

II - 5

透水層埋設による海岸保全工法の水理特性について

室蘭工業大学大学院	学生員	○宮武 誠
室蘭工業大学	正会員	藤間 聡
室蘭工業大学	フェロー	近藤 俊郎
アルファ水工コンサルタンツ(株)	正会員	川森 晃

1.はじめに

最近、砂浜内地下水位を低下させて、前浜の侵食軽減・堆積促進を行う工法が数多く提案されている。この地下水位低下による海岸保全工法は、遡上域での浸透能力の増大により戻り流れを抑制し、浮遊砂の捕集・堆積を促進させる特徴を有している。その中で、砂浜内に埋設した透水層により浸透した地下水を沖側に自然排水させ、地下水位上昇を軽減する工法が開発されている。この透水層埋設工法は従来の堤防を有する侵食防止工法に比べ、海浜景観を損なうことなく自然に近い形で保全でき、建設費や運転費といった面での経済性を有した有効な工法である。

本研究では、砂浜内の地下水流動に関する模型実験及び数値解析を行い、前浜の侵食機構と地下水流動特性の関係を明らかにする。また、透水層設置後の侵食防止機構を把握し、実海域に設置する際、前浜侵食を最小限に抑制するための透水層の最適な層厚の検討を行うものである。

2.砂浜内の地下水流及び侵食機構に関する2次元模型実験

2.1 実験装置及び方法

実験は図-1に示すフラップ式造波機を有する長さ1600cm、高さ90cm、幅75cmの2次元造波水路により行った。水槽左端底部には、中央粒径0.1mm、比重2.67の珪砂を使用して天端幅100cmを有する長さ700cm、高さ60cm、海底勾配1/10の砂浜地形を作成した。砂層内に埋設する透水層の構成材料は中央粒径10mmの碎石とし、透水層と砂層の境界には砂混入防止のためフィルタ材としてプランクトンネットを使用した。

入射波は波高8.5cm、周期1.28secの規則波とし、4時間作用させた時の海底斜面上の水面変動量及び砂浜内地下水位、地形断面変化の測定を行った。斜面上の水面変動量は岸沖距離400~600cm区間で設置した4本の容量式波高計及びそれより岸側の領域では2台のデジタルビデオカメラにより測定を行い、平均水位の算定を行った。地下水位は内径6mmのガラス製マンメータを汀線から岸方向に20cm間隔で10本、水槽底部から20cmの深さに設置して読定した。また、地形断面変化は水層奥行き方向に設置した三測線上で岸沖方向に5cm間隔で測定を行い、その平均値を使用した。

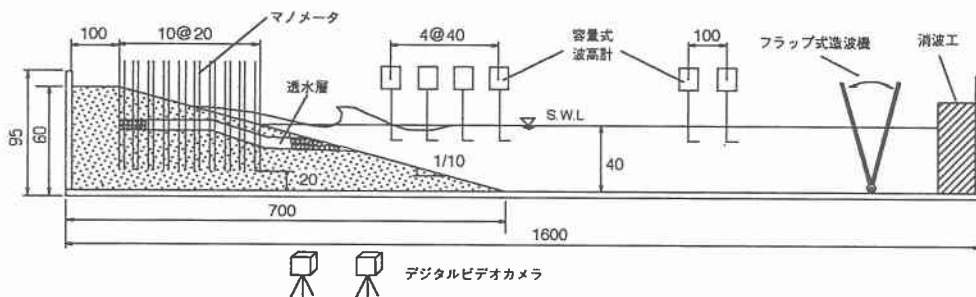


図-1 実験水層及び装置の概要図 (単位:cm)

Hydraulic Characteristics of Beach Stabilization with Drainage Layer System
By Makoto MIYATAKE, Hideo KONDO, Satoshi TOHMA, Akira KAWAMORI

2.2 透水層の設置位置及び層厚

実験は透水層設置前・後の侵食状況の変化を明確にするため、透水層がない場合と埋設した場合について行った。砂浜内に設置した透水層は図-2に示す層厚が、それぞれ5 cm、10 cm及び15 cmの場合について検討した。透水層の配置はいずれも、静水位上とし、出口部を平均水位が最も低下する砕波帯に接続するため、透水層の勾配は途中で変化した。出口部は砕石が斜面上に露出するようにした。

