

波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形 の評価法について

中 村 孝 幸*・小 野 正 順**

1. ま え が き

近年我が国では、沿岸海域の有効利用を目的として各種の形式の沖合防波堤の開発やその水理学的な機能に関する研究が進められつつある。このような沖合防波堤は、小型船舶の航路の維持や外海域との海水交換の促進などのため、離岸堤のように一定の開口部を設けて多列形式に設置されることが多い。そしてこのように空間的に配列された堤体群による波浪の制御効果は、透過・反射率で代表されるような1次元的な波変形の評価法のみで検討することはできず、開口部よりの回折波の影響や配列堤体と波との干渉効果に基づく横波共振の影響などを含めた平面的な波変形の特性を考慮して評価する必要があるものと考えられる。

このため、本研究では、平面的な波変形が生じる場合に重要となる透過波あるいは反射波の波向き特性やそれを考慮した波浪の制御効果の評価法およびその測定法について明らかにする。この際、既に著者ら(1988)が明らかにしている直立式の堤体列を対象にした解析法に基づき、波向き別のエネルギー比など平面的な波変形に関する特性量の理論的な算定法についても誘導する。そして、透過性および不透過性堤体列を用いた水理模型実験や数値実験を行い、本研究で提案する評価法の妥当性を、従来の波高分布に着目する方法などとの比較から検討するものである。

2. 平面的な波変形の算定法

2.1 解析法の概要

ここでは、解析モデルとして、一定水深 h の流体場に直立式の堤体構造物が、平面的に一定間隔 λ で方 y 向に規則的に配列されており、これに平面波が配列軸の法線方向 (x 方向) と角度 θ をなして作用する場合を想定した。波動運動は微小振幅波理論により表現されるものとする。入射波の速度ポテンシャル Φ_I は、次式のよう

$$\Phi_I(x, y, z; t) = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} \times e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $(k_x, k_y) = (k \cos \theta, k \sin \theta)$ 、 k : 波数、 g : 重力加速度、 H : 入射波の波高、 ω : 角振動数 ($= 2\pi/T$, T : 周期) である。

このとき、堤体列による回折波の速度ポテンシャル Φ_D は、著者ら(1988)により明らかにされているように Green 関数法に基づき式 (2) のように表せる。

$$\Phi_D(x, y, z; t) = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{i(k_y y - \omega t)} \int_S f(X, Y) G(x, y; X, Y) dS(X, Y) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S : 堤体列の中の1堤体の断面曲線、 (X, Y) : S 上の座標、 f : 湧き出し強さの分布関数で、堤体表面における不透過条件から決定される。また、 G は上述したような波動場中の Green 関数で、式 (3) により与えられる。

$$G(x, y; X, Y) = \sum_{n=N_-}^{N_+} -\frac{i \exp\{iq_n(y-Y)\}}{2\lambda k_n} e^{ik_n|x-X|} + \sum_{\substack{n=-\infty \\ N < N_-, N > N_+}}^{+\infty} \frac{i \exp\{iq_n(y-Y)\}}{2\lambda \mu_n} e^{-\mu_n|x-X|} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$k_n = \sqrt{k^2 - (k_y + q_n)^2}, \quad \mu_n = \sqrt{(k_y + q_n)^2 - k^2} \dots\dots\dots (4)$$

また、 $q_n = 2n\pi/\lambda$ で、 N_+ と N_- は各々 k_n が実数値となる n の最大値と最小値である。

式(3)の右辺第1, 2項は、それぞれ進行波モード及び減衰定常波モードの成分を表す。そして、この Green 関数の表示式から、堤体列による回折波には、一般に複数個の互いに波向きの異なる進行波成分が含まれることがわかる。従って、例えば長峰性の波が作用したとしても、堤体列により方向分散が生じ、その周辺場には短峰性の波面形状が現れることになる。そして、入射波と波向きの異なる進行波成分が複数個現れるか否かは、より高次の横波共振が出現するかどうかに関係しており、この共振の発生条件は、式 (5) で与えられる。

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科
** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

$$\lambda/L = n/(1 \pm \sin \theta) \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

ここに、 L ：波長である。なお、この条件は、式(4)の $k_n=0$ を考えて求められ、 $n \geq 1$ のときに入射波と波向きの異なる回折波が現れることになる。

