

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

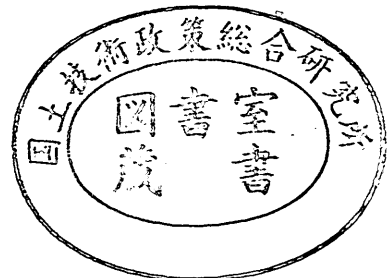
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 14

NO. 3

SEPT. 1975

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第14巻 第3号 (Vol. 14, No. 3), 1975年9月 (Sept. 1975)

目 次 (CONTENTS)

1. Influence of the clearance between bed and mouth sucking a solid body
...Yoshikuni OKAYAMA, Tokuji YAGI, Yoshihiro SATO and Masaru SAITO..... 3
(吸込間隙の影響を受ける固体の吸込力について
.....八木得次・岡山義邦・佐藤義博・斎藤 勝)
2. 数値波動解析法による港内波高分布の計算...谷本勝利・小舟浩治・小松和彦.....35
(Numerical analysis of wave propagation in harbours of arbitrary shape
.....Katsutoshi TANIMOTO, Koji KOBUNE and Kazuhiko KOMATSU)
3. 浅海域における波浪の破碎変形.....合田 良実.....59
(Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking
.....Yoshimi GODA)
4. 港湾環境における耐食鋼の耐食性調査.....善 一章・阿部正美... 107
(Survey of corrosion resistance of corrosion-resistant steel under marine
environments.....Kazuaki ZEN and Masami ABE)
5. 電磁波による岩盤の破碎——局部加熱効果と熱破碎——
.....小岩苔生・白鳥保夫・高橋英俊・松本 茂... 181
(Rock breaking by microwave radiation——effects of local heating and thermal
fracture.....Taisei KOIWA, Yasuo SHIRATORI, Hidetoshi TAKAHASHI
and Shigeru MATSUMOTO)

2. 数値波動解析法による港内波高分布の計算

谷本 勝利*

小舟 浩治**

小松 和彦***

要 旨

任意形状境界に対する波動の解法として開発を進めてきた「数値波動解析法」に、新しく任意反射率境界および無反射性仮想境界の計算法を導入し、開口部からの侵入波に対する港内における波動の解法として完成化した。

本方式は線流量表現による線型の波動方程式を初期条件から出発して差分計算法により逐次解いていくもので、任意形状港内におけるたとえば波高分布を水深変化による波の変形、境界からの反射波の影響を含めて算定することができる。

新しく導入した任意反射率境界の計算法は、境界上の線流量成分をその1メッシュ前の線流量成分の時間的変化から求めるもので、境界条件として反射率 r と入射波の波向き β を与えることが必要である。簡単な条件に対する検討の結果、このうち β の値としては実際の波向きにかかわらず常に 90° に近い値を与えることによって、所定の反射率に対応した結果が得られることがわかった。

また、無反射性仮想境界の導入によって、従来必要とした広大な仮想外海領域を効果的に省くことができることを確認した。二・三の条件に対する適用例を示したが、TOSBAC-5600 システムを用いて、 $12.5L \times 8L$ ($\Delta s = L/12$) および $14.2L \times 16.5L$ ($\Delta s = L/15$) の領域に対するそれぞれ17周期、25周期分の計算に要するCPU占有時間は24分および79分であった。計算所要時間は使用する計算機システムの性能、プログラムの組み方等によるが、波長に比較して計算領域が著しく大きくなる場合には、長時間の占有が必要となり、実用的にはこの面から適用に限界が生ずることになる。

*水工部 防波堤研究室長

**水工部 防波工主任研究官

***水工部 模型試験課

2. Numerical Analysis of Wave Propagation in Harbours of Arbitrary Shape

Katsutoshi TANIMOTO*

Koji KOBUNE**

Kazuhiko KOMATSU***

Synopsis

The authors have developed a numerical analysis method of wave propagation in the region of arbitrary shape and the applications to wave diffraction and refraction were already reported in the reference 7). The present paper shows the applicability of our method to the calculation of wave height distribution in a harbour of arbitrary shape where the boundary has an arbitrary reflection power. The principle is to solve the following equations under given boundary conditions from certain initial state with difference method:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_x}{\partial t} &= -\frac{g}{k} \tanh kh \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial Q_y}{\partial t} &= -\frac{g}{k} \tanh kh \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= -\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y}\end{aligned}$$

where, η is water elevation and Q_x and Q_y are the integrated components of water particle velocity over a water depth. And for the value k , the following well-known relationship is kept everywhere locally for given water depth $h(x, y)$:

$$\sigma^2 = kg \tanh kh$$

where, σ is wave frequency and k is wave number.

The validity of newly introduced calculation method to the boundary of arbitrary reflection power is confirmed by the application to the partial standing waves formed in front of a wall and to wave diffraction by a semi-infinite breakwater of arbitrary reflection power. The comparison of calculated and experimental results to harbours of simple shape and examples of application to harbours of practical shape are presented.

*Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

**Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

***Member of Model Test Section, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	35
1. ま え が き	39
2. 基礎方程式と計算の方法	39
2.1 基礎方程式	39
2.2 任意反射率境界の計算法	40
2.3 仮想境界における計算法と初期条件	41
3. 任意反射率境界の計算法に対する検討	42
3.1 1次元水路に対する計算	42
3.2 半無限堤に対する計算	43
4. 実験結果との比較	45
4.1 二本半島堤内の波高分布	45
4.2 矩形状港内の波高分布	49
5. 計 算 例	50
5.1 水深急変部への適用例	50
5.2 一定水深港湾への適用例	51
5.3 任意水深港湾への適用例	53
5.4 不規則波合成	54
5.5 広領域港湾に対する計算	56
6. あとがき	57
参考文献	57
記号一覧表	58

1. まえがき

港湾施設の適切な配置を検討するためには、港内における波の伝播、変形の特徴を知ることが必要である。こうした港内における波の存在は、船舶航行による波を除いて、開口部からの侵入波、越波による伝達波および堤体透過波、風による港内発生波に起因し、水深変化による変形、港内境界による変形および反射波との合成を経て、複雑な挙動を示す。

このうち、通常最も支配的なのは開口部からの侵入波である。これは港内境界からの反射波、水深変化による変形を考えない場合には、いわゆる防波堤等による波の回折の問題として取り扱えるものであり、簡単な条件に対する回折図が作成されている¹⁾。しかしながら開口部からの侵入波に対し、たとえば港内における波高分布を求めよう場合には、実際の港湾施設の配置条件のもとで、港内境界による変形および反射波の影響を考慮することが必要となる。これに対し机上による検討法として、港内の反射境界を仮想の開口部と見做し回折図を用いて反射波の影響を考慮していく、いわゆる折返し回折図法²⁾が、簡便かつ有効な手法として従来から用いられている。さらにそうした取り扱いにおける重ね合わせに際して、その都度回折計算を行なうことによって、波の位相を考慮する近似造波板方式と称した方法も開発されてきた³⁾。

一方、水理模型実験なみに実際の港湾境界条件を直接対象として、港内波高分布を数値計算により算定する手法が研究・開発され、一部実用に供するようになってきた。フランス SOGREAH 社の Barailler と Gaillard による方法⁴⁾等がそれであり、これは光学の分野でよく用いられているキルヒホッフの法則に基づいた積分方程式による解法である。この手法では水深変化による波の屈折効果も含めることができる。

筆者らは、これとは別に任意形状境界に対する波動の解法として、初期条件から差分計算法によって逐次解いていく数値波動解析法と称した手法を開発し、既に防波堤等による波の回折の問題⁵⁾、水深変化領域における波の屈折、特に幾何光学的波向線が交差する領域に対する波高分布の問題⁶⁾に適用してきた²⁷⁾。今回の報告はこれに続き、実際の港湾施設の配置条件のもとで、開口部からの侵入波による港内波動を解き得るようにするため、任意反射率境界の計算法を新しく導入し、若干の検討お

* 以下、文献5)を第一報、文献6)を第二報と呼ぶことにする。

よび計算例を示したものである。

2. 基礎方程式と計算の方法

2.1 基礎方程式

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かたちで表わして、次式のようになる^{**3)}。

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

ここに、

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

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \quad (2.3)$$

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、 $k(=2\pi/L, L: \text{波長})$ は波数で、角振動数 $\sigma(=2\pi/T, T: \text{周期})$ との間に周知の次の関係がある。

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (2.4)$$

実際の数値計算は、図-2.1に示した間隔 Δs の格子網上の計算点の配列に対して、式(2.1)を次のように差分方程式に変換して、時間間隔 Δt 毎に逐次計算を行なう。

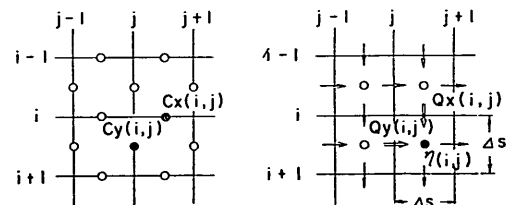


図-2.1 格子網上における計算点の配置

** 第1報において、静水面での速度成分を用いた一定水深領域に対する表面基礎方程式を導き、第2報においてそのまま任意水深領域に対する基礎方程式として示したが、そのときの実際の計算は全て本報告に示す線流量表現の式(2.1)に基づいて行なったものである。任意水深領域に対しては線流量表現の基礎方程式を用いるべきであることが判明したので、本報告においてはこれを一般的な基礎方程式とすることにした。第2報においては、両者は表現だけの相違と思われたため、この点明記していなかったことをお詫びしたい。

$$\left. \begin{aligned}
 &\eta(i, j)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t} = \eta(i, j)^{(N-\frac{3}{2})\Delta t} \\
 &- \frac{\Delta t}{\Delta s} \{Q_x(i+1, j)^{(N-1)\Delta t} - Q_x(i, j)^{(N-1)\Delta t} \\
 &+ Q_v(i, j+1)^{(N-1)\Delta t} - Q_v(i, j)^{(N-1)\Delta t}\} \\
 &Q_x(i, j)^{N\Delta t} = Q_x(i, j)^{(N-1)\Delta t} \\
 &- c_x^2(i, j) \frac{\Delta t}{\Delta s} \{\eta(i, j)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t} \\
 &- \eta(i-1, j)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t}\} \\
 &Q_v(i, j)^{N\Delta t} = Q_v(i, j)^{(N-1)\Delta t} \\
 &- c_v^2(i, j) \frac{\Delta t}{\Delta s} \{\eta(i, j)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t} \\
 &- \eta(i, j-1)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t}\}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ここに、 N は時間ステップを表わし、 $N=0$ のときを初期状態とし、逐次計算は $N=1$ から始まる。

ただし、時間間隔 Δt は計算を安定に進めるため次の関係を満たすように設定しなければならない。

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_{\max}} \frac{\Delta s}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

ここに、 c_{\max} は計算領域の最大水深に対応する波速である。

また、任意水深領域に対する計算では、第2報で述べたように計算波高に対し、次の浅水度補正係数 f_s を乗じるものとする。

$$f_s = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

ここに、

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \quad (2.8)$$

n_1 : 沖側境界における n の値

2.2 任意反射率境界の計算法

実際の港湾における境界は様々な反射特性を有しており、港内の波高分布などを計算するためには、これを考慮することが不可欠である。これに対し、第1報では任意反射率境界の計算法として「造波板方式」と名づけた方法を示したが、複雑な形状の境界に対しては適用困難であった。そのため、本報告では直線状境界の前面に形成された斜め部分重複波の場を考えることにより、新しく任意反射率境界の計算法を導びくことにする。

