

薄鉛直堤近傍の波浪流特性に関する実験的研究

Experimental Study on Wave Induced Current around Wall-Type Vertical Breakwater

落合 実*・遠藤茂勝*

Minoru Ochiai and Shigekatsu Endo

Relations between water surface displacement and the breakwater heights were discussed in our previous study, and also breakwater height that exerts a remarkable influence to wave motion is clarified. In this paper, relation between these wave motion and characteristics of the wave current around wall-type vertical breakwater was investigated experimentally. In the experiments, the wave due to current around a vertical breakwater were measured by PTV. And the characteristics of inner flow mechanism, velocity vector and vorticity distribution near by breakwater were examined. Thereupon, the growth and dissipation processes of eddy motions which contribute to the dispersion of wave energy were elucidated and at same time, the relationship between vorticity and wave energy dissipation was clarified.

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

1. 序論

従来から波浪制御構造物の有効性は来襲波浪に対する透過波高や反射波高といった波高減衰能力が主な評価基準とされ、検討されてきた。しかし近年、これらの構造物周辺で生じる波浪流が周辺海域の水質改善や生態系保存への効果についての関心が高まっている。

このように構造物周辺で生じる波変形による流れの影響、すなわち波動流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あまり検討されていないのが現状である。

一方、著者らは構造物の天端高の変化に対する反射波、前面水位そして透過波などの水位変動の相関について実験的に検討してきた。それら水位変動は堤体天端高と密接な相関性があり、水位変動量が著しく変化する堤体天端高が存在することを既に示した^{1)~3)}。そして入射波に著しい影響を与える天端高が静水面より若干低い天端、いわゆる潜堤構造の場合であることから潜堤状態の堤体周辺の波動流れを検討することにより水位変動などの波浪制御機構を解明しようとするものである。

本研究は構造物による波浪変形と波浪エネルギーの散逸機構を水粒子の運動から解明し、より効果的な防波構造物の開発を目的としている。そこで本論ではその基本構造モデルとして単純な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、波浪エネルギーの減衰機構に関連する流れ特性について報告する。

2. 実験装置および方法

実験水槽は長さ27.6m、幅0.7m、高さ1.0mの両面ガラス張り2次元水槽であり、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28cm

～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、水位変動に影響の大きい堤体高:hs/h=0.9(Hc/h=-0.1)の2種類の結果を比較したものを示す。実験条件は水深:h=40cm、入射波波形勾配:Hi/L=0.016～0.057、比水深:h/L=0.067～0.167の規則波である。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。

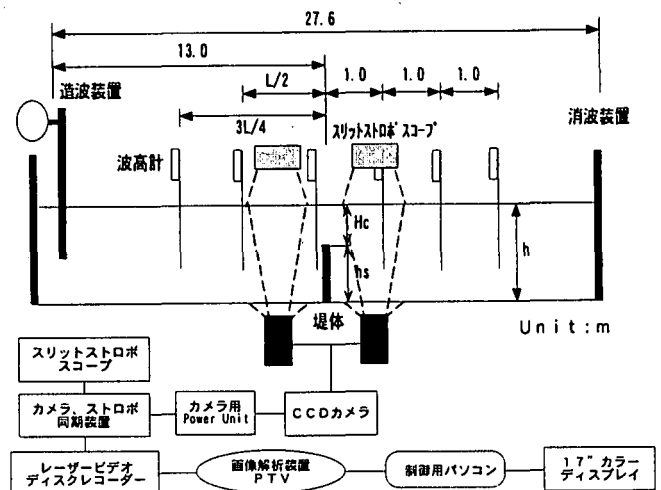


図-1 実験装置およびPTVシステム概略図

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⁹⁾を採用している。

P T V計測において高精度の流速値を得るためには画像中の粒子と雑音を判別する技術が必要である。特に比定常な波浪現象においては照射光のわずかな変動が粒子画像の良否に関係することから、本実験では予め最適な画像処理手法を確立した。それは画像処理で重要な2値化しきい値と認識粒子径そして最大移動範囲などの処理設定値を画質状況に対応した最適値に設定する方法であり、その最適値を用いた画像処理によって得られた粒子運動経路がL V D原画像の粒子運動を的確に表現されることを確認している。

3. 実験結果および考察

3. 1 流速ベクトル分布

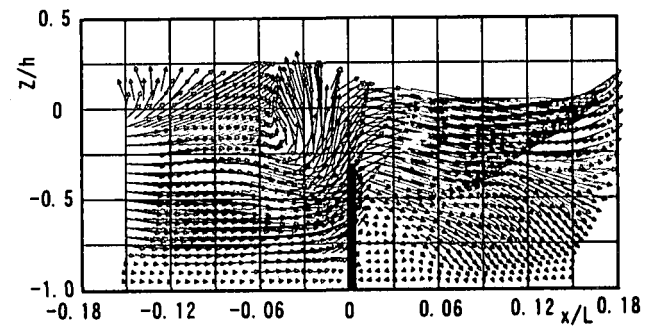
比較的天端が低く入射波に対する影響が少ない堤体近傍の流速分布を測定した結果を図-2に示す。図は $H_c/h=-0.3$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$ の結果であり、図-2(a), (b), (c)および(d)はそれぞれ構造物前面に波の峰、静水面から谷、波の谷および静水面から峰の状態に近づいた時刻の瞬間流速分布である。

