

没水型鉛直板近傍の波浪流に関する基礎研究

FUNDAMENTAL STUDY ON WAVE-INDUCED CURRENT NEAR SUBMEARGED WALL

落合 実¹・鈴木 功²・遠藤茂勝³

Minoru OCHIAI, Isao SUZUKI and Shigekatsu ENDO

¹正会員 工修 日本大学講師 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目二番一号)

²学生会員 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目二番一号)

³フェロー会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目二番一号)

A wave-induced current near submearged wall type breakwater was examined for the clarification of a dispersion system of waves energy and the preservation of sea area ecosystem. The turbulence quantity of a detailed wave-induced current was obtained by PTV measuring. The characteristics of wave-induced current, especially turbulence quantity, an instantaneous velocity and circulating range to the state of wave overtopping were elucidated. It was found that the factor of waves energy dissipation is the interference of a return flow and incident wave in the front area of structure and be the splash with overflow and circulation by return flow in the back area.

Numerical computations were performed by using DNS method. The calculation results agree well with the experiments and the adaptability of the analysis method was confirmed.

Key Words : Wave control, vertical breakwater, submerged breakwater, PTV

1. はじめに

海岸構造物の多くは防災が主な目的であり、反射波、打ち上げ高、透過波などの水位変動量に注目して、それらを効果的に制御できる構造形式が開発されてきた。しかし近年では沿岸海域の環境保全、特に沿岸海域生物の保護・育成を図る必要性が高まり、水位変動量に加えて沿岸域の流れ特性も考慮した構造物が望まれている。このような目的の構造物としては越波や透過流が期待でき、経済的、景観的な有利性を考慮すると没水構造物となる。

しかし没水構造物周辺での波変形による流れの発生、すなわち波浪による周辺流れの内部構造に関する検討は、波浪エネルギーの減殺に加えて海域生物の生活環境の確保や海域生態系の保全という観点からも重要な課題と考えられるが、十分な検討がされていないのが現状である。

一方、著者らは鉛直堤構造物に波浪が入射したときの反射波、前面水位そして透過波などの水位変動におよぼす堤体天端高の影響を検討するために潜堤状態から無越波となる天端高までの重複波に関する実験を行った。また没水板の天端上水深が入射波高の約50%程度の時、反射率、打ち上げ高そして透過率などの水理量が著しい影響を受けることを既に明らかにした^{1)~2)}。そして潜堤を対象に水位変動量と波浪流れの構造との関連を解明するために基本構造

モデルとして単純な没水薄板鉛直防波堤を対象に一樣水深波浪場における防波堤近傍の詳細な流速計測を行い、入射波の特徴的なタイミングにおける波浪の瞬間流速特性の一部を既に報告している³⁾。

本論では前報の結果を踏まえて流速乱れ量を主眼とした堤体近傍の波浪流特性、そしてその内部構造と水位変動との関連を検討することを目的としている。また実験結果を検証するために数値解析を行い、その適用性を検討する。

このように本研究では反射波や透過波に対して効果的な低減機能を持ち、加えて海域生物の生育環境を維持・構築するために必要な海水流動が波浪流によって効果的に励起できる波浪制御域構造物の開発を到達目的として位置付けている。

2. 水理実験手法

実験は長さ27.6m、幅0.7m、高さ1.0mの両面ガラス張り2次元造波水槽を用い、そのほぼ中央に薄板鉛直壁(厚さ0.6cm、鋼板製)を設置した。堤体高:hsは25cm~57cmまで1cm毎に任意に設定できるが既に行った堤体高と水位変動の関係から著しい水位変動が生じない堤体高:hs/h=0.7(Hc/h=-0.3)を基本ケースとして主に検討し、水位変動に影響の大きい堤体高:hs/h=0.8(Hc/h=-0.2)およびhs/h=0.9(Hc/h=-0.1)に関しては局所流速を代表例として比較する。

実験は水深: $h=40\text{cm}$, 入射波波形勾配: $H_i/L=0.016\sim 0.057$, 比水深: $h/L=0.067\sim 0.167$ の規則波で行ったが本論では $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ と $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の2種類の波浪に関する結果を示す。水位計測には容量式水位計を用い, 内部流速はPTVシステムにより計測する。実験水槽, 水位計設置地点そしてPTVシステムの概略を図-1に示す。

実験はトレーサ粒子(ナイロン12, 平均粒径1mm, 平均比重1.02)をほぼ均一に散布し, 水槽上面からビデオカメラの収録周期に同期したストロボスリット光(幅約60cm, 厚さ約1cm)を照射させ, 側面よりCCDビデオカメラで定常波の状態を撮影する。撮影された画像は1/30sec毎にLVDに収録され, その再生画像を解析システム(Nexus PTV system)に入力する。この解析システムの粒子追跡手法は連続する3時刻において粒子画像の形状と配置の適合度を利用する方法⁴⁾を採用している。