2.2 平面的な波変形を表す特性量

a) 透過率 C_T と反射率 C_R ：これらの量は、長峰性の1次元的な波変形が生じる場合の評価によく利用されているが、平面的な波変形が生じる場合にも定義することができる。これは、堤体の配列方向 (y 方向) に平均化された x 方向への透過波および反射波のエネルギーフラックス $(\dot{E}_T)_x$, $(\dot{E}_R)_x$ に着目して、式(6)により求められる。

$$C_T = \sqrt{(\dot{E}_T)_x / (\dot{E}_I)_x}, \quad C_R = \sqrt{(\dot{E}_R)_x / (\dot{E}_I)_x} \quad (6)$$

ここに、 $(\dot{E}_I)_x$ ：入射波の x 方向へのエネルギーフラックス ($= \rho g H^2 C_g (k_x/k)/8$, ρ ：流体密度, C_g ：群速度) である。

C_T, C_R の具体的な算定式は、式(3)の Green 関数を用いて書き下すことができるが、 C_T のみを示すと式(7)のようである。

$$C_T = \sqrt{1 + 2 \operatorname{Re} \left\{ e^{-ik_x x} \int_S f g_{p0} dS \right\} + \left| \int_S f g_{p0} dS \right|^2 + \sum_{n=N_+}^{N_+} \left| \int_S f g_{pn} dS \right|^2 \frac{k_n}{k_x} \right)} \quad (7)$$

ここに、 g_{pn} は、Green 関数中の進行波成分に係する量で次式で定義される。

$$g_{pn} = -i e^{i(k_n |x-X| - q_n Y)} / (2\lambda k_n) \quad (8)$$

式(7)の平方根中のはじめの3項が、入射波と同じ波向きをもつ成分 (以下直進行波成分と称す) からの、また第4項目が入射波と異なる波向き成分 (以下斜波成分と称す) からの寄与を各々表す。

式(6)で定義されるような C_T, C_R は、1次元的な波変形が生じる場合と同様に $C_T^2 + C_R^2 = 1$ の関係が成立するため、算定精度の検証には便利と言える。しかしながら、 C_T, C_R には、 y 方向へのエネルギーフラックスが考慮されていないため、横波共振などの平面的な波変形の実態を表すには不十分と考えられる。

b) 堤体列方向における波高比の rms 値：平面的な波変形が生じる場合、上述したような C_T を実験的に求めることは一般に容易でない。ここでは、 C_T より観測しやすい特性量として式(9)で求められる透過波高 H_T と入射波高 H の波高比の堤体列方向における r.m.s. 値 K_T を定義した。

$$K_T = \sqrt{\left\{ \int_0^\lambda H_T^2 dy / \lambda \right\} / H} \quad (9)$$

この K_T の具体的な算定式は、Green 関数の表示式を

参照すると式(10)のように導ける。

$$K_T = \sqrt{1 + \operatorname{Re} \left\{ e^{-ik_x x} \int_S f g_{p0} dS \right\} + \left| \int_S f g_{p0} dS \right|^2 + \sum_{n=N_+}^{N_+} \left| \int_S f g_{pn} dS \right|^2} \quad (10)$$

この式の平方根中の第4項が、式(7)と同様に斜波成分からの寄与を表す。そして、式(10)と式(7)との比較から、 K_T は、 C_T のように限定した方向へのエネルギーフラックスに着目したものでなく、全ての方向成分波を考慮して定義される量と言えよう。従って、現象的に波高値が重要となる場合には、この波高比の rms 値で評価する方がより適切と考えられる。なお、 K_T と C_T とは、1次元的な波変形が生じる条件下 (直角入射波の場合 $\lambda/L < 1.0$) で一致するものであることを付記しておく。

c) 波向きに着目した成分波のエネルギー比：上記の a), b) で定義した特性量は、算定式に見られるように波向きの異なる各成分波を平均化していることから、方向スペクトルのように波向きに着目した検討が行えない。ここでは、透過波を波向きに着目して直進行波成分と斜波成分との2つに分離し、各成分波の卓越度が検討できるような特性量を定義する。

