

前浜浸透流が汀線侵食現象に及ぼす影響について

宮 武 誠*・藤 間 聡**・川 森 晃***

1. はじめに

砂浜海岸の汀線後退や前浜勾配の急峻化といった侵食現象の解明は、海岸環境保全上急務な課題である。そのためには、砂浜斜面上における波の遡上・流下運動に伴う地下水の浸透・浸出及び前浜地下水位の上昇を考慮に入れた水理現象を把握することが不可欠である。遡上波による斜面上の地下水浸透・浸出に関する研究は、過去に数多く行われている。Packwood (1983) は、乾燥した砂層地盤に遡上波が浸透する状態を鉛直方向の浸透流で再現した数値モデルを提案し、不透過斜面と浸透斜面における遡上波変形の相違について考察した。更に浅野ら (2000) は、Packwood の数値モデルを使用して、地下水の浸透・浸出が漂砂量に及ぼす効果を定量的に評価した。しかし、上記の研究は特殊な条件下の砂層地盤において、1次元浸透流により波浪変形を主眼とした検討であり、前浜地下水位の上昇及び不飽和砂層の水分保湿状態を考慮した2次元浸透流と汀線侵食の関係を考察した論文は少ない。

本研究は、前浜地下水位と汀線侵食に関する模型実験及び浸透流と波浪変形を接続させた数値解析を行い、斜面上の地下水浸透・浸出及び前浜地下水位の上昇が汀線付近の侵食に及ぼす影響を検討するものである。

2. 前浜地下水位と汀線侵食に関する模型実験

2.1 実験方法

実験は、図-1に示すスネーク式ピストン造波機を有する長さ20 m、幅8 m、高さ70 cmの3次元水槽に長さ7 m、高さ60 cm、後浜天端1 mを有する海底勾配1/10の砂浜模型を作成して行った。底質砂は、中央粒径0.1 mm、比重2.68の珪砂を使用し、同砂の透水係数は $K=1.44 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。入射波の波高及び周期は、表-1に示す。入射波はすべて規則波とし、造波板と直角方向に60分間連続造波させ、砂浜斜面上の水位変動、遡上波先端位置、砂浜内の地下水位変動を0.2秒間隔で同期させて測定した。

斜面上の水位変動は、容量式波高計を岸沖方向距離3.5 m~6.0 m 区間に50 cm 間隔で6本設置し測定した。沖波波高及び周期は、造波板から1.5 m 岸側に離れた一様水深部に波高計を設置し算定した。遡上波先端位置は、静水時汀線から鉛直上方1 m に設置したデジタルビデオカメラにより撮影し、1 cm 間隔の直交格子より読定した。地下水位は、直径10 cm の塩化ビニール管を水平床部から30 cm の高さに埋設し、その管内に形成される水面を容量式水位計により計測した。地下水位の測定位置は、遡上波先端付近、後浜法面部、後浜天端部（それぞれ岸沖方向距離2.2, 1.6, 1 m 地点）の3地点とし、

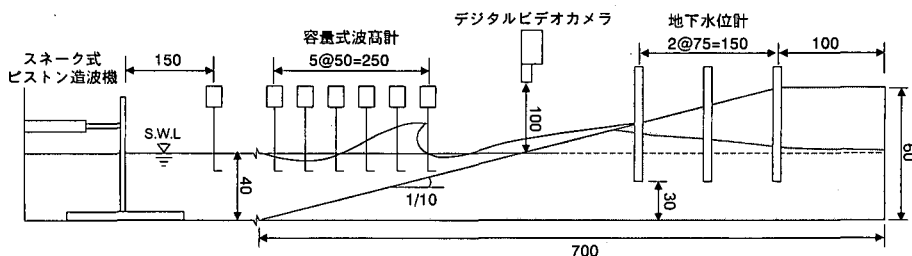


図-1 実験装置の概要図 (単位: cm)

* 学生会員 工修 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻
** フェロー 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
*** 正 会 員 工博 (株)アルファ水工コンサルタンツ

