

複合式波浪制御構造物周りでの相互干渉波動場の理論解析

—護岸と離岸堤群から構成される場合—

THEORITICAL ANALYSIS ON WAVE AND STRUCTURE INTERACTION
AROUND COMPOSITE-TYPE COASTAL STRUCTURE

—A CASE STUDY OF A SEAWALL AND DETACHED BREAKWATERS—

市川督人¹・泉 周作²・斎藤武久³

Masato ICHIKAWA, Syusaku IZUMI and Takehisa SAITOH

¹西松建設株式会社 設計部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

²修(工) 石川県 土木部 (〒920-8580 金沢市鞍月1-1)

³正会員 博(工) 金沢大学准教授 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

This study aims to present a theoretical method to analyze flow fields around a composite-type coastal structure. A dividing region method is adopted in this study, and the case in which the coastal structure is composed of a seawall and detached breakwaters is focused for a fundamental stage of this topic. In the theoretical analysis, flow fields of wave and structure interaction are discussed and an appearance condition of resonant phenomena around seawall side is newly derived as relationship between a geometrical condition of detached breakwaters and incident wave length. Laboratory experiments are also conducted in order to examine the validity of this method. Consequently, theoretical results of water surface elevation around the composite-type structure agree well with the experimental ones and the validity of this method is verified.

Key Words : *Wave-structure interaction, composite-type coastal structure composed of seawall and detached breakwater, dividing region method,*

1. 緒 論

波と海岸構造物による波動場の干渉特性を正確に記述することは、構造物への外力評価や周辺の底質移動など、海岸工学上の諸問題において基本的かつ重要な課題である。これに関連して、護岸、離岸堤あるいは防波堤などの波浪制御構造物の場合、単一構造としての機能は、従来からの多くの議論による研究成果が取りまとめられるに至っている^{1),2)}。一方で、海岸構造物は、例えば護岸と離岸堤、もしくは人工リーフといったような複合構造となる場合が多い。特に、防護・環境・利用の調和のとれた最近の持続可能な海岸整備では、複合構造による面的な防護が必要不可欠であり、構造物の面的配置に伴う相互干渉波動場の特性を把握することが本質的に必要と言える。

本研究では、離岸堤群周りの回折波の空間特性に関して、領域分割法を用いて良好な精度で解析を可能とした Dalrymple and Martin³⁾の手法を発展させ、複合的な海岸構造物周りでの相互干渉波動場の理論解析手法の構築を目的とする。その第一段階として、

護岸と離岸堤群から構成された波動場を対象とし、誘導された理論解を用いて干渉特性を考究すると共に実験結果との比較から、解析方法の有効性を確認する。

2. 理論解析手法

(1) 座標系および領域分割

図-1に座標系を示す。本研究では、水深 h を一定とし、護岸と平行に設置された離岸堤群（離岸距離 B 、離岸堤長 L 、開口幅 l ）に入射波が直交入射する場合を対象とする。実際には、護岸前面への消波ブロックの設置、離岸堤自身の堤体幅および透過率、さらに水深変化や入射角の存在など多くの影響を考慮する必要がある。ただし、後述する領域分割法を用いて理論解析方法を構築する第一段階として、ここでは、最も基本となる構造要素および入射波条件を対象に解析方法の構築を試みる。なお、上述する多くの影響を含めた解析手法の構築に関しては、没水構造となる人工リーフへの適用も含めて今後の研究で発展的に考慮したい。

