

透過性潜堤内外の流れ構造について

吉 田 茂*・早 川 典 生**・細山田得三***

1. はじめに

近年, 静穏な親水性海域の実現をはかり, 海岸を多目的に利用しようとする計画が各地で進められているが, その際, 波浪制御構造物として透過性潜堤が採用される場合が多い。これは景観保護の観点のみならず, 反射率の低減化, 海水交換の促進, 生態系の維持など, 環境にやさしい機能を重視していることが主な理由と考えられる。しかし実際の海岸では, 透過性潜堤の法先, 法尻では基部の侵食による堤体の沈下, 潜堤周囲や背後の底質の洗掘などの現象が生じている。これは透過性潜堤内部・外部の波動場と流れ場の相互作用にもとづくものと考えられるが, 現在までの所, 測定例も少ないため, 明確な説明はなされていない。そこでこれらの問題解決に向けてのアプローチの一つとして, 潜堤を含んだ流れ場全体の構造について調べることが重要であると考え, 本研究では透過性潜堤の模型実験を行い, 潜堤を通過する波により生じる潜堤内部及び外部の流速変動について詳細に計測した。そして全体の流れ場, 渦の挙動 (渦度の大きいものが対象), 主要な計測点において一周期間のベクトルの変動から見た空間的な流速場の特性について調べた。また SOLA-SURF 法によって, 波動場の数値計算を実施し, 実験結果との比較も行った。

2. 実験概要

本研究では, 2 次元波動水槽 (長さ 14 m, 幅 0.5 m, 高さ 0.8 m) を用い, 水槽内のほぼ中央部に台形型の透過性潜堤模型を設置した。模型の材料は粒径 20~25 mm の砂利で, 砂利が崩れるのを防止するため, 台形型に製作した鉄筋の枠に目の大きさが 12 mm の金網をかぶせたものに砂利を詰めた。模型寸法は天端幅 0.42 m, 底幅 1.02 m, 高さ 0.3 m とし, 表法勾配, 裏法勾配ともに 1:1 とした。また砂利の空隙率は実測により, 39.4% が得られた。実験水深は $h=0.4$ m, 潜堤の天端水深は $d=0.1$ m とし, 周期 $T=0.92$ s, 波高 $H=0.07$ m の規則波を入射

波とした。流速の計測点は基本的には図-1 に示すように, 3 cm×6 cm の格子点上であるが, 潜堤周辺の渦度を詳細に調べる必要から, 計測断面番号 14~52 区間の一部分は 3 cm×3 cm の格子点上であり, 計測点数は全部で 603 点である。潜堤の表法肩は 26 断面, 裏法肩は 40 断面とした。波高計としては容量式を用いており, 計測点の沖側及び岸側にそれぞれ一台ずつ波高計 (A 及び C) を固定した。また流速場の測定では, 水平・鉛直 2 方向が同時に測定できる電磁流速計を用いて計測した。外形が 4 mm のセンサーを用いた。この電磁流速計の直上に波高計 (B) を置き, これらを 1 セットとして計測点上を移動させることとし, 同じ条件の規則波を, 複数回 (繰り返し) 作用させて水位と流速の同時計測を行った。水位および流速のサンプリング間隔は 10 ms で, 各計測点上で 2000 個/ch のデータを取得した。そして位相合わせの為に計測点沖側の固定波高計 (A) によって計測された水位変動の時系列に基づいて, 水位及び流速データについてそれぞれ位相平均 (4 波~8 波について) をほどこし一周期間のデータとし, 解析を行った。なお本実験では透過潜堤内部の流速測定も行ったが, 流速センサーを堤体内に設置する場合, 砂利を掘り出し流速センサーを設置して, 再び砂利を埋め戻すことを繰り返すので, 潜堤表面の砂利の配列が異なり, 潜堤周辺の波動場, 流速場が厳密に言えば変化すると考えられる。そこで計測点岸側の固定波高計 (C) で通過波の root-mean-square 値を求め, 全実験の root-mean-square 値の平均値に対して, 5% 以上はずれたものを再実験の対象とした。

