

# 海浜安定化に関する透水層埋設の三次元的効果

佐藤 恒夫\*・榑 俊博\*・柴田 悟\*\*  
込山 清\*\*・平松 和也\*\*\*・長谷川 巖\*\*\*\*

## 1. はじめに

現在, 高松港玉藻地区では再開発事業に伴い護岸の防災機能強化の要望に加え, 住民による砂浜復元を求める声もある。このため運輸省第三港湾建設局では, 人工海浜による面的な護岸の再整備に取り組んでいる。しかし, 護岸の前面は水深が約 12 m, 潮位差が約 2.3 m と大きく, しかも波データも不十分であり, 自然の力による砂の供給が望めないなどのため, 人工海浜の建設において高度な技術力が求められる。そこで, 水深と潮位差の大きい海岸においても十分な海浜安定効果が期待される, 近自然型海浜安定化工法(透水層工法)を適用することとした。

透水層工法は, 砂浜に透水層を埋設することで地下水位の上昇を抑制し, 海浜の安定化をはかる工法である。ところが, 本工法の人工海浜への適用例がないこと, これまでの模型実験(例えば Kanazawa ら, 1996)や現地試験(例えば Katoh and Yanagishima, 1996)は主に二次元的な観点での検討であるため, 具体的に現地海岸に適用する際に, 透水層埋設の三次元的効果, 特に突堤との併用効果や地下水を沖へ排水する役割をもつ排水管の効果的な配置についての検討は行われていない, といった問題が生じた。そこで, これらの残された課題を三次元移動床実験で検討した。

## 2. 研究の内容

### 2.1 実験条件

実験施設は, 幅 10 m × 長さ 27.5 m × 高さ 0.7 m の平面水槽, および造波板長 10 m の規則波造波装置を使用した。この実験施設に, 人工海浜模型を縮尺 1/40 で再現した。養浜材料に関しては, 本実験が浸透流を取り扱うことから, 透水係数  $k=100D_{50}^2$  cm/s (山口, 1980) より現地と模型における粒径の縮尺  $(40)^{-1/4}$  を導出し, この相似則をもとに中央粒径  $D_{50}=0.23$  mm に決定した。実験波は年数回の頻度で発生する波(波高 1.0 m, 周期 3.9

s)を前提としたが, 実験水槽への縮小にあたっては以下のように調整した。まず, 周期についてはフルード則で縮小した(0.63 s)。波高はフルード則で計算されるものよりも大きくした。というのは, 実験砂の粒径を透水係数の相似則で決定したため, 通常移動床実験で用いる砂よりも粒径が大きくなっており, したがって, 大きな波高にしないと砂が十分動かないからである。結局, 0.63 s の周期で造波可能な最大波高 5.0 cm にした。波向きは 48 年間の風データから推算した卓越波向きとした。実験ではこの波を 5 時間作用させた。

実験に使用した透水層埋設時の標準断面を図-1に示す。透水層の埋設位置は陸側端部を後浜法肩の真下に, 沖側端部を L.W.L 水際線の真下にしてある。また, この人工海浜は前面水深が非常に大きいところ(12 m)に建設予定なので, 海浜断面が大きくなってしまふ。そこで, 養浜材料の投入量を削減する目的で, 人工海浜の法先には砂止め堤を設置してある。

実験で検討した突堤および透水層の配置は, 沿岸方向両サイドにそれぞれ突堤と曲げ突堤を配置し 5 本の排水管(3 本は前面方向へ, 2 本は両サイド方向へ)で地下水を排水する曲げ突堤タイプ(図-2), 両サイドに突堤を配置し 3 本の排水管(前面方向へ)で地下水を排水するくの字型突堤タイプ(図-3)である。両タイプともに透水層「あり」, 「なし」の実験を行った。各平面配置における透水層の埋設密度は, 二次元実験の結果より 50%とした(加藤ら, 1999)。ただし, くの字型突堤タイプは左側突堤背後に透水層を埋設していない。

