

潜堤上戻り流れによる砕波の流速場の時間変化

Time-Varying Velocity Field of Breaking Wave on Submerged Breakwater due to Undertow

南 将人*

Masato MINAMI

In spite of occur usually wave breaking, it is defficulte to make clear its a phenomenon. Especially, breaker on the Submerged Breakwater is complicates by existence return current. This research is attempted to measuereed velocity field using PTV (Particle Tracking Velcimity) and carried out to elucidate its time-varied magunitude and direction. Moreover, we measured surface elevation around the circumference submerged breakwater at the same time and calculated the mean sea level.

Keywords: submerged breakwater, return flow, particle tracking velocimetry

1. はじめに

静水面下にある潜堤は、景観性を重要視することにより多用されている。潜堤は、法面が急勾配の人工構造物であり、そこでの水深急変部によって急激な水位の上昇に伴う強制砕波や、潜堤と汀線間の水位上昇に伴う戻り流れによる砕波現象、さらに潜堤背後の洗掘現象等、特異な現象が生じている。

本研究は、潜堤上で生じている砕波現象を中立粒子を用いて可視化し、画像処理法によってその粒子を追跡して流速場の時間変化を求め、戻り流れが存在する場合の砕波に至る過程について検討したものである。また、平均水位上昇量と、潜堤法先部と天端上での水面振幅比を算出して潜堤上の砕波時の水理特性を求めた。

2. 実験方法

2.1 実験水路と潜堤形状

本実験で用いたプランジャー型規則波造波装置付き開水路を図-1に示す。造波方法は、モータの回転駆動を減速装置を用いて回転数を下げ造波板を上下の往復運動に変換するタイプであり、造波周期は0~4.0秒範囲である。開水路部の諸元は、長さ9.3m、幅0.8m、最大水深0.55mである。

本研究で対象とした潜堤の形状は、「海岸波動」¹⁾に習って設定したもので、現地量相当で天端幅30m、潜堤高さ7m、法面勾配1:2、潜堤底部幅58mである。実験では表面を塗料で被覆した木製の不透過とした。潜堤模型の設置位置は、図-1に示すように、造波機から6m離れた位置とし、潜堤背後0.25m位置には消波ブロックを1:2の斜面に積んだ。潜堤と岸側の距離は0.25m（現地量10m）であり、周期によって流速の大きさが異なるが戻り流れが存在している。

実験縮尺は、開水路の大きさと精度を考慮して $\lambda = 1/40$ とし、相似則にフルード則を用いた。

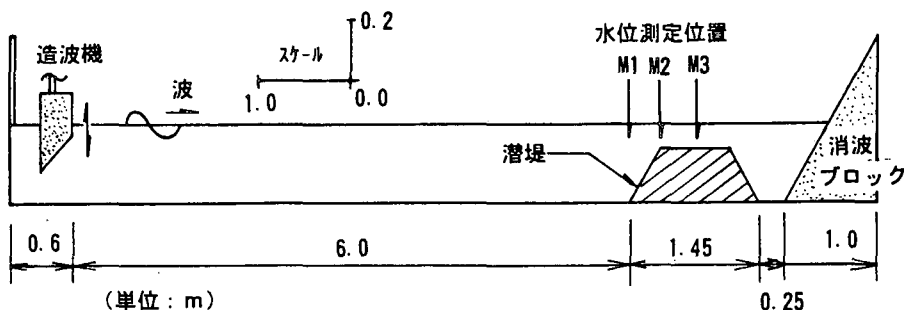
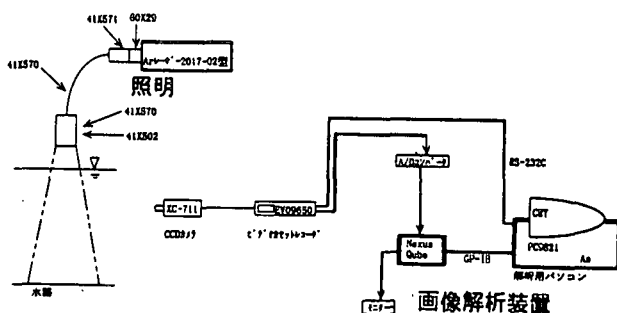