これらの図より波浪が構造物を通過する時、構造物での水位と流れ特性の関係を考察する。(a)では岸向きの速い流れと構造物直前で上向きの流速が認められる。この鉛直上向きに流速と冲向きのベクトルは水位上昇と堤体からの反射を意味するものと考えられるが波の峰が通過するわずかな時間のみに生じることも確認された。また構造物背後では構造物を越流した大きな床面に向かう流れや構造物直後の深い水深で右回りの小さな循環流れが認められる。水位が降下した(b)では構造物の沖側 $x/L < -0.06$ で引き波による戻り流れが認められる。また構造物の背面領域では水面から床面を一循環する右回りの循環流れが生じている。これは波の峰時に生じた構造物天端での剥離流れが次の引き波に伴う戻り流れによって循環として形成されるものと考えられる。この循環流れは波の峰時に大きな越流が生じる時その卓越した質量輸送により循環の形態が崩される。図-3は $H_c/h=-0.1$ の堤体に図-2と同じ波浪が入射した場合の結果であるが各水位における瞬間ベクトルの傾向は図-2とほぼ同様であることが認められる。

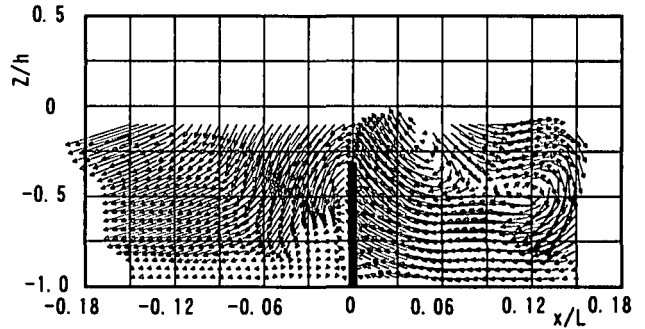
このようなことから構造物の前面領域の流れ形態は戻り流れと反射による水位変動、背面領域では構造物を越える流体の運動特性が主な要因と考えられる。

図-4は構造物を波が通過する時の1周期平均流速を示したものである。図-4(a)は図-2と同じ条件($H_c/h=-0.3$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$)の結果であり、図-4(b)はその波浪がより高い構造物($H_c/h=-0.1$)を通過する場合を示している。

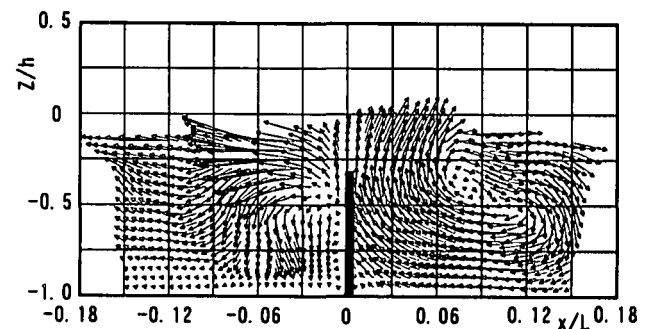
図-4(a)において、構造物前面領域では静水面付近で冲向きの流れがあり、それを補完するような低層岸向きの流れとなり、構造物のごく近傍を中心とする左回りの循環流れが認められる。また背後領域では $x/L \approx$



