室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

複層透過性防波堤の伝達率・反射率の一推定法

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-07-24
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 近藤, 俶郎, 藤間, 聡, 葛西, 勝栄
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3644

複層透過性防波堤の伝達率・反射率の一推定法

近藤俶郎・藤間　聡・葛西勝栄*

An Analytical Approach to Wave Transmission through and Reflection from Layered Porous Breakwaters

Hideo Kondo, Satoshi Toma and Katsue Kasai

Abstract

An analytical approach is proposed to estimate coefficients of wave transmission through and reflection from breakwaters composed of pervious layers. In the present method, the approach to single layer porous breakwaters, disclosed by the writers in 1972, is repeatedly applied to each layer of breakwater.

The approach originally based on long wave assumption is revised to be applicable for waves other than long waves.

The calculated coefficients agree satisfactory with the experimental ones for three layer breakwaters of trapezoidal cross section.

1. ま　え　が　き

多孔質で透水性の材料から構成される防波堤に波浪が作用することによって発生する伝達波や反射波の研究は，広く普及している異形ブロックあるいは石積の傾斜式防波堤の機能を適正に評価するため，あるいはまたよりすぐれた消波性能をもつ新型式の防波堤の開発のためにも重要である。

それゆえに近年多くの研究者がこの種の問題に取組み，均質な材料からなる防波堤については相当に精しくその特性が調べられ，実用に供すことができる理論的解法が得られている。しかしながら，防波堤表面の形状の影響とか，実例の多い複数の層で形成される防波堤の特性などについては未だ不明な点が多い。

筆者らは透水性コアをもつ三層透過性防波堤の伝達波・反射波・内部波などの特性を実験によって調べて，コア位置の効果などに関して興味ある結果を得ている[1)]。

本論文はこれまでの研究に引き続いて複層透過性防波堤の波高伝達率・反射率を理論的に推定する方法について述べているものである。透過性の構造物による波の変形に関する理論は，層流を対象とした線形理論を基礎にして乱流状態に拡張する手法で展開されるのが通例である。このために実流速が急変するような境界面で生ずるエネルギー損失の見積もりやその変形

*現　北海道小樽土木現業所

に対する影響などに不確かな点があり，境界面が多い複層防波堤について精度の良い理論解を得ることは困難であると考えられる。

筆者らは先に長波近似ができる場合について，単層防波堤の伝達率・反射率を求める推定理論を得ているが[2)~6)]，こゝではこの推定法を応用して複層の場合は単層の重ね合せとする取扱いをすることで近似的な推定をおこなう方法を得ることにする。

また長波近似に基づく筆者らの方法は相対水深が大きいような短周期性の波に関しては精度が悪いので，その計算方法の一部を改良して非長波の場合にも適用できるようにする。以上の推定法の適用性を実験値によって検討するものである。

2．単層防波堤の推定法の要約

筆者らの単層についての理論的推定は，長波性の波を対象に境界面における質量とエネルギーの保存の条件を用いて伝達率・反射率を求めているもので，その際境界面におけるエネルギー損失を考慮しているところに特徴がある[2)~6)]。以下にその要約を示す。

1）透水層内の進行波

(1)　波形

$$\eta = \frac{H}{2}\sin(\sigma t - mx) = \frac{H_o}{2}e^{-nx}\cdot\sin(\sigma t - mx) \qquad \cdots(2.1)$$

たゞし，tは時間を表わしx軸は静水面上で波の進行方向を正としてとっており，HはxにおけるまたH_oは$x=0$における波高，$\sigma = 2\pi/T$でTは周期である。またm，nは次式で与えられる。

$$m = \sqrt{\frac{\tau\sigma^2}{2gh}\left[\sqrt{1+F^2}+1\right]} \qquad \cdots(2.2)$$

$$n = \sqrt{\frac{\tau\sigma^2}{2gh}\left[\sqrt{1+F^2}-1\right]} \qquad \cdots(2.3)$$

こゝでgは重力加速度，hは水深，τは慣性力の増加の度合を表わす係数でλを空隙率とするとき，$1 \leqq \tau \leqq 1+\lambda$，である[7),8)]。また$F$は$k$を透水係数として次式で表わされる無次元数である。

$$F = \lambda g/\tau k\sigma \qquad \cdots(2.4)$$

(2)　水粒子速度

$$u = \frac{\lambda\sigma H_o e^{-nx}}{2h\sqrt{m^2+n^2}}\cdot\sin(\sigma t - mx + \delta) \qquad \cdots(2.5)$$

