

港内静穏度に及ぼす防波施設の反射・透過波の 周期特性の影響について

INFLUENCE OF TRANSMISSION AND REFLECTION PROPERTIES OF
MARITIME STRUCTURES WITH WAVE PERIOD ON A HARBOR
TRANQUILITY

中村孝幸¹・村上浩司²・国本栄一³

Takayuki NAKAMURA, Kouji MURAKAMI and Eiichi KUNIMOTO

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²正会員 株式会社芙蓉調査設計事務所 (〒790-8022 松山市美沢1丁目2-30)

³正会員 三省水工(株) 松山支店 (〒790-0011 松山市千舟町5丁目5番3号)

Recently, it has become known that multi directional and irregular natures of incident waves are important for estimating wave sheltering effects by maritime structures, such as wave diffraction effects about a harbor entrance gap. In this study, concerning with variations of wave reflections and transmissions about harbor breakwaters with wave period, the harbor tranquility for the incidence of multi-directional and irregular waves was examined extensively. The vertical line source Green's function method was basically used for the numerical computations. Extension of the method to the permeable boundary conditions was briefly introduced.

Key Words: Harbor tranquility, multi-directional and irregular wave, variation of wave reflection and transmission, permeable breakwater

1. まえがき

現在, 港内の波浪静穏度の検討は, 来襲波の多方向性および不規則性を採り入れた方法に基づき行われてきている¹⁾。これは, 波の回折・屈折現象が入射方向や波周期(あるいは波長)に強く依存するため, 有義波など代表波を規則波に置き換えて港内波浪の算定を行うと回折・屈折変形が十分に再現できないことや特に反射現象による部分重複波の腹・節の位置があまりにも強調され過ぎるなど現況と異なることによる。

現在, 港湾域では各種の防波施設が用いられるようになってきており, その中には, 浮防波堤や直立式消波構造物など, 作用波の周期による反射・透過率の変動が有意なものも数多く見られる。しかしながら, 現状の港内波浪静穏度の算定では, 旧来方式の有義波など代表波を規則波に置き換え, それに対する反射・透過率を利用す

ることが多い。近年では, 不規則波実験を実施して, 代表波に対する反射・透過率を求め, それを利用することも行われるようになってきているが, 一定値の透過・反射率を用いることに変わりはない。

いずれの方式を採るにしても, 回折・屈折変形は複数の成分波を対象にして行うのに対して, 反射・透過現象は代表波に対して行うなど方法論が統一されていないことが指摘できる。

ここでは, 防波施設による反射・透過現象についても, 波の回折・屈折現象と同様に波周期による変動特性を採り入れる方法論を展開する。そして, 特に作用波の周期による反射・透過率の変動が有意な, 浮体式防波堤を例にとり, 旧来方式と新方式による算定を行い, 港内静穏度に及ぼす反射・透過現象の周期特性の影響について明らかにする。

2. 鉛直線グリーン関数法に基づく数値解析法

以下の理論的な検討では、既に著者らの中の一人²⁾が展開している、鉛直線グリーン関数法に基づく港湾域の波高分布の算定法を用いており、その概要について紹介する。このとき、従来の解析で不明確なままとなっていた点や本研究で主対象とする周期による反射・透過波特性の変化の取り扱い方法なども合わせて記述する。

(1) 規則波(成分波)に対する算定法

本研究では、各種の周期の正弦波が各方向へ伝播する状態を線形的に重ね合わせることで、現地の多方向不規則波が表現できると仮定する。そして、このような表現による多方向不規則波が港湾域に來襲するとき、波高分布等を知るためには、まず最初に多方向不規則波を構成する成分波に対する結果を求めておく必要がある。すなわち、任意周期で、任意方向より作用する規則波に対する港湾域の波高分布の算定が必要とされる。

図-1は、このような規則波(波高 H 、周期 T 、波向き θ)が作用するときの港湾域の算定モデルを示す。港湾域は、不透過な陸域境界や島堤で構成され、島堤の中の一つあるいは陸域の一部は透過性堤体とする。図中では、陸域の境界線を C_L 、透過堤の周辺境界線を C_p としてある。そして、これら不透過および透過境界の特性は、鉛直断面内の2次元実験や理論解析による反射率 C_r および透過率 C_t で表されるとする。