図-1 実験装置

2.2 可視化と流速算定法

流速算定は、中立粒子を用いたビデオ撮影と、その粒子を追跡する画像処理の2つより構成される。撮影に使用した中立粒子は、比重が1になるように発泡させて比重調整をしたスチロール球²⁾に界面活性剤を加え、静水中でできるだけ一様に分散させるようにした。

撮影の照明は、波進行方向に細長く、幅4mmのレーザライトシート（アルゴンレーザー：最大出力10W、DANTEC製）を用いた。粒子の撮影には水路側面からCCDビデオカメラを用い、トレーサの分布、水面の形状を記録した。



図一 2 撮影実験システム図

画像処理による流速算定は、撮影した画像を1/30秒毎に全6画像(全0.2s間)をパソコンに取り込み、反射光の強さから2値化し、ある塊をひとつと見なしてその重心位置を数値化した(ラベリング操作)。そして、相関法と多時刻追跡法を組み合わせ、輝度のオーバーラッピング面積より粒子を追跡する「3時刻パターンマッチング法」⁸⁾によって、1/30秒毎(現地相当0.21秒)の流速ベクトルを算出した(以下、PTVと記述)。以上の撮影・解析システム図を図-2に示す。なお、流速ベクトルを算出する際、潜堤の肩部で生じる碎波現象では、空気を取り込んで粒子と区別できないため、流速ベクトルの算出は碎波直前までとした。

2.3 水位测定

水位変化を測定するために、サーボ式水位計を潜堤沖側法先と沖側肩部および潜堤上の中央の3ヶ所に設置した。図-1の記号M1、M2、M3がそれぞれの測定位置を示している。測定は、造波開始から終了まで、約15秒間を50 HzでA/D変換しながら、全750個のデータを計測と同時にF Dに記録した。

2.4 实验条件

作用させた波浪諸元は、既往の研究例¹⁾に習い、周期 $T=6, 9, 12$ 秒の3種類とした。また、実験水位は、天端水深が $R=3.0, R=4.5$ mの2種類を設定した。波高は周期9秒で波高が1mとなるように設定したが、他の実験条件では通過波高を0.8m~2.3mまで適宜変えた。

いずれの場合も規則波を用い、トレーサの移動が見られない静止状態から20波程度を作用させた。

3. 實驗結果

3.1 水位の測定結果

図-3に、周期9秒、水深10m、通過波高1mの水位の測定結果を示す。図中の実線は潜堤肩部(図-1中の記号M2)を、破線は潜堤上(記号M3)での測定結果を示す。図には造波開始から6波分を示しているが、2波目までは振幅1m程度であるが、3波目以降は約3m程度と3倍の振幅となっている。また、目視より3波目以降は戻り流れが強く、水位の上昇が急激に起こっており十分に戻り流れが確認された。また、図-3中の破線で、第3波目以降の水位が下降となる領域に見られる懸掛け状の水位変化は、水位計が追従していないためであり、実際

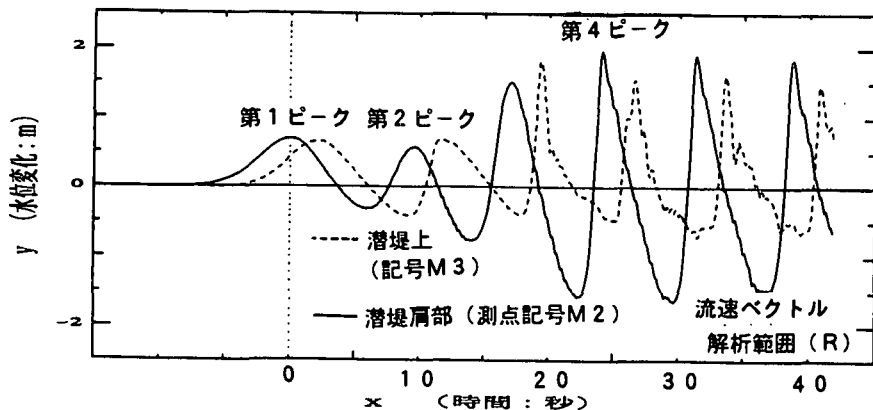


図-3 水位の測定結果 ($T=9s$, $h=1.0m$, $H=1m$)

