

透過性潜堤周辺の流れ構造に関する研究

細山田得三*・早川典生*・吉田 茂**
辻本剛三***・田安正茂****

1. はじめに

数多くの海域波浪制御構造物の中にあつて透過性潜堤は海岸浸食を防止する目的で古くから全国各地に建設されている。さらに近年、構造物背後の海域を静穏な親水性海域として多目的に利用する計画が進められており、そのため海水交換性が高く、海岸景観を損ねない透過性潜堤が最適な構造物として選択される例が多くなっている。

潜堤に関する既往の研究も古くから数多く行われており、大別すると以下のように分類される。

- ① 潜堤による波浪変形と砕波
- ② 潜堤による沿岸流・離岸流制御と海浜変形
- ③ 潜堤の波浪制御機能
- ④ 潜堤構造の安定性

しかしながら、潜堤とその周辺の波動場及び内部流速場の相互作用については未解明の問題点が残されている。それらの1つとして透過性潜堤は、周囲の海底地盤を整備することなく直に設置されるため、潜堤周囲の底質が洗掘される現象が生じ、直背後の養浜等の砂が侵食される問題が挙げられる(岡田ら, 1991; 荘司ら, 1990; 中田ら, 1992)。この現象は、これまで潜堤による砕波等による波浪変形による沿岸流、離岸流等によって引き起こされるとする見解に基づいて解析される(項目②)ことが多い。しかしながら沿岸流によって輸送されるためには、海底面の砂が何らかのメカニズムによって浮遊状態になる必要がある。これに対しては、潜堤堤頂部での砕波による流速変動によって底質が巻き上げられるとする説明や地盤の液化化によるものとする説明がなされているが、現時点では明確な説明は与えられていない。これらの原因を明らかにするためには、潜堤上を通過する波と潜堤との相互作用によって発生する

- ① 岸沖方向流速場
- ② 渦動構造
- ③ 岸側水位上昇による冲向き流れ

* 正会員 工博 長岡技術科学大学建設系 助教授
** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学建設系 教授
*** 正会員 工修 長岡工業港等専門学校 助教授
**** 工修 (株)テトラ

等の内部特性を把握する必要がある。潜堤によって生じる内部流速場についての研究は、砕波によって生じる流速変動について画像解析と数値計算を組み合わせた滝川ら(1995)の研究が挙げられるが、この研究は矩形の不透過性潜堤を対象としている。透過性潜堤に関して周囲の内部流速に関して研究を行った例は、従来少ないと言つてよい。

本研究では、水理模型実験を実施し、潜堤上を通過する波によって生じる流速変動を詳細に計測して潜堤周囲の流れ及び渦動構造について調べた。実験の一部は、境界要素法(BEM)による非線形波動解析との比較も行った。また、潜堤岸側での水位上昇とそれとともなう冲向きの戻り流れについても検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

実験はすべて長岡技術科学大学における2次元造波水路で行われた。水槽は長さ18 m、高さ1 m、幅60 cmである。図-1に実験水路の模式図を示す。波は水路右端にあるピストン型造波装置により発生させた。水路中央部には六脚ブロックを乱積みにして台形状の模型潜堤を設置した。なお、六脚ブロックの空隙率は、乱積みの場合、約50%である。潜堤の法勾配は、1:1であり、天端水深は、水深を変化させることによって40, 55, 70 cmの3通りとした。潜堤の天端幅Bは、100 cmとし、海底面から

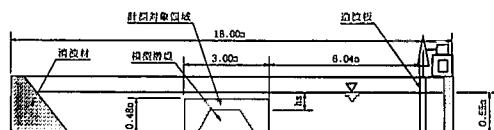


図-1 実験水路

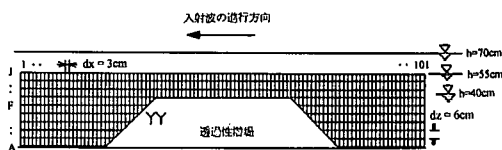


図-2 潜堤周辺の流速計測点模式図

表-1 実験条件

	波浪条件					構造条件			
	T (s)	h (cm)	H_i/h	H_o/L_o	H_i/L	D (cm)	B (cm)	h_s (cm)	h_s/H_i
case 1	1.5	40	0.25	0.028	0.038	37.5	100	2.5	0.25
case 2	1.5	55	0.24	0.037	0.045	37.5	100	17.5	1.35
case 3	1.5	70	0.21	0.043	0.048	37.5	100	32.5	2.17

