

# 潜堤上の構造物に作用する波力と その算定法に関する研究

水谷法美<sup>1</sup>・許東秀<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

潜堤上の擬岩の作用波力の算定法を構築するため、擬岩模型の作用波力特性を水理実験結果に基づいて考究した。擬岩模型が沖側法肩近傍にある場合、砕波により非常に大きな波力が作用する。この波力の最大値を広井式と合田式に基づいて設置位置の関数として定式化した。一方、Morison式に水位変動の効果を含ませ、構造物の前面位置での流速と加速度を使用することにより、水平波力の時間波形が計算可能であること、鉛直方向波力を浮力によりほぼ計算可能であることを解明した。さらに、本研究の数値解析法は、斜面上の潜堤による波変形を精度よく算定でき、それによる流速、加速度、水位変動とMorison式から、衝撃砕波力が発生するような場合でも波力の時間変化を精度良く予測できることを明らかにした。

**Key Words :** *artificial rock, submerged breakwater, wave force, Morison equation, VOF method, porous body model*

## 1. 序論

従来型の離岸堤に代わって潜堤の建設機会が増大しつつある。潜堤は、景観面や海水交換機能面で利点を有するが、水面上に現れない構造物であるために小型船舶等の航行に支障をきたす場合もある。そのため、潜堤にはブイ等により設置位置が明示されることも少なくない。しかし、潜堤上にブイを設置する場合、景観上良くないばかりでなく、短い係留索に砕波による大きな荷重が加わるため、係留システムがダメージを受けやすいなどの問題がある。

最近、このブイに代わって、より自然に近い景観を創造できる標識岩（以下擬岩と称する）を潜堤上に設置する工法が採用され始めている（写真-1参

照）。しかし、擬岩は形状が複雑であるばかりでなく、潜堤天端上では、水深に比べて水位変動が大きく、したがって常時水圧の作用を受ける部分より一時的に水圧の作用を受ける部分が大きく、水位変動の影響を大きく受けること、さらに、潜堤上では、砕波や砕波後の波が作用することから、その波力特性は極めて複雑であることが予想される。擬岩の耐波設計に際し、この作用外力の精度高い予測は必要不可欠であるが、このような波力の特性はこれまで検討例がなく、その実態は十分解明されていない。

本研究では、潜堤上の擬岩模型に作用する波力の特性を水理実験により考究するとともに、その算定手法について検討を加え、擬岩の作用波力の予測手法を構築するものである。

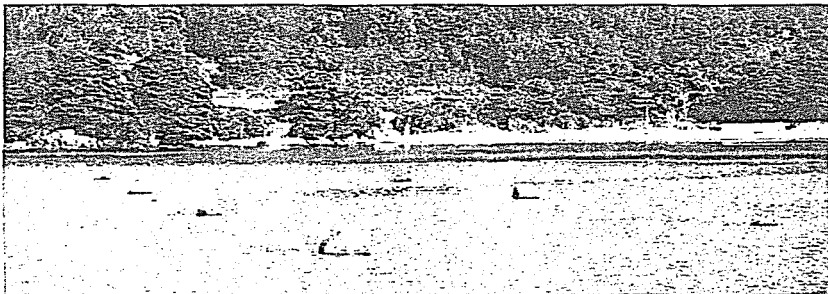


写真-1. 擬岩（標識岩）の施工例（福井県勢浜海岸）

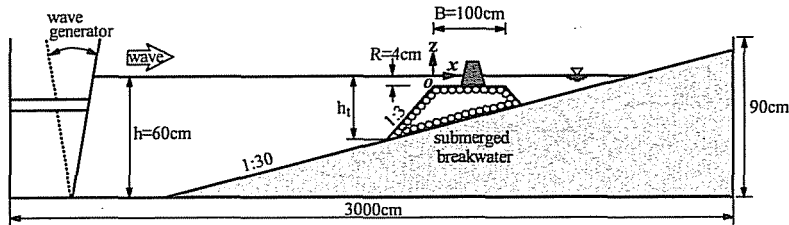


図-1 実験水槽

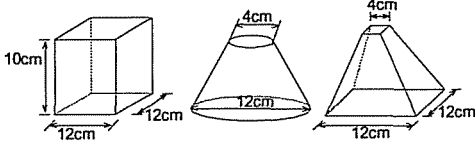


図-2 対象構造物の概要

## 2. 水理実験

実験を、片面ガラス張り2次元鋼製水槽（長さ30m、幅0.7m、高さ0.9m）を使用して行った。図-1に示すように、水槽内に一様勾配1/30の不透過木製斜面を設置し、その上に石により潜堤を構築した。潜堤の法先水深 $h_1$ の違いによる波力の影響を調べるため、法先水深を2種類変化させた（ $h_1=10, 20\text{cm}$ ）。なお、天端水深（ $R=4\text{cm}$ ）、沖側と岸側の法面勾配（ $s=1/3$ ）は一定とした。

実験で使用する擬岩模型として、実際の施工例を参考に擬岩模型として図-2に示す円錐台と四角錐台、および比較のための直方体の3種類の形状の構造物を採用した。

この擬岩模型（以下構造物と称する）を、水槽上端に固定した支持台に取り付けた三分力計を介してつり下げて波力の計測を行った（この波力計測システムの固有振動周波数は約30Hzであった）。この構造物の設置位置を沖側法肩から7箇所（ $x=7, 17, 27, 37, 52, 72, 92\text{cm}$ ）変化させながら構造物に作用する波力の計測を行った。この際、潜堤天端と構造物底面には2mm程度の隙間を設けた。なお、直方体と四角錐台は底面の一边が波峰と平行になるように設置した。

入射波は全て規則波とし、その周期を3種類（ $T=1.0, 1.4, 2.0\text{s}$ ）変化させた。まず、所定の入射波高（ $H_1=8, 14, 20\text{cm}$ ）の波に対して波力の計測を行い（実験A）について碎波波力の特性を調べるために、波高を細かく変化させながらそれぞれの構造物の設置位置で以下の特徴的な碎波状況が生じる場合の波力の計測を行った（実験B）。

(A) 非碎波の場合（構造物より岸側で碎波する場合

も含む）

(B) 構造物の中心位置で碎波する場合

(C) 構造物の前面で碎波し、構造物に衝撃碎波力が作用する場合

(D) 構造物の沖側で碎波し、構造物が碎波後の乱れた領域に含まれる場合

ただし、設置位置で所定の碎波が発生しない場合はその条件を除外した。なお、入射波高、および入射波の波長として一様水深域（ $h=60\text{cm}$ ）での値を使用した。

各々の発生波に対し、構造物に作用する水平・鉛直方向波力（ $F_x, F_z$ ）、構造物中心位置と水深60cmの位置での水位変動、構造物中心位置での水平・鉛直方向流速（ $u, w$ ）の計測を行った。また、実験Bではさらに前面位置での水平・鉛直方向流速と構造物底面中心での水圧の計測を行った。なお、流速はいずれも天端上1cmの位置で計測した。また、円錐台と四角錐台の場合は静水状態における水中部の傾斜面の中心位置を構造物前面位置とした。

