

潜堤上で戻り流れが存在する碎波時の流速分布

南 将 人*・田 中 博 通**

1. はじめに

優れた景観性や水質浄化、そして海岸保全を目的として潜堤は、離岸堤や突堤に代わって多用されるようになってきている。潜堤は、法面が急勾配の構造物であり、急激な水深変化による強制碎波や潜堤上の戻り流れ等によって、潜堤背後が洗掘される等の特異な現象が生じている。

潜堤と汀線間の水位の上昇によって発生した沿岸流は潜堤の両端を通して沖側に流れるが、潜堤長さが長い場合には潜堤上を戻り流れが通過して入射波とぶつかり、強制碎波の原因になるものと考えられる。最近では信岡ら（1993）が連立壁潜堤を用い、潜堤上で岸側への流れを起こして海岸を保全する試みがなされている等、潜堤上で岸向きの流れを考慮した実験、数値計算が多く実施されている。

一方、碎波は、日常的に生じる複雑な現象であり、海浜変形や構造物に作用する波力等に大きく影響する要因であり、その碎波形式には一様勾配斜面において入射波高と斜面勾配との関係によって分類（Galvin, 1968）されている。

最近、安田ら（1995）によってリーフ上で複合型碎波現象が確認されたり、片野ら（1992）の跳車型や2段型碎波等の知見が得られており、さらに滝川ら（1995）によって矩形潜堤上の戻り流れを考慮した碎波変形の内部特性が実験的に得られている。このように潜堤上で発生する碎波現象は新たな現象として、実験および計算が実施されている。しかし、碎波時に空気を巻き込み、激しい渦の発生に伴う高周波成分が発生し、計測および数値解析も非常に困難となっている。

潜堤上での流速分布を実験的に知る努力が様々な実施され、モデル化されてきていることは重要であり、その平面的および時間的な変化を知ることは今後のモデル化にとっても必要であると考えられる。

本研究は、最近、可視化手法で用いられている粒子追跡法を用いて、流速場を連続的に求める PTV を応用し

て流速場を求め、戻り流れがある場合の碎波時の流速ベクトルの時間変化を求めたものである。また、合わせて、潜堤周辺の平均水位上昇量を整理したものである。

2. 実験の概要

2.1 実験装置・実験方法

実験は、長さ 9.3 m、幅 0.8 m、最大水深 0.8 m の造波機付き開水路（一部ガラス面）を用いて実施した。その一端にはプランジャー型規則波造波機が取り付けられており、反対側は消波ブロックを用いて消波を行った。

本研究で対象とした潜堤形状は、土木学会編（1994）を参考に設定したもので、潜堤天端幅 30 m、潜堤高さ 7 m、法面勾配 1:2、潜堤底部幅 58 m とした。実験では表面を塗料で被覆した木製の不透過潜堤とした。実験縮尺は、開水路の大きさと実験精度を考慮して $\lambda=1/40$ とし、相似則にフルード則を用いた。

潜堤模型の設置位置は、造波機から 6 m 離れた位置とし、さらにその背後 25 cm 位置に消波ブロックを 1:2 の斜面で積んだ。潜堤と岸側の距離は現地相当 10 m であるが、目視により戻り流れが存在していることが確認された。実験水路諸元、潜堤設置位置を図-1 に示す。

2.2 可視化実験と水位測定

本実験では、中立粒子を用いた可視化実験と、その粒子を追跡して流速を算出した。

可視化を用いた画像解析には、滝川ら（1995）のポリスチレン球を、渡部ら（1995）の白色樹脂を用いた例がある。本実験では、中立粒子として、比重が 1 になるように発泡させて比重を調整をした発泡スチロール球（鳥羽, 1994）を静水中に界面活性剤を加え、できるだけ一様になるように分散させた（以降、トレーサと記述）。撮

