

透過性防波堤付近の波高計算への
数値波動解析法について

梅田 眞三郎・筧 源 亮

Calculation Method to Breakwater
with Arbitrary Peameability Power
in Numerical Analysis Method of Wave Propagation

Shinzaburo UMEDA and Motoaki YANO

ABSTRACT

A new calculation method elsewhere was introduced to wave diffraction and refraction for the boundary of arbitrary reflection power in numerical analysis method of wave propagation.

In this paper, a calculation method is applied to breakwater with arbitrary peameability power and examples are shown.

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート函塊を主体とした不透水性壁体構造にかわってスリットやブロック形状の透過性の防波堤などの構造物が実用化されるようになり、反射波、伝達波の減衰に伴う水面の静穏化にかなりの効果を発揮しているようである。この種の防波堤をもつ港湾内の波高分布の数値計算方法には種々の方法があるが、そのなかで谷本ら¹⁾による数値波動解析法は比較的簡便で実用的な方法で、任意反射率を有する護岸などによる港湾内²⁾における波高分布を求める方法が確立され、さらに酒井らは、これを拡張し任意透過率を有する防波堤に対しての波高計算を行なっている。しかし、それぞれの計算においては透過率と反射率の値いが等しい付近の検討は今だ十分なされているとは言い難い。そこで本研究では透過性防波堤を有する港内の波高分布を求める数値波動解析法において境界流量の算定方法を工夫して、0~1の間の任意透過率にて解を求められるようにし、検討を行なった。

2. 任意透過率境界に対する数値波動解析法

計算の基礎となる波動方程式は、流速を海底から水面まで積分した線流量の形で表わして、次式のようになる

$$\left. \begin{aligned} \partial Q_x / \partial t &= -c^2 \cdot \partial \eta / \partial x, \\ \partial Q_y / \partial t &= -c^2 \cdot \partial \eta / \partial y, \\ \partial \eta / \partial t &= -\partial Q_x / \partial x - \partial Q_y / \partial y \end{aligned} \right\} \dots (2.1)$$

ここに

$$Q_x = \int_{-h}^0 u dz, \quad Q_y = \int_{-h}^0 v dz \dots (2.2)$$

$$c^2 = g/k \cdot \tanh kh \dots (2.3)$$

ただし、 x, y は静水面における直角座標、 z はそれと直角上向きにとった座標であり、 η は波動による水位、 u, v はそれぞれ x 方向、 y 方向の水粒子速度成分である。また h は水深、 $k (= 2\pi/L, L:波長)$ は波数である。

これらの基礎式の差分化により初期条件および境界条件によって解を求める数値波動解析法の特徴は、境界上の値を直接計算せず、その手前の格子点における値の時間的变化から求められるところにある。

今、ある時間の透過性防波堤境界の前後の線流量をそれぞれ $Q_{10}^{N\Delta t}, Q_{20}^{N\Delta t}$ とし、境界“10”の手前の格子点で

の線流量を Q_1 とすると、谷本らおよび酒井らによれば次の関係式で境界流量が算定される。

$$Q_{10}^{N\Delta t} = A \times Q_1^{N\Delta t - \tau} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} Q_{20}^{N\Delta t} &= \frac{Kt}{1-K_r} \times Q_{10}^{N\Delta t - \tau_x} \\ &= B \times Q_{10}^{N\Delta t - \tau_x} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、 A および B は防波堤の反射率 K_r 、透過率 K_t に関する係数で、ここではそれぞれを便宜上入射係数と透過係数と名づける。 τ と τ_x はそれぞれ入射と透過による時間遅れを表わし、入射時間遅れ、透過時間遅れと名づける。なお任意反射率境界に対しては、谷本らは A と τ を次のように表わしている。

$$A = (1-K_r) / \{ (1+K_r)^2 \sin^2(k\Delta s \sin\beta) + (1-K_r)^2 \cos^2(k\Delta s \sin\beta) \}^{1/2} \dots (2.6)$$

$$\tau = \frac{1}{\sigma} \tan^{-1} \{ (1+K_r) / (1-K_r) \cdot \tan(k\Delta s \sin\beta) \} \dots (2.7)$$

ここで、 Δs は格子間隔、 β は入射角、 σ は角振動数である。また任意透過率境界に対しては、酒井らは τ_x を防波堤幅 W と堤体内における透過波の波速 C_x を用いて、次のように表わしている。

$$\tau_x = W \sin \beta / C_x \dots (2.8)$$

なお、以下の計算においては C_x は、境界前面波速 c を用いて

$$C_x = K_t \times c \dots (2.9)$$

とした。

このような任意透過率境界に谷本らによる無反射性沖側境界の計算法を導入して、種々の透過率で一様水深の1次元水路に対する計算を実施した。その結果、透過率が小さいときあるいは大きいときには、反射および透過波高はそれぞれの反射率あるいは透過率に応じた波高を示す。しかし、透過率と反射率が近づくにつれて図-1に示すように境界前後面における波形がくずれだして振動する結果となった。