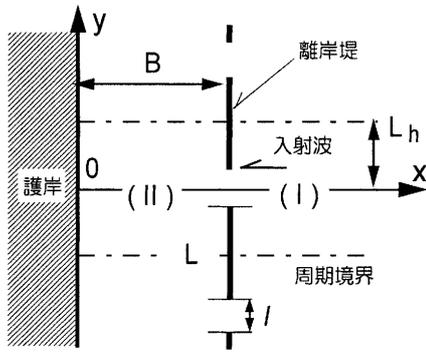


図-1 解析対象領域の定義および領域分割

護岸前面をy軸とし、離岸堤開口部の中心位置を通る冲向にx軸、鉛直上向きにz軸をとるが、離岸堤群への直交入射を対象とする本研究では、 $y = \pm(L + l)/2 = \pm L_h$ を境界とする鏡像の適用が可能となる。このため、領域分割に際しては、 $y = -L_h$ から $+L_h$ の範囲で図-1中の(I)を入射波領域、(II)を透過波領域とする。

対象領域を完全流体の非回転流れ場とし、角振動数 ω の調和振動を仮定した場合、線形ポテンシャル理論から流体場の速度ポテンシャルは、ラプラスの式、水面および水底の境界条件を満足する一般形として次式のように記述できる。

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} \\ = \hat{\phi}(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (1)$$

式中、 i は虚数単位を表す。また、 k は波数を表し、次式の分散関係を満たす。

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

このとき、上述の問題は、次のHelmholtz方程式を支配方程式とする2次元問題となる。

$$\frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial y^2} + k^2 \hat{\phi} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\hat{\phi} = X(x)Y(y)$ の変数分離を仮定し、式(3)に代入することで、 $Y''(y)/Y = -K^2$ (K は正の実数)の一般解、 $Y(y) = C \cos Ky + D \sin Ky$ を得る。ところで、 $y = \pm L_h$ が鏡像境界となるためには、x軸に関する $Y(y)$ の対象性が求められる。このため、式(4)中では、奇関数の係数である D がゼロとなり、次式の関係が課せられることになる。

$$Y(y) = C \cos Ky \quad (4)$$

さらに、両鏡像境界 $y = +L_h$ および $-L_h$ での圧力およ

びy方向速度の連続性から、 K に関する以下の関係が導かれる。

$$K_n = \frac{n\pi}{L_h}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots, \infty) \quad (5)$$

式中の n は、y軸方向 $-L_h$ から $+L_h$ 間の水面変位モードの次数を表している。なお、 $Y''(y)/Y = K^2$ を仮定した場合は、y軸方向に関する周期条件を満足することができない。

一方、 $X(x)$ に関しては、 $X''(x)/X + (k^2 - K_n^2) = 0$ の一般解が次式のように導かれる。

$$X(x) = E_n e^{i\kappa_n x} + F_n e^{-i\kappa_n x}, \quad \kappa_n = \sqrt{k^2 - K_n^2} \quad (6)$$

このとき、入射波領域(I)の反射波に関連した速度ポテンシャルが、x軸に沿った反射波の進行条件を満足する必要があるため、 F_n はゼロとなり次式が課される。

$$X(x) = E_n e^{i\kappa_n x} \quad (7)$$

また、透過波領域(II)では、護岸前面での不透過条件により、次式が課される。

$$X(x) = E_n \cos \kappa_n x \quad (8)$$

(2) 各領域における速度ポテンシャルおよび領域間の境界条件式

a) 入射波領域

入射波領域(I)の速度ポテンシャル $\phi^{(I)}$ は、入射波の速度ポテンシャル ϕ_I および反射波の速度ポテンシャル $\phi_r^{(I)}$ の和として、 $\phi^{(I)} = \phi_I + \phi_r^{(I)}$ となる。このとき、入射波の速度ポテンシャルは、x軸負方向へ進行する平面波であり、次式で与えられる。

$$\phi(x, y, z)_I = \frac{Ag \cosh k(z+h)}{i\omega \cosh kh} e^{-ikx} \quad (9)$$

$\phi^{(I)}$ は式(4)、式(5)および式(7)の関係から次式となる。

$$\phi^{(I)} = \phi_I + \phi_r^{(I)} \\ = \frac{Ag \cosh k(z+h)}{i\omega \cosh kh} e^{-ikx} \\ + \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{i\kappa_n x} \cos \frac{n\pi}{L_h} y \quad (10)$$