2.3 透水層厚による前浜侵食の抑制効果

図-3(a)は、透水層がない場合の地形断面変化を示したものである。実験開始から60分経過までに岸沖距離340～400 cmの間では巻き波型の砕波が発生した。そのため最大侵食深は350 cm地点で6.3 cm程度に達し、遡上域での侵食に比較して砕波帯での洗掘が卓越する。その後、120分経過後では砕波帯での洗掘はほぼ停止するのに対し、遡上域での侵食区間が更に後浜まで拡大している。この侵食状況の変化は地形変化に伴い、砕波形態が巻き波型から崩れ波型へと変化したことと考えられる。実験終了時には遡上域から砕波帯に至る全区間で侵食深は4～6 cm程度に達する。一方、400 cm地点より沖合においては実験開始60分経過後から砂州の形成が認められる。この砂州は前浜侵食の増大により沖側に拡大しながら移動する。

図-3(b)は、層厚5 cmの透水層を設置した場合の地形断面変化を示す。透水層の出口部を砕波帯に設置し

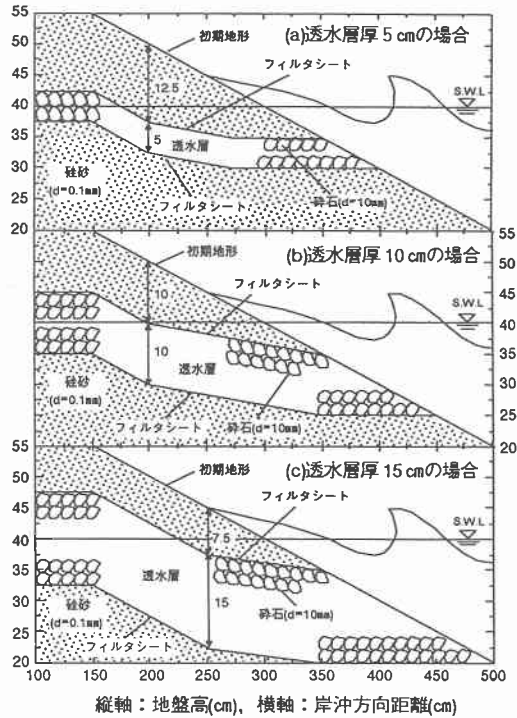


図-2 検討した透水層の配置及び層厚 (単位: cm)