### 2.2 計測方法と解析方法

各実験ケースにおいて波高分布, 地下水位, 水深変化,

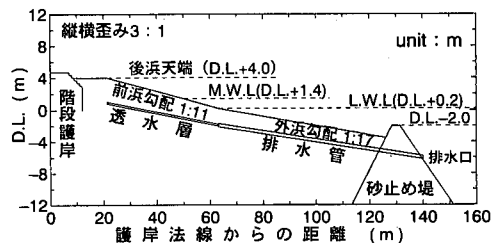


図-1 透水層埋設時の標準断面(数値は現地換算)

\* 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所  
\*\* 元 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所  
\*\*\* 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所  
\*\*\*\* 正会員 株式会社エコー

表-1 実験ケース一覧

突堤形状	排水管	透水層	平面配置図
曲げ突堤	なし	なし	図-2 (透水層を撤去)
曲げ突堤	5本	あり	図-2
くの字型	なし	なし	図-3 (透水層を撤去)
くの字型	3本	一部	図-3

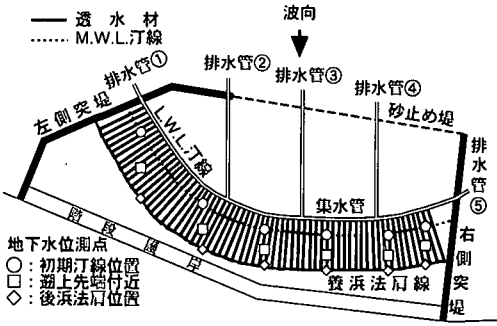


図-2 曲げ突堤タイプ

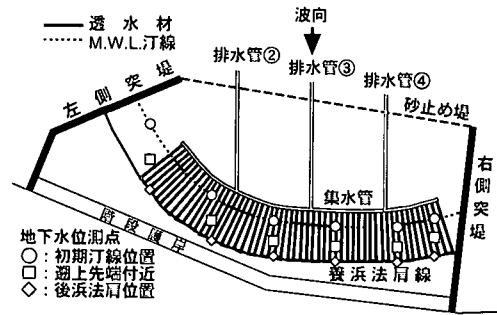


図-3 くの字型突堤タイプ

汀線変化, 海浜流, 排水管内流速等の測定を行なった。これら測定項目のうち, 海浜の地下水位測定点については, 岸沖方向に3地点を設定した(図-2, 3)。岸沖方向の3地点は初期汀線位置(○印), 遡上先端付近(□印), 後浜法肩(◇印)に設定してある。初期汀線位置での水位上昇量は wave set-up であることに留意されたい。管内流速は  $\phi=48$  mm の排水管に小型電磁流速計を埋設して測定し, 別途実施した流量検定結果をもとに排水流量に換算した。

透水層と突堤の併用による海浜安定効果については, 地下水位と wave set-up の抑制, 地形変化(汀線変化, 水深変化)の実験結果をもとに検討し, 排水管の効果的な配置については地下水位と wave set-up の抑制, 排水流量に注目して検討した。