簡単のため、図-2.2に示すように反射率 r の直線状境界が $x=0$ (y 軸)上にあり、これに図中に示した角度 β で波が入射、反射されて、次式で表わされる斜め部分重複波が形成されているものとする。

$$\eta = \eta_I + \eta_R \quad (2.9)$$

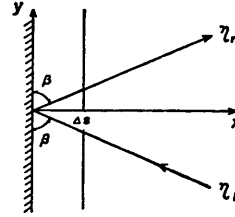


図-2.2 任意反射率境界への波の入・反射

$$\eta_I = a \sin(kx \sin \beta - ky \cos \beta + \sigma t) \quad (2.10)$$

$$\eta_R = -ra \sin(kx \sin \beta + ky \cos \beta - \sigma t) \quad (2.11)$$

ここに、 a は境界への入射波の振幅、添字 I, R はそれぞれ入射波、反射波を意味する。

このとき、境界 ($x=0$) および $x=\Delta s$ の線上における x 方向の線流量成分 Q_0, Q_1 は、次のようになる。

$$Q_0 = -(1-r)ac \sin \beta \sin(\sigma t - ky \cos \beta) \quad (2.12)$$

$$Q_1 = -\{(1+r)^2 \sin^2(k\Delta s \sin \beta) + (1-r)^2 \cos^2(k\Delta s \sin \beta)\}^{\frac{1}{2}} ac \sin \beta \sin\{\sigma(t+\tau) - ky \cos \beta\} \quad (2.13)$$

ここに、

$$\tan \sigma \tau = \frac{1+r}{1-r} \tan(k\Delta s \sin \beta) \quad (2.14)$$

いま、式 (2.12) と (2.13) を比較すれば Q_0 は次式のように Q_1 と関係づけられることがわかる。

$$Q_0^t = A Q_1^{t-\tau} \quad (2.15)$$

ここに、

$$A = \frac{1-r}{\{(1+r)^2 \sin^2(k\Delta s \sin \beta) + (1-r)^2 \cos^2(k\Delta s \sin \beta)\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

すなわち、式 (2.15) は時刻 t における任意反射率境界での線流量成分 Q_0^t が、 Δs だけ離れた地点における時刻 $(t-\tau)$ での線流量成分 $Q_1^{t-\tau}$ に係数 A を乗じたものに等しく、境界上の値を直接計算しなくても、その手前の値の時間的変化から求められることを表わしている。

本方式における任意反射率境界の計算法は以上の原理を導入したもので、任意反射率境界点に適切な r, β の値を与え、図-2.3 に示した格子網上の計算点に対し、 $t=N\Delta t$ の時刻における $Q_0^{N\Delta t}$ を次式により求める。

$$Q_0^{N\Delta t} = A Q_1^{(N-N_0)\Delta t} \quad (2.17)$$

ここに、 A は式 (2.16) による係数、 N_0 は式 (2.14) の関係より次のように与えられる。

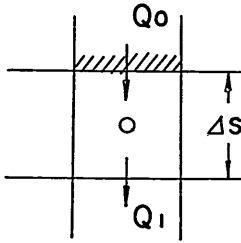


図-2.3 任意反射率境界の線流量成分

$$N_0 = \frac{1}{\sigma \Delta t} \tan^{-1} \left\{ \frac{1+r}{1-r} \tan(k \Delta s \sin \beta) \right\} \quad (2.18)$$

ただし、式(2.17)における Q_1 は通常の差分方程式により Δt 間隔毎に計算されており、その時間的变化から N_0 ステップ前の値を推定して求める。この際、 N_0 は整数とは限らないから、2次曲線による補間推定を行なうものとする。

2.3 仮想境界における計算法と初期条件

従来、たとえば波に関する水理模型実験において一定の入射波で実験を遂行するため、模型構造物から反射された波が造波板や水槽側壁によって再反射され、それらが模型に達する以前に測定を終了するといった手法を用いているのと同様に、数値計算においても周辺境界からの再反射波の影響を避けるために仮想外海領域を必要とした。これに対し、無反射性の仮想境界を導入することによって、計算の遂行上にも必要な広大な仮想外海領域は省くことが可能となる。今回の計算では、側壁に相当する仮想境界に対しては、2.2 で述べた任意反射率境界の計算法において、 $r=0$ とすることによって無反射性とするとし、造波板に相当する沖側境界に対しては、入射波が既知であることを利用して、次のような別の方法を導入することにした。

沖側境界を無反射性とするためには、境界線流量を入射波と反射波によるものの和で与えてやればよい。このうち入射波の線流量は与件として既知であるが、反射波によるものは港湾等の境界条件に応じた計算結果により一般に未知である。しかしながら、反射波の線流量は沖側境界計算点と例えば Δx だけ離れた地点での線流量から、そこでの入射波による線流量を差し引いたものの伝播として求めることができる。

本方式ではこうした原理をとり入れることとし、なお伝播の関係を単純にするため、図-2.4に示すように一般の格子網領域に長さ3メッシュから成る幅1メッシュ毎の1次元水路状の領域を設けることにした。この沖側境界計算のための領域は同一水深とし、差分方程式における切り捨て誤差を0とするため、格子間隔 Δx は一般の

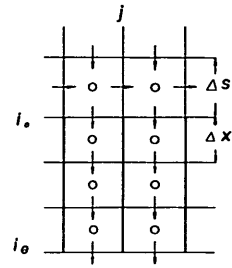


図-2.4 沖側仮想境界

格子間隔とは別に次の関係式を満たすように定める。

$$\Delta x = c_1 \Delta t \quad (2.19)$$

ここに、 c_1 は沖側境界計算領域の水深に対応する波速、 Δt は一般の計算時間間隔である。

この場合、無反射性沖側境界における線流量は、図-2.4に示した格子網配置に対し、次式により計算すればよいことになる。

$$\begin{aligned} Q_x(i_e, j)^{N \Delta t} &= Q_x(i_e - 1, j)^{(N-1) \Delta t} \\ &+ a_1 c_1 \sin \{ k(i_e - i_0 - 1) \Delta x + (N-1) \sigma \Delta t \} \\ &- a_1 c_1 \sin \{ k(i_e - i_0) \Delta x + \sigma N \Delta t \} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ただし、初期条件 ($N=0$) は $i=i_0$ に丁度波の先端が到達した状態として次のように与える。

$$\left. \begin{aligned} i &= i_0 \sim i_e \\ \eta(i, j)^{-\frac{1}{2} \Delta t} &= a_1 \sin \left\{ \left(i - i_0 + \frac{1}{2} \right) k \Delta x - \frac{1}{2} \sigma \Delta t \right\} \\ Q_x(i, j)^0 &= -a_1 c_1 \sin \{ (i - i_0) k \Delta x \} \\ Q_y(i, j)^0 &= 0 \\ i &= 1 \sim i_0 - 1 \\ \eta(i, j)^{-\frac{\Delta t}{2}} &= Q_x(i, j)^0 = Q_y(i, j)^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

ここに、 a_1 は入射波の振幅である。沖側境界における一般の水位、線流量の逐次計算は、1次元水路としているため、 i 方向成分のみに対して、式(2.5)により $ds = \Delta x$ として遂行すればよい。ただし、 $i=i_0$ における線流量成分 $Q_x(i_0, j)$ は、そこで i 方向の格子間隔が変化するため、これを考慮して次式により計算する。

$$\begin{aligned} Q_x(i_0, j)^{N \Delta t} &= Q_x(i_0, j)^{(N-1) \Delta t} \\ &- c_1^2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ \eta_0^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} - \eta(i_0 - 1, j)^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} \} \end{aligned} \quad (2.22)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \eta_0^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} &= \eta(i_0, j)^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} \\ &+ \frac{\Delta s - \Delta x}{2 \Delta x} \{ \eta(i_0 + 1, j)^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} \\ &- \eta(i_0, j)^{(N-\frac{1}{2}) \Delta t} \} \end{aligned} \quad (2.23)$$

3. 任意反射率境界の計算法に対する検討

2.2 で任意反射率境界の計算法を述べたが、本方式では境界点に対し r と β を与えなければならない。反射率 r は計算上一定の値を与えるとしても、境界への到達波の波向き β は波の伝播、変形の結果であり、また複雑な境界形状にあっては1方向のみとは限らず、原理的には与え与えることができない。実用的には適切な値を想定して与えることになり、以下主として本計算法における β の与え方について簡単な計算を実施して検討する。

3.1 1次元水路に対する計算

まず、2で述べた任意反射率境界と無反射性沖側境界の計算法を導入して、1次元水路に対する計算を実施した。この場合、側壁は勿論完全反射とする。

図-3.1(1)~(6)は、水路長を2波長とし任意反射壁前方1波長にわたる10周期目の計算波高分布を示したものである。反射率を0.0から1.0まで0.2づつ変化させているが、計算波高分布は図中実線で示した入・反射波の重ね合わせによる波高分布とほぼ完全に一致しており、1次元水路に対しては本方式に全く問題が無いことが確認される。

一方、同様な条件において、計算における波向き条件のみ $\beta=75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ と変化させて波高分布を求めると図-3.2(1)~(5)のようになる。反射率 $r=0$ から0.8に対する結果を示しているが、 $\beta=75^\circ$ ではほぼ所定の反射率に対応した結果となるが、 $\beta=60^\circ, 45^\circ$ とすると

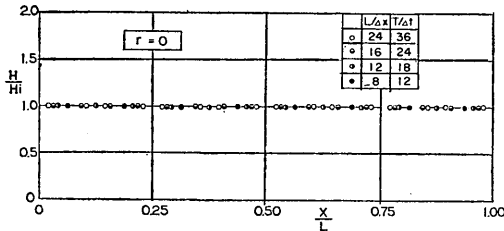


図-3.1(1) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.0, \beta=90^\circ$)

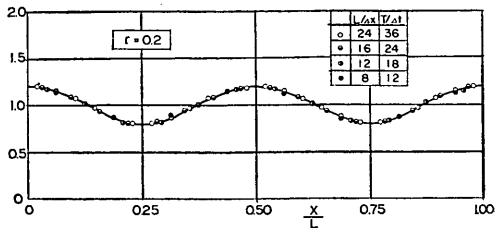


図-3.1(2) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.2, \beta=90^\circ$)

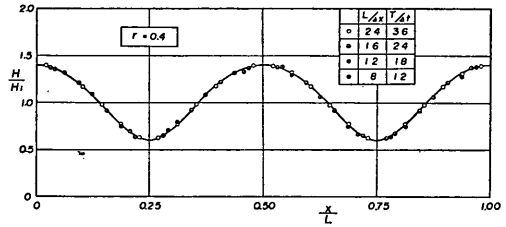


図-3.1(3) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.4, \beta=90^\circ$)

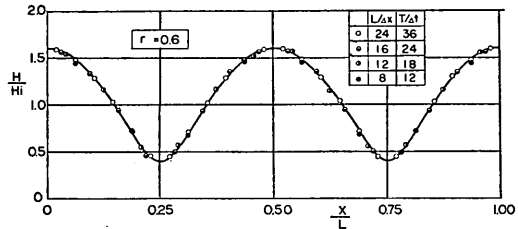


図-3.1(4) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.6, \beta=90^\circ$)