表-1 入射波条件

実験名	波高 H_0 (cm)	周期 T_0 (sec)	波形勾配 H_0/L_0
Run-1	8.85	1.21	0.039
Run-2	6.51	1.18	0.030
Run-3	9.31	1.66	0.022

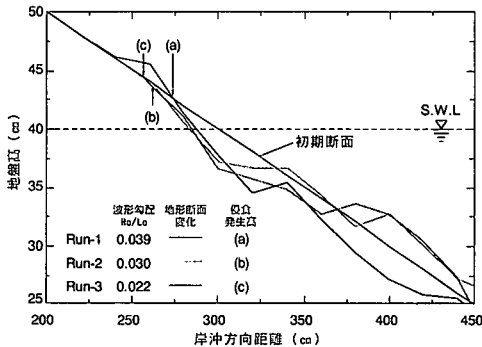


図-2 波形勾配による地形断面変化

塩化ビニール管は砂混入防止のため、フィルタ材で被覆して埋設した。また、実験終了時には砂面計を用い、沿岸方向の5側線について、岸冲方向に5cm間隔で侵食深を測定した。

2.2 波形勾配による汀線侵食現象

図-2は、実験終了時に得られた地形断面変化を示す。波形勾配が大きい場合、波エネルギーの逸散は碎波帯内で集中するため、碎波帯での洗掘深が卓越する。これに対して波形勾配が減少すると、波エネルギーの逸散は、碎波帯から波打ち帯までの広範囲に及ぶ。そのため乱れを伴う遡上波が、汀線付近の侵食深を増大させる。この結果、洗掘の発生位置は、碎波帯から汀線付近に移動する。図中の矢印は、斜面上の侵食発生位置を示す。波形勾配が大きい場合、汀線より岸側では堆積が生じ、バームが形成される。しかし、波形勾配が減少すると、侵食は斜面上の更に高い位置から発生する。以上の結果、波形勾配が小さいほど汀線付近の侵食は進行する。本研究は、この汀線侵食現象に関して、地下水の浸透・浸出及び前浜地下水位の上昇による影響を定量的に評価する。

2.3 砂浜斜面上の地下水浸透・浸出による影響

実験で得た遡上波先端位置の観測値を用いて、遡上波先端流束及び地下水浸透・浸出流束を算定する。算定に用いたエネルギー法はスカラー量を取り扱ったものであり、ベクトルの異なる遡上波先端流束と地下水浸透・浸出流束を1本の平衡方程式で表すことが可能である。図-3に示すモデルにおいて、静水位から遡上波の最大到達地点までの高さを η_{max} とすると、下記のエネルギー平衡方程式を得る。

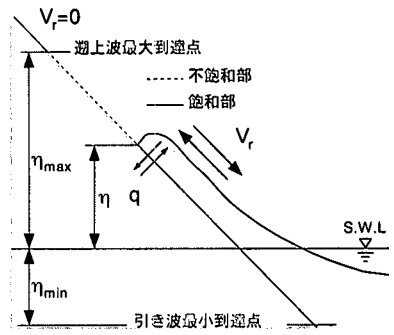


図-3 モデル概要図

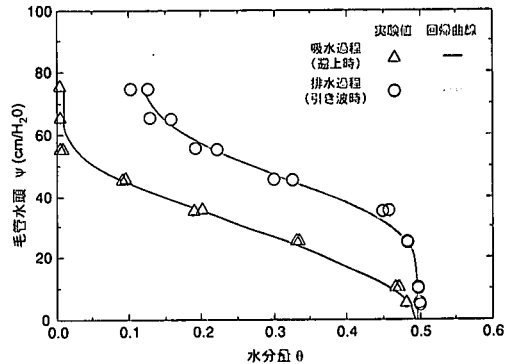


図-4 実験砂の水分保持特性曲線

$$\frac{V^2}{2} + g\eta = g\eta_{max} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 η は波の遡上または流下時の遡上高、 g は重力加速度、 V は、遡上波エネルギーの消長が地下水の浸透・浸出によって生じるものとして、下記のように取り扱う。