ここで，

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{n}{m}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\sqrt{1+F^2}-1}{\sqrt{1+F^2}+1}\right] \quad \cdots(2.6)$$

(3) 単時間に単位時間に単位幅を横切る平均エネルギー量：

$$W = \frac{w_o \lambda \sigma m H^2}{8(m^2+n^2)} \quad \cdots(2.7)$$

2）異なる透水層の鉛直境界面での伝達率・反射率

入射波，反射波，伝達波の波形をそれぞれ次のようにおく。

$$\eta_i = \frac{H_i}{2}\sin(\sigma t - m_i x) \quad \cdots(2.8)$$

$$\eta_r = \frac{H_r}{2}\sin(\sigma t + m_r x + \alpha_r) \quad \cdots(2.9)$$

$$\eta_t = \frac{H_t}{2}\sin(\sigma t - m_t x + \alpha_t) \quad \cdots(2.10)$$

こゝで伝達率，反射率をそれぞれ $H_t/H_i = K_t$，$H_r/H_i = K_r$ として定義し，境界面における質量，エネルギーの保存の条件を用い，かつ圧力強度の連続性を仮定すると K_t, K_r は次のように得られる。

$$K_t = \left[\frac{(M_r+C_r)(1+C_r)}{C_t^2 M_r + M_t(1+j)C_r(1+C_r)+M_r C_r}\right]^{1/2} \quad \cdots(2.11)$$

$$K_r = \left[\frac{C_t^2 - M_t(1+j)(1+C_r)+C_r}{C_t^2 M_r + M_t(1+j)C_r(1+C_r)+M_r C_r}\right]^{1/2} \quad \cdots(2.12)$$

ここで $M_r = [m_r(m_i^2+n_i^2)/m_i(m_r^2+n_r^2)]$ $\cdots(2.13)$

$M_t = [\lambda_2 m_t(m_i^2+n_i^2)/\lambda_1 m_i(m_t^2+n_t^2)]$ $\cdots(2.14)$

$C_r = [\sqrt{m_i^2+n_i^2}\ /\ \sqrt{m_r^2+n_r^2}\ ]$ $\cdots(2.15)$

$C_t = [\lambda_2\sqrt{m_i^2+n_i^2}\ /\ \lambda_1\sqrt{m_t^2+n_t^2}\ ]$ $\cdots(2.16)$

上の四式中の m, n について下付 i, r, t はそれぞれ入射，反射，伝達の各波についてのものであることを示している。λ_1, λ_2 はそれぞれ入射側，伝達側の材料の空隙率である。また j は下式で与えられる境界面におけるエネルギー損失係数である。伝達波を基準とすると，f を定常流の損失係数として

$$j = \frac{8 f \sigma^2 H_t}{3\pi g h^2 \sqrt{m_t^2+n_t^2}\cdot m_t} \quad \cdots(2.17)$$

で表現される。

位相差 α_r, α_t は次式で与える。

$$\alpha_r = \cos^{-1}[\{K_t^2-(1+K_r^2)\}/2K_t] \quad \cdots(2.18)$$

$$\alpha_t = \cos^{-1}[\{(1+K_t^2)-K_r^2\}/2K_t] \quad \cdots(2.19)$$

3）直立透過性防波堤の伝達率・反射率

単層の直立防波堤は，前後の水域との間に二つの境界面をもつ透水層であるから，透水性物質の無い水域では，$\lambda=1.0$, $m=\sigma/\sqrt{gh}$, $n=0$，$\tau=1.0$ であることを考慮して次のように構造物としての伝達率 K_T, 反射率 K_R が得られる。なお傾斜堤（台形断面）の場合は，水中部分を同面積の直方体断面に仮定して計算する方法がとられている。

$$K_T = K_{tf}\cdot e^{-nB}\cdot K_{tb} \qquad \cdots(2.20)$$

$$K_R = [K_{rf}^2 + K_{tf}^2 K_{rb}^2 \overline{K}_{tf}^2 e^{-2(n_i+n_r)B} + 2K_{rf}\cdot K_{tf}\cdot K_{rb}\cdot \overline{K}_{tf}\cdot e^{-(n_i+n_r)B}$$

$$\cdot\cos(-2m_iB+\bar{\alpha}_{tf}+\alpha_{rb}+\alpha_{tf}-\alpha_{rf})]^{1/2} \qquad \cdots(2.21)$$

こゝでBは堤体幅員，また K_t, K_r, α_t, α_r についての下付き f, b はそれぞれ堤体の前後の表面での値を，また－は後退波に関するものを示す記号として用いられている。