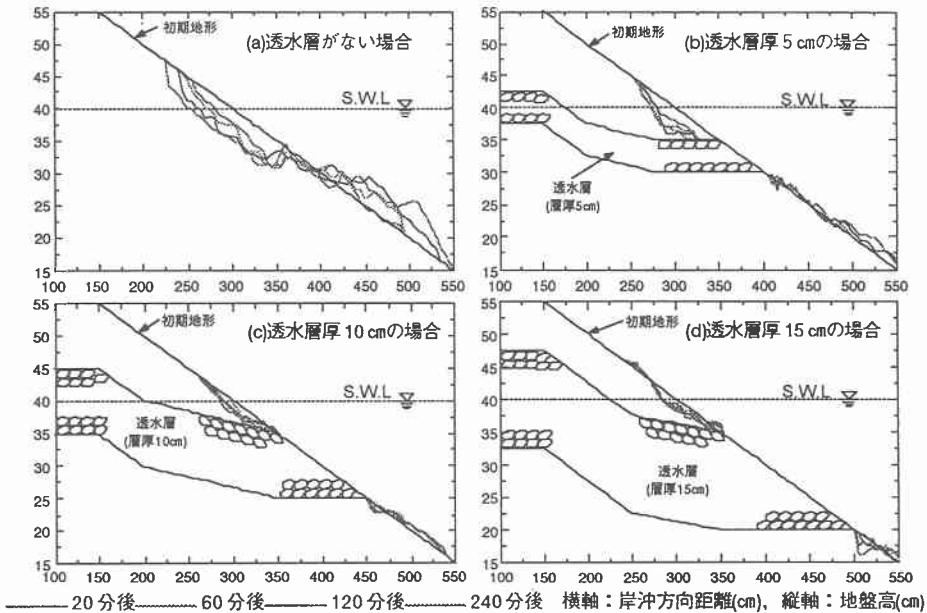


図-3 透水層の層厚による地形断面変化

た結果、表面粗度の増加及び碎石の自重により波エネルギーを減殺し、碎波帯での大規模な洗掘を防止している。遡上域での侵食範囲は透水層設置前に比べ半分以下に縮小しているが、侵食深は設置前とほぼ同程度に達する。一方、岸沖距離 300～350 cm 区間では戻り流れの影響を受け、透水層が一部で露出した侵食状況となっている。この結果、5 cm 厚の透水層は十分な集水効果がないため、卓越した戻り流れによる浮遊砂を抑制できず大規模な侵食が発生すると推定される。図-3(c)は、層厚 10 cm の場合の地形断面変化を示す。遡上域での侵食範囲及び碎波帯での洗掘は、層厚 5 cm の場合と同様に抑制している。遡上域では戻り流れによる浮遊砂が発生するが、最大侵食深は 2.1 cm 程度と層厚 5 cm の場合に比べ 1/2～1/3 に減少する。これは、遡上域での浸透能力の増大により、一度巻き上げられた底質砂が再度、砂層に堆積し岸沖漂砂を抑制しているものと推定される。層厚を 10 cm にした結果、明らかに侵食抑制効果が認められる。この地形変化は 20 分経過後で 5 mm 程度と微少になりほぼ定常状態に達する。図-3(d)は、層厚 15 cm の場合の地形断面変化を示す。遡上域での岸沖距離 245～255 cm 区間で 2 cm 程度の堆積が認められる。これは透水層厚の増大により集水効果が更に高まり、遡上波の最高到達点で浮遊砂が堆積したと考えられる。しかし侵食範囲及び侵食深はともに層厚 10 cm の場合とほぼ同程度であり、層厚 10 cm 以上の侵食抑制効果は得られないことが認められる。

2.4 透水層厚による地下水位の変化

図-4 は実験開始 12 分経過後の測定地下水位及び透水層がない場合と層厚 10 cm の場合の平均水位を示している。透水層がない場合、前浜地下水位は Wave set-up により上昇し、沖側の平均水位より高い位置で定常状態に達する。この前浜地下水位の上昇は、遡上域の砂層内に飽和領域を形成し、底質砂を浮遊させる。この結果、戻り流れによる掃流と相乗して侵食速度を加速しているものと考えられる。

層厚 5 cm の透水層を設置した場合、地下水位は上昇し、その上昇量は透水層設置前の約 1/2 に相当する。この結果、層厚 5 cm の場合では、浸透した地下水を十分に排水できず、前浜地下水位は沖側の平均水位より高い位置にあり、設置前とほぼ同様な侵食現象が発生したと考えられる。層厚を 10 cm とした場合、地下水位の上昇量は 5 mm 以下となり、ほぼ静水位で定常状態に達する。これは、浸透水が透水層により集水され、速やかに沖側排水された結果と推定される。平均水位の上昇量は浸透能力の増大により設置前に比べ低下する。従って、この透水層の集水効果は戻り流れを抑制し、遡上域での侵食を大幅に防止すると考えられる。層厚を 15 cm と厚くした場合においても、地下水位は 3 mm 程度上昇し、層厚 10 cm の場合とほぼ同位置にある。そのため層厚 15 cm の場合は層厚 10 cm 場合に比して侵食抑制効果にあまり大差がなかったものと考えられる。

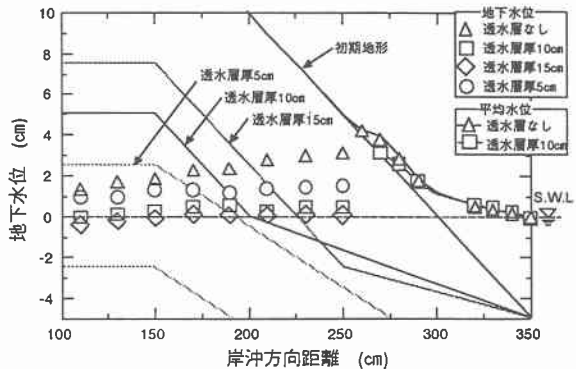


図-4 各ケースによる測定地下水位

3. 砂浜内の地下水流動特性

実験では透水層を設置した結果、前浜地下水位の上昇を抑制し、前浜侵食を大幅に軽減できることを明らかにした。また、層厚を薄くすると地下水位は上昇し、侵食抑制効果は半減することを明らかにした。更に透水層厚による侵食抑制効果を詳細に把握するため、実験では測定困難な地下水の流速及び流向について、数値解析を行い検討した。

3.1 基本方程式

砂層内は全て飽和領域であると仮定して、以下に示す2次元地下水流動方程式を適応し、砂浜内の地下水位及び浸透流速・流向の算定を行った。

$$S \cdot \partial h / \partial t = K \cdot \nabla^2 h \quad (1)$$

$$V = -K \cdot \nabla h \quad (2)$$

ここに、 h は位置水頭と圧力水頭の和で与えられるピエゾ水頭、 S は比貯留係数であり、圧力水頭の変化に対する空隙率の変化の割合を表す。 V は浸透流速、 K は透水係数である。