T : 周期, h : 水深, H_i : 入射波高, H_o/L_o : 沖波波形勾配, D : 潜堤高, B : 潜堤天端長, h_s : 潜堤天端水深

表-2 碎波に関する無次元量

	滝川ら		出口ら	
	H_o/h_s	$\sigma^2 h/g$	h/L	h_s/H_o
case 1	4.00	0.72	0.15	0.25
case 2	0.74	0.99	0.19	1.35
case 3	0.46	1.25	0.22	2.16

σ : 角周波数

潜堤天端までの高さは 37.5 cm とした。本模型潜堤は現地に施工されている幅広潜堤の形状に比して縦横比が大きく、鉛直と水平の縮尺が異なる歪み模型に相当する。本研究では、潜堤周辺の流れの基礎的な知見を得るために行うものであり、この点については今回は問題としない。

実験に用いた波はすべて規則波で、周期は 1.5 秒に固定されている。なお、実験波及び構造条件に関連した各種パラメータについては表-1 にまとめて示す。表-2 には既往研究において見出された碎波形態(滝川ら, 1995)及び碎波限界(出口ら, 1989)に関する無次元パラメータを示す。case 1 については両研究においても碎波領域に該当する。case 2 は滝川らの形態分類によると巻き波から落ち込み型碎波に近い領域に分類される。また、出口らが示した碎波限界 $h_s/H_i=1.5$ を下回っており、碎波領域に該当している。case 3 は滝川によれば崩れ波型に分類されるが、非碎波領域が近く、出口らの分類では非碎波領域に分類されるがかなり碎波領域に近い。

内部流速場は、水平及び鉛直の 2 方向が測定できる電磁流速計を用いて計測した。電磁流速計の時間分解能は、20 Hz である。図-2 には、流速計測点格子を示す。計測対象領域は、造波板の中立位置から 6.04 m の点から模型潜堤を挟んで岸側に 3.0 m の間とした。この距離は、水深 0.55 m で周期 1.5 s の場合(case 2)の実験波の波長 2.91 m と同程度である。計測点の格子間隔は、水平、鉛直方向にそれぞれ 3 cm, 6 cm とし流速の計測点数は、潜堤模型の周辺 686 点である。流速計の本数が限られていることから同一条件で規則波を複数回作用させて計測を行った。また、容量式波高計を 2 本、それぞれ流速計測点直上と潜堤の沖側に設置し、計測点上の水位および位

相合わせのための沖側水位を測定した。計測された流速、波高はリアルタイムで AD 変換され、直ちにフロッピーディスクに格納される。AD 変換のサンプリング時間間隔は、0.02 秒(50 Hz)である。測定時間は水路の長さとして反射波による影響を避けるため 28 秒とした。従って取得されたデータの個数は、1400 個となる。実際の解析では、計測データの時系列を図化し波形が安定している時間を調べ、その範囲を有効解析範囲とした。なお、碎波帯などのように流速変動成分がかなり卓越するような流れ場の構造については一般的にレーザ流速計が用いられる。本研究は碎波帯よりも沖側に設置された潜堤を対象としており、また高周波の変動よりも構造物から発生する渦動構造を主要な解析対象としているため電磁流速計を用いた計測でも有効と考えられる。