この原因を考えるにあたって、(2.6)から(2.9)式で示される防波堤境界における係数と時間遅れの位相差の変化をみると、図-2のようになる。この図に関係する波長 L 、周期 T 、水深 h 、格子間隔 Δs 、防波堤幅 W および入射角 β は、以下の検討における計算条件の一例で次のような値である。

$$L = 108.98 \text{ m}$$

$T = 10.0 \text{ sec}$
 $h = 15.0 \text{ m}$
 $\Delta s = W = 3.41 \text{ m}$
 $\beta = 9^\circ$

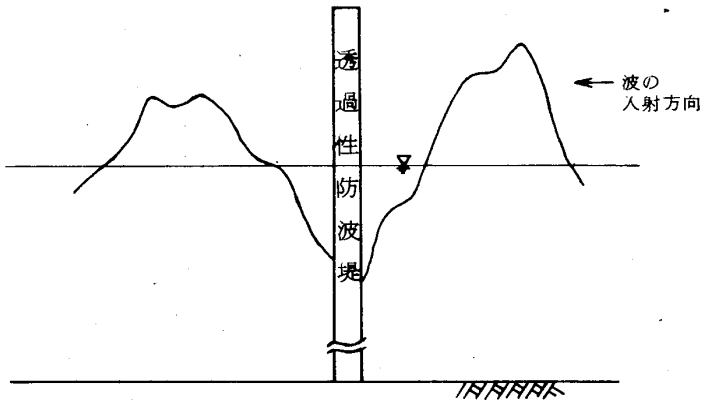


図-1 透過性防波堤付近の波高

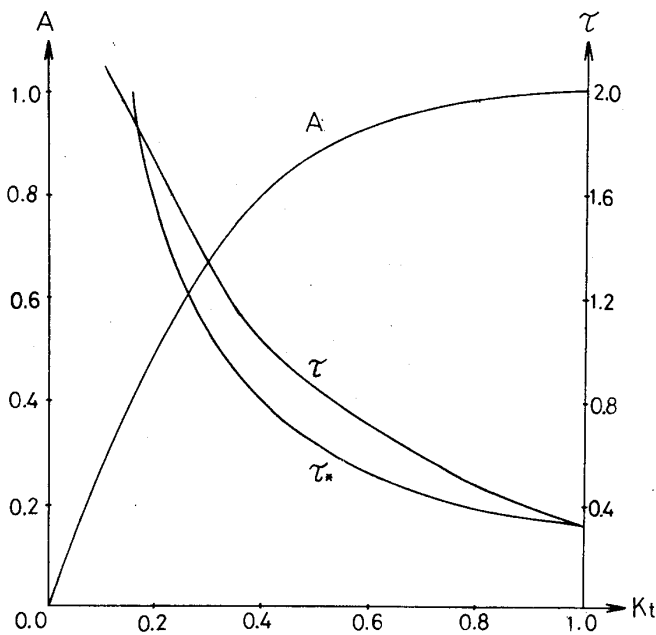


図-2 透過率に対する入射係数, 入射時間遅れおよび透過時間遅れの変化

(2.4)式で数値波動解析法の特徴が代表されているように, 境界での流量補正係数の形をとるAと入射時間遅れ τ の調整によって任意反射率境界に対する流量が算定されている。これに(2.5)式の境界流量を考慮することによって任意透過率境界に対する流量を算定することができる。しかし(2.5)式における透過係数Bは実質1であるため, 透過後の流量は透過前の流量の時間的変化からのみ計算を行なっていることになっている。すなわち透過後の境界流量は, 入射および透過時間遅れである位相差 τ と τ_x の影響も受けるが(2.4)式の入射係数Aの影響が大きいことが予想される。

このようなことから前述の任意透過率境界に対して, 透過率と反射率がほぼ等しい場合に十分な結果が得られなかったのは, 防波堤境界における入射あるいは透過係数や位相差の検討が十分になされていないと考え, 次のような入射および透過係数と位相差の組合せで種々の検討を試みた。

なお前述のように反射および透過波高は, それぞれの反射率や透過率に比例するものと考え, 以下の検討においてもその大小を比較するにあたってはそのような考えに基づいている。

