

潜堤の波高減衰と背後の空気巻き込み領域に関する研究

南 将人* ・梅村 豪** ・大向達也***
鎌田 剛**** ・種市賀有***** ・田中博通*****

1. はじめに

景観性重視や海藻類の育成等を目的として、離岸堤に代わって潜堤が多用されている。潜堤上の強制砕波による波高低減の他に、潜堤天端面の高さを变化させて潜堤上で屈折させることによる波向変更（鈴木ら, 1995 a, 1995 b)等, 海岸保全施設として利用されている。しかし、設置に伴って離岸堤に見られない直背後の洗掘現象（佐藤, 1996, 中田ら, 1992）も観測されている。

潜堤は、急勾配な人工構造物であり、その上で波を強制砕波することによる波高減衰によって背後の海岸を保全している。最近では、ブシネスク方程式や緩勾配方程式に砕波によるエネルギー減衰項を加え、砕波現象の再現を試みた数値計算が行われるようになってきている（平石ら, 1995, 神山, 1995, 吉田ら, 1996）。

潜堤上の砕波は、空気を巻き込む急激な現象のため複雑であるが、その周辺での水位の変化や空気の巻き込み状態を明らかにすることは、前述の潜堤直背後の洗掘現象が観測されていること等を考慮すると、様々な機能を高める上で必要なことと考えられる。さらに、潜堤上で砕波して空気を巻き込みながら岸側へと伝わる際、水表面と底面間で流速が異なるため、空気の巻き込み範囲を知る必要があると考えられる。

そこで、本研究では、a)潜堤上砕波位置と波高減衰効果、b)潜堤背後における空気巻き込み範囲の変化や底面付近の流速分布、の2点について水理模型実験を実施した。

これらの項目について水位変化や流速ベクトル、そして空気巻き込み範囲等を実験で求め、潜堤の波高減衰に及ぼす砕波位置の効果、潜堤背後の空気巻き込み領域の範囲（乱流場）と成長速度について、入射波との関係において整理した。

2. 実験の概要

2.1 実験装置と潜堤諸元

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、反対側で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（1994）を参考に設定したもので、潜堤天端幅75 cm, 潜堤高さ17.5 cm, 法面勾配1:2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。

潜堤模型の設置位置は、造波機から5 m離れた位置を潜堤沖側法先とし、水路の反対端には消波ブロックを1:2の斜面で積んだ。実験に用いた潜堤の形状、および水位の測定位置を図-1に示す。

2.2 実験方法

測定は、砕波位置の目視観測と水位変化測定、および可視化実験より構成される。

前者については、潜堤周辺5箇所（図-1）にサーボ式水位計を設置して水位変化（ $H_1 \sim H_5$ ）を測定した。また、測定と同時にA/D変化してFDに記録した。さらに、測定と同時に砕波位置を目視によって観測した。目視による砕波位置の確認は、波進行方向に潜堤沖側肩部付近、潜堤天端上、岸側肩部周辺の3位置で行った。

後者については、比重が1となるように調整した発砲スチロール球を造波前に浮遊させて、造波開始からスチロール球の移動をビデオ撮影し、画像解析装置を用いて粒子を追跡して流速を算定した（鳥羽, 1994；南・田中,

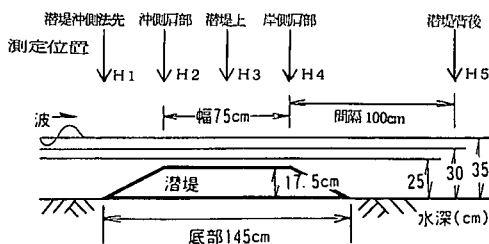


図-1 潜堤設置位置と測定位置

* 正会員 工修 八戸高専 建設環境工学科
.. 岩手大学
... 秋田大学
.... ドービー建設工業(株)
..... 松浦企業(株)
..... 正会員 工博 東海大学海洋土木工学科

1996). 流速の算定には、撮影した画像を 1/30 秒毎に画像解析装置に取り込み、反射光の強さから 2 値化した後、領域を設定してその重心位置を数値化 (ラベリング) した。このデータに基づき相関法と多時刻追跡法を組み合わせた「3 時刻パターンマッチング法」(西野・鳥居, 1992) によってベクトルを算出した (トラッキング)。

2.3 実験条件

潜堤天端上水深 R は、3 種類 (7.5, 12.5, 17.5 cm) とした。全水深 D に対する天端水深比 R/D は、それぞれ 0.3, 0.42, 0.5 である。