さて、透過波の堤体列方向にわたる平均エネルギーを E_T とすると、これは式(10)の K_T の2乗と入射波のエネルギー $E_I (= \rho g H^2/8)$ との積で与えられる。いまこの E_T を、直進行波成分 E_{T0} と斜波成分の E_{T1} に分離し、各成分波の全透過波に対するエネルギー比 $T_i (= E_{Ti}/E_T, i=0, 1)$ を求めると式(11), (12)のように導ける。

$$T_0 = 1 + 2 \operatorname{Re} \left\{ e^{-ik_x x} \int_S f g_{p0} dS \right\} + \left| \int_S f g_{p0} dS \right|^2 \quad (11)$$

$$T_1 = \sum_{n=N_+}^{N_+} \left| \int_S f g_{pn} dS \right|^2 \quad (12)$$

3. 実験装置および実験方法

3.1 1量実験の概要

本実験では、堤体列への直角入射波の条件を想定して行った。この場合、無限配列された堤体まわりの波動場は、鏡像原理により隣接する堤体の中心間距離 λ に等しい幅の水路内に一つの堤体を設置することにより実現できる。実験に用いた水槽は、幅 1.0 m、高さ 1.25 m、長さ 28 m の2次元造波水槽である。堤体の設置水深は 35 cm と一定にし、入射波の波高についても 5 cm 程度とした。また、入射波の周期 T は、 $0.4 < \lambda/L < 1.5$ の範囲で、12種類に変化せしめた。

反射・透過率の測定は、1次元的な波変形を生じる $\lambda/L < 1.0$ の波条件に対してのみ行った。一方、平面的な波

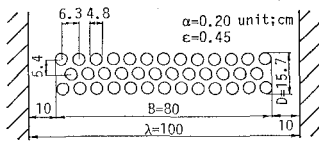


図-1 透過性堤体の模型

変形が生じる $\lambda/L > 1.0$ の波条件の場合、堤体の透過波側で離岸距離を各種に変化せしめ、水路横断方向の異なる4地点で透過波を同時測定した。そして、透過波側での波高分布や K_T および T_i ($i=0, 1$) の推定に用いた。なお、 T_i を求めるために必要となる各波向き成分への分解法については後述する。

多列式防波堤の模型堤体には、図-1 に示すような外径 4.8 cm の塩ビパイプを千鳥に空隙率 $\varepsilon=0.45$ で配列した透過性のパイプ堤およびこれと同じ外郭寸法（堤体長 $B=80$ cm, 堤体厚 $D=16$ cm）を持つ不透過性の矩形堤の2種類を用いた。なお、これら堤体列間の開口率 α は、20% とした。

3.2 各波向き成分波への分解法

ここでは、実験と同様に堤体列の透過波側において離岸距離 $x=\hat{x}$ の位置で堤体の配列方向 (y 方向) に λ にわたって複数点で透過波を同時測定したものとする。ただし、 $\hat{x}$ としては、減衰定常波成分が無視できるような堤体より1波長程度以上離れた位置とする。また、透過波は、微小振幅波理論により表されるものと仮定する。

いま測定された透過波の水面変動を $\eta(\hat{x}, y, t)$ とすると、これは y 方向に λ の周期性を持つことから式(13)のように Fourier 展開表示できる。

$$\eta(\hat{x}, y, t) = a_0(\hat{x}, t) + \sum_{n=1}^M a_n(\hat{x}, t) \cos(q_n y) + \sum_{n=1}^M b_n(\hat{x}, t) \sin(q_n y) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $M: 2n\pi/\lambda \leq k$ を満足する n の最大値である。

そして、空間的な変動の振幅を表す a_n, b_n は、 $n=0$ の場合を除き、 y 方向の波数成分が q_n と $-q_n$ の両方向成分波を含むことから、これらの正負を区別して式(14)、(15)のように表せる。

$$a_n(\hat{x}, t) = a_n^+(\hat{x}, t) + a_n^-(\hat{x}, t) \quad (n \neq 0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$b_n(\hat{x}, t) = b_n^+(\hat{x}, t) + b_n^-(\hat{x}, t) \quad (n \neq 0) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、上添字の±は、 y 方向の波数成分が正負のものに対応する。

