

波浪制御に及ぼす薄鉛直堤周りの波流れに関する実験的研究

Experimental Study on Wave Current Due to Wall-Type Vertical Breakwater in Wave Control

落合 実・遠藤茂勝*

Minoru Ochiai and Shigekatsu Endo

In this paper, characteristics of the wave control for wall-type vertical breakwater were investigated experimentally. In the experiments, the motion of sea surface wave facing a vertical breakwater, reflected wave and transmitted wave were measured.

Relation between water surface displacement and the crown heights were discussed. And the characteristics of inner flow mechanism, velocity and vorticity distribution near by breakwater was examined. It was clearly that the crown height having a good effect on wave control of wall-type vertical breakwater was determined.

keywords : wave control, vertical breakwater, submerged breakwater, PTV

1. はじめに

海域利用の多様化に伴い、外海からの波浪を効率よく消波し、その上環境保全のためにも閉鎖水域を少なくする観点から適度な外洋との海水交換性を持たせる工夫が必要となる。これらの目的に合致した形式の海洋構造物、すなわち波浪制御構造物が望まれる。また従来から消波や透過を目的とした波浪制御構造物としては透過型防波堤や潜堤が検討されているが¹⁾、大水深におけるそれらの機能については十分な検討がなされていない。

深い水深における堤体構造としては混成堤の直立部を透過形式にするかその直立部の天端を静水面より低くする、いわゆる潜堤が考えられる。そこでこのような構造物が大きな波高に対して構造物自身がその波浪エネルギーを減殺し、波力を軽減させることができれば、より経済的な波浪制御構造物となる。

そこで本研究では、構造物自身が波浪エネルギーを減殺し、適度な透過波浪および反射波の軽減が図れる波浪制御構造物の開発を目的としている。これまで防波堤の有効性は主に波が堤体に入射した場合に生じる堤体前面水位、反射率そして透過率などの水位変動量から波浪エネルギーの減衰を検討し、評価されているがエネルギー減衰に支配的な波動による流速特性との関係についての検討は十分でない。

本論はその基礎的な段階として薄板型の鉛直防波堤を対象に水位変動とその近傍の流速計測を行い、堤体の前面水位変動や反射波および透過波の特性と堤体近傍流速場の関係について検討する。

2. 実験模型と実験方法

(1) 実験模型

本研究では反射、打ち上げ、透過波などの水理特性がその天端高と入射波特性に支配されるがその時の水理現象を水位変動のみでなく堤体近傍域の流速特性と

の関係を主眼に調べるものであることから、比較的単純な薄板の鉛直堤を対象とする。また波の反射率や透過率に対して静水面より若干低い位置の構造が大きく寄与することを考え、実験堤体はその天端が静水面以下、いわゆる潜堤状態から天端を高くし、無越波となるまでの天端高としている。実験堤体は厚さ0.6cm鋼鉄製であり、天端高:hsは25~57cmの範囲で任意に設定できる構造となっている。

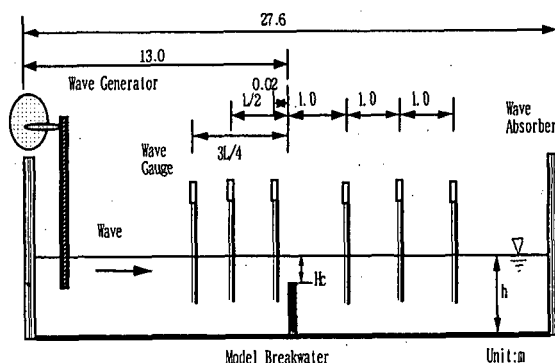


図-1 実験設備概略

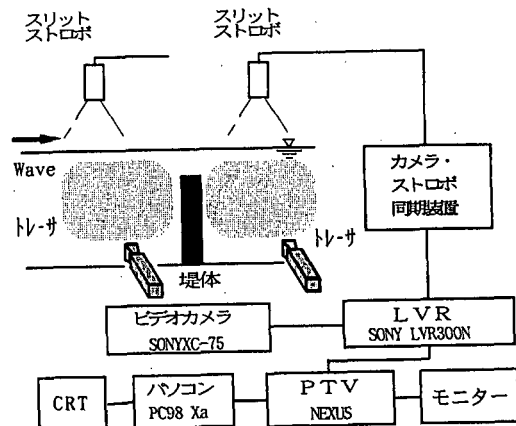


図-2 PTVシステム概略図

実機では堤体天端がある程度大きく、本堤体と類似の鉛直板を複数枚並べて遊水部を設ける形式を想定しているので、このような基礎実験から得られる水量はその基本特性として位置付けられる。