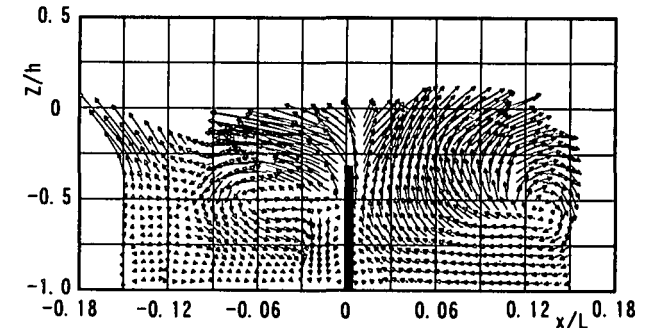
(a) 波の峰付近



(b) 静水面から谷



(c) 波の谷付近

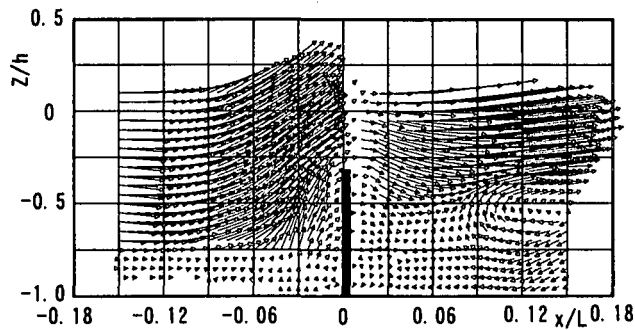


(d) 静水面から峰

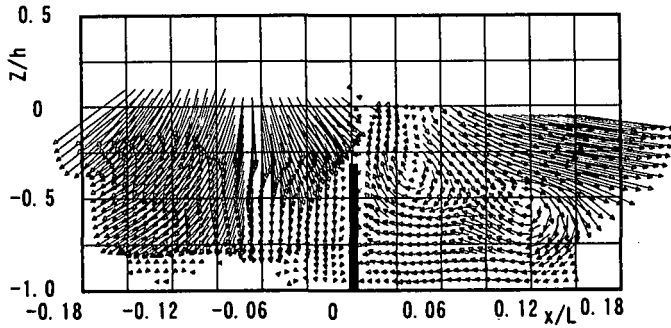
図-2 瞬間ベクトル

($H_c/h=-0.3$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$)

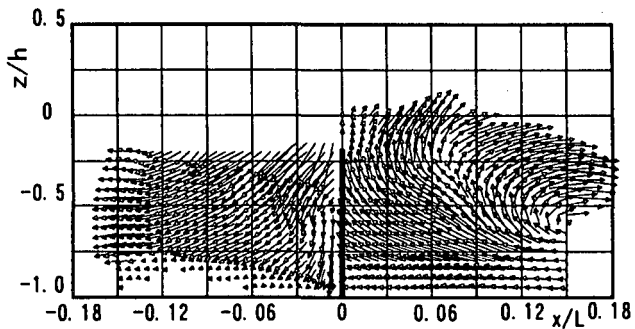
0.06, $z/h \approx -0.5$ を中心とした右回りの循環流れが認められる。図-4(b)の前面領域において、静水面付近で岸向き、構造物直前で鉛直下向きとなり、図-4(a)とは異なった流れ形態となっている。また背面領域では循環流れの中心位置が若干、岸側となっているが図-4(a)の流れ形態とほぼ同様である。これらの平均流速から前面領域に関して、波の反射が少ない $H_c/h=-0.3$ の場合は重複による水位変化が少なく、引き波時に静水面付近で戻り流れが大きくなり、右回りの循環流れとなる。そして反射が大きい場合には構造物直前で水位変化が



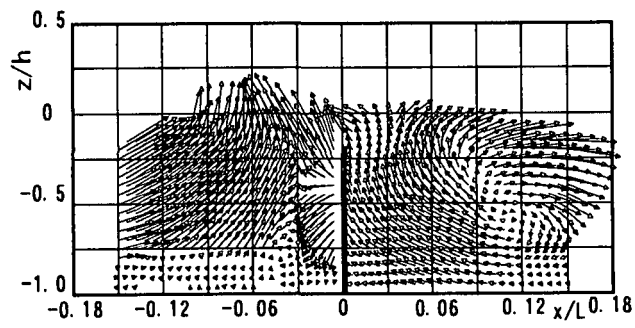
(a) 波の峰付近



(b) 静水面から谷



(c) 波の谷付近

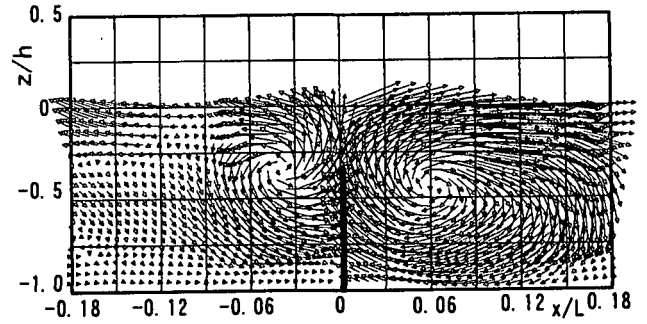


(d) 静水面から峰

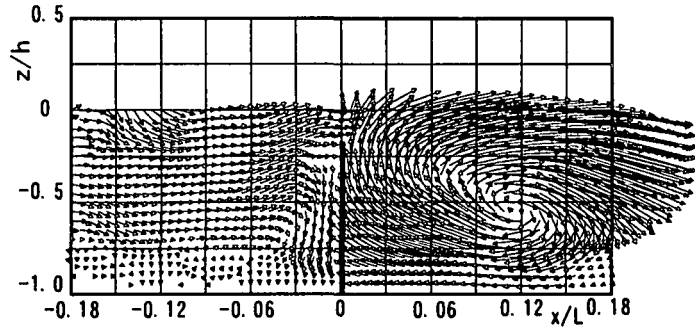
図-3 瞬間ベクトル

($H_c/h=-0.1$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$)