測定された流速場については、潜堤沖側の波高計によって測定した水位変動の時系列をゼロアップクロス法によって分割し 1 波 1 波を決めた。これに応じて流速場の位相平均を求め解析を行った。波の周期は、1.5 秒でサンプリング周波数は、50 Hz としているため、1 周期を 75 分割しており、位相の分解能は、0.084 rad となる。潜堤によって生じる流速変動成分は、位相平均流速から渦度 $\omega(=w_x - u_y)$ を計算し、その空間分布を各位相毎に求めた。

3. 実験結果

3.1 各位相での流速ベクトル

図-3 には case 2 で測定された各位相平均流速ベクトルの時間変化を示す。図 A から J に向かって 0.15 s (0.268 rad) 間隔で 1 周期間を图示している。また、各流速ベクトルの上の点は、波高計によって測定された水位変動である。図中の矢印は、潜堤による若干の碎波をあらわしている。潜堤岸側ではこれらの点が若干ずれている部分があるが、これは同一水平地点で深さ方向に最大 8 点程度計測を行ったことによる水位変動計測の誤差を示している。若干の誤差はあるものの再現性はほぼ良好である。

波の入射時(A)には潜堤上部で強い沖向き流速が生じている。波の入射とともに流れの方向が岸向きに転じ(B-D)、潜堤上では沖向き流速と岸向き流速が同時に存在している。潜堤上の水位と流速の位相については微小振幅波理論による進行波とは異なり、水位最大の点では、流速の位相は、波の進行方向と逆となっている。また潜堤岸側の法肩部付近においては、流速は沖側よりも流速の値が小さいものの全計測を通して流速ベクトルに変動が生じていることがわかる。

3.2 潜堤上での流速変動の振幅分布

図-4 には、潜堤上で計測された流速変動の振幅の空

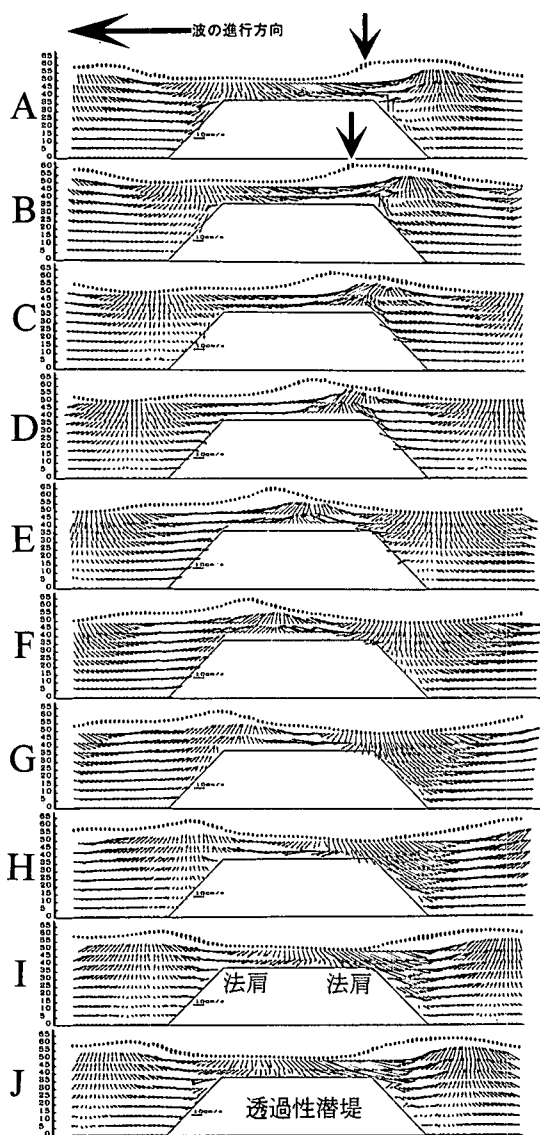
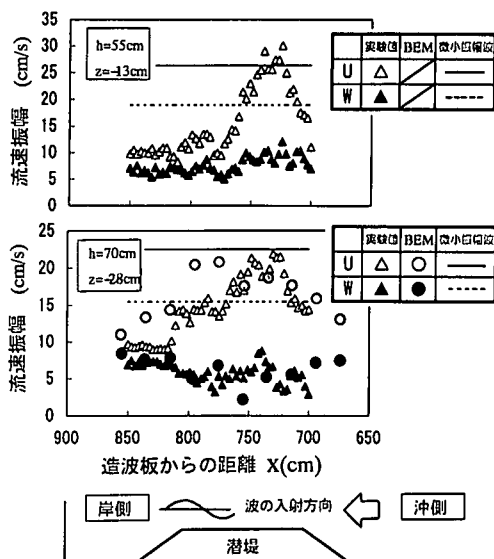