(2) 実験装置および方法

実験は幅0.7m、長さ27.6m、高さ1.0mの2次元規則波造波水槽を用い、水槽のほぼ中央部に堤体を設置した。その概略を図-1に示す。波浪条件は入射波波形勾配： $H_i/L=0.013\sim0.076$ ，相対水深： $h/L=0.097\sim0.207$ ，水深： $h=40\text{cm}$ としている。水位変動については反射波，前面水位そして透過波の減衰効果などを検討するために合計6ヶ所に設置した容量式水位計で計測する。水位計からの出力はデジタルデータレコーダで収録し，パソコンにより静水面を基準とした波の峯を「波頂高」，谷を「波底高」とし分けて算出する。反射率は合田らによる入射分離法³⁾により算定する。また流速は図-2に示すようなPTVシステムを用いて堤体の前面と背面近傍の水槽中央断面を計測対象としている。トレーサ粒子には平均径1.4mm，平均比重1.02のシリコン球形粒子を用いる。PTVにおける粒子追跡法には種々考案されている⁴⁾が本システムの粒子認識法には3時刻パターマッチング法⁵⁾を採用している。PTVシステムは粒子画像の良否で計測結果の信頼性が左右されることから，本実験では波浪流の非定常性や複雑性を考慮して，画像の撮影手法や画像解析条件の設定に関する検討を予め行い，その測定手法を確立している。本文における座標系は堤体前面と静水面との交点を原点とし，波の進行方向： X ，鉛直上向き： Z としている。

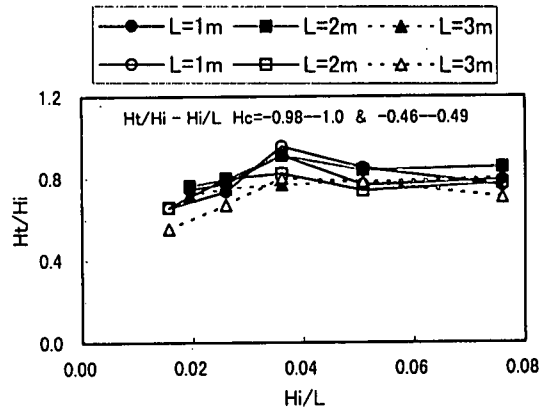
3. 実験結果および考察

3.1 水位変動の相関

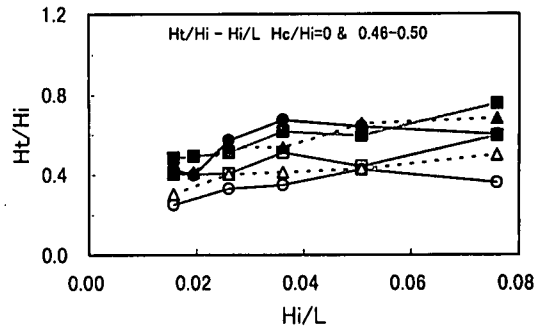
1) 透過率の距離による減衰

図-3は透過堤における入射波波形勾配と透過率： $K_t=H_t/H_i$ の関係を天端上水深と堤体背後距離をパラメータとして表している。図-3(a)は堤体天端が静水面より低い $H_c/H_i=-1.0\sim-0.98$ と $H_c/H_i=-0.46\sim-0.49$ の場合を示している。図は波形勾配が比較的小さい範囲において若干透過率が小さくなっているがほぼ一定値となっており，入射波特性の影響が少ないことが認められる。また天端上水深がこの図の範囲であると透過はに及ぼす影響は少なく，背後距離による減衰も明瞭な傾向が認められない。このような比較的天端上水深が大きい場合には入射波のエネルギーが直接通過し，背後領域の水面を振動させることから効果的な波浪制御が期待できない。図-3(b)は堤体天端が静水面と同じ $H_c/H_i=0$ と $H_c/H_i=0.46\sim0.50$ の場合を示している。図は波形勾配が大きくなると若干透過率が大きく傾向が認められる。また背後距離による透過波の減衰は比較的小さい波において認められ，堤体を越えた波の水塊が背後域に投下されることによるスプラッシュ波の発生が考えられる。