平面波が図-1のような一定水深 h の港湾域に作用するとき、考慮すべき現象は波と構造物との干渉に起因する回折散乱と反射・透過現象になる。従来、このような場での波の回折散乱と反射・透過現象は、ポテンシャル波動論に基づき検討されている。いま、入射波と回折散乱波の速度ポテンシャルをそれぞれ Φ_I 、 Φ_S とすると、その基礎方程式は、次式で示す3次元のラプラス方程式を満足する。

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (j=I, S) \quad (1)$$

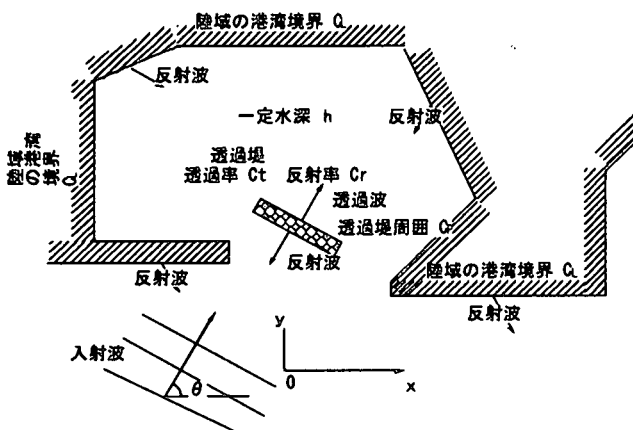


図-1 解析モデルおよび座標系

ここに、 (x, y) は平面直交座標系を、 z は原点を水表面に置き、鉛直上方を正とする鉛直座標である。このとき、回折散乱波の速度ポテンシャルには、反射・透過波の影響も含まれている。

線形波動理論を仮定すると、未知量である回折散乱波の速度ポテンシャル Φ_S は、一定水深であることおよび周辺境界が鉛直面であることを考慮すると、次式で示すような進行波モードの解を仮定できる。

$$\Phi_S(x, y, z; t) = \Phi_S(x, y) \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

ここに、 Φ_S :回折散乱波の速度ポテンシャルの複素振幅、 h :水深、 ω :角振動数($=2\pi/T$, T :周期)、 i :虚数、 k :進行波モードの波数で次式の分散関係式を解いて与えられる。

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (3)$$

ここに、 g :重力加速度である。

入射波として、その水面変動 η_I が次式で与えられるものを仮定する。

$$\eta_I(x, y) = \frac{H}{2} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_I(x, y) &= -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} \\ &= \Phi_I(x, y) \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 H :入射波高、 $k_x = k \cos \theta$ 、 $k_y = k \sin \theta$ 、 θ :波の入射方向と x 軸とのなす角。

このとき、入射波の速度ポテンシャル Φ_I は次式のように定義できる。

ここに、 Φ_I は入射波の速度ポテンシャルの複素振幅に相当する。

式(2)を式(3)に代入すると、この解析での基礎方程式で、平面座標にのみ依存するヘルムホルツ方程式へと導かれる。

$$\frac{\partial^2 \Phi_S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_S}{\partial y^2} + k^2 \Phi_S = 0 \quad (6)$$

鉛直線グリーン関数法では、ヘルムホルツ方程式の特異解で円筒波を表す鉛直線グリーン関数を基礎解とするもので、これは次式で示される³⁾。

$$G(x,y;X,Y) = -\frac{i\pi}{4} H_0^{(1)}(kR) \quad (7)$$

$$R = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2} \quad (8)$$

ここに、 $H_0^{(1)}(kR)$ ：0次の第1種ハンケル関数で、引数の R は一般点 (x,y) と湧出し点 (X,Y) との間の平面距離で式(8)による。

鉛直線グリーン関数法では、式(7)で示される円筒波型の解を港湾周辺境界に密に分布させて、防波堤などの不透過条件や低反射条件をより厳密に満足させるように波源強度を決定した後に波高分布を求めている。