3. 任意透過率境界の計算法に対する検討

(2.6), (2.7)式における入射係数Aと透過時間遅れ τ は, 境界上および境界の手前の格子点での線流量の比較から決められたものであるが, ここでは図-2を参考に次のような入射係数A, 透過係数Bおよび入射時間遅れ τ , 透過時間遅れ τ_x を設定して検討を試みた。

$$\text{入射係数 } A : A_1 = (1 - K_r) / \{ (1 + K_r)^2 \sin^2(k\Delta s) + (1 - K_r)^2 \cos^2(k\Delta s) \}^{1/2} \dots (3.1)$$

$$A_2 = Kt \dots (3.2)$$

$$A_3 = (1 - K_r)^2 / \{ (1 + K_r)^2 \sin^2(k\Delta s) + (1 - K_r)^2 \cos^2(k\Delta s) \}^{1/2} \dots (3.3)$$

$$\text{透過係数 } B : B_1 = \frac{Kt}{1 - K_r} = 1.0 \dots (3.4)$$

$$B_2 = Kt \dots (3.5)$$

$$\text{入射時間遅れ } \tau : \tau_1 = \frac{1}{\sigma} \tan^{-1} \left\{ \frac{1 + K_r}{1 - K_r} \tan(k\Delta s) \right\} \dots (3.6)$$

$$\tau_2 = \Delta t \dots (3.7)$$

$$\text{透過時間遅れ } \tau_x : \tau_{x1} = W / C_x \dots (3.8)$$

$$\tau_{x2} = \Delta t \dots (3.9)$$

ここで設定した入射係数Aの A_1 , A_2 および A_3 の透過率に対する変化の状況を, 図-2と同じ計算条件で図示すると図-3のようになる。これらの入射係数と(3.4)~(3.9)式の透過係数や時間遅れを表-1のように組合わせて, 透過率の変化に対する反射および透過波

高の変動状況を調べた。以下の検討においては、波の諸元に関しては前述の図-2におけるものと同じで、時間間隔 Δt を 0.30 sec にとり定常状態になっていると思われる 10 周期目を検討の対象とした。

表-1 各計算に対する防波堤境界の計算条件

	入射係数 A	入射時間 遅れ τ	透過係数 B	透過時間 遅れ τ_x	
RUN 1	A1	τ_1	B ₁	τ_{x1}	ケースⅠ
RUN 2	A1	τ_1	B ₂	τ_{x1}	
RUN 3	A2	τ_1	B ₁	τ_{x1}	
RUN 4	A3	τ_1	B ₁	τ_{x1}	
RUN 5	A1	τ_2	B ₂	τ_{x1}	ケースⅡ
RUN 6	A2	τ_2	B ₂	τ_{x1}	
RUN 7	A3	τ_2	B ₂	τ_{x1}	
RUN 8	A1	τ_2	B ₁	τ_{x1}	ケースⅢ
RUN 9	A2	τ_2	B ₁	τ_{x1}	
RUN10	A3	τ_2	B ₁	τ_{x1}	
RUN11	A1	τ_2	B ₂	τ_{x2}	ケースⅣ
RUN12	A2	τ_2	B ₂	τ_{x2}	
RUN13	A3	τ_2	B ₂	τ_{x2}	
RUN14	A1	τ_2	B ₁	τ_{x2}	ケースⅣ
RUN15	A2	τ_2	B ₁	τ_{x2}	
RUN16	A3	τ_2	B ₁	τ_{x2}	