3. SOLA—SURF 法による波動場の数値計算

波動場の非線形性を十分に取り入れることが可能で, 自由表面の取扱いの比較的容易な SOLA—SURF 法により波動場の数値計算を実施し, 潜堤内部・外部について, 実験結果との詳細な比較検討を行った。計算式や計算手法については, 細山田ら (1997) によっている。計算上の条件は実験条件と同じにとる。沖側端の波動の与え方 (造波条件) としては, 時刻ごとに水位と水平流速 (微小振幅波理論による水平流速の深さ方向の平均値) を与える。数値計算上の格子間隔は, $dx=1$ cm, $dz=1$ cm,

* 正会員 工修 長岡工業高等専門学校助教授 環境都市工学科

** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

*** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

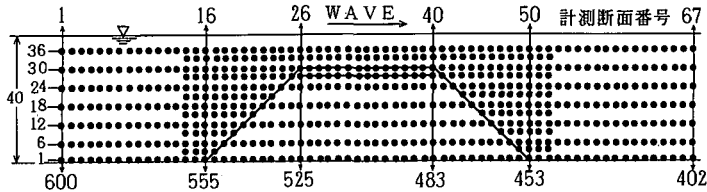


図-1 流速計測点位置図 (法面勾配 1:1, 単位: cm)