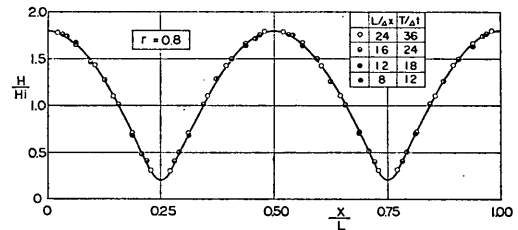


図-3.1(5) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.8, \beta=90^\circ$)

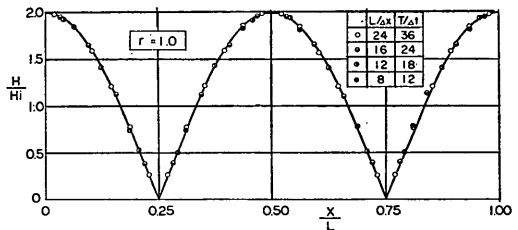


図-3.1(6) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=1.0, \beta=90^\circ$)

違った結果となる。こうした β の与え方の影響は反射率 r が小さいほど顕著となることが認められる。たとえば $r=0$ の場合、 $\beta=75^\circ$ では $r=0.0$ 、 60° では $r=0.08$ 、 45° では $r=0.18$ に対応した計算結果となっており、 $r=0.8$ では、いずれもほぼ所定の結果となっている。 r

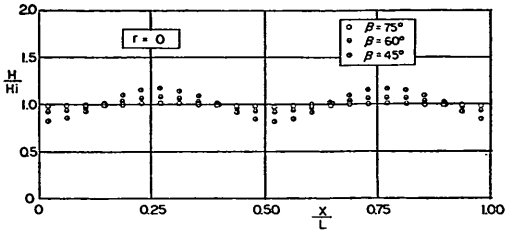


図-3.2(1) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.0$)

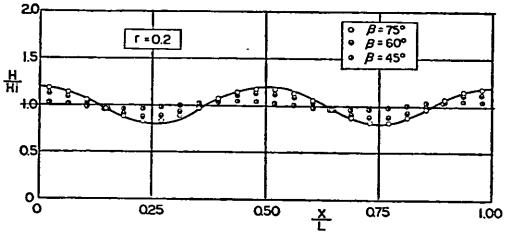


図-3.2(2) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.2$)

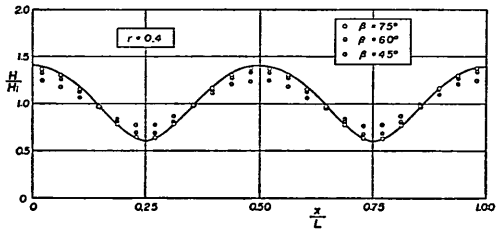


図-3.2(3) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.4$)

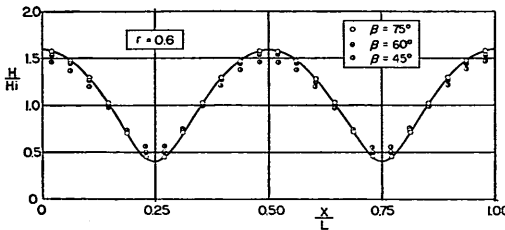


図-3.2(4) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.6$)

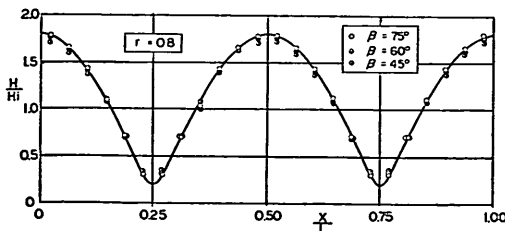


図-3.2(5) 任意反射率境界壁前方の波高分布 ($r=0.8$)

=1.0 に対して、式の性質上 β の与え方は無関係となり、いずれも完全重複波に対応した結果が得られる。

3.2 半無限堤に対する計算

次に平面問題における最も単純な例である半無限堤による波の回折に対する計算を行なう。まず、半無限堤に波が直角に入射する場合を考える。この場合、堤前面には $\beta=90^\circ$ で波が入射し、堤背面には堤端からの回折波が堤に沿う方向に進行することになるから、その意味では $\beta=0^\circ$ であり、境界に直角成分を有した到達波が無いことから、計算上反射率の影響は無いと考えられる。これに対し計算結果では、堤前面側については 3.1 の場合と同様 90° に近い β の値を与えることによって、反射率に応じた妥当な結果が得られることが確認された。一方堤背後については図-3.3に結果の1例を示しているように反射率および β の値によって結果が異なる。たとえば堤背面を完全消波 ($r=0$) とした場合の回折波高が、完全反射 ($r=1.0$) とした場合より大きくなり、不自然な結果を与えることになる。堤背面についても β の値を 90° に近い値とすることによって、より妥当な結果を得ることができるが、一般に他境界からの反射波が顕著に到達する場合以外は、防波堤等の背面については実際の反射率にかかわらず完全反射として計算を行なうのがよいであろう。

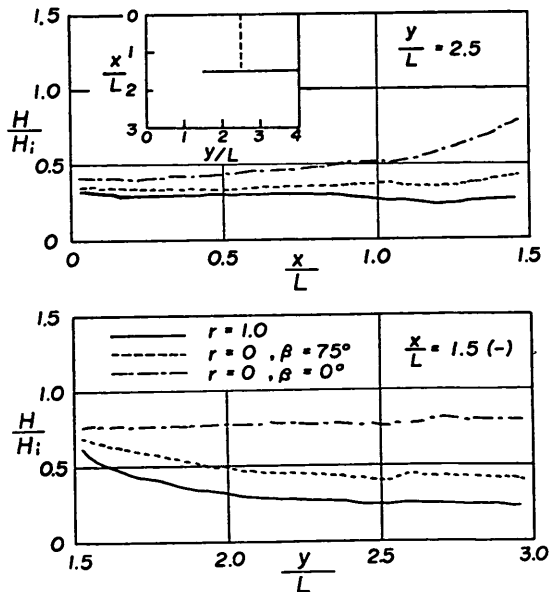


図-3.3 半無限堤前面の境界条件の影響

図-3.4は、堤前面の反射率 $r=0.0$ の半無限堤に波向が 45° で斜めに入射した場合の堤外側 $x/L=1$ の線上における計算波高分布を種々の β に対して示したものである。この場合、防波堤が完全消波であるから、波高比分布はほぼ1.0となるべきである。これに対し、計算結果は β が 90° に近いほど妥当な結果が得られることが認められる。格子網上の防波堤境界は階段状に配置することになるため、こうした結果になるものと思われる。そのため、一般に任意反射率境界の計算における β の値としては、常に直角に近い値を与えることとした。

次に周辺の仮想境界における無反射性の検討を行なうために、半無限堤、直角入射の条件で十分長時間計算を

継続した結果を示す。計算領域は x 方向に $6L$ 、 y 方向に $7L$ で、 $y/L=3\sim 7$ に1メッシュ幅 ($L/16$) の防波堤を背面が $x/L=3$ の線上となるように配置する。 $x/L=6$ に丁度波の先端が到達したときを初期状態とし、いずれも10周期目の計算結果である。図-3.5、3.6は防波堤前面の反射率がそれぞれ1.0および0.3の場合の全計算領域にわたる波高比分布であり、図-3.7は防波堤前面および背面に沿う波高分布を入射波領域まで含めて示したものである。また、図-3.8は完全反射の場合の両側方仮想境界に沿う計算波高分布である。これらの結果から、周辺仮想境界の無反射性は実用的には十分満足できるものであることが確認できる。

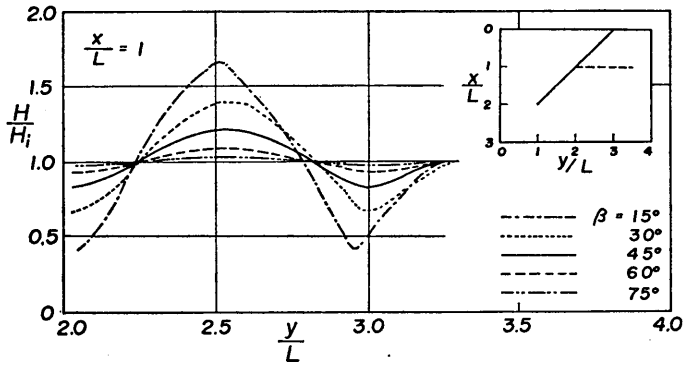


図-3.4 半無限堤斜め入射

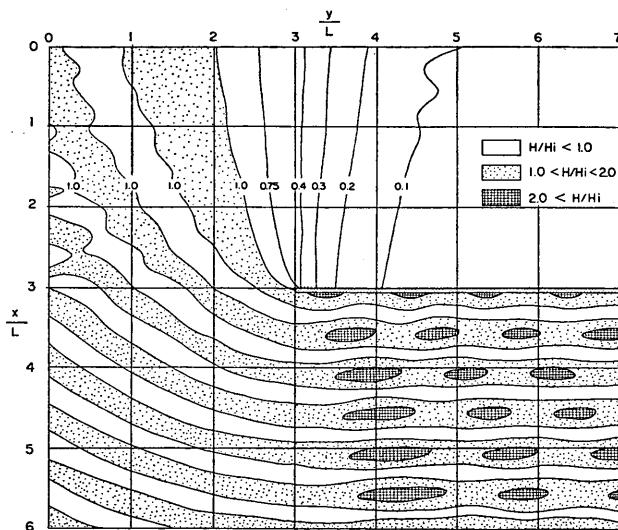


図-3.5 半無限堤堤端付近の波高比分布 (堤前面 $r=1.0$, $\beta=75^\circ$)

数値波動解析法による港内波高分布の計算

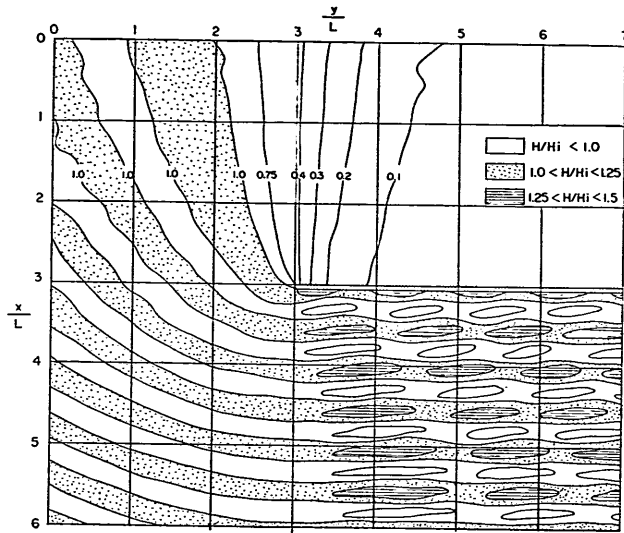


図-3.6 半無限堤堤端付近の波高比分布 (堤前面 $r=0.3$, $\beta=75^\circ$)

