

II-43

透水層埋設による自然海浜侵食防止について

室蘭工業大学 ○学生員 宮武 誠
 室蘭工業大学 正会員 藤間 聡

1. はじめに

最近、砂浜海浜の波浪による地下水位の上昇が海岸侵食に影響していることが、現地観測や水理模型実験及び数値シミュレーションから明らかにされている。この点に着目して、透水層埋設による海岸侵食防止工法が開発されつつある。この工法は、砂浜中に設けた透水層より前浜付近の地下水を沖側の海底から自然排水させ、地下水位の上昇を軽減しようとするものである。従来の海浜保全工法に比べ、より自然に近い形で保全できる景観上の配慮に加え、コストの面でも期待できる極めて有効な工法である。

本研究では、実海域に透水層を埋設するのに際して、その効率的、経済的な配置、規模等を決定するための基本的知見として、前浜付近の地下水位の上昇が及ぼす海浜変形への影響を、水理模型実験及び数値解析の面から検討する。

2. 自然海浜上の波変形及び砂浜侵食に関する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1600×95×75cmの2次元水槽にフラップ式造波機を有する造波水路で行った。砂浜地形の断面は、水槽の水平底部に天端幅1mを有する海底勾配1/10の水平距離700cm、高さ60cmとする。底質砂は、中央粒径0.1mm、比重2.67の珪砂を使用した。沖側最大水深は海底底面から40cmとし、沖合いから周期1.15sec、入射波高9cmの入射波浪を4時間作用させた時の斜面上の波高分布、遡上高、断面地形の変化及び砂浜内の地下水位の測定を行った。

波高分布は、左端壁から水平距離400～600cm地点に4点の容量式波高計を設置して、ペンオシロスコープにより測定し、その地点より岸側では、2台の8mmビデオカメラを使用し、ビデオ解析により遡上高さも同様に測定を行った。また、砂浜内の地下水位は、砂が混入しないよう被覆した内径6mmのガラス製のマンメーターを汀線から岸方向に20cm間隔で10本、水平底部から20cm深さに設置し、目測により読定した。地形断面の変化は、水槽奥行き方向に3側線設け、各側線に沿って岸沖方向に5cm間隔で目測により読定し、後節の侵食及び堆積量の算定には、3側線の平均値を用いた。

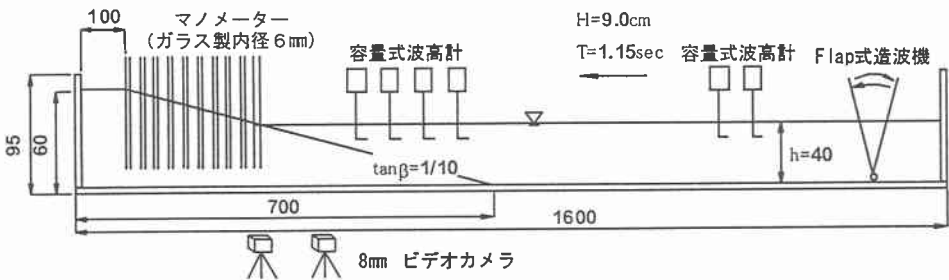
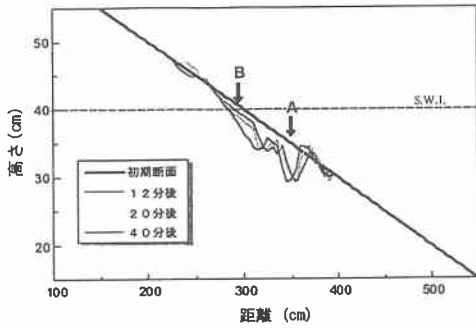


図-1. 2次元水槽及び実験装置 (単位 cm)