水位変動を電気容量式水位計、流速を電磁流速計また波力を三分力計、圧力を超小型圧力計で計測した。これらの出力は、各々のアンプを通して電圧信号に変換し、ペン書きレコーダーに記録すると同時に、2台のパーソナルコンピューターを使用して時間間隔0.04秒（25Hz）、データ数2600と時間間隔0.0005秒（2kHz）、データ数30000個でAD変換し、それらのデータもハードディスクに収録した。なお実験及び計測はすべて静水状態から開始した。実験で得られた水位の時間変化にゼロダウンクロス法を採用して個々の波を定義し、波別解析を行った。そして、波高が定常になった後の5波の波力と流速の最大値を平均し、それらの値を最大波力、最大流速とした。

## 3. 数値解析

波力を予測するためには、波動場を正確に予測する必要がある。本研究では、潜堤上での碎波による波力の予測を行うため、碎波現象も再現しうる計算手法が必要である。

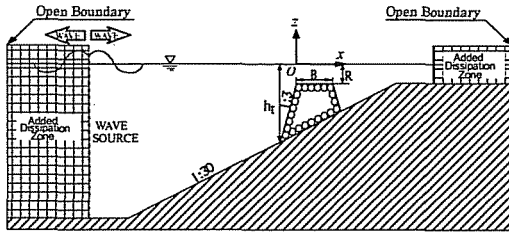


図-3 計算領域の概要

砕波の数値計算は、酒井ら<sup>1)</sup>、朴・宮田<sup>2)</sup>、渡部・佐伯<sup>3)</sup>などによって行われてきているが、本研究では透水性構造物内の流れを容易に組み込み可能な川崎による数値解析手法<sup>4)</sup>を採用した。

一方、透水層内の流れの非線形計算に関しては、榊山・鹿島<sup>5)</sup>や水谷ら<sup>6)</sup>の研究がある。榊山・鹿島は、構造物と波の相互干渉による非線型効果を考慮したN-S方程式に透過性、流体抵抗などを導入したPorous Body Model<sup>7)</sup>の支配方程式を導き、透過性防波堤の内部および周辺の流速場、波圧場を計算している。この手法は、透水性構造物を各セルの間隙率で表現しているため、特別な構造物表面の境界条件を設定する必要が無く、全計算領域を統一的な支配方程式で解析できる利点を有する。これに対して水谷ら<sup>6)</sup>は、流体領域と透水層内を異なる支配方程式で解析するBEM-FEMモデルを提案している。この手法は、流体領域で非回転運動を仮定しているため、計算効率に利点はあると考えられるが、本研究のような砕波をとまなうような現象へそのまま適用することはできない。そこで、本研究では、川崎の提案した数値計算手法（数値波動水槽）に榊山らのPorous Body Modelに基づく透水層内の流れの支配方程式を適用した数値計算を行うこととした。

### (1) 基礎方程式

基礎方程式は、非圧縮性粘性流体に対する式(1)の連続式、式(2)と(3)の運動方程式、式(4)のVOF関数Fの移流方程式である。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q(z, t)\delta(x - x_s) \quad (1)$$

$$\gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g - M_z - R_z + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \mu w \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z Fw)}{\partial z} = Fq \quad (4)$$

ここで、 $q(z, t)$ ：造波位置 $x=x_s$ でのわき出し強さ、 $t$ ：時間、 $g$ ：重力加速度、 $\rho$ ：流体密度、 $F$ ：VOF関数（流体の体積率）、 $\delta$ ：Diracのデルタ関数、 $\mu$ ：付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数、 $\gamma_v$ ：体積空隙率、 $\gamma_x, \gamma_z$ ：それぞれ $x, z$ 方向の面積空隙率（本計算では均一媒体を仮定し、実験で使用した実際の潜堤の空隙率を用いて $\gamma_v = \gamma_x = \gamma_z = 0.36$ とした）、である。

また、 $M_x, M_z, R_x, R_z$ は流体抵抗の項を表し、それぞれ $M_x$ と $M_z$ は構造物から受ける慣性力項、 $R_x$ と $R_z$ は抗力項の $x, z$ 成分である。

### (2) 計算方法

上述の基礎方程式を、流速 $u, w$ を計算格子境界上に、圧力 $p$ 、ソース $q$ およびVOF関数 $F$ を計算格子中央におくstaggerd meshを用いて有限差分近似を行う。

自由表面以外の境界条件は、次のように設定した。すなわち、底面の境界条件は、不透過条件およびslip条件を採用した。なお、本研究では一様勾配斜面を対象に行っているが、直交格子上における斜面の取り扱い、Petitら<sup>8)</sup>にならった。また、計算領域末端（開境界）における境界条件として、流速やVOF関数 $F$ などすべての物理量の水平勾配が0となる条件を課した。

図-3に本研究で使用した2次元数値波動水槽の概略図を示す。図中の $B, R, h_t$ はそれぞれ堤幅、天端水深、法先水深である。本計算では、図-3に示すように、解析対象領域の両端に付加減衰領域を、解析対象領域と沖側の付加減衰領域の接続位置に造波ソースを設けた。そして、斜面上に設置された透過潜堤に対して、 $x$ の負の方向から波を入射させた。ここで、静水面と潜堤天端先端の鉛直延長線が交わる点を原点とし、鉛直上向きを $z$ 軸の正としている。なお、海底斜面勾配は $i=1/30$ 、潜堤法面の勾配は、沖側、岸側ともに $s=1/3$ であり、水理実験と同一の条件である。

## 4. 波動場の特性

### (1) 波高と平均水位

図-4に波高と平均水位の変動特性の実験結果を計算結果とともに例示する。図より、波高分布については、構造物前面で部分重複波の形成により波高の増減が周期的に繰り返される。潜堤表法肩付近で波高は最大となり、その後砕波や透水層内の抵抗によるエネルギー逸散により波高は減少し、潜堤背後の

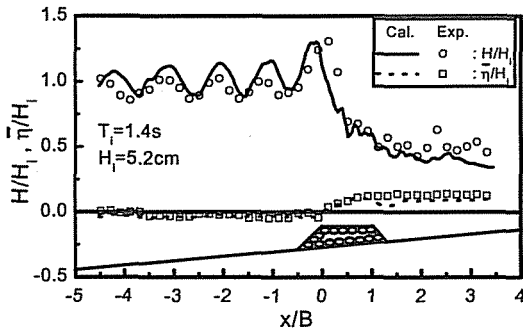


図-4 平均水位と波高の空間分布

波高は非常に小さくなる。一方、平均水位は碎波点以深で低下し、碎波点より岸側で上昇するset-downとset-upの特性が明瞭に現れている。

計算結果は、平均水位、波高分布ともに良好に実験結果を再現しており、さらに部分重複波の腹と節の位置での波高もほぼ一致していることから反射率もほぼ妥当に評価されていることが推察される。

## (2)最大流速

図-5に水平方向の無次元最大流速  $u_m / \sqrt{gH_1}$  (添字mは最大値を示す) の  $x/L_1$  に伴う変動特性を示す。  $u_m / \sqrt{gH_1}$  は、  $H_1/L_1$  や碎波条件によらず  $x/L_1$  により同様の変動特性を示し、一般的に  $x/L_1$  が小さなところでは、最大流速は大きな値となっている。これは、潜堤法面での水深の減少により浅水変形が起こり、波高が増大し流速が大きくなっているためである。