大きく、引き波時に構造物を越えた戻り流れが落下することにより鉛直下向き流れとなり、右回りの循環流れが形成されることが認められる。このように波の干渉による水位変動量とそれに伴う構造物を越える戻り流れの方向が前面領域の流況を支配し、その構造物近傍の流れが波エネルギーを散逸するものと考えられる。一方、背面では構造物を越波した流体の運動量によって循環流れが形成され、その運動量が大いほど中心位置が岸側に移り、広範な領域の循環流れとなることが認められる。



(a) $H_c/h=-0.3$



(b) $H_c/h=-0.1$

図-4 平均流速ベクトル

($H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$)

3. 2 流速時系列特性

図-5は測定された各点流速の時間波形を示している。図は $H_c/h=-0.3$, $H_i/L=0.026$, $h/L=0.122$ の結果であり、図-5(a), (b)および(c)はそれぞれ $z/h=-0.75$, -0.5 および -0.25 における代表点の流速を系列表示したものである。図-5(a)において、前面と背面領域の流速はほぼ正弦波形を呈し、その振幅は w より u の方が大きい。そしてそれらの振幅は構造物背後で若干小さくなり、岸沖方向で位相の変化が認められる。図-5(b)における u および w の空間波形の振幅は(a)で認められた振幅より、それぞれ平均的に大きくなり、また $x/L=-0.03$ の地点で w の空間波形に変動が認められる。この変動は構造物前面における戻り流れと入射波との干渉によるものと考えられる。また背後領域では空間波形に若干の変動が認められる。そして図-5(c)では前面および背面領域で空間波形に大きな変動が生じ、特に構造物近傍の $-0.06 < x/L < 0.06$ で u および w ともかなり大きな変動が認められる。これらの変動は構造物を越波した流れが背後で戻り流れと干渉したり、あるいは前面領域では戻り流れが入射波と干渉することによって生じるものであり、静水面付近で複雑な流れ構造となっていることが示唆される。これらの傾向は図-6に示した比較的堤体高が高い $H_c/h=-0.1$ においても認められる。

このように波が構造物に衝突する時の越波そして戻り流れ、その後、次の入射波との干渉といった一連の現象においては、本実験条件の場合、静水面付近の上層($z/h > -0.25$)および構造物近傍($-0.06 < x/L < 0.06$)の領域で特徴的な流れ特性を呈することが認められる。このことから、ある構造物の形状と波浪条件に対応した支配領域、すなわち特徴的な流れ特性を呈する領域を

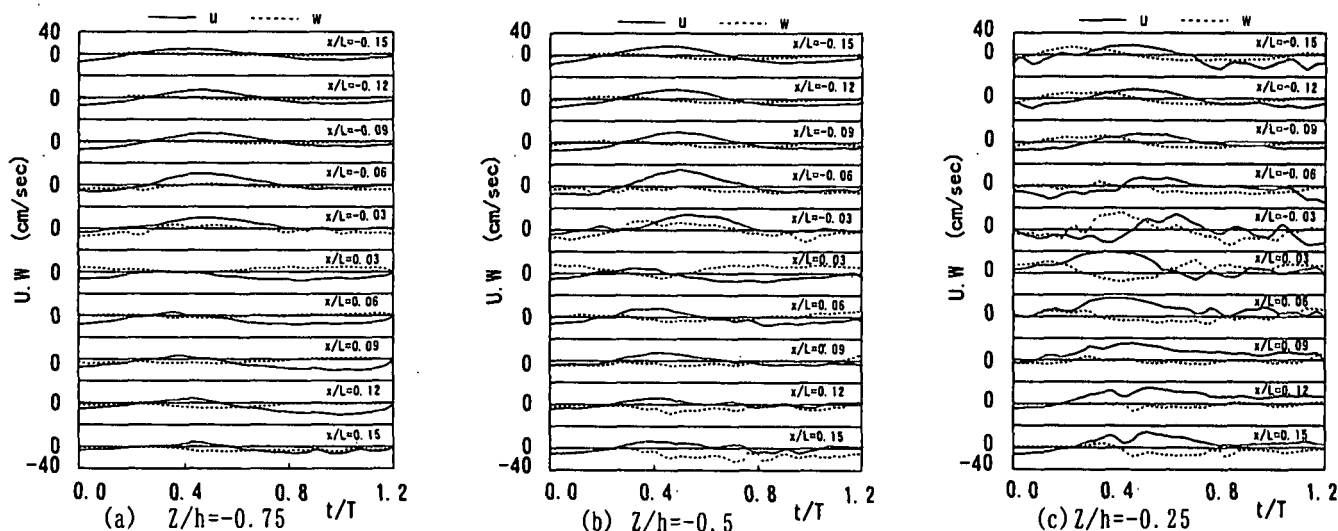


図-5 流速時間波形 ($H_c/h=-0.3, H_i/L=0.026, h/L=0.122$)