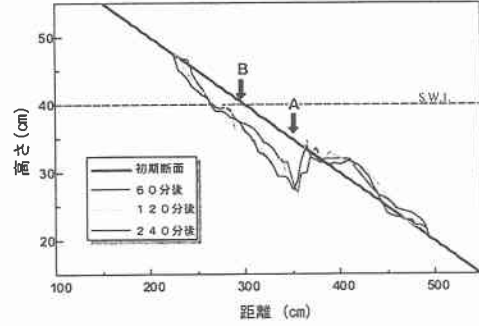
2. 2 地形断面の変化及び砕波形態

図-2(a)は、実験開始40分経過に伴う地形断面の変化を示したものである。実験で観察したところ、砕波帯は左端壁から水平距離350cm付近であり(図中A)、砕波帯内では、渦が発生する巻き波型の砕波が発生した。この地点では、初期地形から6.3cm程度の深さまで洗掘される。また、同時に250～300cmの汀線付近(図中B)では、Aに比べ0.5～3.5cm程度と緩やかな侵食を受ける。

A Study on Shore Protection with Permeable Layer
 By Makoto MIYATAKE and Satoshi TOHMA.



(a) 12 ~ 40 分経過後



(b) 60 ~ 240 分経過後

図-2. 断面地形の変化

この時点では、310~330cm付近で侵食量は少なく、この地点を境界にA地点及びB地点は、分離した侵食状況になっている。しかし、60分経過に伴う地形断面の変化(図-2(b))をみると、A地点及びB地点での侵食は、1つになりさらに激しく侵食されていく一方で、沖側375~500cm付近で堆積が生じ、沿岸砂州が形成される。また、60分以後も砕波帯の位置はほとんど変化はみられなかったが、2時間経過した頃から、砕波形態が巻き波型から崩れ波型に変化し、侵食量と堆積量は、定常状態に達する。この沿岸砂州が形成された60分以後について、200~500cm地点の奥行き単位当たりの侵食面積及び堆積面積を得られたデータを用いて算定した結果を表-1に示す。侵食面積に対する堆積面積の割合は26%程度であり、残りの約74%は沿岸漂砂となって沖側に流出される。

	60分後	120分後	240分後
侵食面積 A(cm ²)	416.5	501.4	573.8
堆積面積 A'(cm ²)	100.5	135.4	160.8
A'/A	0.24	0.27	0.28

表-1. 侵食面積と堆積面積

2. 3 平均水位分布及び地下水位分布

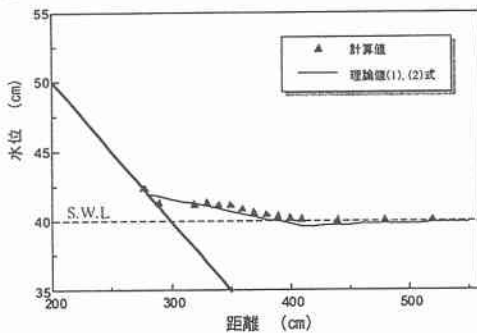
断面の変化が少ない実験開始から30分までについて検討を行った。平均水位分布は、各測点ごとに測定された水面変動量の時系列をそれぞれ各時間ごとに角波数で平均して算出した。図-3(a)及び(b)は、4分後及び20分後の平均水位分布である。図中の実線は、Longuet-HigginsとStewart(1962)の考えに従って、砕波するまでの平均水位の低下量(wave set-down量)を、

$$\bar{\eta} = -(1/16)H_{0w}k_0 \coth^2 kh_w / (kh_w + \sinh kh_w \cdot \cosh kh_w) \quad (1)$$

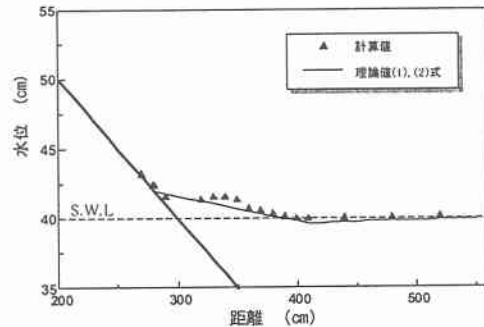
により求め、砕波帯内での上昇量(wave set-up量)を、

$$\bar{\eta} = K_w(h_{bw} - h_w) + \bar{\eta}_b \quad (2)$$

により算定したものである。ここに H_{0w} : 沖波波高, $\bar{\eta}_b$: 砕波点における平均水位の低下量であり、 $K_w = (1+8/(3\gamma)^2)^{-1}$, $\gamma = 0.78$ である。なお、砕波水深 h_{bw} は合田(1970)による図表から算定した。