$$V = V_r + q \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_r は遡上波先端流束、 q は遡上波先端における地下水の浸透・浸出流束であり、砂浜への浸透を正、浸出を負とする。浸透・浸出流束は遡上波先端を基準にして、その上部の砂層表面を不飽和部、下部を飽和部とし、下記の差分式より求める。

$$q = -S_y \frac{\partial \eta}{\partial t} = -S_y \frac{\eta_{max} - \eta}{\Delta t} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 S_y は砂層内外に浸透・浸出しうる割合を表す比浸出量である。不飽和部に対する比浸出量の算定は、図-4に示す土柱法により得た水分保持特性曲線を用いる。図中の回帰曲線は、5次多項式近似で補間したものを示す。比浸出量は、地下水位が静水位にあるとし、静水位から遡上波先端までの高さを毛管水頭 ψ として、下式で算定する。

$$S_y = \theta_s - \theta(\psi) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 θ_s は飽和水分量、 $\theta(\psi)$ は毛管水頭 ψ に対する水分量を表す。

図-5(a)は、Run-3における遡上波先端流束分布を示す。遡上波先端流束は、遡上・引き波時ともに遡上高の減少に伴い増加し、汀線付近で最大となる。図-5(b)は、Run-3における地下水浸透・浸出流束分布を示す。遡上時の地下水浸透流束は遡上高の増加に伴い、その絶対値は増加し、遡上波先端流束を減少させる。一方、引き波時の地下水浸出流束は、遡上波の流下方向に向かって加速し、汀線よりやや上方で最大となる。この地下水浸出流束は、引き波時の遡上波先端流束を加速させ、汀線侵食の増大に寄与する。しかし、地下水の最大浸出流束は0.065 cm/sであり、底質砂の移動限界流速0.9 cm/sに比して微小な値となる。この結果、汀線付近の洗掘は、遡上波による掃流力に起因し、地下水の浸出による影響は小さいものと考えられる。

2.4 前浜地下水位の上昇による影響

図-6は波形勾配による地下水位及び遡上高の空間分布を示す。遡上波先端付近(岸沖方向距離220 cm地点)の地下水位は、最大遡上高よりも低い位置で上昇を停止する。この地下水位上昇は図-4の水分保持特性曲線に関して、遡上時の吸水過程と引き波時の排水過程との間にヒステリシスを生じ、浸透量が浸出量よりも大きいことに起因する。最大遡上高と最小引き波高の落差は、波形勾配の減少とともに増大する。この落差の増大は遡上波先端流束を加速させ、汀線付近の侵食深を増大させているものと推定される。図中の矢印は、図-1で得られた遡上斜面上の侵食発生位置を示す。これより、遡上斜面上の侵食は、遡上波先端付近の地下水位が上昇した高さより発生する。これは前浜地下水位の上昇により、静水位より上部の砂層内に飽和領域が形成され、浮力による底質砂自重の低下が、遡上波による掃流効果を助長させることに起因する。

3. 波浪が作用する前浜砂層内の浸透流解析

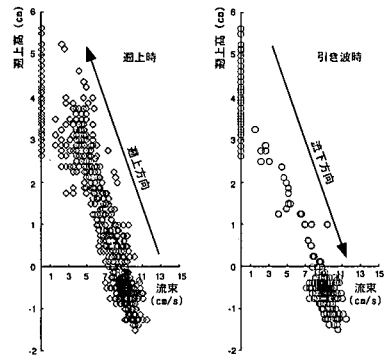
本章において、前浜地下水位の上昇及び遡上波による砂層内浸透流の流速・流向を詳細に検討するため、前浜浸透流解析を行う。

3.1 前浜浸透流に関する基本方程式

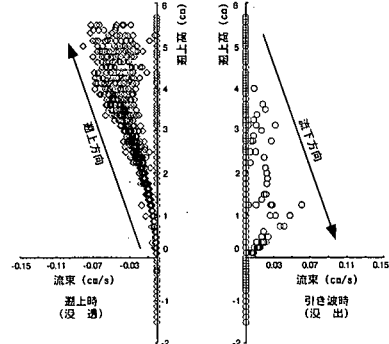
前浜浸透流の基本方程式には、飽和-不飽和浸透流方程式(Bear, 1979)を用いる。図-7において、浸透流座標系は、E点を原点とする水平方向にx軸、鉛直上向き方向にz軸として、下記の方程式を得る。

$$(u, w) = -Kk_r(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$(S_w S_s + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t}$$