の水位変化はやや緩やかとなっている。

周期 $T=6$ 秒の場合でも水位は同様の变化をしており、数波後から水位上昇が大きくなり上昇時には急激となるが、周期 $T=12$ 秒の場合にはこのような変化は見られない。

周期 $T=9$ s、水深 $h=10$ m、波高 $H=1$ mの場合の碎波時の水面形状のスケッチを図-4に示す。この波形は、図-3の第4波目のピーク時を中心に画いたもので、実線と点線間の時間間隔は、現地相当0.42秒である。スケッチ図に示すように、潜堤肩部で空気を巻き込み始め、波の先端から徐々に空気を巻き込む崩れ型碎波の開始点となっている。その後、空気の混入領域は波頂部にまで広がりついには段波状となって、波高を減衰して潜堤上を進行している。

周期が12秒と長い場合には通過波高が3m以上で碎波していたが、その位置は斜面の途中（図中A）で生じていた。また、周期が6秒と短い場合には潜堤上（記号B）で碎波しており、巻き波型碎波となっている。

3.2 流速ベクトルの経時変化

3.1に示したように、例えば潜堤肩部（M2）では水位変化の振幅が第1～2ピークとそれ以降とは異なっている。前者についてはまだ反射による戻り流れが発生していない状態であり、後者は強い戻り流れが生じており進行波の先端が沖側に引きずり込まれるような現象が目視によって確認された。

この水位変化より、戻り流れが存在し、水位の上昇変化が急激である第5ピーク時の碎波直前まで（図-3参照：記号R）の流速ベクトルをPTVによって算出した。

まず、流速算定手順を以下に概説する。図-5に、周期9秒のトレーサ画像をパソコンに取り込んだ例を示す。この図は碎波後のトレーサ分布であるので波先端で空気を巻き込んでいる。図中の白く分布しているのが発泡スチロール球の反射光であり、流速の算定はこのような波先端で空気を巻き込む直前までとした。

この画像から輝度（数値化：0～256範囲）によって2値化し、領域5mm範囲をひとつの領域と見なして、それぞれの重心位置を抜き出した（ラベリング操作）。領域を設定したのは、トレーサ粒径が小さいため反射光が弱くある程度の大きさが必要であるが、波進行中に变形してしまうためである。次に、相関法を多時刻で行い各位相毎に流速ベクトルを算定した（トラッキング操作）。

以上の操作によって得られた流速ベクトル図の一例を図-6に示す。この図は、第5波目の碎波直前を対象に全2.1秒間を、時間間隔0.42秒おきに示したものであり、全6画像の連続取り込みを2回繰り返すことによって得たものである。

図（a）は肩部（記号M2）で水位が下降し始め、戻り流れの開始時点である。潜堤上の領域Aはトレーサ密度が濃いため变形してしまい流速方向に特性が見られないが、目視の結果、黒矢印に示すように滑り落ちるように粒子が移動している。潜堤沖側の領域Bは沖側に粒子が移動しており、肩部付近で約2.5m/s、法先付近で約2m/s程度の斜面にほぼ平行に粒子が移動している。なお、ベクトルが無いのは、変形が大きすぎる等の原因で算定できなかったことを示す。また、水面付近では水面からの反射光が強すぎたり、トレーサが少ないために追跡出来なかったものであり、今後、いかに均等に粒子を分散させるかが課題である。

図（b）は0.42秒後の流速分布を示しているが、潜堤沖側法先付近の水粒子のベクトルの向きが、波の進行に伴ってやや鉛直上向きと変化している。流速の大きさも約1.5m/sとなっている。

図（c）（d）と時間が経過するに従ってベクトルの向きは岸向きへと方向を変化させ、図（f）の空気を取り込んで碎波する直前では、潜堤肩部を除きベクトルの向きはほぼ岸向きとなっている。