(a) 4分後



(b) 20分後

図-3. 平均水位分布

実験で得られた set-up 量は、時間が経過するにつれて大きくなり、実験開始4分後では静水面からの set-up 量が 2.4cm 程度に達する。その後、20分を経過したあたりで set-up 量は 3.2cm 程度に達し、以後、変化は見られなかった。Longuet-Higgins と Stewart による set-up 量は、2.1cm 程度であり比較すると、実験値は、やや大きい値を示す。これは、実験において碎波帯で巻き波型の碎波が発生し、波の backwash より runup が卓越し、それに伴い、set-up 量が大きくなったと考えられる。また、set-down 量は、Longuet-Higgins と Stewart では 0.4cm 程度であるが、本実験では、見られなかった。

図-4 (a) 及び(b)は、各時間経過で得られた地下水位分布図である。波を作用させて、4分まで 210～250cm 付近で、地下水位は上昇する。その上昇量は、250cm 地点で最大であり、静水面から 3.1cm 程度であった。その後、時間経過とともに徐々に海浜の奥まで浸透し、12分経過後では、110cm 地点で 2cm 程度の上昇が見られた。地下水位は12分過ぎたあたりで、その変動量は 10⁻¹cm 程度になる。このことから、波の遡上により砂浜内の地下水位は、前浜付近でその上昇量は大きく、後浜付近では、前浜付近に比べ 1cm 程度小さい分布形状を示す。

図中矢印→及び⇒は、実験開始から30分までに得られた set-up 量及び、最大遡上高を示している。波を作用させて時間経過とともに、波の遡上高が上昇し、やがて図中に示す最大遡上高に達する。地下水位もそれに追従する形で上昇する。その結果、汀線付近の地下水の上昇量と set-up 量とは、ほぼ一致する結果が得られた。

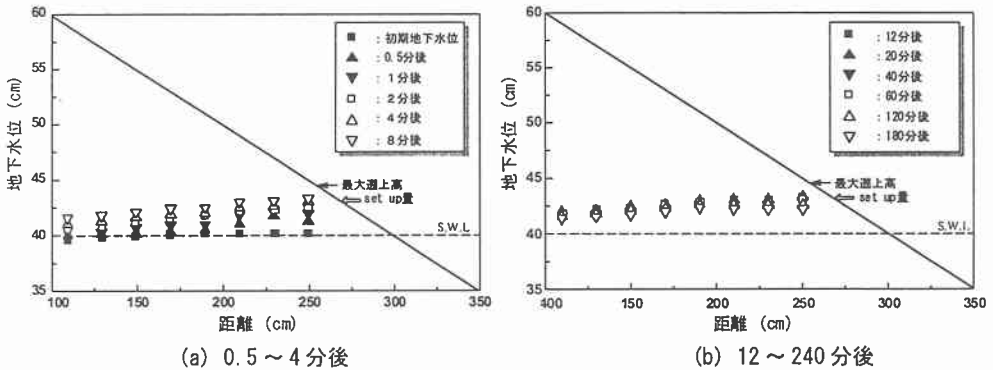


図-4. 地下水分布図

3. 砂浜内の2次元浸透流解析

実験では、4時間波を作用させた結果、波の遡上により 3cm 程度の地下水位の上昇を確認することができた。しかし、この地下水位の上昇による砂浜内の地下水の流れを実験で具視化することは、容易なことではない。そこで、実験で得られた平均水位が、場所的に変化する場合の砂浜内の非定常な地下水の流れを数値シミュレーションによって検討することにする。