式中、 A は入射波振幅、 g は重力加速度を表す。また、 A_n は反射波および擾乱波の振幅に関する未知係

数であり、後述する境界条件により決定される。

b) 透過波領域

透過波領域(II)の速度ポテンシャル $\phi^{(II)}$ は、式(4)、式(5)および式(8)の関係から次式となる。

$$\phi^{(II)} = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos \kappa_n x \cos \frac{n\pi}{L_h} y \quad (11)$$

式中、 C_n は擾乱波の振幅に関する未知係数であり、後述する境界条件により決定される。

c) 境界条件式および未知係数の決定方法

入射波領域(I)および透過波領域(II)の境界 $x=B$ において、離岸堤部 $-L_h \leq y \leq -l/2$ および $-l/2 \leq y \leq L_h$ 、開口部 $-l/2 \leq y \leq l/2$ での各領域間の圧力および速度の連続性から以下の境界条件式が課される。

$$\frac{\partial \phi^{(I)}}{\partial x} = \frac{\partial \phi^{(II)}}{\partial x} ; x = B \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi^{(II)}}{\partial x} = 0 ; x = B, \quad \begin{array}{l} -L_h \leq y \leq -\frac{1}{2}l \\ \frac{1}{2}l \leq y \leq L_h \end{array} \quad (13)$$

$$\phi^{(I)} = \phi^{(II)} ; x = B, \quad -\frac{1}{2}l \leq y \leq \frac{1}{2}l \quad (14)$$

このとき、式(12)より、以下の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} -ik \frac{Ag}{i\omega} e^{-ikB} + \sum_{n=0}^{\infty} i\kappa_n A_n e^{i\kappa_n B} \cos \frac{n\pi}{L_h} y \\ = \sum_{n=0}^{\infty} -\kappa_n C_n \sin \kappa_n B \cos \frac{n\pi}{L_h} y \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、便宜的に $n=0$ の場合を分けて式(15)を整理すると、次式のように記述できる。

$$-\frac{Ag}{\omega} e^{-ikB} + iA_0 e^{ikB} = -C_0 \sin kB \quad (16)$$

$$iA_n e^{i\kappa_n B} = -C_n \sin \kappa_n B \quad (17)$$

一方、式(13)より式(18)が、さらに、式(14)に式(16)および式(17)の関係を代入することにより式(19)がそれぞれ以下のように導かれる。

$$\sum_{n=0}^{\infty} \kappa_n C_n \sin \kappa_n B \cos \frac{n\pi}{L_h} y = 0 \quad (18)$$

$$\frac{2Ag}{\omega} e^{-ikB} - \sum_{n=0}^{\infty} i e^{-i\kappa_n B} C_n \cos \frac{n\pi}{L_h} y = 0 \quad (19)$$

以上の関係を、関数 $G(y)$ を用いて次式のように整理する。

$$G(y) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \kappa_n C_n \sin \kappa_n B \cos \frac{n\pi}{L_h} y = 0 \\ -L_h \leq y \leq -\frac{1}{2}l, \frac{1}{2}l \leq y \leq L_h \\ \frac{2Ag}{\omega} e^{-ikB} - \sum_{n=0}^{\infty} i e^{-i\kappa_n B} C_n \cos \frac{n\pi}{L_h} y \\ -\frac{1}{2}l \leq y \leq \frac{1}{2}l \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 $G(y)$ の両辺に $\cos(j\pi y/L_h)$ ($j=0,1,2,\dots,\infty$)を乗じ、 $-L_h \leq y \leq L_h$ 間で積分することにより、式(19)を $J+1$ 行 $N+1$ 列 ($j=J, n=N, J=N$ での打ち切りを行う)の行列を係数行列とする $J+1$ 元の連立方程式へと変形する。この操作により、積分範囲で条件が異なる関係式を効率的に、係数行列へ取り込むことが可能となる。以上の操作により、 $J+1$ 元の連立方程式は次式のように誘導される。