(a) 遡上波先端流束分布



(b) 浸透・浸出流束分布

図-5 遡上波先端流束及び地下水浸透・浸出流束

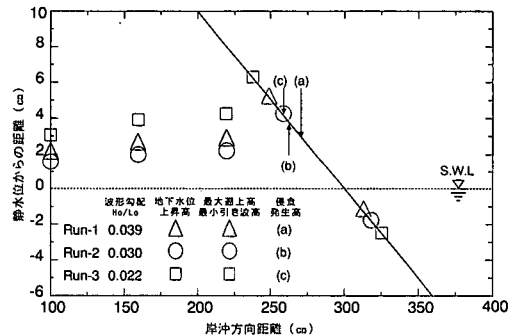


図-6 地下水位上昇高と侵食発生高

$$= \frac{\partial}{\partial x} (Kk_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (Kk_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z}) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 u, w は x, z 軸方向の浸透流速、 K は飽和透水係数、 $k_r(\theta)$ は透水係数比、 S_w は飽和度、 S_s は比貯留係数、 $C(\theta)$ は比水分容量を表す。不飽和領域内の比水分容量及び透水係数比の算定に必要な $\theta-\psi$ 関係は、図-4に示した水分保持特性曲線の値を用いる。透水係数比は、下記に示す一般化 Kozeny の式により算定する。

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 θ は毛管水頭 ψ に対する水分量、 θ_s は飽和水分量、 θ_r は残留水分量であり、べき数 n は 3.0 (Irmay, 1954) を採用した。

3.2 遡上波に関する基本方程式

浸透流と接続する斜面上の遡上波に関する基本方程式は、下記に示す Boussinesq 方程式を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial \xi} = q \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = \frac{d^2}{3} \left(\frac{\partial^3 Q}{\partial \xi^2 \partial t} \right) \dots\dots (9)$$

ここに、 ξ は静水位上にとった水平座標、 η は水面変動量、 Q は線流量、 q は地下水の浸透・浸出流束、 d は静止水深、 $D (= d + \eta)$ は全水深、 g は重力加速度である。遡上波先端位置の決定は、岩崎・真野 (1979) の方法を準用する。

3.3 計算方法

ピエゾ水頭 h は、(6) 式を ADI 法により差分化した下記の式を用いて計算し、浸透流速 u, w は得られた水頭値を使用して、(5) 式を中央差分化させて計算する。

$$a_{i,j}^{k+1/2} \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ (Kk_r)_{i+1/2,j}^{k+1} \frac{h_{i+1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}}{\Delta x} - (Kk_r)_{i-1/2,j}^{k+1} \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta x} \right\} + \frac{1}{\Delta z} \left\{ (Kk_r)_{i,j+1/2}^k \frac{h_{i,j+1}^k - h_{i,j}^k}{\Delta z} - (Kk_r)_{i,j-1/2}^k \frac{h_{i,j}^k - h_{i,j-1}^k}{\Delta z} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$a_{i,j}^{k+3/2} \frac{h_{i,j}^{k+2} - h_{i,j}^{k+1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ (Kk_r)_{i+1/2,j}^{k+1} \frac{h_{i+1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}}{\Delta x} - (Kk_r)_{i-1/2,j}^{k+1} \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta x} \right\} + \frac{1}{\Delta z} \left\{ (Kk_r)_{i,j+1/2}^{k+2} \frac{h_{i,j+1}^{k+2} - h_{i,j}^{k+2}}{\Delta z} - (Kk_r)_{i,j-1/2}^{k+2} \frac{h_{i,j}^{k+2} - h_{i,j-1}^{k+2}}{\Delta z} \right\} \dots\dots (11)$$