3.1 基本方程式

本研究では、解析領域をすべて飽和領域と仮定し、砂浜内の浸透流及び地下水位分布は、以下に示す 2次元地下水流動方程式及び、ダルシー則を用いた。

$$S \cdot \partial h / \partial t = K \cdot \nabla^2 h \quad (3)$$

$$V = -K \cdot \nabla h \quad (4)$$

ここに h : 位置水頭と圧力水頭で与えられるピエゾ水頭、 S : 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である。 K : 透水係数であり、砂浜が等方性均質多孔体であるとして、一定値とする。

3. 2 境界条件

浸透流の計算は差分法で行い、境界条件(図-5)として以下のように与えた。

- ①流体と接する湿潤境界(AE面); 水面変動量 $-\bar{\eta}$ と静水時の水深 d の和を圧力水頭 φ として、位置水頭 z の和で与えた。

$$h = \varphi + z \quad (5)$$

- ②陸上境界(BC・BE面); set-upしたE点からの鉛直距離を負の圧力水頭 $-\varphi$ とし、位置水頭 z の和で与えた。

$$h = -\varphi + z \quad (6)$$

- ③左端境界及び底端境界(AD・CD面); 境界に対して法線方向の流速をゼロ($V_n=0$)として与えた。

但し、実験で得られた平均水位を境界条件として与える際、欠測している格子点に対しては、3次のスプライン曲線で補間した値を用いた。

3. 3 基本方程式の差分化

初期条件として領域すべての格子点に静止水深を水頭の形で与え、浸透流をゼロの状態から計算を行った。座標軸は境界左端の底部D点を原点とする鉛直方向に z 軸、水平方向を x 軸として直交格子を用いた交互方向陰解法により圧力水頭分布を計算した。差分式は次のように表される。

$$S(h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) / \Delta t = K(h_{i+1,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i-1,j}^{k+1}) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i,j-1}^k) / \Delta y^2 \quad (7)$$

$$S(h_{i,j}^{k+2} - h_{i,j}^{k+1}) / \Delta t = K(h_{i+1,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i-1,j}^{k+1}) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^{k+2} - 2h_{i,j}^{k+2} + h_{i,j-1}^{k+2}) / \Delta y^2 \quad (8)$$

ここに下添え字 i, j は2次元格子の位置、上添え字 k は時間格子の位置、 $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ は x 及び z 方向の格子間隔及び時間ステップである。なお、流速の計算は中央差分により行い、水位の計算は、地下水位より上部の領域を負の圧力水頭として与えているため、圧力水頭が零の点を重ねた線として行った。比貯留係数 S は底質砂の空隙率の2~3割のオーダーで取り扱い、透水係数 K は、あらかじめ行った定水位透水試験により測定した値を用いた。それぞれ $S=0.096 \sim 0.144, K=1.44 \times 10^{-2}$ である。

3. 4 計算結果

図-6(a)及び(b)は、4分及び20分経過後の地下水分布の計算値と実験値の比較を示す。計算値においても地下水位は、4分経過後、200~260cm付近で急激に上昇し始める。その上昇量は、静水面から4cm程度であり、実験値よりやや大きい結果が得られた。一方、100~150cm付近では、地下水位の上昇はわずかで、100cm地点で0.8cm程度と実験値にほぼ一致している。20分を経過した頃から計算値の地下水位は、ほぼ静止状態となる。4分経過後の結果に比べると、200~260cm付近の地下水位はほとんど変化せず、100~150cm付近の地下水位が前浜付近に対して、やや遅延して上昇する。その上昇量は、100cm