このようなことから波形勾配による若干の変化があるものの平均的な透過率は天端上水深に直接支配されることが確認される。

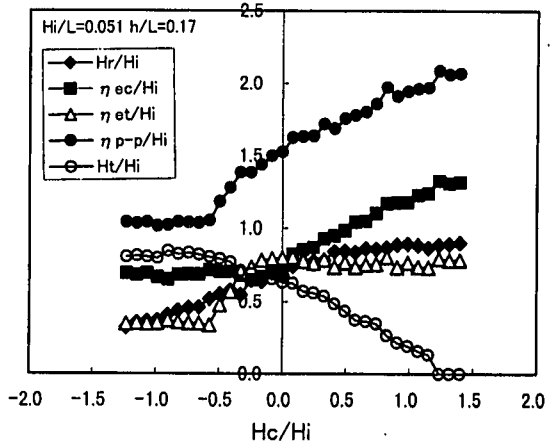


(a) $H_c/H_i=-0.98\sim-1.0, -0.46\sim-0.49$

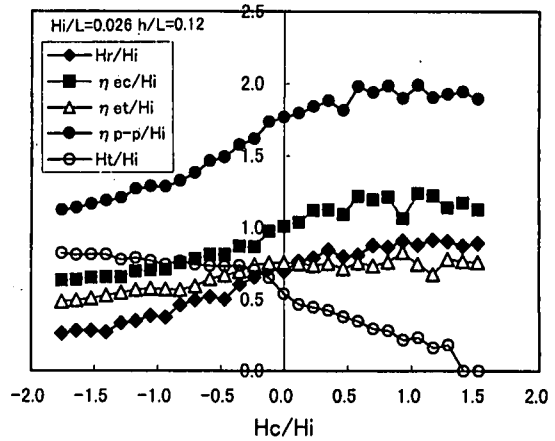


(b) $H_c/H_i=0, 0.46\sim0.50$

図-3 入射波波形勾配と透過波

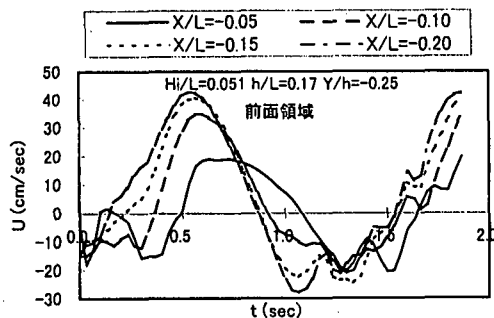


(a) $H_i/L=0.051, h/L=0.17$



(b) $H_i/L=0.026, h/L=0.12$

図-4 水位変動の相関関係



(a) $Y/h = -0.25$, 前面領域: u

2) 前面水位, 反射率, 透過率の相関

図-4は透過堤の反射波, 透過波そして堤体前面水位の相関関係を示したものである. 図-4(a)および(b)はそれぞれ $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ および $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ における静水面からの天端高: H_c/H_i に対する透過率: K_t , 前面水位の波頂高: η_{ec}/H_i , 波底高: η_{ec}/H_i そして入反射分離法により算定した反射率: K_r との関係である. 図-4(a)において堤体天端が高くなりその静水面からの高さが大きくなるに伴い前面水位変動と反射率は大きくなり, 逆に透過率が小さくなる傾向を示しているがその変化割合はそれらの水位変動諸量において約 $H_c/H_i > -0.5$ の範囲でそれぞれ著しくなることが認められる. また前面水位の波底高は約 $H_c/H_i < -0.5$ において $\eta_{ec}/H_i \approx 0.25$ とほぼ一定であり, 約 $-0.5 < H_c/H_i < -0.3$ の範囲で急増し, $H_c/H_i > -0.2$ では $\eta_{ec}/H_i \approx 0.77$ と一定値を示している.

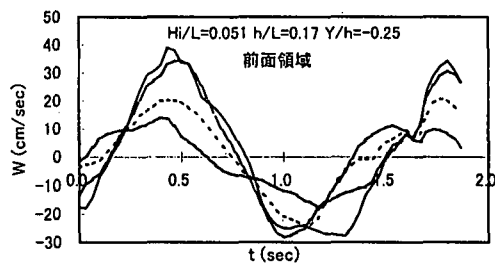
図-4(b)においても天端上水深の変化に伴う前面水位, 反射率, 透過率の相関は急激な変化を示す領域が異なるものの比較的波形勾配の大きい図-4(a)の場合と同様な相関関係を示している. 他の波浪条件における結果から前面水位におけるこの急増傾向は比較的波形勾配が大きい波浪の方が大きいことが認められている.