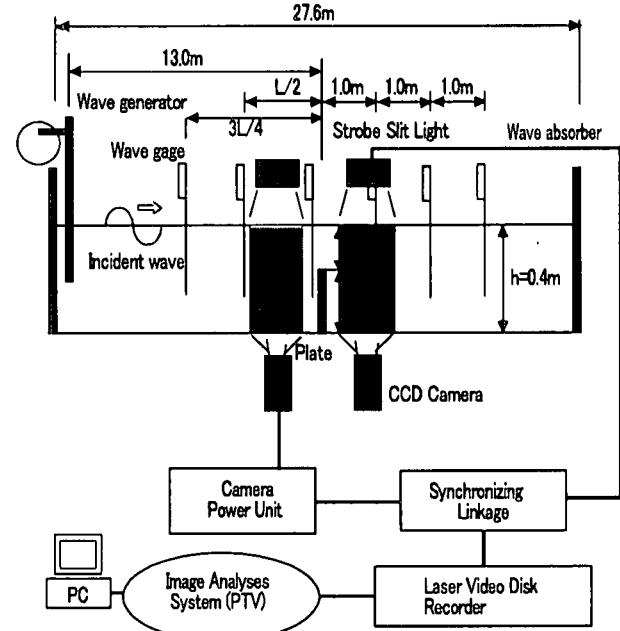


図-1 実験設備およびPTVシステム概略

3. 数値解析手法

本計算で用いた基礎方程式は, 非圧縮粘性流体に対する2次元の連続方程式とNavier-Stokes運動方程式であり, それらを式(1)~(3)に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \quad (3)$$

ここで, x および z は, それぞれ波の進行方向および鉛直方向座標軸を示す。原点は, 静水面と没水鉛直壁前面の延長線が交わる点とする。 u および w は, それぞれ x および z 方向流速方向成分。 t は時間, g は重力加速度, ρ は流体密度, P は圧力, ν は動粘性係数, ∇ はLaplace演算子である。

これら(1)~(3)の基礎方程式を用いて, 一樣水深中に置かれた没水型鉛直板に波浪が衝突するとき生じる鉛直板近傍の波浪流をDNS法(Direct Numerical Simulation)により解析する。本計算では基礎式を2次の中心差分によって空間離散化し, 自由水面の運動解析を考慮したMAC法(Marker And Cell Method)を非定常な水面に関してより安定した解が得られるSMAC法を用いる。

本数値計算において, 自由水面における境界条件は次式を満足する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = w \quad (4)$$

ここで $\eta = \eta(x, t)$ は自由表面形状関数である。そして鉛直板表面は不透過でnon-slip条件, 水路床面の境界では不透過でslip条件としている。解析領域は鉛直板設置地点を中心に x 方向に $\pm 1.5L$ (L :入射波長), z 方向には静水面を基準に $-h\sim 0.5h$ (h :

水深)である。また計算メッシュ系はスタガード格子を適用し, メッシュサイズは x および z 方向に対してそれぞれ $\Delta x/L=0.015$ および $\Delta z/h=0.025$ であり, 時間間隔 Δt は解の安定性を考慮して $\Delta t=1/450\text{sec}$ とする。計算では実験で使用した造波装置の運動に合致した振動流速を入力している。

4. 実験および数値解析結果の考察

(1)瞬間および平均流速

図-2は波浪が没水鉛直板を越流する時の鉛直板近傍の波浪流を測定して得られた瞬間流速ベクトル分布の一例を示したものである。図は波浪条件 $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ で $H_c/h=-0.7$ の天端高の場合であり, 堤体面で水位が最大となる瞬間から0.2sec毎に一周の瞬間流速ベクトルを示したものである。これらの図から越流する流況をまとめる。

堤体前面で最大水位となる時の前面域では入射波の水位変動に伴う岸・下向き流れと堤体面には垂直に衝突する流れ, 背後域では堤体を越流する岸向きの大きな流速が床面にも到達し, その到達点より堤体側の床面で近くで沖向きの流れが生じる。その後, 前面では水位降下に伴う沖・下向き流れと堤体面で戻り流れによる鉛直下向き流れ, そしてそれによる堤体前面で反時計回りの循環ができる。背後では越流流速が小さくなり, 床面の到達点が岸側に移り, それに伴う後流が生じ, 時計回りの循環となる。

より水位が降下すると前面域では入射波の引き波に伴う戻り流れと堤体天端からの戻り流れが, 背後域では循環流れが卓越する。水位が上昇すると前面域での水面付近での戻り流れと入射波の干渉, 堤体直前での反時計回りの循環が生じる。また背後領域では水面付近に中心を持った時計回りの大きな循環となる。より水位が上昇すると前面域では, 入射波の流れが堤体に衝突して生じる沖・上向き流速がそ