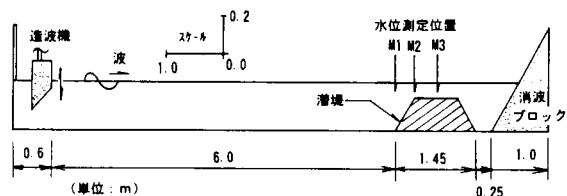


図-1 実験水路と潜堤設置位置

* 正会員 工修 八戸高専 建設環境工学科

** 正会員 工博 東海大学 海洋土木工学科

影用の照明は、波進行方向に細長く、幅 4 mm のレーザーシート（アルゴンレーザー：最大出力 10 W DANTEC 製）を用い、水表面上 30 cm の位置に設置した。粒子移動の撮影には、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 1/30 秒毎に記録した。

また、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。水位の測定は、造波開始から終了まで、計測と同時に 50 Hz で A/D 変換しながら FD に記録した。

2.2 流速の算定方法

流速算定には、撮影した画像を 1/30 秒毎に 6 画像（全 0.2 s 間：現地量 1.26 秒）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。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」（西野，鳥居，1992）によって、1/30 秒毎の流速ベクトルを算出した（以下、PTV と記述する）。なお、流速ベクトルの算出は、潜堤の肩部で生じる碎波現象が空気を取り込んでしまい、トレーサと区別できないため、碎波直前までとした。

2.3 実験条件

波浪諸元は、周期 $T=6, 9, 12$ 秒の 3 種類、潜堤天端水深 $R=3.0$ m, 4.5 m の 2 種類（水深 $h=10$ m, 11.5 m）それぞれ規則波を 20 波程度作用させた。また、入射波高は、0.8 m から 2.3 m まで周期毎に適宜変化させ、全 7 ケースを実施した。各ケースの実験波諸元を表-1 に示す。これらの中で、Case 5 が既往の実験例（土木学会編，1994）に相当するケースである。

3. 実験結果

3.1 水位変化

図-2 に、Case 5（波浪条件： $T=9$ s, $h=10$ m, $H=1$ m）の波浪を作用させた時の水位測定結果を示す。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。図は、造波開始から 5 波分を示し第 1 波目のピークを時刻 0 として表示している。図より潜堤肩部においては、第 2 波目まで振幅 1 m 程度であるが、3 波目以降は約 3 m 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存在し、水位の上昇が急激に起こっていることが確認された。

また、図-2 中の潜堤上（破線）で、第 3 波目以降の水位が下降する領域に見られる腰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、実際にはより緩やかな変化となっている。

3.2 碎波時の水面変化

Case 5（波浪条件： $T=9$ s, $h=10$ m, $H=1$ m）の場合の碎波時の水面形状のスケッチを図-3 に示す。

この波形は、図-2 の第 4 波目において、空気を巻き込む直前（時刻 23.06 s）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、潜堤肩部において空気を巻き込み始め、波の先端から徐々に上方に向かって空気巻き込み領域が広がっていく。その後、空気の混入領域は波頂部にまで達し、ついには段波状となって波高を急減して潜堤上を進行する。また、トレーサ移動状況は、潜堤上の戻り流れと入射波とが衝突するため潜堤肩部で上方に互いに移動している様子が確認された。

周期が 12 秒の場合には、設定ケース内では碎波せず、試行の結果、 $H=3.0$ m 以上で碎波するが、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 秒の場合には潜堤上（記号 B）で碎波しており、波頂部が前方にロール状に飛び込む巻き波型碎波となっている。Case 6（ $T=6$ s）の場合を図-4 に示す。

この波浪条件を用いて滝川ら（1995）が示した潜堤上碎波の碎波形態の分類を適用してみると、周期 9 秒の場合は崩れ波型碎波領域となり、周期 6 秒の場合は非碎波領域となる。前者は一致しているが、後者は一致せず、

表-1 実験条件

	T (s)	h (m)	H_i (m)	H_0/L_0
Case 1	12.0	11.5	1.68	0.007
Case 2	12.0	11.5	2.30	0.010
Case 3	12.0	10.0	1.29	0.006
Case 4	9.0	11.5	0.88	0.007
Case 5	9.0	10.0	1.04	0.008
Case 6	6.0	11.5	0.76	0.013
Case 7	6.0	11.5	1.12	0.020