ここに、 $a = [S_w S_s + C(\theta)]$ とし、添字 i, j, k は 2 次元格子の位置及び時間格子の位置、 $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ はそれぞれ x, z 軸方向の格子間隔及び時間ステップである。

(8) 式及び (9) 式の解法には、Crank-Nicolson 型陰解法により差分化した下記の式を用いる。

$$\frac{\eta_i^{k+1} - \eta_i^k}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{Q_{i+1/2}^{k+1/2} - Q_{i-1/2}^{k+1/2}}{\Delta \xi} + \frac{1}{2} \frac{Q_{i+1/2}^{k-1/2} - Q_{i-1/2}^{k-1/2}}{\Delta \xi} = q_i^k \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{Q_{i+1/2}^{k+1/2} - Q_{i+1/2}^{k-1/2}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + \frac{1}{2} gD_{i+1/2}^{k+1/2} \frac{\eta_{i+1}^{k+1} - \eta_{i+1}^{k+1}}{\Delta \xi} + \frac{1}{2} gD_{i+1/2}^{k-1/2} \frac{\eta_{i+1}^k - \eta_{i+1}^k}{\Delta \xi} = \frac{d_{i+1/2}^2}{3 \Delta t} \left\{ \frac{Q_{i+3/2}^{k+1/2} - 2Q_{i+1/2}^{k+1/2} + Q_{i-1/2}^{k+1/2}}{\Delta \xi^2} \right\}$$

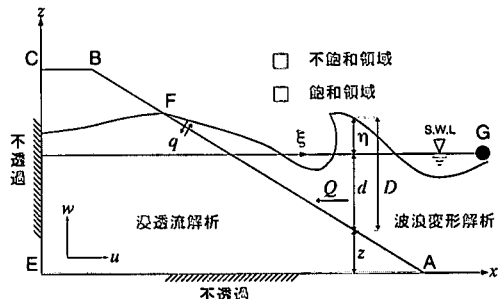


図-7 解析座標及び境界条件

$$\frac{Q_{i+3/2}^{k+1/2} - 2Q_{i+1/2}^{k+1/2} + Q_{i-1/2}^{k+1/2}}{\Delta \xi^2} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、添字 i, k は ξ 軸方向格子の位置及び時間格子の位置、 $\Delta \xi, \Delta t$ はそれぞれ ξ 軸方向の格子間隔及び時間ステップである。線流量 Q は、(12) 式を (13) 式に代入して求め、水面変動量 η は、得られた線流量により (12) 式を用いて計算する。なお、(13) 式中の ' の付いた非線形項は 1 次の風上差分を用いて計算する。

3.4 境界条件

図-7 に示す浸透流に関する境界条件は、以下のよう
に与える。

- ① 遡上波と接する境界 (AF 面)：斜面上の全水深 D を圧力水頭とし、位置水頭 z との和を斜面上の浸透流格子に与える。また、(12) 式中の q は、(3) 式より計算した浸透・浸出流束を与える。
- ② 遡上波と接していない境界 (CF 面)：遡上波先端 (F 点) からの鉛直距離を負の圧力水頭として、位置水頭 z との和を斜面上の浸透流格子に与える。
- ③ 底端及び左端の境界 (AE・CE 面)：境界と法線方向の浸透流速成分を零とする。

3.5 遡上波による前浜浸透流特性

Run-3 における遡上・引き波時の浸透流速分布及び遡上波波形を図-8 及び図-9 に示す。浸透流速分布は、砂浜斜面上の値を除外して表示し、図中の砂層内に示した実線は圧力水頭分布を示す。圧力水頭は遡上波の波動による影響を受け、砂層表面では変動するが、後浜側の砂層内では遡上時及び引き波時による変化は見られない。この結果、遡上波によって砂層内に伝播される圧力は、砂層表面のごく近傍でほぼ消散する。従って、砂層内の地下水は、その影響をほとんど受けていないと推定される。砂層表面での地下水位は、遡上時において遡上波水位の上昇に追従するが、引き波時の急激な遡上波水位の低下には追従しない。そのため引き波時では、図-9 の区間 ab において、浸潤面が形成される。この砂層表面での地下水位変動は、地下水位自身の高さを除々に増加させ、