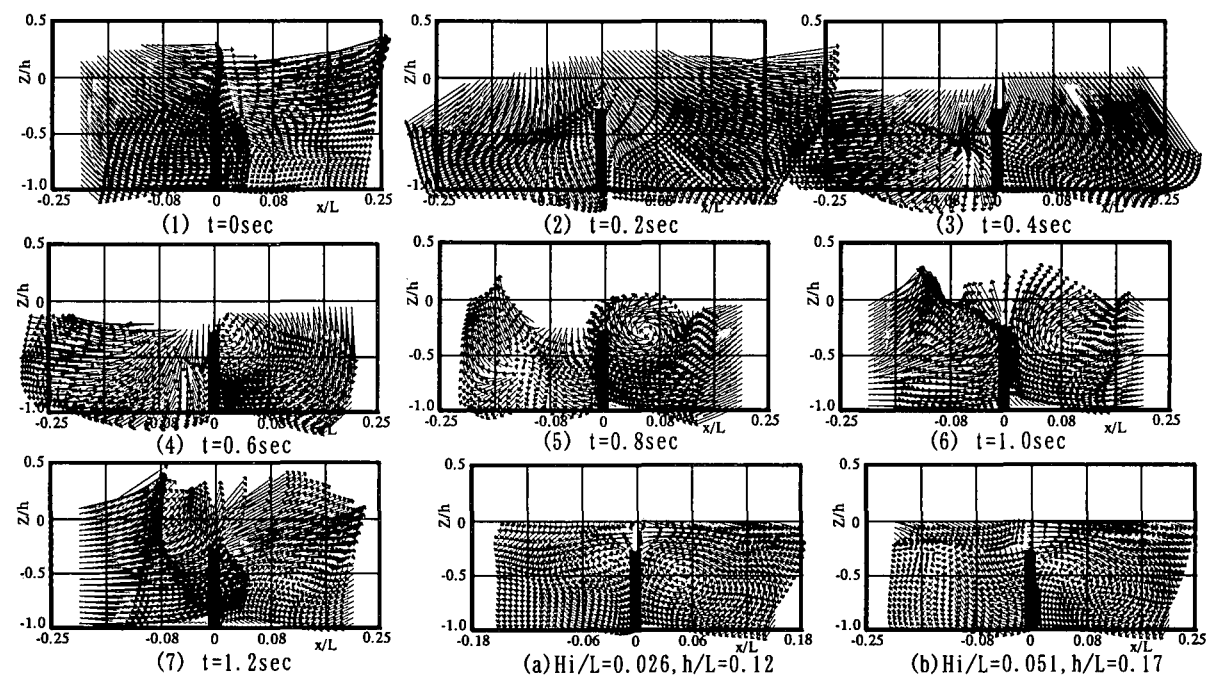
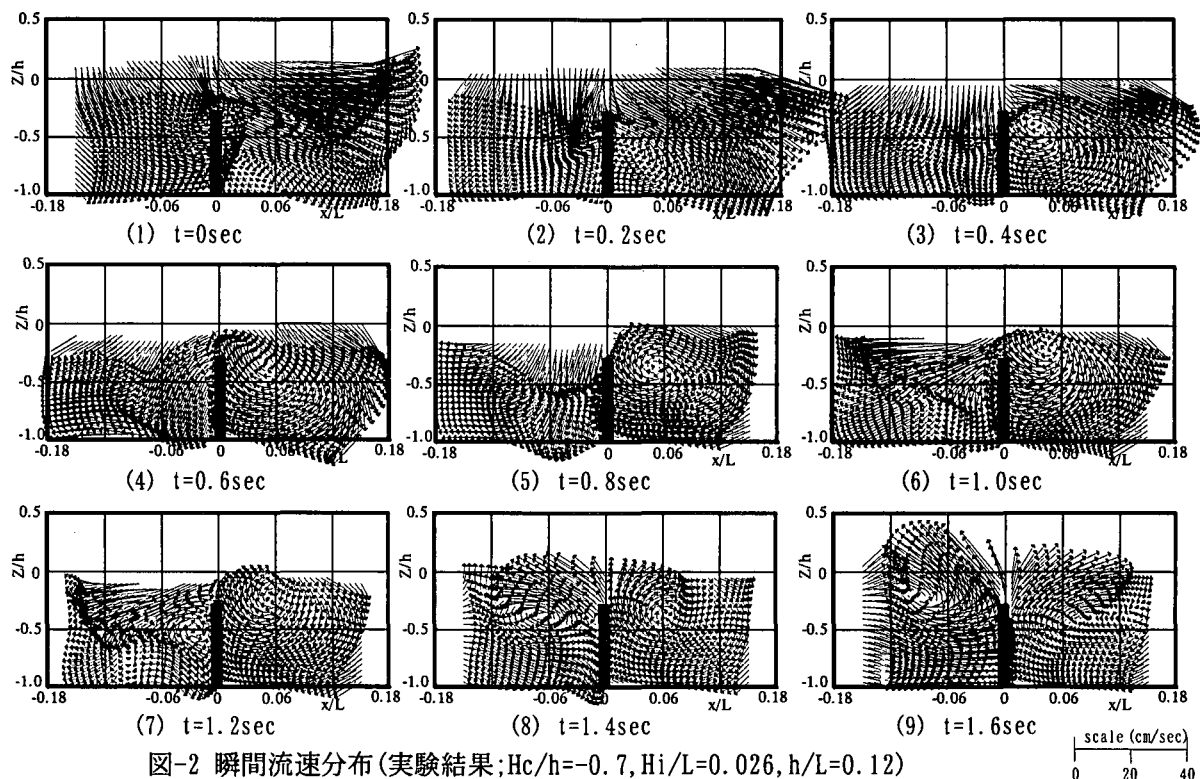