3.2 解析座標系及び境界条件

各時間ごとの地下水位及び浸透流速・流向の計算は直角格子を用いた差分法により行った。解析に用いた座標系は実験で得られた海底斜面上の平均水位と浸透流を結合させるため、図-5に示すように独立させて設定した。波変形に関する座標系は静水位時の汀線 E 点を原点とした、鉛直方向に η 軸、水平方向に ξ 軸とし、各砂浜の境界に課した境界条件は以下のようである。

①海域と接する飽和境界(AE 面): 水面変動量 $\pm \eta$ と静水時の水深 d との和を圧力水頭 φ とし、位置水頭 z との和で与えた。

$$h = \varphi + z \quad (3)$$

②大気と接する不飽和境界(BE 面): E 点からの鉛直距離を負の圧力水頭 $-\varphi$ として位置水頭 z との和で与えた。

$$h = -\varphi + z \quad (4)$$

③水層上端及び底端境界条件($AD \cdot CD$ 面): 境界に対して法線方向の浸透流速を零とした。

なお、斜面上の平均水位は、地形変化が少ない実験開始12分経過後の値を使用し、欠測している計算点については3次のスプライン関数で補関した値を用いた。

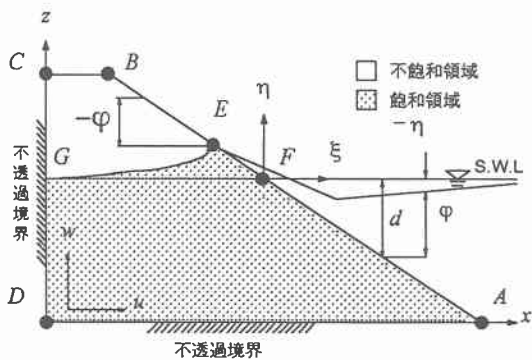


図-5 解析座標系及び境界条件

3.3 計算方法

浸透流解析に関する座標系は境界左端底部 D 点を原点にとり、水平方向に x 軸、鉛直方向に z 軸とした。砂層内の圧力水頭分布の計算は(1)式を使用して、交互方向陰解法により求めた。 x 軸及び z 軸方向の差分式は下記のようなものである。地下水位は図-5に示す領域 $BCGE$ の不飽和領域で圧力水頭を負値として与えているため、圧力水頭が零となる点を連ねた線とした。

$$S(h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) / \Delta t = K(h_{i+1,j}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i-1,j}^k) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i,j-1}^k) / \Delta z^2 \quad (5)$$

$$S(h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) / \Delta t = K(h_{i+1,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i-1,j}^{k+1}) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i,j-1}^{k+1}) / \Delta z^2 \quad (6)$$

ここに、下添字 i, j は空間格子の位置、上添字 k は時間格子の位置、 $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ はそれぞれ x, z 軸方向の格子間隔、時間ステップである。また、浸透流速・流向の計算は得られた水頭値により(2)式を使用し、中央差分により求めた。なお、砂層内の透水係数は実験値である $K=1.44 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ とし、透水層内の透水係数はForchheimerが提案した実験式²⁾により決定した値 $K=1.247 \text{ cm/s}$ を与えた。砂層内の比貯留係数 S は $S=0.0096 \text{ cm}^{-1}$ とし、透水層内ではそれより1オーダー低い値とした³⁾。