このような解析によると、回折散乱波の速度ポテンシャルの振幅 s は、上記の鉛直線グリーン関数 $G(x,y;X,Y)$ を用いると湧き出し分布法を介して次式のように表すことができる²⁾。

$$s(x,y) = \int_{C_p+C_L} f_s(X,Y) G(x,y;X,Y) dC(X,Y) \quad (9)$$

ここに、 $C_p+C_L(=C)$ は島堤を含む港湾境界に沿う曲線を示し、その曲線上の座標点が (X,Y) で、湧出し関数であるグリーン関数 $G(x,y;X,Y)$ の置かれる位置である。 $f_s(X,Y)$ は、その湧出しの強さを示し、港湾境界上の反射特性や透過特性を考慮して決定できる。

a) 港湾境界を不透過条件とするときの回折散乱波

ここでは、港湾境界が全て不透過なものとして、回折散乱・反射現象に着目して、回折散乱波の速度ポテンシャルを求める。ここでは、反射特性を表すのに部分吸収条件が適用できるものとしており、このような吸収条件を用いると、反射特性を考慮した港湾境界上での境界条件は次式で与えられる²⁾。

$$\int_C f_s(X,Y) \left\{ ika(x,y) G(x,y;X,Y) + \frac{\partial G(x,y;X,Y)}{\partial n} \right\} dc = - \left\{ ika(x,y) \varphi_r(x,y) + \frac{\partial \varphi_r}{\partial n} \right\} \Big|_{(x,y) \text{ on } C} \quad (10)$$

$$\alpha(x,y) = \frac{1 - C_r(x,y)e^{i\delta(x,y)}}{1 + C_r(x,y)e^{i\delta(x,y)}} \quad (11)$$

ここに、 $\partial/\partial n$ ：構造物の没水面上での法線微分、 $\alpha(x,y)$ ：吸収率、 $C_r(x,y)$ ：港湾境界 (x,y) における反射率、 $\delta(x,y)$ ：反射波の遅れの位相角で、鉛直不透過面よりの完全反射時における反射波よりの遅れを表す。

式(10)は $f_s(X,Y)$ を未知数とする1次元の積分方程

式になっており、これを解くことにより湧き出し強さが求められる。このように、式(10)を解くことにより湧出し強さが、さらにこれを式(9)に代入することにより、回折散乱波の速度ポテンシャルの複素振幅が算定できる。

平面波浪場の任意点 (x,y) における回折係数 $K_D(x,y)$ は、上記のようにして求められた回折散乱波の速度ポテンシャルを用いて次式により算定できる。

$$K_D(x,y) = \frac{|\varphi_f(x,y) + \varphi_s(x,y)|}{|\varphi_f(x,y)|} \quad (12)$$

b) 透過堤の近似的な取り扱い

ここでは、従来の研究²⁾と同様に、基本的には港湾境界が不透過条件のときの算定結果を利用して、この結果に透過堤よりの透過波の影響を線形的に重ね合わせるという近似的な取り扱いにより、透過堤を含む港湾域の波高分布の算定を行う。

このような方法での算定ステップは次のようにまとめられる。

ステップ①：透過堤を不透過堤とみなし、港湾域内での反射波の算定を行う。この算定は、上記で紹介した諸式を用いて実行できる。

ステップ②：入射波と①での反射波を併せて、透過堤に作用させ、透過波の算定を行う。このとき、透過堤自身よりの反射波の影響は考慮しない。

従来の研究²⁾では、このステップにおいて堤体の透過面と入射波および反射波の波向きとの関係が不明確なままとなっていた。本研究ではこの点について詳細な検討を行い、結論的に図-2に示すように、入射波の場合には、入射波の波向きベクトルと透過堤境界上に立てた外向き法線ベクトルとが同方向となる場合のみ、また周辺境界よりの反射波が透過堤に入射する場合、着目する反射源

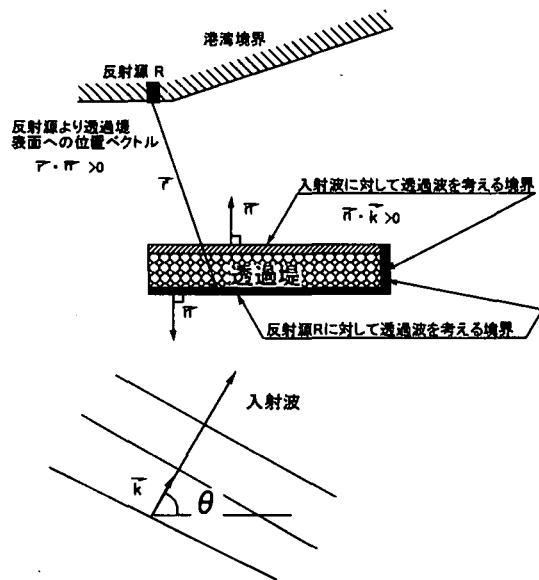


図-2 入射源からの波向きにより透過波を考える境界の設定法

より透過堤境界へ伸びる位置ベクトルとやはり同様の外向き法線ベクトルとが同方向になる場合のみ、着目する透過堤境界より透過波が抜けるようにする必要があることが確認されている。