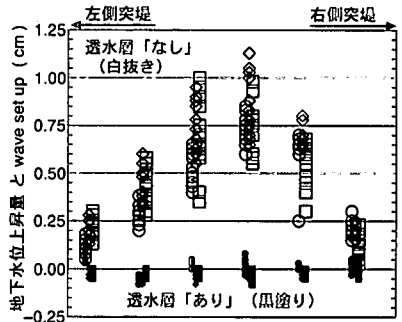
### 3. 透水層が海浜内の現象に及ぼす効果

#### 3.1 透水層による地下水位の抑制効果

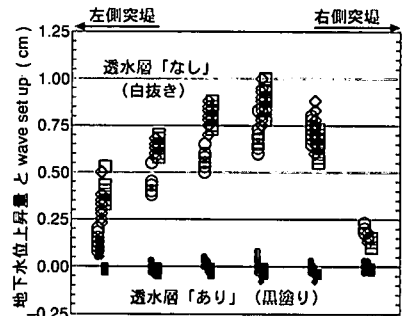
図-4は曲げ突堤タイプ, くの字型突堤タイプでの沿岸方向の地下水位分布である。2つのタイプともに透水層「なし」の場合は開口部中央で地下水位の上昇と wave set-up が生じ, 両サイドの突堤に近くなるほどその上昇量が小さくなっている。左側突堤背後では, 突堤による遮蔽効果で波高が小さくなっていることが影響し, 右側突堤付近の上昇量が少ないのは, 砕石を用いてつくった突堤の透水性が高く, このため突堤を横切って右方向へ地下水が流出した結果であると考えられる。一方, 透水層「あり」では地下水位の上昇が十分に抑制されており, ゼロ以下の水位になっていることもある。水位がゼロ以下になるのは, 砂止め堤沖側に設置してある排水口付近で wave set-down が生じ, この水位に近づくように透水層が地下水位の上昇を抑制するためである。

#### 3.2 排水流量と排水位置

図-5は, 曲げ突堤タイプとくの字型突堤タイプにおける各排水管の排水流量である。データが複数個になっているのは, 実験中に繰り返し測定したためである。ま



(a) 曲げ突堤タイプ



(b) くの字型突堤タイプ

図-4 沿岸方向地下水位分布

ず、曲げ突堤タイプの排水流量（○印）に注目する。排水流量は、排水管によって異なり、排水管④および排水管③は排水流量が多く、排水管②、排水管①の順番で減少し、排水管⑤ではゼロ（ときどき負、逆流）になっている。このことと、図-4(a)に示した透水層「なし」のときの地下水水位上昇量や wave set-up 量を比較すると、両者には正の相関があって、地下水水位上昇量と wave set-up 量が大きいところに取り付けた排水管の排水流量が多くなっている。また、wave set-down の発生している場所に排水口をもっていくと地下水水位をゼロ以下に下げることが出来る(Kanazawa ら, 1996)、つまり効率よく排水できる、という観点でみると、排水量の多い排水管④と排水管③の排水口位置は砂止め堤のすぐ沖側であるので wave set-down が生じているが、排水流量の少ない排水管②と排水管①の排水口位置は曲げ突堤の外側であって、wave set-down は発生しにくいところである。さらに、排水流量がゼロの排水管⑤では全く wave set-down は生じていない。したがって、両者の対応はよい。いずれにしても、排水管①と⑤は、ほとんど排水していないので、取り除いても全排水流量の低下は生じないと判断した。

そこで、くの字型タイプの実験では、排水管①と⑤を取り除いた。また、排水管②の排水口位置では wave set-down が期待できる。この状態で排水流量を測定した結果を、図-5 中に●印でプロットしてある。曲げ突堤タイプの5本の排水管の総流量と、くの字型突堤タイプの3本の排水管の総流量がほぼ等しいことが分かる。

### 3.3 透水層による海浜流の抑制効果

海浜流については染料を使用して目視観察を行った。図-6 は曲げ突堤タイプの中・底層における海浜流である。図中の矢印は、線が太いほど流れが強いことを示す。透水層「なし」では両サイドの突堤先端付近から海浜内に流れ込み、開口部の中央付近から沖向きに出る流れと、

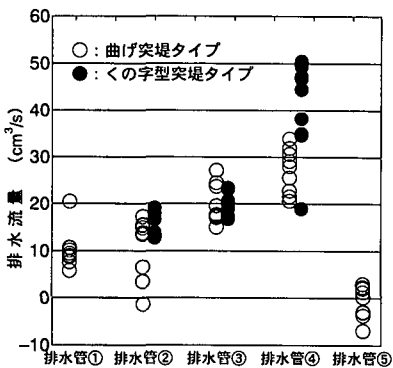
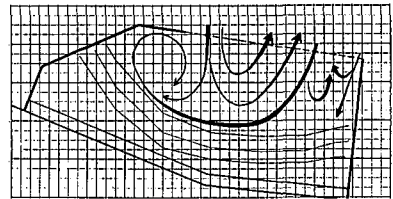