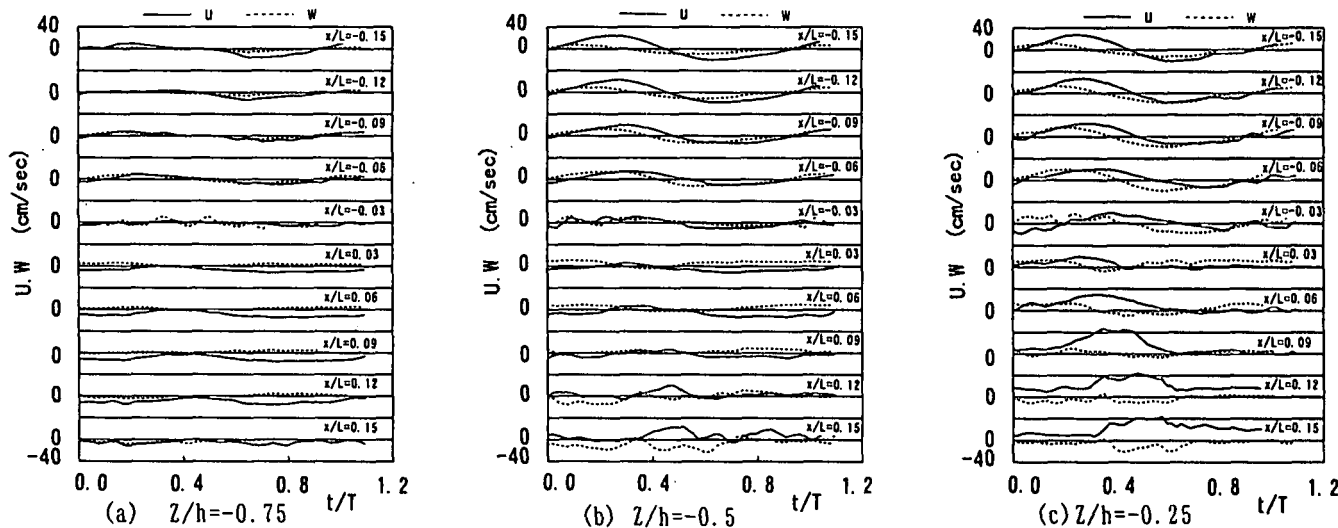


図-6 流速時間波形 ($H_c/h=-0.1, H_i/L=0.026, h/L=0.122$)

見出し、その特性を把握することによって波が構造物を越波する場合のエネルギー収支が明らかになるものと考えられる。

3. 3 鉛直断面流速特性

図-7は瞬間流速分布から岸沖方向の各地点における鉛直断面の平均流速を算定した結果を示す。図は各岸沖位置の鉛直断面における瞬間的な断面平均移動質量を意味しており、構造物位置における入射波の水位をパラメータとして示している。図-7(a)および(b)は $H_i/L=0.026, h/L=0.122$ の波がそれぞれ $H_c/h=-0.3$ および $H_c/h=-0.1$ の構造物を越波する場合の結果である。

構造物の天端上水深が比較的大きい($H_c/h=-0.3$)場合について述べる。構造物に波の峰付近が到達する時、構造物前面で大きな鉛直上向きの流れと越波後の若干床向きの強い岸向き流れが認められ、全測定範囲($-0.15 < x/L < 0.15$)において流体質量が岸向きとなることを示している。その後、前面の水位が降下すると、鉛直および岸向き流れが小さくなり、特に鉛直方向流れでは前面と背後域で大きな負の値となっている。また構造物直後では鉛直上向き沖向きの戻り流れも確認される。この戻り流れは前面水位が波の谷に到達するまで続き、再び水位が上昇してきたときには岸沖方向の流れは無くなり、鉛直上向きのみとなる。すなわち背面

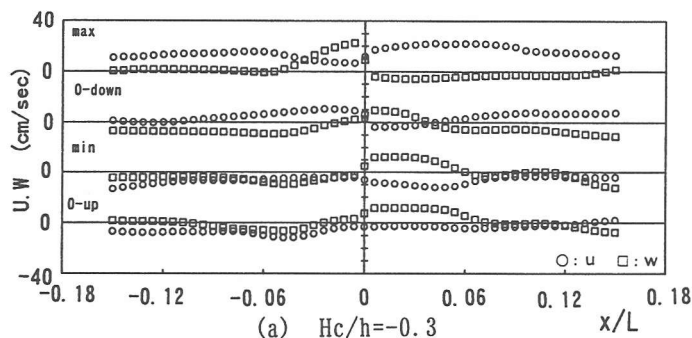
では越波によって供給された流体塊は前面水位が降下することにより床面から構造物背面に向かい、背面に沿う鉛直上向きの流れが卓越する。この卓越した流れによって背後で極端な水位低下が生じていない。