潜堤上の碎波の流速分布を実験的に求めた例として、Quinn, P. A. ら⁴⁾の研究がある。法面勾配1：3に周期2秒の波を入射させた場合の流速分布をPIVを用いて計測した。流速方向はほぼ法面に平行になり、潜堤肩部で戻り流れが波の進行方向に一致するように反転されている。本実験結果では図（e）の肩部（記号C）で見られるように急激な方向転換が生じて上向きとなっており、Quinnらの結果とほぼ同様な分布が得られた。また、粒子

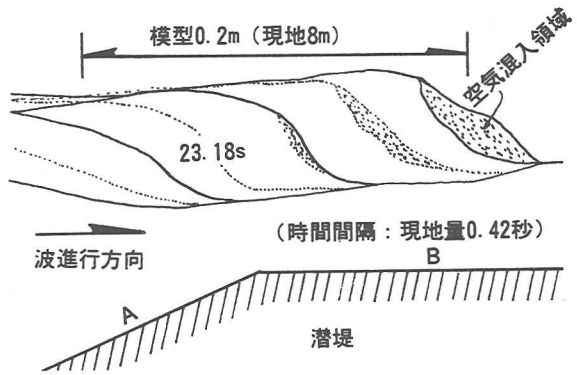


図-4 碎波時の水面形状変化のスケッチ図



図-5 トレーサの分布 ($T=9$ s, $h=10$ m, $H_0=1$ m)

の目視観測と合わせると、戻り流れが入射波によって岸側に押し戻されることによって生じている。

以上、戻り流れがある場合の流速分布の大きさや方向の変化についてPTVを用いて測定した。その結果、水深10m、周期9秒、通過波高1mの入射波条件に対しては、2.0m/s程度の戻り流れが有り、それに伴って流速が反転する様子を時系列的に求めることができた。