3.4 透水層内における地下水位分布特性

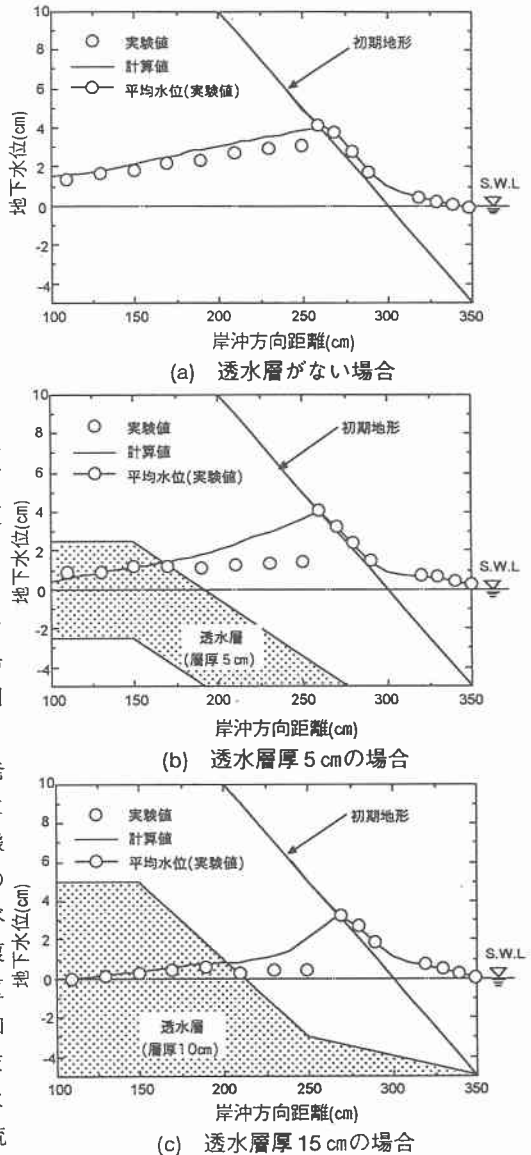
図-6(a)は、透水層がない場合の地下水位分布の計算及び実験結果を示す。計算地下水位は、プロットして表示した実験値と同様に線形的に上昇する。両者の差は最大でも5mm程度であり、ほぼ妥当な精度で実験値と一致する。図-6(b)は層厚が5cmの透水層を設置した場合を示す。計算地下水位は透水層内で実験値と同様に低下するが、透水層上部の砂層内では設置前とほぼ同程度に上昇し、実験値のような低下は見られない。層厚10cmの場合

を図一6(c)に示す。透水層内の計算地下水位は層厚5cmの場合より更に低下して、実験値にほぼ一致する。透水層上部の砂層内では、計算地下水位は層厚5cmの場合に比べ最大で1.8cm低下し、勾配は急な分布形状となる。従って、10cm厚の計算値水位では透水層内・外において地下水位の低下が認められる。15cm厚の計算地下水位においても、層厚10cmの場合とほぼ同程度の低下量となる。

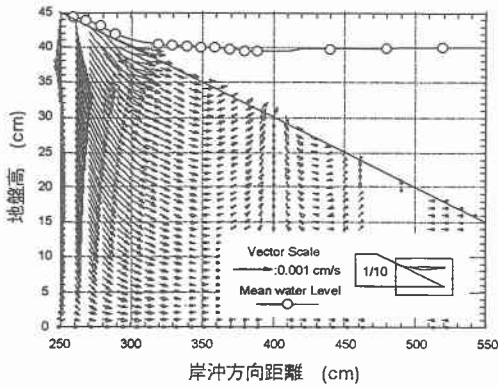
3.5 透水層の層厚による浸透流特性

図一7(a)は透水層がない場合の浸透流速分布を示す。浸透した地下水は岸沖距離260cm地点から沖側に向かって平均水位の低下する400cm地点に集中する。この区間の砂層内では、斜面に沿う平行な流れが発生し、斜面上では一度浸透した地下水が再度、砂層表面に戻ろうとする復帰流が発生する。この平行流及び復帰流は、碎波による巻き上げや戻り流れによる掃流といった侵食現象を助長すると考えられる。

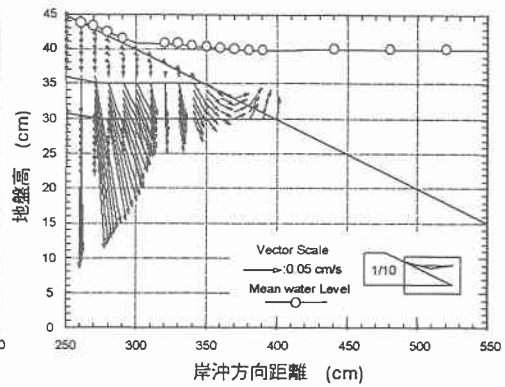
図一7(b)は透水層厚が5cmの場合の浸透流速分布を示す。平均水位の最も低下する透水層出口部では復帰流が発生する。この復帰流の流速及び発生する区間は、層厚10cm及び15cmの場合の1/5程度と小さい。透水層上部の砂層内では、設置前と同様に平行流が発生する。よって浸透した地下水は透水層により十分に集水・排水できず、地下水位は上昇し、設置前と同様に侵食されると考えられる。図一7(c)は層厚10cmの場合を示す。透水層内の流速は周りの砂層内に比べ $10^2 \sim 10^3$ 倍程度となる。透水層出口部で発生する復帰流は、設置前の 10^3 倍程度速くなり、出口部の全区間で発生している。よって浸透した地下水は沖側出口部から速やかに排水されているものと推定される。また、透水層上部の砂層内では透水層の集水効果により、設置前の流速より2~3倍程度速くなり、その流向は鉛直方向に卓越する。この侵食に寄与しない鉛直流は戻り流れを抑制し、遡上域での侵食を大幅に軽減するものと推定される。層厚15cmの場合の浸透流速分布を図一7(d)に示す。透水層内及び復帰流の流速は共に層厚10cmの場合とほぼ同程度である。復帰流の発生する位置は層厚10cmの場合にほぼ一致している。それより沖側の出口部では微小な流速が発生するが、排水機能には寄与していない。よって層厚を厚くしたことによる透水層の排水機能の向上は認められない。一方、透水層上部の砂層内では、流速・流向ともに層厚10cmの場合とほぼ同様に鉛直流が卓越する。