図-3 瞬間流速分布(実験結果;
Hc/h=-0.7, Hi/L=0.051, h/L=0.17)

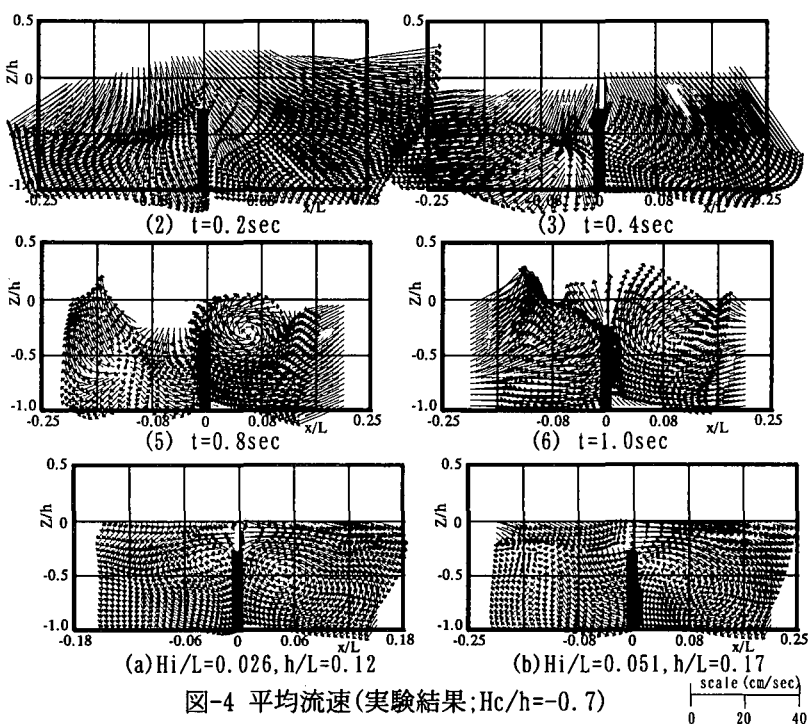


図-4 平均流速(実験結果; Hc/h=-0.7)

れまであった反時計回りの循環を加速させる。背後域では越流による流速が時計回りの循環を加速させ、その中心位置をほぼ半水深に移動する。再び最大水位近くになると越流が増大し、前面域の反時計回りの循環が水面付近に移動する。背後域の時計回りの循環は水面からの大きな流速でその中心を床面近くに移動する。これら堤体の前面域と背後域に生じていた循環流れは越流が最大となる瞬間のみ消滅する。以上が堤体を波浪が越流する流況であり、他の波

浪条件では越流と戻り流れ量の違いによって若干流況が異なるがほぼ同様の流れ形態となっている。その一例を図-3に示す。これらの図から堤体前面域では入射波と戻り流れの干渉、背後域では越波と戻り流れによる循環流れが特徴的な流況であり、この流れが波浪エネルギー散逸の一要因である。

