

現地海岸に埋設した透水層の排水流量と前浜地形変化

柳 鳴 慎 一* ・加 藤 一 正** ・天 坂 勇 治***
名 城 整*** ・望 月 徳 雄****

1. はじめに

砂浜の中に埋設した透水層によって、浜に遡上した後浸透した海水を沖に自然排水し、前浜の侵食を減少させる新しい砂浜保全工法に関する模型実験が片山ら(1992)、塩見ら(1995)によって行われ、地下水位の低下、前浜侵食の減少効果が確認されている。

本研究ではこの工法の実用化に向け、図-1に示す波崎海洋研究施設(以後 HORS と呼ぶ)で現地試験施工し、調査を実施した。

調査は、透水層による排水流量と地下水位の関係に注目し、沿岸方向の施工幅が十分確保できなかったこともあり、前浜地形変化については二次的に調査した。得られたデータをもとに砕波帯内の水位、透水層内の地下水位、排水流量、遡上流量相互の関係および地形変化について検討した。

2. 透水層の施工概要および調査方法

(1) 透水層の施工概要

図-2, 3 は、透水層およびその先の排水パイプの施工概略断面図および平面図である。透水層の設置深さは、HORS の地形測量データをもとに、最深包絡地形の下側に透水層が位置するように決めた。透水層の陸側端は、年に1~2回鹿島灘に来襲する波(波高4.4m, 周期10.3s)の遡上位置までとし、海側端の位置は、最深包絡地形の干潮時汀線とした。透水層で集めた地下水は、まとめて一本の排水管で沖に流すことにし(塩見ら, 1995)、その先端はトラフ地形になる頻度の高いところとした。結果として排水管延長は144mになった。

透水層の現地施工は、1994年8月に行った。

図-4 は、使用した透水材である。耐用年数20年以上の防食塗装を施したエキスパンドメタルのまわりに防砂シート(透水係数0.9 cm/s)を巻いた構造が一つのユニット(長さ2m)になっていて、連結材で長手方向に結合できるようになっている。透水材の設置は、まず両側に

止水矢板を打設して所定の深さまで掘削した後に長手方向に連結しながら行い、写真-1に示すように、岸沖方向88m区間に6列(幅7.6mのところに1.2mピッチ)並べて、透水層とした。透水層設置後に、もとのレベルまで覆砂した。両側に打設した矢板は、そのまま残した。ただし、岸沖方向距離-52m~-42m付近では、砂浜が浸食された場合でも通行車両の安全が確保できるように、矢板打設レベルを下げてある。

透水層の沖側端で集水し、内径0.4mの排水管に連結した。砕波帯内での排水管の埋設には、遠隔操作が可能な水陸両用ブルドーザーとサンドポンプ等からなる埋設システムを用いた。

(2) 調査方法

以下の項目について測定をおこなった。

a) 地下水位の測定: 内径40mmのパイプを、透水層中心線に沿って岸沖方向5m間隔で砂浜に打ち込んで、簡易井戸を作った。地下水位の測定は、簡易井戸にメジ

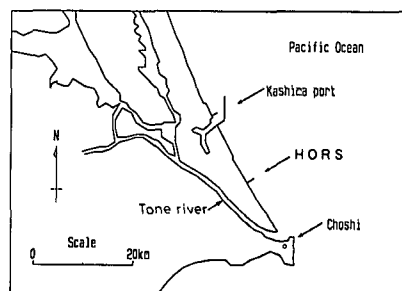


図-1 調査位置図

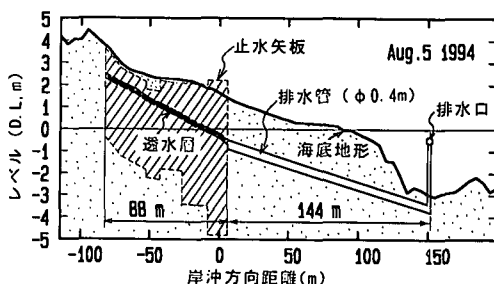


図-2 施工概略断面図

* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室長
*** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
**** 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室