実験に用いた波浪は、潜堤が無い状態で (以降、通過波と記述) 砕波しないことを条件として、造波信号を適宜調節し、周期 $T=0.98$ s から 1.72 s、波高 $H=0.4$ cm から 10.4 cm の規則波を用いた。実験で用いた波浪の波形勾配の範囲は 0.001 から 0.087 である。

規則波を用いているために作用波は全 5 波とし、水位の変化特性より、解析波として第 3 波と第 4 波を用い、両者の平均値を用いた。測定は、水位変化と粒子の移動、そして砕波位置の目視観測を同時に実施した。

3. 砕波位置と波高減衰

潜堤による波高変化と、砕波位置別の通過波に対する波高比との関係を整理した。

まず、図-2 に通過波と潜堤有りの場合の水位変化の結果を示す。この例は、砕波位置が潜堤沖側 ($H_1 \sim H_2$) の場合で、通過波の諸元は、波高 $H=8.5$ cm、周期 $T=1.1$ s、水深は $D=25$ cm である。上段は潜堤沖側法先位置 (図-1 の位置 H_1)、中段は岸側肩部 (H_4) そして下段は潜堤背後 (H_5) である。図中の実線は通過波を、点線は潜堤有りの場合を示している。潜堤沖側では水位の変化に差異は見られないが、潜堤背後では波高が小さくなり、入射波に比べて 4 波ともほぼ同じ高さとなっている。この例では約半分に波高が減衰している。水深 $D=25$ cm の場合、潜堤背後の波高比は、最小 0.40 となった。また、下段の潜堤背後の水位変化には、各波毎に腰掛け部 (図中の記号 a) が見られ、潜堤上の砕波によって高周波成分が発生している。

水深 25 cm では、周期 ($T=0.98 \sim 1.54$ s) と波高 ($H=0.4 \sim 9.7$ cm) を適宜変化させて全 30 種類の波を作用させたが、通過波高が 4.0 cm を超えると沖側で砕波し始め、潜堤岸側肩部での波高は 5.0 cm 以下となった。他の水深の場合の潜堤上の波高は、水深 $D=30$ cm で 7.5 cm、水深 $D=35$ cm で 11 cm となった。砕波した場合には、それぞれの水深に対応して波高の上限が決まってしまうが、砕波しない場合には、潜堤上の波高と入射波高とは比例関係にあった。

次に潜堤による波高変化の整理結果を示す。図-3 は

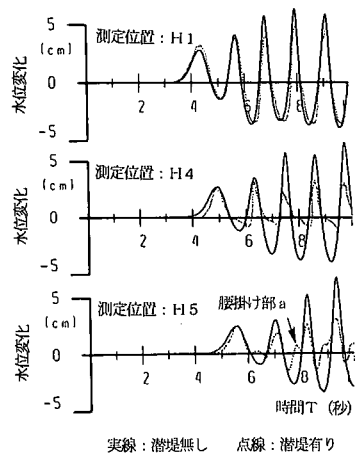


図-2 水位変化 ($R/D=0.3$, $H=8.5$ cm, $T=1.1$ s)

通過波の波形勾配と潜堤有無の波高比の結果を整理したもので、潜堤の岸側肩部から 1.5 波長離れた位置 (測定位置 H_5) での結果を示している。横軸は通過波の波形勾配、縦軸は潜堤設置時の波高を通過波で割った値を取った。縦軸で 1 以下の場合には波高が減衰していることを示す。図の白三角印は非砕波の結果を示し、黒く塗りつぶした記号は砕波したケースを示している。また、図中の線 (a~d) は、潜堤天端水深の違いを示している。

非砕波 (記号 Δ) では波高比が 1 を超え、潜堤によって波高が増幅された事を示している。実験範囲では最大 1.7 倍まで増大している。非砕波となる入射波の条件は波形勾配が、0.02 以下の場合である。

砕波したケースの波高比は、砕波位置によって異なり波高比 0.4~1.4 となった。ケースによっては 1 を超えており、砕波しているにも関わらず波高が増大している場合もあった。

潜堤の岸側で砕波した場合 (測定位置 H_4 付近: 図中の記号 $\blacksquare$) では、波高比が 1 を超えている。これは、砕波直後の波が潜堤背後の水深が深い場所に飛び込んだ為に、新たに潜堤背後に波が発生したためであり、必ずしも潜堤によって波が減衰するとは限らない。