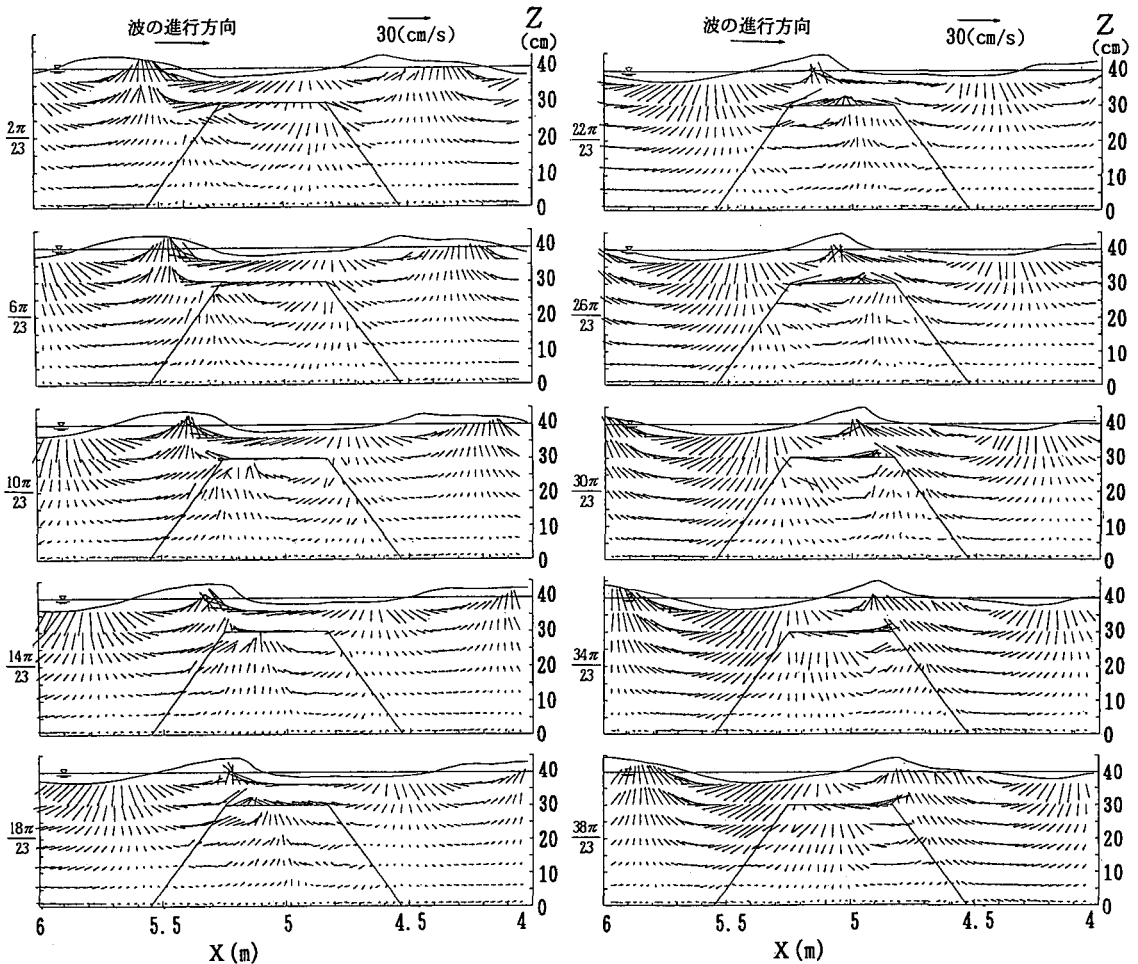


図-2 位相平均の流速ベクトル (実験値)

計算時間ステップは、 $dt=0.001\text{ s}$ で、データ取得時間範囲は $t=29\text{ s}\sim 30.84\text{ s}$ とした。その他、動粘性係数 $0.01\text{ (cm}^2/\text{s)}$ 、透水係数 $0.001\text{ (cm}^2)$ とした。

4. 実験結果と考察

4.1 実験による流速ベクトルの空間分布

図-2には、図-1の計測点上で得られた流速データについて、位相平均を施して得られた流速ベクトルの空間分布を示す。各図の左側に位相角を示す。流速ベクトル

の特性として、潜堤の沖側では部分重複波特有の性状を示している。すなわち、鉛直上向き最大流速の位相は、(水底近くでは進行波の場合に近いが) 水面に近いほど、進行波の場合に比べて、非常に進んでいる。しかも波が沖から潜堤に近づくにつれて、位相の進みの程度が大きくなり堤上では、その位相が継続し、潜堤岸側に入ると(波の復元と共に)進行波の場合の位相に近づくが、鉛直流速ベクトルは一点に集中せず分散することがわかる。なお本実験では天端上で碎波し、ここでは碎波後の波と