図-3 位相平均流速ベクトル (case 2)

間分布を示す。各計測点の水平位置は図-4下部の模式図と対応している。なお、流速波形は、非線形効果によって上下非対称となっており、ここでの流速振幅とは、0と変位が最大となる点との差によって定義している。潜堤沖側の法肩部のやや岸側において水平流速振幅がかなり大きな値となっており、微小振幅波の値を超えている点も見られる。 $h=55\text{ cm}$ (上段) では流速振幅がピークとなる地点から岸側に向かって流速振幅は急激に減少していく。 $h=70\text{ cm}$ (下段) ではこの現象が緩やかである。これは潜堤による遮蔽と砕波による波高の減衰が小さいことによるものである。砕波を取り入れていない BEM

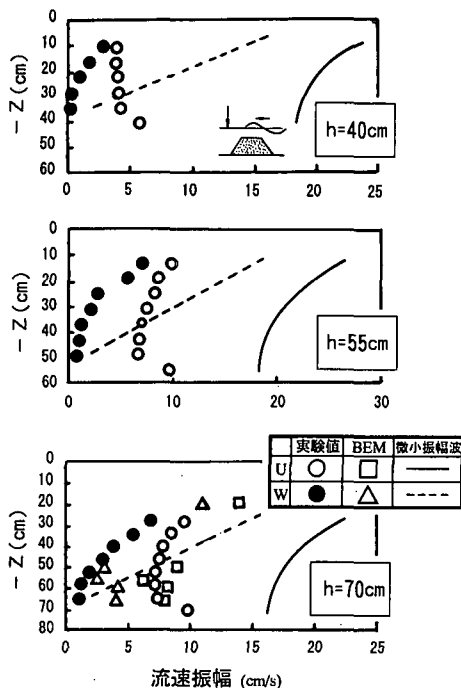
図-4 潜堤上の流速振幅分布
(上段: case 2, 下段: case 3)

による計算では実験結果とほぼ一致しているが、潜堤中央から岸側に向かっての減少が実験に比して顕著ではない。岸側の法肩部において若干の流速振幅の増加と変動が見られる。これらは潜堤岸側の法肩部における流速変動の発生によるものと考えられる。

図-5は潜堤の岸側における流速振幅の鉛直分布を示す。また微小振幅波理論による潜堤のない場合の進行波の流速振幅の鉛直分布も比較して示している。微小振幅波理論によって求められた流速振幅は当然ながら実験値を上回っている。しかしながら微小振幅波理論では鉛直方向の変化が大きく、実験値は下方にいくに従って微小振幅波理論との差が小さくなっている。特に鉛直方向流速振幅はもっとも深い点では微小振幅波理論によるものと同程度となっている。BEMによる計算は砕波を含まないため、流速振幅が実験値よりも大きくなっている。

3.3 潜堤岸側での渦度分布

図-6には位相平均流速場から求めた渦度の等高線の時間変化を示す。左側はcase 2の場合であり、位相変化の記号(A, C, E, G, I)は図-3の記号と対応している。潜堤法肩部に強い渦度が集中しており、潜堤法肩部から法面に沿って渦が下降している様子が分かる。渦度の等高線は、入射した渦の分裂や渦度の拡散によって時間の進行とともに複雑になる(C, E)。水深が70 cmの場合は、渦の分裂はさらに顕著であり、渦①の入射点よりもさらに岸側斜面付近では、別の渦②が誘起されている。さらに岸側においても図-6Cで示すように水面上から渦度③が供給されていることがわかる。潜堤岸側の法肩部での渦度が最大となる位相はその点での水位変動の位相と