潜堤上で砕波した場合 (記号 $\bullet$) には、ほぼ波高比が 0.8 となっており、波形勾配によらずほぼ一定の減衰となることが分かる。また、天端水深の違いによる差異は、天端水深が浅い程波高比が小さくなっているが、その差は 0.1 となっており、この程度为天端水深の違いによる波高比への影響は小さいものと考えられる。

砕波した場合の潜堤背後の波高を砕波限界波高と比較した。その際、砕波位置は潜堤上 (図中の記号 $\bullet$) と沖側 (図中の記号 $\blacktriangle$) の 2 種類とした。合田の規則波に対する砕波限界波高の近似表示式 (合田, 1973) による波高は、各水深毎に、 $D=25$ cm の場合 5.5 cm、 $D=30$ cm

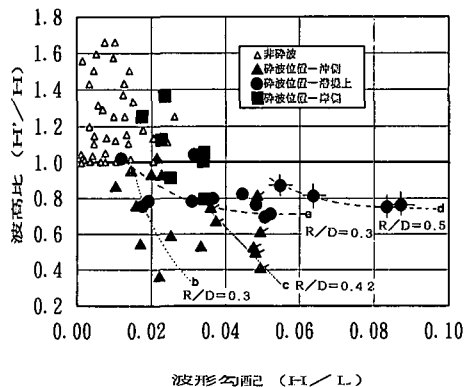


図-3 潜堤有無の波高比と波形勾配

で9.0 cmそして $D=35$ cmで12.0 cmとなり、前述の潜堤岸側肩部の波高の測定結果との比はそれぞれ、1.1, 1.2, 1.1とほぼ一定値となった。

従って、砕波が潜堤天端面上または沖側で発生する場合には、天端水深(R)に関わらず、砕波限界波高にほぼ一致する波高が生じる結果となった。

砕波が潜堤の沖側で生じた場合(▲印)の波高比は最小0.4となり、波形勾配が大きくなると潜堤の効果が大きくなっている事が分かり、潜堤上で十分にエネルギーが失われたためと考えられる。また、天端上水深による差異は天端水深が浅い程波高比が小さくなっている。今回の実験では通過波で砕波しない波を用いたために、波形勾配が大きな場合のケースは行っていないが、砕波位置が潜堤沖側の場合の波高比の最小値は0.4以下となり、砕波位置が潜堤上の場合と比べ約2倍の低減効果がある。

以上のように、潜堤による波高の変化は、波形勾配が大きくなる程波高比が小さくなる傾向を示すが、砕波位置によってもその値が大きく異なる事が分かる。

また、潜堤上(測定位置 H_3)の水位変化は、潜堤背後(H_5)と同様な結果が得られ、潜堤による波高減衰効果は砕波位置によっても大きく異なるものと考えられ、今後、砕波位置を考慮する必要があると考えられる。

4. 空気巻き込み範囲

潜堤背後の乱れ場領域を検討するために、空気を巻き込んで白く見える領域を目視によって設定し、その長さや高さについて整理した。

図-4に潜堤背後の乱れ場を表わす項目として、高さ(h_{ea})と長さ(L_{ea})に関する諸元を定義した図を示す。高さは空気を巻き込んでいる最高と最低面の鉛直距離、長さは波進行方向の水平距離と定義した。

実験の解析は、空気の巻き込み範囲を画像からその形状をトレースし、静水面を基準にして上下の高さ(空気巻き込み範囲の深さ)を求めた。さらに、潜堤岸側法先

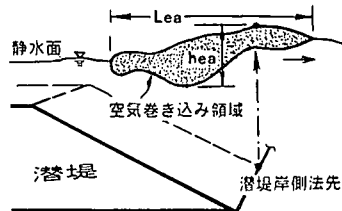


図-4 空気巻き込み領域(乱れ場)諸量の定義

で水位が最大となる瞬間の巻き込み範囲の長さや高さを読み取り、通過波波形勾配との関係を整理した。

図-5に空気巻き込み領域の経時変化の測定結果一例を示す。このケースは、全水深 $D=30$ cm, 波高 $H=9.0$ cm, 周期 $T=1.3$ sの場合である。時間間隔は1/10秒間隔である。

図中の水面上および下とは、静水面を基準に、それぞれ空気巻き込み領域の最高と最低位置を読み取った値を示している。

波進行に伴って巻き込み領域の長さや高さとも長くなりながら岸側に伝播していく。しかし、高さについて6番以降は、静水面下はほぼ一定となっていた。このケースにおける静水面以下の深さは、水深比0.3, 入射波高比1.0となっている。他のケースでもほぼ同じ値となっている事から、潜堤背後に生じる空気の巻き込み範囲はほぼ通過波高と同程度の水深までと考えられる。空気巻き込み領域長さの成長速度と波速($\{g(D+H)\}^{1/2}$)は、それぞれ、110~160 cm/sと195 cm/sであり、波速の0.6~0.8倍の速さで領域の長さが増加している。