ステップ③：透過堤よりの透過波を入力として、港湾域全体よりの反射波を算定する。このとき、透過堤自身よりの再反射波の影響も考慮する。

ステップ④：透過堤に、③で算定された反射波を再度作用させて透過波の算定を行う。このとき、透過堤自身よりの反射波の影響は考慮しない。

ステップ⑤：透過堤を透過する波あるいはその反射波が十分に小さくなるまで③、④のステップを繰り返し、求められた各結果を線形的に重ね合わせることで最終的な波高分布を求める。ただし、以下の算定では、収束性が良かったことから、この繰り返しステップは1回のみ限定しており、違う機会に収束性等について詳細に検討したい。

上記の各計算ステップに対応する算定式を示すと以下のようである。

ステップ②に対応する算定式：透過波の速度ポテンシャルの複素振幅 ϕ_T は、 ϕ_S と同様に鉛直線グリーン関数を核関数とする湧き出し分布法により表せるものとした。

$$\phi_T(x,y) = \int_{C_p} f_T(X,Y) G(x,y;X,Y) dC(X,Y) \quad (13)$$

ここに、 f_T は透過堤境界上に置く湧き出しの強さの分布関数、 C_p はこの透過堤境界である。このとき、透過堤は有限厚さのものとしており、面としての堤体堤の影響が考慮できるようにしてある。

湧き出しの強さ f_T は、ステップ②の説明の所で述べたように、入射波と周辺境界よりの反射波の影響を考慮して次式により決定できる。

$$\frac{\partial \phi_T(x,y)}{\partial n} = \{i(k_x x + k_y y) \phi_T(x,y) + \frac{\partial \phi_R(x,y)}{\partial n}\} C_i(x,y) e^{i\delta_T} \quad (x,y) \text{ on } C_p \quad (14)$$

ここに、 C_i は透過率、 δ_T は透過現象に伴う位相遅れの角度である。ここで、注意すべき事項として、図-2で説明した透過堤表面に対する波向きの影響がある。また、着目している透過堤からの反射波は、上式の右辺には考慮しない。これは透過堤よりの透過波には、反射波は影響しないことによる。

ステップ③に対応する算定式：式(14)を解くことで、式(13)に含まれる湧き出し強さ f_T が求まり、結果的に透過波速度ポテンシャルの複素振幅 ϕ_T が港湾域内の任意点に対して算定できる。そこで、透過波を源に

する港湾境界よりの反射波を求めることが可能になる。この算定は、単に式(10)の右辺の入射波ポテンシャルの振幅に代わり、式(13)の透過波ポテンシャルのそれを代入することで実行できる。

(2) 多方向不規則波の取り扱い

合田¹⁾は、無数の周波数および波向き成分波の線形重ね合わせにより、多方向不規則波が表現できるとする考え方にに基づき、防波堤による回折係数の推定法などを提案している。また、合田¹⁾は実際設計に便利のように、不規則波のスペクトルの代表波表示による標準化やその離散化手法も併せて示している。

ここでは、上記した算定法に基づき成分波に対する波高比等を求め、さらに合田による多方向不規則波の取り扱い方法を用いて、エネルギー的な波高比等を最終的に算定した。このエネルギー的な波高比 $(K_D)_{eff}$ は、次式の定義による。

$$(K_D)_{eff} = \left[\frac{1}{m_0} \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} P(f;\theta) K_D^2(f;\theta) d\theta df \right]^{1/2} \quad (15)$$

ここに、 $K_D(f;\theta)$ は周波数 f 、波向きの成分波に対する波高比、 m_0 は周波数方向スペクトル $P(f;\theta)$ の積分値、 θ_{max} 、 θ_{min} はそれぞれ方向角の最大・最小値で、対象海域に対して遮蔽物がないときには、波の主卓越方向より左右に 90° の値が用いられる。