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N [i e^{-i\kappa_n B} \hat{C} \hat{C}_{nj} \\ + \kappa_n \sin \kappa_n B (CC_{nj} + \tilde{C} \tilde{C}_{nj})] C_n \\ = \frac{2Ag}{\omega} e^{-ikB} \hat{C} \hat{C}_{0j}, j=0,1,\dots,J \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、

$$CC_{nj} = \int_{-L_h}^{\frac{1}{2}l} \cos \frac{n\pi}{L_h} y \cos \frac{j\pi}{L_h} y dy \quad (21)$$

$$\tilde{C} \tilde{C}_{nj} = \int_{\frac{1}{2}l}^{L_h} \cos \frac{n\pi}{L_h} y \cos \frac{j\pi}{L_h} y dy \quad (22)$$

$$\hat{C} \hat{C}_{nj} = \int_{-\frac{1}{2}l}^{\frac{1}{2}l} \cos \frac{n\pi}{L_h} y \cos \frac{j\pi}{L_h} y dy \quad (23)$$

式(20)から未知数 C_n を求め、式(16)および式(17)に代入することにより A_n が求まり、各領域における速度ポテンシャルが確定する。

(3) 各領域における相互干渉場の特性

以上により、各領域における速度ポテンシャルの算定法が示された。以下に解析手法の検証および系統的な計算と実験により複合式波浪制御構造物周りの波浪特性について整理するが、事前に、理論解から明らかになる種々の特性に関して整理する。

表-1 反射進行波として存在する高次モード波の範囲
(表中 + の次数まで. 実験室スケール: 離岸堤幅
37cm, 開口幅11cm, 水深20cm)

入射波周期 T (s)	入射波長 λ (cm)	次数 $n=1$	$\bar{\lambda}-\lambda$ の符号	次数 $n=2$	$\bar{\lambda}-\lambda$ の符号	次数 $n=3$	$\bar{\lambda}-\lambda$ の符号
0.3	14.0	$n=1$	+	$n=2$	+	$n=3$	-
0.4	25.0	$n=1$	+	$n=2$	-	$n=3$	-
0.5	38.9	$n=1$	+	$n=2$	-	$n=3$	-
0.6	55.0	$n=1$	-	$n=2$	-	$n=3$	-

a) 入射波領域

式(10)より, 変数分離された時間項 $e^{-i\omega t}$ との関係より, $\kappa_n = \sqrt{k^2 - K_n^2}$ が実数, つまり, $k > K_n$ の範囲で, 第2項は x 軸正方向へ進行する反射波を表現し, $k < K_n$ の範囲では擾乱を表現することになり, 以下の解釈ができる.

$k > K_n$ の場合, $2\pi/\lambda > n\pi/L_h$ (λ : 入射波の波長) から, $\lambda < 2L_h/n$ であり, $\bar{\lambda}_n = 2L_h/n$ を閾値として定義した場合, $\lambda < \bar{\lambda}_n$ までの範囲が x 軸正方向へ向かう反射波の存在条件となる. 具体的には以下のようなのである.

$n=0$ の場合, $K_n=0$, $\kappa_0=k$, $\bar{\lambda} \rightarrow \infty$ であり, 波長 λ が有限値となる波数 k のいかなる入射波も反射されることを示す.

$n=1$ の場合, $\kappa_1 = \sqrt{k^2 - (\pi/L_h)^2}$ であり, $\bar{\lambda} = 2L_h$ から, 波長 λ が $2L_h$ よりも小さい場合に, 反射波が存在することになる. この場合, 上述の0次の反射波に加えて, 1次の反射波が存在することになる.

