, Kazuyoshi HACHISUKA, and Keiji KUROIKI

¹土木学会名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

²土木学会会員 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所
(〒951-8012 新潟市中央区入舟町4-3778)

³国土交通省北陸地方整備局港湾空港部 (〒951-8012 新潟市中央区美咲町1-1-1)

⁴土木学会会員 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

A set of new formulas for prediction of wave transmission coefficient of low-crested structures (LCSs) have been derived by combining Numata's formula (1975) for waves passing through LCSs and Tanaka's diagram (1976) for waves passing over LCSs. The new formulas are applied to various laboratory datasets including 851 data, and the predicted values of transmission coefficient are 1.9% larger than the measured ones on the average with the standard deviation of 8.8%. The formulas are also applied to the field data of the submerged breakwater of Niigata West Coast. The predicted values of the transmission coefficient agree well with the observed values, and the decrease of wave transmission by widening of the crest is appropriately reproduced by the new formulas. The question of model scale effects on wave transmission coefficient is also discussed.

Key Words: *Low-crested structures, submerged breakwater, wave transmission coefficient, crest height, nominal diameter, Itoigawa Coast, Niigata West Coast, Yugawara Coast*

1. まえがき

海浜の侵食対策にはいろいろな工法が用いられる。わが国では離岸堤が1960年代から積極的に採択されてきた。豊島(1972)は1969年頃までの離岸堤の施工事例を取りまとめて紹介している。離岸堤は各地で侵食防止に効果を挙げてきたとはいえ、砂浜から見れば多数の離岸堤が沖の海面を遮る形となり、景観が悪いという難点がある。このため、離岸堤の天端を水面下に引き下げ、その代わりに天端幅を大きく広げた人工リーフ¹が1980年代後半から用いられ

るようになっている。

一方EU諸国では、世界的な海岸侵食への対処として離岸堤や人工リーフを養浜と組み合わせた工法を各地で採用しており、離岸堤と人工リーフをまとめて低天端堤(Low-crested structures: LCS)と呼び、その水理機能についての研究を数多く発表している。たとえば、Lambertiほか(2005)は施工事例を取りまとめて紹介しており、本技術論文でも低天端堤の用語を用いることにする。また、次節に紹介するように波高伝達率の推定式は数多く提案されているものの、どの推定式も一長一短があり、推奨に値するものは見いだしがたい。

¹ この語を翻訳したArtificial Reefは英語としては人工漁

礁を意味することが多いので、注意する必要がある。

わが国では実験に基づいて作成された、田中 (1976) や宇多ほか (1988) の波高伝達率の図表が参照されることが多く、推定式としてのとりまとめは活発ではない。

こうした状況において、近年の欧米の実験研究はデータベースとして利用できるものが多い。そこで、沼田 (1975) の潜堤内部透過波の研究と田中 (1976) の波高伝達率の設計図表をベースとして波高伝達率の新しい推定式を導き、欧米のデータベースを用いて新提案式の適合度を検証することとした。さらに、新潟西海岸に建設されている大規模潜堤で歴年実施されている波浪観測データを用い、新提案式の適用性を検討した。本技術論文は新提案式の誘導経過とその適用性について取りまとめたものである。

2. 既往の波高伝達率推定式について

低天端堤の波高伝達率に関しては、多くの推定式が提案されており、そのうちの幾つかを発表年代別に紹介する。なお、波高伝達率は $K_T = H_T/H_I$ で定義する。ここに、 H_T は伝達波の有義波高、 H_I は入射有義波高である。

(1) 岩崎・沼田 (1969) のブロック積み離岸堤の波高伝達率

この研究は異形ブロック積み離岸堤を対象にしたもので、波高伝達率を次のように表した。なお、この定式化に当たっては、Goda・Ippen (1963) の金網フィルターの透過率の理論を援用し、諸定数の値を実験データに基づいて定めている。

$$(K_T)_{\text{thru}} = [1 + \kappa (H_I/L)^{0.5}]^{-2} \quad (1)$$

ここに、 H_I は入射波高、 L は設置水深における波長であり、定数 κ は相対天端高 $h_c/H_I > 1.0$ を条件として 3.0 ~ 4.0 の値とされた。

(2) 沼田 (1975) のブロック積み離岸堤の波高伝達率

沼田はその後の研究に基づき、天端が高くて越波が生じないケースについては式 (1) の定数 κ を次のように定式化したものである。

$$(K_T)_{\text{thru}} = [1 + \kappa_N (H_I/L)^{0.5}]^{-2} : \kappa_N = 1.135 (B_{\text{SWL}}/D)^{0.65} \quad (2)$$

ここに、 B_{SWL} は静水面における離岸堤の天端幅、 D はブロックの高さである。係数 κ_N は $3 < B/D < 10$ の範囲で当てはめられたものである。なお沼田は、天端が低くて越波が生じる異形ブロック積み離岸堤に

ついて、波の峰高や波頂における水平粒子速度をパラメータとした波高伝達率の推定式を提示している。ただし、不規則波に対しては適用が難しいため、ここでは引用しない。

(3) 田中 (1976) の広天端捨石堤の波高伝達率図表

田中は、規則波による実験結果を図 - 1 のように取りまとめている。波高伝達率は換算沖波波高 H_0' に対する伝達波高の比として算定され、相対天端高も h_c/H_0' としてまとめられている。

ただし、実験は一樣水深の条件で行われ、前面での碎波も起きていなかったため、換算沖波波高 H_0' と離岸堤位置での通過波高 H_I との差は小さかったと思われる。また、後述するように波高伝達率は実験ごとのばらつきが大きいため、 H_0' を H_I で置き換えても誤差は小さいと考えられる。したがって、この技術論文では田中の図表が通過波高 H_I に対してまとめられたと見なして解析を進める。

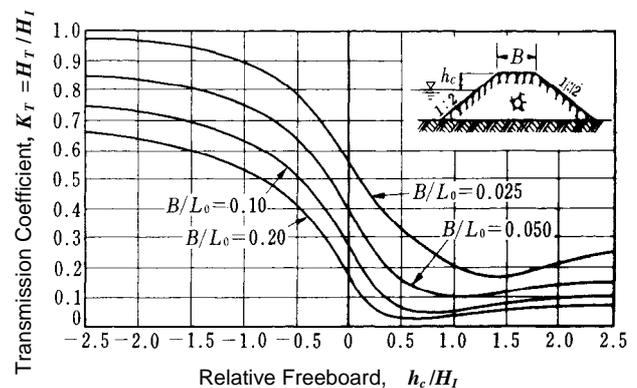


図 - 1 田中 (1976) による捨石堤の波高伝達率算定図

なお (株) エコーではこの図表のうちの $h_c < 0$ の部分に対して次のような経験式を当てはめている。

$$K_T = 0.35 (-h_c/H_I)^b (B/L_0)^{-0.25} : b = 0.54 (B/L_0)^{0.3} \quad (3)$$

ここに、 B は天端幅、 L_0 は有義波周期に対する深海波長である。ただし式 (3) の適用範囲は次の通りである。

$$-h_c/H_I = \max \{0.1, \min [2.0, -h_c/H_I]\} \quad (4)$$

(4) Ahrens (1987) のリーフ型低天端捨石堤の波高伝達率

リーフ型捨石堤とは、単一サイズの捨石で全堤体を構成したものを指す。これに対して、コア部に小粒径の捨石を用い、表層を大粒径の捨石あるいはブロックで覆ったものが通常型傾斜堤である。

提案式は不規則波実験に基づくものであり、入射

有義波高はスペクトル有義波高 H_{m0} を用い、天端高が $h_c > H_{m0}$ であって波高伝達がほぼ内部透過波だけの場合と、 $h_c > H_{m0}$ であって越波を伴う場合（潜堤を含む）とに分けて算定式を示している。

$$h_c > H_{m0} : \quad (K_T)_{thru} = 1 / \{1 + [(H_{m0}/L_p)(A_t/D_{50}^2)]^{0.592}\} \quad (5)$$

$$h_c < H_{m0} : \quad (K_T)_{over} = 1 / \left\{ \begin{aligned} &1 + \left(\frac{h_t}{h}\right)^{1.188} \left(\frac{A_t}{hL_p}\right)^{0.261} \\ &\times \exp \left[0.529 \left(\frac{h_c}{H_{m0}}\right) + 0.00551 \left(\frac{A_t^{3/2}}{D_{50}^2 L_p}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 A_t は堤体の断面積、 D_{50} は捨石の中央粒径、 h は水深、 h_t は堤高、 L_p はスペクトルピーク周期に対する波長である。

(5) 高山ほか (1985) の広天端幅潜堤の波高伝達率

消波ブロック積み離岸潜堤を対象とした不規則波実験による経験式で、次のように表される。

$$K_T = -0.92 \frac{B}{L_0} - 0.42 \frac{h_c}{H_0'} + 3.8 \frac{H_0'}{L_0} + 0.51 \quad (7)$$

ここに、なお、波高伝達率は離岸堤位置における通過有義波高を基準として定義される。また、 H_0' は換算沖波波高である。式 (7) は、相対天端高や相対天端幅などによって適用範囲が制限されるはずであるが、論文では特に言及されていない。

(6) Van der Meer・Daemen (1994) による低天端捨石堤の波高伝達率

捨石堤を通常型捨石堤とリーフ型捨石堤に分類して異なる経験式を提示している。

通常型捨石堤：

$$K_T = \min \left\{ \begin{aligned} &0.75, \\ &\max \left\{ \begin{aligned} &0.075, \\ &\left[\left(0.031 \frac{H_l}{D_{50}} - 0.24 \right) \frac{h_c}{D_{50}} \right. \\ &\left. - 5.42 \frac{H_s}{L_{p0}} + 0.0323 \frac{H_l}{D_{50}} \right. \\ &\left. - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{50}} \right)^{1.84} + 0.51 \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

リーフ型捨石堤：

$$K_T = \min \left\{ \begin{aligned} &0.80, \\ &\max \left\{ \begin{aligned} &0.15, \\ &\left[\left(0.031 \frac{H_l}{D_{50}} - 0.24 \right) \frac{h_c}{D_{50}} \right. \\ &\left. - 2.6 \frac{H_s}{L_{p0}} + 0.05 \frac{H_l}{D_{50}} + 0.85 \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 L_{p0} はスペクトルピーク周期に対する深海波長であり、 D_{50} は通常型の中詰部分あるいはリーフ型捨石堤全体の捨石の中央粒径である。なお、波高伝達率は入射波のスペクトル有義波高を基準にしており、上式中の波形勾配の項の H_s はゼロクロス有義波高である。

(7) d'Angremondほか (1996) による通常型低天端捨石堤および不透過堤の波高伝達率

これも不規則波実験のデータを取りまとめた経験式であり、次のように表される。

$$K_T = \min \left\{ \begin{aligned} &0.80, \\ &\max \left\{ \begin{aligned} &0.075, \\ &\left[-0.4 \frac{h_c}{H_l} + C \left(\frac{B}{H_l} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに C は定数であって透過構造で 0.64、不透過構造で 0.80 の値が示されている。また、 ξ は次式で定義されるイリバレン数である。

$$\xi = \tan \alpha_s / \sqrt{H_l/L} \quad (11)$$

ここに、 α_s は法面の傾斜角である。なお、式 (10) は \min, \max の制限で明らかのように、 $0.075 \leq K_T \leq 0.80$ がその適用範囲である。

(8) Seabrook・Hall (1998) による潜堤の波高伝達率

一連の不規則波実験のデータに対して当てはめた経験式であり、次のように表される。

$$K_T = 1 - \left[\begin{aligned} &\exp \left(0.65 \frac{h_c}{H_l} - 1.09 \frac{H_l}{B} \right) \\ &- 0.047 \frac{B}{L} \frac{h_c}{D_{50}} + 0.067 \frac{h_c}{B} \frac{H_l}{D_{50}} \end{aligned} \right] \quad (12)$$

なお D_{50} は被覆材の中央粒径を用いる。また、原式では天端の没水深を正の値として用いているので、ここでは h_c を含む項の符号を逆転して表示した。天端幅 B については適用範囲の制限がある。