天端上水深が比較的小さい($H_c/h=-0.1$)場合は $H_c/h=-0.3$ の場合とほぼ同様の傾向を示しているが、波の谷と静水面から峰時において、約 $z/L > 0.1$ で大きな岸向きの流れを示し、また静水面から峰時の前面では岸向きの流れが認められる。これら若干の違いは天端上水深が小さいことによる越波量や反射波そして戻り流れによる影響と考えられる。

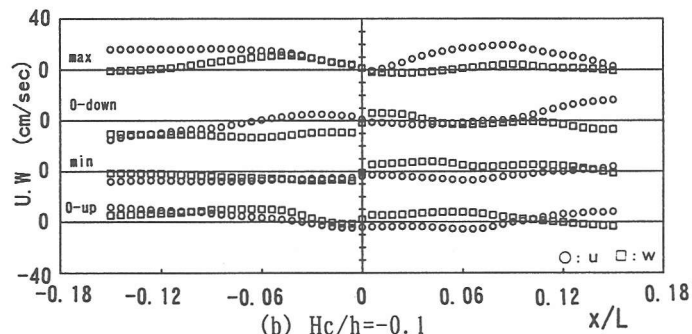
図-8は一波当たりの断面平均移動質量を示したものである。比較的天端上水深が大きい $H_c/h=-0.3$ の構造物背面において鉛直流速および岸向き流速が認められるがこれらの値は小さい。そして天端上水深が低い $H_c/h=-0.1$ では $H_c/h=-0.3$ の場合より、断面平均流速の変動が若干小さく、越波流量が背後の流れ特性に直接影響することを示唆している。

3. 4 渦度分布特性

図-9は測定された流速から渦度を算定した結果である。図は $H_c/h=-0.3, H_i/L=0.026, h/L=0.122$ の条件における結果であり、図-9(a), (b), (c)および(d)はそれぞれ構造物前面において波の峰、静水面から谷、



(a) $H_c/h = -0.3$



(b) $H_c/h = -0.1$

図-7 鉛直断面平均流速
(瞬間流速 ; $H_i/L = 0.026$, $h/L = 0.122$)

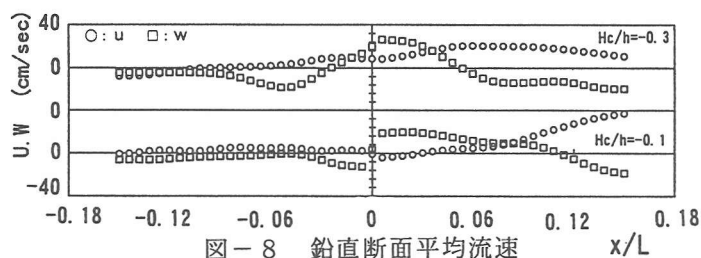
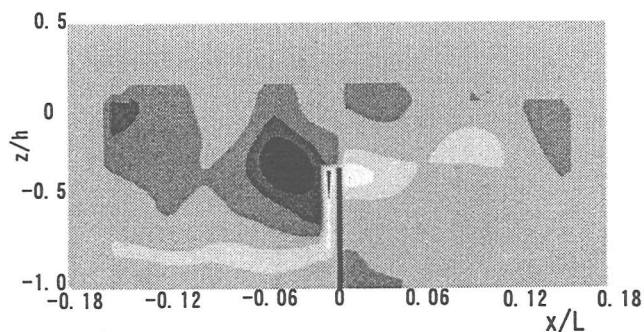


図-8 鉛直断面平均流速

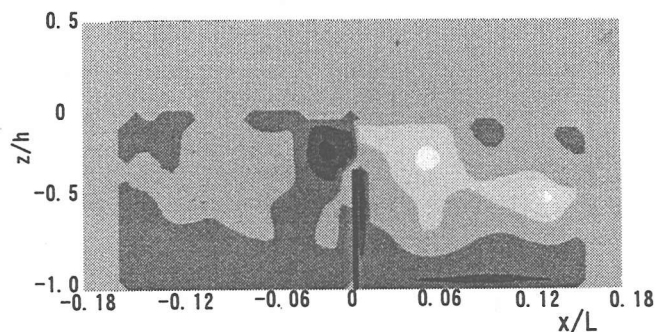
(一周周期平均流速 ; $H_i/L = 0.026$, $h/L = 0.122$)