また、 $a_n^\pm, b_n^\pm$ は、角振動数 ω の単一調和成分波を想定すると、式(3)の G の表示式などを参照して、次式のように表すことができる。

$$a_0(\hat{x}, t) = \zeta_0 \cos(\omega t - k\hat{x} + \delta_0) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\begin{cases} a_n^\pm(\hat{x}, t) \\ b_n^\pm(\hat{x}, t) \end{cases} = \zeta_n^\pm \begin{cases} \cos \\ \sin \end{cases} (\omega t - k_n\hat{x} + \delta_n^\pm) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 ζ_0, δ_0 : 直進行波成分の振幅および位相差、 $\zeta_n^\pm, \delta_n^\pm$: y 方向の波数成分が q_n と $-q_n$ の斜波成分の振幅および位相差で、これらが最終的に求めたい量である。

一方、 a_n, b_n は、時間に関する調和解析結果のように式(18)、(19)で表すこともできる。

$$a_n(\hat{x}, t) = (A_0)_n \cos(\omega t) + (A_s)_n \sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$b_n(\hat{x}, t) = (B_0)_n \cos(\omega t) + (B_s)_n \sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

そして、式(17)を式(14)、(15)に代入して式(18)、(19)との比較を行うと、 $\zeta_0, \zeta_n^\pm$ は、 $(A_0)_n$ や $(A_s)_n$ などと次式で示すような関係のあることが導ける。

$$\zeta_n^\pm = \sqrt{\left\{ \frac{(A_0)_n \pm (B_s)_n}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{(A_s)_n \mp (B_0)_n}{2} \right\}^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 $\zeta_0 = \zeta_{0+} + \zeta_{0-}$ である。

したがって、各波向き成分の振幅を求めるには、最初に式(13)で示すように空間的に調和解析を行い、その結果をさらに時間的に調和解析して式(20)の関係式に代入すればよい。なお、本実験のように対称物体に直角入射波が作用する場合には、式(15)の $b_n=0$ となり、解析も測定もより簡単になる。また、反射波についても、同様な分解法で斜波成分が抽出でき、残りの直進行波成分については、入反射波の分離推定法などを利用して解析できる。

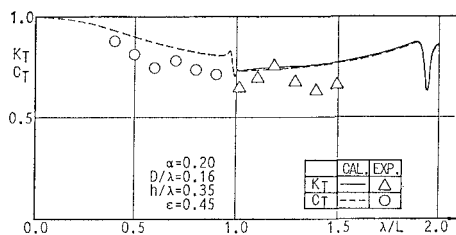
4. 各堤体列まわりの波変形

4.1 透過性堤体と不透過性堤体との比較

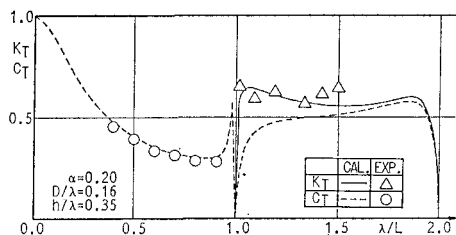
図-2(a), (b)は、各々透過性のパイプ堤体列およびそれと同じ外郭寸法を有する不透過性の矩形堤体列の C_T ならびに K_T の実験結果と算定結果との比較を λ/L の変化で示す。なお、平面的な波変形が生じる $\lambda/L > 1.0$ の範囲では、 C_T と K_T の両算定結果がプロットしてある。実験結果と算定結果を比較すると、パイプ堤体列の C_T に多少の差がみられるが、両者はほぼ一致している。

また図-3(a), (b)は、平面的な波変形が生じる条件下 ($\lambda/L > 1.0$) での図-2(a), (b)に対応する透過波の波向き特性量 T_i ($i=0, 1$) を示す。この場合も、実験結果と算定結果は、両堤体列について比較的よく一致している。

次に、これら2つの堤体列の波浪制御効果について比較してみると、図-2(a), (b)に見られるように1次元的な波変形となる $\lambda/L < 1.0$ の範囲では、一般的に予想されるように不透過性の矩形堤体列の C_T がパイプ堤体列のそれよりも小さく、ほぼ1/2程度になっている。しかしながら、平面的な波変形が生じる $\lambda/L > 1.0$ の範囲では、両堤体列の K_T は、ほぼ同程度の大きさで、これは、図-3(b)からわかるように、矩形堤体列の場合、 $\lambda/L > 1.0$ の範囲で斜波成分 T_i が卓越し、開口部を通り抜ける波が増大することによる。一方、パイプ堤体列の場合、