実際の算定では、式(15)中の周波数方向スペクトルを、周波数および波向きの両者について有限個の区間に分割して、各代表周期および各代表波向きのスペクトル成分をまず算出する。そして、これら成分波に対する回折係数 K_D を求めて、離散化された式(15)により、有効回折係数 $(K_D)_{eff}$ が算定できることになる。

(3) 透過・反射率の周期による変化の取り扱い

本研究では、上記したような数値解析法に基づき、多方向不規則波を入力として、港湾域の波高分布の算定を行った。このとき、波周期による消波構造物の透過・反射率の変化を考慮する方法として以下の2つの方法を採用した。

a) 各周期成分波に対して個別の透過率 C_i 、反射率 C_r を設定する方法

この方法は、不規則波を近似する有限個の周期成分波に対して、実験結果や数値算定結果を参照して、個別に C_i 、 C_r を設定する方法である。算定では、 C_i 、 C_r の波周期による変化が一般的な条件に対して与えられるように、実験結果や数値算定結果を入力として3次スプライン補間法を適用して任意周期条件下で C_i 、 C_r が推定できるようにした。

b) エネルギー平均した透過・反射率を用いる方法

この方法は、やはり C_t , C_r の実験結果や数値算定結果を参照して、システム関数的に透過波および反射波のスペクトルを算定しておき、入力である入射波スペクトルとの比の平方根をとることでエネルギー平均した透過・反射率を求める。そして、この一定透過・反射率を代表値として、港湾域の波高分布を算定する方法である。

3. 港湾域の浮防波堤を対象にした算定結果

(1) 港湾モデル

ここでは、上記の解析法の妥当性を検証することおよび透過・反射率の周期変化の影響を検討する目的から、図-3に示すポンツーン形式の浮防波堤を想定して平面波浪計算を実施した。なお、図-3は、断面2次元実験の様子を示すもので、現地量に換算して表示してある。算定では、図-4中に斜線で示す港湾の一部にこの浮防波堤を設置した。この図中には、浮防波堤以外の陸域境界や島堤の反射率の値などについても併せて示した。

(2) 浮防波堤の透過・反射率

図-5は、この浮防波堤の断面2次元実験による透過率 C_t と反射率 C_r の結果および中村ら⁴⁾の減衰波理論に

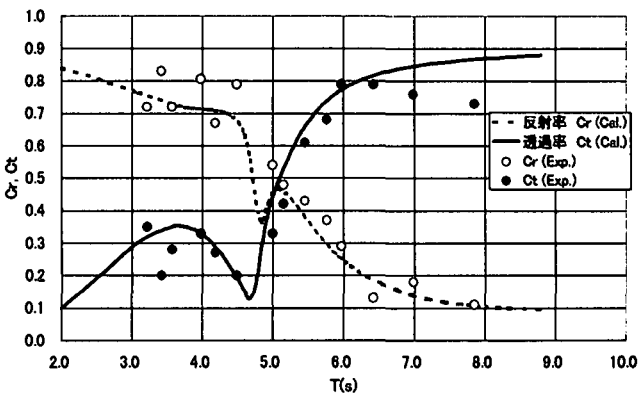


図-6 ポンツーン形式浮防波堤の反射率と透過率の波周期による変化

表-1 想定した多方向不規則波の特性とエネルギー平均透過率と反射率

Tl/3	Hl/3	主波向き	Smax	周期分幅ΔT	方向分幅Δθ	Qp	Qr
4.6s	1m	200°	10	5	7	0.42	0.63
6s	1m	200°	10	5	7	0.65	0.45

よる算定結果の両者を現地スケールに換算して、作用波の周期による変化で示す。この図より、透過・反射率は、波周期Tにより有意に変化することや、このため不規則波を対象とするとき透過・反射率をどのように与えるべきかが問題になることが分かる。

(3) 港湾域の波高分布

以下で紹介する算定結果は、表-1に示す特性をもつ多方向不規則波を作用させたときの結果である。表中で Tl/3, Hl/3はそれぞれ有義波の周期、波高を、 S_{max} は方向集中度パラメータを示す。