本手法はトレーサを追跡するために、その大きさや一様に分布させる等の技術的な課題があり、現在のところ、目視観測と合わせて利用せざるを得ないのが現状である。

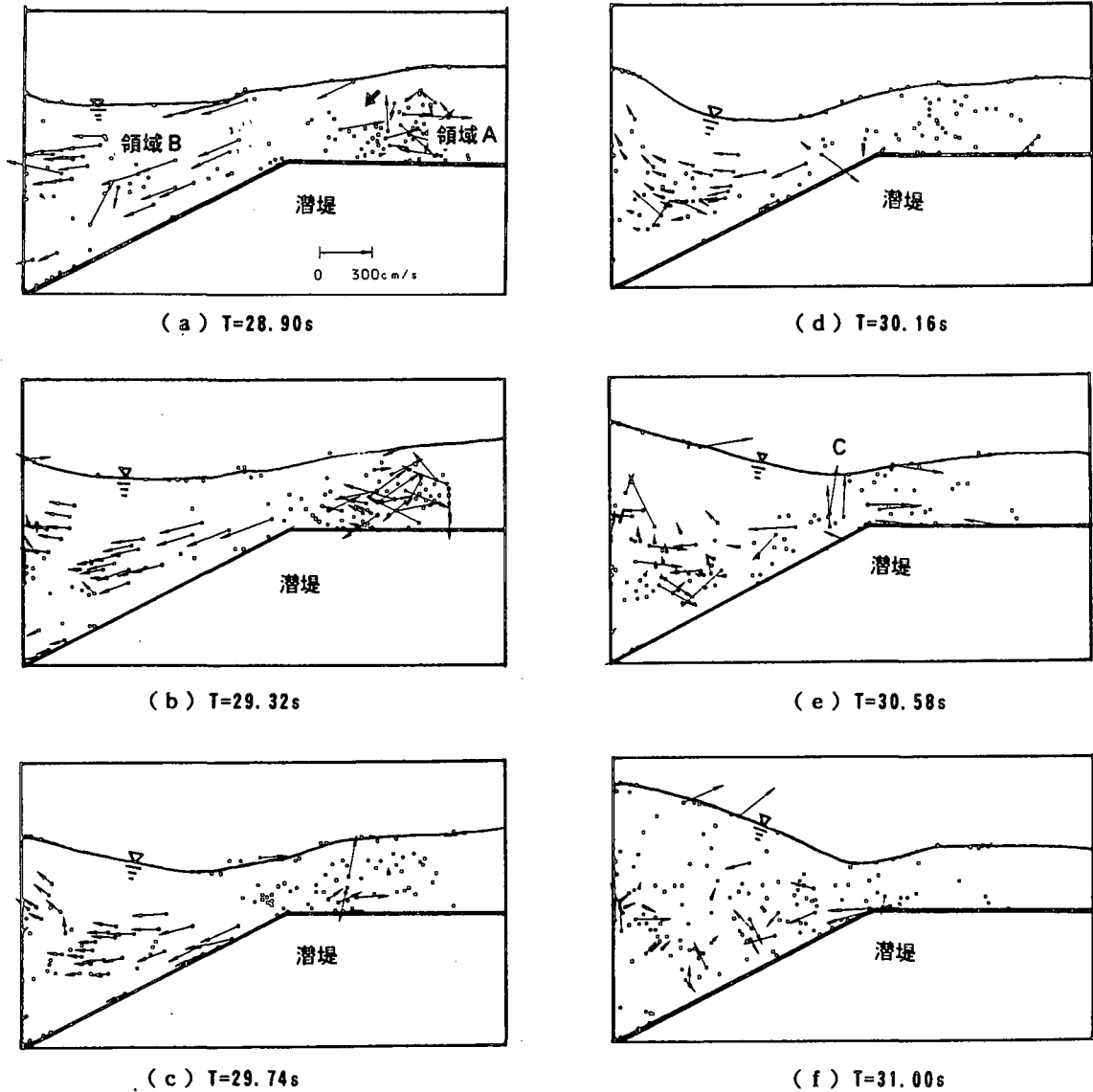


図-6 流速ベクトルの測定結果

3.3 平均水位と振幅比

水位測定結果を用いて、平均水位上昇量と振幅比をもとめ、戻り流れがある場合の水利特性を求めた。

平均水位上昇量は、零アップクロス法を用い、図-7に示すように、プラス側（点々）とマイナス側（斜線）との面積差を求めた。また、振幅比は、プラス側とマイナス側それぞれのピーク値を、潜堤法先位置(M1)でのそれとの比を求め、5～6波の平均を算定した。

図-8に平均水位上昇量 η を通過波高 H_0 で無次元した結果を示す。その結果、岸側に近づくに従って平均水位上昇量が大きくなっているが、その上昇量は周期によって大きく異なっている。周期が短い程上昇量が大きくなり

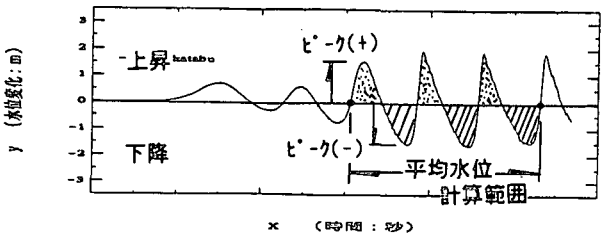


図-7 平均水位算定範囲

最大で通過波高の20%となっている。これに対し、周期が長くなると上昇量は小さくなり、周期12秒では水位上昇量は通過波高の数%と、ほとんど見られない。周期が長い分、潜堤背後への質量輸送量が少なくなっているものと考えられる。

次に潜堤上での最大および最小水位を整理した。まず、潜堤肩部および潜堤上の各ピークを対応する入射波のそれで無次元化し、平均を算定して潜堤法前後での水位増幅率を求めた。その結果を図-9に示す。同図より周期が長い場合には潜堤肩部と潜堤上では差が無いが、周期が短い場合にはピークの変化が急激に起こっており、周期が短い場合には戻り流れの影響が大きいものと考えられる。

