

透水層設置による前浜地下水位の制御

片山 忠*・黒川 誠**・柳嶋 慎***
加藤 一正****・長谷川 巖*****

1. はじめに

前浜の地下水位を強制的に下げて、荒天時の前浜侵食を軽減し、静穏時の堆積を促進するサブサンドフィルタ－工法に関する現地調査は、Chappell ら (1979), 柳嶋ら (1991), Vesterby (1991) によって実施され、その効果が示されている。しかし、本工法は、地下水位を下げるために継続的に揚水する必要がある、そのための運転コストの問題をかかえている。そこで、強制的に地下水位をさげるかわりに、砂中に設けた透水層により、前浜の地下水を沖の海底から自然排水して地下水位を下げる方法を考えた。

本研究は、透水層の排水効果による地下水位の変化と前浜地形変化について二次元移動床模型実験を実施し、運転コストのかからない地下水位低下工法の可能性を検討したものである。

2. 実験方法および実験条件

実験は、長さ 38 m, 幅 1 m, 高さ 1.5 m の造波水路で行った。水路内に 図-1 に示す海浜断面を移動床でつくった。後浜の天端高は静止水位から 13.5 cm で天端幅は 1.15 m, 海底勾配は 1/10 とした。前浜および後浜の表層の砂層厚は、10 cm とした。使用した砂の中央粒径は 0.135 mm, 均等係数は 1.19 である。なお、砂の透水係数は Hazen の式 (山口, 1980) で係数として平均値を用いた

$K=110(D_{10})^2$ (1)
で評価すると、 9.72×10^{-8} cm/s となる。ここで、 D_{10} は粒径加積曲線の 10% に相当する粒径である。

透水層の設置位置は、後浜では静止水位とほぼ同じレベルとし、1/20 勾配でその先端 (排出口) は沖側海底面にすりつけている。透水層の層厚および透水層として用いた碎石の粒径はそれぞれ 10 cm, 13~20 mm にし

* 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長
** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室
**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長
***** (株)エコー第一技術部水理課

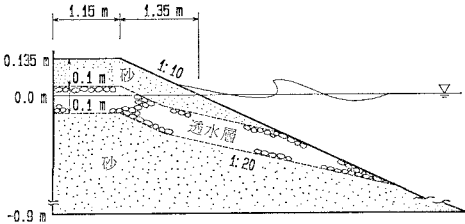


図-1 模型海浜

表-1 実験ケースおよび実験条件

条件	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
H_0 (cm)	9.0	11.9	15.1	8.5	8.8	10.8	15.5	8.4
T (s)	1.34	1.79	1.79	1.39	1.34	1.79	1.79	1.38
H_0/L_0	0.032	0.024	0.030	0.028	0.022	0.031	0.031	0.028
波作用時間(h)	5	5	5	2.5	5	5	5	2.5
透水層	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり	あり

た。そして、透水層に砂が入り込まないように砂と透水層の境界面には、ブランクトンネットをはさんだ。

実験ケースおよび波浪条件を表-1に示す。ケース1~4が透水層なしの場合であり、それぞれに対応する透水層ありのケースは11~14である。実験波は規則波を基本とし、ケース4および14のみ修正 Bretshneider—光易型のスペクトル形状を有する不規則波を用いた。

沖波および波高の岸沖分布は、容量式波高計を用いて測定した。規則波の週上高さは、スケールを用い目視によって測定し、不規則波の週上高さは、90~250 波について測定し、全データのうち、週上高さの高いほうから 1/3 の数の平均 ($R_{1/3}$) を計算した。断面地形は波作用の前後に砂面計を用い、水路幅方向の3測線について岸沖方向 10 cm 間隔で測定した。なお、解析には3測線の平均値を用いた。wave set-up 量、地下水位は、内径 6 mm のビニールホースを使用したマノメータによって後浜から前浜にかけて岸沖方向 25 cm 間隔で、1~10分毎に測定した。砂中および透水層内の浸透流速は、水槽ガラス面と砂の間に染料 (メチレンブルー) を注入し、

染料パッチの重心の移動距離と所用時間から計算して求めた。碎波位置は、スケールを用い目視により測定した。

3. 断面地形の変化

図-2 に波の諸元がほぼ同一の、ケース1および11の断面変化を示す。透水層のないケース1では、初期汀線と法肩との中間から岸沖方向距離 3.5m 付近まで侵食されその沖側に堆積が生じ、小さなバーが形成されている。一方、ケース11は、地形変化が著しく少なく、前浜にはバームが形成されている。つまり透水層があることによって前浜の侵食がなくなったと言える。