3. 2 堤体近傍の流速特性

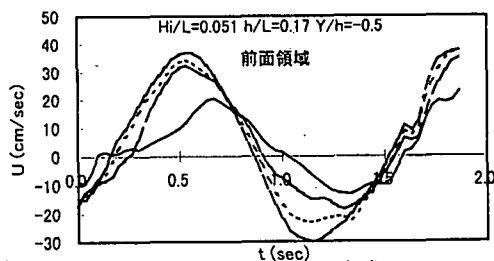
前項の検討から堤体前面の水位変動, 反射率そして透過率の相関関係に著しい影響をおよぼす堤体高が確認されたので, その堤体条件における流速特性と渦度を主体に検討する.

1) 流速時系列

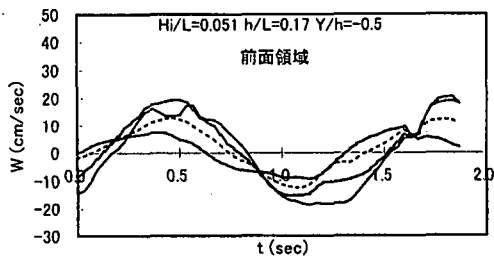
図-5は $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の波が $H_c/H_i=-0.33$ の堤体に衝突した時の堤体前面および背後領域における流速の時系列を示す. 図-5(a)および(b)は $Z/h=-0.25$ における各 X/L の点でのそれぞれ X 方向流速: U および Z 方向流速: W を示している. 図はほぼ入射波と同様な時系列形状となっているが比較的堤体に近い点で波の谷から水位が上昇する時に乱れが生じていることが認められる. これは堤体背後からの戻り流れによるものと考えられる. また図-5(c)および(d)は $Z/h=-0.5$ における結果で(a)および(b)と比較できる. 図から $Z/h=-0.25$ に見た戻り流れによる乱れが少なく安定した形状となっている. 図-5(e)および(f)はそれぞれ U および W について堤体背後領域の時系列で $Z/h=-0.5$ の場合を示



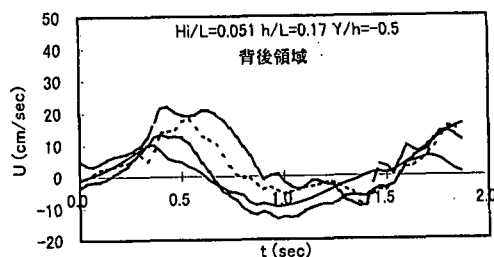
(b) $Y/h = -0.25$, 前面領域: w



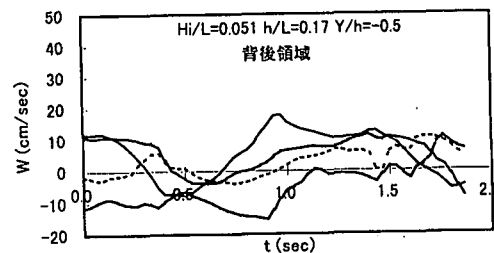
(c) $Y/h = -0.50$, 前面領域: u



(d) $Y/h = -0.50$, 前面領域: w



(e) $Y/h = -0.50$, 背面領域: u

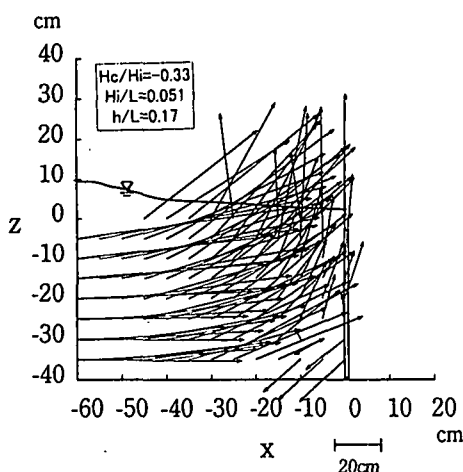


(f) $Y/h = -0.50$, 背面領域: w

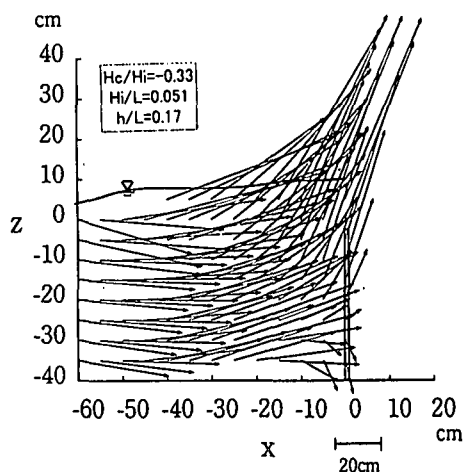
図-5 流速時系列

($H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/H_i=-0.33$)