次に、巻き込み領域の高さ長さ比(h_{ea}/L_{ea})と波形勾配との整理結果を示す。空気巻き込み範囲は、波進行に伴って変化するため潜堤背後への境界条件となる潜堤岸側法先位置で、水位が最も高くなる瞬間の空気巻き込み範囲諸元を読み取った。その結果を図-6に示す。

巻き込み領域(L_{ea} , h_{ea})と通過波諸元(H , T)との関係を整理すると、次の通りである。

入射波周期が長くなると巻き込み範囲の長さや高さは共に小さくなり、短くなると逆に大きくなる。周期が短いと波頂部より下方へ落ち込む勢いが強くなり、巻き込み領域は広がる。また、入射波高が高くなると巻き込み領域は広がる。実験の結果、入射波高及び周期共、巻き込み領域の長さや高さの間には線形関係が見られ、波高が高い程、または周期が短い程、領域の長さや高さは大きくなる傾向が見られた。

入射波諸元による領域の大きさの違いは、砕波形式によるものと考えられる。周期が短い程、巻き波型砕波となり波頂部からの飛び込みによる波の発生が大きな原因と考えられ、一方、周期が長い程、砕波形式が崩れ波型砕

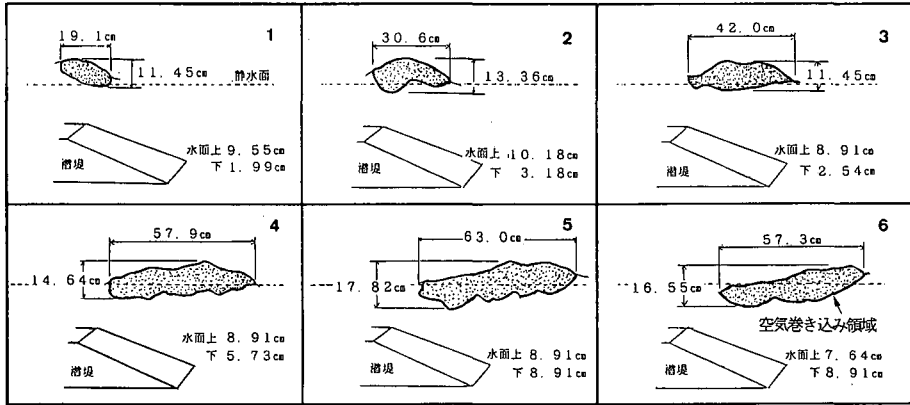
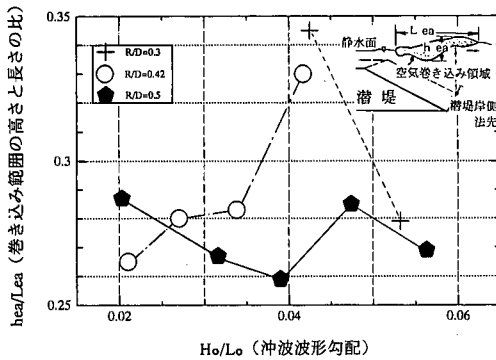

 図-5 乱れ場の時間変化 ($R/D=0.42$, $H=9.0$ cm, $T=1.3$ s, $\Delta t=0.1$ s)


図-6 波形勾配と巻き込み領域の大きさ

波となるために波頂部から除々に崩れ、空気巻き込み量が少なくなる。また、水深による差異は、水深が深い場合には $0.26 \sim 0.29$ となり、水深が浅くなると最大 0.33 となる。水深が深い程、領域の高さ長さ比が一定となる傾向が見られた。

5. 底面付近の流速分布

水表面の空気の巻き込み範囲より下方の領域における流速場を PTV によって求め、潜堤背後の流速分布について検討した。流速場の算出は、発砲スチロール球を浮遊させてその移動を撮影したビデオ画像を用い、粒子を追跡して流速ベクトルを求めた (画像解析装置: 株ネクサス製)。実験の際の照明には、幅 4 mm のアルゴンレーザシートを水路上方から照射し、撮影は水路の側面からガラス面を通して行った。シートの水路横断方向の位置は、水路幅の中央とした。

図-7 に PTV による流速の算定結果の一例を示す。この図の波浪諸元は、波高 $H=6.2$ cm, 周期 $T=1.5$ s, 水深 $D=35$ cm のケースである。