(9) Calabreseほか (2002) による通常型捨石堤の

波高伝達率

ハノーバーの大型造波水路で行った $H_{m0}=0.6 \sim 1.1$ m という碎波を含む大型実験のデータに対して導いた経験式である。

$$K_T = a \frac{h_c}{B} + b$$

$$b = [1 - 0.562 \exp(-0.0507\xi)] \exp\left(-0.0845 \frac{B}{H_I}\right) \quad (13)$$

$$a = \left(0.6957 \frac{H_I}{h} - 0.7021\right) \exp\left(0.2568 \frac{B}{H_I}\right)$$

ここに、 ξ は式 (11) で定義されたイリバレン数であり、入射波高 H_I はスペクトル有義波高で定義されている。なお、この経験式では粒径の効果を導入していない。

(10) Wamsley・Ahrens (2003) によるリーフ型捨石堤の波高伝達率

これは (4) 項の Ahrens の提案式を改良したもので、相対天端高 h_c/H_{m0} によって次のように使い分ける。

$h_c > 2H_{m0}$ (内部透過波のみ) :

$$(K_T)_{thru} = 1/\left\{1 + \left(\frac{H_s}{D_{50}}\right)^{0.982} \exp\left[0.433 + 2.35\left(\frac{A_t}{L_0 h_t}\right)\right]\right\} \quad (14)$$

$0 < h_c < 2H_s$ (天端が水面より上) :

$$(K_T)_{over} = 1/\left\{1 + \exp\left[\frac{0.465 + 12.7 \frac{h_c}{H_I} \sqrt{\frac{H_I}{L_0}}}{- \frac{17.4}{A_t/h_t d_{50}} + \frac{0.00118}{H_I/L_0}}\right]\right\} \quad (15)$$

$h_c < 0$ (天端が水面より下) :

$$(K_T)_{over} = 1/\left\{1 + \exp\left[-0.646 + 0.631 \frac{h_c}{H_I} + 0.00137 \frac{A_t}{d_{50}^2}\right]\right\} \quad (16)$$

なお、入射波高 H_I はスペクトル有義波高 (H_{m0})_I である。

(11) Briganti ほか (2003) による通常型低天端捨石堤の波高伝達率

EUのDELOSプロジェクトによる低天端堤にかかわるデータベースを整理して、これまでよりも適合度の良い波高伝達率の推定式を工夫したものである。相対天端幅 $B/H_I = 10$ を境界として二つの推定式を与えている。なおこの成果は、Van der Meer ほか (2005) にもそのまま記載されている。

$B/H_I < 10$:

$$K_T = \min \left\{ \left[-0.06 \frac{B}{H_I} + 0.93 \right], \max \left[0.05, \left(-0.4 \frac{h_c}{H_I} + 0.64 \left(\frac{B}{H_I} \right)^{-0.31} \right) \times [1 - e^{-0.5\xi}] \right] \right\} \quad (17)$$

$B/H_I > 10$:

$$K_T = \min \left\{ \left[-0.06 \frac{B}{H_I} + 0.93 \right], \max \left[0.05, \left(-0.35 \frac{h_c}{H_I} + 0.51 \left(\frac{B}{H_I} \right)^{-0.65} \right) \times [1 - e^{-0.5\xi}] \right] \right\} \quad (18)$$

この提案式は、基本的には d'Angremond ほか (1996) による式 (10) であり、波高伝達率の上下限を広げ、 $B/H_I > 10$ に対する係数値を修正したものである。

(12) Buccino・Calabrese (2007) による低天端堤の波高伝達率

これまでの推定式がすべて実験データに当てはめた経験式であったのに比べ、エネルギーの減衰機構などを物理的に考察し、波高伝達率のデータベースをの半分を使って各種の係数を設定し、残りの半分で推定式の適用度を検定したものである。推定式は潜堤タイプと離水タイプに分けて構築している。

没水型捨石堤 : $-2H_{m0,I} < h_c < 0$

$$K_T = \begin{cases} K_1(h_c/H_I) & : 2 \geq \frac{|h_c|}{H_I} \geq 1/1.2 \\ K_2(h_c/H_I) & : \frac{|h_c|}{H_I} = 0 \\ K_2(h_c/H_I = 0) \\ + \frac{K_1(h_c/H_I = 1/1.2) - K_2(h_c/H_I = 0)}{1/1.2} \\ \times \left(\frac{h_c}{H_I} \right) & : 0 < \frac{|h_c|}{H_I} < 1/1.2 \end{cases} \quad (19)$$

ここに、

$$K_1(h_c/H_I) = 1/\left\{1.18 \left(\frac{H_I}{|h_c|} \right)^{0.12} + 0.33 \left(\frac{H_I}{|h_c|} \right)^{1.5} \frac{B}{\sqrt{H_I L_{p0}}} \right\} \quad (20)$$

$$K_2(h_c/H_I=0) = \left[\begin{array}{l} \min(0.74, 0.62\xi_{p0}^{0.17}) \\ -0.25 \min\left(2.2, \frac{B}{\sqrt{H_I L_{p0}}}\right) \end{array} \right]^2 \quad (21)$$

$$\xi_{p0} = \tan \alpha_s / \sqrt{H_I / L_{p0}}$$

離水型捨石堤： $h_c > 0$

$$K_T = \sqrt{K_2^2(h_c/H_I=0) \exp\left(-b \frac{h_c}{\gamma_f H_I}\right) + \left(\frac{1}{1+\nu} \frac{\min(h_c, R_{us})}{H_I}\right)^2} \quad (22)$$

ここに、 b は平均越波量の減衰定数、 γ_f は越波量にかかわる粗度パラメータ、 ν は式(23)による内部透過の伝達係数、 R_{us} は有義波の打ち上げ高である。

$$\nu = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{16\beta H_I B_{eff}}{3\pi 2 h} - 1} \right] : \beta = 3.6 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{D_{50}} \quad (23)$$

なお、 n は堤体の空隙率である。

3. 新しい波高伝達率の提案

(1) 低天端堤による波浪減衰の機構と波高伝達率の基本特性

低天端堤が来襲波浪を減衰させるのは、主に次の五つのメカニズムによる。

- 1) 沖側への波の反射による波浪伝播の阻止
- 2) 波浪による堤体内部の水粒子運動に伴う乱流抵抗のエネルギー損失（内部損失）
- 3) 表法面を波が遡上し、越波する際の乱れ、砕波減衰
- 4) 凹凸のある法面・天端面の粗度抵抗による摩擦減衰
- 5) 天端水深が小さいために生じる不規則砕波に伴う減衰

最初の波の反射は防波構造物の基本であるけれども、低天端堤は一般に反射率が低いため、エネルギー的には二次的である。第2の内部損失は、主として天端が十分に高く越波が生じない場合の内部透過波に伴うものである。しかし、没水構造物であっても無視できない大きさである。第3は、天端が水面よりやや上であって、構造物背後へ波が打ち込んで造波する場合が対象である。第4は、天端面の高さにかかわらず、常に作用しているけれども、他のメカニズムに比べると影響力が小さい。第5は天端が水面下のときの主要減衰機構である。

低天端堤の波高伝達率を検討する際には、こうした諸機構を理論的に解明することが望まれるけれども、現象が複雑に絡み合っているために、明快な取り扱いが難しい。それでも、波が堤体の内部を通過する際の減衰（主として第2項）と、波が堤体の上を通過する際の減衰（第3～5項）に分けて考えることはできる。

前章に紹介した波高伝達率の推定式の多くは、天端が十分に高く内部透過波のみの場合、天端が水面以上で越波を伴う場合、天端が水面以下で砕波減衰が主体となる場合に分け、それぞれのケースについて実験データの経験的取りまとめによって個別に導かれたものである。

上述の五つのメカニズムのうち、不規則砕波減衰によるものについては、合田(2003)が不透過の台形構造物を対象として段階的砕波変形モデルを用いた数値計算を行い、波高伝達率の算定図表を作成したことがある。ただし、潜堤であっても内部透過の影響が無視できないため、この図表だけでは低天端堤への適用が難しい。

ここで、低天端堤の波高伝達率の推定式に要求される条件を考えると、まず波高伝達率の物理的定義から明らかなように、その値が0以上であって、1以下の値でなければならない。関数形として $K_T = a \times (h_c/H_I) + b$ のようなものは、 $0 \leq K_T \leq 1$ の条件を満たすことができないため、 $\min\{a, b\}$ や $\max\{a, b\}$ の関数を使って強制的に上・下限を設けることになる。その点では、 $K_T = 1/[1+f(x)]^\beta$ のような関数形であれば、 $0 \leq K_T \leq 1$ の条件を満足する。

低天端堤の波高伝達率の支配パラメータは、相対天端高 h_c/H_I である。次に影響を与えるのは、天端幅 B 、波長 L または L_0 、堤体構成材の代表径 D_n 、法面勾配 α_s 、相対堤高 h_t/h 、堤体の空隙率 n その他である。これらのどれを取り上げ、どのように無次元パラメータとするかによって、推定式の使いやすさや適合性がきまることになる。

(2) 新算定式の必要性

前節に紹介したように、低天端堤の波高伝達率については数多くの提案がなされているものの、その多くは使用したデータベースに適合するように試行錯誤で設定したものである。そのため、適用範囲を限定したものが多く、そうした経験式の中では、Brigantiほか(2003)とVan der Meerほか(2005)にほる算定式がやや適用範囲が広い。この算定式はそれまでの諸式の実験データへの適合度を検討した上で、それらの改良をはかったものであり、各種の実験データとの適合度が向上している。それでも、波高伝達率の推定値と実験値が絶対値で0.2以上異なる

場合がある。

一方、Bucchino・Calabrese (2007) の提案式は、エネルギー減衰の機構などを概念的に考察して係数値を設定したものであり、推定値と実験値の差は一部を除いて伝達率の絶対値でほぼ0.1以下と適合度が良好である。しかし、式(19)～(23)の諸式を組み合わせ使用しなければならず、使い勝手が悪い。また、平均越波流量の減衰定数 b 、粗度パラメータ γ_f 、有義波の打ち上げ高 R_{us} など、別系統の実験公式を参照する必要があり、そうした値の設定の仕方によって波高伝達率の適合度も影響される。

Brigantiほか(2003)の算定式にしても、相対天端幅によって二つの推定式を使い分ける必要があり、また $0 \leq K_T \leq 1$ の条件を満足しないために波高伝達率に上限と下限を設けるなど、一般性に欠けるところがある。

こうしたところから、適用範囲を限定せずに汎用的に使用できる波高伝達率の推定式が要望されるのである。

(3) 金網フィルターの波高減衰率について

ここで、内部透過波の波高伝達率の実験における模型と現地の相似性に関連する参考資料として、岩崎・沼田(1969)が利用したGoda・Ippen(1963)の金網フィルターの理論を紹介しておく。なお金網フィルターとは、線径 D の金属線を中心間隔 S で格子状に配列した金網を鉛直に立て、これを波の進行方向に数十枚並べたもので、水粒子に対する格子網の抗力抵抗で波エネルギーを減衰させる。すなわち、抗力と水粒子速度の積が波に対する仕事率であり、波が金網1枚を通過するごとに波のエネルギーが消耗される。金網による波の変形が小さいと仮定することによって、抗力による仕事率が求められ、それによって m 枚の金網による波高減衰率が計算できる。

この理論の要点は金網線の抗力係数の見積もりである。円柱としての抗力係数がレイノルズ数に関わりなく一定値をとる場合(たとえば線径が数十cm級の現地サイズ)には、波高減衰率が次のように与えられる。

$$K_T = 1 / \left[1 + m C_D \frac{D}{S} \frac{H_L}{L} F(kh) \right] \quad (24)$$

ここに、 m はフィルター枚数、 C_D は円柱の抗力係数、 $F(kh)$ は水粒子速度に対する相対水深の効果現す関数である。

これに対して、造波水路で使用するような金網の線径がmm級の場合には、レイノルズ数によって抗力係数が変化する。レイノルズ数が 10^3 以下ではたとえば次のようなべき関数となる。

$$C_D = C'_D R_e^\beta \quad ; \quad R_e = V_n D / \nu \quad (25)$$

ここに、 R_e はレイノルズ数であり、 V_n は金網に作用する水粒子速度、 ν は水の渦動粘性係数である。べき指数 β はレイノルズ数によって $\beta = -2/3 \sim 0$ の範囲で変化する。