4） 乱流の場合えの拡張

2), **3)** で示した伝達率・反射率の解は，堤体内の流れが層流である限りは，陽に求められる。しかし工学的に大切な波高の大きな波による堤体内の流れは乱流であるので，乱流状態にも解が得られるものでなくてはならない。水粒子速度が単調和波のものであるときには，透水係数 k に代って次式で定義した仮想的な等価透水係数 k_t を用いることで，乱流にも適用することができる。

$$k_t = k/[1+\frac{8}{3\pi}\cdot\varepsilon\cdot U^*] \qquad \cdots(2.22)$$

こゝで U^* は堤体の代表的な流速振幅である。筆者らは U^* を堤体中央の水粒子速度 u の振幅として採用している。ε は透水層の材質によって定まる係数である。k_t を求めるにはあらかじめ U^* を仮定し，k_t を求めそれによって計算した堤体内の流速から U^* を得て，最初に仮定した U^* と一致することを確かめることによっておこなわれる。

以上述べた推定法によって計算した結果は K_t は $h/L<0.1$ の範囲で実験値と良く近似しているが，K_R は充分な精度をもってはいない[5),6)]。

3．複層透過性防波堤の伝達率・反射率

複層の透過性防波堤は，Fig. 1のようにそれがいくつかの直方体の透過層の集合であるときには次のようにして推定できる。

(1) 伝達波は入射波が次々に各層を透過した後で，岸側水域に出現する一成分波として近似させる。すなわち一回でも反射した後に岸側に伝

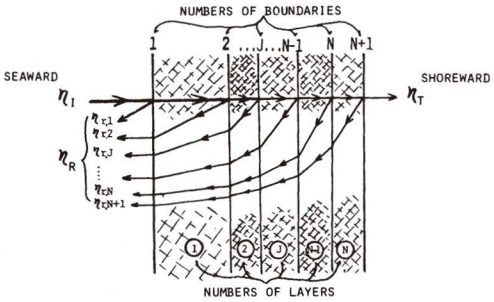


Fig.1 Sketch of Transmitted and Reflected Waves by Layered Porous Breakwater.

達する波は無視する。この方法は各層がある程度の厚さをもつときには妥当性がある。N層からなる防波堤のK_Tは，次のようになる。

$$K_T = K_{t,1} \cdot K_{t,2} \cdots\cdots K_{t,J} \cdots\cdots K_{t,N} \cdot K_{t,N+1} \cdot exp\{-(n_1B_1 + n_2B_2 + \cdots\cdots + n_JB_J + \cdots\cdots + n_NB_N)\} \quad \cdots(3.1)$$

(2) 次に反射波は(1)の伝達波が各境界面でもたらす各反射波成分が海側水域に出現したものの和とする。すなわち合成反射波の波形を次式であたえる。

$$\eta_R = \eta_{r,1} + \eta_{r,2} + \cdots\cdots + \eta_{r,J} + \cdots\cdots + \eta_{r,N} + \eta_{r,N+1} \quad \cdots(3.2)$$

ここで,

$$\eta_{r,1} = \frac{H_I}{2} K_{r,1} \cdot \sin(\sigma t + m_o x + \alpha_{r,1}), \quad m_o = 2\pi/L,$$

$$\vdots$$

$$\eta_{r,J} = \frac{H_I}{2} \cdot K_{t,1} \cdot K_{t,2} \cdots\cdots K_{t,J-1} \cdot K_{r,J} \cdot K_{tb,J-1} \cdots\cdots K_{tb,1} \cdot exp[-\{(n_{i,1} + n_{r,1})B_1 + (n_{i,2} + n_{r,2})B_2 + \cdots + (n_{i,J-1} + n_{r,J-1})B_{J-1}\} \cdot \sin\{\sigma t + m_o x - (m_{i,1} + m_{r,1})B_1 - \cdots\cdots - (m_{i,J-1} + m_{r,J-1})B_{J-1} + \alpha_{t,1} \cdots\cdots + \alpha_{t,i-1} + \alpha_{r,J} + \alpha_{tb,J-1} + \cdots\cdots + \alpha_{tb,1}\},$$

$$\vdots$$

$$\eta_{r,N+1} = \frac{H_I}{2} K_{t,1} \cdot K_{t,2} \cdots\cdots K_{t,J-1} \cdots\cdots K_{t,N} \cdot K_{r,N+1} \cdot K_{tb,N} \cdots\cdots K_{tb,1} \cdot exp[-\sum_1^N (n_{i,J} + n_{r,J})B_J] \cdot \sin\{\sigma t + m_o x - \sum_1^N (m_{i,J} + m_{r,J})B_J + \sum_1^N a_{t,J} + \alpha_{r,N} + \sum_1^N \alpha_{tb,J}\}.$$