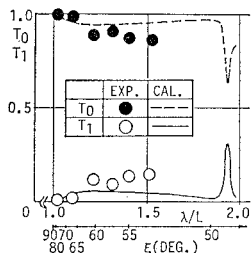


(a) 透過性堤体列

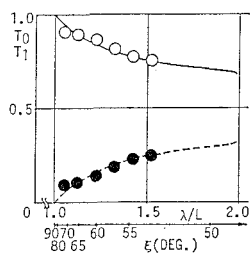


(b) 不透透性堤体列

図-2 堤体の構造形式の違いによる波高制御効果の比較

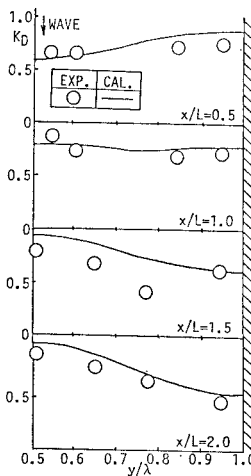


(a) 透過性堤体列

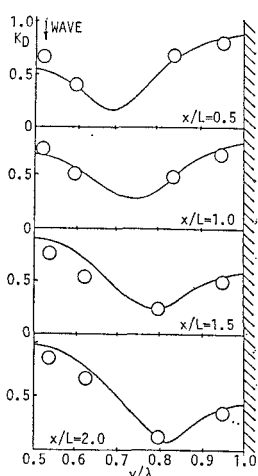


(b) 不透透性堤体列

図-3 堤体の構造形式の違いによる波向き別のエネルギー比の比較



(a) 透過性堤体列



(b) 不透透性堤体列

図-4 堤体の構造形式の違いによる透過波側での波高分布の比較 ($\lambda/L=1.5$)

図-3(a)に見られるように、ほぼ T_0 が 1 に近く、逆に直進波成分が卓越している。なお、これら図中の第 2 横軸 ξ は、斜波成分の波向き角度を表す。そして、図-2 (b) に見られるように、斜波成分の卓越する条件下で、 C_T は、 K_T を下回り、横波の卓越する場合に C_T で波高制御効果を評価すると実際の波高値を過小評価するなど不十分であることがわかる。

一方、図-4 (a), (b) は、代表例として $\lambda/L=1.5$ の波条件下でのパイプ堤体列と矩形堤体列の透過波側における波高分布を回折係数 K_D の水路幅方向への分布で表す。

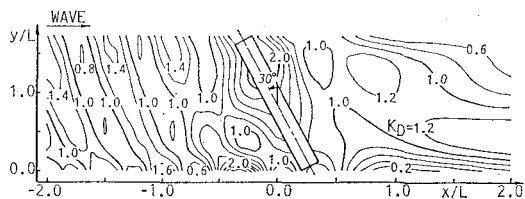
これらの図の比較から、矩形堤体列の方が、パイプ堤体列の場合よりも横方向への波高変動が大きく、図-3 で示す両堤体列による透過波の波向き特性が、平面的な波高分布に現れていることがわかる。従って、図-4 で示すような波高分布の特性は、図-2 の波高比の rms 値および図-3 の波向き別のエネルギー比の両者を用いても十分に把握でき、しかもこれら 2 つの特性量に基づく評価法の方が定量的な判定が可能で、しかも簡潔に行えるなどより合理的なものと言えよう。

4.2 傾斜配置した矩形堤体列まわりの波変形

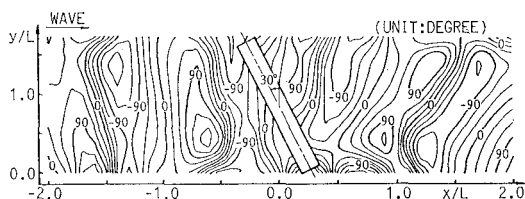
図-5, 6 は、図中に示すように不透透矩形堤の堤体軸を配列方向軸より 30° 傾斜させて配置した場合の波高分布および波の同位相線の算定結果をコンターで示す。このとき、入射波は配列軸の法線方向より作用し、 $\lambda/L=1.73$ と平面的な波変形が生じる条件になっている。また、隣接堤体との外縁距離は配列方向軸に射影した時に 0 で、堤体幅 D と堤体長 B との比は、1:11 である。