なお, 表-1に λ , n および $\bar{\lambda} - \lambda$ の関係を例示するが, λ の増加に伴い重ね合せとなる高次モード波次数の減少によって干渉の低減が予想される.

b) 透過波領域

式(11)より, n 次 ($n \neq 0$) の成分波に関して, 今, $n=1$ の場合を考える場合, 護岸前面での不透過条件に関連した式(8)に加えて, $x=B$ で x 方向編微分がゼロとなる条件を課すことで, 透過波領域(II)において, 重複波の形成が記述できることになる. このとき, $(\cos \kappa_1 x)|_{x=B} = 0$ より $\sin \kappa_1 B = 0$ から, $\kappa_1 B = m\pi$, $\kappa_1 = m\pi/B$ ($m=1, 2, \dots, \infty$) が, 重複波の発生条件となる. もちろん, $n=0$ の場合は, $\sin kB = 0$ であり $\lambda = 2B/m$ となる. $n=1$ の場合, 最も低次モードの重複波となる $m=1$ に対応して, $\kappa_1 = \sqrt{k^2 - K_1^2}$ および式(5)より重複波の発生条件として以下の関係が導かれる.

$$k^2 - (\pi/L_h)^2 = (\pi/B)^2, \quad (24)$$

$$k = \frac{\sqrt{L_h^2 + B^2}}{L_h B} \pi$$

入射波の波長 λ を用いた場合, 透過波領域(II)にお

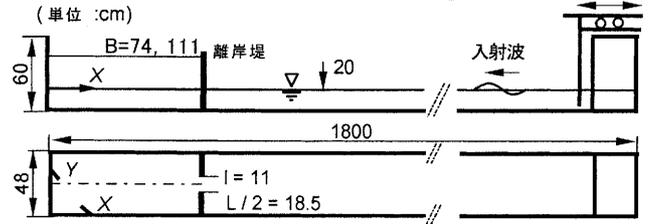


図-2 実験装置の概要

ける重複波の発生条件は次式のように整理できる.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2L_h B}{\sqrt{L_h^2 + B^2}} \quad (25)$$

$$= \frac{2L_h}{\sqrt{(L_h/B)^2 + 1}} < 2L_h$$

以上を任意の m ($m > 1$) を用いて一般化すると, 以下のように整理できる.

$$k^2 - (n\pi/L_h)^2 = (m\pi/B)^2, \quad (26)$$

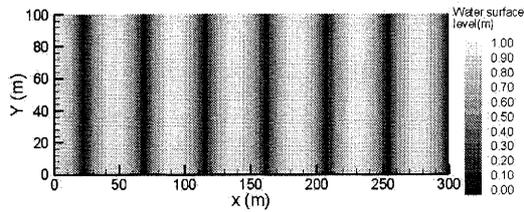
$$k = \frac{\sqrt{m^2 L_h^2 + n^2 B^2}}{L_h B} \pi$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2L_h}{n} \frac{1}{\sqrt{(m/n)^2 (L_h/B)^2 + 1}} \quad (27)$$