図-3 にケース2および12の断面変化を示す。両ケースとも後浜法肩付近から岸沖方向距離 3.5m 付近まで侵食されそれよりも沖側で堆積が生じた。ただし、ケース12はトラフの水深が透水層によって規定されるため、ケース2よりも浅く、バーの形成位置もケース2にくらべ岸側にずれている。また、ケース2においては波作用5時間後においても地形変化は平衡状態に達していないけれど、ケース12の前浜付近の地形変化は、波作用150分で平衡状態に達している。ケース2と12の侵食量を比較すると、透水層のあるケース12のほうが少なく、透水層があることによって、侵食が軽減されたことが分かる。

図-4 にケース3および13の断面変化を示す。透水層のないケース3では、法肩から岸沖方向距離 4.3m 付

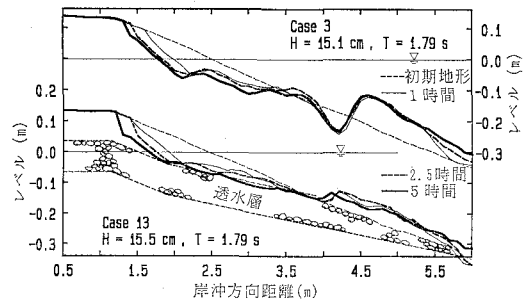


図-4 断面の変化 (ケース 3, 13)

近までが侵食し、それより沖側で堆積が生じた。バーの位置、規模は波作用30分以後はまったく変化していない。前浜付近の地形も、150分後からは変化が少なくなっている。ケース13では、法肩から岸沖方向距離 3.8m 付近まで侵食し、それよりも沖側で堆積している。波作用5時間後には、透水層上面の砂はほとんどなくなり、海底の透水層排出口上に著しく堆積した。バーは、4.25m 付近に形成されたけれど、トラフは透水層に規定されているためその水深は浅い。なお、汀線付近の勾配は前浜に浜崖が形成されたため急になっている。本ケースでは、透水層の侵食軽減効果はほとんど現れていない。

ケース4および14は、ケース1の波高、周期と有義波高、有義周期を同一にした不規則波のケースである。規則波による実験(ケース1)に比べ地形変化が均され、ステップ型の地形になっていた。透水層がないケースおよび透水層があるケースとも規則波にくらべ不規則波の場合のほうが侵食されていた。これは、不規則波に含まれる有義波高よりも大きな波の影響と考えられる。

4. wave set-up 量および地下水位の変化

図-5 に透水層がないケース1の wave set-up 量および地下水位の測定結果を示す。静水時汀線(↓印)における wave set-up 量は、波作用1分後までは急激に上昇し、その後はわずかに上昇している。一方、地下水位は、波の遡上とともに波作用時汀線付近から上昇をはじめ徐々に浜の奥まで浸透し、波作用20分後にはほぼ定常状態に達した。なお、地下水位の小さなピーク(図中○

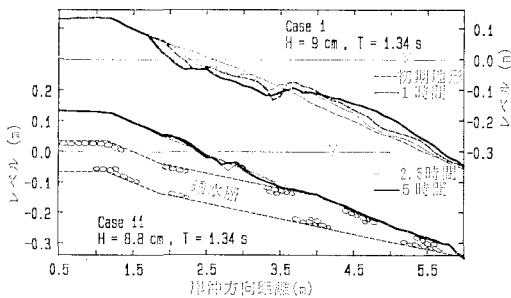


図-2 断面の変化 (ケース 1, 11)

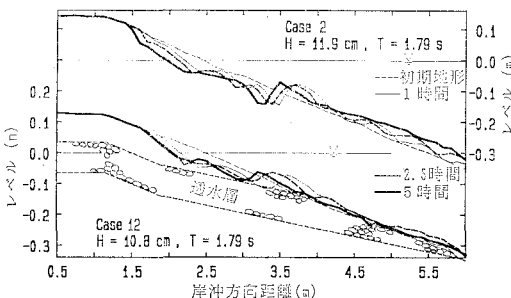


図-3 断面の変化 (ケース 2, 12)

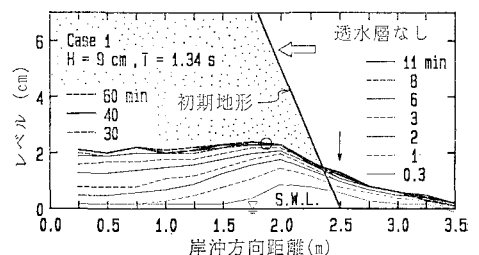


図-5 Wave set-up および地下水位の変化

印)の位置は、図中に白抜き矢印で示す遡上位置にほぼ一致する。

図-6 に透水層があるケース11の wave set-up 量および地下水位の測定結果を示す。本ケースは波作用開始から最後まで wave set-up はほとんど生じず、地下水位も上昇していない。