まず最初に、図-4の港湾において浮防波堤を取り除いたときの波高分布の算定結果 (Tl/3=4.6s) を図-6に示す。この図より、浮防波堤がないときには、港湾内において入射波高と同程度の波高値が見られ、何らかの防波施設の必要性が確認できる。また、図-7は、浮防波堤の透過率を0.99, 反射率を0とほぼ浮防波堤がない状態と同一の条件にしたときの結果 (Tl/3=4.6s) を示す。このときの浮防波堤まわりの波高分布は、図-6のそれがないときの波高分布とほぼ同じであり、算定における透過堤の取り扱いの妥当性が確認できる。

次に、図-8, 9, 10は、Tl/3=4.6sのときについて、透過・反射率を①個々の代表成分波に対して与える場合、②有義波周期を代表量として、それに対して与える場合、③表-1中に示すエネルギー平均量で与える場合の3者の算定結果を示す。これらの図の比較から、上記の①と③に対応する結果はほぼ同程度の波高値を示すのに対して、②の方法による結果では、港内で1割程度波高値が低いなどの差異が見られる。これは、図-5に見られるように、有義波周期に対応する周期条件下で透過率が極小となり、この透過率を代表値として用いて算定しているためである。

そして、不規則波を対象とするときには、上記の①か

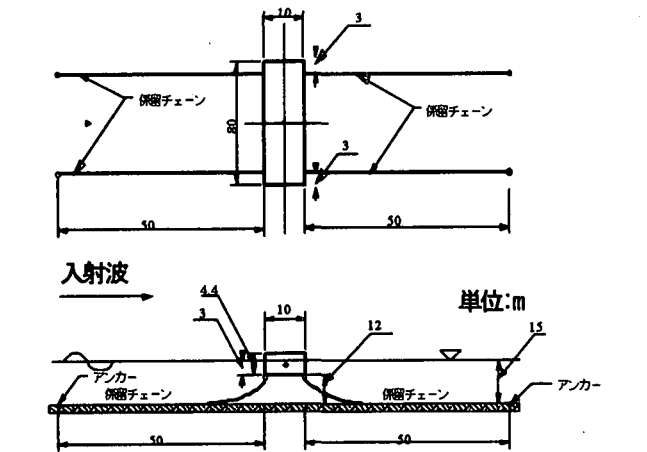


図-3 ポンツーン形式の浮防波堤

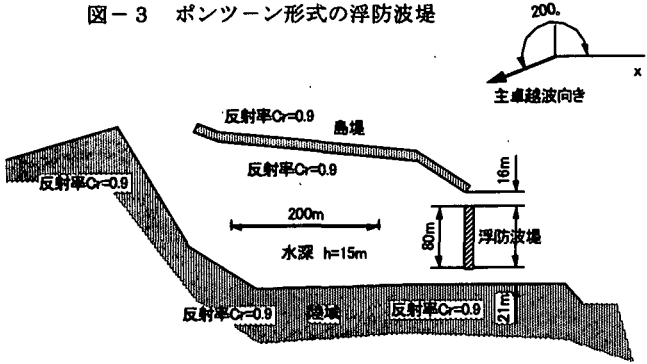


図-4 浮防波堤を含む港湾域の算定モデル

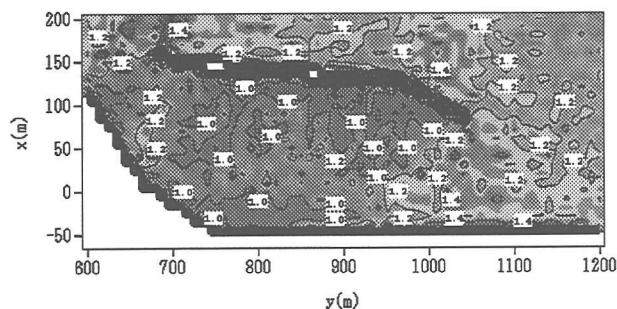


図-6 浮防波堤のないとき($T1/3=4.6s$)