したがって

$$K_R = \left|\frac{H_R}{H_I}\right| = [A_1{}^2 + A_2{}^2 + \cdots\cdots A_{N+1}^2 + 2\{A_1A_2\cos(\beta_1 - \beta_2) + A_1A_3\cos(\beta_1 - \beta_3) \cdots\cdots + A_JA_N\cos(\beta_J - \beta_N) \cdots\cdots + A_NA_{N+1}\cos(\beta_N - \beta_{N+1})\}]^{1/2} \quad \cdots(3.3)$$

ここで $A_1 = K_{r,1}$,

$$A_2 = K_{t,1} \cdot K_{tb,1} \cdot exp[-(n_{i,1} + n_{r,1})B_1],$$

$$\vdots$$

$$A_J = K_{t,1} \cdot K_{t,2} \cdots\cdots K_{t,J-1} \cdot K_{r,J} \cdot K_{tb,J-1} \cdots\cdots K_{tb,1} \cdot exp[-\sum_1^J (n_{i,J} + n_{r,J})B_J].$$

$$\vdots$$

$$A_{N+1} = K_{t,1} \cdot K_{t,2} \cdots K_{t,J} \cdots K_{t,N} \cdot K_{r,N+1} \cdot exp[-\sum_1^N (n_{i,J} + n_{r,J})B_J],$$

また $\beta_1 = \alpha_{r,1}$

$$\beta_2 = -(m_{i,1} + m_{r,1})B_1 + \alpha_{t,1} + \alpha_{r,2} + \alpha_{tb,1},$$

$$\vdots$$

$$\beta_J = [-\{(m_{i,1} + m_{r,1})B_1 + (m_{i,2} + m_{r,2})B_2 \cdots\cdots + (m_{i,J} + m_{r,J})B_J\} + \alpha_{t,1} + \alpha_{t,2} + \cdots\cdots + \alpha_{t,J-1} + \alpha_{r,J} + \alpha_{tb,J-1} + \cdots\cdots + \alpha_{tb,1}],$$

$$\vdots$$

$$\beta_N = [-\sum_1^N (m_{i,J} + m_{r,J})B_J + \sum_1^N \alpha_{t,J} + \alpha_{r,N+1} + \sum_N^1 \alpha_{tb,J}].$$

内部に透水性コアをもつ三層透過性防波堤を対象にした計算プログラムを付録に示してある。

4．非長波えの近似推定法

2，**3**章で述べた理論は入射波を長波として，K_TとK_Rを求めているものであり，この理論の適用範囲は h/L の小さい領域に限定される。この理論の適用範囲を拡張することを次のように試みる。式（2.2，3）の m, n に関する式中の共通項を取り出してそれを次のように書き改める。

$$\sqrt{\frac{\tau\sigma^2}{2gh}} = \frac{2\pi}{T\sqrt{gh}} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{2}}$$

$T\sqrt{gh}$は長波の波長であるから，これに代って通常の微小振幅波の波長，

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right). \qquad \cdots(4.1)$$

を用いることにするならば，非長波の場合の m，nの近似値が得られるはずである。すなわち式（2.2，3）の m，nに代って下のように定義される m^*，n^*を用いる。

$$m^* = \frac{2\pi}{L}\sqrt{\frac{\tau}{2}(\sqrt{1+F^2}+1)}\ , \qquad \cdots(4.2)$$

$$n^* = \frac{2\pi}{L}\sqrt{\frac{\tau}{2}(\sqrt{1+F^2}-1)}. \qquad \cdots(4.3)$$

非層流の場合の計算の時には，m，nで収れん計算を終えた後にK_T，K_Rを計算する段階でm^*，n^*を使用する。

5．実験値との比較

こゝでは内部に透水性コアをもつ三層透過性防波堤のモデルに関する実験値[1]に関して**4**の理論による計算を行ない両者の比較をする。

実験は長さ 18.5，幅 0.4，深さ 1.0 mの二次元規則波波動水路を用いて，水深 $h=50\ cm$ として行なわれた。モデル防波堤は Fig. 2 に示す傾斜堤を主体としたが，直立堤に関しても実験している。防波堤構成材料は表層に ϕ34 mm の立体格子を用い，コア材料としては砕石（中央粒径2.9 cm，$\lambda=0.43$）あるいは ϕ11mm の立体格子を用いた。立体格子はビニールパイプを