抗力係数が式(25)で表されるときには、金網フィルターの波高減衰率が次のように与えられる。

$$K_T = 1 / \left[1 + \frac{(1+\beta)}{2^\beta} m C_D \left(\frac{\sigma L}{V_n} \right)^\beta \frac{D}{S} \left(\frac{H_L}{L} \right)^{1+\beta} G(kh, \beta) \right]^{1/(1+\beta)} \quad (26)$$

ここに、 σ は各周波数($=2\pi/T$)、 L は波長である。抗力係数が一定、すなわち $\beta = 0$ の場合には、式(26)は式(24)に帰着する。

Goda・Ippen(1963)の研究では、小型水路用の金網フィルターの実験結果から $\beta = -0.5$ の値が最もデータに適合することを示している。また、模型を現地サイズに引き延ばしただけでは縮尺効果によって波高減衰の効果を過大に評価することを例示している。

(4) 堤体の内部を透過する波の波高伝達率

先に(1)項で述べたように、低天端堤の波浪減衰は、堤体内部を透過する波の減衰と、堤体の上を通過する波の減衰とが加算されたものである。この技術論文では、まずこの両者についての波高伝達率を推定し、その二つをエネルギー的に合成するアプローチを取る。

まず、内部透過に関するこれまでの諸提案式の中では、岩崎・沼田(1969)が離岸堤内部を透過する波の減衰をGoda・Ippen(1963)のフィルター理論を参照して取り扱っており、さらに沼田(1975)が式中の定数を各種の実験データや現地観測資料に基づいて設定している。したがって、内部透過波については式(2)によることにする。この推定式を以下に再掲する。

$$(K_T)_{\text{thru}} = [1 + \kappa_N (H_L/L)^{0.5}]^2 \quad (27)$$

ここに、

$$\kappa_N = 1.135 (B_{\text{eff}}/D_{\text{eff}})^{0.65} \quad (28)$$

ただし、幅 B は式(2)のような静水面における堤体幅ではなくて、潜堤に対しても適用できるように、以下に定義するような有効幅 B_{eff} を用いる。

$$B_{\text{eff}} = \begin{cases} B_{\text{SWL}} & : h_c > 0 \\ (9B_{\text{crest}} + B_{\text{bottom}})/10 & : h_c = 0 \\ (4B_{\text{crest}} + B_{\text{bottom}})/5 & : h_c < 0 \end{cases} \quad (29)$$

ここに、 B_{crest} は天端幅、 B_{bottom} は海底面における堤体幅である。式(25)では、天端が静水面よりもわずかに上、あるいは下にあるかによって有効天端幅

B_{eff} が不連続に変化する形になっている。ただし、波高伝達率に対する天端幅の影響は天端高ほど大きくはないので、こうした不連続は許容範囲と思われる。

また、 D_{eff} は低天端堤の構成材の有効径で、捨石であれば中央粒径 D_{50} 、コンクリートブロックであればその高さである。テトラポッドについては、質量を M 、密度を ρ として算出した代表径 $D_n = (M/\rho)^{1/3}$ を D_{eff} として用いる。テトラポッドの高さはほぼ $1.64D_n$ であるので、沼田 (1975) による式 (2) の定義とは若干の差異がある。

式 (27) のように天端幅のみならず底幅も考慮したのは、堤体の断面積をある程度考慮し、また実験データとの整合性を取るためである。この有効天端幅は、次項の天端を越えて通過する波の波高伝達率の算定にも使用する。

(5) 天端の上を通過する波の波高伝達率

一方、低天端堤の上を越えて通過する波については、図 - 1 の田中の図表が実務で広く使われており、応用性が高いと考えられる。この図表の曲線群を数式の形で表した式 (3) も便利であるものの、適用範囲が式 (4) で限定されており、汎用性に欠ける難点がある。

そこで、式 (3) に代わるものとして次式を案出した。相対天端高を変数とする指数関数を適用するのは、 h_c/H_l が負の大きな値になったときに、波高伝達率が 1 の上限値に収束する特性があり、 $0 \leq K_T \leq 1$ の条件を部分的に満たすためである。

$$(K_T)_{over} = \max\{0, (1 - \exp[\alpha(h_c/H_l - F_0)])\} \quad (30)$$

ここに、 α は上部通過波に関する減衰定数、 F_0 は無次元見かけ遡上高であり、これらを次のように定式化する。

$$\alpha = 0.248 \exp[-0.384 \ln(B_{eff}/L_0)] \quad (31)$$

$$F_0 = \max\{0.5, \min(1.0, H_l/D_{eff})\} \quad (32)$$

式 (32) の無次元見かけ遡上高は、波高伝達率にかかわる斜面の遡上高を概念的に表示したもので、これでもって斜面への波の遡上高を算定するものではない。Bucchino・Calabrese (2007) は有義波の遡上高を波高伝達率の推定式に取り込んでいるけれども、波高伝達率に関する諸要素の影響や実験結果のばらつきを見ると、あまり精緻に定式化することのメリットは小さいと判断した。

この式 (32) の関係を図示すと図 - 2 のようになる。不透過滑面であれば $D_{eff} = 0$ と見なされるので、 $F_0 = 1.0$ の扱いとなる。

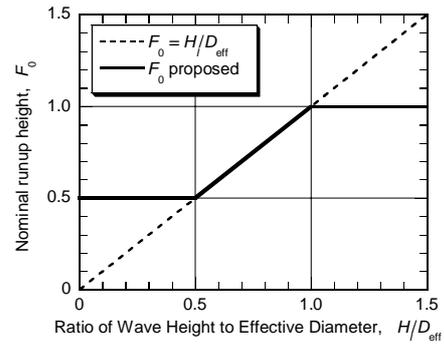


図 - 2 無次元遡上高 F_0 と波高粒径比 H_l/D_{eff} の関係

式 (30) の波高伝達率を $F_0 = 1.0$ のケースについて示したのが図 - 3 である。式の形から分かるように、相対天端高 h_c/H_l が F_0 を超えると指数関数の値が 1 よりも大きくなり、そのままでは波高伝達率が負値となるので、それを避けるために $\max\{0, (1 - \exp[\dots])\}$ の制限を設けている。

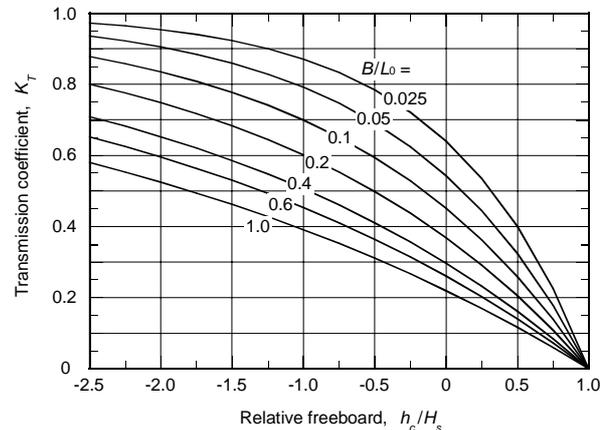


図 - 3 波高伝達率の田中 (1976) の算定図表の数式表示 ($F_0 = 1.0$ の場合)

減衰定数の α は、当初は図 - 1 の曲線をできるだけ忠実に再現するように設定した。しかしそうした定数を用いると、不規則波のデータセットに適用したときにずれが生じたため、試行錯誤によって調整した結果を用いた。図 - 3 の波高伝達率は、図 - 1 よりも若干大きめであるが、このほうが実験データとの適合度が良い。図 - 1 が規則波に対して得られたことが影響しているかもしれない。

(6) 低天端堤の波高伝達率

内部を透過する波と天端を越える波とは、エネルギー的に合成する。したがって、総合的な波高伝達率は次式で算定する。

$$(K_T)_{all} = \min\left\{1.0, \sqrt{(K_T)_{over}^2 + C_h^2 (K_T)_{thru}^2}\right\} \quad (33)$$

ここに、 C_h は内部透過波が作用する堤体の相対高さ

表す係数であり，次式のように定義する。

$$C_h = \min \{1.0, h_t / (h + H_t)\} \quad (34)$$

すなわち，天端が水面上 H_t 以上であれば $C_h = 1.0$ とし，それよりも低ければ堤高に比例して低減させる。

式 (33) で $\min \{1.0, X\}$ の形で上限値 1.0 を設けたのは，天端が僅かに水没した透過性潜堤に波高の小さい波が入射したときなど， h_c/H_t の絶対値が大きいために $(K_T)_{\text{over}}$ が大きな値をとり，一方で $(K_T)_{\text{thru}}$ の値も無視できない大きさであるために，両者の 2 乗和の平方根が 1 を超える事態が生じるためである。

4. 不規則波実験データによる新推定式の検証

(1) 比較検討に用いた実験データの概要

新推定式の適合度は，各種の不規則波実験データ

によって検証される。今回の検討で用いたデータセットの概要を表 - 1 に示す。全体で 14 種類のデータセットで，総データ数は 851 ケースである。データのうち，Ahrens のものは本人から提供を受け，木村ほか (2002) のデータは室蘭工業大学 木村克俊教授から頂戴した。その他のデータは De Jong (1996) の論文に記載された数表から転記したが，デルフト水理研究所以外のデータセットは Mr. John P. Ahrens から提供されたファイルにも記載されていたので，両者を照合の上で使用した。

低天端堤の伝達波に関しては，近年の EU の DELOS プロジェクトの中でいろいろ実験が行われているようであり，たとえば Buccino・Calabrese (2007) の論文ではそうしたデータセットを用いて，式 (19) ~ (23) の推定式への適合度を検討している。しかしながら，今回は表 - 1 以外のデータセットは入手できず，検討に加えることができなかった。

表 - 1 波高伝達率の提案式の比較検討用の不規則波実験データの概要

実験報告者	ケース数	H_s (m)	T_p (s)	h_c/H_s	K_t	B_{eff} (m)	D_n, D_{50} (mm)	備考
Seelig	13	0.11 ~ 0.17	1.3 ~ 3.3	0.0 ~ 1.3	0.05 ~ 0.36	0.6 ~ 0.8	0	不透過・台形
Seelig	117	0.08 ~ 0.18	0.9 ~ 3.3	-4.4 ~ 3.1	0.04 ~ 0.92	0.6 ~ 1.3	111, 161	通常型捨石堤
Ahrens	204	0.01 ~ 0.18	1.3 ~ 3.6	-2.6 ~ 5.9	0.13 ~ 0.86	0.5 ~ 1.2	19, 29	リーフ型捨石堤
Allsop	27	0.05 ~ 0.17	1.0 ~ 3.2	0.5 ~ 3.1	0.05 ~ 0.38	0.5 ~ 0.8	40	通常型捨石堤
Powel - Allsop	63	0.09 ~ 0.24	1.4 ~ 2.3	-2.4 ~ -0.7	0.24 ~ 0.98	0.2 ~ 0.5	76, 90	リーフ型捨石堤
Van der Meer	31	0.08 ~ 0.23	1.9 ~ 2.6	-0.9 ~ 1.7	0.05 ~ 0.81	0.6 ~ 0.8	34	リーフ型捨石堤
Daemen	53	0.03 ~ 0.15	1.0 ~ 2.9	-0.7 ~ 4.0	0.05 ~ 0.63	0.5 ~ 0.9	40, 61	通常型捨石堤
Daemrich-Kahle								
不透過	45	0.02 ~ 0.21	1.2 ~ 3.3	-8.0 ~ 0.0	0.41 ~ 0.92	0.4 ~ 0.6	0	不透過・台形
堤頂幅 $B=0.2\text{m}$	51	0.02 ~ 0.23	1.2 ~ 3.3	-8.7 ~ 0.0	0.37 ~ 0.90	0.4 ~ 0.6	78	テトラ被覆捨石堤
堤頂幅 $B=1.0\text{m}$	44	0.02 ~ 0.22	1.2 ~ 3.3	-8.3 ~ 0.0	0.14 ~ 0.86	1.2 ~ 1.4	78	テトラ被覆捨石堤
Delft H1872	39	2.3 ~ 6.3	6.1 ~ 13.2	0.6 ~ 1.8	0.06 ~ 0.28	12 ~ 24	~1650	テトラ被覆捨石堤
Delft M2090	31	0.9 ~ 4.0	4.8 ~ 10.1	0.4 ~ 3.4	0.02 ~ 0.27	7 ~ 20	870	通常型捨石堤
Delft H2014	11	0.14 ~ 0.20	1.8 ~ 2.2	-1.0 ~ 0.4	0.27 ~ 0.71	0.6 ~ 1.0	0	不透過・台形
Delft H2061	32	0.08 ~ 0.23	1.2 ~ 2.9	-0.4 ~ 2.5	0.03 ~ 0.61	0.3 ~ 0.8	35 ~ 50	テトラ被覆捨石堤
木村ほか (2002)	90	0.10 ~ 0.15	1.6 ~ 2.8	-0.1 ~ -0.2	0.34 ~ 0.73	0.4 ~ 1.3	55	テトラ被覆捨石堤