波の谷および静水面から峰の水位に近づいた時刻の瞬間渦度分布である。渦度は $\zeta = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x$ で定義する。これらの図から構造物前面の水位に対応した渦度分布を明らかにし、波エネルギーの散逸について検討する。構造物に波の峰付近が到達すると構造物直前の天端上付近で負の大きな渦度が確認される。この負の渦度領域は前面水位の降下に伴って沖方向と床面に拡大し、再び水位が上昇すると構造物の天端近くに移動し、最大水位の状態に帰する。一方、背後領域では峰の時に正の大きな渦度が生じ、その渦領域は水位降下に伴って岸方向に拡大しながら移動する。前面水位が最低になると構造物背後には1つの正の広い渦度領域が生じ、水位が再び上昇するとその領域が分裂する。また床面と構造物前面にごく近い領域では固定境界面の影響と思われる渦度も認められる。ここで天端高が比較的高い $H_c/h = -0.1$ 場合の渦度分布を図-10に示し比較する。構造物での水位が下降し再び上昇する過程の分布特性は $H_c/h = -0.3$ の場合とほぼ同様であるが波の峰が近づいたときの分布は $H_c/h = -0.3$ で認められた構造物前面での大きな正の渦度が認められない。

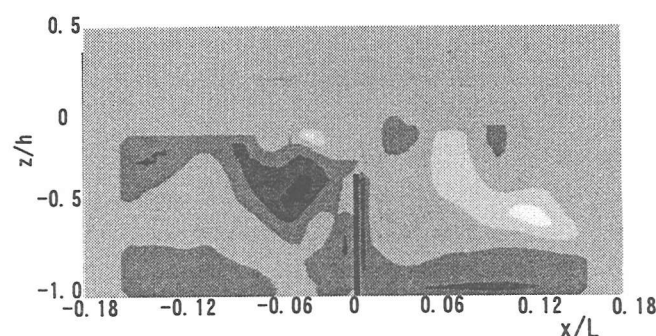
このような構造物天端付近に認められた渦は越流および戻り流れにおける剥離によるもので天端高が低い程広範で大きく、また天端が高くなると小さい領域となる。そして前面では左回り、背後ではその渦が右回



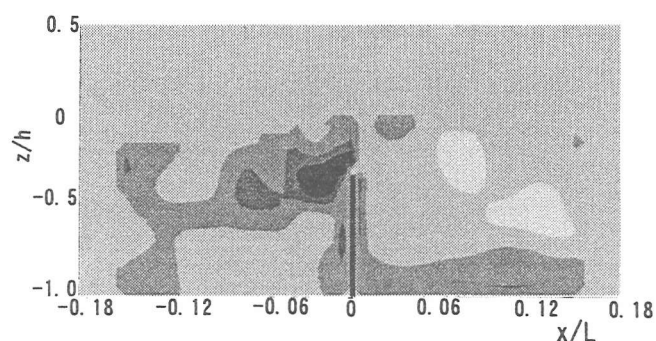
(a) 波の峰付近



(b) 静水面から谷



(c) 波の谷付近



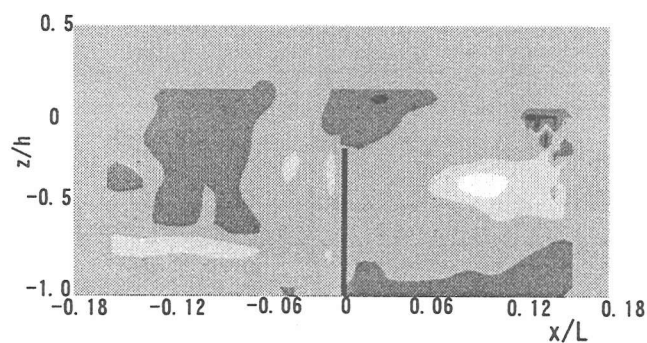
(d) 静水面から峰

図-9 渦度分布
($H_c/h = -0.3$, $H_i/L = 0.026$, $h/L = 0.122$)

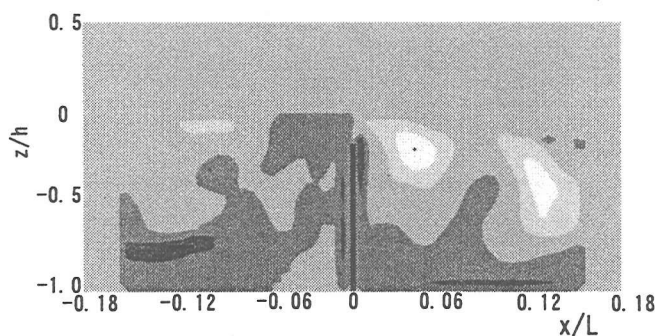
りの広い範囲に成長し、分裂と合体を繰り返す現象がエネルギー散逸に寄与するものと考えられる。