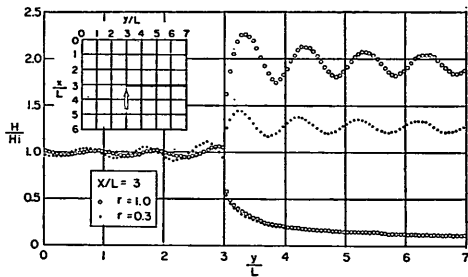


図-3.7 防波堤に沿う波高比分布

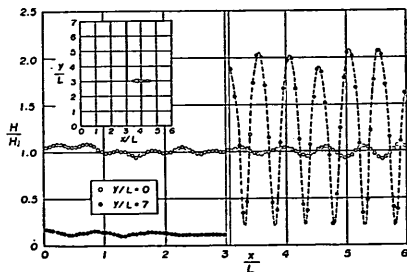


図-3.8 側方仮想境界に沿う波高比分布

4. 実験結果との比較

本章では、二本半島堤内と矩形状港内に対する計算と模型実験による波高分布の比較を示す。前者の計算は、仮想外海領域を考慮した従来の方法により、任意反射率境界の計算法はとり入れていない。後者の計算は任意反射率境界を含むものである。

4.1 二本半島堤内の波高分布

まず、防波堤による波の回折の問題への数値波動解析法の適用性を検討するために行なった二本半島堤内の波高分布に対する計算と実験結果の比較について述べる。

対象とした二本半島堤は、海岸線から左右対称に2本の斜め防波堤を伸ばしたもので、海岸線と防波堤とがなす内角が 45° , 60° , 75° の三種である。防波堤の開口幅は全て $4L/3$ とし、入射波の波向きが海岸線に直角の場合を対象とすることとして、計算および実験共に図-4.1, 4.2 に示したように中心線を完全反射として半分の領域のみによっている。ここに、計算と任意反射率および無反射性仮想境界の計算法を導入していない従来の手法により行なったため、防波堤沖側に仮想外海領域を設け、また海岸線からの反射波の影響を含まない結果を得るため、海岸線に相当するところからそれと直角に侵入波を逃がす領域を設けている。そして計算結果を、周辺の境界からの反射波の影響が対象とする堤内に到達する以前の値として求めることとした。計算における諸定数は以下のとおりである。

水深 $h=10\text{m}$

波長 $L=150\text{m}$

格子間隔 $\Delta s=L/15=10\text{m}$

時間間隔 $\Delta t=T/24 \approx 0.65\text{sec}$

一方、実験は図-4.2に示したように海岸線背後を水面域とし、水槽端に砂利斜面の消波域を設けることによって、水槽端からの反射波の影響を軽減することにした。

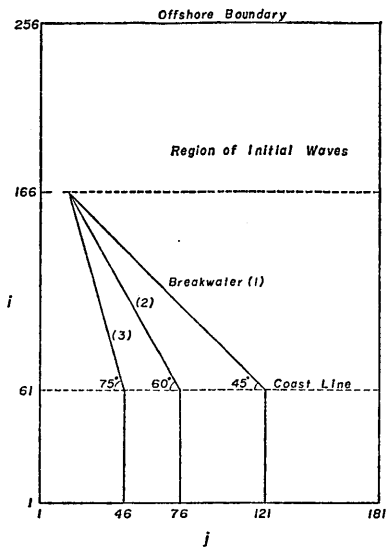


図-4.1 二本半島堤の計算配置

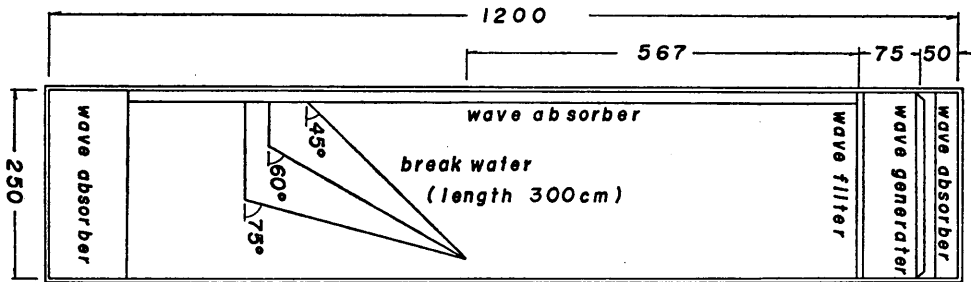


図-4.2 二本半島堤の実験配置

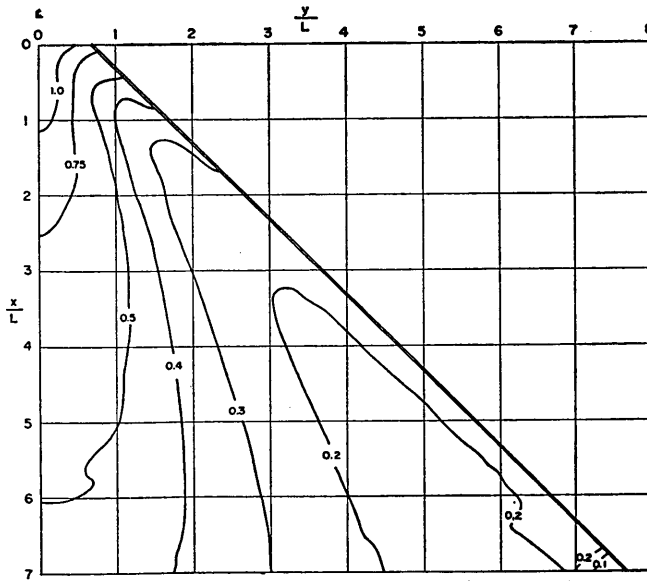


図-4.3 二本半島堤内の計算波高比分布 ($\alpha=45^\circ$)

海岸線の造波板側にも水槽端と同様な砂利斜面による消波浜を設け、開口部側でない水槽側壁にはサンフレックスを金網に詰めた消波装置を配している。防波堤境界は木製直立壁とし、実験の条件は以下のとおりである。

水深 $h=15\text{cm}$

波長 $L=40\text{cm}$

入射波高 $H_i=1.4\text{cm}$

図-4.3~4.5 は計算による堤内波高比分布を示したものである。防波堤と海岸線とのなす角 α が 45° の場合は比較的単調な分布であるが、 60° 、 75° の場合にはかなり複雑なものとなっている。図-4.6は同一線上に対する各ケースの波高比分布を示したものであるが、この場合必ずしも堤内面積が広いほど堤内波高が小さくはならない。

数値波動解析法による港内波高分布の計算

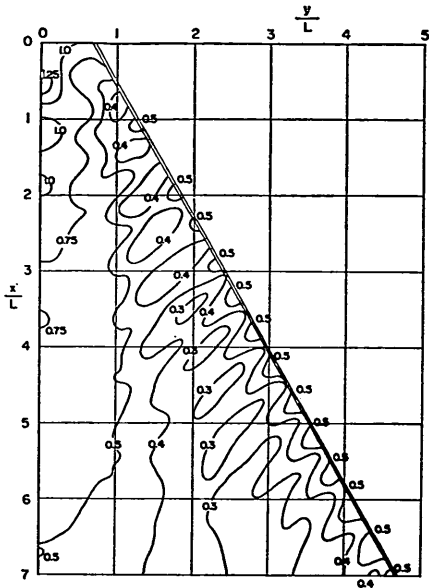


図-4.4 二本半島堤内の計算波高比分布($\alpha=60^\circ$)

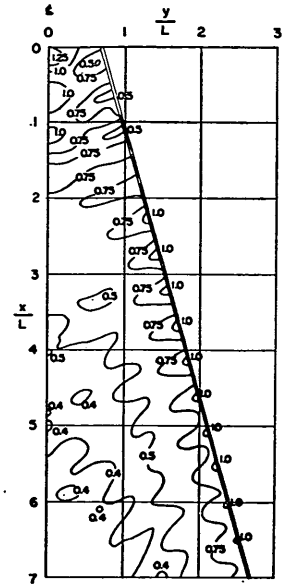


図-4.5 二本半島堤内の計算波高比分布($\alpha=75^\circ$)

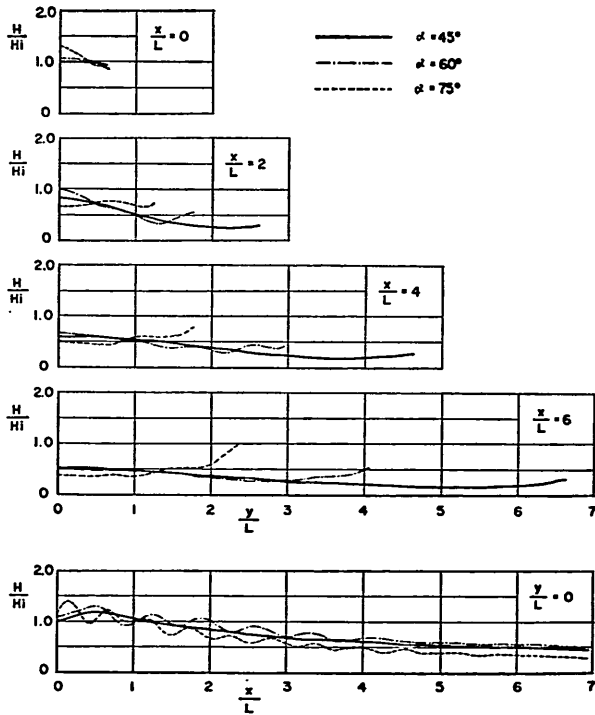


図-4.6 二本半島堤内の断面的波高比分布(計算値)

図-4.7~4.9 は、各ケースについて実験結果と比較したものである。 $\alpha=45^\circ$ の場合には、計算結果は実験結果にかなりよく一致している。 $\beta=60^\circ$ でも両者はほぼ一致しているが、 $\beta=75^\circ$ ではやや相違が認められるようになる。特に、計算結果に現われている防波堤背面に沿って大きな波高の生ずる傾向は、実験結果には認められない。計算におけるこうした結果は、防波堤境界を数値計算上不連続な階段状に近似していることによるかもしれない。しかしながら、堤内全体に亘る波高分布の算定の観点からは、実用上十分な精度を有していると見なすことができる。

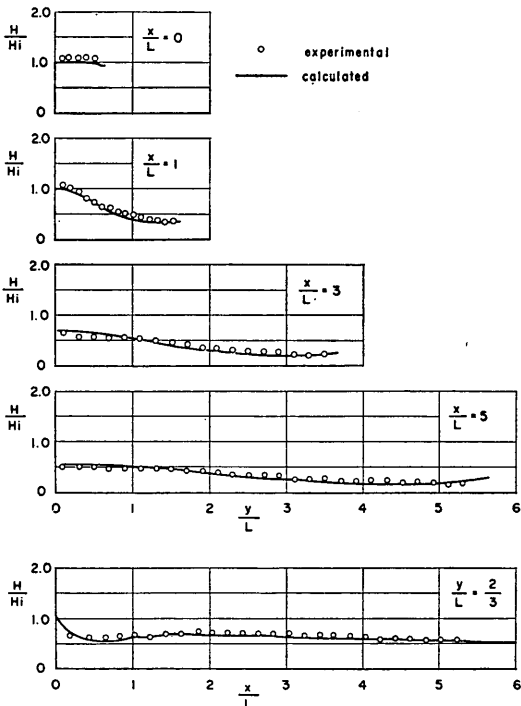


図-4.7 実験結果との比較 ($\alpha=45^\circ$)