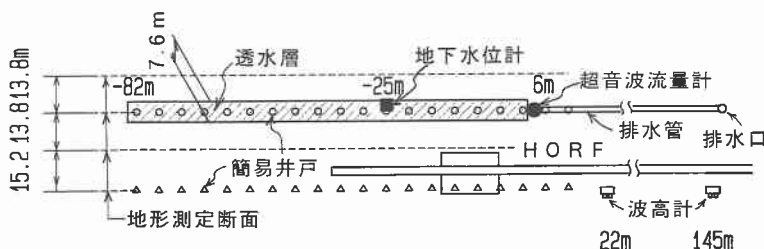


図-3 施工平面図および計器の配置

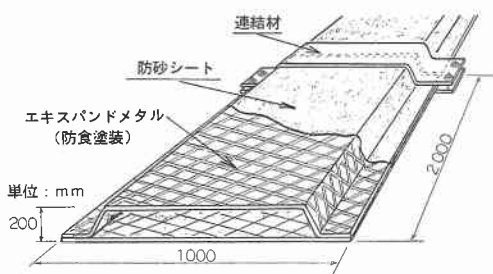


図-4 透水材詳細図



写真-1 透水層施工状況

ヤー付きのフロートを挿入して行い、静穏時には1日1回、荒天時には1～3時間毎に実施した。これとは別に、透水層断面内の1地点(-25m地点)では、内径12.5cmの塩ビパイプを砂浜に打ち込み、パイプ内に設置した水位計によって地下水位の連続測定を行った。さらに、透水層の中心線から沿岸方向に29m離れた測線において簡易井戸による地下水位の測定を同様におこなった。

b) 排水流量の測定：排水管外側に取り付けた超音波流量計によって連続測定した。

c) 前浜断面の測定：4測線の前浜断面を測定した。そのうち1測線は、透水層中心線に一致しており、残り3測線は透水層中心線より沿岸方向にそれぞれ銚子側に13.8m、29mおよび鹿島側に13.8m離れている。これらの測線に沿って、岸沖方向5m間隔で、静穏時には1

日1回、荒天時には1～3時間毎に測定した。

d) 波形(水面変動)と潮位：汀線付近(22m地点)と排水口位置での波形は観測桟橋上に取り付けた超音波式波高計によって連続測定した。汀線付近の長周期波の波高 H_L は、毎正時をはさむ20分間のデータについてスペクトル解析を行い、その結果得られた周波数スペクトルの0次モーメントから求めた(加藤ら, 1989)。

e) 沖波波浪：鹿島港の波高計が故障していたため、常陸那珂港の波浪データから鹿島港の毎偶数時の有義波高・周期を推定(加藤ら, 1989)した。

3. 調査時の海象条件

透水層設置後現在に至るまで調査を継続しているが、ここでは矢板が打設された状態で二次元性が確保され、台風第9424号が来襲した前後について解析を行った。

図-5の上段は、調査時の有義波高・周期を、下段は汀線における長周期波の波高の経時変化を示している。有義波高は、台風第9424号のために18日0時から急激に大きくなっている。そして、18日16時に、有義波高は、5.8mで極大になった。その後は、徐々に減衰している。

長周期波の波高は、18日0時頃から急激に増大するとともに、バームの侵食が生じた。そして16時には、長周期波の波高は、1.6mに達した。その後、19日には少し小さくなるものの、20日未明に再び増大し1.5mになった。この時再びバーム地形が侵食された。

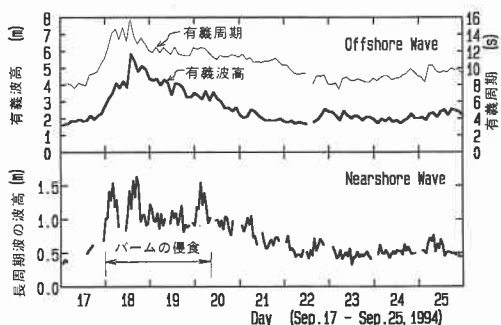


図-5 調査時の海象条件

4. 排水流量の変化

(1) 地下水位の変化

図-6は、まだ海が穏やかなときの地下水位と前浜地形を透水層と自然海浜について示したものである。図中に矢印で示した長周期波の遡上レベルも低い位置にある。自然海浜の地下水位(△印)に較べて、透水層の地下水位(○印)が低い位置に保たれていることが分かる。

写真-2は、長周期波の遡上が高いレベルに及ぶ状態であった9月18日12時37分に長周期波が引くタイミングをねらって砂浜を撮影したものである。自然海浜では地下水が表面まで飽和状態にあるのに対し、透水層を埋設した範囲では、表面の干上がりが明確に認められる。