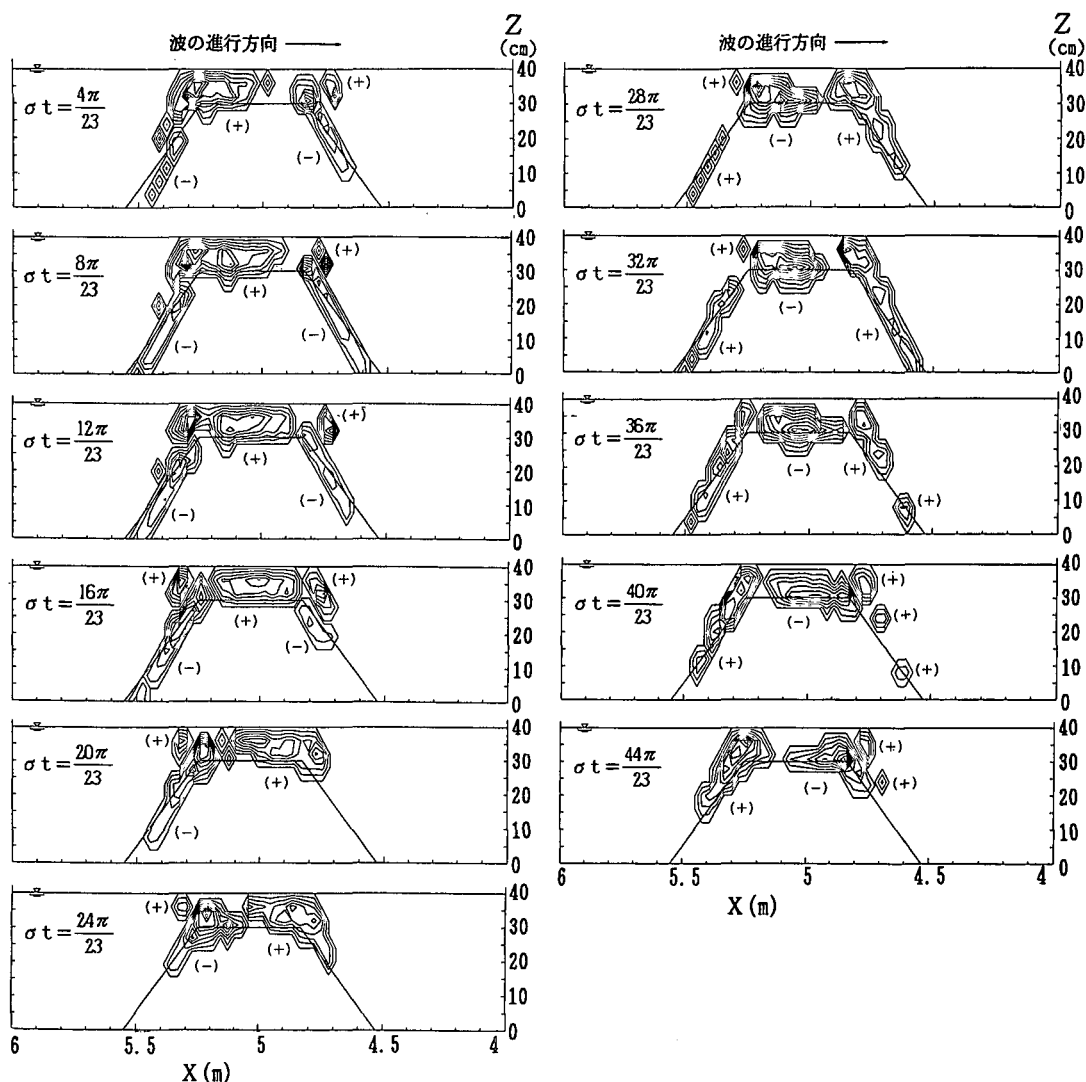


図-3 渦度の空間分布 (実験値, 渦度の絶対値 0.5 s^{-1} 以上のもの)

なっている。また透過潜堤内では位相の進みが緩和され、進行波の状態に近い。潜堤表法肩周辺では、引き波時の流速が極めて大きいことがわかる。実験における砕波の観察結果と、流速ベクトル図とを比較した所、波峰直下で流速ベクトルが一点で多重に交差している場合に砕波発生及び継続がほぼ対応していた。

4.2 渦度の空間分布

図-3には実験より得られた位相ごとの渦度の空間分布を示す。図中の σt は位相角で、図-2と同じとり方であり、また (+), (-) はそれぞれ正の渦、負の渦を示す。ここでは、渦度の絶対値が 0.5 s^{-1} 以上の強い渦にのみ注目し、潜堤周辺部での渦の挙動について議論する。図中の実線は渦度の等値線を示すもので、一番外側の線が $+0.5 \text{ s}^{-1}$ (正の渦) または -0.5 s^{-1} (負の渦) を示し、