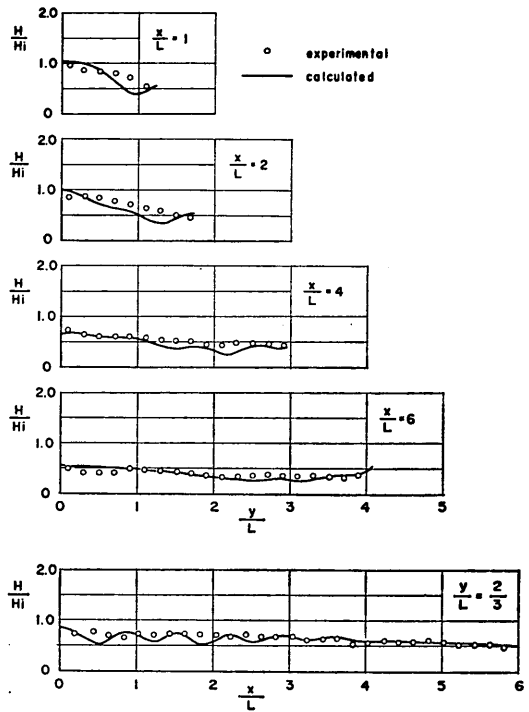


図-4.8 実験結果との比較 ($\alpha=60^\circ$)

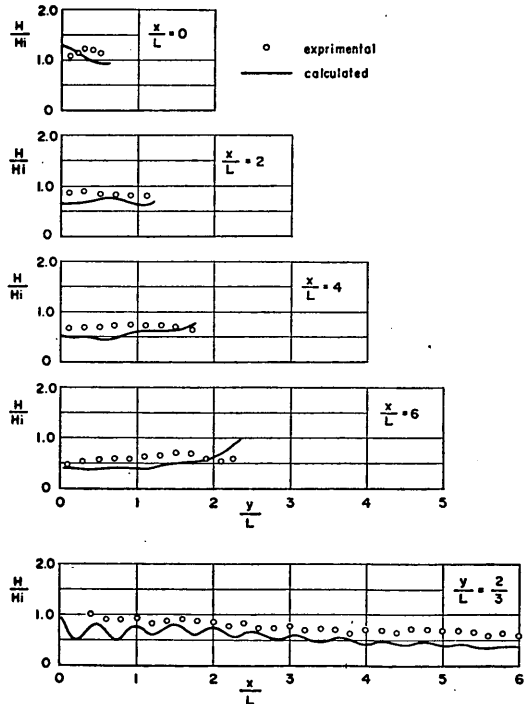


図-4.9 実験結果との比較 ($\alpha=75^\circ$)

4.2 矩形状港内の波高分布

次に任意反射率境界および無反射性沖側境界をとり入れた計算手法により、簡単な形状に対する計算を実施して、実験結果と比較してみる。対象とした形状は幅 $4L$ 、奥行 $1.7L$ の矩形状のもので、開口幅 $1.0L$ 、港奥および堤外面の反射率が 0.3 のものである。波向きは海岸線に直角とし、計算は左右対称性のため図-4.10 に示したように半分の領域に対し実施した。同図には、計算による波高比線をも示してある。ここに、計算結果は8周期目のもので、格子間隔および時間間隔は以下のとおりである。

$$\Delta s = \frac{L}{16}, \quad \Delta t = \frac{T}{24}$$

一方、実験における配置は図-4.11 に示したとおりで、部分反射境界は木製の直立壁前面に砂利斜面を設けるこ

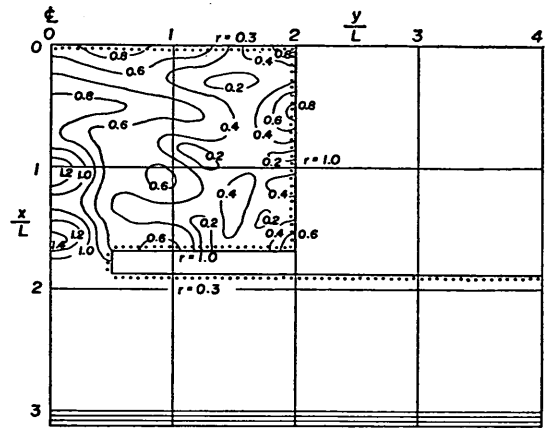


図-4.10 矩形状港湾の計算配置と計算波高比分布

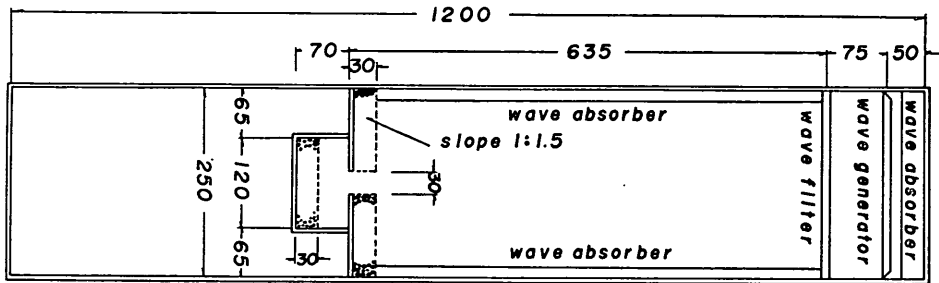


図-4.11 矩形状港湾の実験配置

とによった。反射率 0.3 はこうした砂利斜面に対し、実験入射波を直角に作用させた場合の前面波高分布を測定し、Healy の方法によって求めた値であり、計算における港奥部分反射境界の位置は、そうした前面波高分布における静水面と斜面との交点に近い腹の位置としたものである。実験における条件は以下のとおりである。

- 水深 $h=15\text{cm}$
- 波長 $L=30\text{cm}$
- 入射波高 $H_i=1.8\text{cm}$

図-4.12~4.13 に各測線上における計算と実験結果を対比して示した。計算結果は実験によるものより波状性

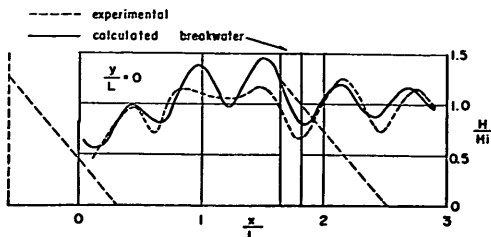


図-4.12 実験結果との比較 ($y/L=0$)

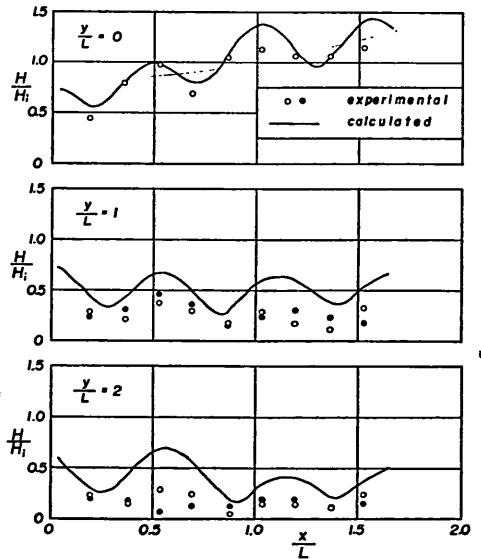


図-4.13 実験結果との比較 (x 軸方向)

が顕著となっており、特に堤内側壁に沿ってやや差が大

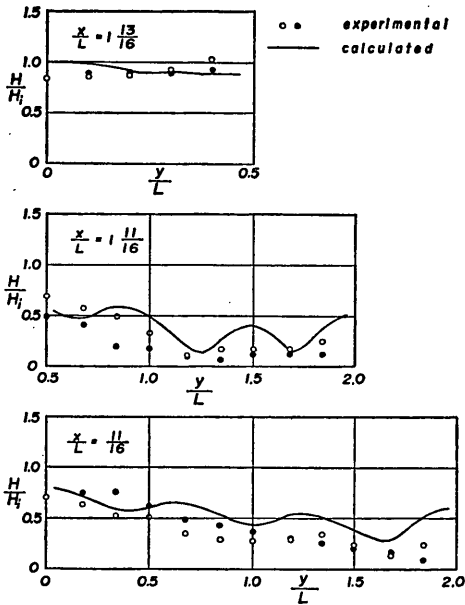


図-4.14 実験結果との比較 (y 軸方向)

きいのが認められる。こうした違いのなかには、水理実験における波の変動性等も影響していると思われる。

5. 計算例

本章では種々の条件に対する計算例を示し、実際問題への本方式適用上の注意事項を随時述べることにする。

5.1 水深急変部への適用例

本方式は任意水深分布に対して、屈折による波の変形を含めて解くことができるが、基本式の性質上水深急変部に対しては近似度が悪くなる。しかしながら、第2報において一定水深領域に孤立して存在する球面浅瀬に対して計算を実施し、実験結果と比較したが、両者は極めて良く一致した。この場合の浅瀬の平均勾配は1/8であり、この程度的水深変化領域に対しては十分適用可能である。

今回、図-5.1に示すように一様水深15mの領域から5mの領域まで屈曲した勾配1:20の斜面でつながる海底地形に対し、水深15mにおける波長150mの波が、図中に示した波向きで入射する場合の計算を実施した。実際の計算は、波向きに対し地形が左右対称であるため、対称線を完全反射壁とし半分の領域によっている。計算の条件は以下のとおりである。

$$ds = L_1/15$$

$$dt = T/24$$

$$L_1 \text{ (水深15mにおける波長)} = 150\text{m}$$

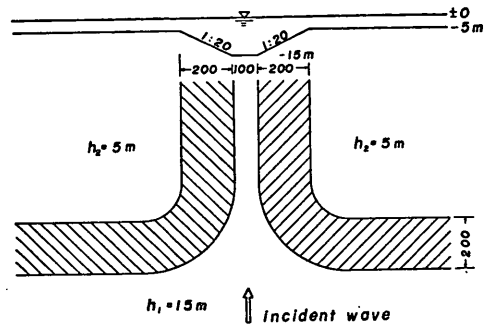


図-5.1 計算の対象とした海底地形

図-5.2に計算波高比の分布を示した。y/L₁=0の線上では波の伝播と共に波高が小さくなり、波向き線の集中する水深5mの一定水深部で波高が著しく増大するところが現われることが認められ、こうした水深急変部では波の屈折による到達波高の変化が顕著であることがわかる。実際現象としては、入射波高の大きさによって砕波が生ずることになり、波高増大に限度があることになるが、そうした砕波現象を直接計算にとり入れることはできない。