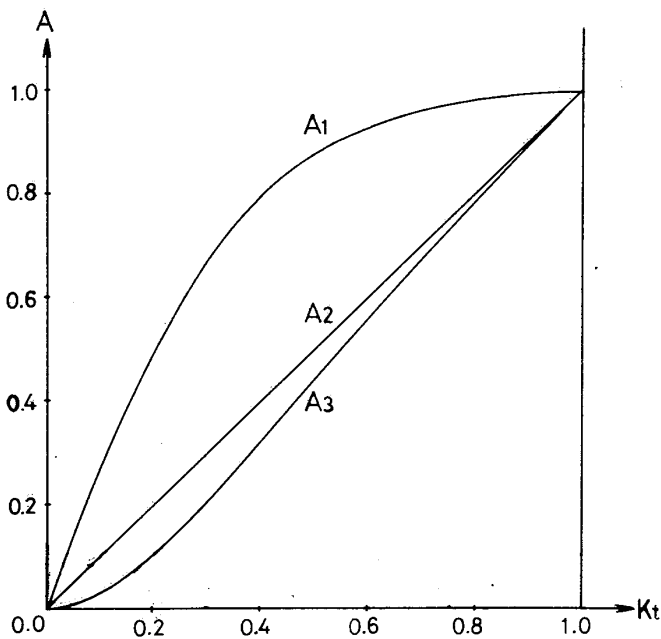


図-3 透過率に対する入射係数の変化

3-1 透過係数の検討

透過性防波堤の透過性状は水理学上では非常に複雑であるが、数値計算上ではその特性を透過率でもって表わしているのが一般的である。(2.5)式で示される透過係数 B に対して(2.6)~(2.8)式の入射係数、入射時間遅れおよび透過時間遅れで示される防波堤境界における計算条件は、表-1のRUN 1に相当する。この結果では、前述のように透過率と反射率が近づいた場合に振動解が生じた。そこで透過係数以外の境界における計算条件はそのままにして、Bを透過率に比例する値をとって計算を行なってみた(RUN 2)。その結果透過率が大きい場合には、透過率や反射率にほぼ比例した透過波高や反射波高が得られた。しかし透過率が小さい場合には、反射波高が大きくなったり、透過率と反射率が等しい値に近づいた場合には、RUN 1と同様に波形は振動する結果となった。

3-2 入射係数の検討

入射係数 A は任意反射率境界に対して(2.6)式が適用されるように、その係数は防波堤特性を示す反射率と透過率や波の諸元と格子間隔とで表わされている。その係数 A は(2.4)式によって位相差 τ とともに境界への流入量を規定していることになる。したがって(2.5)式で表わされる透過後の流量は、透過係数 B が 1 であるので入射係数に大きな影響を受けていると考えられる。

そこで、RUN 1 に対して RUN 3 と RUN 4 のように入射係数のみを変えて計算を行なってみた。その結果それぞれの透過波高は、図-4に示すように比較的透過率に比例した波高が得られたが、反射波高は反射率が大きくなるにつれて増大しすぎる結果となった。なお図に

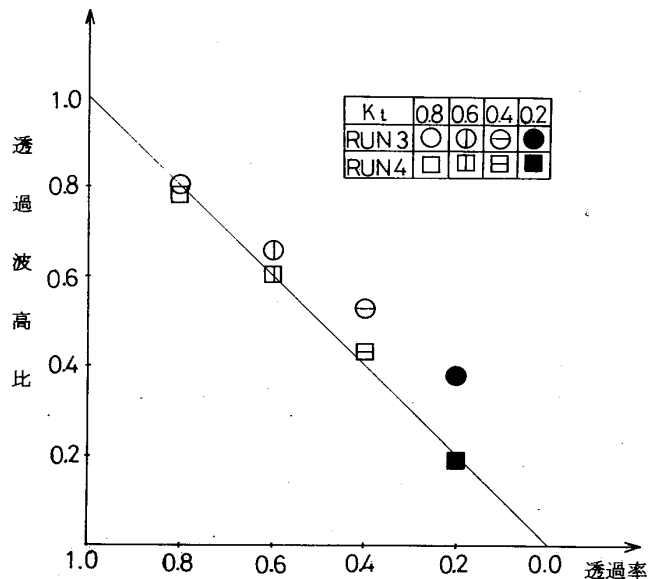


図-4 透過率に対する透過波高比の変化

示す透過波高比は、防波堤境界背面における透過波の振幅を透過率が1のときの振幅で割ったものである。

3-3 入射、透過係数と位相差の検討

表-1には列挙していないが、入射時間遅れ τ を τ_1 、透過時間遅れ τ_x を τ_{x1} である1step遅れの Δt (sec)にとって入射および透過係数をRUN 1から4までのように種々に変えて検討してみた。その結果は、RUN 1と2のものと同様に反射率と透過率が近づいた場合には振動解が生じ、その他の透過率に対しては透過波高がやや小さく、反射波高はやや大きくなった。

3-1と3-2における検討と上述の透過時間遅れの検討によって種々の透過率に対する反射および透過波高の変動状況を調べてみたが、それぞれともに透過率と反射率が近づいた場合には十分な結果が得られなかった。そこで、入射時間遅れ τ を上述の透過時間遅れと同様に、1step遅れの Δt (sec)にとって種々の入射と透過係数や透過時間遅れに対して検討を試みた。それぞれの計算は、表-1のRUN 5からRUN 16にかかげた防波堤境界における係数や位相差の組合せで実行した。透過率と線形関係にある A_2 を中心として、それより大きな A_1 と逆に小さな A_3 の三つの入射係数に対して、それぞれ2種類の透過係数と透過時間遅れの組合せによって4ケースに分けて計算結果を考察してみる。

まず透過係数と透過時間遅れが透過率とともに変化するRUN 5からRUN 7のケースIの結果を図示したのが図-5である。図に示す反射波高比は、防波堤境界前面における反射波の振幅を透過率が1のときの振幅で割ったものである。透過波高をみると、RUN 6とRUN 7の場合には透過率から予想される波高に比べて小さすぎる。それに対してRUN 5の場合には比較的透過率に比例した透過波高が得られている。しかし反射波高をみるとそれらがちょうど逆になり、RUN 5の反射波高は反射率から予想される波高に比べて小さく、RUN 6とRUN 7の反射波高はやや大きな値のところもあるが反射率に比例した波高が得られた。