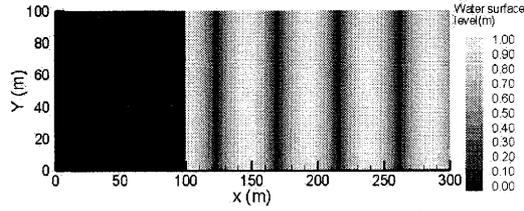
$$< \frac{2L_h}{n} = \bar{\lambda}_n$$

3. 実験装置および実験方法

図-2 に, 実験装置の概要を示す. 実験には, 一端に吸収式造波機が装備された長さ 18m, 幅 48cm, 高さ 65cm の 2 次元造波水槽を用いた. 水槽の他端を護岸前面とし, 離岸堤長 $L = 37$ cm, 開口幅 $l = 11$ cm からなる離岸堤模型 (開口幅は離岸堤長の約 30%で, $L_h = 24$ cm, 厚さ 1cm の木製板) を, 離岸距離 $B = 74$ cm および 111cm の場合に応じて水槽内に設置した. このとき, 開口幅の中心位置を水槽の奥行き方向中心位置と一致させ, 理論解析の場合と同様に, 離岸堤中心位置を側方の鏡像境界としている. 水深は $h = 20$ cm に固定して, 入射波には入射波高 $H_0 = 1.0 \sim 1.9$ cm, 周期 $T = 0.51 \sim 1.67$ s の規則波を採用し, $Y = 2$ cm, 12cm および 24cm の 3 測線に沿って, $X = 0$ cm から $X = 2B$ の範囲で水槽内の水面変動記録を取得した. 入射波は, 水槽中央位置の 2 本の波高計で同時に取得した水面変動記録から入射分離法により算定している. なお, 水面変動記録は, 造波開始から約 60s 経過後に計測を開始し, サンプル間隔を 100Hz とした 100s 間のデータを取得した.



(a) 護岸（離岸堤なし）からの完全反射



(b) 離岸堤（開口幅ゼロ，離岸距離100m）からの完全反射

図3 完全反射の再現計算

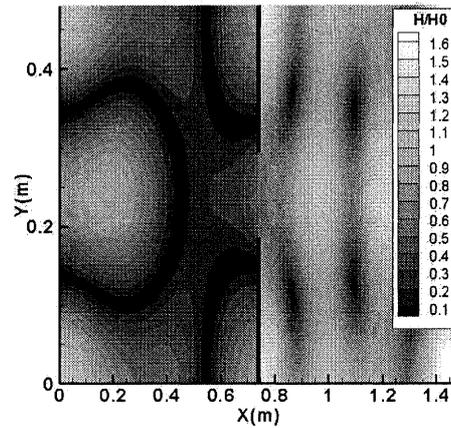
（入射波振幅0.5m，入射波長92.3m，水深10m）

4. 理論解析結果および実験結果との比較

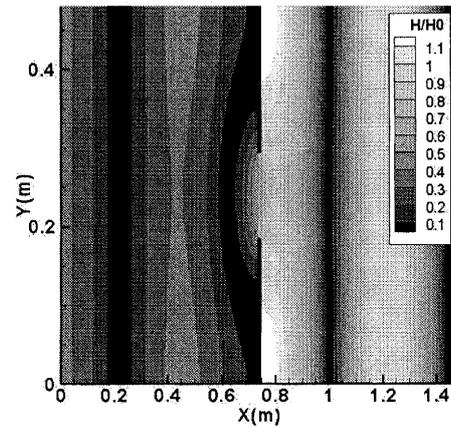
理論解析結果の算出に際しては，連立方程式となる式(20)を数值的に解く必要がある．このスキームの検証のため，護岸からの完全反射および護岸から一定の離岸距離位置に開口幅をゼロとして設置した離岸堤からの完全反射に関する予備計算を行った結果を図-3に示す．なお，スケールは，現地スケールを想定した計算例であるが，護岸（離岸堤長 $L = 0$ とした場合）と離岸堤位置（開口幅 $l = 0$ とした場合）からの完全反射の場合ともに，最大水面変位が入射波振幅の2倍となる完全重複波が再現され，構築したスキームの有効性が確認できている．以下に，図-2の実験スケールを対象に行った理論解析結果と実験結果との比較を示す．