ケース1の規則波の波高、周期と同じ有義波高、周期の不規則波であるケース4を同一の波作用時間で比較したところ、地下水位のピークは不規則波のほうが高く、ピークの位置も不規則波の方が岸側にずれていた。これは不規則波の最大波の遡上の影響であると考えられる。また、規則波の場合、定常に達すると各測点における地下水位はほとんど変化しない。しかし、不規則波の場合、大きな波高の波が遡上すると地下水位は急激に上昇し、その後波高が小さくなるとゆっくりと下降した。

図-7 に静水時汀線における wave set-up 量と波形勾配の関係をすべてのケースについて示す。なおプロットしたデータは、各ケースの波作用開始後5~10分までに測定された値を用いている。図中の実線は、合田(1975)の理論による海底勾配 1/10 の場合の wave set-up 量である。透水層が無い場合(○印)、wave set-up 量は合田の理論にほぼ一致し波形勾配の増加とともに減少する。しかし、透水層がある場合(●印)には、wave set-up はほとんど生じず、特にケース11, 14はまったく生じなかった。この結果から、透水層を設置すると、wave set-up が生じないか、または著しく減少することが分かる。なお、ケース12および13では継続して波を作用させたところ地形変化とともに、wave set-up 量は大きくな

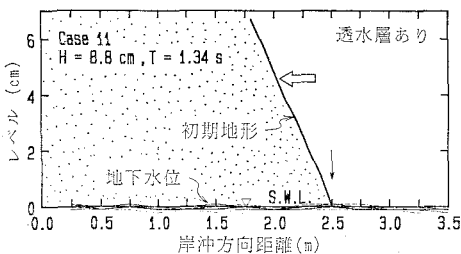


図-6 Wave set-up および地下水位の変化

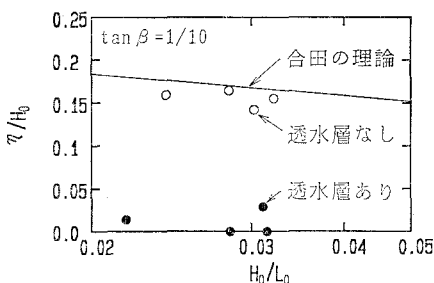


図-7 Wave set-up 量と波形勾配の関係

った。特に、ケース13において、wave set-up 量は透水層の無いケース3の1/2程度になった。この原因は、汀線付近が侵食され、その砂が透水層の沖側端(排出口)上に堆積(図-4 参照)し、透水層の排水効果が減少したためと考えられる。

5. 遡上高さと外力の関係

図-8 に静止水面からの遡上高さ(R)と波形勾配の関係を示す。波作用にともなう地形変化が生じるので、各ケースとも前浜地形があまり変化していない波作用0~1時間の間に測定されたデータをプロットした。また図中の実線は Hunt の式(本間, 1985)

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \dots\dots\dots (2)$$

で $\tan \beta = 1/10$ のときの計算値である。ここで、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長、 $\tan \beta$ は海底勾配である。図-8 によると、遡上高さは透水層の有無に関係せず、Hunt の式に一致しており、波形勾配の増加とともに減少する。

ところで、透水層がある場合、wave set-up はほとんど生じなかった。にもかかわらず図-8において、透水層の有無による遡上高さの違いは見られない。そこで波作用時の平均水位(透水層のないケースでは wave set-up した水位)を基準とした実遡上高さ(R')と波形勾配の関係について整理した結果を図-9に示す。透水層がない場合に比べ透水層があるときのほうが実遡上高さは高くなっている。透水層がない場合は、沖に大きなバーが形成され(図-4 参照)、そこでの碎波によって大きな波のエネルギー減衰が生じるのに対し、透水層がある場合、沖に大きなバーは形成されないでエネルギー減衰が少ない。このような違いによって、透水層がある場合の実遡上高さが大きくなったと考えられる。