それより内側に向ってそれぞれ $+0.5 \text{ s}^{-1}$ または -0.5 s^{-1} 間隔となっている。 $\sigma t = 2\pi/23$ では、表法面に一渦はないが、その後 $\sigma t = 3\pi/23$ で、表法先の内部で一渦が発生し、発生域が法面に沿って上方へ進む。 $\sigma t = 4\pi/23$ では、図のように一渦は表法面の下半分以上の範囲で発生している。表法肩には+渦があり、下から上昇する+渦を取り込んで渦度を強める。一方裏法肩には-渦があり、-渦はすでに裏法面を半分以上下降している。 $\sigma t = 8\pi/23$ では表法面の一渦の発生はさらに上方に及ぶ。表法肩の+渦は十分発達すると、図のように渦の一部は天端上を岸方向に進み徐々に移動速度を増す。また裏法肩の-渦は、その一部が下降するのに伴い渦度が弱まる。一渦は透過堤内の裏法尻 (海底) にまで達している。 $\sigma t = 12\pi/23$ のように表法面の一渦が天端に達すると、+渦の分裂が始

まる。裏法肩の一渦は急速に弱まると共に、裏法尻の一渦は消滅する。 $\sigma t = 16\pi/23$ では表法面の一渦の上昇により、天端上の+渦が分裂し、+渦は裏法肩に達する。これにより一渦は、裏法面内部に押し下げられて弱まり消滅寸前となる。 $\sigma t = 18\pi/23$ では、裏法面での一渦は完全に消滅する。 $\sigma t = 20\pi/23$ では、表法面の一渦の上昇が活発となり、表法肩の一渦が急速に渦度を強める。一渦は表法先の方から発生が徐々に停止する。一方天端上の+渦はさらに進行し、常駐の+渦と合体し、裏法肩で渦度を強める。裏法面上には一渦は存在しない。 $\sigma t = 24\pi/23$ では、表法面の一渦のさらなる上昇があり、表法肩の一渦はこれを取り込み極値に達すると共にその一部は図のように天端上を岸方向に移動する。+渦よりもやや低い位置を移動する。また裏法肩の+渦が極値に達すると渦は法面上（一渦の時よりも幾分外側）を下降する。 $\sigma t = 26\pi/23$ で、表法先の内部より+渦が発生する。 $\sigma t = 28\pi/23$ では表法面の下半分以上の範囲で+渦が発生している。表法肩の一渦はさらに岸の方に伸びて行く。一方+渦はこれに押されて裏法肩に集中するが、+渦の大きなものがどんどん下降する為、裏法肩の+渦はそれほど強くはならない。 $\sigma t = 32\pi/23$ では、図のように表法面の主に内部で強い+渦が発生する。また、裏法肩の+渦は依然活発であり、+渦は裏法尻内部に到達し、海底に大きな影響を与えていると思われる。 $\sigma t = 36\pi/23$ では、表法面の+渦は水面にまで達する。しかも法面上の渦はかなり強い。天端上の一渦はさらに進行し、裏法肩に達する。裏法肩及び裏法面の一渦は徐々に弱まり、消滅を始めている所も見られる。 $\sigma t = 40\pi/23$ では、表法先で+渦の発生が停止し渦の上昇と共に、表法肩の渦度が強まる。天端上を移動する一渦は、常駐の+渦と衝突し、裏法面を下降し始める。裏法面の+渦はさらに弱まる。 $\sigma t = 44\pi/23$ では、表法面では+渦の上昇がさらに活発となり、表法肩で渦度を強める。一方天端上の一渦は裏法肩に集中し、渦度を強めるとともに裏法面での渦の下降も活発となる。潜堤まわりの渦の挙動については、以上のようなことが、表法先での、一渦の発生が $\sigma t = 3\pi/23$ 、+渦の発生が $\sigma t = 26\pi/23$ となることから、一渦、+渦は半周期ごとに交互に発生していることが確認された。また、引き波時には、表法肩に強い+渦が、裏法肩には強い一渦が形成され、押し波時にはこれが逆になることがわかった。さらに一渦の発生及び消滅は主として透過堤体内部で行われているのに対し、+渦はそれよりやや外側の境界にまたがった所で行われていることがわかった。