T ：周期， h ：水深， H_i ：入射波高， H_0/L_0 ：沖波波形勾配（規則波を使用）

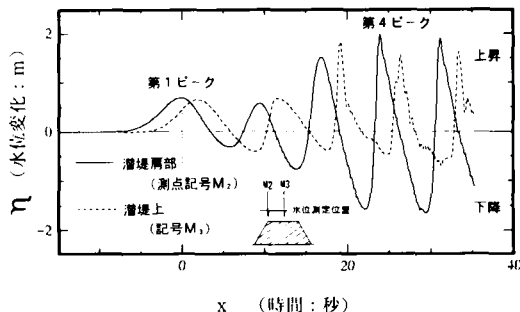


図-2 水位変化の計測例（Case 5）

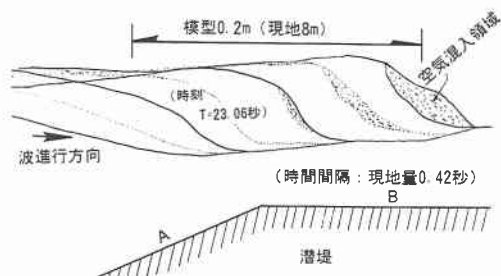


図-3 碎波時の水面変化 (周期9秒)

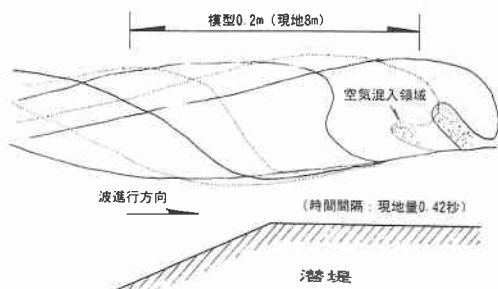


図-4 碎波時の水面変化 (周期6秒)

法面の有無が原因の一つと考えられる。

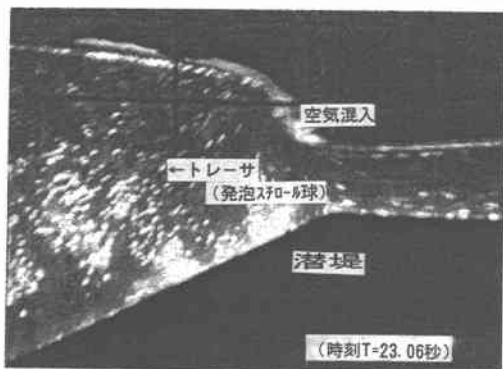
3.3 流速ベクトル変化

水位変化で示したように、潜堤肩部 (M2) で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おらず、後者は強い戻り流れが生じて、波先端が沖側に引きずり込まれるような現象が確認された。

この水位変化より、戻り流れが存在し、水位の上昇が急激である第4ピーク時の碎波直前まで (図-2参照) の流速ベクトルをPTVによって算出した。

流速の算定は、トレーサの分布を画像解析装置に取り込む事によって行った。図-5に、周期9秒のトレーサ画像を装置に取り込んだ例 (時刻23.06s) を示す。この図は碎波直前のトレーサ分布を示したもので、波先端で若干の空気を巻き込んでい。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、流速の算定はこの光を用いて行った。

取り込んだ画像を、輝度 (数値化: 0～255 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、単一ではトレーサ粒径が小さくて反射光が弱く、また、領域が大きいと波進行中に變形してしまうため、試行錯誤して設定した範囲である。そして、相関法を多時刻で適用して、各位相毎に流速ベクトルを算定し (トラッキング操作)、この結果を用いて

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

ベクトルを格子補間した。

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、全1.26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、領域 A で示すように潜堤上で約1.8 m/sの速さの戻り流れが存在している。この領域では、目視の結果、黒矢印に示すように水表面から滑り落ちるように粒子が移動していた。また、沖側の領域 B は、戻り流れが入射波が衝突することによって向きを変えようとしている。流速の大きさは約1.2 m/sで時計回りに向きを変えている。なお、ベクトルが無いのは、設定したトレーサ領域の變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、潜堤の法先で流速ベクトルの向きが斜面とほぼ平行になり、また、水表面付近では鉛直上向きとなっている。