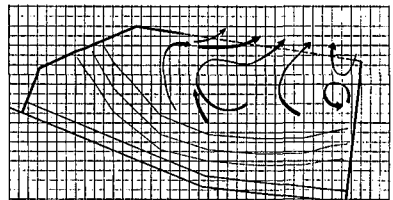
図-5 各平面配置における排水流量

汀線付近で右側から左側の突堤背後に流れ込む流れが確認できる。しかし、透水層「あり」ではこれらの流れが抑制されている。図-7 は、くの字型タイプの中・底層における海浜流の分布である。透水層「なし」では左側突堤背後に向かう沿岸流が確認できる。しかし、透水層「あり」は沿岸方向の流れが全体的に抑制され開口部に向かう弱い流れに変化している。

このように、透水層「なし」の場合に左側突堤背後に向かう流れが顕著であり、透水層「あり」の場合にはこの流れが抑制されるという結果は、前述の図-4 から説

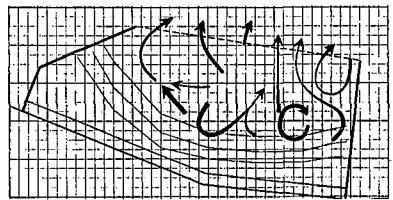


(a) 透水層「なし」

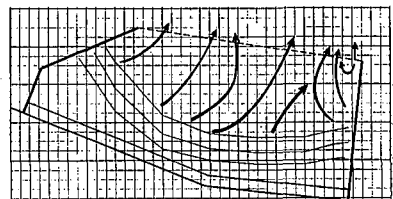


(b) 透水層「あり」

図-6 曲げ突堤タイプの海浜部流況（中・底層）



(a) 透水層「なし」



(b) 透水層「あり」

図-7 くの字型タイプの海浜部流況（中・底層）

明がつく。曲げ突堤タイプ・透水層「なし」の場合、wave set-up 量が沿岸方向に変化するため(図-4(a)参照)、開口部中央から左側突堤に向けて水面勾配が生じている。この結果、開口部中央から左側突堤に向かう沿岸流が発達することとなる。透水層「あり」では、wave set-up が十分に抑制されることによって沿岸方向に水面勾配ができないので、左側突堤背後に向かう沿岸流は弱くなる。くの字型突堤タイプでも同様の現象が起きていることが、図-4(b)より確認できる。ただし、透水層「なし」では、曲げ突堤タイプと比較して左側突堤に向けた水面勾配が緩いため、強い沿岸流にはなっていないといえる。

以上のように、透水層を埋設することで砂止め堤から沖に向かう流れが弱くなる、突堤背後に向かう沿岸流が抑制される、といった、これまでの研究で明らかにされていなかった海浜流抑制効果が確認できた。

### 3.4 平面配置比較

#### a) 汀線変化量

透水層の効果で地下水位の上昇が生じず、そのため突堤背後に向かう沿岸流が抑制されたことは、前節の考察で明らかとなった。このような透水層の働きが、突堤形状の違う場合に汀線形状や水深変化量といった地形変化に対してどういった影響を及ぼすのか、以下にその考察を行う。

図-8は、曲げ突堤タイプ、くの字型突堤タイプの透水層「あり」での最終汀線形状を比較した結果である。なお、両者の初期地形は同じであるが、くの字型突堤タイプではAで囲んである部分が砂止め堤であることに留意されたい。図の下段を見ると、曲げ突堤タイプの左側突堤背後で、汀線の前進が生じている。このような汀線前進は必ずしも必要ない。一方、くの字型突堤タイプでは、この部分に汀線の前進が見られず安定している。右