(2) 個別データセットに対する適合度

今回提案する式 (27) ~ (34) による波高伝達率の計算に必要な入力データは，次の通りである。

- ・入射有義波高： $(H_{1/3})_I$
- ・有義波周期： $T_{1/3}$ または $T_{m-1,0}$
- ・天端高： h_c (没水構造物では負値)
- ・有効天端幅： B_{eff}
- ・堤体構成材有効径： D_{eff}
- ・堤体の高さ： h_t
- ・設置水深： h

以上の入力データがあれば，式に従って波高伝達率

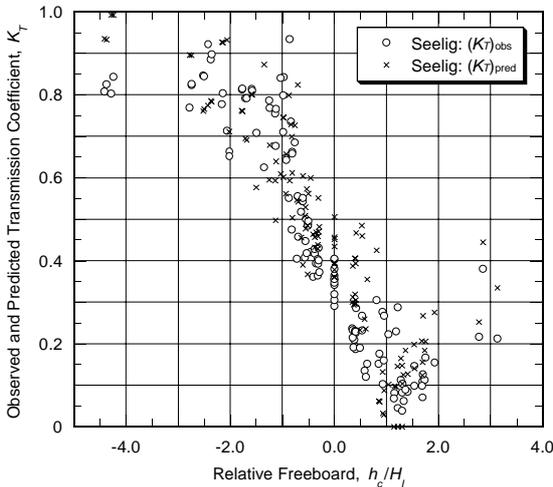
を順次計算できる。なお， $T_{m-1,0}$ は周波数スペクトルの積率から算定されるスペクトル有義周期であり，個別波浪解析で求められる有義波周期 $T_{1/3}$ にほぼ等しい。

なお，上記の入力データのうち，通常型捨石堤では被覆層，フィルター層，内部コアとそれぞれ異なる大きさの材料を使っているため，堤体構成材の有効径 D_{eff} の見積もりが難しい。本研究では，データセットに応じて判断して設定した。以下，各データセットについて波高伝達率を推定した結果を述べる。

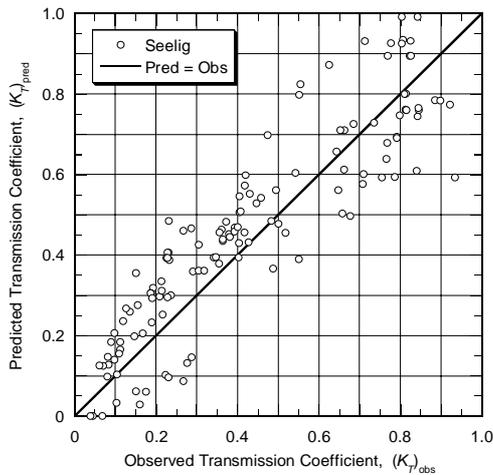
(3) Seelig のデータセットに対する適合度

このデータは1970年代に米国陸軍工兵隊の海岸工学研究センターで Seelig (1980) が実験したものであり、不規則波実験としては初期のものである。Seelig の報告には規則波の実験結果も記載されているとのことであるが、ここでは Ahrens および De Jong が選んだ不規則波のデータのみを解析した。このデータに対して波高伝達率を推定した結果を図 - 4 に示す。

Seelig がテストした模型堤体は6種類あり、一つは不透過の台形断面 (13 ケース) のもので、あとの五つは捨石被覆層とコア部からなる通常型断面 (117 ケース) である。被覆石は $D_{50} = 111$ および 161 mm の2種類、コア部は $D_{50} = 29$ mm の碎石である。Ahrens のファイルには全体の断面積とコア部の断面積が示されていたので、被覆層とコア部の面積を重みとして粒径の加重平均を計算し、それを堤体構成材の有効径 D_{eff} とした。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{\text{pred}}$ と実験値 $(K_T)_{\text{obs}}$ の比較

図 - 4 Seelig のデータセットに対する適合度

模型堤体の断面図は De Jong (1966) に記載されていたので、有効天端幅 B_{eff} は式 (29) によって算定した。

図 - 4 (a) は波高伝達率の実験値を白丸、推定値を \times 印で示し、相対天端高 h_c/H_I に対してプロットしたものである。また図 - 4 (b) は波高伝達率の推定値 (縦軸) を実験値 (横軸) と比べたものであり、斜めの直線が両者同一の条件を表している。

Seelig のデータは推定値との差がかなり大きく、波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ の標準偏差は 0.125 にも達する。中には、推定値 0.484、実験値 0.232 と過大なケース (相対天端高 $h_c/H_I = 0.531$) や、逆に推定値 0.593、実験値 0.934 と過小なケース (相対天端高 $h_c/H_I = -0.857$) もある。ただし、平均差は 0.042 であって、推定値が若干大きめな程度である。

(4) Ahrens のデータセットに対する適合度

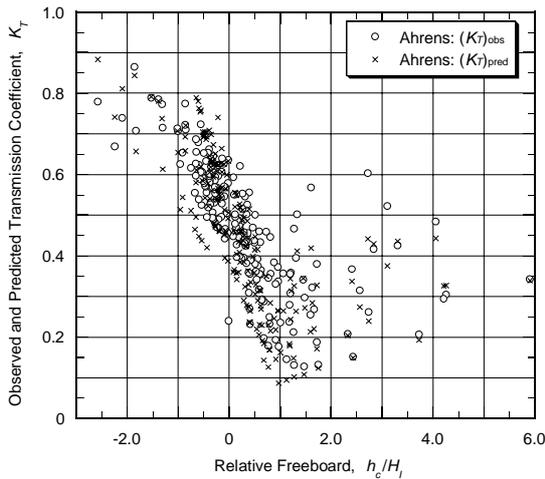
このデータも米国陸軍工兵隊の海岸工学研究センターで取得されたものであり、同センターの報告書にその結果が記載されている。データセットのファイルは Ahrens の提供によるもので、データ数は 204 ケースである。

実験の対象となったリーフ型捨石堤は、 $D_{50} = 18.6$ または 29.3 mm の単一粒径の碎石で構成された台形断面のものである。データファイルには堤体の断面積、初期高さ、波の作用で変形した後の高さが記載されているが、天端幅などの情報が記されていないため、有効堤体幅は断面積を変形後の堤体高で除したものを使用した。

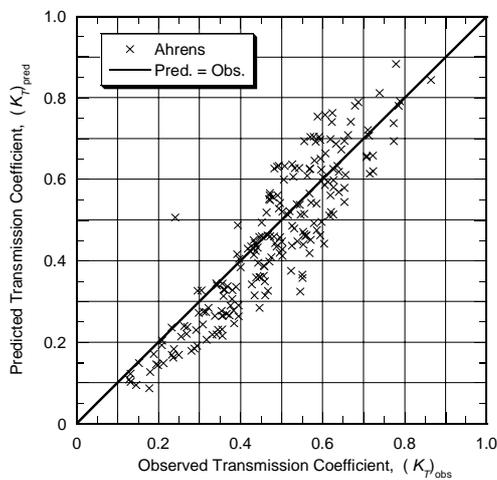
また、Ahrens (1987) は入射波高として堤体位置ではなくて、伝達波高を測定する位置であらかじめ測定した通過有義波高を用いて波高伝達率を算定している。Ahrens によると、入射波が大きいときには堤体位置と波高測定位置の間で波が減衰するケースがあり、そうした波浪伝播中の減衰の影響を取り除くためにこのような定義を用いたと述べ、波高伝達率がやや大きめに評価されたケースがあることを認めている。実験ケースの中には、スペクトル有義波高が水深の 60% を超えるものが若干数ある。

図 - 5 は波高伝達率の推定値と実験値を比較したのであり、Seelig のデータセットに対する図 - 4 と同じ方式で示している。

Ahrens のデータセットについては、波高伝達率の推定値がやや小さめであり、推定値と実験値との差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ の平均は -0.024 、その標準偏差は 0.080 である。差が最も大きいのは、相対天端高 $h_c/H_I = -0.012$ で波高伝達率の実験値が 0.240、推定値が 0.506 のケースである。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

図 - 5 Ahrens のデータセットに対する適合度

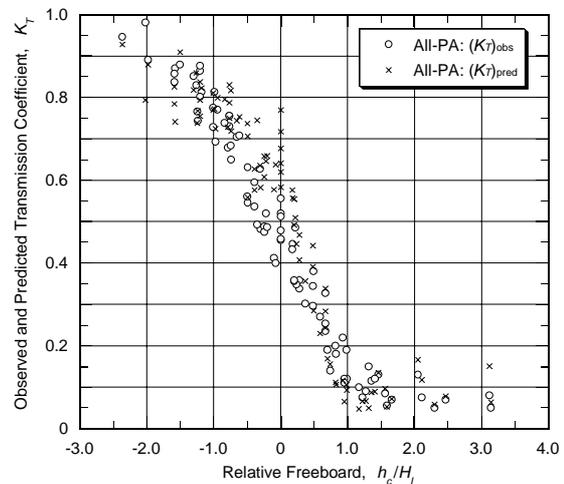
(5) Allsop および Powell・Allsop のデータセットに対する適合度

Allsop は 1983 年の海岸構造物会議で 3 層構造の捨石堤の模型実験結果を発表しており、そこで用いられた 27 ケースをデータセットとして利用した。被覆層は $D_{50} = 40$ mm の砕石であるが、フィルター層とコア部の粒径の情報が不明なので、有効径としては $D_{eff} = D_{50}/2 = 20$ mm を使用した。

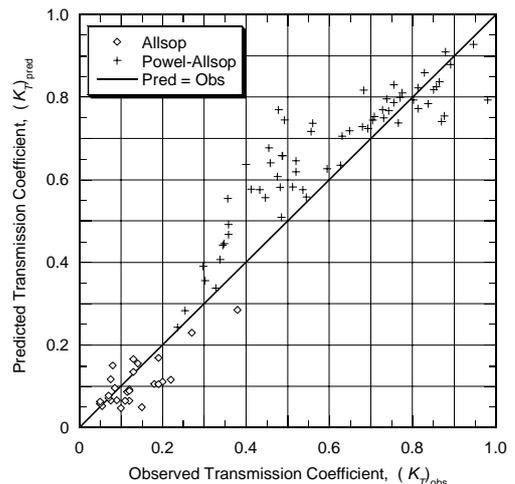
この有効径の選択は式 (28) の定数 K_N の値に影響を与える。ただし、式 (32) の無次元遡上高は波高が相対的に大きいので、全て $F_0 = 1.0$ となり、有効径の選択に影響されない。

Allsop (1983) のデータは、すべて天端が水面より上のケースであり、波高伝達率が 0.05 ~ 0.24 と図 - 6 (b) で波高伝達率が小さい領域にある。これに対して、Powell・Allsop (1985) がウォリングフォード水理研究所の所内報告書に記載したのは幅広のリー

フ型捨石堤であり、波高伝達率は 0.24 ~ 0.98 と大きく広がっている。捨石は $D_{50} = 76$ mm が大半で、63 ケースのうちで 6 ケースが $D_{50} = 90$ mm を使用したものである。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