図-10 は、各ケースについて遡上高さ(R)とその時の地下水位ピーク高さ(G_{wpeak})の関係をプロットした

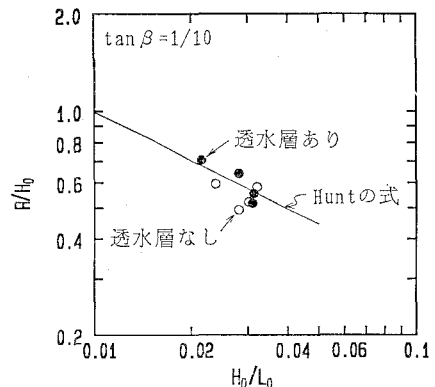


図-8 遡上高さと波形勾配の関係

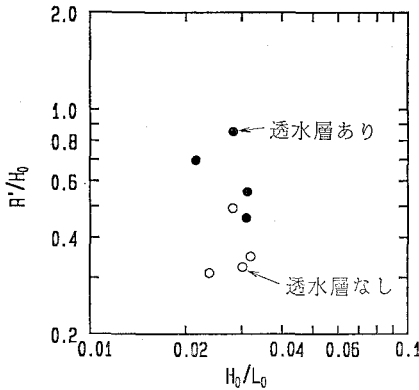


図-9 実測上高さと波形勾配の関係

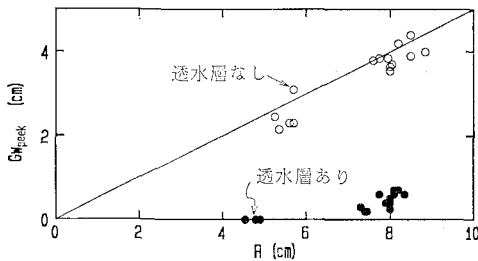


図-10 地下水位ピーク高さと遡上高さの関係

ものである。データが多くなっているのは、同一ケース内で時間を置いて繰り返し測定したためである。なお、前浜に浜崖が形成されたケース13のデータは外した。この図から透水層のない場合（○印）、地下水位のピークは遡上高さのほぼ1/2になることがわかる。しかし、透水層がある（●印）と地下水位の上昇は著しく少なくなり、ケース11においては地下水位はほとんど上昇していない。

以上述べた地形変化と外力の関係から、ケース12, 13, 14においてケース11にくらべて透水層による侵食軽減効果がなかった原因として、①前浜の砂が侵食され、透水層排出口上に堆積したため透水層の排水能力が低下した（ケース13では wave set-up が生じていた）。②バー・トラフの形状が透水層がない場合にくらべ小さいため碎波にともなうエネルギーロスが少なく、前浜に遡上する波のエネルギーが大きかったことが考えられる。さらにもう一つの考え得る原因については後述する。

6. 砂中および透水層内の浸透流速

図-11 にケース1および11の砂中および透水層内の浸透流速測定結果を示す。透水層が無い場合、砂中の浸透流速は0.15 mm/min 以下である。流れは、静止水面よりも高い位置では岸向きに、静止水位付近では下方に、静止水面よりも深い位置では海底面に沿って沖に向

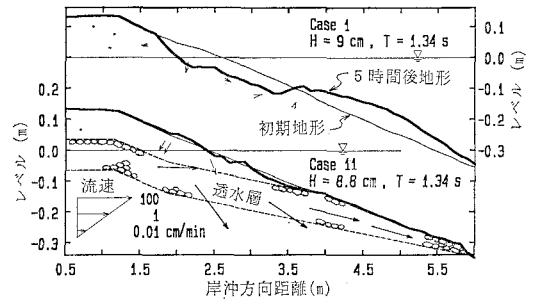


図-11 砂中および透水層内の浸透流

かっている。透水層がある場合、砂中の浸透流速は透水層がない場合よりも2～3倍速くなり、流れは全ての測点で透水層に向かっている。そして、透水層内には、約30 cm/min（砂中の浸透流速の約1000倍；流速ベクトルは対数表示）の沖向き流れが生じている。ただし、透水層内の流れは平均的には沖向きでありながら、波動にともなう水平方向の周期的な変動をともなっていた。また、ガラス面に接して測定していることを考えると、実際にはさらに速い流れになっている可能性がある。

透水層内に生じる速い流れの要因を検討するために、まず透水層がない場合に遡上した波（水）が砂中に浸透する水量を二次元非定常浸透流数値シミュレーションによって評価することを試みた。計算では、浸透流に関する基礎方程式（赤井ほか、1977）をもとに、四角形要素の有限要素法（Zienkiewicz, 1977）を用いた。シミュレーションでは、模型海浜全体を対象範囲とし、境界条件は波作用時汀線における水位とした。そして、汀線から遡上レベルまでの範囲に砂中に流入する流量を与え透水層がない場合の実測地下水位に一致する水量を求めた。その結果、図-11 に示すケースの浸透流量は6.7 l/hour/m と推定された。透水層がある場合も、同じ流量が前浜への波の遡上にともなって砂中に流入すると仮定すると、透水層（厚さ10 cm）内の流速は、空隙率を0.3として0.37 cm/minになる。つまり、遡上した水が浜に浸透する流量だけでは透水層内の速い流速を説明できない。