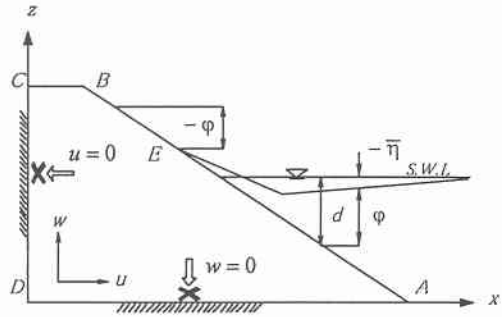
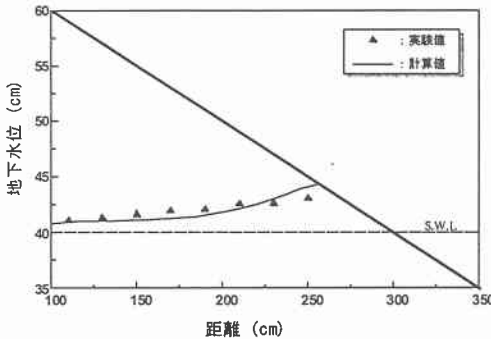
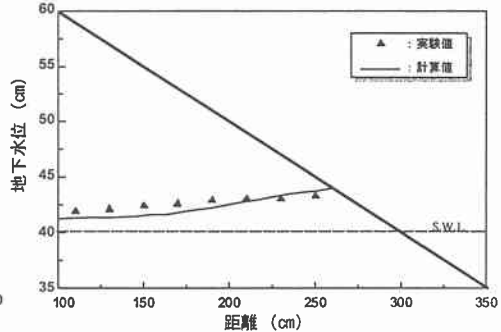


図-5. 境界条件



(a) 4分後



(b) 20分後

図-6. 地下水分布の計算値と実験値の比較

地点で1.3cm程度であった。20分経過すると、計算値においても前浜付近の地下水位の勾配は緩やかになる。この結果から、前浜付近の地下水位は、連続性を保とうとして海水が浸透し、急激な地下水位の上昇を引き起こす。一方、左端境界近傍の地下水位は、時間が経過するにつれ、後浜の奥まで海水が浸透し、前浜付近の地下水位に追従する形で、徐々に上昇することが推定される。

図-7は、4分後の浸透流速分布の計算結果を示す。270cm付近から沖側では、流速が 10^{-3} cm/s程度と周り比べ非常に大きく、海水が砂浜内に浸透していることが認められる。この浸透した地下水は、350cm付近の砕波帯内に集中して流れ込むことにより、前浜付近の地下水位を上昇させていると推定される。また、斜面上では、地下水が一部表面流出している。一方、100cm付近の後浜の流速は非常に微小であり、高さ30cm以下の所では 10^{-6} cm/s程度で、ほとんど流れが生じていない。これから地下水位が、後浜では上昇が遅く、前浜付近と比較して遅延して上昇することが考えられる。

図-8(a)及び(b)は、20分後の実験から得られた砂浜の断面変形及び、浸透流速分布の計算結果である。20分を経過した辺りから、地下水位は静止状態になったため、340～360cm付近で、地下水は沖側に流出する。特に360cm付近では、流速は最大で地下水が上向きに流出している。この流出部は、平均水位が低下している水頭の低い付近であり、実験によると350cm付近の砕波帯内にほぼ一致する(図中↓)。この付近で激しく侵食されているのは、砕波による洗掘及び、この地下水の上向きの流速が要因であることが考えられる。現在、この上向きの地下水の流出が、どの程度砕波帯の侵食に関与しているか検討中である。

4. 結び

本研究では、波浪が、砂浜内の地下水位を上昇させ、砕波帯で上向きな地下水の流出を生じることが、水理模型実験及び数値シミュレーションにより明らかにすることができた。この結果から、上向きの地下水の流出は、砕波帯内において砕波による侵食に影響していることが考えられる。今後、こういった地下水の上昇を防ぐ方法として、透水層を埋設した形で2次元及び3次元水理模型実験を行い、その効果を確認すると同時に、透水層の経済的・効率的な配置及び規模を決定していく予定である。