図 - 6 Allsop および Powell・Allsop のデータセットに対する適合度

波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{pred} - (K_T)_{obs}$ は、Allsop のデータベースが平均で 0.006、標準偏差が 0.053 と適合度がよいが、Powell・Allsop のデータベース平均で 0.063、標準偏差が 0.090 であって、推定値がやや過大である。両者合わせては差の平均が 0.046、標準偏差が 0.085 である。

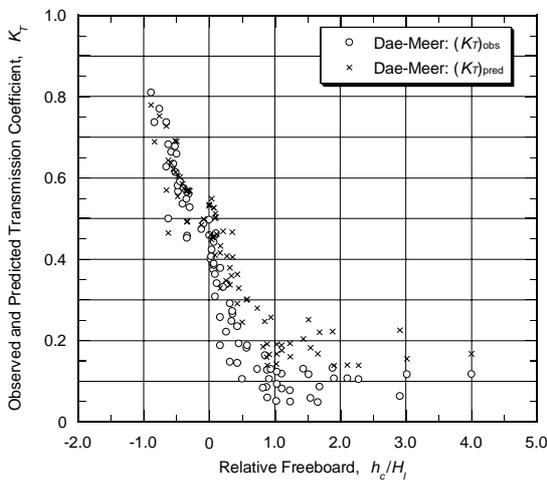
(6) Daemen および van der Meer のデータセットに対する適合度

Van der Meer のデータは 1988 年のデルフト工科大

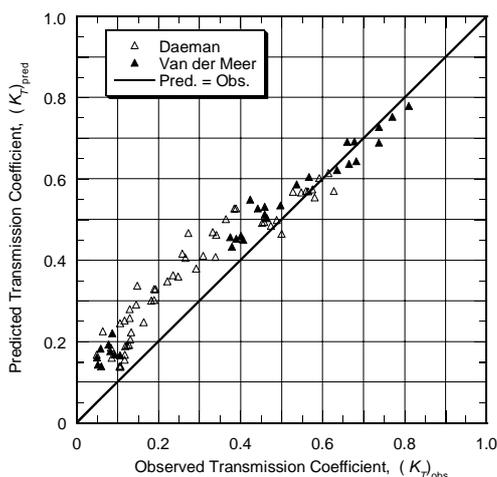
学への博士論文に記載されたリーフ型捨石堤の31ケース, Daemenのデータは1991年の同大学への修士論文に記載された通常型捨石堤の53ケースである。両論文ともデルフト水理研究所の報告書となっているようであるが, いずれも入手できていない。

前者のリーフ型捨石堤は粒径 $D_{50} = 34$ mm の砕石を使用しており, 後者は被覆層に $D_{50} = 40$ と 61 mm の砕石を使い, コア部に $D_{50} = 28$ mm の砕石を使っている。後者の捨石堤構成材の有効径としては, 被覆層とコア部の断面積を重みとして加重平均した $D_{\text{eff}} = 34.2$ と 45.1 mm を用いて波高伝達率を計算した。

Van der Meerのデータのデータセットに対しては, 波高伝達率の推定値と実験値の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ が平均で 0.050 , 標準偏差が 0.050 であり, Daemenのデータセットに対しては差の平均が 0.082 , 標準偏差が 0.050 である。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{\text{pred}}$ と実験値 $(K_T)_{\text{obs}}$ の比較

図 - 7 Daemen および van der Meer のデータセットに対する適合度

波高伝達率の推定値は, 天端が水面上の場合に実

験値よりも大きく, 天端が水面以下の場合には実験値よりも小さくなるケースが大半である。Daemenの実験では入射有義波高が 0.06 m 以下のデータが11ケースあり, これらに対する波高伝達率の差の平均が 0.122 と大きいので, 模型の縮尺効果によって波高伝達率の実験値が小さくなった可能性も考えられる。

二つのデータセットに対する全体としての波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ は, 平均で 0.070 , 標準偏差で 0.059 である。

(7) Daemrich-Kahle のデータセットに対する適合度

このデータはハノーバー大学のフランツィウス水工研究所の報告書に Daemrich・Kahle が1985年に発表したものである。

実験を行ったのは, 前法・後法勾配がともに2割りの台形断面の不透過堤およびテトラポッド被覆堤であり, 不透過堤の天端幅は $B = 0.2$ m, テトラポッド被覆堤の天端幅は $B = 0.2$ m および $B = 1.0$ m の2種類である。天端高は3種類の堤体とも, $h_c = 0, -0.1, -0.2$ m の3通りである。模型テトラポッドの代表径は $D_n = 78.3$ mm であった。ただし, コア部にはその法肩から底面まで遮水板が入っていたので, 有効径としては $D_{\text{eff}} = D_n/5 = 15.7$ mm を使用した。

図 - 8 (a) は, $h_c = -0.1$ と -0.2 m のデータについて, 波高伝達率を相対水深に対して表示したものである。区別はしていないが, 3種類の模型堤体についての波高伝達率の推定値と実験値を表示してある。

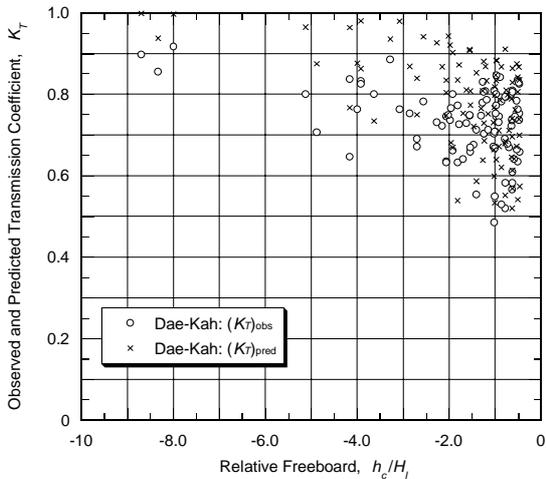
図 - 8 (b) は, 天端高が 0 のデータについて, 波高伝達率を相対天端幅 B/L_0 に対して表示したものである。伝達率の推定値は実験値よりもやや大きめではあるけれども, 相対天端幅の変化に追従して実験値に近い値を示している。すなわち, 式 (31) で設定した減衰定数 α の関数形が適切であったことを例証している。

最後の図 - 8 (c) は, 波高伝達率の推定値と実験値を比べたものである。波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ は全140ケースに対して, 平均で 0.053 , 標準偏差で 0.082 である。3種類の模型堤体とも推定値と実験値との差はほぼ同じであり, 全体として推定値が大きめである。

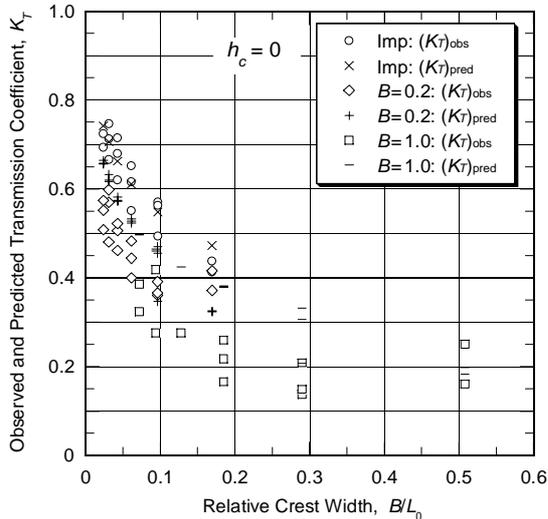
(8) デルフト水理研究所のデータセットに対する適合度

ここでは4種類の模型についての実験データを検討する。いずれも De Jong (1996) の論文中の数表に記載されたもので, H2014 は不透過の台形堤体であ

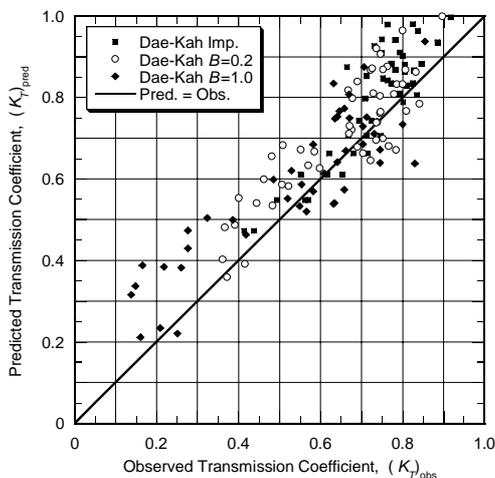
るが、H1872とM2090は特定の港の傾斜防波堤の受託実験（1985～1994年実施）、H2061では基礎実験と思われる。なお、H2014などの数値は、デルフト水理研究所の報告書番号である。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率 K_T と相対天端幅 B/L_0 の関係 ($h_c=0$)

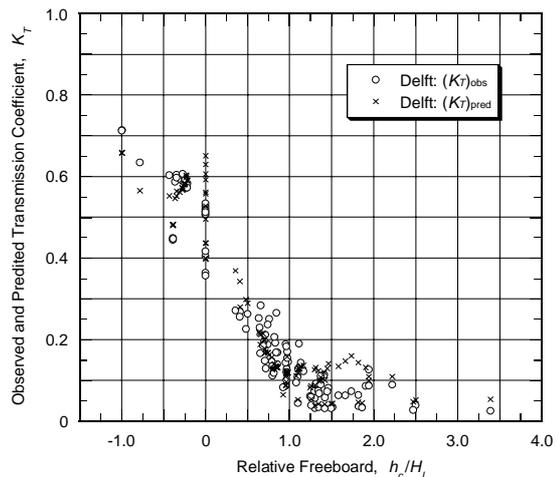


(c) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

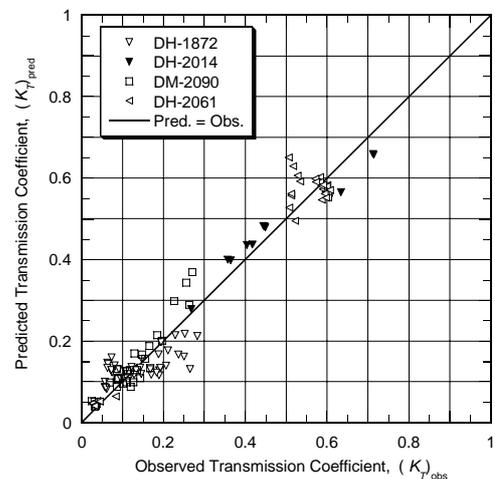
図 - 8 Daemrich-Kahle のデータセットに対する適合度

H1872の39ケースは現地換算寸法で記述されており、被覆テトラポッドの代表径は $D_n=1.627$ と 1.696 m である。天端幅が $B=5$ m と狭い、典型的なテトラポッド被覆傾斜堤である。コア部の効果を考え、堤体構成材の有効径は $D_{eff}=D_n/3$ と見積もった。

M2090の31ケースは通常型捨石堤であり、被覆層、フィルター層、コア部の3層構造であって、現地換算寸法で記述されている。被覆捨石の中央粒径は $D_{50}=0.87$ m であるが、これについても有効径を $D_{eff}=D_{50}/3=0.29$ m と見積もった。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端高 h_c/H_I の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

図 - 9 デルフト水理研究所のデータセットに対する適合度

H2061の32ケースはテトラポッド被覆傾斜堤の基礎実験のようであり、模型テトラポッドは代表径が $D_n=35, 44$, および 50 mm の3種類を用いている。