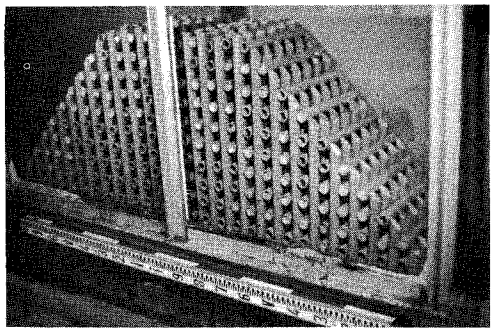


Photo.-1 Model Breakwater Made of Lattice (Trapezoidal Cross Section)

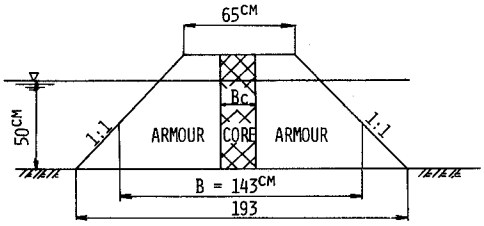


Fig. 2 Cross Section of Model Breakwaters.

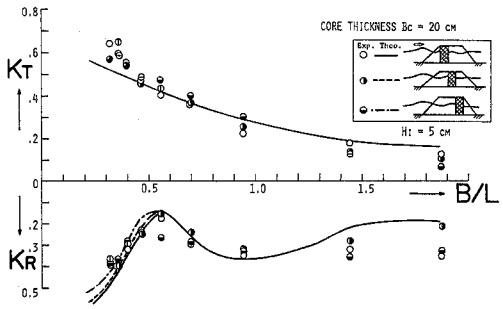


Fig. 3 Transmission and Reflection Coefficients versus Relative Width for Different Core Locations (Lattice core).

鉛直と水平に並べて接着して作製されたが，パイプ間の間隙はパイプ外圣と同じにしており，パイプを円柱とみなすときの立体格子の空隙率は $\lambda=0.607$ である[3),7)]。

立体格子を用いた防波堤モデルの例を写真で示す（Photo.－1）。

コアが砕石の場合のモデル防波堤の表層とコアの乱流抵抗係数の比は，通常の実物防波堤において表層に異形ブロック，コア材に石を用いた場合に近似した値をとっている。

理論計算に際しては **3** で記したように長方形断面におき代えている。

一般に K_T は単層，複層をとはず相対幅員 B/L の増大にともなって指数関数的に減少し，また比波高 H_I/h の増加とともに直線的に減少する傾向が明らかにされている。また K_R は単層の場合 B/L の値によって振動し，B/L^*（L^* は防波堤内部の平均波長）≒0.25 付近で最大値をとり，0.5 付近で極小値をとる。K_R は H_I/h の増加にともなってわずかに減少する。しかし複層の場合，隣り合う各層の境界面で反射波が出現するので，コアの厚さ，透水係数などによって，K_R の B/L による変化は複雑に変化することが予想される。

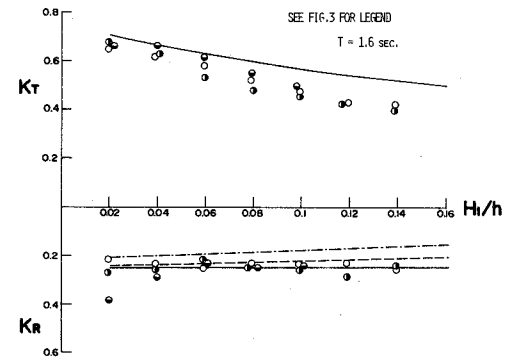


Fig. 4 Effect of Relative Wave Height on Transmission and Reflection Cofficients (Lattice Core).

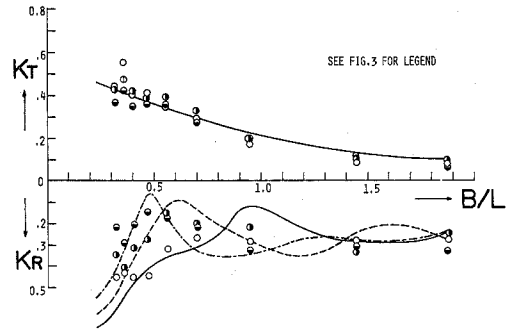


Fig. 5 Transmission and Reflection Coeffcients versus Relative Width for Different Core Locations (Rubble Core).