また、  $x/L_1$  が0.0から0.1の範囲で無次元流速は最大となるが、最大値が最も大きくなる時の碎波条件は(B)または(C)、すなわち衝撃碎波力が作用する場合であり、碎波時には水平方向流速が大きくなっていることがわかる。そして、ほぼ  $x/L_1 \approx 0.3$  まで急激に減少して、その後、ほぼ一定値をとる。非碎波の場合(図中(A))は、  $x/L_1$  による無次元最大流速の変化は、碎波する場合に比べて緩やかであり、  $x/L_1 > 0.2$  の範囲では、比較的大きな値となっている。これは、碎波が構造物より沖側で起こる場合は、その規模に比例して碎波後の波高は減少し、流速値も小さくなるためであり、このことから、流速の減少に及ぼす碎波の影響が大きいことがうかがえる。

図示しないが、  $R/h_1$  が0.4の場合、  $x/L_1$  に伴う変動はほぼ同様であるが、その変化は小さくなる。特に、非碎波の場合、  $x/L_1$  が0.15以下のところでは無次元最大流速の値は小さい。これは、一般に波高に比例する流速を波高の1/2乗で無次元化しており、非碎波の場合、流速の変動が入射波高に大きく支配されるため、波高の低い  $R/h_1$  が0.4の場合の方が小さな値

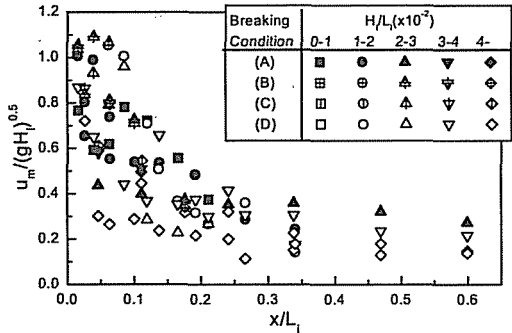


図-5 水平方向最大流速 ( $R/h_1=0.2$ )

になったと思われる。さらに、  $R/h_1$  が大きい場合は、小さい場合に比べて潜堤設置による効果が相対的に減少しているために、潜堤法面の水深急変部での浅水変形の影響による水平方向流速の増大は、  $R/h_1$  が0.4の場合に比べると、  $R/h_1$  が0.2の場合は、より緩やかな変動を示すものと考えられる。

なお、入射波高が大きくなると碎波が生じるが、碎波位置は潜堤上では沖側法肩付近に限られており、図からもわかるように、衝撃碎波力の発生するような(B)の碎波条件の領域は法肩付近に限られ、  $x/L_1$  が約0.25以下である<sup>9)</sup>。

一方、鉛直方向の最大流速は、水平方向とほぼ同様に  $x/L_1 \leq 0.1$  で最大値をとり、その後減少していくが、その変動幅は水平方向に比べて小さくなる<sup>9)</sup>。

## 5. 最大波力

図-6に、直方体の無次元最大波力  $F_{xm}/\rho g H_1 A_x$  ( $A_x$  は構造物の  $x$  方向への投影面積) の無次元距離  $x/H_1$  にもなう変動特性を示す。比較のため、直立堤と混成堤ケーソンに対する波圧算定式である広井式<sup>10)</sup>と合田式<sup>11)</sup>を使った場合の波力の計算値も示した。なお、計算値は波高に依存するが、ここでは、それぞれの潜堤に対して最も大きな波力が得られた波の波高(いずれも  $x=7\text{cm}$  の場合に発生)を使用した。

図-6より、  $x/H_1$  が小さい範囲で(B)や(C)の碎波状況のもとで非常に大きな波力が発生していることがわかる。これらは碎波にともなう衝撃的な波力に対応する。しかし、このような波力は  $x/H_1$  の小さい限られた範囲(表法肩近傍)でのみ発生し、その範囲は、  $R/h_1=0.4$  の場合では  $x/H_1$  が約6.0程度以下、  $R/h_1=0.2$  の場合では  $x/H_1$  が4.0程度以下とみなせる。それ以降は無次元最大波力は減少し、一定値に漸近することが確認できる。

直立堤、混成堤に対する波力算定式である広井式と合田式による波力と比較すると、実験値の最大値

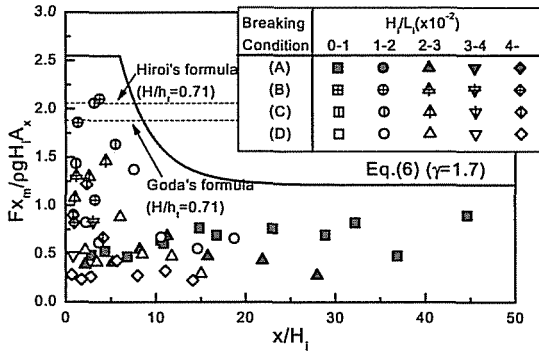
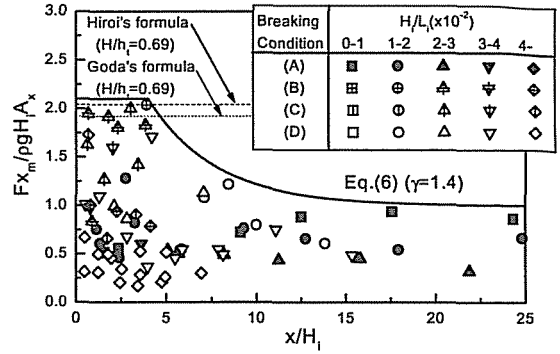
(a)  $R/h_1=0.4$ (b)  $R/h_1=0.2$ 

図-6 無次元最大波力の変動特性 (直方体の場合)

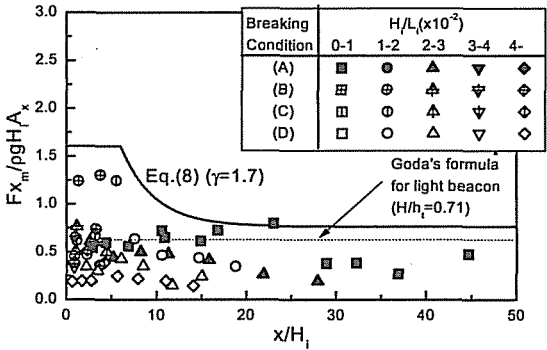
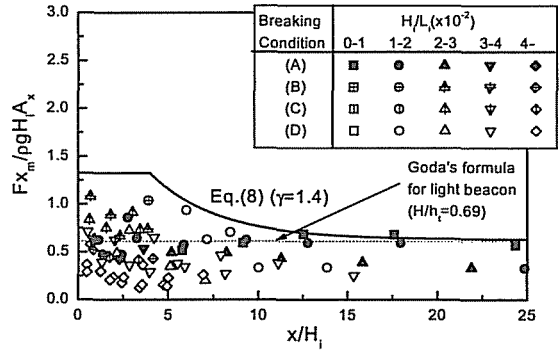
(a)  $R/h_1=0.4$ (b)  $R/h_1=0.2$ 

図-7 無次元最大波力の変動特性 (円錐台の場合)