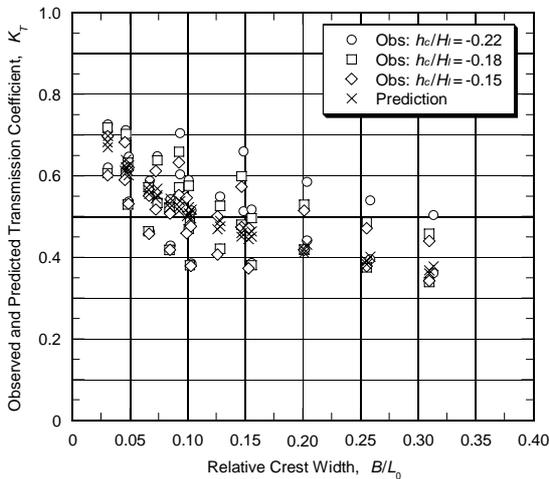
H2014の11ケースは滑面不透過堤で、表法3.5割

勾配，裏法2割り勾配で，天端幅0.20mである。

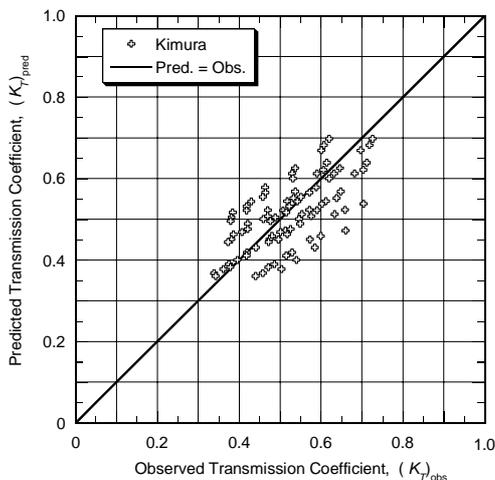
この4種類のデータセット全体の113ケースに対する波高伝達率の推定値と実験値の差 $\Delta K_T = (K_T)_{pred} - (K_T)_{obs}$ は，平均が0.006，標準偏差が0.045であって，推定値は実験値との整合性が高い。個別のデータセットについても，全体との差は少ない。

(9) 木村ほか (2002) のデータセットに対する適合度

このデータセットには，テトラポッド被覆潜堤の実験90ケースが含まれている。模型テトラポッドは質量360g，代表径 $D_n = 54\text{mm}$ である。論文には明記されていないけれども，論文の前半において砕石をコア部に用いた傾斜堤のテトラポッドの安定性を取り扱っているので，論文後半の波高伝達率もテトラポッド被覆潜堤と見なした。有効径としては，他のデータセットと同じく $D_{eff} = D_n/3$ として算出した。



(a) 波高伝達率 K_T と相対天端幅 B/L_0 の関係



(b) 波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

図 - 10 木村ほかのデータセットに対する適合度

この実験では天端高を $h_c = -2.2\text{cm}$ に固定し，波高を $H_1 = 10, 12.5, \text{および } 15\text{cm}$ に変えることで3通りの相対天端高を得ている。一方で天端幅を $B = 0.24 \sim 1.14\text{m}$ に変化させ，周期も3種類を用いて，相対天端幅の範囲を広げている。さらに，同一条件で不規則波の波群特性を変えた2通りの測定を行っている。

図 - 10 (a) は，このデータセットの波高伝達率を相対天端幅 B/L_0 に対してプロットしたものである。波高伝達率の実験値は h_c/H_1 のパラメータごとに区別して表示しているが，この実験条件では推定結果がほぼ同じ値になるので，区別なしにプロットしている。2回の繰り返し測定による実験値は，波高伝達率の絶対値で0.10～0.15程度異なる場合が大半である。木村ほかは，波群特性の違いによって伝達率やテトラポッドの安定性に差異が生じることに注意している。

図 - 10 (b) は，波高伝達率の推定値と実験値を比べたものであり，繰り返し測定による実験値の変動性が現れている。波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{pred} - (K_T)_{obs}$ の平均は-0.010，標準偏差は0.075である。

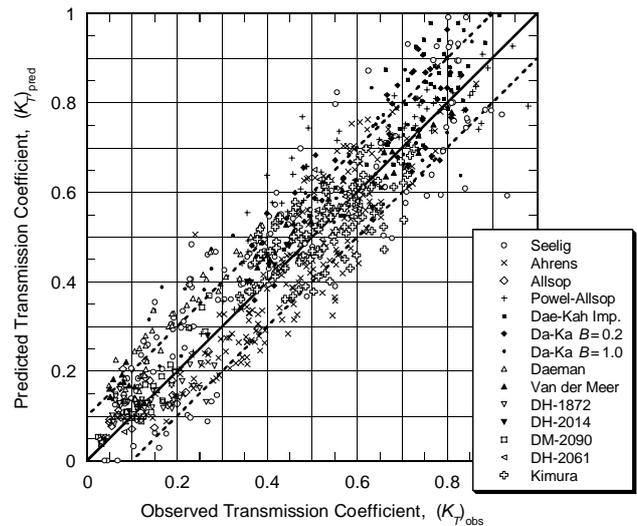


図 - 11 全データに対する波高伝達率の推定値 $(K_T)_{pred}$ と実験値 $(K_T)_{obs}$ の比較

(10) 全データに対する適合度

これまでに紹介したデータセットのすべてについて，波高伝達率の推定値と実験値をまとめて比べたのが図 - 11 である。図中の斜めの実線は $(K_T)_{pred} = (K_T)_{obs}$ ，斜めの破線 $(K_T)_{pred} = (K_T)_{obs} \pm 0.1$ の条件を表している。全体についての波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{pred} - (K_T)_{obs}$ の平均は0.020，標準偏差は0.088である。今回の推定方式による波高伝達率は，全体としてはやや過大な値となる傾向がある。波高伝達率

の差が正規分布すると想定すれば，全ケースの約90%が伝達率の差が $-0.12 \sim 0.16$ の範囲に入っていることになる。なお，波高伝達率の推定値と実験値の相関係数は0.930である。

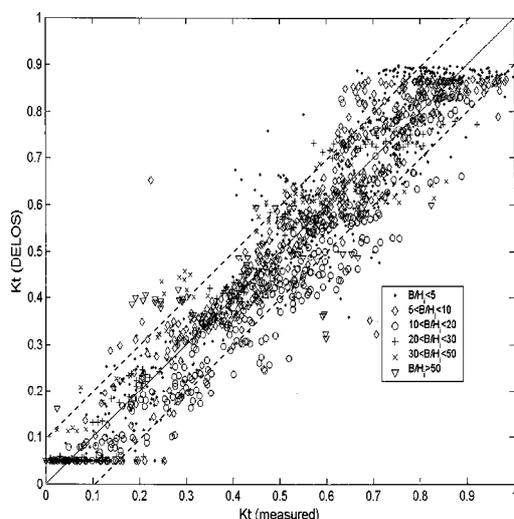


図 - 12 DELOS プロジェクトにおける波高伝達率の推定値 (K_T)_{pred} と実験値 (K_T)_{obs} の比較

こうした波高伝達率の推定値と実験値の差は，既往の Briganti ほか (2003) と Van der Meer (2005) が示したものとほぼ同じ程度である。図 - 12 は後者の論文からスキャンし，縦横比を修正して再掲したものである。検討対象の実験データのうち，共通のものは398ケースにとどまっており，今回検討した中で標準偏差が大きい Seelig (1980) のデータセットは一部しか扱われていない。また， ΔK_T についての分析結果が示されていないため，厳密な比較は難しい。

表 - 2 データセットごとの波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{pred} - (K_T)_{obs}$ の平均と標準偏差

実験報告者	ケース数	平均	標準偏差
Seelig	130	0.0418	0.1251
Ahrens	204	-0.0236	0.0801
Allsop	27	-0.0249	0.0455
Powel - Allsop	63	0.0365	0.0846
Van der Meer	31	0.0495	0.0503
Daemen	53	0.0817	0.0602
Daemrich-Kahle			
不透過	45	0.0624	0.0698
堤頂幅 $B=0.2\text{m}$	51	0.0477	0.0760
堤頂幅 $B=1.0\text{m}$	44	0.0496	0.0976
Delft H1872	39	-0.0046	0.0526
Delft M2090	31	0.0157	0.0305
Delft H2014	11	0.0058	0.0411
Delft H2061	32	0.0086	0.0439
木村ほか (2002)	90	-0.0096	0.0747
全データセット	851	0.0195	0.0878

なお，データセット別の ΔK_T の平均値と標準偏差を表 - 2 に記す。データセットによって伝達率の差の傾向が異なっており，一組の波高伝達率の推定式によってこれらすべてのデータセットの実験値に適合させるのは難しいように思われる。前述のように，たとえば Daemen (1988) のデータの一部には模型縮尺効果による波高伝達率の低減の可能性が指摘される。

結論として，既往の低天端堤の波高伝達率のデータベースを用いて検討した結果では，今回提案する波高伝達率の推定方式はその適用性がかなり高いといえよう。

5. 新潟西海岸の大規模潜堤の観測データによる新推定法の検討

(1) 新潟西海岸の大規模潜堤の概要

国土交通省北陸地方整備局では，1986年度から新潟港海岸（西海岸地区）を直轄海岸として保全事業を行っている。この事業では大規模養浜工によって汀線を前進させるとともに，海浜を防護する長大な離岸堤（連続潜堤）と4基の大型突堤を建設している。

離岸堤は計画延長が1,580mであり，現在はその大半が建設済みである。潜堤は水深約9mの等深線に沿って海岸に平行に配置され，天端幅40m，天端水深-2.0mで，全断面を質量20トンのテトラポッドで構築されている。法面勾配は表法・裏法とも1.5割である。

潜堤の建設は1989年度に開始され，暫定天端幅17mで施工されて1990年10月には延長200mとなり，順次建設が続けられた。1993年度には延長600mとなった段階で天端幅40mへの拡幅が開始され，1993年10月には拡幅断面の延長が約230mとなり，1997年10月には600mが完成断面となった。それ以降は，天端幅40mで計画延長へ向けての施工が行われた。

新潟は地区全域にわたって地盤沈下が毎年続いており，年間の沈下量が1cmを超えるところもある。これによって検潮記録で確認される平均海水位も上昇し，潜堤の天端もそれに伴って沈下している。新潟港湾・空港整備事務所が2005年度に潜堤の横断面を音響測深器で測定した資料から読み取ると，次項に述べる波高計設置区域の平均天端高は-2.42mと判断される。この沈下が1989～2005年の間に等速度で起きていたと仮定し，沈下速度が26mm/年であるとして各年度の潜堤の天端高を算定した。

(2) 潜堤周辺の波浪・流況観測の概要

海浜保全事業の進捗とともに、各種の技術調査が行われてきた。堤周辺では数台の流速計（水圧センサー付き）と超音波式波高計を約1ヶ月間設置し、波浪・流況の観測を暦年行っている。

波浪計測の機器は、潜堤から沖へ約500mの水深約12mの個所をSt.1として超音波式波高計1台、潜堤東部の600m区間のほぼ中央で潜堤の前法肩から海側へ約25mの所にSt.2として流速・水圧センサー1台、同じく前法肩から陸側へ約55mの所にSt.3として流速・水圧センサー1台を設置しており、その他数台の流速計を各所に設置した。いずれも、10月下旬から11月中旬の約1ヶ月間にわたり、2時間ごとの波形データを記録している。ただし、1990～1993年は17～19日間であり、また1997年は11月上旬から12月上旬の1ヶ月間である。これらの計測機器は毎年設置し直しており、位置に若干の移動がある。

今回のデータ解析では、1990, 1991, 1993, および1995～1997年の記録を使用した。1990年と1991年は天端幅が17mの状態であり、1993年以降は天端幅が40mである。

1990～1993年の間は潜堤前方25mのSt.2の波高計を設置していたけれども、1995年以降はSt.2を取り止め、沖合500mのSt.1の波高計とSt.3の水圧センサーしか稼働させていない。そこで、1990年と1993年の間の記録についてSt.1とSt.2の有義波高の関係を調べたところ、図-13のような結果が得られた。

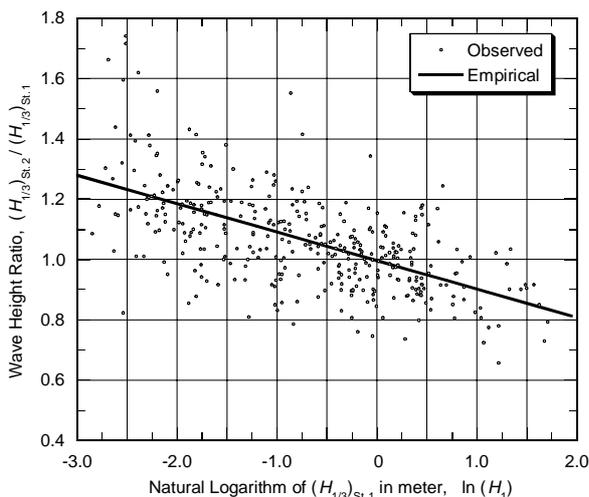


図-13 潜堤前面St.2と沖合St.1の有義波高の比率の変化

図の縦軸は波高比、横軸はSt.1の有義波高 $H_{St.1}$ の自然対数であり、図中の斜め右下がりの直線は次の

回帰式で表される。

$$H_{St.2}/H_{St.1} = 0.9965 - 0.0943 \ln(H_{St.1}) \quad (35)$$

ただし、有義波高はm単位である。観測された波高比と式(35)による推定値との相関係数は0.609である。

この経験式によると、St.1の有義波高が2.7mを超えるとSt.2の波高がSt.1よりも小さくなる。この波高は水深が浅くなることによる不規則碎波の波浪減衰と考えられる。しかし、波高が2.7m以下のときにSt.2の波高が大きくなる原因は解明できていない。St.1の波高計が超音波式であり、St.2の波高計が水圧センサーであることが影響しているのかもしれない。