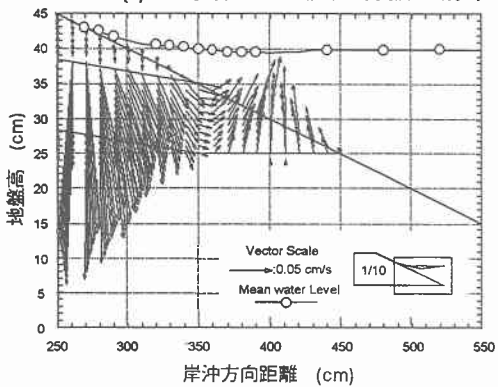
図一6 地下水位分布の計算結果



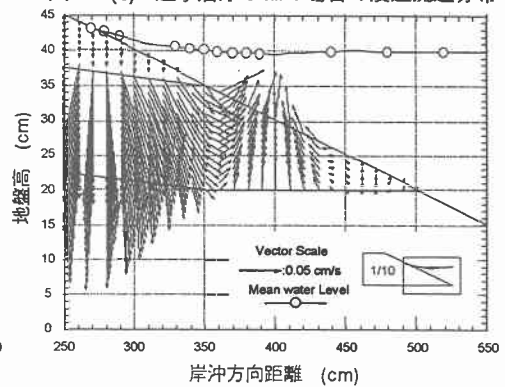
図一 7(a) 透水層がない場合の浸透流速分布



図一 7(b) 透水層厚 5 cm の場合の浸透流速分布



図一 7(c) 透水層厚 10 cm の場合の浸透流速分布



図一 7(d) 透水層厚 15 cm の場合の浸透流速分布

4. 結び

本研究で得られた結論を要約すると以下のようである。

- (1) 前浜地下水位の上昇により砂層内では平行流や復帰流が発生する。これらの地下水流動特性は、碎波による巻き上げや戻り流れと相乗して前浜の侵食速度を加速させる。
- (2) 透水層を埋設した結果、透水層上部の砂層内では透水層の集水・排水機能により鉛直流が発生する。その結果、地下水位の低下により戻り流れは抑制され、遡上域での侵食を大幅に軽減できる。
- (3) 透水層の層厚が 5 cm と薄い場合、それに伴い透水層の集水・排水機能は半減する。よって浸透水を十分に集水・排水できず地下水位は上昇する。その結果、斜面上では平行流が卓越し、透水層がない場合と同様な侵食現象が発生する。
- (4) 層厚が 15 cm と厚い場合、透水層の集水・排水機能は向上せず、層厚 10 cm 以上の侵食抑制効果は得られない。
- (5) 侵食抑制効果に寄与する透水層の集水・排水機構を考慮すると、10 cm 厚の透水層が最適な層厚である。

謝辞

本研究には文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(1)代表者 田中 仁東北大教授の補助を受けた。記して謝意を表します。また、実験に多大な協力を頂いた本学 4 年目、阿部 高広、中西 裕介両君に感謝致します。

参考文献

- 1) 宮武 誠・近藤俊郎・藤間 聡・川森 晃：透水層埋設による前浜付近の浸透流特性，海岸工学論文集，第 4 6 巻，1999，pp706～710。
- 2) Forchheimer.Wasserbewegung durch Boden.Z. Ver.Deutsch.Ing.45,1901,pp.1171-1788.
- 3) 水文・水資源学会編：水文・水資源ハンドブック，朝倉書店，p75，1997。