図は潜堤岸側法先で水位が最大となる瞬間の空気巻き

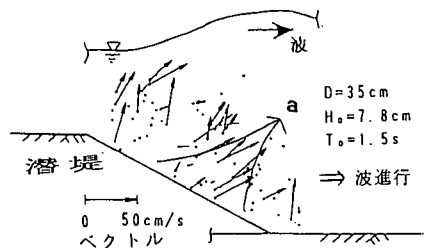
込み範囲より下方のベクトルを示している。

水位の上昇に伴って背後の底面近傍で流れが生じており、このケースの場合、底面で約 50 cm/s の流れが生じていた。この速度は、水深を用いた波速の $1/4$ となっており、岸側斜面ではほぼ一様に水面に向かうような流れが存在していることが分かる。ベクトル図より、水面に向かうような流れが存在しており、潜堤の被覆材を巻き上げる方向に流速が発生している事が分かる。

潜堤背後の流速分布を PIV を用いて測定した実験として、M. Petti ら (1994, 1995) らの研究がある。法面勾配 $1:1.5$, 周期 3 s の実験結果が示されているが、それによると、砕波した波が潜堤岸側肩部を過ぎると、岸側肩部で流れが剝離を起こし、岸側法面の途中に再付着するような循環流の様な流速分布となっている。さらに、剝離による渦度の発生が潜堤背後の砂移動の大きな要因となる事を示している。本実験では、このような明確な剝離は見られずほぼ一様な流速分布となっており、潜堤背後の砂移動の方向やその量を検討するためには、これらの流速分布の発生条件についても整理する必要があるものと考えられる。

6. まとめ

砕波位置の観測と潜堤背後の水位変化および空気巻き


 図-7 底面の流速分布 ($R/D=5.5$, $H=6.2$ cm, $T=1.5$ s)

込み領域の観測を追跡して、潜堤背後の乱流場形成範囲について検討した。その主な結果を以下に示す。

① 潜堤上での碎波位置によって、その背後の波高が異なる。碎波の位置が沖側である程波高が減衰し、潜堤岸側でのそれと比べると約2倍の減衰効果がある。

② 潜堤背後の空気巻き込み領域の長さとは高さは、潜堤背後への伝播に伴って両者とも長くなる。また、巻き込み高さの最大は、全水深比0.3、入射波高比1.0であり、ほぼ入射波高以上に空気巻き込み領域は深くはならない。

③ 空気巻き込み領域の長さ高さ比は、潜堤天端水深によって異なり、水深が深い程小さくなるが、水深が浅い程大きくなる。これは碎波形式の差異によるものである。

④ 潜堤岸側法先位置で水位が最大となる瞬間の流速分布は、波速の1/4で、斜面にほぼ一様となっている。

謝辞：最後に、本研究を行うにあたり、財団法人建設工学研究振興会より奨励金の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 鈴木康正・平石哲也・富樫宏次・高羽泰久・南将人・岩垣雄一 (1995a): 潜堤を用いた海岸安定工法に関する現地観測と模型実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 696-700.
鈴木康正・上原 功・富田康大・望月徳雄・平石哲也 (1995b): フ

- レネル潜堤による波向・波高変更効果に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 701-705.
佐藤昭二 (1996): 漂砂, 1996年度水工学に関する夏期研修会論文集・B, 土木学会水理学会委員会.
中田博昭・鈴木 勝・阿部勝雄・川又良一・南 将人 (1992): 潜堤周辺の地形変化に関する数値モデルと現地観測結果との比較, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 431-435.
平石哲也・上原 功・鈴木康正: プシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性, 港湾技研資料, No. 814, Dec. 1995.
榊山 勉 (1995): 透過潜堤上で碎波をとまう波の変形特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 771-775.
吉田 茂・早川典生・細山田得三: 潜堤上の波形解析と実験, 海洋開発論文集, Vol. 12, 1996.
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, p. 146-148.
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.
南 将人・中田博通 (1996): 潜堤上で戻り流れが存在する碎波時の流速分布, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 86-90.
西野耕一・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.
合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻第3号, pp. 31-69., 1973.
Petti M., Quinn, P. A. Liberatore, G. and Easso, W. J.: Wave velocity field measurements over a submerged breakwater by means of PIV laser techniques. Proc. of the 24th Int. Conf. Coastal Eng., Kobe, Japan, 1994.
M. Petti and G. Liberatore: Behaviour of wave trains in shallow water, MAST G 8-M Final Overall Meeting, pp. 29-33. SEP., 1995.