またRUN 5からRUN 7は、同じ透過率のものを比較した場合図-3からもわかるようにその順に入射係数の値が小さくなっている。すなわち同じ透過率に対しては、RUN 5の入射係数 A_1 が一番大きな値で、次がRUN 6のそれで、一番小さいのがRUN 7の入射係数である。このような入射係数の違いから透過および反射波高をみると、同じ透過率のもとで入射係数が小さくなれば透過波高も小さくなるが、反射波高は大きくなっている。

ケースIに対して透過係数を一定にとったRUN 8か

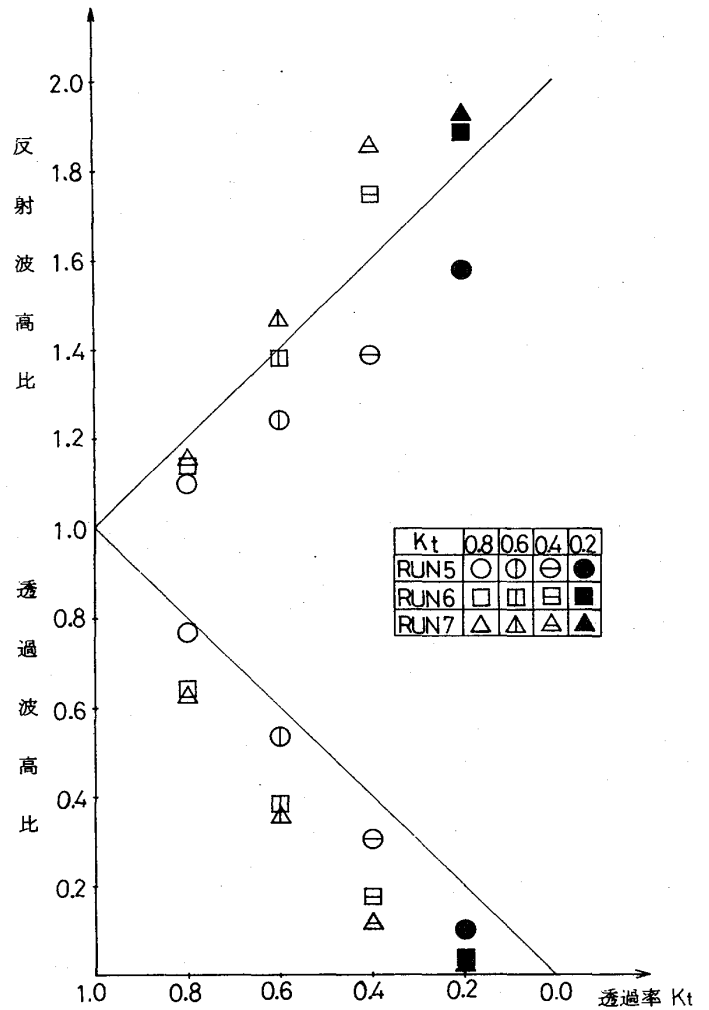


図-5 透過率に対する透過波高比と反射波高比の変化(ケースI)

らRUN 10のケースIIの結果を図-6に示す。ケースIと比べると透過波高がどの透過率に対しても大きくなっている。特にRUN 8の入射係数が大きい値をとる場合にそれが顕著である。その他、入射係数の違いによる反射および透過波高の変化はケースIと全く同じである。

反射波高については、ケースIとほとんど同じような傾向を示している。すなわちRUN 8の反射波高は、反射率から予想される波高と比べると小さく、RUN 9とRUN 10の反射波高は、ほぼ反射率に比例した波高が得られた。また同じ透過率のもとで入射係数が小さければ反射波高が大きくなっている。

次に透過時間遅れも一定にとって検討してみた。まず透過係数が透過率とともに変化するRUN 11からRUN 13のケースIIIの結果を図-7に示す。透過波高は、同じ透過率のものを比べると入射係数の小さい方が小さくなっている。また入射係数の一番大きな値をとるRUN 11の透過波高が最も透過率に近い波高を示している。逆に