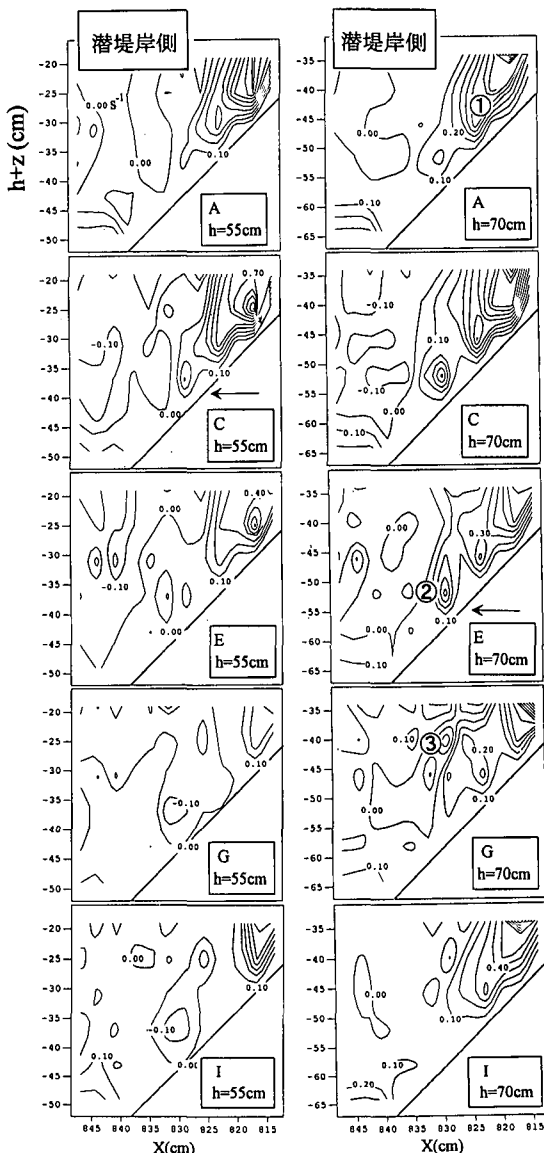
図一五 流速振幅の鉛直方向変化
(上: case 1, 中: case 2, 下: case 3)

ほぼ 180 度ずれており、引き波時の水位が最も低下した位相となっている。さらに時間が経過すると (G)、渦は次第に減衰し法肩部に入射波が到達する位相で法肩部の渦度は最小となる。ただし、渦③はこの位相で最大となっている。

渦度の等高線が最も深い位置に到達している位相は法肩部の渦度が最大となる位相よりもやや遅れており、図中の矢印で示すように水深が 55 cm の場合 z が 40 cm 程度 (C)、水深が 70 cm の時に最大 55 cm 程度 (E) にとどまっている。これらの結果から潜堤岸側への波の入射に伴って潜堤法肩から渦が入射し、引き波の位相の時に最深部まで到達することがわかる。本模型実験では、入射した渦が底面まで到達している様子は確認されなかった。しかしながら潜堤の高さが低く底面までの距離が短い場合には渦が底面まで到達し海底面の局所洗堀を引き起こす可能性が示唆される。

3.4 水位上昇と戻り流れ

図一七には流速及び波高の位相平均値をさらに全位相で平均して求めた定常流速ベクトルと平均水位上昇の分布を示す。岸側の水位上昇に伴い、冲向きの戻り流れがほぼ全層において見られる。流速の値は、浅い点ほど大きな値となっている。また、潜堤岸側の法肩部では、入射した渦によって流速ベクトルが反転している。沖側の法肩部においては非常に強い冲向きの流れが見られ、



図一六 渦度の等高線図
(左: case 2, 右: case 3)

その影響が海底面付近まで到達している。図一八には定常流速場の潜堤岸側で拡大された流速ベクトル図と渦度の等高線を示す。潜堤法肩部付近には渦度が集中していることがわかる。