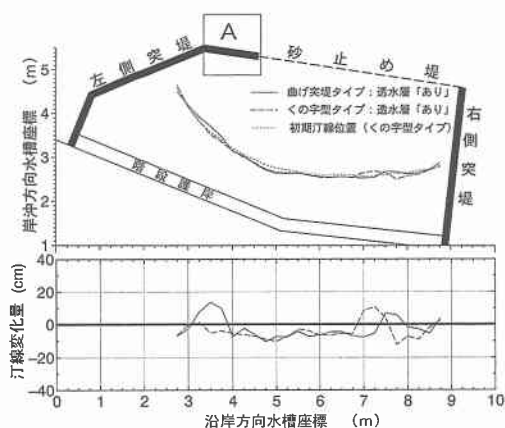


図-8 透水層「あり」の汀線形状比較

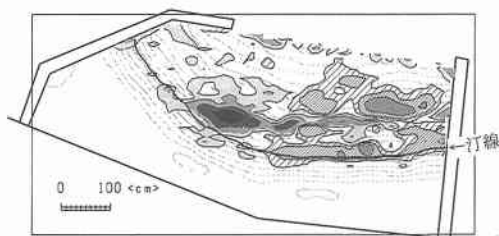
側突堤付近については、汀線前進の生じる場所が若干ずれるものの、両者の前進量を比較するとほとんど同じである。海浜中央部での汀線後退量は、概ね 10 cm 程度であり、両タイプでの違いは認められない。したがって、より開放的なくの字型突堤タイプの配置を積極的に取り入れるほうが望ましい。

#### b) 水深変化量

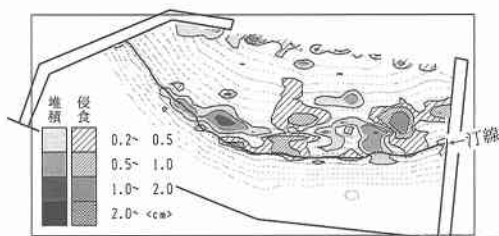
図-9, 10は、5時間の波作用による水深変化量の分布である。図中の黒塗りと斜線は、それぞれ堆積域と侵食域で、変化量が大きいほど密度を濃くしてある。

図-9に示した曲げ突堤タイプでは、透水層「なし」の場合、右側で広い範囲の侵食が生じ、左側の曲げ突堤背後で堆積が生じる。これは、外側から遮蔽域へ流れ込むように発生する海浜流に対応した地形変化である。これに対して、透水層を埋設すると沿岸方向への水面勾配がつかなくて(図-4)、遮蔽域へ向かう流れも弱まる(図-6)、地形変化はこれらの水理特性の変化を反映したものになっている。つまり、右側から左側への明確な砂の移動はなくなり、中央部が侵食を受けその両サイドに堆積が生じている。また、全体に地形変化量も少なくなった。

図-10に示すくの字型突堤タイプでは、透水層「なし」の場合、侵食・堆積は汀線に平行な範囲で生じており沖側が侵食、岸側が堆積となっている。図-9と比較すると遮蔽域が狭いので沿岸方向の砂移動が少なく、その結果、侵食・堆積領域が岸沖方向に分布したものと考えられる。透水層を埋設すると中央部分が侵食を受けその右側