謝辞

本研究について、貴重な助言を頂いたアルファ水工コンサルタンツの川森 晃氏、実験に多大な協力を頂いた本学4年目学生、上山 悟君、近藤 英俊君へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山 忠, 黒川 誠, 柳嶋 真一, 加藤 正一, 長谷川 巖(1992): 透水層埋設による前浜地下水位の抑制, 海岸工学論文集 第39巻, pp871～875.
- 2) 佐藤 勝弘, 妻夫木 一秀, 野口 雄二, 岩佐 直人(1996): 透水層埋設による地下水低下による3次元予測計算, 海岸工学論文集 第43巻, pp656～660.
- 3) 井内 国光, 柿沼 忠男(1996): 海岸の自由地下水の流出, 海岸工学論文集 第43巻, pp541～545.

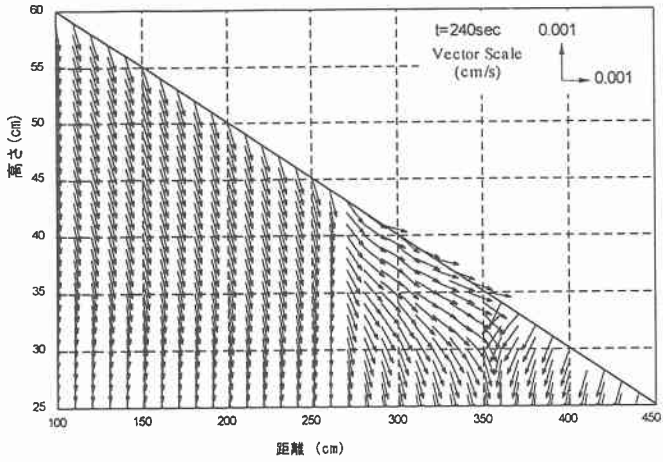


図-7. 浸透流速分布の計算結果 (4分後)

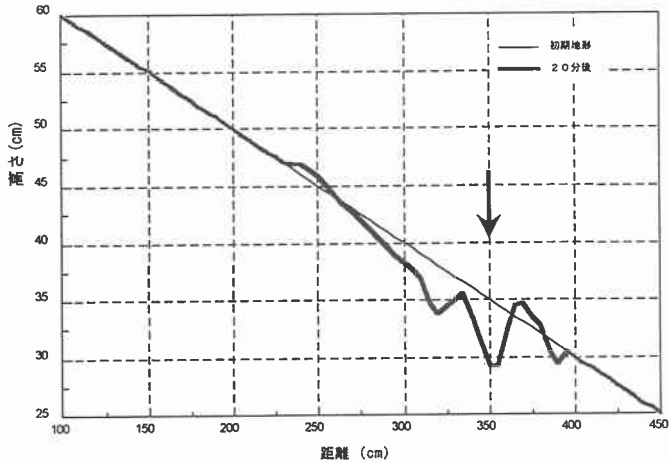


図-8 (a). 地形断面の変化 (実験値開始20分後)

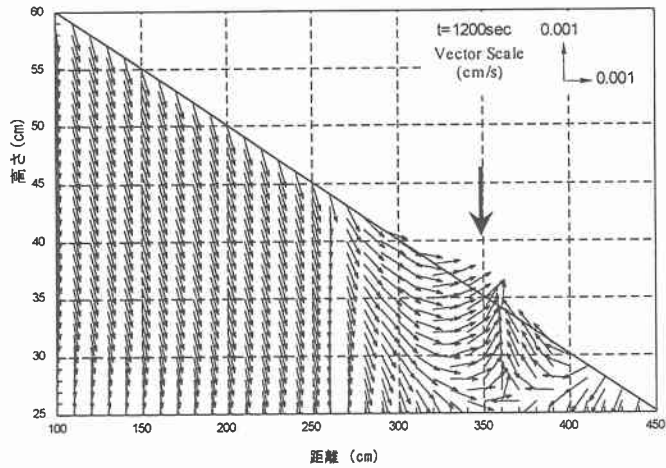


図-8 (b). 浸透流速分布の計算結果 (20分後)