4.3 数値計算による流速ベクトルと渦度

図-4には、SOLA-SURF法による数値計算結果の例を示す。ここでは実験(図-2)で定めている位相角 $\sigma t = 0$ のベクトル分布に最も近いベクトル分布をなす数値

計算のベクトル図を位相角 $\sigma t = 0$ にとっている。ただしベクトル図は、どちらも位相角 $(2\pi/23)$ 間隔で描いた。数値計算と実験とを比較すると、全体的には潜堤内部・外部共に、流速ベクトルは向き、大きさ共に実験値と良く一致しているといえる。数値計算によるものも鉛直上向き流速ベクトルの位相が、水面に近いほど進んでおり、実験と一致した。また境界付近の流速も良く一致している。若干異なる点としては、1)潜堤法肩の外部及び内部で引き流速が実験値の方で大きいこと。2)数値計算によるものは、潜堤を過ぎると鉛直上向き流速ベクトルの位相は、急速に是正され進行波の性状に近づくこと。3)流速と波形との間の位相差は数値計算の方が小さい。この理由については沖側造波条件(流速)、岸側端条件、計算時間などのうち複数のものが影響していると考えられる。次に渦度の空間分布の例を示す。比較のため数値計算では計算後、実験と同じ格子点の渦度のみをとりだし、渦度の絶対値が 0.5 s^{-1} 以上のものについて作図を行った。そのため等値線は直線的になっている。図には特徴ある2例を示したが、まず数値計算の $\sigma t = 12\pi/23$ では、天端上で渦が分裂直前の状態であり、実験値と良く一致している。また、表法面における渦の発生や裏法面における渦の分布などの様子も良く表わされている。また数

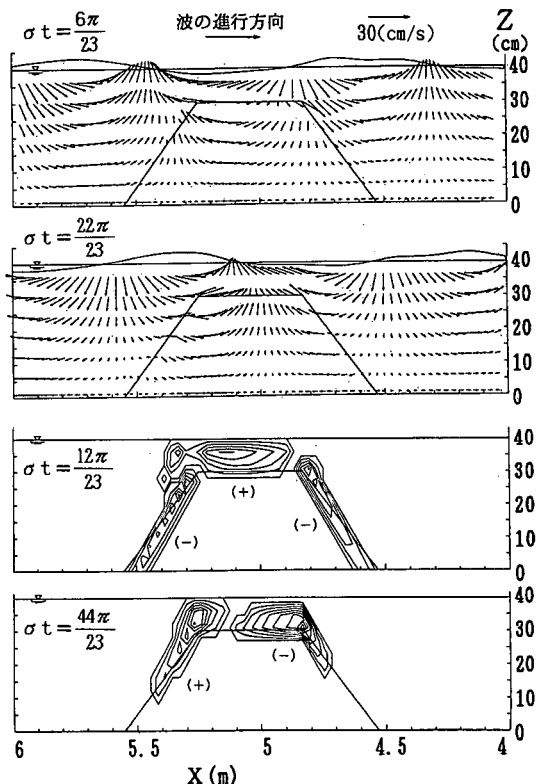


図-4 数値計算による流速ベクトルおよび渦度

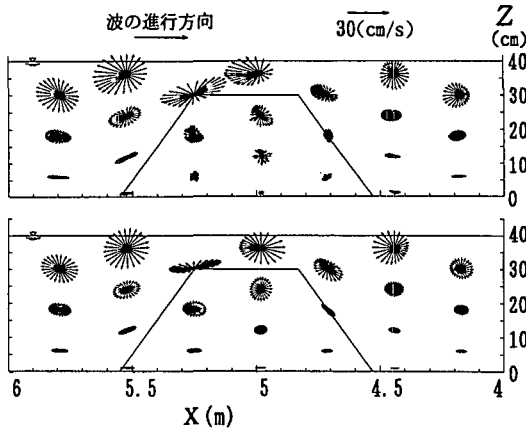


図-5 一周期間の流速ベクトル
(上段:実験値,下段:数値計算値)