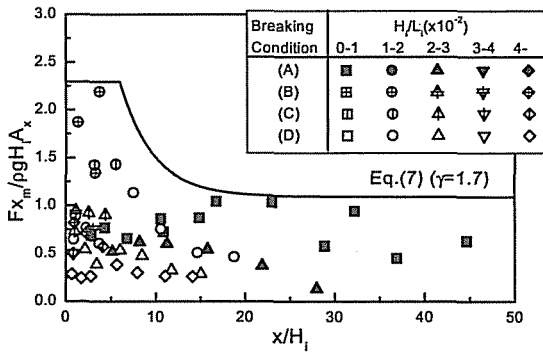
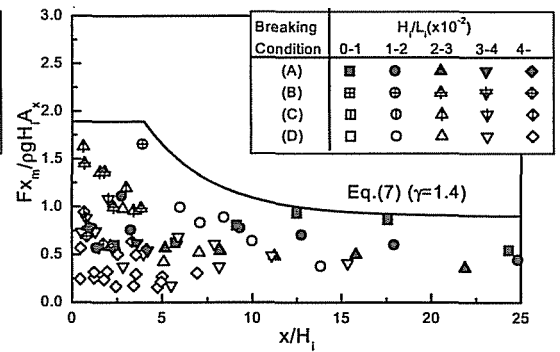
(a)  $R/h_1=0.4$ (b)  $R/h_1=0.2$ 

図-8 無次元最大波力の変動特性 (四角錐台の場合)

はほぼこれらの式による計算値に近いことがわかる。合田式と広井式を比較すると、広井式の方が若干大きくなり、合田式はいずれの $R/h_1$ の場合も最大値を過小評価する傾向がある。したがって、合田式に比べれば広井式の方が安全側の値に近いといえる。

図-7 は同様の結果を円錐台に対して示したものである。既述したように直方体に比較して無次元最

大波力は非常に小さく、その値は直方体の約半分程度である。合田ら<sup>12)</sup>は、岩礁上の灯標に作用する波力算定式を水理実験に基づいて提案している。それによると円柱に近似された灯標に作用する波力は、

$$F_G = 0.5 \rho g H A_x \quad (5)$$

与えられる。円錐台の場合、断面が鉛直方向に変化するものの形状は灯標と似ていると考えられるため、図中に合田らの波力算定式の結果も比較のために示してある。なお、この場合も最大波力に対する波高に対して計算値を求めてあり、さらに円錐台は表面が傾斜しているため、傾斜の効果として曲率の効果<sup>12),13)</sup>を参考に後述の係数 $\alpha=0.9$ をかけてある。

式(5)は砕波後の波に対して提案されているため $x/H_i$ が小さい範囲の(B)や(C)の砕波状況の実験値を過小評価しているが、 $x/H_i$ が10以上の範囲ではほぼ実験値の上限に対応しており、本実験の収束値は合田らの波力算定式でほぼ近似可能であるといえる。

図-8は、四角錐台に対する同様の結果を示したものである。実験値は直方体と円錐台の中間の値となっている。

以上より、直方体の作用波力の最大値は広井式で近似できること、円錐台の作用波力の漸近値が合田らによる灯標の作用波力算定式で近似できること、などが明らかとなった。そこで、これらを考慮し、本研究では、直方体に対する広井式で無次元最大波力の最大値を、灯標に対する合田らの式で無次元最大波力の $x/H_i$ の大きい範囲の収束値を与える。そして、四角錐台と円錐台の傾斜の効果、円錐台の表面の曲率の効果をそれぞれ係数 $\alpha$ と $\beta$ で考慮することとする。

ところで、いずれの波圧算定式も波高は構造物へ入射する時の波高により計算されるが、波力を無次元化する際には沖波条件での入射波高を用いる方が便利である。しかし、構造物に入射する時の波高と入射波高の比は一定ではないため、波力の絶対値は大きくても入射波高で無次元化すると逆に小さくなることもあり、場合によっては実際の波力を過小評価する場合も考えられる。そこで、本研究では、広井式や合田らの式に使用する波高として入射波高を採用し、浅水変形や潜堤による波高の変化(増加)分を係数 $\gamma$ で表すこととする。この $\gamma (=H/H_i)$ の値は、実験結果の整理より、 $R/h_i=0.2$ の場合は約1.4、 $R/h_i=0.4$ の場合は約1.7となることが判明したのでこれらの値を使用する。

直方体の場合：

$$F_{x_m} = \begin{cases} \gamma F_H & (x < x_0) \\ \gamma(F_H - F_G/\beta) \exp\left\{-0.27\left(\frac{x-x_0}{H_i}\right)\right\} \\ \quad + \gamma F_G/\beta & (x \geq x_0) \end{cases} \quad (6)$$

四角錐台の場合：

$$F_{x_m} = \begin{cases} \alpha\gamma F_H & (x < x_0) \\ \alpha\gamma(F_H - F_G/\beta) \exp\left\{-0.27\left(\frac{x-x_0}{H_i}\right)\right\} \\ \quad + \alpha\gamma F_G/\beta & (x \geq x_0) \end{cases} \quad (7)$$

円錐台の場合：

$$F_{x_m} = \begin{cases} \alpha\beta\gamma F_H & (x < x_0) \\ \alpha\gamma(\beta F_H - F_G) \exp\left\{-0.27\left(\frac{x-x_0}{H_i}\right)\right\} \\ \quad + \alpha\gamma F_G & (x \geq x_0) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 $F_H$ は広井式で求められる直方体に作用する波力、 $F_G$ は合田らの灯標に対する波力算定式で求められる円錐台の作用波力である。式中の $\alpha$ は構造物の傾斜の効果、 $\beta$ は曲面の効果を検討するための補正係数で、本研究の構造物の場合、 $\alpha=0.9$ 、 $\beta=0.7^{12)}$ 、 $\gamma$ は $R/h_i=0.4$ の時 $\gamma=1.7$ 、 $R/h_i=0.2$ の時 $\gamma=1.4$ である。また、 $x_0$ は衝撃力の発生限界で、 $R/h_i=0.4$ の時 $x_0=6.0H_i$ 、 $R/h_i=0.2$ の時 $x_0=4.0H_i$ である。

図-6～図-8にはこれらの提案式も示してある。いずれの場合も実験値の上限を良好に近似しているといえる。

## 6. 波力算定式

### (1) Morison式

潜堤上の構造物の作用最大波力は図-6～8により予測できるが、構造物の波に対する動的応答などを論議するには波力の時間変化の予測も重要である。潜堤上の構造物の作用波力のうち、工学上特に重要となる大きな波力は、既述したように砕波によって生じる衝撃的な波力である。衝撃砕波力は、波谷から波峰までの水塊が構造物に衝突することにより失われる運動量が衝撃力として構造物に作用する。この水塊の衝突にともなう付加質量の急激な変化のために、抗力と慣性力のみでは衝撃砕波力までを表現することは困難で、別途衝撃砕波力の効果を加える必要があるとされ、衝撃砕波力の研究が、直立円柱を対象に多く行われてきた<sup>14),18)</sup>。

これに対し、著者らは、構造物前面での流速と加速度を使用し、水位変動とともに変化する構造物の没水体積と流れ方向の投影面積を構造物の中心位置での水位より下にある部分を対象として評価することによってMorison式を適用することが可能であることを指摘した<sup>9),19)</sup>。すなわち、波力の $x$ 方向成分と $z$ 方向成分、 $F_x$ と $F_z$ はそれぞれ式(9)と式(10)のよう