図-4は図-2および図-3の条件における一周平均流速であり、一波当たりの質量輸送を示す。(a)において前面域では堤体天端近くで反時計回りの循環、

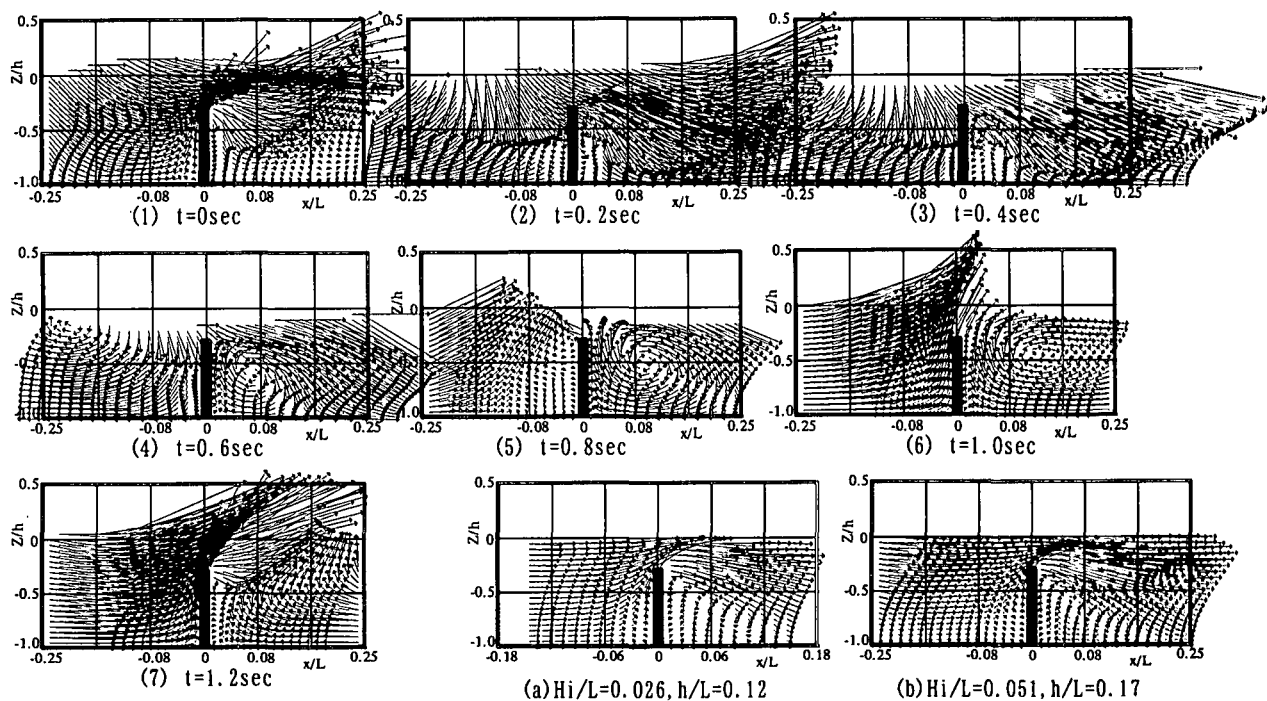
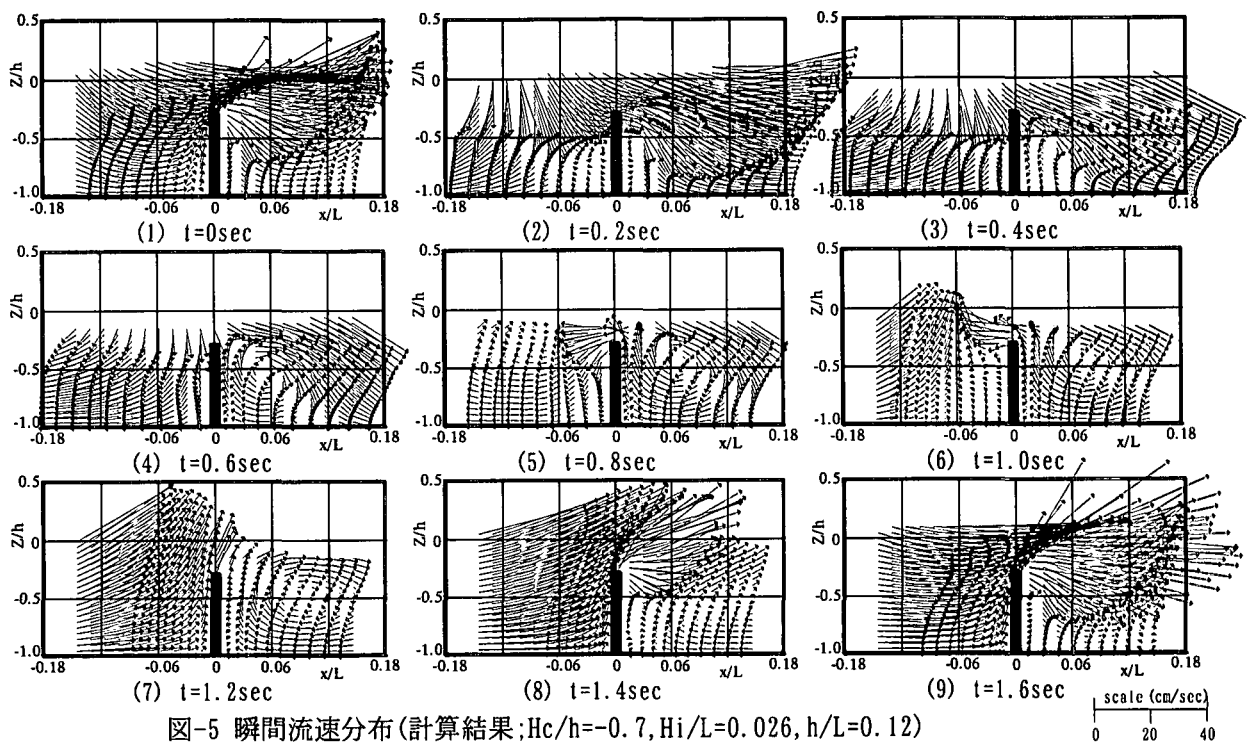