図-7は、長周期波が発達して、バーム侵食が始まった直後の地下水位と前浜地形を透水層と自然海浜について示したものである。長周期波が発達して浜の高いレベルに遡上するようになって、透水層の地下水位(○印)は自然海浜のそれ(△印)より低い位置に保たれていること分かる。ここで注意しておかなければならないことは、自然海浜の地下水位が矢板天端レベルより高くなっていることである。同じ状況は干潮時にも確認されている。このため、透水層海浜に両サイドから地下水が流入しており、二次元性が必ずしも十分確保されていないと

いうことである。地下水の流入は、矢板打設レベルの低い-52 m~-42 mの範囲で大きいと考えられる。

図-8は、20分間平均の潮位(排水管の出口の水位)、透水層の地下水位(-25 m地点)、排水流量の経時変化である。地下水位は、長周期波の波高が小さい9月17日には全体に低く、潮位と同じ変化をしている。これに対して、長周期波の波高が増大した18日以降は、地下水位・潮位ともに高いレベルで変動する。その変動特性に注目すると、地下水位は潮位に1時間程度遅れて応答していることが分かる。その結果、下げ潮時には、地下水位が潮位よりも相対的に高くなっている。なお、9月17日の8時付近で地下水位が一定レベルになっているのは、このレベルが透水層の下側に一致していて、地下水位がこれ以上下がらないためである。

ここで、9月18日以降の地下水位変動の時間遅れについて述べておく。まず、透水層自体の地下水排水能力は非常に高いと考えられる。たとえば、排水管出口に蓋をした状態で透水層の施工が完了した後に、蓋を取り除いたところ激しい勢いで地下水が吹き出し、-25 m地点の地下水位は14分間で約40 cm低下した。そうすると、この原因は、自然海浜での地下水位の上昇にあると考えられる。図-7で述べたように、長周期波が高いレベルまで遡上するようになって、自然海浜では矢板天端レベル以上に地下水位が上昇し、透水層海浜に地下水が流入する

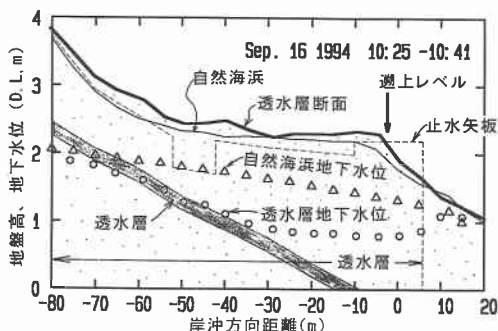


図-6 穏やかな時の地下水位と前浜地形

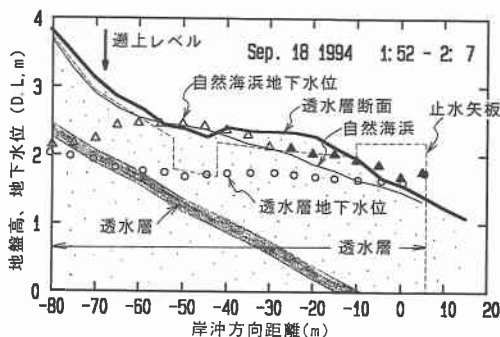


図-7 バーム侵食が始まった直後の地下水位と前浜地形



写真-2 干上がった透水層埋設範囲

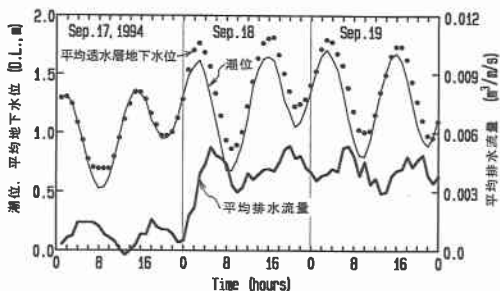


図-8 潮位、平均地下水位、平均排水流量の経時変化

ようになる。自然海浜での地下水位は潮位変化に遅れて応答する（例えば、Duncan, 1964）ので、透水層海浜への流入量にその時間遅れが反映される。すなわち、下げ潮時には多くの地下水が流入して地下水位が相対的に高くなるのである。とにかく、地下水位変動の時間遅れの影響は排水流量に現れており、地下水位の相対レベルの大きくなる下げ潮時には排水流量の増加が認められる（図-8）。