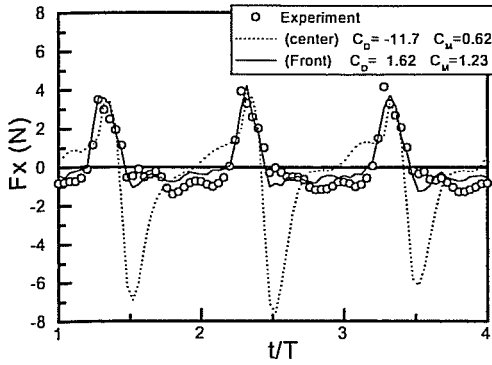


図-9 Morison式による計算波力と実測波力の比較例  
(円錐台の場合)

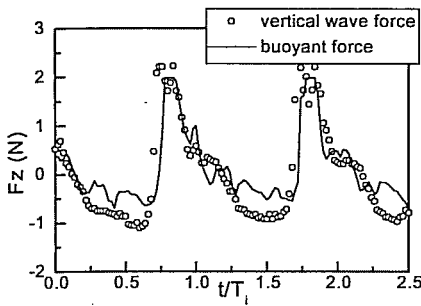


図-10 鉛直方向波力と浮力の比較例  
(円錐台の場合)

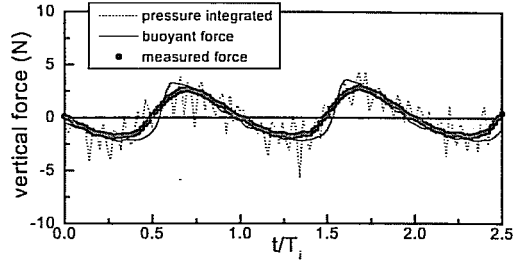
になる。なお、式(10)の右辺第3項は、浮力の変化による波力成分である。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho A(\eta) |u|u + C_{Mx} \rho V(\eta) \dot{u} \quad (9)$$

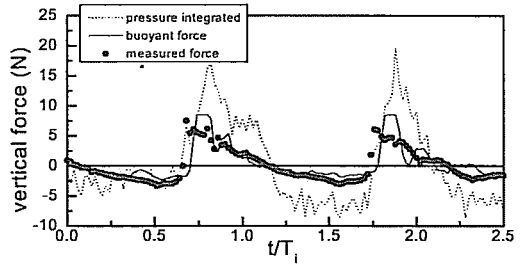
$$F_z = \frac{1}{2} C_{Dz} \rho A_z w |w| + C_{Mz} \rho V(\eta) \dot{w} + \rho g(V(\eta) - V(0)) \quad (10)$$

ここに、 $C_{Dx}$ 、 $C_{Dz}$ ：x、z方向の抗力係数、 $C_{Mx}$ 、 $C_{Mz}$ ：x、z方向の慣性力係数、 $A(\eta)$ 、 $V(\eta)$ ： $z=\eta$ 以下の部分の波進行方向の投影面積と体積、 $V(0)$ ：静水時の構造物の没水体積、 $\eta$ ：構造物中心位置側方での水位変動、 $A_z$ ：底面面積、である。

本研究では、Morison式の抗力係数と慣性力係数を、波力の計算波形が実験波形に最もよく合うよう、最小二乗法で決定した。すなわち、実験で計測した流速の時間変化から各時間における加速度を求め、さらに水位変化 $\eta(t)$ から求まる投影面積 $A(\eta)$ 、 $A_z$ と体積 $V(\eta)$ を式(9)と式(10)に代入して計算される計算波力と実験で計測した波力が最もよく合うように係数を決定した。



(a) 非碎波の場合(非越波)



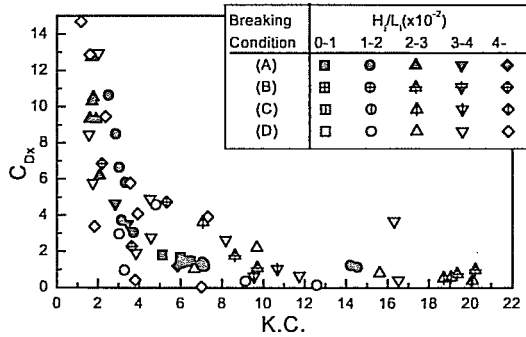
(b) 構造物前面で碎波する場合(越波有)

図-11 底面圧力の積分値と鉛直方向波力の関係  
(直方体の場合)

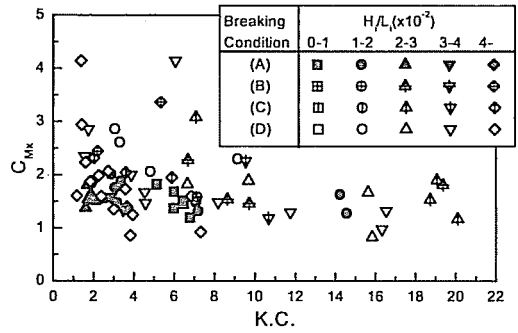
図-9にMorison式で計算した水平方向の計算波力を実験値と比較した結果を例示する。構造物中心位置で計測した流速・加速度は、波が構造物前面に衝突した際に最大となる波力の時間変化に比べて位相が遅れるため、最小自乗法を使って実験結果にフィッティングさせると抗力係数が大きな負値となり、時間波形は実験値と大きく異なる。これに対し、構造物前面で計測した流速・加速度を使用した場合、計算波力は実験値と良好に一致する。特に、衝撃的な碎波力が作用する場合であっても、実験値と計算値は良好な一致度が得られている。これは、波峰部分の水塊が構造物によって失う運動量が力積として短時間の間に作用したものが衝撃力として解釈すれば、衝突面での運動量の変化によって慣性力が表現されたと考えられる。

また、後述するように、抗力係数と慣性力係数もほぼ安定した値となっており、これらの結果から判断すれば、潜堤上の構造物の作用水平波力は、構造物前面での流速と加速度を使用すれば、工学上、本研究で対象としたような構造物に作用する碎波波力の算定に、抗力と慣性力の和であるMorison式を適用可能といえる。

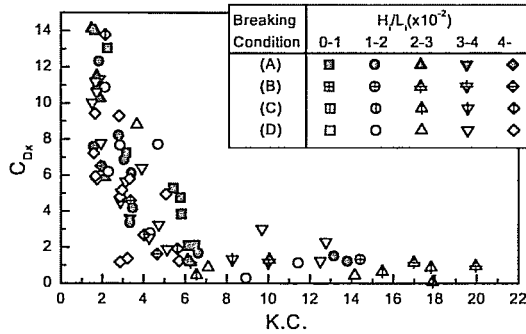
図-10は鉛直方向波力の実験値と式(10)の第3項の浮力を比較した結果である。同図より明らかなように、鉛直方向波力に対しては、浮力が支配波力成分であることがわかる。図が煩雑になるため示していないが、抗力と慣性力の割合は非常に小さいことを