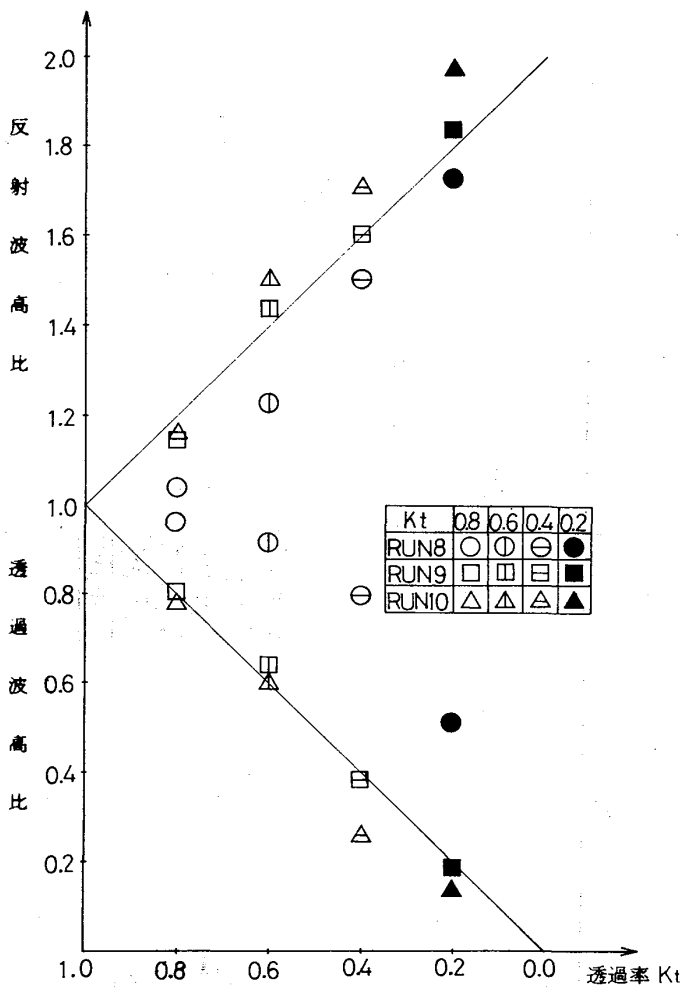


図-6 透過率に対する透過波高比と反射波高比の変化(ケースⅡ)

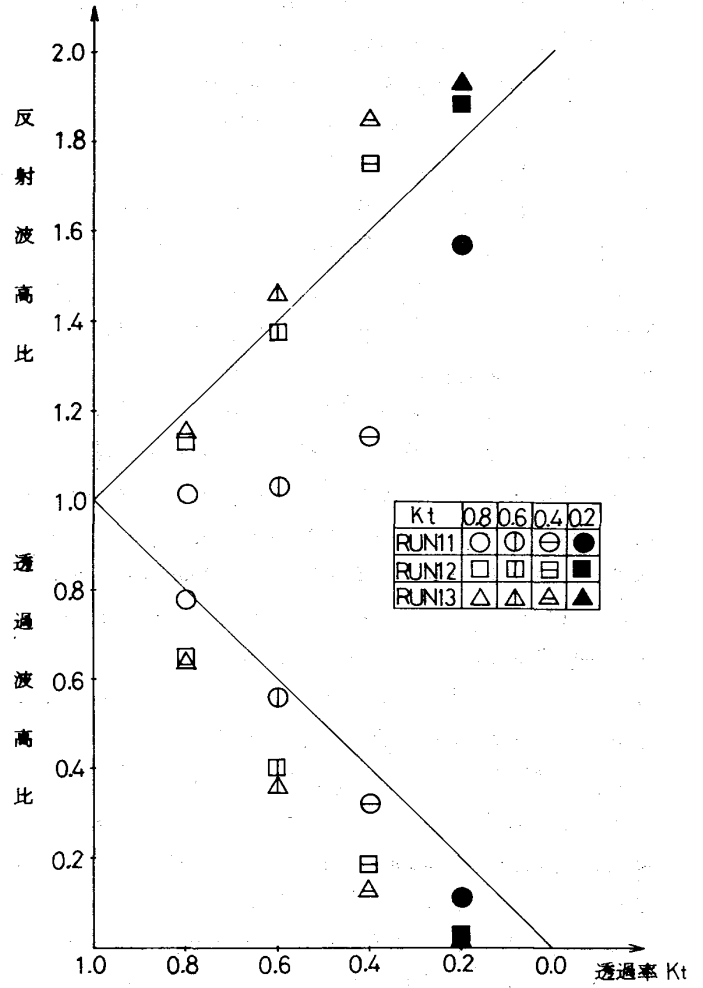


図-7 透過率に対する透過波高比と反射波高比の変化(ケースⅢ)

反射波高は同じ透過率のものを比べるとRUN11で明らかのように入射係数の大きな方が小さくなっている。

ケースⅢを透過係数と同じであるケースⅠと比較すると、それぞれの入射係数に対して入射および透過波高はよく似た波高となっており、特にRUN6とRUN12、RUN7とRUN13の反射波高は全く同じである。このことから、透過係数を透過率に比例してとれば透過時間遅れは反射波高に対してはあまり影響がなく、透過波高に対してわずかばかり影響があるということが推定される。