値計算の $ot=44\pi/23$ は渦が、沖側法肩、岸側法肩でそれぞれ均衡を保っている様子を示し実験値と極めて良く一致している。両者が異なる点としては、実験値の方で、岸側法肩の上部に常駐の渦が存在している点である。

4.4 流れ場の特性

図-5は一周期間の流速ベクトル変動の空間分布を示す。まず実験値の方で見ると、潜堤沖側のベクトル楕円の長軸が傾斜しており、部分重複波の影響と見られる。水面に近い所では、ベクトル楕円の中心が偏心しており、戻り流れの影響と見られる。表法肩では鉛直流速がかなり大きく波高増大に寄与している。天端上では楕円の中心が著しくずれており戻り流れが卓越している。岸側では、本来の楕円、つまり微小振幅進行波の性状に近づいており、また波動成分の減衰も大きくなっている。潜堤内部では、表法面に近い所で、若干の沖向き流速が見られた。また数値計算では、実験と概ね良く一致(楕円軸の大きさ・傾斜など)しているが、沖側ではほぼ正規の楕円となっている。天端上では、質量輸送と思われる岸向き流れがある。潜堤内部では特に流れの卓越方向は認められない。その他、実験に関して、まず図-2の波形の空間分布から堤上の碎波の有様、碎波後の波の減衰が観察される。また連続式の満足度を調べる為、透過潜堤内に5つの異なる矩形の検査面をとり、一周期間について $100 \times |(\text{流入する水体積}) - (\text{流出する水体積})| / (\text{検査面水体積})$ で誤差率を表したところ、誤差率は0.1%~1.6%となった。

5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下に示す。

(1) 位相ごとに流速ベクトル(図-2)を比較した結果、潜堤を含んで沖側では、鉛直上向き流速に着目すると、深さ方向に位相が変化し、特に水面付近では、微小振幅進行波に比べ、位相が大きく進んでいることがわかった。また波が潜堤に近づくほどこの位相の進みが大きくなるが、天端上ではほぼ一定のままで進行する。

(2) 潜堤内部では鉛直上向き流速の深さ方向の位相差は緩和される。また潜堤岸側では、波の復元とともに深さ方向の位相差は徐々に緩和される。

(3) 実験より得られた渦度(絶対値 0.5 s^{-1} 以上のもの)の空間分布(図-3)について、位相を追って一周期間の渦の動きを追跡した。その結果、表法先の堤体表層で、+渦、-渦が半周期ごとに交互に発生することを確認した。またこれら表法面での渦の発生・表法肩での集中・天端上での移動・裏法肩での再集中・裏法面での消滅など、渦に関する一連の過程について把握できた。

(4) 実験と数値計算について、位相ごとに流速ベクトル・渦度・波形の空間分布を比較(図-4)した結果、両者は良く一致することがわかった。しかし波形と流速の間の位相差は、実験の方が数値計算よりも少し進んでいることがわかった。

(5) 一周期間の流速ベクトル(図-5)を描くと、中心位置のずれた楕円(歪んだ楕円)や軸の傾斜した楕円が得られる。この歪んだ楕円は質量輸送や戻り流れを表わし、また楕円軸の傾斜は境界の影響、反射、境界の影響からの解放等の意味を持つものと考えられる。実験と数値計算とを比較すると、両者は潜堤内部も含めて良く一致しているが、異なる点は実験の方は沖から天端にかけて、水面近くで若干の戻り流れが生じ、一方数値計算では天端上で若干の質量輸送が見られる点である。

謝辞：本実験の実施に当り、模型の製作は本校の佐藤隆司技官、また実験の大部分は当時卒業研究生だった大竹洋、本間秀則、池田友樹、阿部光弘の4君の熱心な協力のもとで行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 細山田得三・吉田 茂・早川典生・辻本剛三 (1997): SOLA—SURF 法による潜堤周辺波動場の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 86-90.