Fig. 3，4 は立体格子コアの傾斜堤の K_T，K_R をそれぞれ B/L および H_I/h を横軸にとり，

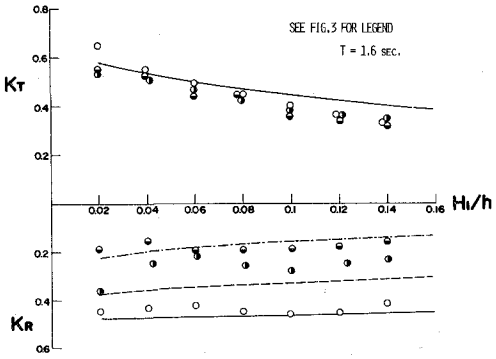


Fig. 6 Effect of Relative Wave Height on Transmission and Reflection Coefficients.

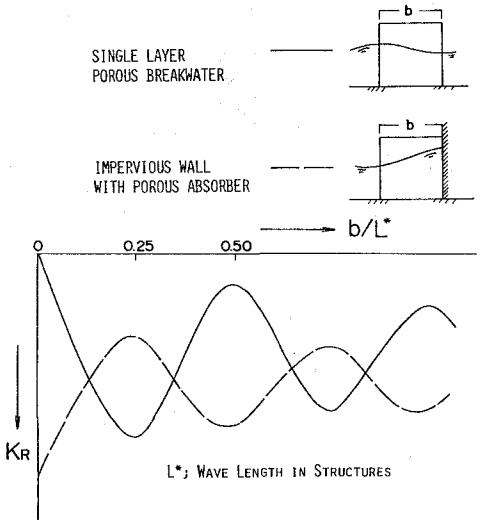


Fig. 7 Character of Reflection Coefficients Caused by Pervious Structures.

コア位置をほゞ20 cm ずつ変化させた場合について示してある。B/L による実験値の変化は前述の単層の場合の傾向が現われているが，これはコアと表層の透水性が大きく違わないので似た結果となってでているものである。たゞし，K_R の極小値の位置が少しずれて $B/L \fallingdotseq 0.55$ に出現している。理論値のK_Tは，コア位置に無関係にほとんど同じ値を与えるので実線のみで描いているが，実験値についてもほゞ同様なことが言え，$B/L > 0.4$ では実験値と合っている。K_R の理論値は$B/L < 1.4$ では良く一致している。H_I/h による理論値の傾向は，一般にH_I/hが増大するにつれて実験値に対して過大となる。これはH_I/hが大きい波は鉛直方向の速度成分によるエネルギー損失が無視できないことを意味している。K_RはH_I/hによってあまり変化しないが，コア位置による変化が実験値よりもけん著に現われている。

砕石コアの場合は，K_Tについては上記と同様な傾向であるが，K_Rは極小値の出現位置が単層の場合と相当に異なっている (Fig. 5,6)。これはコアの透水性が表層に比べてきわめて低いので，あたかも不透水壁であるかのような K_T の特性が現われているからである (Fig.7 参照)。K_T の理論値は実験値と良好な一致を示している。K_R はコア位置によって $B/L < 1.0$ の範囲でけん著に変動し，コア位置が後方になるほど低い K_Rを与えていることが認められるが，理論値はその傾向を良く把らえている。

以上，傾斜堤で内部に透水性コアをもつ三層透過性防波堤のモデル堤についての実験値についての理論値の傾向について述べたが，理論値は全般的に実験値とかなり良く近似していると認められる。

なお直立堤の場合の実験値の傾向は，直立堤の幅員が傾斜堤の水中平均幅員と同じ場合には，K_T は前者の方が若干小さくなる。K_R は極小値の出現する B/L の値が傾斜堤の場合よりもか

なり小さくなる。この原因は透水性の大きい直立構造物では，内部での境界面の間の振動が外力によって強く誘起されやすいことにあると考えられる。この結果，直立堤の方が傾斜堤よりも，理論 K_R の適合度が低いという興味のある結果がでている。

6. む　す　び

複層の透過性防波堤の伝達率と反射率を，単層の場合の重ね合せによって推定する理論を導びき，実験値と比較して傾斜堤のモデル関してはほぼ満足できる結果が得られた。直立堤で表層の抵抗が小さいと，境界条件が明確化するため境界面間の固有振動が励起され易く，それにともなって全体としての合成反射波の性質が変化する。このような場合は，本方法による推定は精度が低くなるが，ブロックあるいは石積の防波堤は実物ではほとんどが傾斜堤である。また，たとえ直立堤でも表層前面からの反射成分の割合がその他の境界面からの成分よりも相当に大きいから，本推定法は有効に使用されると思われる。