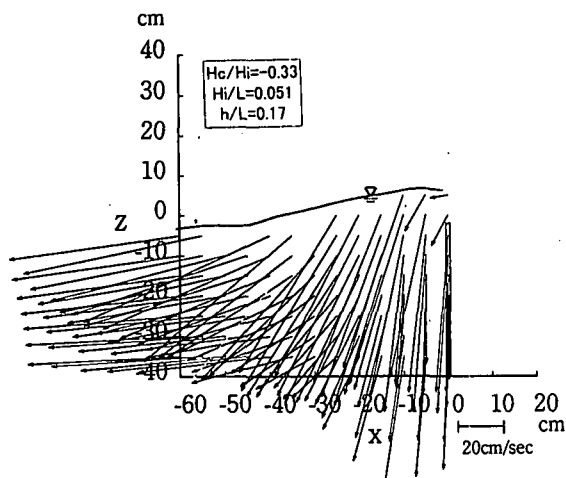
している. 背後域ではかなりの流速に乱れが生じ, 複雑な流動形態となっていることが示唆できる. 他の波浪条件においても流速時系列がこれらの図とほぼ同様の傾向となっていることが認められている. これら流速時系列は計測画像や流況の観測とよく一致し, 波に



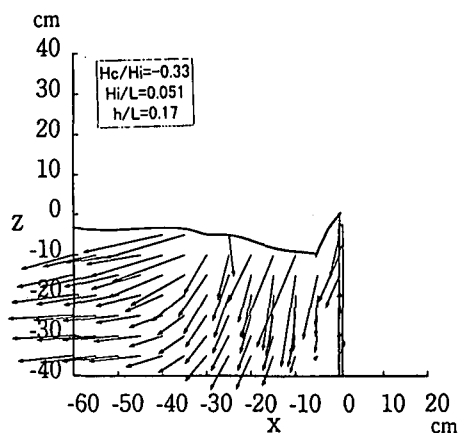
(a) 打ち上げ初期



(b) 打ち上げ



(c) 峰から谷



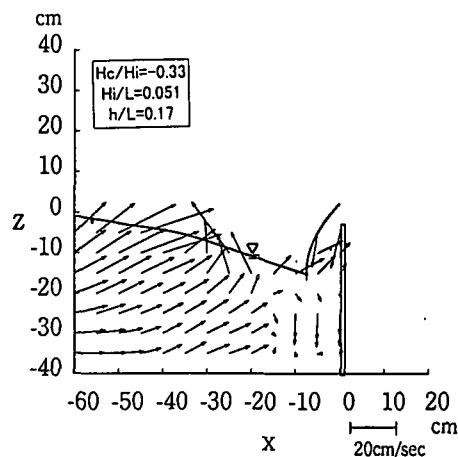
(d) 静水面から谷

よる流れ場の流速計測に対してPTVシステムの有用性が認められる。

2) 流速ベクトル

図-6は図-5と同様な条件、 $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の波が $H_c/H_i=-0.33$ の堤体に衝突した時の堤体前面の速度ベクトルを示したものである。図-6(a), (b), (c), (d)は堤体と進行波の関係がそれぞれ打ち上げ始め、打ち上げ、引き波途中、十分な引き波そして引き波から再入射の時系列的な関係を表している。

(a)において波の峰が堤体に近づき水位が上昇し始めているときの場合であり、沖側からの大きな流速が認められる。また堤体の前面近づく程上向きの流速となる流況が示されている。堤体によって波運動の水平方向の自由度が抑制され、鉛直方向に向けられる結果と考えられる。そして(b)は(a)より波の峰が堤体近くに進行してきたときの流況であり、堤体に向かうU方向の流れが卓越し、堤体前面付近では大きな上向きの流れが認められる。堤体面は水平方向の波の運動の抑制が最大となり、壁面への圧力が高くなる状況が考えられる。(c)においては堤体に波の峰が到達し、その後、静水面より水位が下がり谷へと下降する時の流れ状況を示している。堤体近くでは鉛直下向き、より沖側では大きな沖向き流れとなり、引き波時の運動形態が現れている。また堤体天端付近では背後からの戻り流れが若干認められる。(d)は(c)より若干時間が経過し、