原因は不明であるものの、St.2で波浪が観測されていない1995～1997年のデータについては、式(35)の経験式を用いて波高を換算し、それを潜堤への入射波高と見なして波高伝達率を算定した。

(3) 波高伝達率の計算条件

新潟西海岸の大規模潜堤の波高伝達率を推定するに当たっては、次のような前提で計算を行った。

- 1) 潜堤の延長は十分に長いので、潜堤端部からの波の回り込みは無視し、2次元断面として扱う。
- 2) 観測時刻の検潮データに基づき、そのときの潮位を用いて天端水深を算定する。
- 3) 1989年の潜堤の天端高は-2.0mであり、それ以降は毎年26mmだけ沈下しているとして、各年の天端高の基準を定める。
- 4) テトラポッドの施工に当たっては若干の不陸が生じたであろうから、上記の天端高はテトラポッドの頂点に相当すると考え、実質的な天端面はテトラポッドの高さの5%だけ低い位置にあったと見なした。
- 5) 有効天端幅は式(29)を用い、天端幅17mに対して $B_{\text{eff}} = 20.3\text{m}$ 、天端幅40mに対して $B_{\text{eff}} = 43.3\text{m}$ とした。
- 6) テトラポッドの有効径としては、代表径 $D_n = (M/\rho)^{1/3}$ ではなく、20トンテトラポッドの高さである3.28mをそのまま用いた。これは、後述するように現地構造物については模型実験とはやや異なるアプローチが必要なためである。

なお、入射波高があまり小さいケースは潜堤の波浪減衰効果が期待できず、またデータの散らばりも大きくなるので、1990～1993年のデータは入射波高0.4m以上 ($\ln H_1 > -0.92$)、1995年以降は0.5～0.7m以上 ($\ln H_1 > -0.69 \sim -0.36$) のケースのみを解析した。

(4) 波高伝達率の推定値と観測値の比較

新潟西海岸の潜堤は、当初は幅 17 m の暫定断面で施工され、後に幅 40 m の完成断面に拡幅されているので、両者の性能比較が可能である。まず、1990、1991年の暫定断面のときの波高伝達率の推定値と観測値を相対天端高に対して表示したのが図 - 14 である。明らかに、推定値が観測値よりも小さく、潜堤の効果を過大に評価している。

計算で得られる波高伝達率のうち、式 (28) による内部透過波は $(K_T)_{\text{thru}} = 0.3 \sim 0.4$ 程度の値であり、潜堤の上を通過する波が $(K_T)_{\text{over}} = 0.5$ 以上の値をとるのに対し、その 60% ~ 70% 程度と小さめである。また、全体の波高伝達率に対しては式 (28) のように相対堤高によって割り引かれるため、内部透過波による波高伝達率の増分は相対天端高 -2.0 付近で $\Delta K_T \approx 0.07$ である。

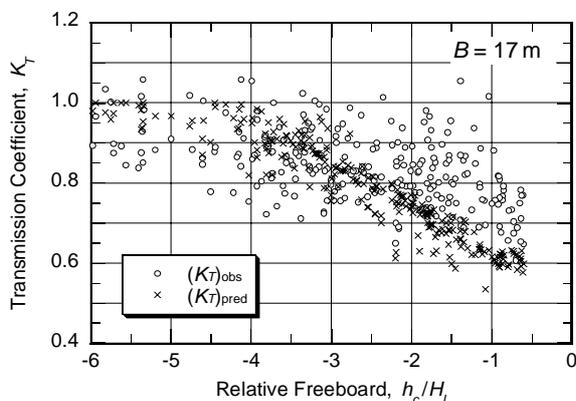


図 - 14 暫定断面における波高伝達率の推定値と観測値の比較 (模型用透過定数を使った場合)

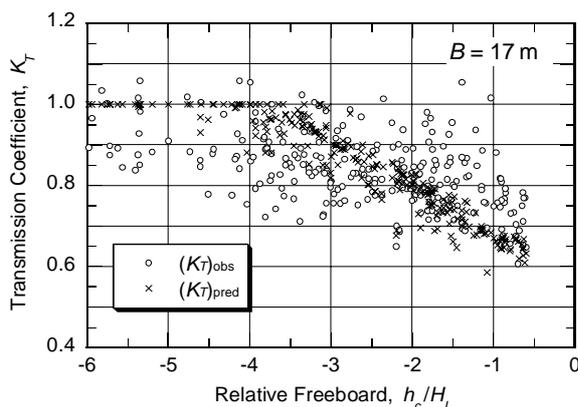


図 - 15 暫定断面における波高伝達率の推定値と観測値の比較 (現地用透過定数を使った場合)

天端幅が 40 m に拡幅された 1993 年以降の観測データにおいても推定値が観測値よりも小さい傾向が見られるものの、天端幅 17 m のときほどではな

い。そこで、波高伝達率の推定値が過小となる原因は内部透過波に対する沼田の抵抗係数が大きすぎるのではないかと考え、これを次のように変更した。

$$\kappa_p = 0.6(B_{\text{eff}}/D_{\text{eff}})^{0.65} \quad (36)$$

すなわち、定数の値を約 1/2 に低減した。この定数を使って天端幅 17 m のときの波高伝達率を再計算すると、図 - 15 のように、推定値がほぼ観測値の散らばりの中に納まる結果が得られる。

この計算では、内部透過波の伝達率が $(K_T)_{\text{thru}} = 0.5 \sim 0.6$ 程度に増大し、潜堤の上を通過する波の 90% ~ 100% の大きさになる。これによって、内部透過波による波高伝達率の増分は相対天端高 -2.0 付近で $\Delta K_T \approx 0.13$ 程度と大きくなり、これによって波高伝達率の推定値が観測値に近い値に修正されるのである。

そこで、新潟西海岸の潜堤に対しては式 (36) の内部抵抗係数を用いて内部透過波の伝達率を算定することとし、完成断面について推定伝達率と観測伝達率を相対天端高に対してプロットすると、図 - 16 のようになる。

観測データについてはばらつきが大きいものの、波高伝達率の推定値は観測値の中央部を占めており、推定結果がほぼ妥当であることを示している。

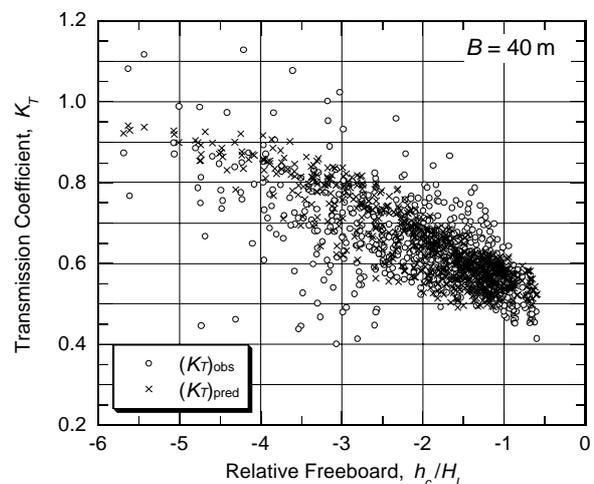


図 - 16 完成断面における波高伝達率の推定値と観測値の比較

暫定断面と完成断面の両者について、波高伝達率の推定値と観測値を直接に比した結果を図 - 17 に示す。ここにプロットされているのは、暫定断面のデータが 249 ケースであり、波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ の平均は 0.002、標準偏差は 0.1013 である。完成断面のデータは 729 ケースであり、波高伝達率の差 $\Delta K_T = (K_T)_{\text{pred}} - (K_T)_{\text{obs}}$ の平均は 0.009、標準偏差は 0.0897 である。全データとしては 978 ケー

ス、波高伝達率の差の平均が 0.007、標準偏差が 0.0928 である。推定値と観測値の相関係数は 0.768 である。

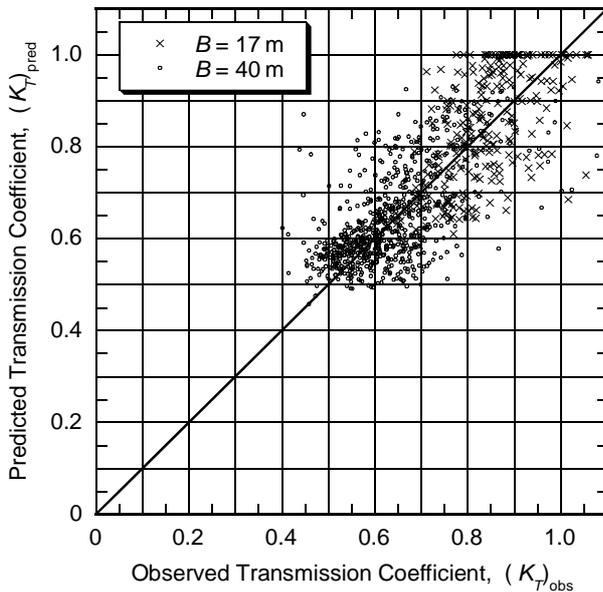


図 - 17 新潟西海岸の潜堤の波高伝達率の推定値と観測値の比較

6. 低天端堤の波高伝達率に関する模型縮尺効果について

新潟西海岸の連続潜堤の波高伝達率を推定する際に、内部透過波に関する式 (28) の抵抗係数 κ_N を使ったのでは推定伝達率が過小となり、式 (36) の κ_P に変更することによってようやく観測値に整合する値が得られたのは、テトラポッドの流体抵抗が現地構造物で小さくなっていった可能性がある。

捨石堤の内部透過波に関しては Madsen (1974) が矩形石棹堤に線形長波が作用する場合を対象とし、堤体内の流れが乱流であることを仮定した波高伝達率の推定式を提示している。その推定式におけるパラメータは H_l/D_n , B/h , および堤体の空隙率 n であって、構造物の大きさの絶対値は直接には関与しない。したがって、その推定式においては模型縮尺効果が入ってこない。

低天端堤に関して模型の縮尺効果が現れる可能性があるのは、乗り越え伝達波の碎波および内部透過波の流体抵抗の再現性である。前者については合田・森信 (1997) が、実験波高が 7 cm 程度よりも大きければ相似性が維持されることを実験的に確認している。

後者は、波動運動に伴って捨石などの空隙に励起される往復流に対する流体抵抗の問題である。現地

では乱流であり、模型が小さいときには往復流が層流となるために相似性が崩れる。空隙を通過する往復流に対する流体抵抗は、van Gent (1995) によれば次の修正 Forchheimer 式で表すことができる。

$$I = au + bu|u| + c(du/dt) \quad (37)$$

ここに I は動水勾配であり、係数 a, b, c はそれぞれ次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} a &= a_o \frac{(1-n)^2}{n^2} \frac{\nu}{gD_{n50}^2} \\ b &= b_o \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^2} \frac{1}{gD_{n50}} \quad : KC = \frac{\hat{U}T}{nD_{n50}} \\ c &= \left[1 + \frac{1-n}{n} \left(0.85 - \frac{0.015}{\hat{U}/(ngT)} \right) \right] \frac{1}{ng} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ここに、 n は空隙率、 ν は動粘性係数、 T は周期、 \hat{U} は往復流速の振幅である。van Gent は $D_{n50} = 20 \sim 61$ mm の碎石に対して U 字管往復流試験を行い、 $a_o = 1,000, b_o = 1.1$ の値を推奨している。