(2) 水位差と排水流量の関係

図-9 は、-25 m 地点の地下水位、排水流量、排水管出口の水位の変動である。ただし、出口の水位変動は 10 秒間の移動平均をした結果である。地下水位は、9 時 2 分から 4 分間に 0.2 m 上昇し、その後の 2 分間で 0.1 m 下降している。地下水位の下降のスピードが上昇時と同じくらい早いことは、急激に上昇し、ゆっくり下降する自然海浜の場合（柳嶋ら, 1993）と異なっており、透水層によって速やかに排水されていることを意味する。これに対して、排水流量は、1～2 分周期で変動している。この変動は、地下水位と排水管出口水位の水位差によるものである。つまり、地下水位の変動量は少ないので、出口の水位が低くなっている 8 時 58 分、9 時 6 分には多量の地下水が沖に向かって流れる。反対に、出口の水位が地下水位以上に高くなるとき、例えば 9 時 1 分や 4 分、には逆流が生じる。ただし、厳密には、排水流量のピークは排水口水位のピークよりも遅れる傾向にある。

排水流量と水位差の間に関係があることが分かったので、次にそれらの関係を 20 分間平均値について検討する。このために、ここでは透水層内の代表水位として、地下水位面と透水層上面が交わる場所の水位を用いる（図-7 参照）。このように定義された代表水位は、時間によってその岸沖方向位置が変化するので、簡易井戸内で計測した水位の岸沖分布から求めなければならない。しかしながら、そのデータ数は限られるので、連続観測を実施している -25 m 地点の 20 分間平均地下水位 (GW_{-25m}) と岸沖分布から求まる代表水位 (GW_d) の関係を調べた結果、式 (1) 関係があることが分かった。

$$GW_d = 0.96 \cdot GW_{-25m} + 0.12 \text{ (m)} \quad \cdots \cdots (1)$$

図-10 は、式 (1) で計算した代表地下水位と排水管の出口の水位との水位差 (Δh) に対して 20 分間平均排水流量をプロットしたものである。ここで、排水流量は透水層の単位幅当たりの流量である。この図によると、水位差の増加に伴い排水流量が増加することが分かる。しかしながら、両者の関係を近似した直線が原点を通らないことや、バーム侵食開始後のデータ (Δ 印) にばらつきが多い等の不明な点がある。これらについては、両サイドから透水層海浜への地下水の流入や、透水層内の地下

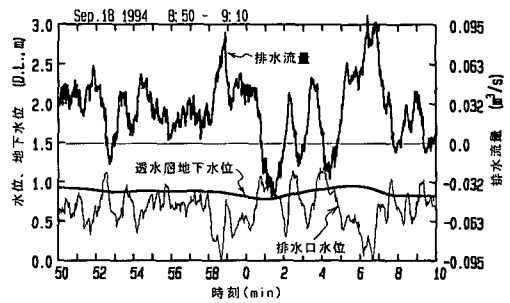


図-9 地下水位、排水流量、排水管出口の水位変動

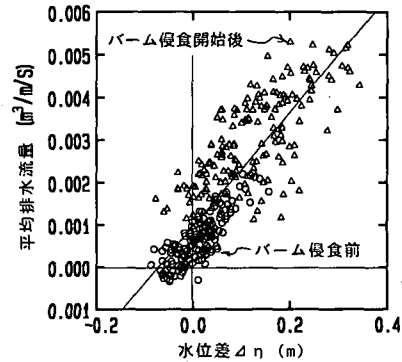


図-10 水位差と排水流量の関係

水位を透水層の中心線で測定している等との関連で今後検討したい。

(3) 遡上流量と排水流量の関係

次に遡上流量と排水流量とを比較した。長周期波の遡上高さは、加藤ら (1989) によって、汀線での水位を基準に、

$$R_L = 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31 \quad \cdots \cdots (2)$$

となる事が示されている。遡上した時の砂浜上の水位を、汀線において長周期波の半波高、遡上レベルで 0 となる三角形分布を仮定し、汀線より岸側の海水量を計算し、長周期波の周期 T_L で割ると、平均遡上流量が次のように求まる。

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{(H_L)_0}{2} \cdot \frac{0.96(H_L)_0 + 0.31}{\tan \beta} \cdot \frac{1}{T_L} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで $\tan \beta$ は前浜勾配である。

図-11 は、バーム侵食後の平均排水流量と推定した平均遡上流量との関係である。ただし、下げ潮時には自然海浜から透水層埋設範囲への地下水の流入が多いと考えられるので、上げ潮時のデータのみプロットした。遡上流量が $0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$ までは、遡上流量の約 2% が排水されるが、それよりも遡上流量が増加しても排水流量はほとんど増加しない。