入射波領域における干渉場の特徴として，理論解析の特徴から，入射波長の増加に伴う干渉の低減が表-1に示すように予想されている．対応する計算結果の一例を図-4(a)および(b)に示す．入射波高が1cm，離岸距離が74cmの場合で，入射波の周期（波長）がそれぞれ，0.55s（46.7cm）および0.8s（88.4cm）の場合である．なお，図中の値は，対象地点の波高 H を入射波高 H_0 で除した無次元波高を表している．図より，入射波長の増加に伴い，入射波領域 (I) において，干渉の低減が確認できる．一方，同一の入射波周期による造波条件下で計測された岸沖方向の波高分布に関する実験結果との比較を図-5(a)および(b)に例示する．対象測線は， $Y=24\text{cm}$ の場合であり，横軸は，計測位置 X を入射波長 λ で除した無次元距離を表している．計測したほとんどの位置において無次元波高の理論値と実験値は良好に一致していることが分かる．

次に，透過波領域に関して，重複波の発生条件は，入射波長と離岸堤群の設置条件を含んだ式(27)のように誘導されている．図6(a)および(b)に，式(27)

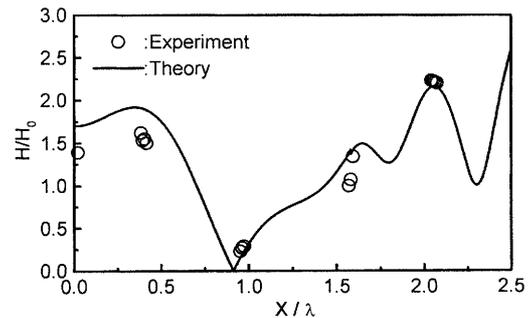


(a) 入射波長46.7cm ($T=0.55\text{s}$)

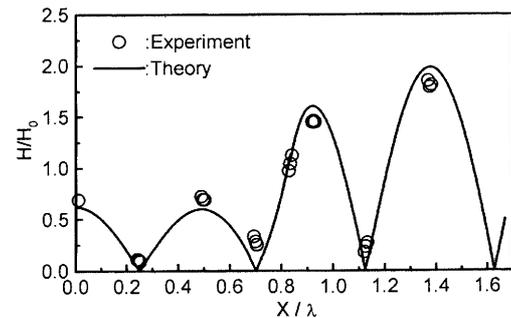


(b) 入射波長88.4cm ($T=0.80\text{s}$)