式 (37) の流体抵抗のうちの第 1 項は層流抵抗、第 2 項は乱流抵抗、第 3 項の加速度抵抗である。第 3 項はフルード相似則に従い、縮尺効果を受けないのでこれを除外して考え、式 (37) を次のように変形する。

$$\frac{I}{bu|u|} = 1 + \frac{a_o(1-n)n}{b_o(1+7.5/KC)} \frac{1}{Re} \quad : Re = \frac{|u|D_{n50}}{\nu} \quad (39)$$

すなわち、層流抵抗の寄与分は式 (37) の右辺第 2 項で表され、これはレイノルズ数に反比例して小さくなる。いま、空隙率を $n = 0.45$ として幾つかの低天端堤諸元について計算すると、表 - 3 の結果が得られる。最右欄の Ratio は式 (15) の右辺第 2 項の値を示す。

表 - 3 レイノルズ数と層流・乱流抵抗比の試算例

構造物	h (m)	H (m)	T (s)	D (m)	u (m/s)	Re	Ratio
現地A	10.0	3.00	10.0	1.0	1.59	1.6×10^6	0.0001
現地B	10.0	1.00	7.0	0.5	0.57	2.9×10^5	0.0006
模型A	0.157	0.047	1.25	0.016	0.20	3.1×10^3	0.0597
模型B	0.157	0.016	0.88	0.008	0.07	5.6×10^2	0.2828

ここで模型 A と B は、現地構造物 A と B をフルード縮尺 1/64 で換算したものである。なお、流速振幅は微小振幅波の静水面における水平粒子速度を用いた。この結果から、模型のレイノルズ数が 10^4 程度よりも大きければ層流抵抗はほとんど寄与せず、流体抵抗は乱流抵抗のみとなって縮尺効果が現れないことが分かる。しかし、レイノルズ数が 10^3 以

下であると層流抵抗が無視できない大きさとなり、そうした模型を使って実験すると、波高伝達率を過小評価することになる。なお、レイノルズ数を評価するときには伝達波の波高を用いて流速を計算する。

前節(5)項で述べた Daemen の実験結果の一部は $Re = 550 \sim 1,530$ であったので、模型の縮尺効果を受けて波高伝達率が小さく測定されたと考えられる。

これまでに水理模型実験の縮尺効果として指摘されているのは、傾斜護岸の越波に関して越波流量が少ないときには模型が過小な流量を与えることである。たとえば、榊山・鹿島(1997)は模型実験のレイノルズ数を 10^5 以上とすることを推奨している。また、消波ブロックの安定性に関して榊山ほか(1994)が臨界レイノルズ数として $(3 \sim 5) \times 10^5$ の値を引用している。

新潟西海岸の連続潜堤については、波高が小さいときでも上記の臨界レイノルズ数を超過しており、模型の縮尺効果によって内部透過波に対する減衰係数が小さくなったとは考えられない。この減少の理由としては、流れの場における抗力係数の変化が考えられる。すなわち、円柱の抗力係数はレイノルズ数が $10^3 \sim 10^5$ の範囲では約 1.2 の一定値を示すけれども、 $10^5 \sim 10^6$ の遷移領域では境界層の剥離点の位置が変化し、抗力係数が 0.3 ~ 0.7 に急減する。

テトラポッドは円錐台の脚4本の集成構造であり、その流体抵抗は円柱とやや類似している。円柱の抗力係数の変化は、広い流れの場に置かれた単柱の場合であって、低天端堤のように空隙率約 50% で積み上げられたテトラポッドの脚部の流体抵抗にそのまま適用できるものではないであろう。しかし、表-3の現地構造物 B のように波高 $H = 1\text{m}$ 、直径 $D = 0.5\text{m}$ のときにはレイノルズ数が 3×10^5 となり、抗力係数の遷移領域に該当する。このような高レイノルズ数領域におけるテトラポッド充填構造に対する流体抵抗の知見は得られていないけれども、式(16)のように実大構造物で抵抗係数を低減する必要があることは、円柱の抗力係数に類似した現象が起きていることの例証といえよう。

7. むすび

この技術論文においては、まず低天端堤の波高伝達率に関する各種の提案式を概観した。しかし、いずれも一長一短があり、波高伝達率の実用的算定式としてふさわしくない。そこで、低天端堤の内部透過波に関しては沼田の推定式を採択し、上部を通過する波に関しては田中の算定図表を新たに数式表示

し、両者をエネルギー的に合成する算定方法を提案した。

新しい波高伝達率の推定方法は、欧米で2000年頃までに取得された各種の実験データおよび木村ほかの実験データ、合わせて851ケースについてその適合度を検討したところ、波高伝達率の推定値と実験値との相関係数が0.925、伝達率の絶対値差の平均が0.02、差の標準偏差が0.090と、実験データに対する適合度が高いことが確認された。

また、新潟西海岸の大規模潜堤の波高観測データについて比較検討したところ、内部透過波に対する抵抗係数を小さく修正することによって、観測値ときわめてよく一致する結果が得られた。この内部抵抗係数の修正は、テトラポッドの脚部の流体抵抗が高レイノルズ数領域で減少している可能性を示唆しているが、今後さらに検討する必要がある。

今回導いた波高伝達率の新しい推定法が、今後の海浜保全施設の計画・設計に役立つことを願う次第である。

謝 辞

本文中にも述べたように、今回解析した欧米の実験データの多くは米国の Mr. John P. Ahrens から提供されたものである。また、室蘭工業大学の木村克俊教授からは貴重な実験データ 90 ケースのファイルを頂戴した。さらに、デルフト工科大学の Dr. Marcel Stive 教授から Mr. R.J. Jong の修士論文のコピーを送付して頂いた。こうしたデータを用いることによって今回の研究が可能となったものであり、ここに記して深く感謝する次第である。

参考文献

- 岩崎敏夫・沼田 淳 (1969): 透過性防波堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 329-334.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, 42p.
- 木村克俊・清水雄平・田谷年樹・山本泰司・土井善和・半沢稔 (2002): 消波ブロック積み幅広潜堤の変形および伝達は特性に関する検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 816-820.
- 合田良実 (2003): 段階的砕波モデルによる人工リーフ波高伝達率の特性解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 676-680.
- 合田良実・森信耕信 (1997): 水平ステップ上の砕波限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 66-70.
- 榊山 勉・鹿島遼一 (1997): 消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験の比較, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 736-740.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 康浩 (1994): 人工島式立地発

- 電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 661-665.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985): 広天端幅潜堤の波浪減衰効果に関する不規則波実験, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 545-549.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152-157.
- 豊島 修 (1972): 「現場のための海岸工学 (侵食編)」, 森北出版, 320p.
- 沼田 淳 (1975): ブロック堤の消波効果に関する実験的研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 501-505.
- 本間 仁編 (1962): 「物部 水理学」, 岩波書店.
- Ahrens, J.P. (1987): Characteristics of reef breakwaters, *Coastal Engineering Research Center, Tech. Rept. CERC-87-17*, Vicksburg, MS, 45p. and appendices.
- Allsop, N.W.H. (1983): Low-crested breakwater, studies in random waves, *Proc. Coastal Structures '83*, Arlington, VA, pp. 94-107.
- Briganti, R., van der Meer, J., Buccino, M., and Calabrese, M. (2003): Wave transmission behind low-crested structures, *Proc. Conf. Coastal Structures 2003*, Portland, ASCE, pp. 580-592.
- Buccino, M. and Calabrese, M. (2007): Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, **133** (3), pp. 213-224.
- Calabrese, M., Vicinanza, D., and Buccino, M. (2002): Large-scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves, *Coastal Engineering 2002 (Proc. 28th Int. Conf., Cardiff)*, ASCE, pp. 1900-1912.
- Daemen, I.F.R. (1991): Wave transmission at low-crested structures, *M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, Delft Hydraulics H462*.
- Daemrich, K.F. and Kahle, W. (1985): Shutzwirkung von Unterwasserwellen brechen unter dem einfluss unregelmässiger Seegangswellen, *Eigenverslag des Franzius-Instituts für Wassebau und Küsteningenieurswesen, Heft 61* (in German).
- d'Angremond, K., van der Meer, J.W., and de Jong, R.J. (1996): Wave transmission at low-crested structures, *Coastal Engineering 1996 (Proc. 25th Int. Conf., Orlando, Florida)*, ASCE, 2418-2427.
- De Jong, R.J. (1996): Wave transmission at low-crested structures and stability of tetrapods at front, crest and rear of a low-crested breakwater, *M.Sc. Thesis, Delft University of Technology*.
- Goda, Y. and A.T. Ippen (1963): Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipators composed of wire mesh screens, *M.I.T. Hydrody. Lab. Rept.*, No. 60, 66p.
- Lamberti, A., Archetti, R., Kramer, M., Paphitis, D., Mosso, C. and Di Risio, M. (2005): European experience of low crested structures for coastal management, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 841-866.
- Powell, K.A. and Allsop, N.W.H. (1985): Low-crested breakwaters, hydraulic performance and stability, *Hydraulic Research Wallingford, Rept. A 57*, Wallingford, U.K.
- Seabrook, S.R. and Hall, K.R. (1998): Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters, *Coastal Engineering 1998 (Proc. 26th Int. Conf., Copenhagen)*, ASCE, pp. 2000-2013.
- Seelig, W.N. (1980): Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters, *U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Rept. 80-1*. Fort Belvoir, VA, 187p.
- Van der Meer, J.W. (1988): Rock slopes and gravel beaches under wave attack, *PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft Hydraulics No. 396*.
- Van der Meer, J.W.m Briganti, R., Zanuttingh, B., and Wang, B.X. (2005): Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 915-929.
- Van der Meer, J.W. and Daemen, F.R. (1994): Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures, *J. Wtwy, Prt., Coast., and Ocn. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 1-19.
- Van der Meer, J.W. and de Waal, J.P. (2000): Wave transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping, *Coastal Engineering 2000 (Proc. 26th Int. Conf., Sydney)*, ASCE, pp. 2156-2168.
- Van der Meer, J.W., Wan, B.-X., Wolters, A., Zanuttigh, B., and Kramer, M. (2003): Oblique wave transmission over low-crested structures, *Proc. Conf. Coastal Structures 2003*, Portland, ASCE, pp. 567-579.
- Wamsley, Ty V. and Ahrens, J.P. (2003): Computation of wave transmission coefficients at detached breakwaters for shoreline response modeling," *Proc. Conf. Coastal Structures 2003*, Portland, ASCE, pp. 593-605.

記号表

A_r	: 堤体の断面積
B	: 堤体幅または天端幅
B_{bottom}	: 海底面における堤体幅
B_{crest}	: 天端幅
B_{eff}	: 有効天端幅
B_{SWL}	: 離岸堤の静水面における堤体幅
C_h	: 内部透過波が作用する堤体の相対高さ表示係数
D	: 低天端堤の構成材の直径または高さ
D_{eff}	: 構成材の有効径
D_n	: 構成材の代表径 $= (M/\rho)^{1/3}$

D_{50}	: 捨石の中央粒径	α	: 上部通過波に関する減衰定数
F_0	: 無次元見かけ遡上高	α_s	: 法面の傾斜角
H_I	: 入射有義波高 $= (H_{1/3})_I$	β	: 円柱の抗力係数のレイノルズ数依存則のべき指数
H_T	: 伝達有義波高 $= (H_{1/3})_T$	ΔK_T	: 波高伝達率の推定値と実験値の差
H_0'	: 換算沖波波高	κ_N	: 沼田による内部抵抗係数 (式-28)
h	: 水深	κ_P	: 現地構造物に対する内部抵抗係数 (式-36)
h_c	: 水面から天端までの高さ (上方が正)	ξ	: イリバレン数 (式-11)
h_t	: 底面から計った堤体の高さ		
K_T	: 波高伝達率 $= H_T/H_I$		
$(K_T)_{\text{obs}}$: 波高伝達率の実験値あるいは観測値		
$(K_T)_{\text{pred}}$: 波高伝達率の推定値		
L	: 波長		
L_p	: スペクトルピーク周期に対する波長		
L_0	: 有義波周期に対する深海波長		
$T_{1/3}$: 有義波周期		