本論文は文部省科学研究費，自然災害特別研究(1)「海岸における波の制御に関する研究」（代表　京都大学工学部　岩垣雄一教授）の分担研究の成果の一部であることを付記する。また実験には 49 年度土木工学科卒業生，相馬英敏（現苫小牧高専），山田悦郎（現北海道函館土木現業所）の両君の協力を得ていることを記し，感謝の意を表する。

（昭和 51 年 5 月 22 日受理）

参　考　文　献

(1) 近藤・藤間・葛西：海岸工学論文集，**22**，495（1975）.
(2) Kondo, H. : **Coastal Engrg.in Japan, 13**,32 (1970).
(3) 近藤・藤間：海岸工学論文集，**17**，155（1970）.
(4) 近藤・藤間：海岸工学論文集，**18**，133（1971）.
(5) 近藤・藤間・浅野・海岸工学論文集，**19**，193（1972）.
(6) Kondo, H. and S. Toma : **Proc of Coastal Engrg. Conf.**, **13**, (III),ASCE, 1847 (1972).
(7) Madsen, O. S. : Jr. of Wats., Habs. and Coastal Eng. Div., Proc. ASCE, **100** (WW3), 169 (1974).
(8) Kondo, H : Jr. of Wats., Habs. and Coastal Eng. Div., Proc. ASCE, **101** (WW3), 300 (1975).