このことは、下げ潮時の排水管内の流量のほうが上げ潮時よりも多いことから、透水層の排水能力が不足して

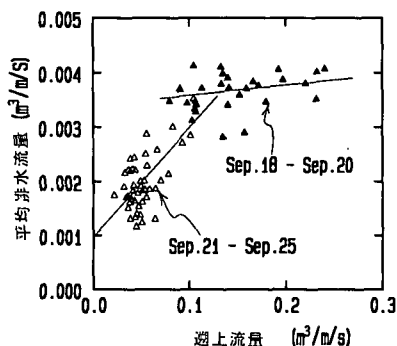


図-11 遡上流量と排水流量の関係

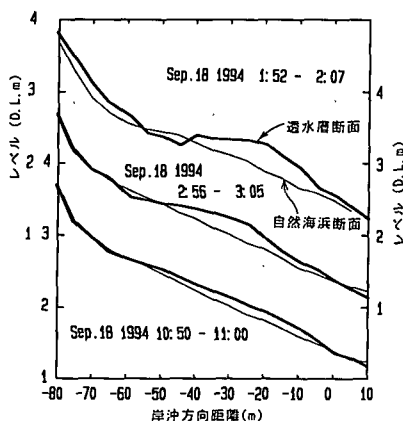


図-12 バーム侵食時の断面地形変化

いるためではない。というのは、下げ潮時にはさらに多くの流量が流れていたからである。むしろ遡上流量が一定値を超えると砂の中に浸透しなくなる（現地砂の透水係数が小さい）ためと考えられる。

5. 前浜地形変化

透水層の沿岸方向幅(7.6 m)が狭かったことや、矢板天端レベルが低くてサイドからの地下水の流入があったために、前浜の断面変化を議論するには少しデータの質が良くないと思われる。しかし、透水層を設置したときの断面変化は、最も知りたいところであるので、データの整理をしてみた。

図-12は、バーム侵食過程の断面地形の変化を透水層と自然海浜について示したものである。なお、自然海浜は、3測線の平均断面である。上段に示す、18日2時頃には、自然海浜で既に侵食が進み、-45 m地点よりも沖側では、一様勾配になっている。透水層断面は、この時点ではバーム地形が明瞭に残っている。中段に示す3時になると、自然海浜は、-60 m地点から沖側が侵食され、一様勾配になっている。しかし、-60 mよりも陸側では、堆積が生じている。一方、透水層断面は侵食が進行する

ものの、依然としてバーム形状が見られる。下段に示す11時の自然海浜の地形は、3時の地形とほとんど変わらない。透水層断面は侵食が進み、一様勾配に近づいているけれど、自然海浜ほどには侵食されずに残っている。その後、16時頃に、満潮と長周期波の波高のピーク時刻が重なったため透水層断面は自然海浜と同じところまで侵食された。

つまり、透水層の施工幅が、7.6 mであっても、自然海浜にくらべ侵食を遅らすことができることが分かった。

6. おわりに

得られた主要な結論は以下のとおりである。

① 透水層埋設範囲の地下水位は、台風による波の遡上が多い時でも自然排水により低下できる。

② 長周期波によって排水口位置の水位が短期的に上昇すると水位差が負になり、排水パイプ内には、沖から岸に向かう流れ（逆流）が生じる。しかし、平均排水流量と平均水位差 Δh との関係は次式で示される。

$$\text{平均排水流量} = 0.013 \cdot \Delta h \quad (\text{m}^3/\text{m/s}) \quad \cdots (4)$$

③ 排水流量は、波の遡上流量の2%に比例して増加するが遡上流量が0.1 m³/m/sを超えると増加は少なくなる。

④ 現地試験の透水層幅が7.6 mであったにもかかわらず、透水層埋設範囲の侵食は自然海浜より遅れるという効果が認められた。

最後に、試験施工の計画、実施及び調査は、第二港湾建設局横浜調査設計事務所、日本テトラポッド(株)、日鐵建材工業(株)および当所の共同研究で実施したものである。現地調査においては、元漂砂研究室尾崎靖氏、漂砂研究室中村聡志主任研究官の協力を得た。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川 滋 (1992): 透水層設置による前浜地下水位の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 871-875.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食, 長周期波に注目した現地観測, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇, 波崎海洋研究施設における現地観測, 港研報告, 第28巻, 第1号, pp. 2-41.
- 塩見雅樹・戸引 照・松川文彦・津川昭博・長谷川 滋 (1995): 透水層設置による海浜安定化効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第42巻.
- 柳嶋慎一・加藤一正・福田真人 (1993): 現地海岸における前浜地下水位の変動特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 411-415.
- Duncan, J. R. (1964): The effects of water table and tidal cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development, Mar. Geol., Vol. 2, pp. 186-197.