そこで、透水層がある場合（ケース11）に wave set-up が生じなかったことを考慮に入れて、以下のような計算を行った。

二次元定常状態の碎波帯内の運動方程式は、水平拡散項を無視すると、沖向きを x 軸正として

$$\frac{d}{dx}(\rho U^2(h+\eta) + S_{xx}) = -\rho g(h+\eta) \frac{d\eta}{dx} - \tau_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる（本間、1985）。ここで、 U は平均流速、 h は水深、 η は水位上昇量、 S_{xx} は radiation stress、 τ_b は底面摩擦応力である。水位上昇がないので $\eta=0$ とおき、

さらに $\tau_0=0$ と仮定すると、式(3)は簡単に積分できる。

そこで、一様勾配 ($h=x \tan \beta$) とし、波高水深比を一定 ($\gamma=H/h$) のもとで浅海長波近似で評価した radiation stress

$$S_{xx} = -\frac{3}{16} \rho g \gamma^2 x^2 \tan^2 \beta \quad \dots\dots\dots (4)$$

を用いると、

$$U = -\frac{\gamma}{4} \sqrt{3gx \tan \beta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。これにともなう流量(岸向き)の補償流が透水層内で発生すると仮定すれば、透水層内の沖向き流速 v_i は、

$$v_i = \frac{\gamma}{4\lambda D} \sqrt{3gx \tan \beta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、 λ は空隙率 ($=0.3$)、 D は透水層厚さ ($=10$ cm) である。式(6)を用い、 $\gamma=0.78$ とし、汀線から 5 cm 沖 ($h=0.5$ cm) の v_i を計算すると、75 cm/min になった。これは、透水層内の実測流速の 2.5 倍ほどに相当する。計算値が大きい理由としては、流速を式(5)で最大限過大評価していることが考えられ、実際の碎波帯内の岸向き流速は底面摩擦応力の影響を受け、また少しでも wave set-up が生じるとそれは流速を減ずるように働くこと、さらには透水層の上側の砂層の透水係数の影響を考慮に入れると計算値は実測値に近づくものと考えられる。このように考えると、透水層内の速い流れは、radiation stress が作用して碎波帯内の水が海底に浸透する影響を強く受けているといえよう。

すると、透水層の海底での出口が碎波帯の沖側にあるほうが透水層の効果をより発揮することになる。なぜなら、碎波帯外の radiation stress の勾配の状況は透水層の出口から水を吸い出すように作用し、逆に、出口が碎波帯内にあると、radiation stress は水を透水層内に押し込む方向に作用するからである。ケース12、ケース13で透水層の効果が悪くなった今一つの原因として、入射波

高が大きくなるにつれて碎波位置が透水層の出口の沖に移動し、相対的に透水層の出口が碎波帯内に移動したことが考えられる。

7. おわりに

透水層の効果は以下のとおりである。

①汀線での wave set-up はほとんど生じない。

②地下水位の上昇が著しく少なくなる。

③汀線付近の侵食量を軽減させる。

④透水層の速い流れは、radiation stress によって碎波帯内の海底を通して透水層に向かう流れの影響を強く受けている。

今後は、透水層の最適諸元を得るために透水層の配置、規模を変化させた実験および radiation stress を考慮した浸透流数値シミュレーションを行う予定である。また、透水層を設置したときの静穏時の前浜への砂の堆積状況も調べる予定である。

なお、浸透流解析には当所土質部土性研究室所有のプログラムを使用した。また使用にあたっては小林正樹土質部長に有益な助言をいただいた。ここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 赤井浩一・大西有三・西垣 誠 (1977): 有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第264号, pp. 87-96.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 本間 仁監修 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582 p.
- 柳嶋慎一・加藤一正・片山 忠・磯上知良・村上裕幸 (1991): 地下水位低下の前浜地形変化におよぼす影響, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 266-270.
- 山口柏樹 (1980): 土質力学, 技報堂出版, 389 p.
- Chappell, J., I. G. Eliot, M. P. Bradshaw and E. Lonsdale (1979): Experimental control of beach face dynamics by watertable pumping, Eng. Geol., 14, pp. 29-41.
- Vesterby, H. (1991): Coastal drain system, Proc. Inter Conf. Geotec. Eng. Coastal Development, pp. 651-654.
- Zienkiewicz, O. C. (1977): The Finite Element Method Third Edition, McGraw-Hill, New York, 787 p.