(e) 谷から静水面

図-6 流速ベクトル；前面領域

($H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/H_i=-0.33$)

波の谷に近づいた時刻の状況である。堤体の前面近くでは鉛直下向き、より沖側では沖向き流れとなっている。(e)は堤体に波の谷が到達し、再び入射波が衝突使用としている状況で、堤体近傍では背後からの戻り流れがあるが流速は小さく、沖側からの進行波に伴う流速が堤体に向かう様子が現されている。またこの流況は(d)図と傾向が類似しているが平均的に流速が小さく、波の谷が近づいた時の運動が小さいことを示している。この状態から水位が上昇して、次の波の峰が堤体に近づき、(a)図のような流況が繰り返されることが確認されている。

図-7は図-6と同様な条件、 $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の波が $H_c/H_i=-0.33$ の堤体に衝突した時の堤体前面と背後の流速を同時に示したものである。

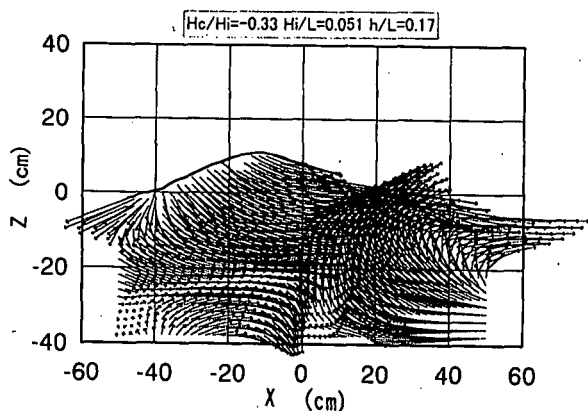
図-7(a)は堤体に波の峰が近づいた時の流況であり、堤体前面の水面付近に大きい進行方向下向きの流速が生じその流れは堤体に衝突、または越える流れが認められる。これは堤体に衝突する進行波の運動量がかなり大きく、鉛直堤の壁面にほぼ垂直に波の運動流速成分が衝突することを示している。また堤体背後の水面付近では堤体を越波した波による前面からの流れが大きくなっている。そして底面付近では波の進行方向とは逆向き流れが生じ、堤体背後で上昇流れとなり水面付近で越波してきた前面からの強い流れと衝突している様子が認められる。背後領域での沖向きの流れは堤体に波の峰が近づく時に引き波のために生じ、堤体背面では上昇する流れとなり越波した大きな流れと水面付近で衝突し、背後に流入するものと考えられる。

図-7(b)は堤体付近で波の峰が過ぎ、谷に向かう時刻の流況を示している。前面領域では水面近くで鉛直下向きの流れが卓越し、水底近くでは波の進行方向の流速が残っている。また背後領域では堤体を越えた流れの突入によって約 $X=40\text{cm}$, $Y=-20\text{cm}$ 付近を中心にした循環が生じている。そして堤体天端付近では戻り流れも認められ、複雑な瞬間流速分布となっている。このような循環は背後域で大きな引き波が生じる瞬間に循環形態が無くなるもののほぼ定常的に存在することが認められている。

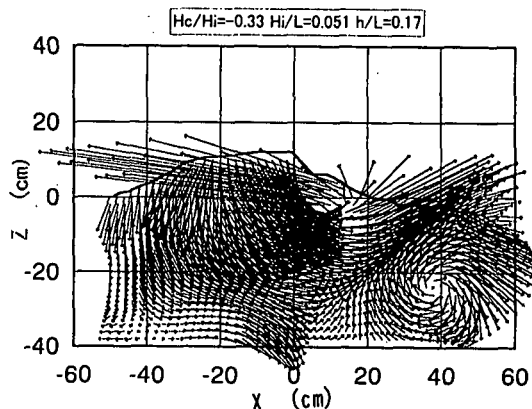
堤体に波が入射した時の流速分布がかなり複雑となることから堤体周辺の平均的な速度場を把握するために波の1周期当たりの平均流速を算出した結果が図-8である。図は $H_c/H_i=-0.33$ の堤体に $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の波が入射した場合で水面は静水面までを示している。堤体の沖側では緩やかな岸向きの流速となり、堤体面付近の静水面近くでは上向きの越波する流れ、そして堤体近くでは下降する流れが認められる。このような流速分布から進行波の運動量が堤体前面と背後域に輸送される形態が確認される。また堤体背後領域では $X/L \approx 0.16$, $Z/h = -0.5$ 付近を中心とする循環が生じ、堤体を越波した波の流れによって岸側への波の運動量が輸送されることを示している。