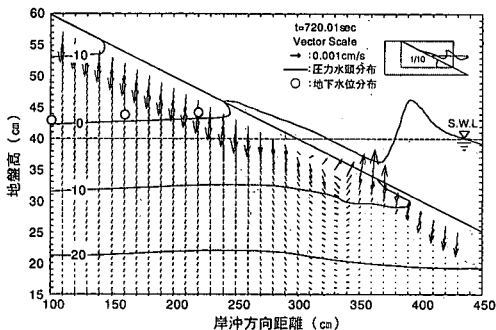


図-8 浸透流速分布 (遡上時)

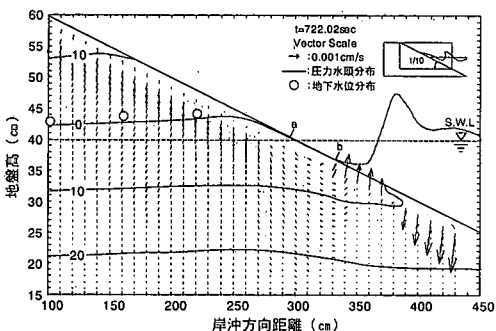


図-9 浸透流速分布 (引き波時)

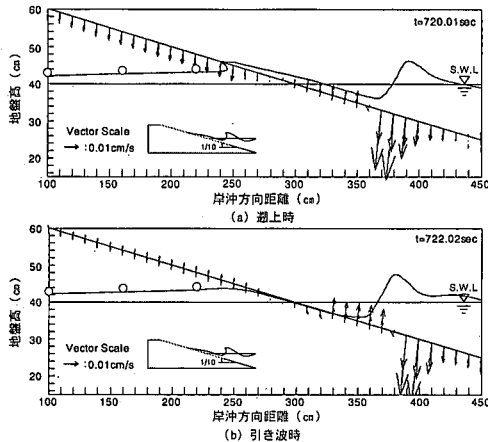


図-10 砂層表面における浸透流速分布

生地点よりやや沖側であり、その流速はほぼ同程度となる。

4. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると下記の通りである。

(1) 波形勾配の減少に伴い汀線付近の侵食深が増大するのは、遡上高の増加に伴う遡上波先端流束の増大が主な要因となる。

(2) 遡上斜面上の侵食が前浜地下水位の上昇した高さから発生するのは、静水位より上部の砂層内に浮力が働くのと同時に、冲向き及び上向きの定常浸透流による掃流力及び揚力が前浜砂層を不安定な状態にすることに起因する。

参 考 文 献

浅野敏之・米永敏之 (2000): 前浜砂層内の浸透流を考慮した波打ち帯の漂砂の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 511-515.
 岩崎敏行・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
 Bear, J. (1979): Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, pp. 190-224.
 Irmay, S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. AGU, Vol. 35, pp. 463-467.
 Packwood, A. R. (1983): The Influence of beach porosity on wave uprush and backwash, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 29-40.

図中の○印で示した実験値にほぼ一致する高さまで上昇する。この地下水位の上昇により、岸沖方向距離 250~350 cm 区間の砂層内では、遡上時・引き波時ともに冲向き及び上向きに向かう飽和浸透流が発生し、このことにより遡上波の非定常性はなくなる。この結果、地下水位の上昇による定常浸透流の流速・流向は、飽和砂層内に掃流力及び揚力を常時作用させ、浮力とともに遡上波による掃流効果を増大させる。

図-10 は、砂浜斜面上の浸透流速分布を示す。砂層表面における圧力水頭の変動により、浸透流速は周りの砂層内よりも 1 オーダ程度大きな値となる。地下水位の上昇を考慮に入れた結果、引き波時において鉛直上向きに発生する地下水浸出流速は、岸沖方向距離 320~350 cm 区間で最大となり、その最大値は 0.062 cm/s となる。これは図-5 に示すエネルギー法による最大浸出流束の発