そして、これらの図から、水位変動の極大値の分布や波の進行方向などが概略的に推定できる。例えば、図-6 の堤体の透過波側に着目すると、波の同位相線は、ほぼ右上がりになっており、透過波の主卓越方向がこれと直交する方向と推定される。また、図-5 から、波高の最大・最小値が現れる位置などがわかる。しかしながら、これらの図に基づき、各種の波向き成分で構成される透過波の方向特性を把握することは困難で、透過波の代表波高としてどの波高値を選択すべきかについても判定し難い。

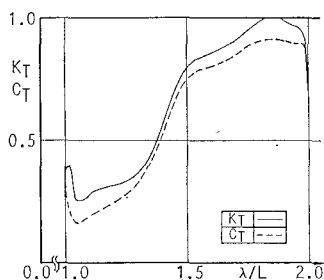
一方、図-7, 8 は、それぞれ上記の堤体列の透過波側における波高特性量 C_T , K_T および波向き特性量 T_i ($i=0, 1$) を示す。なお、 T_1 については、左右に向かう斜波成分の大きさが異なるため右斜波成分 T_{1R} と左斜波成分



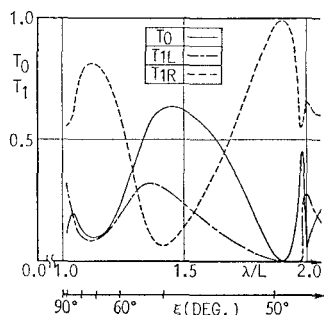
図—5 傾斜配置した堤体列まわりの波高分布
(傾斜角度 30° , $\lambda/L=1.73$, $B/D=10.97$, $B/\lambda=1.10$, $D/\lambda=0.10$)



図—6 傾斜配置した堤体列まわりの波の同位相線
(傾斜角度 30° , $\lambda/L=1.73$, $B/D=10.97$, $B/\lambda=1.10$, $D/\lambda=0.10$)



図—7 傾斜配置した堤体列の C_T および K_T



図—8 傾斜配置した堤体列による透過波の波向き特性

分 T_{1L} の2つに区別して表示した. 図—8において, 上記のコンター図の条件の場合に相当する $\lambda/L=1.73$ の値に着目すると, 右斜波成分 T_{1R} が6割程度と卓越するものの直進行波成分 T_0 も3割程度含まれることなど透過波の波向き特性が的確に評価できることがわかる. そして, この場合, 左斜波成分 T_{1L} がほぼ無視できる大きさであることから, 透過波の主卓越方向としては, 図—6に見られるような結果となることが理解される. また, 図—7に着目すると, この条件下での K_T は, 0.9を上回る値となっており, 図—5の空間的な波高変動からも推測されるように堤体列による波高制御効果はほとんど期待できないものとなっている.

さらに図—7, 8より, 傾斜配置した矩形堤体列による波高制御効果は, λ/L の値が1.1付近でよいことや, 堤体列による波向きの変化効果は, 同様の値が1.2および1.9付近で最も著しいことなどが容易に認められる. したがって, これら2枚の図を用いて堤体列の波浪制御効果が総合的に判定でき, 図—6, 7のような波高分布などと比較すると算定労力を大幅に軽減して的確な評価が可能になるものと結論される.

4. 結 語

i) 堤体の配列方向における波高のrms値および波向き別のエネルギー比に着目する評価法は, 波高分布に着目するそれに比較して, 計算や測定のための労力を大幅に軽減して波向き特性などが的確に検討できるなどより合理的である.

ii) 堤体の法線方向へのエネルギーフラックス成分に着目して定義される透過・反射率は, 平面的な波変形が生じる条件下では, 実際の波高値を過小評価するなど不十分で, 上述したような波高比のrms値を用いる方が妥当である.

iii) 堤体列まわりの平面的な波変形の評価に用いる波向き別のエネルギー比や波高比のrms値は, Green関数法に基づく算定法を用いてほぼ予測できる.

参 考 文 献

中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 527~531.