3) 渦度特性

図-9は $H_c/H_i=-0.33$ の堤体に $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の波が入射した場合の堤体周辺の渦度($\zeta = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x$)分布を示したものである。図-9(a), (b), (c)は堤体位置において堤体と波との関係が峰に向かう打ち上げ、峰から谷に向かう下降、谷から峰に向かう場合であり、図では静水面までの範囲を示している。(a)において沖側では約 $h/3$ の水面付近に小さい正の渦度、それより深いところで小さい負の渦度となっている。そして堤体の天端近傍では正の渦度となり、背後域の水面付近でも正となっている。また背後約 $X=30\text{cm}$ では負の大きな渦度が存在し、前面領域との対象性は認められない。こ



(a) 静水面から峰



(b) 静水面から谷

図-7 瞬間流速ベクトル：堤体周辺領域
($H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/H_i=-0.33$)

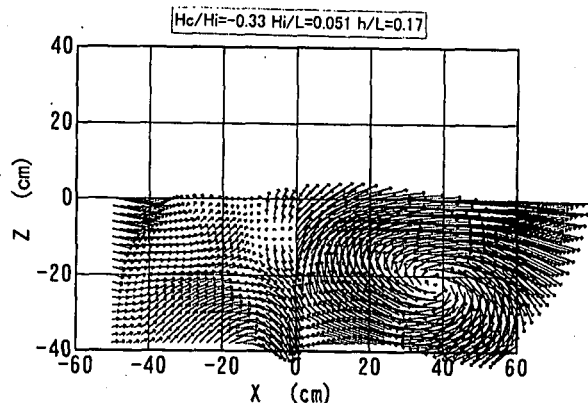


図-8 平均流速ベクトル

($H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/H_i=-0.33$)

のように堤体に波の峰が近づく場合には堤体により乱された流れが堤体を越え背後の水面付近を乱し、それより岸側に大きな渦を生じさせることを示している。

図-9(b)においては沖側の水面付近で小さな負の渦度が認められるが堤体近くでも正の小さな渦度、そして背後も小さな正の渦度となっている。

図-9(c)においては約 $h/2$ より水面において大きな負の渦度が生じ、堤体近くでは正の大きな値が水底から水面まで分布することが認められる。また背後域の堤体直後でも大きな正の渦度領域が水底から水面まで達し、水面付近ではかなり大きい値となっている。これらの渦度は水位が峰に向かう「アップ」時と谷に向かう「ダウン」時の分布とはかなり異なり、その「アップ」時が「アップ」

77° 時より平均的にかなり小さな値となる。そして水位が谷から上昇し始める時刻がかなり大きな渦度で広い範囲となることが認められる。これらのことは堤体を波が通過する場合に水位が峰に向かう時に堤体前面で上向きの流れが卓越し、その流れが越波し、また引き波によって堤体背面を上昇してきた流れとともに堤体上部の水面付近で渦流れが発生するという流速分布の結果から裏付けられる。

4. 結言

以上のように薄板型の鉛直防波堤を対象に水位変動とその近傍の流速計測を行い、堤体の前面水位変動や反射波および透過波の特性と堤体近傍流速場の関係などを検討し次の事柄が明らかとなった。

1) 透過波の堤体背後距離による減衰は本実験条件において堤体が比較的高く波形勾配が大きい場合に若干認められたが、顕著な減衰傾向は確認できなかった。

2) 透過率、堤体前面水位そして反射率などは波形勾配や相対水深により若干変化するが堤体高に支配される。堤体天端が高くなると前面水位変動と反射率は大きくなり、逆に透過率が小さくなるがその変化割合は約 $H_c/H_i > -0.5$ の範囲でそれぞれ著しくなる。また前面水位の波底高は約 $H_c/H_i < -0.5$ においてほぼ一定となり、それより大きい高さで急増した後、一定値となる。この急増傾向は比較的波形勾配が大きい波浪の方が大きいことが認められる。

3) 堤体付近の流速測定結果は画像や流況観測の結果とよく一致し、波・流れ場の流速計測へのPTVシステムの適用性が確認された。堤体を波が通過する時の堤体周辺の流況が時系列的および平均的に流速ベクトル分布として詳細に得られた。水面変動と流速分布の関係から堤体を波が通過する時の波の運動特性が明らかとなった。