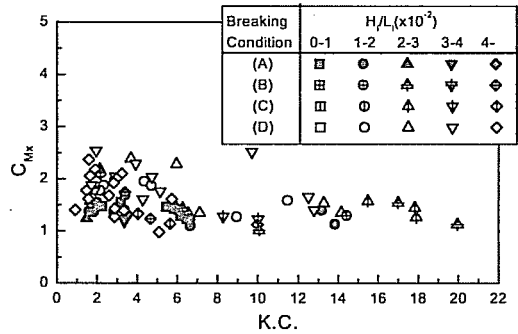
(a) 直方体



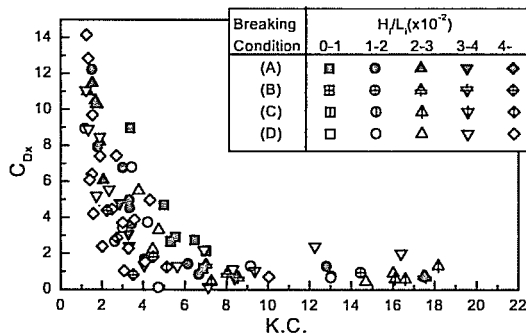
(a) 直方体



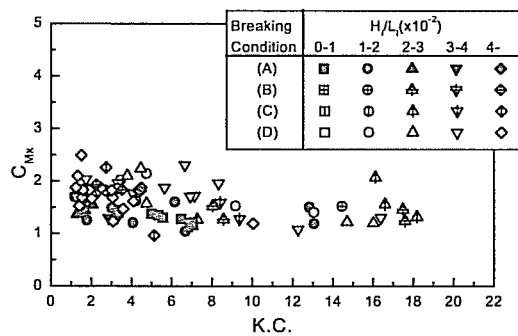
(b) 四角錐台



(b) 四角錐台



(c) 円錐台



(c) 円錐台

図-12 抗力係数とKC数の関係 ( $R/h_1=0.2$ )図-13 慣性力係数とK.C.数の関係 ( $R/h_1=0.2$ )

確認している。すなわち、鉛直方向波力は、構造物底面に作用する圧力の寄与が大きく、その圧力はほぼ静水圧によって与えられることになる。なお、図-10で浮力の最大値が平坦になっているのは、波高が大きいため、波が構造物天端を越えて構造物が完全没水状態となり、浮力が一定となるためである。

図-11は、構造物底面中央部に取り付けた圧力計によって計測した圧力が平均的に底面全体にわたって作用すると仮定して求めた波力を、浮力及び鉛直方向波力の実験値と比較した例である。図-11(a)より、非碎波の場合、圧力計の出力には高周波数の振

動が含まれているものの、その積分値は波力の実験値や浮力と良好に一致していることが確認できる。

一方、図-11(b)に示す碎波の場合、浮力と波力の実験値は良好に対応しているものの、圧力の積分値は特に上向きの力を過大評価している。これは、一般に碎波が作用する場合、波が構造物上を越波する。このとき構造物上面にも鉛直下向きの力が作用するが、圧力の積分値は底面に作用する上向きの力のみを考慮している。このためこのような差が生じたと考えられる。したがって、このことを考慮すれば、鉛直方向波力には静水圧による浮力が支配的な成分



であると言えそうである。

## (2) 波力係数

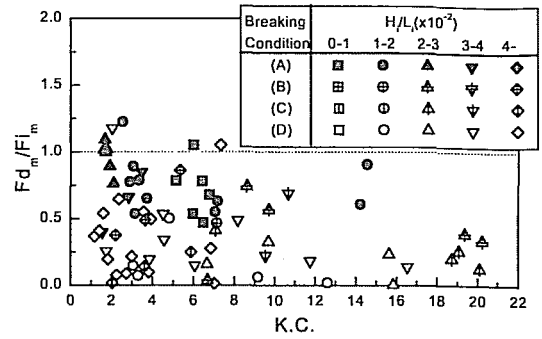
鉛直方向波力は、浮力が抗力や慣性力に比べて圧倒的に大きく支配的な波力成分であることを前述するとともに、図-10より、浮力のみを考慮することでもほぼ作用波力を推算可能であることを指摘した。したがって、ここでは水平方向波力に対する抗力係数と慣性力係数について考究することとする。

図-12に $R/h_f=0.2$ の場合の抗力係数 $C_{Dx}$ のKeulegan Carpenter数 (K.C.数= $u_m T/D$ ,  $D$ は構造物の代表長で、直方体と四角錐台は底面の辺長, 円錐台の場合は底面の直径) にともなう変化特性を示す。抗力係数は、構造物の形状に関係なく、K.C.数が4~5以下では、比較的広範囲にばらつきながら、K.C.数の減少にともない増大する。これは、直立円柱の抗力係数に対して認められている傾向に一致する。しかし、K.C.数が4~5以上になると、K.C.数の増大にともない、ほぼ一定値に収束していく傾向がある。ただし、収束値は構造物の形状によって若干変化し、図-12の縦軸のスケールではあまり明瞭ではないものの、円錐台が最も小さくなる傾向が認められた。

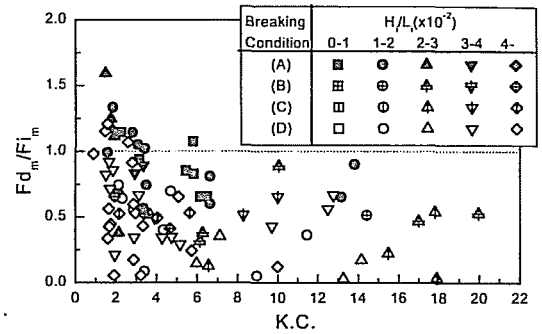
つぎに、慣性力係数の特性について考察する。図-13に、慣性力係数 $C_{Mx}$ とK.C.数の関係を示す。全体的に慣性力係数は構造物の形状により直方体、四角錐台、円錐台の順に小さくなるが、K.C.数にともなう変動特性はよく似ており、抗力係数に比べてK.C.数に対する依存性は小さく、ほぼ一定値と見なせる。

ところで、これらの抗力係数と慣性力係数を使用した場合の抗力と慣性力の最大値の比 $F_{d_m}/F_{i_m}$ の変動特性を図-14に示す。一般にK.C.数の小さい範囲で1.0を超える値がいくつかあるなど、抗力の割合が比較的大きいが、K.C.数の増大とともに抗力の割合が減少し、慣性力が支配的な状況へと変化する。これらの傾向はこれまで報告されている直立円柱<sup>20)</sup>や没水球体<sup>21)</sup>の波力特性と異なる。本研究で対象とするような構造物は、水深の非常に浅い水域に設置されるが、このような状況では、K.C.数が大きい波は碎波の条件になり、したがって衝撃的な碎波力が作用する状況に近づく。このような状況では、大きな運動量を持った波峰が構造物に衝突し、運動量が力積となって大きな波力を生じると考えられる。すなわち、K.C.数が大きい方が慣性力の卓越する状況になると考えられる。

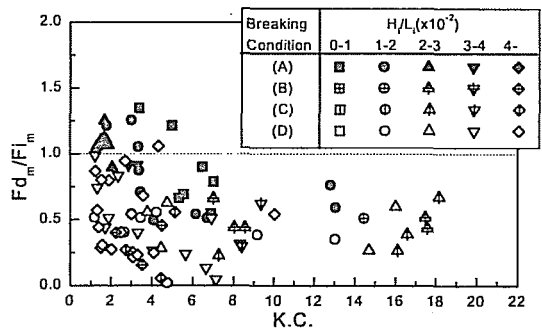
一方、K.C.数が小さい範囲では非碎波か碎波であっても比較的規模の小さい碎波が作用する。この場合、流速と加速度の時間変化には明確な位相差が存在する。これは本章の最初に述べた通りである。一