図 (c) とさらに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、斜面では約1.2 m/s、表面では約1.5 m/sの移動速度となっている。

図 (d) の空気を取り込んで碎波する直前では、流速ベクトルの向きはほぼ斜面に平行となり、潜堤肩部で時計回りの流れが (記号 c) 生じている。

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 (1995) 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。その結果、潜堤肩部で戻り流れが反転しておりこれは、滝川らが指摘している戻り流れと入射波が衝突して、前者が押し戻される現象と一致している。

Quinnらの結果によると、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

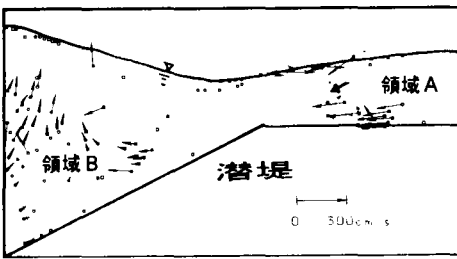
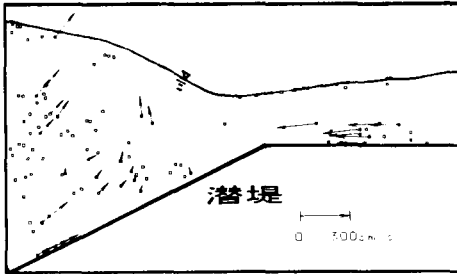
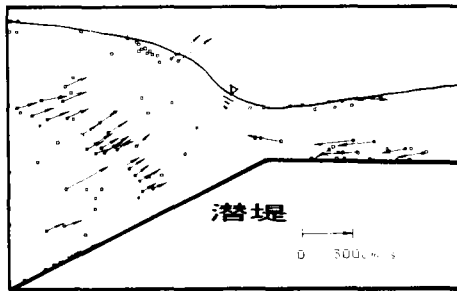
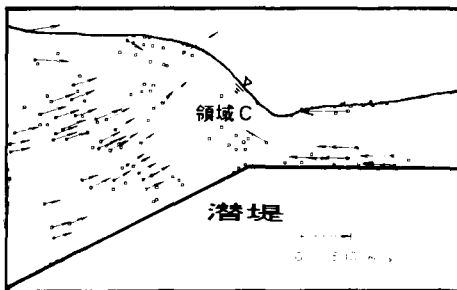
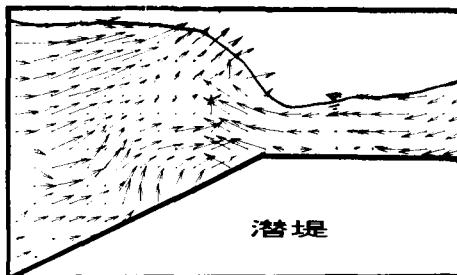

 (a) 時刻 $T=22.01$ 秒

 (b) 時刻 $T=22.43$ 秒

 (c) 時刻 $T=22.85$ 秒

 (d) 時刻 $T=23.27$ 秒

 (e) 格子補間結果 (時刻: $T=23.27$ s)

図-6 流速ベクトルの算定図 (Case 5)

ように反転されている。本実験結果では図(d)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(図-6(e))。よって、粒子の目視観測と合わせると、潜堤上で発生する碎波現象は、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ものと考えられる。

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10 m、周期9 s、通過波高1 mの入射波条件に対しては、1.8 m/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平面的に追跡するために、流速場を平面的に捕らえるのに有効な方向であるが、トレーサの分散や画像解析方法について課題が残されており、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り、より高精度かつ水面付近までの流速を捕らえられるように、トレーサの種類、分散法を今後検討する必要がある。

3.4 平均水位上昇量

潜堤周辺の流れ強さを検討するために、水位の測定結果から平均水位上昇量を求めた。平均水位上昇量は、零アップクロス法を用い、第3波～6波間のプラス側とマイナス側との面積差を求めた。