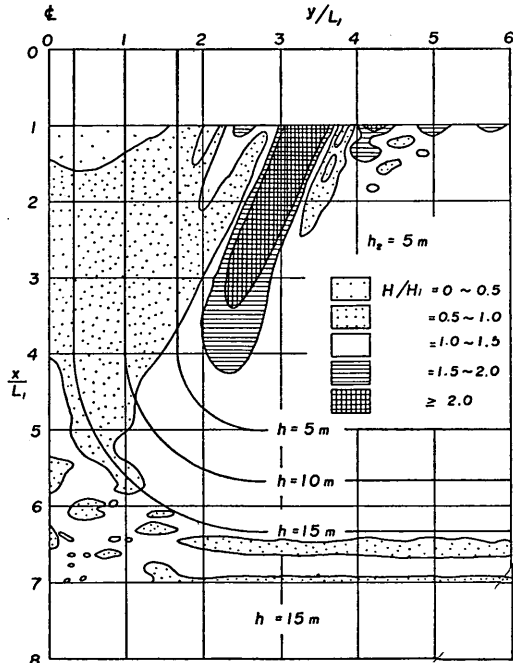


図-5.2 計算波高比分布

図-5.3は同条件において、図中に示したように防波堤を配置した場合の堤内における波高比分布を示したものである。ここに、堤内の波高分布のみを問題としたため

数値波動解析法による港内波高分布の計算

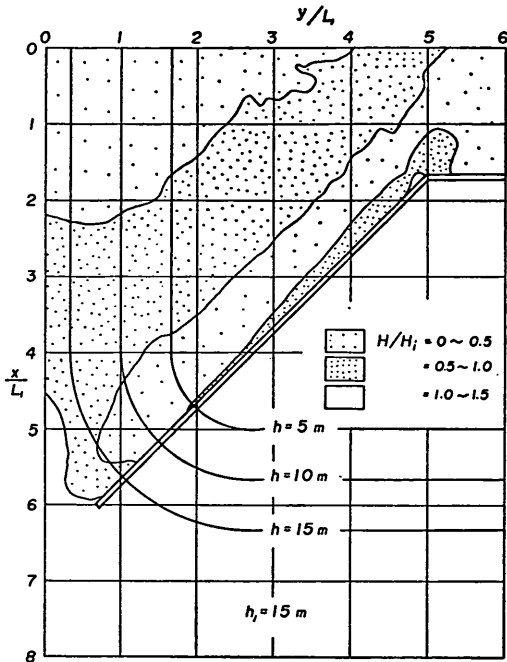


図-5.3 防波堤がある場合の波高比分布

5.2 一定水深港湾への適用例

港湾の条件によって、水深変化が著しくない場合には一定水深と見なして計算を遂行するのが簡単である。ここでは、1.5km×1.0km程度の埋立型港湾への適用例を示す。

図-5.5 は外郭施設のみによる港内の波高分布を、図-5.6 は港内施設を配置した場合の波高分布を示したもの

防波堤前面側は完全消波として計算を実行している。図-5.4は、防波堤有無の場合の断面的波高比分布を対比して示したものである。y/L=0の線に限ってみれば、この場合防波堤の効果は小さいことがわかる。

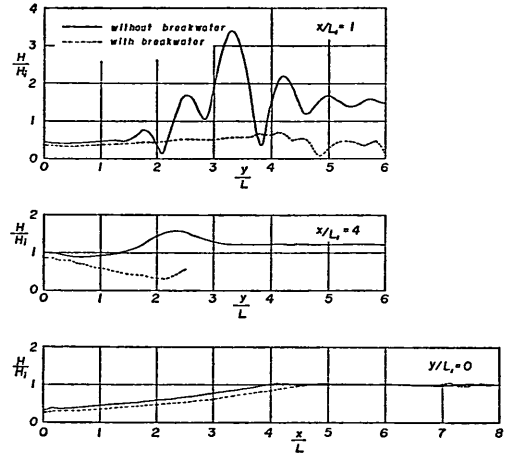


図-5.4 防波堤有無による波高比分布の比較

である。両者を比較することにより、港内施設からの反射によって波高変化の著しい領域が現われることがわかる。たとえば、図-5.6の y/L=4, x/L=0~2 付近の領域では入射波高の1倍以上から0に近い波高が複雑な分布で現われている。こうした領域では、部分的に小さい波高が現われているところでも静穏度がよいとは見なされず、逆に擾乱度が高いと解釈しなければならない。こ

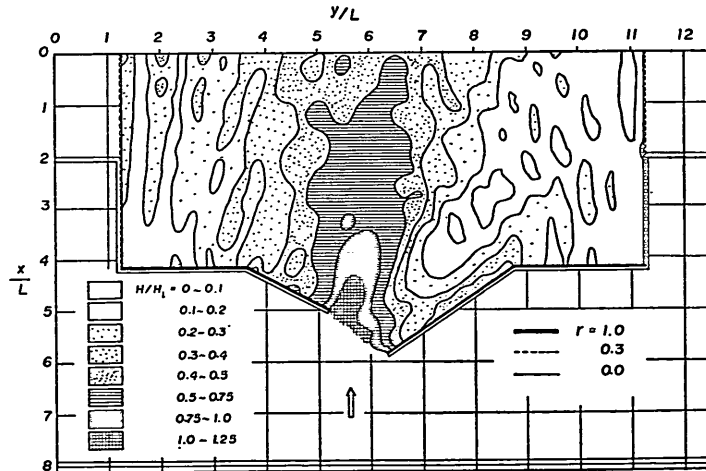


図-5.5 一定水深港内波高比分布 (外郭施設のみ)

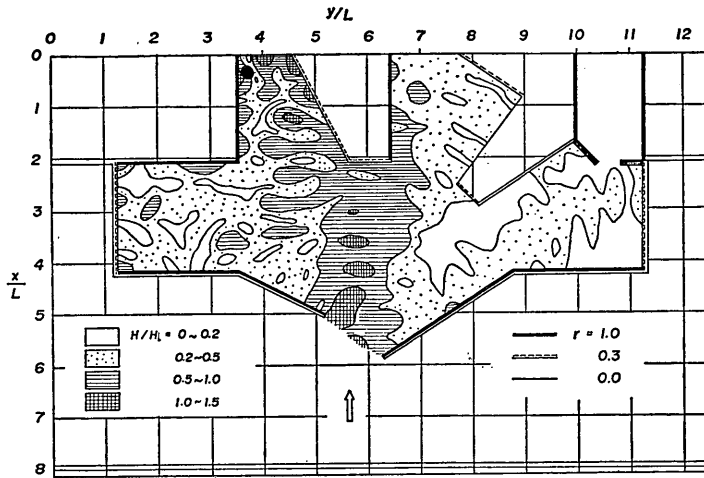


図-5.6 一定水深港内波高比分布 (港内施設あり)

の意味では港内の静穏度を単なる波高比分布のみで表わすのは不十分で、たとえば、表面水粒子運動の三次元における最大速度ベクトルの絶対値で表わす等の適切な表現法を用いるべきであろう。この点については目下検討中である。なお、本計算の条件は以下のとおりで、計算結果は $x/L \approx 8$ に波の先端があるときを初期条件とし、17周期目のものである。

$$\Delta s = L/12, \quad L = 120\text{m}$$

$$\Delta t = T/18, \quad T = 12.6\text{sec}$$

図-5.7は、図-5.6において入射波の波向き方向に対する開口部の投影幅が丁度0となるように防波堤を延長した場合の計算結果である。特に、前者において開口部か

らの波の直進領域に相当するところで、延長の効果が顕著であることがわかる。

以上の計算は、港内波高分布に主眼を置いたため、外郭施設の海側の境界条件は反射率0として実行したものであるが、防波堤等からの反射波が港内波高に影響を与える場合には、勿論条件に応じた反射率を与えてやらなければならない。図-5.8は、図-5.7において防波堤外側の境界条件のみ完全反射に変えて行なった計算結果である。両者を比較すると、図-5.8の場合が、図-5.7の場合より、全体的にやや大きくなっているのが認められるが、開口部付近を除いては大差ない。一般に、港内の波高を問題とする場合、港外側の地形および反射特性につ

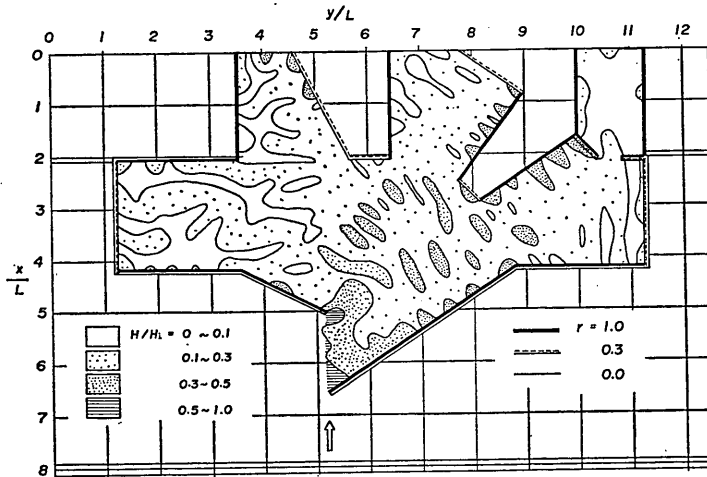


図-5.7 防波堤を延長した場合の波高比分布 (防波堤外面、完全消波)

数値波動解析法による港内波高分布の計算

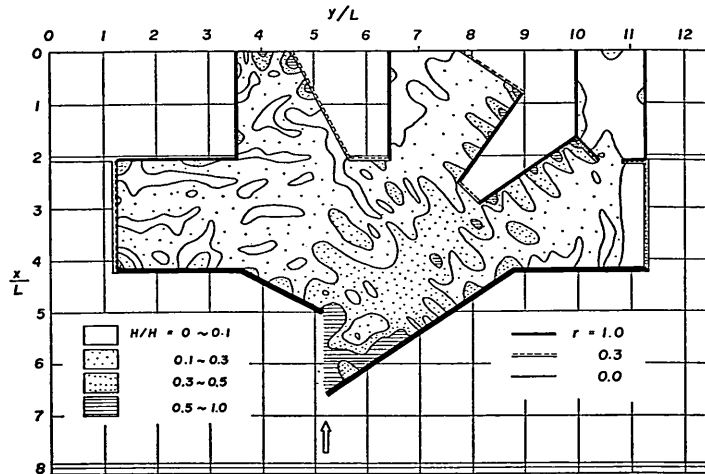


図-5.8 防波堤を延長した場合の波高比分布 (防波堤外面, 完全反射)

いては港内への影響に配慮して, 計算に便利なように与えてよいであろう。

5.3 任意水深港湾への適用例

図-5.9に示したような水深分布を有する掘込み港湾の外港部に対して, 計算を実施する。主防波堤先端の水深は12mであり, それより沖側では計算上一定水深とする。波浪条件は, 水深12mで波長120mの波が海岸線に直角方向に入射した場合を対象とする。格子間隔等の計算条件は以下のとおりである。

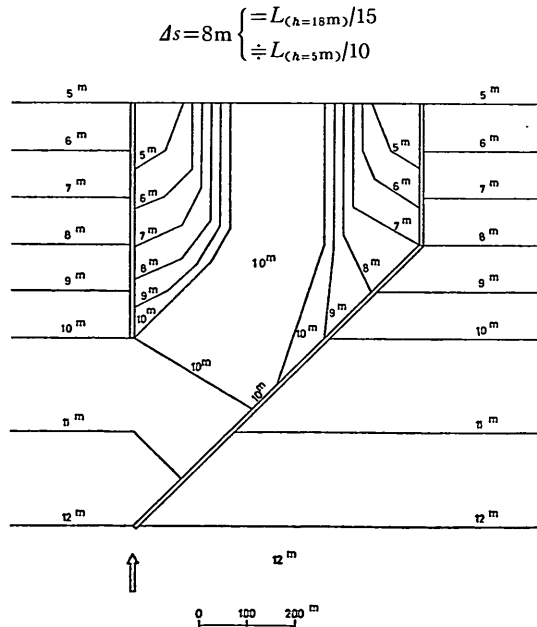


図-5.9 任意水深港湾の配置

$$\Delta t = T/24 \approx 0.49 \text{ sec}$$

図-5.10 は計算波高比の分布を示したものである。ここに, 計算上の海岸線は水深5mとし, 完全消波境界とした。図により, 港内中央部では全体に波高が小さく, 防波堤よりに波高変化が大きくなることわかる。こうした港内における水深変化の影響を明かにするため, 一定水深とした場合の計算結果を図-5.11に示した。前図と比較することにより, 影響の程度を知ることができ