最後にケースⅢの条件に対応して透過係数を一定にとったRUN14からRUN16のケースⅣの結果を図-8に示す。RUN14からRUN16の三つの透過および反射波高をみると、ケースⅢと同様に同じ透過率に対しては入射係数の大小によってそれぞれの波高は逆に増減している。すなわち透過波高は入射係数の値の大きい方が高くなっているが、反射波高は逆に低くなっている。また透

過率の違いによる波高の変化をみてみると、RUN15の反射および透過波高がそれぞれの反射率や透過率に最も近い値を示している。透過係数と同じで透過時間遅れが異なるケースⅡと比較してみると、入射係数の大きいRUN8とRUN14の一部を除いては、反射波高と透過波高の違いは小さい。このことによって入射係数の値が透過率に等しいかあるいは近い値であれば、入射時間遅れや透過係数の一定なものに対して透過時間遅れをかえても反射や透過のそれぞれの波高への影響があまりないことが推定される。

以上のように、入射および透過のそれぞれの係数や時間遅れの種々の組合せによって4つのケースに分けて入射や透過の波高変化の状況を調べてきた。それらをまとめてみると次のようになる。どの場合も同じ透過率に対して入射係数が小さくなれば透過波高は小さくなり、逆に反射波高は大きくなる。透過係数に関しては、ケースⅠとケースⅡ、ケースⅢとケースⅣのそ

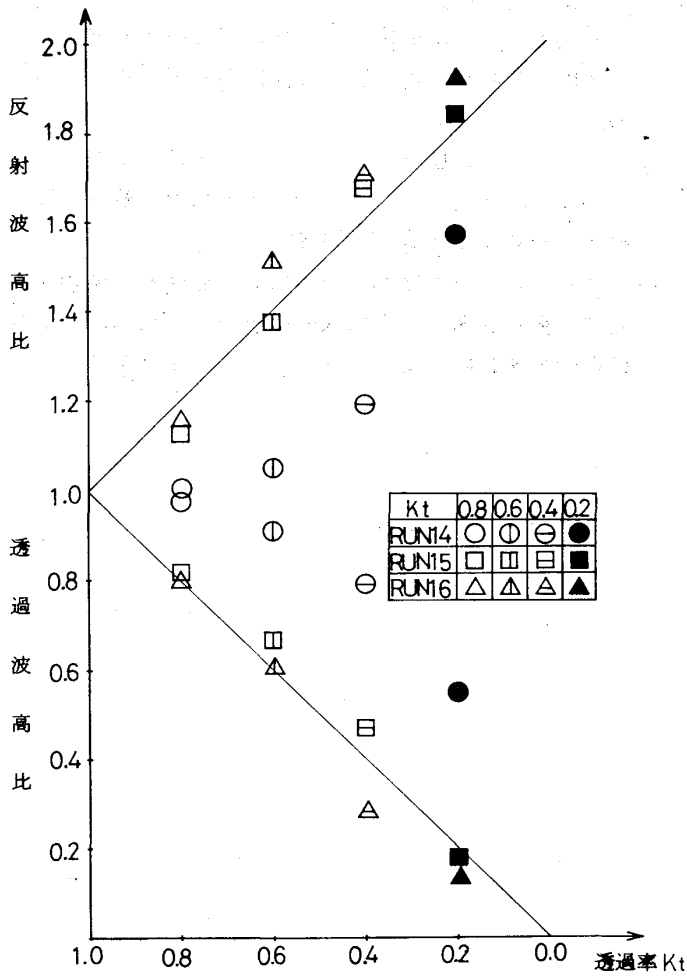


図-8 透過率に対する透過波高比と反射波高比の変化(ケースⅣ)

それぞれを比較すればわかるように反射係数および透過時間遅れが同じであれば透過波高は透過係数を一定にとった方が大きくなっている。しかし反射波高については透過係数の違いによる波高変化は、はっきりとはみられない。一方透過時間遅れに関しては、入射係数の値が透過率に等しいかあるいは近い値の場合には、反射および透過波高にはあまり影響がない。

4. 計算例

前章の任意透過率境界における入射および透過係数とそれぞれの位相差の検討を行なったが、ケースⅡにおけるRUN9の結果が比較的、反射率および透過率に比例したそれぞれの波高が得られたので、その計算条件でもって他の波の諸元のものに適用してみた。その計算の一例として

$L = 92.32 \text{ m}$
 $T = 10.0 \text{ sec}$

$h = 10.0 \text{ m}$
 $\Delta s = 2.72 \text{ m}$
 $\Delta t = 0.29 \text{ sec}$

の沖側境界における波の諸元と計算条件で、透過率Ktが1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2の5ケースに対しての計算結果を図-9に示す。防波堤境界前後の0.5波長づつにおける12周期目の波高の変動状況を図示している。この図では、防波堤を境にして透過および反射波高は変形し、それぞれ透過率と反射率にほぼ比例した波高を示している。なお図では入射波高Hi=3mでそれぞれの波高を割った無次元量で波高を示している。