また、水位変化の経時変化に見られるように、造波開始後の2波目を境に大きさが大きく異なっており、3波目以降は戻り流れによるものと考えられるため、最初の2波とそれ以降の鉛直上向きと下向きに分けて、それぞれのピーク量を求め平均した値を通過波高で割って無次元化した。水深10m、周期9秒、通過波高1mの場合、潜堤肩部においてプラス側に約2.1倍、マイナス側に2.9倍となっている。周期9秒の場合、水深が11.5mの場合には3倍近くなる場合があり、戻り流れによって水位変動の振幅が2～3倍となっている。

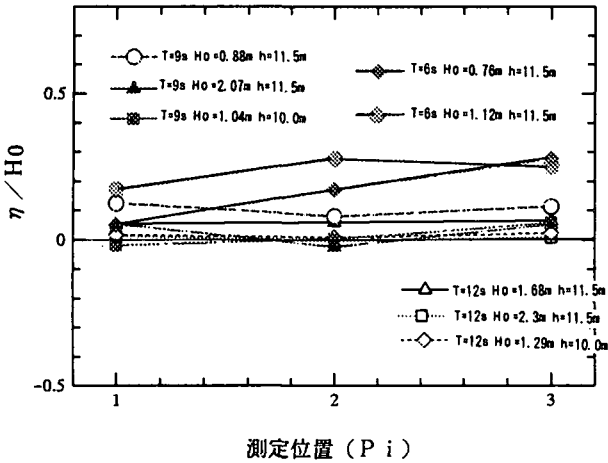


図-8 無次元平均水位上昇量

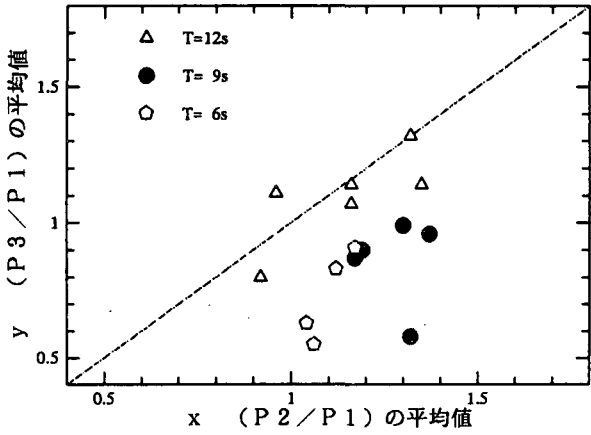


図-9 水位変化増幅量

4. まとめ

潜堤上に戻り流れがある場合をポリスチレン球を用いて可視化し、流速場の時間変化をPTVによって算出した。その結果を以下に記述する。

- (1) 潜堤肩部での戻り流れによる砕波位置は、波周期によって異なり、周期が長い程その位置は沖側にずれ、周期12秒の場合では潜堤斜面の途中となり、周期が短い場合には岸側で砕波し、巻き波型砕波となる。
- (2) 潜堤上での砕波は、戻り流れによって波先端が岸側へと引きずり込まれることによって急激に前面が切り立ち、ついには戻り流れが岸側に押し戻されることによって砕波に至る。
- (3) 潜堤上の平均水位の上昇量は、周期によって異なり、周期が短い場合に上昇量が大きく通過波高の約20%となる。これに対し、周期が長い場合には数%であり、ほとんど平均水位の上昇量は見られない。

今後は、より水面に近い領域での流速場を測定できるようし、数値計算を用いてモデルの構築を目指したい。最後に、本研究を実施するにあたり貴重な助言および指導を頂いた東海大学田中助教授、ならびに実験に協力して頂いた阿部仁、工藤司、高田淳一、立石香織の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

1) 海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】、p. 146-148, 土木学会海岸工学委員会、1994. 7.
2) 鳥羽良昭：風波の流れの可視化、可視化情報、Vol. 14, No. 2, p. 3-8, 1994. 10.
3) 西野耗一、鳥居薫：2次元PTVにおける粒子追跡方法-3時刻パターンマッチング法、第10回流体計測シンポジウム講演会、1992.
4) Quinn, P. A., Greated, C. A. and Easson, W. J.: Wave Velocity-Field Measurements, COASTAL MORPHODYNAMICS, MAST G8-M FINAL OVERALL MEETING, SEPTEMBER 1995.