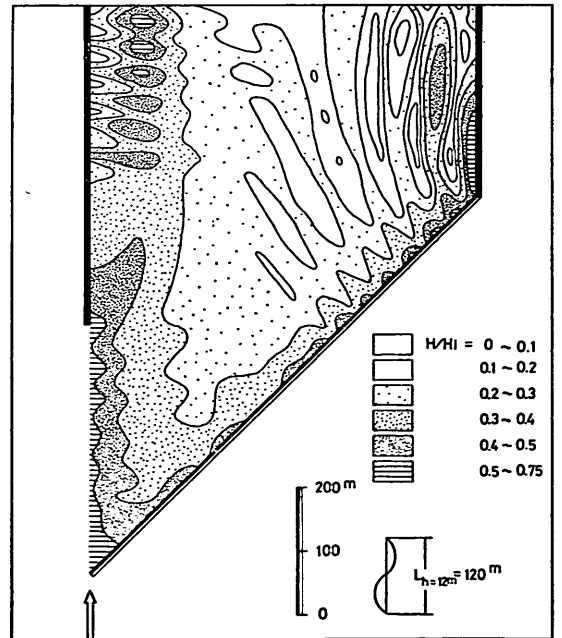


図-5.10 任意水深港内の波高比分布

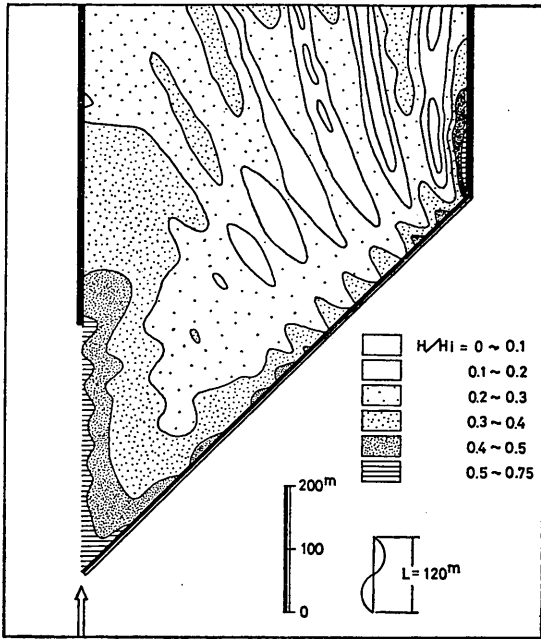


図-5.11 一定水深とした場合の波高比分布

る。完全消波とした港奥の境界線上では、水深変化を考慮することにより、水深の浅い防波堤よりに波が屈折するため、中央付近で波高が小さくなっていることがわかる。これから掘込み部となる場合には、そこへの入射波の大きさも水深変化を考慮するかどうかで違ってくることになる。

5.4 不規則波合成

本方式によって、波の不規則性を考慮するためには、坂井・河合⁹⁾らが指摘しているように、成分波毎の計算を行なって、その結果をエネルギー的に合成しなければならない。成分波の選定および合成に際しては、周期、方向の不規則性を考慮した波のパワー・スペクトルに基づくことが必要であり、不規則波による波の回折の問題等に用いられている手法と全く同様に考えればよい。

結果を有義波高で表示する場合、格子網上の水位計算点において、合成した結果の有義波高は次式で求められる。

$$H_{\frac{1}{3}}(i, j) = 4.0 \sqrt{\sum_{n=1}^{n_c} \frac{1}{2} a_n^2 \{K_D(i, j, n)\}^2} \quad (5.1)$$

ここに、

$H_{\frac{1}{3}}(i, j)$: 各水位計算点における合成有義波高

$K_D(i, j, n)$: 各水位計算点における n 番目の成分波

による計算波高比

n_c : 成分波の数

a_n : n 番目の成分波の入射波としての振幅

入射波の有義波高 $(H_{\frac{1}{3}})_I$ に対する比をとれば、結果を有義波高比の分布で得ることができる。ただし、 a_n と $(H_{\frac{1}{3}})_I$ との間には次の関係が成立しなければならない。

$$(H_{\frac{1}{3}})_I = 4.0 \sqrt{\sum_{n=1}^{n_c} \frac{1}{2} a_n^2} \quad (5.2)$$

前述したように成分波は周期、方向の不規則性を考慮して選定することが必要であり、各成分波の周期および振幅 a_n は、入射波のパワー・スペクトルに基づいて決定するのが一般的であるが、ここでは簡単に表-5.1に示したような等振幅の6成分を考え、図-5.11と同条件の

表-5.1 成分波の諸元

成分波の No.	方向 θ^* ($^\circ$)	周期 T (sec)	振幅 a (m)
1	0	8	$(H_{\frac{1}{3}})_I^{**} / (4\sqrt{2})$
2	0	10	〃
3	0	12	〃
4	0	14	〃
5	30	12	〃
6	-30	12	〃

* 波の主方向を $\theta=0^\circ$ とする。

** $(H_{\frac{1}{3}})_I$: 入射波の有義波高 (m)

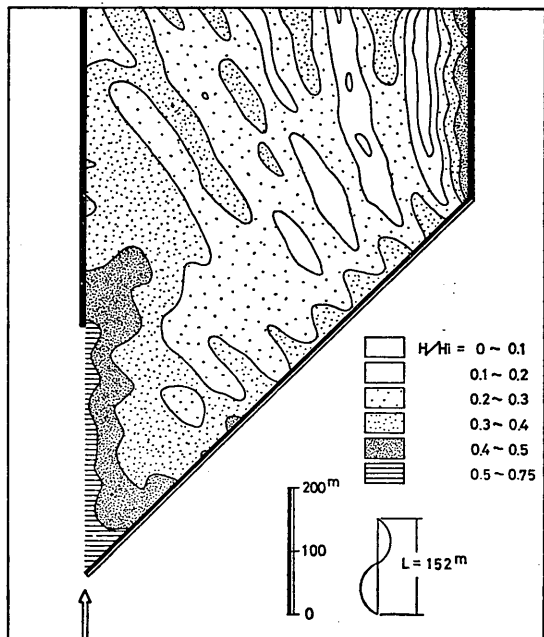


図-5.12 成分波による波高比分布
($T=12$ sec, $\theta=0^\circ$)

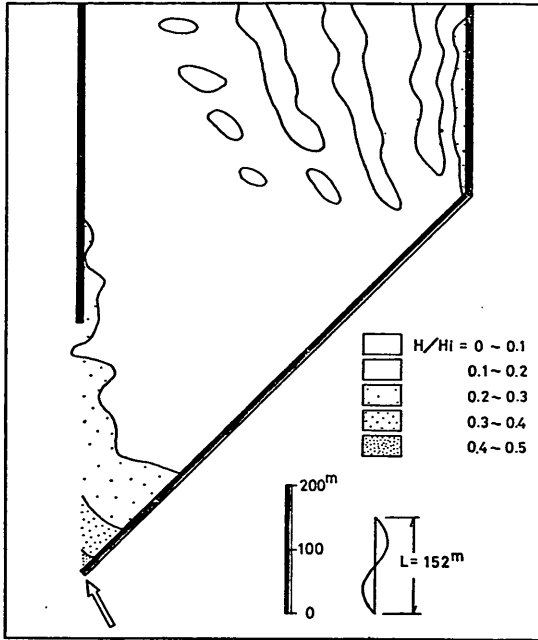


図-5.13 成分波による波高比分布
($T \cong 12\text{sec}$, $\theta = -30^\circ$)

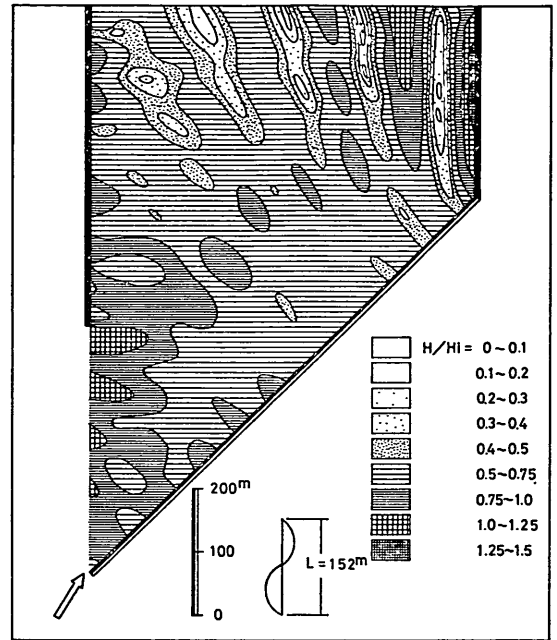


図-5.14 成分波による波高比分布
($T \cong 12\text{sec}$, $\theta = +30^\circ$)

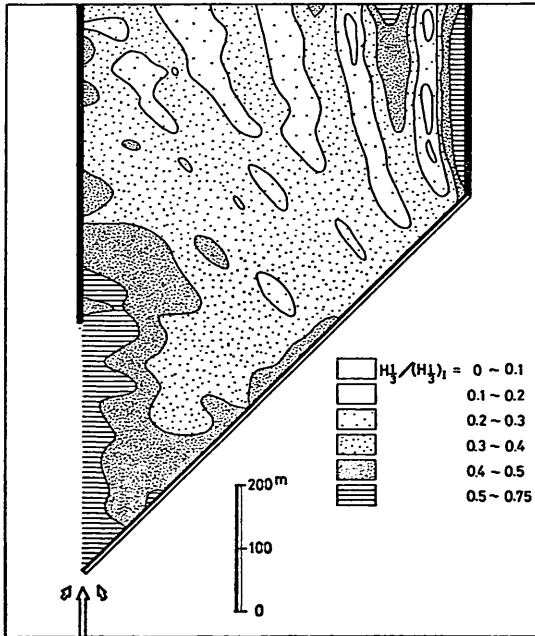


図-5.15 有義波高比分布 (異方向6成分波)

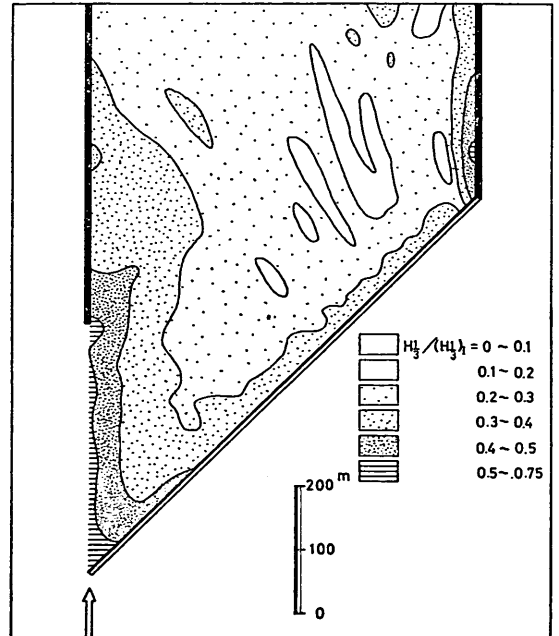


図-5.16 有義波高比分布 (単一方向4成分波)

境界に対する不規則波合成を行なってみた。ただし、水深は20mの一定水深としている。まず、図-5.12~5.14は、周期12secの成分波による波高比分布を示したもので、式(5.1)における $n=3, 5, 6$ に対する $K_D(i, j, n)$ の分布である。こうした結果を6成分波に対して合成し有義波高比の分布のかたちで表わせば、図-5.15のような結果が得られる。成分波毎の計算結果と比較して、合成結果はかなりならされたものとなることがわかる。なお、図-5.16は周期のみの不規則性を考慮して、表-5.1の1~4の4成分波に対する同様な有義波高比分布を示したものである。ただし、この場合各成分波の振幅は $(H_{1n})_i / (2\sqrt{2})$ の等振幅としている。