図-7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。

3.5 振幅増幅比

次に潜堤上での最大および最小水位を整理した。潜堤肩部(測点M2)および潜堤上(M3)の各ピークを、対応する法先位置でのピーク(M1)で無次元化し、6～8波分を平均して、潜堤法先に対する水位の増幅率を求めた。その結果を図-8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。その結果、Case 5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

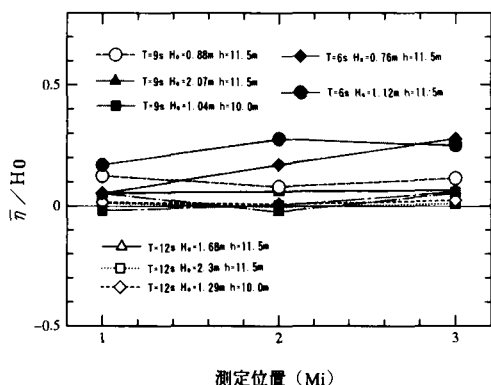


図-7 平均水位上昇量

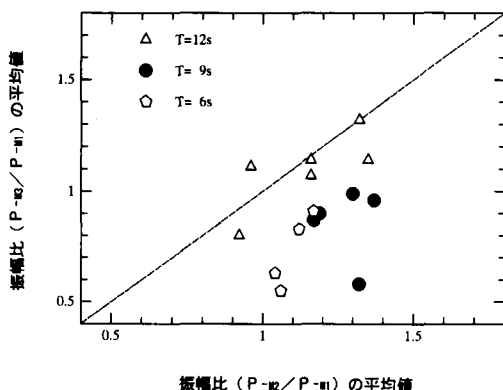


図-8 振幅比の算定結果

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。

4. まとめ

中立粒子の分布を画像解析装置に取り込み、粒子の移動と水面形を追跡して、砕波時の流速ベクトルを時系列で算出した。その主な結果を以下に示す。

(1) 砕波の発生位置は、波周期によって異なり、周期が短いとその砕波位置は岸側にズレ、周期が長いと沖側にズレる。

(2) 中立粒子の移動を追跡すると、潜堤肩部での砕波現象は、潜堤上からの戻り流れと進行する波による水粒子の移動とがぶつかり合って、入射波が戻り流れによって押し返されて鉛直上向きに方向を変えることによって生じている。

(3) PTVによって、流速ベクトルを算出した。潜堤沖側では斜面にはほぼ平行な向きとなり、静水面付近では上向きとなっている。これらは戻り流れによるものであり、波の進行に伴って、徐々に上向きへと変化する。周期9秒の時、この時の流速の大きさは、潜堤上で1.8m/s程度、それ以外で1.2m/sから1.5m/s程度となっており、砕波が生じている静水面付近ほど、流速が早くなっている。

本研究を行うにあたり、阿部仁、工藤司、高田純一、立石香織(当時、八戸高専学生)諸氏の協力を得た。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 646-650.
- 滝川 清・山田文彦・松本健昨 (1995): 潜堤上砕波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 66-70.
- 鳥羽良昭 (1994): 風波の流れの可視化, 可視化情報, Vol. 14, No. 2, pp. 3-8.
- 土木学会編 (1994): 海岸波動 [波・構造物・地盤の相互作用の解析法], 海岸工学委員会, pp. 146-148.
- 西野耗一・鳥居 薫 (1992): 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.
- 信岡尚道・村上啓介・入江 功・松永厚彦・木原康成・牛房幸光 (1993): 潜堤構造物の海浜流制御と海岸保全機能, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 261-265.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀 (1995): 複合型砕波の発見とその発生条件, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 51-55.
- 渡部靖憲・佐伯 浩 (1995): 画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 116-120.
- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 12, pp. 3651-3659.
- Quinn, P. A., Greated, C. A. and Easson, W. J. (1995): Wave Velocity-Field Measurements, Coastal Morphodynamics, MAST G8-M Final Overall Meeting.