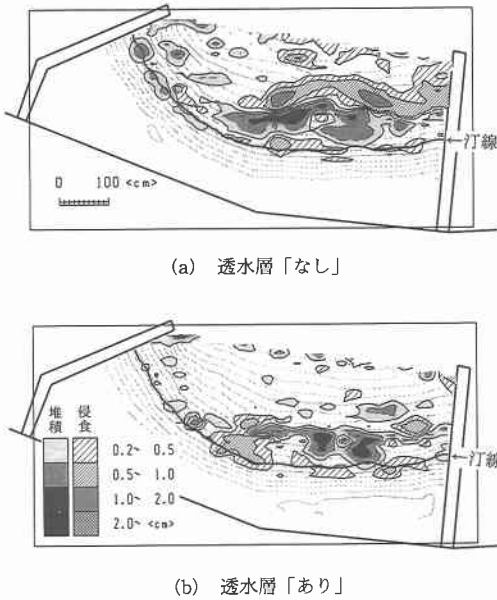


(a) 透水層「なし」



(b) 透水層「あり」

図-9 曲げ突堤タイプ水深変化量分布



図一10 く字型突堤タイプ水深変化量分布

に堆積が生じていて、図一7(b)の海浜流の方向とよく対応した地形変化になっている。実は、くの字型突堤タイプの実験における初期地形は曲げ突堤タイプのそれと同じにしてあったので、沿岸方向に水面勾配がなくなった場合、このような右方向への砂移動が生じるものと考えられる。なお、全体的な地形変化量は透水層「あり」のほうが少ない。

以上のように、構造物と組み合わせて透水層を埋設すると、遮蔽域への砂の移動を減少させる効果が現れる。言い換えると、小笹・Brampton (1979) の沿岸漂砂公式において第二項の係数  $K_2$  の値を小さくする効果である。

さて、曲げ突堤タイプとくの字型突堤タイプとの透水層「あり」を比較すると、全体的な地形変化量は同程度である。ただし、砂移動の傾向が少し異なる。前者(図一9(b))では中央から左右方向に砂が運ばれており、後者(図一10(b))では中央から右方向に運ばれる傾向が強い、この違いは、左側突堤の形状が異なるにもかかわらず実験での初期地形を同じにしたためであり、したがっ

て両者の優劣をつけるものとはならない。そうすると、海浜地形の安定性の観点では同じになるので、開放性に優れているくの字型突堤タイプの配置が望ましい。

#### 4. 結 論

本研究では、透水層埋設の三次元効果、特に突堤との併用効果や地下水を沖へ排水する面的システムについて三次元移動床実験を行い、以下の結論を得た。

- ① 排水流量は、透水層を埋設しないときの地下水位上昇量と wave set-up に強く依存しており、上昇量が多いほど排水流量は大きくなる。ただし、排水口付近での平均水位の変化も重要な要因であり、排水口付近で wave set-down が生じないと効率的な排水は行えない。
- ② 透水層「あり」では wave set-up が生じないので、突堤背後に向かう沿岸流が弱まる。その結果、突堤背後に向かう沿岸漂砂量も減少する。

謝辞：本研究は高松港玉藻地区における人工海浜整備に係る技術検討委員会において検討された事項の一部をとりまとめたものである。ここに、数多くのご助言を頂いた同委員会の委員および関係者の皆様に深甚な謝意を示します。

特に、本論文の取りまとめにあたり、ご指導とご助言を賜った同委員会の委員長である運輸省港湾技術研究所加藤一正水工部長に改めてお礼を申し上げます。

#### 参 考 文 献

小笹博昭・A. H. Brampton (1979): 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-104.

加藤一正・出口一郎・灘岡和夫・佐藤恒夫・山縣宣彦・佐藤幸夫・石本健治 (1999): 人工海浜への透水層埋設工法適用に関する検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 716-720.

山口柏樹 (1980): 土質力学, 技報堂出版, 389 p.

Kanazawa, H., F. Matukawa, K. Katoh and I. Hasegawa (1996): Experimental study on the effect of gravity drainage system on beach stabilization, Proc. of 25th ICCE, pp. 2640-2653.

Katoh, K. and S. Yanagisima (1996): Field experiment on the effect of gravity drainage system on beach stabilization, Proc. of 25th ICCE, pp. 2654-2665.