(a) 直方体



(b) 四角錐台



(c) 円錐台

図-14 抗力と慣性力の比の特性 ( $R/h_f=0.2$ )

方、水位変動は流速の位相とほぼ一致する。すなわち、慣性力が最大値をとるとき、水位はまだ低いため、慣性力が作用する体積はまだ小さい。一方、流速が最大となると、水位も最高となり、したがって抗力が作用する断面は大きくなる。

K.C.数が大きくなり、碎波が作用するようになると、流速と加速度の位相差が非常に小さくなり、したがって慣性力も大きな没水体積に作用することになる。このような水位変動の影響が、他の構造物の波力と異なる抗力と慣性力の卓越特性を生じさせたと考えられる。

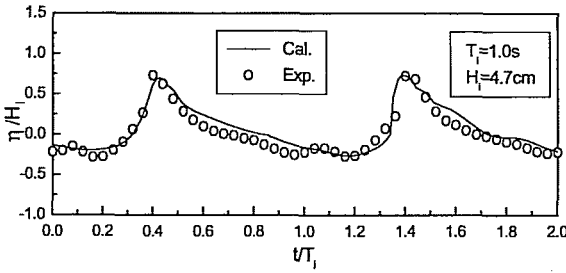
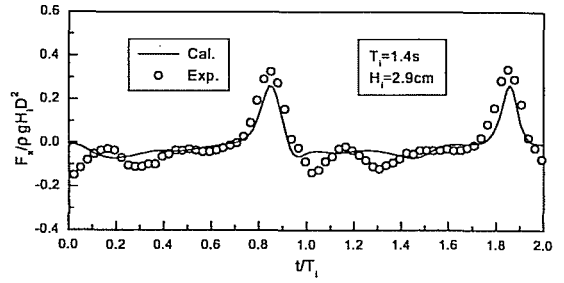
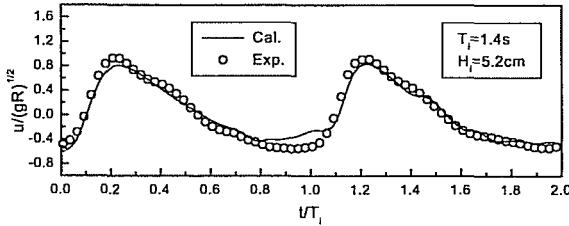


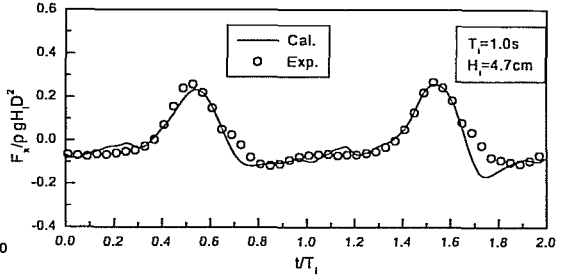
図-15 水位変動の比較例 (砕波の場合,  $x/L_i=0.111$ )



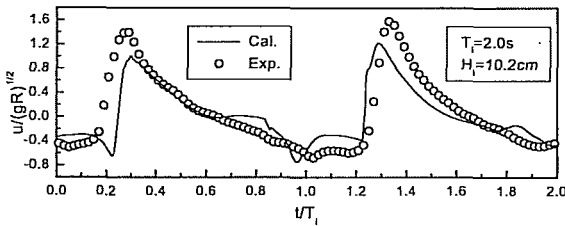
(a) 非砕波の場合 ( $x/L_i=0.137$ )



(a) 非砕波の場合 ( $x/L_i=0.026$ )

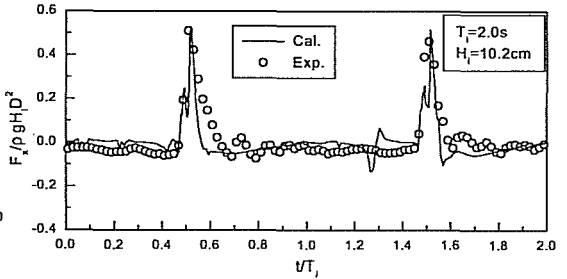


(b) 砕波の場合 ( $x/L_i=0.046$ )



(b) 砕波の場合 ( $x/L_i=0.016$ )

図-16 水平方向水粒子速度の比較



(c) 砕波の場合 ( $x/L_i=0.016$ )

図-17 波力の計算値と実験値の比較

## 7. 数値計算による波力の予測

Morison式が波力の時間波形の予測に有効であることを確認したが、Morison式を使用するためにはその入力である流速と加速度、および水位変動の予測を行う必要がある。本研究で採用した数値解析手法を使ってこれらの予測を行い、Morison式に代入し、波力の時間変化の予測を行う。

図-15は、潜堤上の水位変動の計算値を実験値と比較した結果を例示したものである。斜面上を進行するとともに浅水変形によって波高が増大し、入射波は非線形性を強める。そして潜堤上ではさらに非線形性が強く現れ、波峰が尖り波谷が平坦になる非線形な波の水位変化を計算結果は忠実に再現している。

図-16に、水平方向水粒子速度の時間波形の計算値と実験値を例示する。図から明らかなように、水

平方向流速の時間波形は、水面の時間波形と同様、斜面と潜堤の影響により、波峰が急峻化し波谷が平坦になるといった強い非線形性を帯びた波形になっている。砕波直後の水平方向水粒子速度の時間波形である図-16(b)をみると、計算値と実験値の間に若干の位相のずれと計算値の方が若干過小評価しているのが認められる。これは、砕波による乱れの影響を本計算手法では完全には考慮されていないことが原因であると考えられる。このように、砕波直後は両者に若干の差があるものの全体的には水粒子速度の時間変化を精度よく再現できることが確認された。

ところで、Morison式にこれらの時間変化、およびこれから求められる加速度を代入することにより水平方向波力の時間変化が計算できることになる。図-17は、このようにして計算した潜堤上の円錐台の波力を実験値と比較したものである。なお、計算に必要な抗力係数と慣性力係数の値として図-12と

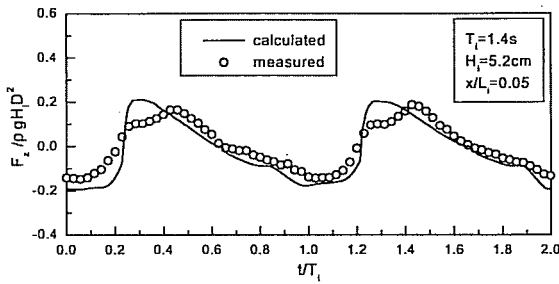


図-18 鉛直方向波力の計算値と実験値の比較例

13の収束値を採用することとした。したがって、円錐台の場合、 $C_{Dx}=0.8$ 、 $C_{Mx}=1.35$ を使用した。

図-17からわかるように、計算値は非碎波や碎波前の波力だけではなくピーク値がかなり尖った衝撃碎波力まで精度よく再現されているといえる。すなわち、本研究で得られた慣性力係数と抗力係数と、本研究で提案した計算手法によって求めた水粒子速度と加速度、および水面波形を使用することにより、非碎波だけではなく工学的に特に重要となる衝撃碎波力まで精度よく算定できると言える。