主　要　記　号

B：防波堤の幅員，傾斜堤の場合は静水面下の部分の平均幅員

H_I, H_R, H_T：防波堤に関する入射波高，反射波高，伝達波高

H_i, H_r, H_t：境界面における入射波高，反射波高，伝達波高

h：水　深

K_R, K_T：防波堤全体としての反射率（$=H_R/H_I$），伝達率（$=H_T/H_I$）

K_r, K_t：境界面における反射率（$=H_r/H_i$），伝達率（$=H_t/H_i$）

k：透水係数

k_t：乱流状態に対する仮想透水係数

L：波　長

m：透水層内の波の波数

T：周　期

u：水平方向水粒子速度

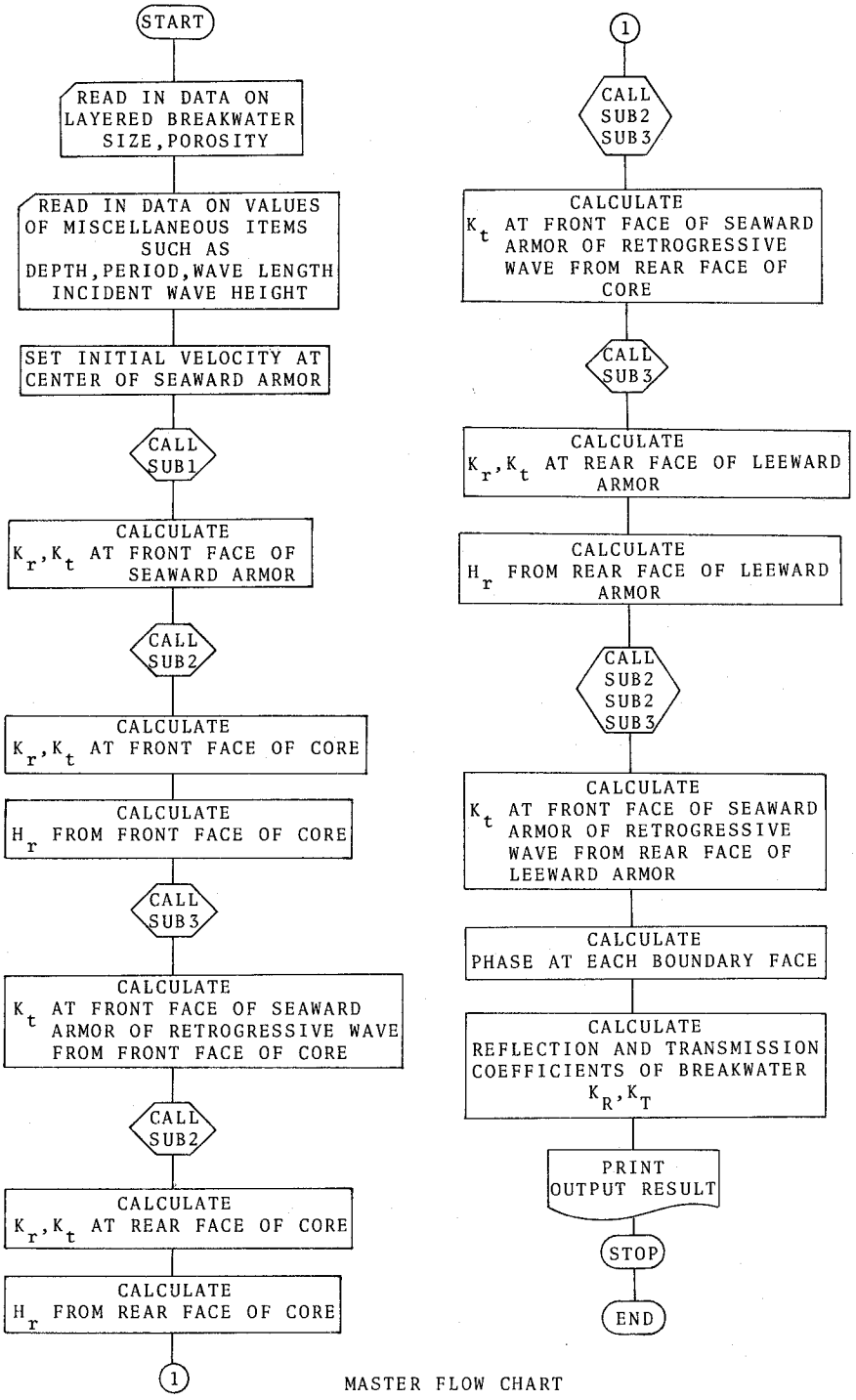
α_r，α_t：入射波に対する反射波，伝達波の位相

η：静水面からの水位

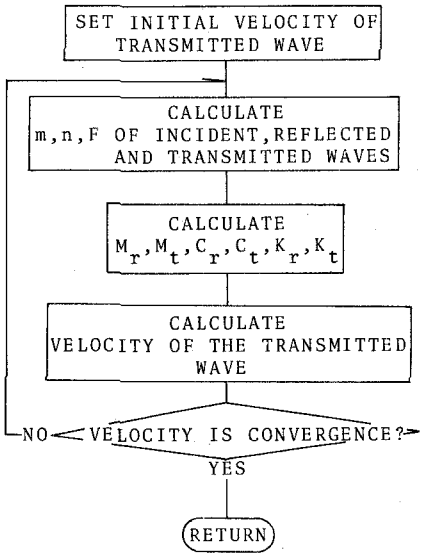
δ：透水層内の波の波形と水平水粒子速度の位相

λ：空隙率

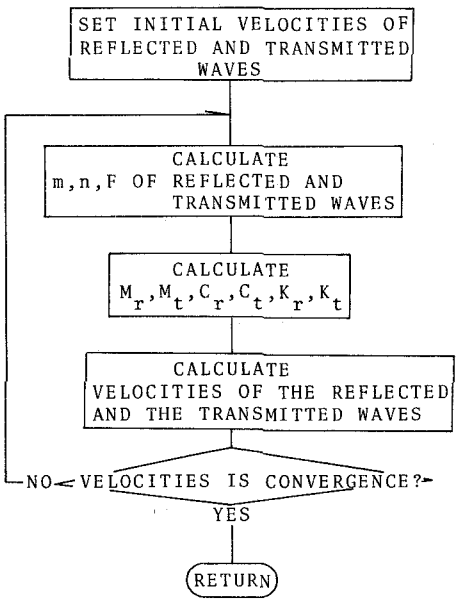
τ：慣性の増加を示す係数



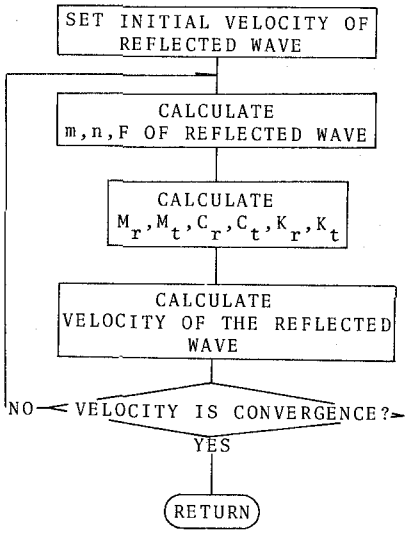
MASTER FLOW CHART



FLOW CHART - SUB1



FLOW CHART - SUB2



FLOW CHART - SUB3