図-7 平均流速 (計算結果; $H_c/h=-0.7$)

scale (cm/sec)
0 20 40

背後域ではほぼ半水深に中心を持つ時計回りの循環流れとなる。また(b)では(a)の前面域で見られた反時計回りの循環は認められない。質量輸送に関しては越波した流体塊が $x/L > 0.18 \sim 0.20$ 程度まで達し、循環を形成する。それより岸側では静水面近くで岸向きの質量移動に伴う波動が生じる。これらの循環流れや質量移動は相対天端上水深 H_c/h が支配する越流量と戻り流れ量の違いに影響される。

図-5～7はそれぞれ図-2～4の実験結果に対応した

数値解析結果を示す。図-2と5の瞬間流速を比較すると最高水位から水位が降下し約0.6sec程度までは計算結果は実験結果を再現している。またそれ以後では波の入射タイミングが実験より計算の方が早く、岸向きの流速が戻り流れよりも大きく表現されている。これは堤体からの戻り流れと不連続な水面形、そして戻り流れと入射波との干渉などが局所的に生じているためである。一方、背後域での時計回りの循環流れは実験値を十分再現している。これらのこ

とは図-3と7の関係においても認められる。そこで最低水位から水位上昇に至るわずかな瞬間を除いた瞬間流速の数値解析結果は実験値を十分再現しており、本数値解析手法の有用性が認められる。また図-4と7の平均流速を比較すると前面域において計算結果は入射タイミングの影響による岸向きの一様な流れが大きく、堤体直前の複雑な実験結果と若干異なっているが、背後域の循環流れはよく再現されている。

(2) 流速と水位変動量の相関

図-8は実験における反射率と透過率に対する波浪流の相関例を示す。図中は堤体天端近く; $x=-2\text{cm}$, $z=-10\text{cm}$ と $x=2\text{cm}$, $z=-10\text{cm}$ を代表点として、一周期当たりの鉛直流速; w の変動を $(w_{\max} - w_{\min})/\tilde{w}$ で表している。ここで $w_{\max}$, $w_{\min}$ はそれぞれ w の最大と最小流速, $\tilde{w}$ は入射波における w の最大と最小流速の差である。図は $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ の場合であり、相対天端上水深の増加と共に反射率が低下、透過率が增大する一般的な傾向を示している。代表地点の流速は天端上水深が小さくなるに伴い越流流体塊の運動と合致し、前面域で大きく、背後域で小さくなり、前面水位と透過波との相関が認められる。今後、多くの特徴的な代表点を選定し、種々の流速特性量と反射率や透過率の相関を検討することにより、天端高パラメータに対する流速の内部構造と水位変動との関連が導かれるものと考えられる。

(3) 流速乱れ量

図-9は $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ の入射波が天端高 $H_c/h=-0.7$ の堤体を越流する場合の一周期の流速乱れ u', w' を示す。ここで本論では平均流速を堤体が無い時の堤体設置地点における入射波流速に対する乱れ量を次のように定義する。

$$u' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} / N \cdot \tilde{u} \quad (5)$$

$$w' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2} / N \cdot \tilde{w} \quad (6)$$

$$u'w' = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) / N \cdot \tilde{u}^2 \quad (7)$$

ここで u', w' は u, w の乱れ量, $u'w'$ はレイノルズ応力, u_i, w_i は u, w の瞬間流速, $\bar{u}, \bar{w}$ は入射波の u, w 時系列に対する6次近似式による流速, $\tilde{u}, \tilde{w}$ は入射波における u, w の最大流速と最小流速の差, N はデータ数である。

岸沖方向流速 u において、前面域では堤体によって打ち上げ、戻り流れなどが生じる地点で比較的大きな乱れ認められる。また背後域では水面付近と堤体直後そして床面近くに比較的大きな乱れが生じている。鉛直方向流速 w において、前面域では水面に近い堤体の沖側で比較的大きな乱れとなり、背後域