一方、水位変動が正確に予測できれば浮力の時間変化がわかるので、鉛直方向波力についてもほぼ浮力から容易に算定できる(図-18参照)。

なお、碎波後の波の減衰計算については検討の余地が残されていることを付け加えておきたい。

## 8. 結言

本研究では、潜堤上に設置された擬岩模型に作用する波力を取り上げ、その特性と予測手法について水理模型実験の結果および数値計算の両面から考察してきた。以下、本研究で得られた主要な結論を要約する。

- 1) 水平方向の無次元最大流速は、無次元距離 $x/L_1$ が0.0から0.1の範囲で、衝撃碎波力が作用する場合に最大となり、 $x/L_1$ が0.3あたりまで急激に減少して、その後の変化は極めて小さくなる。また、非碎波の場合、 $x/L_1$ の増加による無次元最大流速の減少は、碎波する場合に比べて緩やかであり、 $x/L_1 > 0.2$ の範囲では比較的大きな値となっていることから、流速の減少に及ぼす碎波の影響は大きい。
- 2) 無次元最大波力は、構造物の形状の違いにより、円錐台、四角錐台、直方体の順に大きな値をとり、円錐台と比較して、四角錐台で1.2~1.3倍、直方体では2倍程度の値をとる。これらの最大値を構造物の無次元設置位置 $x/H_1$ の関数として定式化した。

- 3) 水平方向波力は、構造物前面での流速と加速度を使用することにより、抗力と慣性力の和であるMorison式により算定可能である。一方、鉛直方向波力は、抗力と慣性力に浮力を加えた式で算定可能である。
- 4) 一般的に水平方向波力に対しては、慣性力が卓越波力成分となる。特に碎波による衝撃的な波力が作用する場合、慣性力が重要な波力成分となる。一方、K.C.数の小さい範囲で抗力が卓越する場合がある。これは水位変動に伴う受圧面積の変化の影響である。
- 5) 鉛直方向波力は浮力が非常に卓越しており、浮力のみでも鉛直方向波力をほぼ予測できる。
- 6) 本研究では、VOF法を採用した数値波動水槽にPorous Body Modelの基礎式を採用することにより、斜面上に設置された潜堤による碎波を含む波変形の数値解析手法を提案し、その妥当性を検証した。さらに、水粒子速度(加速度)と水位変動の時間波形、および実験結果より得られた慣性力係数 $C_{Mx}$ と抗力係数 $C_{Dx}$ を使用することにより、潜堤上の構造物に作用する波力の時間変化を、非碎波の場合だけではなく衝撃的な碎波波力が作用する場合まで算定可能となった。

謝辞：本研究を行うきっかけをいただいた東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所所長 倉田克彦氏および東洋水研(株)技術部長 遠藤正男氏に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 酒井哲郎, 水谷太作, 田中秀明, 多田幸夫: 斜面上の巻き波型碎波の碎波後の運動機構の数値解析, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.71-75, 1987.
- 2) 朴鍾千, 宮田秀明: 有限差分法による2次元及び3次元波崩れの数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第175号, pp.11-24, 1994.
- 3) 渡部靖憲, 佐伯浩: 碎波帯内の流速場のダイレクトシミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.71-75, 1996.
- 4) 川崎浩司: 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学大学院学位論文, 1998.
- 5) 榊山勉, 鹿島達一: ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究所報告書, 48p, 1992.
- 6) 水谷法美, 前田健一郎, W.G.McDougal, A.M. Mostafa: 透水性構造物の抵抗係数の評価と波・潜水透水性構造物の非線形相互作用の数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.131-135, 1996.

- 7) Sha, W.T., Domanus, H.M., Shimitt, R.C., Oras, J.J. and Lin, E.I.H. : COMMIX-1; A three dimensional transient single-phase component computer program for thermal hydraulic analysis, Argonne National Laboratory, NUREG, NUREG/CR-0785, ANL-77-96, 1978.
- 8) Petit, H.A.H., Tonjes, P., van Gent, M.R.A. and van den Bosch, P. : Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. ICCE'94, Vol.1, pp.511-524, 1994.
- 9) 水谷法美, 許東秀, 米勢嘉智, 倉田克彦, 遠藤正男, 岩田好一朗: 潜堤上の構造物に作用する波力の特性とMorison式の適用性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.15, pp.357-362, 1999.
- 10) 広井勇: 波力の推定法に就て, 土木学会誌, 第6巻, 第2号, pp.435-449, 1920.
- 11) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp.31-69, 1973.
- 12) 合田良実, 池田龍彦, 笹田正, 岸良安治: 岩礁上の円柱の設計波力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第4号, pp.45-81, 1972.
- 13) 谷本勝利, 吉本靖俊, 滑川伸孝, 石丸敬純: 半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.551-555, 1987.
- 14) Ross, C.W. : Large-scale tests of wave forces on piling, TM-111, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C., 1959.
- 15) 合田良実, 原中祐人, 北畑正記: 円柱に働く衝撃碎波力の研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻, 第6号, 30p, 1966.
- 16) 樫木亨, 後野正雄, 岩橋哲哉: 浅海域における円柱構造物の碎波局部衝撃波力特性と全体波力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.376-380, 1983.
- 17) 堀川清司, 渡辺晃, 勝井秀博: 円柱に作用する碎波力に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, pp.37-42, 1973.
- 18) 光易恒, 本多忠夫: 円柱に作用する碎波の波力, 第20回海岸工学講演会論文集, pp.43-47, 1973.
- 19) 水谷法美, 許東秀, 小島一哲, 倉田克彦, 遠藤正男, 岩田好一朗: 潜堤上の構造物に作用する波力の特性に関する一考察, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集II, pp.315-316, 1998.
- 20) Sarpkaya, T. and Isaacson, M.Q. : Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Von Nostrand Reinhold, 615p., 1981.
- 21) 水谷法美: 没水球体に作用する波力の算定手法に関する研究, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp. 91 ~ 100, 1994.

(1999. 10. 22 受付)

## WAVE FORCE ON A THREE DIMENSIONAL BODY ON A SUBMERGED BREAKWATER AND ITS ESTIMATION METHOD

Norimi MIZUTANI and Dong-Soo HUR

Characteristics of wave forces on a three dimensional body on a submerged breakwater have been investigated experimentally. Maximum wave force has been found to depend greatly on the location of the structure and its shape. In the vicinity of the leading crown edge, the plunging breaking occurs and the impulsive breaking wave force acts on it. The variation of the maximum wave forces are formulated based on Hiroi's and Goda's formulae. Moreover, the Morison equation has been modified to consider the varying water surface, and the calculated wave force using the velocity and acceleration at the front face is confirmed to reproduce well the experimental result. The numerical prediction method based on the VOF method has been also developed to estimate the velocity and acceleration of breaking waves on a submerged breakwater. With the use of these computed values and recommended drag and inertia coefficients, the Morison equation can give good estimation of wave force even in a case that the impulsive breaking wave force acts on the structure.