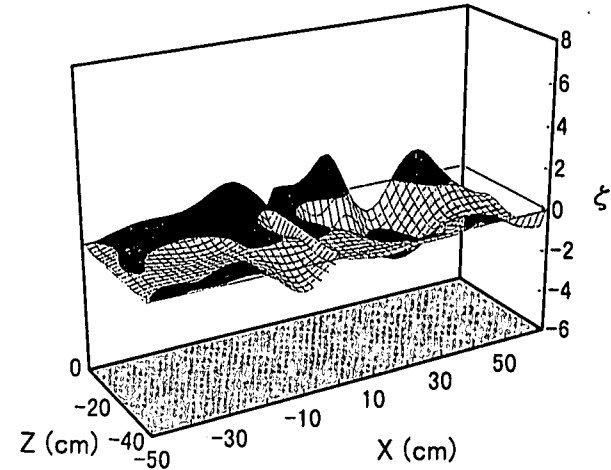
4) 渦度分布から堤体付近の波流れの特性として堤体によって生じる渦流れを評価した。堤体を波の峰が通過する時の堤体上端部で生じた渦流れが背後に輸送され、引き波時には前面領域に戻され、堤体が波運動の変化に及ぼす渦の影響が認められた。

以上のようにPTVシステムを用いて波動内の流速を測定し流速および渦度分布を検討したが、堤体によって碎波した場合には空気の巻き込みによる粒子トラッキング性能の低下のため流速の不確かさが生じたことから画像解析において粒子と気泡との有効な分離手法を確立し、より高精度の結果を得てゆきたい。

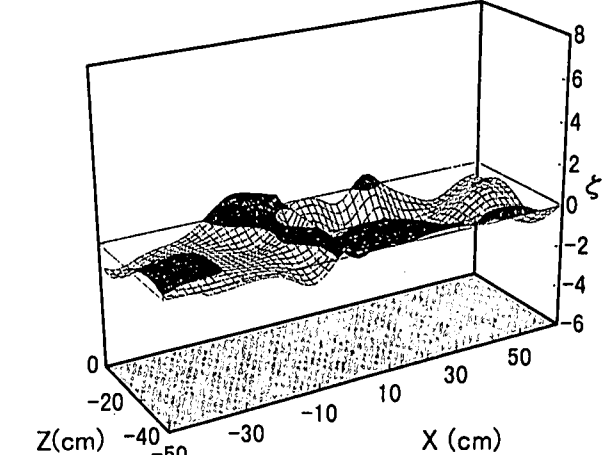
最後に本研究を行うにあたり水理実験などに協力していただいた日本大学大学院 飯田康弘君（現：大成建設㈱）と前田卓男君に謝意を表する。

参考文献

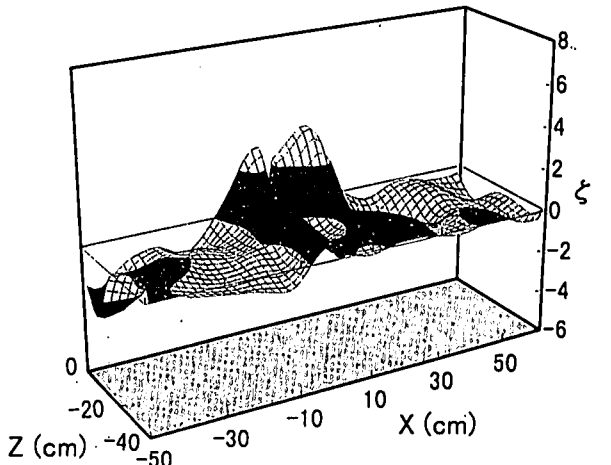
1) 例えば、宇多他；海講論文集，pp441～445，1987。荻原他；海講論文集，pp532～536，1988。小島他；海洋開発文



(a) 静水面から峰



(b) 静水面から谷



(c) 谷から静水面

図－9 渦度分布

($H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$, $H_c/H_i=-0.33$)

集，pp247～252，1993。辻他；年次講演概要Ⅱ部，pp854～855，1993など。2) 例えば，遠藤他；海洋開発論文集，pp19～24，1991。落合他；海洋開発論文集，pp165～170，1993など。3) 合田他；港湾技研資料，No248，pp3～24，1976。4) 例えば，木村他；計測自動制御学会論文集，pp101～107，1987。小林他；機械学会論文集（B編），pp107～115，1989-1。西野他；機械学会論文集（B編），pp405～411，1989-2。5) 西野他；流体計測シンポジウム講演予稿，1992