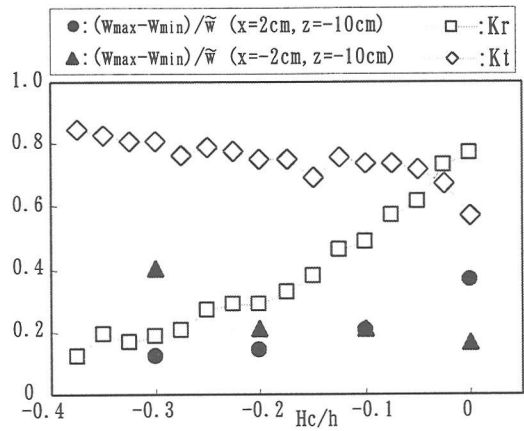


図-8 天端上水深と反射率・透過率の相関 ($H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$)

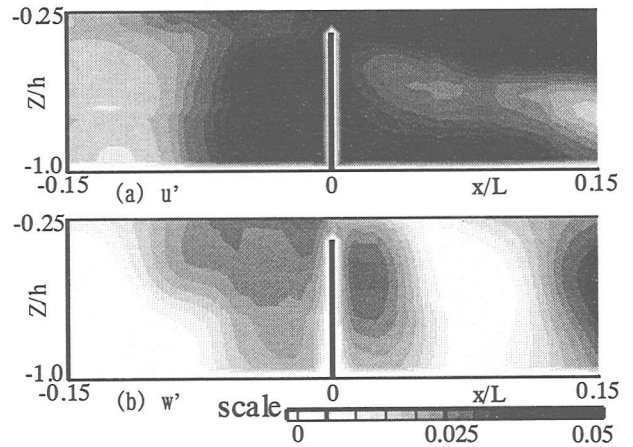


図-9 流速乱れ量; 実験結果 ($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$)

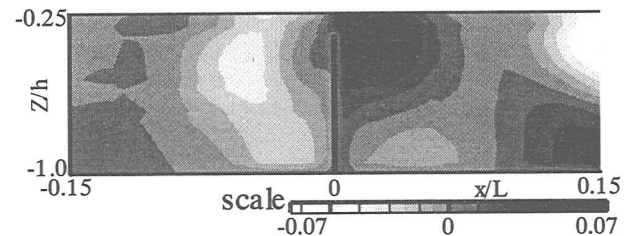


図-10 Reynolds応力 $u'w'$; 実験結果 ($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$)

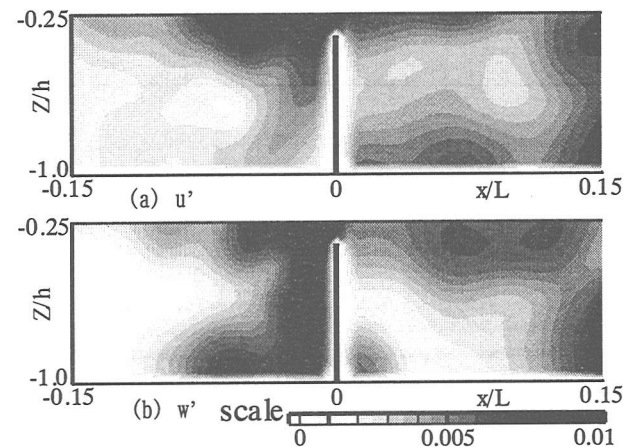


図-11 局所流速乱れ量; 実験結果 ($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$)

では堤体直後で大きくなっている。図-10は $u'w'$ 分布を示す。前面の沖側で負、天端背後で正の比較的大きな値となっている。堤体からの戻り流れや越流による天端付近ではなく離渦そして落ち込みなどが認められる箇所では比較的大きな乱れやレイノルズ応力が確認される。

これらの乱れは入射波に対する変動量であり、入射波の位相変化と局所的な比較短周期な乱れを含んで評価している。そこでそれらを分離するために入射波が6次関数で精度良く近似できることから $\bar{u}, \bar{w}$ の代わりに各点の流速時系列を6次関数で近似しその関数式の値を用いて整理することとする。図-11はその一例を示す。図-11および9から流速乱れは前面域において比較短周期の乱れが堤体直前の水面および前面部で大きく、それより若干沖側で比較長い周期の乱れがとなる。また背後域では比較短周期の乱れがほぼ全域にあり、背面、水面そして床面近くで比較長い周期の乱れ認められる。

図-12~14は $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/h=-0.7$ の場合であり、それぞれ図-9~11と比較できる。波形勾配の比較的大きい図-12~14は図-9~11よりも平均的に乱れ量が大きい分布形態はほぼ同様の傾向となっている。