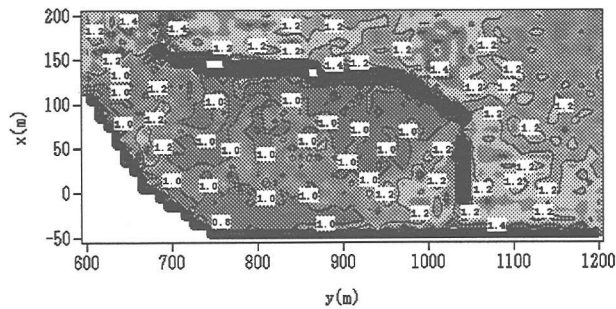


図-7 浮防波堤の $C_t=0.99$, $C_r=0.0$ のとき($T1/3=4.6s$)

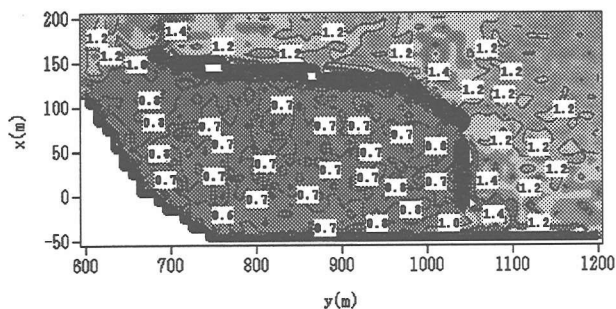


図-8 C_r と C_t の周期変化を考慮したとき
($T1/3=4.6s$)

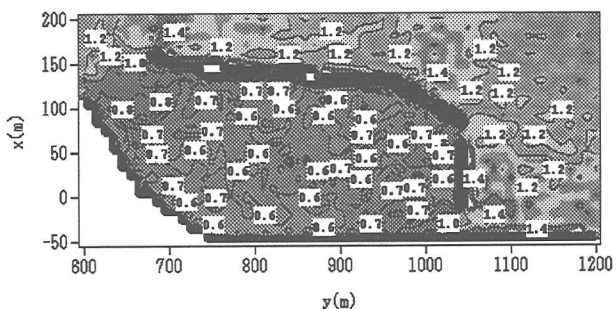


図-9 有義波に対する一定の C_r と C_t を用いたとき
($T1/3=4.6s$)

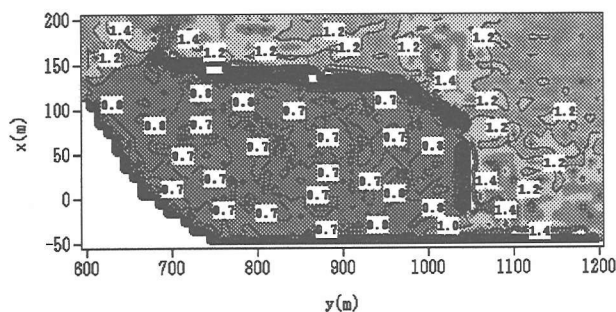


図-10 パワー平均の C_r と C_t を用いたとき
($T1/3=4.6s$)

③のように透過・反射率の周期特性の影響を何らかの方法で考慮した算定が望ましいといえる。

本研究では、 $T1/3=6s$ のときについても、上記①～③の方法により算定を行い、同様の検討を進めているが、このときには、逆に①の方法による結果が、②のそれと比較して、約1割程度低く現れることなどを確認しており、これはやはり図-5に示す透過率の周期変化による影響と考えられる。

4. 結語

従来よりの有義波など代表波に対する一定の透過・反射率を用いる方法は、透過堤の特性を十分に表すことが

できず、波高分布を過大評価あるいは過小評価する恐れがあり、透過・反射率の周期特性を考慮した算定が望ましい。

そして、周期特性を考慮する方法としては、不規則波を構成する各周期成分波の個々に対して透過・反射率を設定するか、あるいは周波数スペクトルを対象にして定義されるエネルギー平均的な透過・反射率を設定する方法を用いると、合理的な港内静穏度の評価が可能になる。

参考文献

- 1) 合田良実：港湾構造物の耐波設計法，鹿島出版会，pp.31-80，1977。
- 2) 中村孝幸・佐伯信哉：透過堤を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究，海洋開発論文集，第15巻，pp.339-344，1999。
- 3) Isaacson, M. Q.: Vertical cylinder of arbitrary section in waves, Jour. of Waterways, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol.104, No.wv4, pp.309-322, 1978。
- 4) 中村 孝幸・大森 禎敏：浮桟橋を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究，海岸工学論文集，第41巻，pp.971-975，1994。