4. まとめ

本研究によって得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 潜堤周辺の流速場の位相平均ベクトル図 (図一2) を作成し、潜堤による流速変動の生成を確認した。
- (2) 潜堤の後部の法肩部より渦が入射し潜堤に沿って

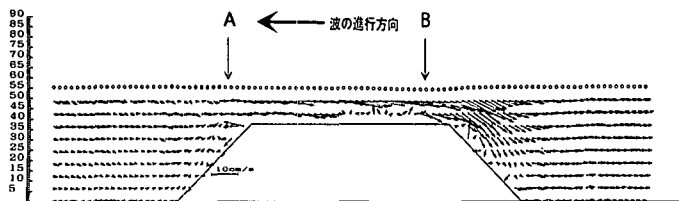


図-7 定常流速場及び定常水位分布

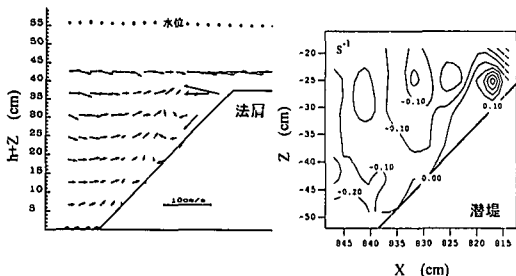


図-8 潜堤岸側における定常流速場の渦度の等高線

下降していく様子が確認された。しかしながら入射する渦は、本実験の範囲では、潜堤法尻まで到達する様子は確認されなかった。

(3) 潜堤堤頂部岸側の流速振幅は、微小振幅波理論に比して大きくなる点も見られ、岸側へ向かうにつれて流速振幅が小さくなっている。しかしながら潜堤の岸側法肩部では渦に伴う流速変動が顕著になる。

(4) 潜堤岸側法肩部から入射する渦度が大きくなるのは、引き波時であり、鉛直流速が下向きに最大となる位相に近い。

(5) 定常流速場の流速ベクトル及び渦度においては、潜堤後部の流れは、沖側を向いており、水位上昇に対応した戻り流れが生じていることが確認された。

(6) 戻り流れの流速分布は、浅い点ほど大きく、また、潜堤法肩部には流速変動が生じていることが分かった。また、戻り流れにおいても法肩部付近に渦度が集中していることが確認された。

本研究は潜堤構造物周辺の流れ構造の基礎的な特性を把握するために実施したものであり、実海域に施工された潜堤を対象としていない。今後は、実際に施工された

ている潜堤を対象とした研究を実施したいと考えている。また、本研究で得られた知見を現地スケールに応用する場合には、相似則の適用性について考慮する必要がある。これらについては今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究を実施するに当たり、運輸省港湾技術研究所水工部高橋耐波研究室長、加藤漂砂研究室長、善助土質研究室長、鶴谷環境評価研究室長、田端竹千穂運輸省新潟調査設計事務所前所長、田所篤博同次長、新潟大学泉宮助教授に有益な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。また長岡技術科学大学大学院生中村秀一君にはデータ整理、図面の作成について助力いただいた。ここに感謝の意を表す。

本研究の一部は、文部省科学研究補助金(一般研究(C) 07650610 研究代表者 辻本剛三)で行ったことを記してここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 荘司喜博・中山春雄・滝口要之助・黒木敬司・坂井隆行 (1990): 新潟西海岸における波、流れおよび地形変化の観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 429-433.
- 岡田 豊・河野二夫 (1991): 青島海岸に設置された潜堤の効果に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 321-325.
- 中田博明・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. 431-432.
- 滝川清・山田文彦・松本健作 (1995): 潜堤上碎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.
- 樫本亨・出口一郎・岡原義典 (1989): 幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 633-637.
- 細山田得三・早川典生・辻本剛三 (1996): 境界要素法による波動場数値計算の潜堤周辺流れ場への適用, 土木学会年次学術講演会 (印刷中) .