5. 結論

本研究では没水型鉛直板を対象に波浪流の基本特性を得るための水理実験と数値解析を行い、瞬間流速と流速乱れ量を検討した。これらの検討から次の知見が得られた。

- 1) 鉛直板を波浪が越流する時の構造物近傍の流速特性、特に瞬間流速および流速乱れ量の詳細な空間分布が得られた。
- 2) 水位と瞬間流速そして平均流速分布から構造物前面では構造物への衝突と戻り流れの干渉、背面域では越流と戻り流れによる循環流れの流況、そして時系列的には越流した流体塊によって生じる渦および戻り流れによる渦の位置と規模およびそれらが消滅・生成される過程が明らかとなり、波浪エネルギー散逸の一要因を示唆した。
- 3) 乱れ特性量は入射波に対して比較的低周波な乱れと比較的高周波な局所的乱れに区別し、構造物の壁面域で大きく、背後域では水面近傍と構造物直後そして床面近くで大きな乱れが生じ、構造物が波浪流に及ぼす影響範囲を明らかにした。
- 4) 本数値解析結果は構造物に波浪が衝突して生じる構造物近傍の瞬間流速ベクトルの実験結果を再現でき、本数値解析手法の適応性が確認された。

以上が単純な鉛直没水板の基本特性であるが実用的には対象地点で要望される水理条件を満足するように、ここで対象とするような鉛直板を単体、あるいは複数枚設置する構造を想定している。そこで本研究で得られた知見はその基礎データとして位置付け、今後は実用的な構造形式の開発に向け系統的な検討を行いたい。

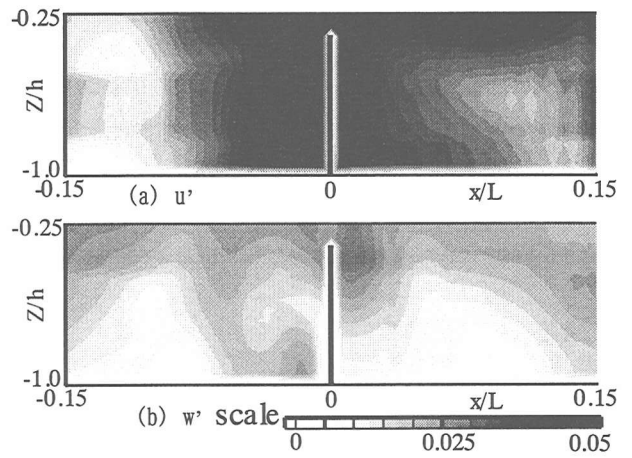


図-12 流速乱れ量;実験結果
($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$)

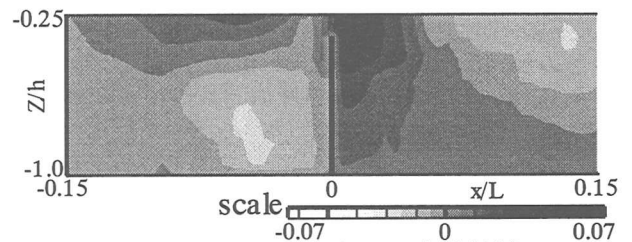


図-13 Reynolds応力 $u'w'$;実験結果
($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$)

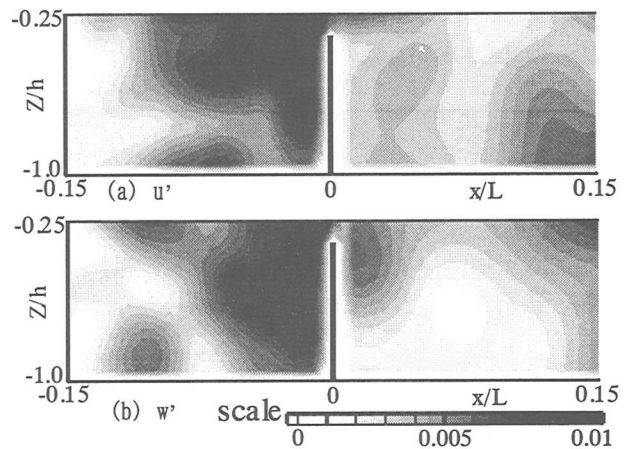


図-14 局所流速乱れ量;実験結果
($H_c/h=-0.7$, $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$)

参考文献

- 1) 落合実, 遠藤茂勝: 鉛直壁の天端高による部分重複波の水面変動と反射率について, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp.165~170, 1993
- 2) 落合実, 遠藤茂勝: 水面下に透過部を有する鉛直堤の波浪制御に関する基礎実験, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp73~78, 1996
- 3) 落合実, 遠藤茂勝: 薄鉛直堤近傍の波浪流特性に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp.387~392, 1997
- 4) 西野耕一, 笠木信英, 平田賢, 左田豊: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機械学会論文集(B編), Vol. 55-501, pp405~411, 1989

(1999. 4. 19受付)