図-4 入射波長の違いに伴う波動場の変化特性（入射波振幅0.5cm，離岸距離74cm）

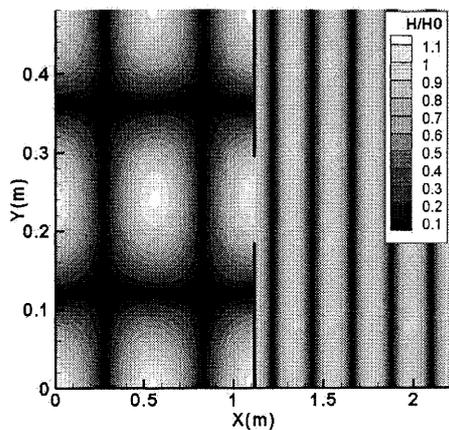


(a) 図-4(a)の解析条件に対応した実験結果との比較（測線： $Y=24\text{cm}$ ）

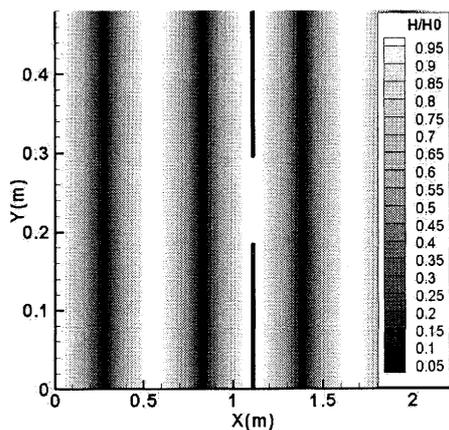


(b) 図-4(b)の解析条件に対応した実験結果との比較（測線： $Y=24\text{cm}$ ）

図-6 水面変動特性に関する理論解析結果および実験結果との比較

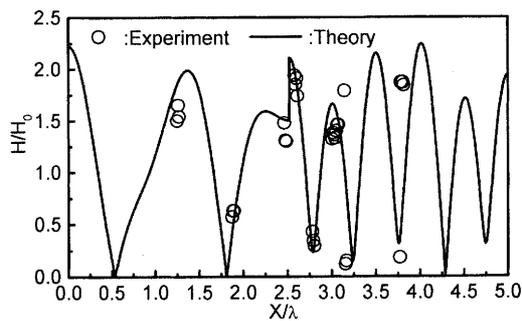


(a) 入射波長43.5cm ($T=0.53s$)
($n=1, m=2$: 2次モード)

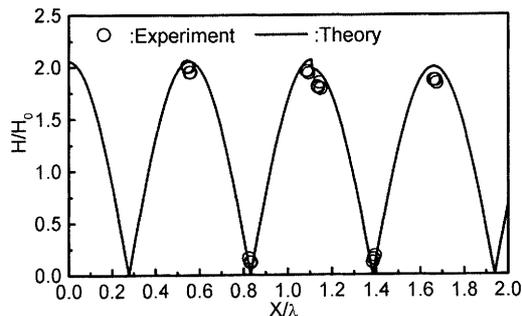


(b) 入射波長111.6cm ($T=0.94s$)
($n=0, m=2$: 2次モード)

図-7 領域(II)での共振発生時における波動場の変化特性(入射波振幅0.5cm, 離岸距離111cm)



(a) 図-7(a)の解析条件に対応した実験結果との比較(測線: $Y=2cm$)



(b) 図-7(b)の解析条件に対応した実験結果との比較(測線: $Y=2cm$)

図-8 水面変動特性に関する理論解析結果および実験結果との比較

の条件を満足する入射波長の波が作用した場合の計算例を示す。(a)は入射波の周期(波長)が, 0.53s (43.5 cm) の場合で, Y 軸(沿岸)方向に1次, X 軸(岸沖)方向に2次の重複波モードに対応する条件となっている。また, (b)は入射波の周期(波長)が, 0.94s (111.6 cm) の場合で, Y 軸(沿岸)方向に0次, X 軸(岸沖)方向に2次の重複波モードに対応する条件であり, それぞれ, 入射波高が1cm, 離岸距離が111cmの場合である。図より, 式(27)から予測される重複波の発生モードに対応した透過波領域での共振の発生が確認できる。特に, $n \neq 0$ の場合に, 格子状に形成される水面変動の空間分布特性が良好に捉えられていることが分かる。同一の入射波周期による造波条件下で計測された岸沖方向の波高分布に関する実験結果との比較を図-7(a)および(b)に例示(対象測線が $Y=2cm$ の場合)するが, 計測したほとんどの位置において無次元波高の理論値と実験値は良好に一致し, 本解析手法の有効性が確認できる。

5. 結論

本研究では, 複合的な海岸構造物周りでの相互干渉波動場を正確に記述する理論解析手法の構築を目的とし, 第一段階として, 護岸と離岸堤群から構成された波動場を対象に, 領域分割法を用いた理論解析手法を構築した。

理論解析では, 護岸前面域および離岸堤背後域における入射波および反射波さらに擾乱波との干渉特性を明らかにした。また, 護岸前面域における理論解の特性から, 対象領域における共振発生条件を新たに誘導した。

室内実験で得られた波高分布に関する実験結果は理論解析結果と非常によく一致し, 本解析手法の有効性を確認することができた。

謝辞: 本研究を行うに際し, 実験およびデータの整理に終始助力を惜しまなかった石川県庁の河原宏貴氏(当時, 金沢大学学部生)に厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, p. 333, 1991.
- 2) 土木学会海岸工学委員会: 海岸施設設計便覧, 土木学会, p. 582, 2000.
- 3) Dalrymple, R.A. and Martin, P.A.: Wave diffraction through offshore breakwaters, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, No.116, pp.727-742, 1990.