5.5 広領域港湾に対する計算

本方式による計算は、港湾形状を通常波長の十数分の一の格子網に分割して行なうため、波長に比較して広領域の港湾に対しては計算量が著しく多くなる。本章における今ままで示した計算例は全て TOSBAC-5600システムを用いて、演算の遂行をコア内処理だけによって行なったものである。計算所要時間はプログラムの組み方等によっても異なってくるが、たとえば5.2の図-5.7の領域(約 $12.5L \times 8L$, $\Delta s=L/12$) に対する306ステップ(17周期)の計算に要するCPU占有時間は24分であった。この程度の条件に対しては、十分実用的に適用可能である。

しかしながら、波長に比較して広領域となる条件に対しては、演算の実行に外部記憶装置を必要とするように

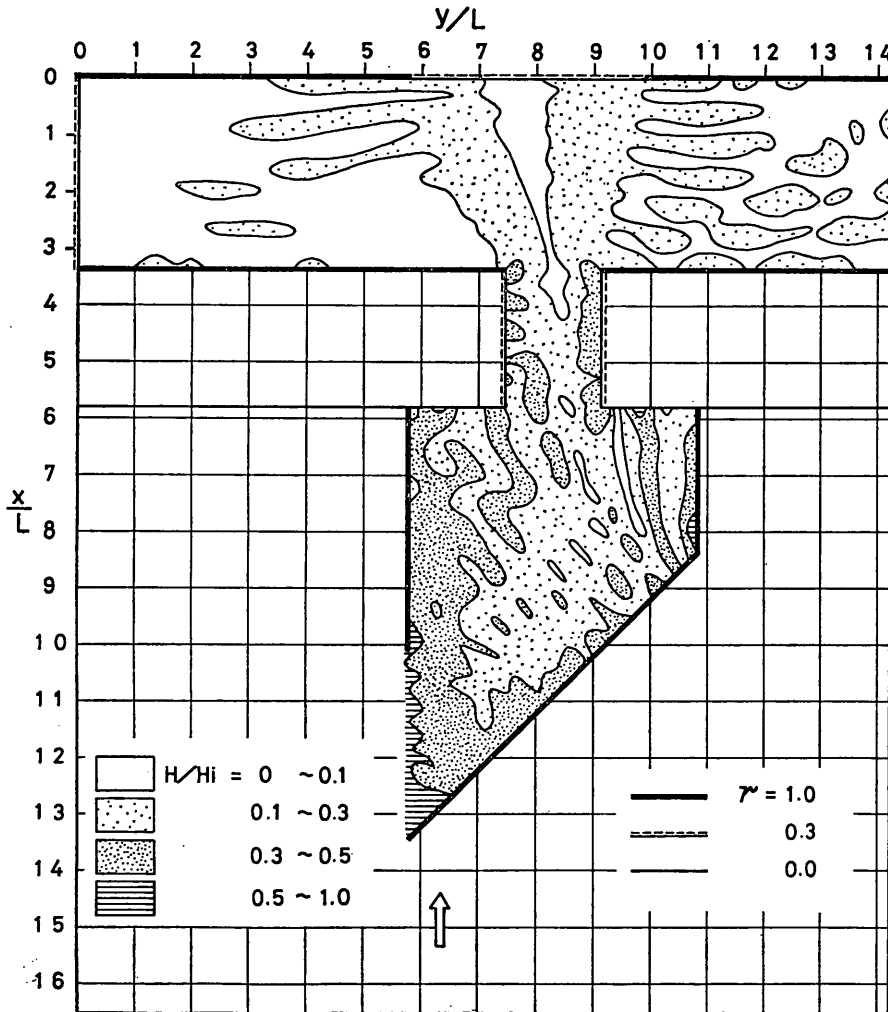


図-5.17 外部記憶装置を用いた計算による波高比分布

なり、各時間ステップ毎にデータの送受が必要となってくることもあって、計算時間が著しく増大する。こうした限界および計算所要時間はあくまでも使用する計算機のシステムと性能等による。前述のシステムを用いて、外部記憶装置として磁気ディスク(MKM0019C)を利用し、図-5.17の領域(14.2L×16.5L, $d_s=L/15$)に対し600ステップ(25周期)の計算を実施してみたが、CPU占有時間は79分であった。ただしこの場合、初期状態から時間ステップと共に、計算領域を広げていく方式を採用している。計算所要時間は領域面積のはば3乗に比例して増大することになるから、実用的にはその面で本方式の適用に限界が生ずることになるろう。

6. あとがき

以上、筆者らが開発を進めてきた数値波動解析法に対し、新しく任意反射率境界および無反射性仮想境界の計算法を導入し、実験を含めた若干の検討と実際計算例を示した。その結果、任意反射率境界の計算における β の値は、実際の波向きにかかわらず90°に近い値を与えることによって所定の反射率に応じた結果を得ることができ、無反射性仮想境界を導入して従来必要とした広大な仮想外海領域を効果的に省けることが明らかとなった。

本方式によって港内における波動を解いて、たとえば波高分布を求めることができる。しかしながら、波長に比較して広領域の港湾に対しては計算時間が著しく長くなり、実用的には適用に限界が生ずることになるろう。計算の所要時間は、使用する電子計算機システムの性能、プログラムの組み方等によるが、TOSBAC—5600システムを用いて、12.5L×8L($d_s=L/12$)の領域および14.2L×16.5L($d_s=L/15$)の領域に対するそれぞれ306、600ステップの計算に要するCPU占有時間は24分、79分であった。本方式が最も効果的に適用できるのは、開口部からの侵入波が港内の静穏度に厳しく影響する外海に面した小港湾に対してであろう。そのほか、大港湾における港口付近の航行船舶に対する静穏度の検討などにも有効に用い得るものである。

また本方式の特長は、定常状態における波高分布を求めることばかりでなく、その過程にあって波の伝播と共に逐次計算により時々刻々の波のパターンをも把握することができる点にある。さらに平面的水粒子運動成分を直接的に解いていくことから、これにたとえば表面における鉛直運動成分を加えて、水粒子運動成分の最大ベクトルの絶対値の表示が容易である。この点については、港内擾乱度あるいは静穏度の適切な表示法との関連で今

後検討を続けていきたい。

なお、本報告のうち、3.2の半無限堤に対する計算および4.2の矩形形状港内の波高分布は49年度の実習生鈴木義晃君(東海大学海洋学部海洋土木工学科4年生)、4.1の二本半島堤内の波高分布は同赤木晴之君(神戸大学工学部土木工学科3年生)が主として担当したものである。また、第5章に示した計算は、港湾局建設課の要請のもとに当所設計基準部計算室(室長宝谷有毅)と協同開発した本方式の汎用計算プログラムの開発過程において実施したもので、プログラムの作成および演算の実施は東京芝浦電気株式会社が行なったことを付記する。

(1975年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) たとえば、森平倫生・奥山育英：海の波の回折計算法と回折図，港湾技研資料，No. 21，1965年11月 45p。
高井俊郎：防波堤開口部に斜めに入射する波の回折図，港湾技研資料，No. 66，1969年3月，42p。
合田良実・吉村知司・伊藤正彦：島堤による波の反射および回折に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 10，No. 2，1971年6月，pp. 3~52
永井康平：不規則な海の波の屈折および回折の計算——線型重ね合せ法による平行直線状等深線海岸での屈折と防波堤での回折の計算図——，港湾技術研究所報告，Vol. 11，No. 2，1972年6月，pp. 47~119
- 2) たとえば、佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾，彰国社刊，372 p. 1972年
- 3) 横井聡之・油谷進介：港内静穏度の算定法について，昭和49年度研究発表会講演集，土木学会西部支部，1975年2月，pp. 125~126
- 4) L. Barailler, P. Gaillard: Évolution récente des modèles mathématiques d'agitation due à la houle calcul de la diffraction en profondeur non uniforme, La Houille Blanche, No. 8, 1968, pp. 861~869
- 5) 伊藤喜行・谷本勝利：新しい方法による波動の数値計算——防波堤周辺の波高分布への適用——，港湾技術研究所報告，Vol. 10，No. 2，1971年6月，pp. 97~120
- 6) 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，Vol. 11，No. 3，1972年9月，pp. 87~109
- 7) Y. Ito, K. Tanimoto: A Method of Numerical Analysis of Wave Propagation—Application to Wave Diffraction and Refraction—, Proceedings of the Thirteenth Coastal Engineering Conference, 1972, July, Volume 1, pp. 503~522

- 8) 高岡征二郎・平出友信：港湾構造物への到達波高の算定——数値波動解析法の応用例——，第21回海岸工学講演会論文集，1974年11月，pp. 103~107
- 9) 坂井藤一・河合三四郎：波動解析への有限要素法の適用，第20回海岸工学講演会論文集，1973年11月，pp. 393~396

記号一覧表

a	: 到達波の振幅
a_I	: 沖側仮想境界における入射波の振幅
a_n	: 不規則波合成における n 番目の成分波の入射振幅
A	: 任意反射率境界の計算における振幅補正係数
c	: 波速
c_1	: 沖側仮想境界における波速
c_{max}	: 計算領域における最大波速
c_x	: x 方向線流量成分計算点における波速
c_y	: y 方向線流量成分計算点における波速
f_s	: 浅水度補正係数
g	: 重力の加速度
h	: 水深
H_i	: 沖側仮想境界における入射波の波高
$H_{\frac{1}{2}}$: 合成有義波高
$(H_{\frac{1}{2}})_I$: 入射波の有義波高
i	: 格子網上における x 方向の格子番号
i_0	: 一般格子網と沖側仮想境界領域接続部の格子番号
i_e	: 沖側仮想境界の格子番号
j	: 格子網上における y 方向の格子番号
k	: 波数 ($=2\pi/L$)
K_D	: 不規則波合成における成分波による波高比

L	: 波長
L_1	: 沖側仮想境界における波長
n	: 群速度と波速の比，または不規則波合成における成分波の番号
n_1	: 沖側仮想境界における群速度と波速の比
n_e	: 不規則波合成における成分波の数
N	: 時間ステップの番号
N_0	: 任意反射率境界の計算における補正時間ステップ
Q_x	: x 方向の線流量成分
Q_y	: y 方向の線流量成分
Q_0	: 任意反射率境界における線流量成分
Q_1	: 任意反射率境界の1メッシュ前の線流量成分
r	: 任意反射率境界における反射率
t	: 時間
T	: 波の周期
u	: x 方向流速成分
v	: y 方向流速成分
x	: 静水面における x 座標
y	: 静水面における y 座標
z	: 静水面に鉛直上向きにとった z 座標
α	: 二本半島堤における海岸線と防波堤のなす内角
β	: 任意反射率境界への法線方向から測った入射角
Δs	: 計算格子間隔
Δt	: 計算時間間隔
Δx	: 沖側仮想境界領域における1次元格子間隔
η	: 波による変動水位
η_I	: 任意反射率境界への入射波の水位
η_R	: 任意反射率境界による反射波の水位
σ	: 角振動数 ($=2\pi/T$)
τ	: 任意反射率境界の計算における補正時間