これらのことから構造物近傍での波浪流は構造物の天端に近い位置に生じた渦領域の規模と位置の変化が波のエネルギー減殺に寄与するものと推測される。

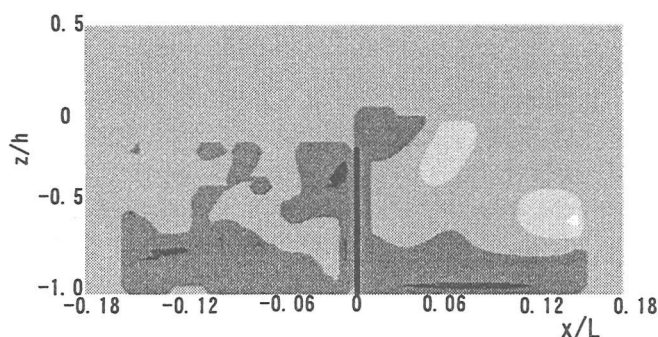
また前面水位が静水面から谷と静水面から峰の場合における渦度が波の峰や谷が前面に到達した時よりも平均的に大きいことから、波浪流の散逸には構造物の天端近くで生じた渦が静水面から谷および静水面から峰時に加速されることも重要な現象と考えられる。



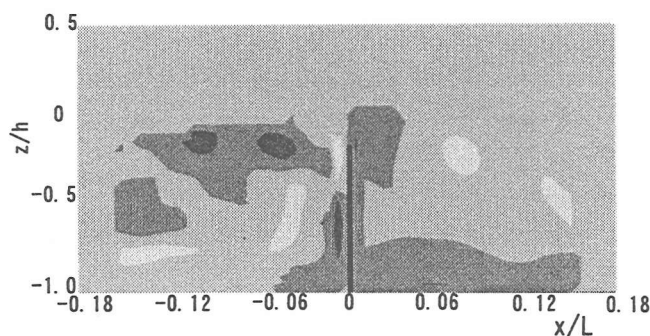
(a) 波の峰付近



(b) 静水面から谷



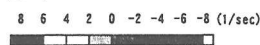
(c) 波の谷付近



(d) 静水面から峰

図-10 渦度分布

($H_c/h = -0.1$, $H_i/L = 0.026$, $h/L = 0.122$)



4. 結論

以上のように波動中に置かれた薄板鉛直型潜堤を対象にその近傍流速を計測し、得られた結果から堤体前面水位、反射波および透過波などの波高に影響が小さい堤体を基本ケースとして著しい影響が生じる堤体との特性を検討したが次のようにまとめられる。

1) 潜堤を波が通過する時の堤体近傍の瞬間ベクトル分布が得られ、波の衝突、反射波、越波、引き波となる時の現象から波が構造物と干渉して形成される流れ形

態を明らかにした。前面領域では引き波時の戻り流れが構造物と衝突して複雑な流れとなり、戻り流量が大きい場合に循環流れが形成される。そして背面では越波した流れが次の水位下降や引き波によって戻り流れとなり、循環が生じ、再び水位上昇して波の峰近くになると卓越した越波流れによって循環流れが消滅する。この循環流れの中心は越波流速が大きいほど岸側に移り、広範な循環流れとなることを明らかにした。

2) 堤体近くの流速時系列から堤体の影響が顕れる領域、すなわち特徴的な流速変動を呈する領域を明確にした。その領域の流動特性がエネルギー収支に関連することを明らかにした。

3) 岸沖方向の各点における鉛直断面の平均流速分布から波浪による移動質量の関係を示し、越波流量や戻り流れそして反射波などの時空間的な相関関係を明らかにした。

4) 堤体近傍の瞬間的な渦度分布から渦の発生位置と大きさ、消滅の過程を把握し、渦度特性を明らかにした。水位が静水面から谷および静水面から峰時に近づく時に越波や戻り流れによって構造物の天端近くで生じた渦が加速される現象が認められ、この現象が波エネルギー散逸の大きな要因であることを示した。

5) 非定常な波浪が構造物を通過する時に巻き込まれる気泡とトレーサ粒子の判別あるいは流れ場の非定常性による画質変動がP T V計測の課題であるが画像処理手法を確立し、精度良い流速計測が可能となった。

以上のように限られた天端高の堤体について述べたが今後、種々の天端高および波浪条件に関する結果を系統的に検討し、効果的な波エネルギーの減殺に関して堤体天端高と流速変化との相関などを把握して行きたい。なお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理量はその基本特性として位置付けられる。

最後に本研究を行うにあたり水理実験などに協力いただいた大学院前田卓男君と鈴木 功君に謝意を表す。また本研究設備は本学研究所大型機器予算によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) 遠藤茂勝・落合実(1991): 鉛直壁を持つ海域制御構造物の壁面での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. 7, pp. 19~24
- 2) 落合実・遠藤茂勝(1993): 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
- 3) 落合実・遠藤茂勝(1996): 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, pp. 73~78
- 4) 西野耕一・笠木信英・平田賢・左田豊(1989): 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, pp. 405~411