次に水深が変化する場合を計算してみる。その計算における波の諸元と防波堤境界における条件は、前章のRUN9と同じとし、4波長水路において沖側境界で水深hがh=15.0mで海岸境界で10.0mとなるように海底勾配SをS=0.023として計算を行なった。なおこの場合水深が変化するので、計算波高に対して次の浅水度補正係数fs³⁾を乗じた。

$$f_s = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4.1}$$

ここに

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \tag{4.2}$$

n₁ = 沖側境界におけるnの値

その結果、図-9と同様にして反射および透過波高の変動状況を図示すると図-10のようになる。水深が変化するために屈折による波の変形がみられるとともに、防波堤を境にして透過および反射波高が変形し、それぞれ透過率と反射率に応じた波高を示している。

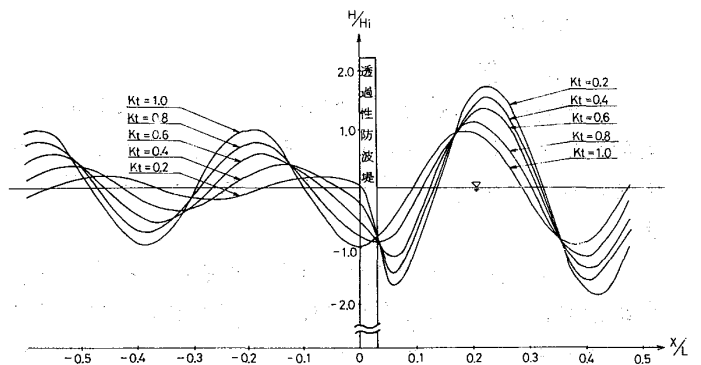


図-9 透過性防波堤付近の波高(水深が一樣な場合)

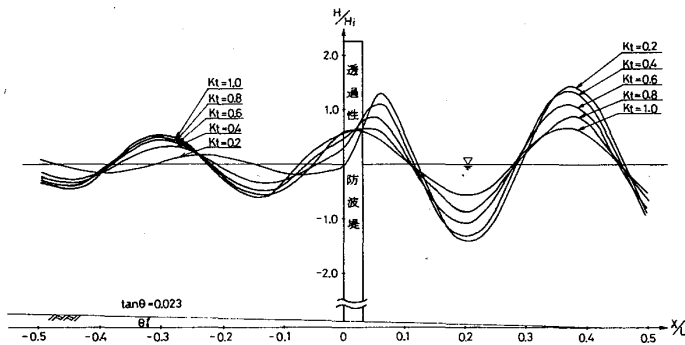


図-10 透過性防波堤付近の波高（水深が変化する場合）

5. あとがき

数値波動解析法による透過性防波堤における境界流量の算定方法において、入射および透過係数や位相差の検討によって入射および透過波高の変動状況を調べてきた。その結果、入射時間遅れに関しては、任意反射率境界における(2.7)式を任意透過率境界に適用した場合、透過率と反射率が近づいたときには適当な解が得られにくく、むしろその時間遅れを一定にとった方が比較的良好な結果が得られることがわかった。入射係数に関しては、その値の大小によって反射や透過波高が大きくなったり、小さくなったりする。この入射係数と透過係数や入射および透過時間遅れの適当な値によって透過率や反射率に比例した透過および反射波高が得られることがわかった。今回検討したなかでは、次のような入射および透過係数とそれぞれの時間遅れを

$$A = Kt$$

$$B = 1.0$$

$$\tau = \Delta t$$

$$\tau_x = \frac{W}{C_x}$$

とした場合に、透過率や反射率に最も近い透過および反射波高が得られた。ただし、それぞれにおいては計算の安定のために適当な時間間隔や格子間隔を選ぶ必要がある。

以上のように透過性防波堤付近の波高計算における境界流量の算定方法の基礎的な検討を試みてきたが、今後防波堤境界における波の入射や反射方向などが一様でない複雑な問題に対する検討も行なう必要があると思われる。

《参考文献》

- 1) 谷本勝利, 小舟浩治, 小松和彦: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, 1975
- 2) 酒井哲郎, 佐藤孝夫, 岩垣雄一: 任意反射率・任意透過率の防波堤による平面的な波浪変形の数値計算, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978
- 3) 伊藤喜行, 谷本勝利, 山本庄一: 波向線交差領域における波高分布—数値波動解析法の応用—, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第3号, 1972