

透水層埋設による海浜安定化効果の定量的評価

塩見雅樹*・戸引 勲**・松川文彦**
津川昭博***・長谷川 巖****

1. はじめに

片山ら(1992)は、前浜から碎波帯内の範囲の砂中に透水層を設置し(図-1上段)、遡上して浜に浸透する水を沖に排水する方法には、前浜の侵食抑制や堆積促進等の海浜安定化効果あることを実験的に確認した。井上ら(1989)は、人工海浜の養浜材料の量的制約と海浜の利用上の観点から、水面上の前浜部は粒径の小さい砂、水面下は粒径の粗い砂の2層で構成された断面の変化を2次元実験で調べている。その結果、全体を細かな粒径の砂とした場合に較べて侵食傾向がなくなることを確認している。井上らの2層断面は、透水層の設置と同じ効果があったのではないかと判断される。

実験的には効果の確認された透水層を設置する工法が実用になれば、構造物が地上や海水中に露出しないので、景観・利用の面に優れた海浜安定化工法になる。しかしながら、現時点での我々の知識は定性的であり、また現地施工を前提とした検討は十分行っていない。そこで、本研究では、主に以下の3項目について検討した。

① 透水材料の検討：石材を用いた透水層は、例えば人工海浜のように下から順番に施工できる場合には施工上の問題は比較的少ない。しかしながら、侵食を受けている海浜を本工法によって保全するような場合には、砂中に透水層を埋設することの困難が伴うと考えられる。そこで、石材に代わる透水材料として透水パイプを検討した。

② 排水方法の検討：図-1上段のように、碎波帯内に透水層を設置することは必ずしも必要なことではないと考えられる。というのは、透水層による自然排水で地下水位を制御できる範囲は静止水面以上、つまり汀線より陸側に限られるからである。そこで、碎波帯内の透水層をパイプに置き換え、さらに地下水を一本のパイプで集中排水する方法を検討した。

③ 効果の定量的評価：透水層設置の効果を定量的に把握するための解析を行った。

2. 二次元実験の目的と実験内容

(1) 実験目的

二次元実験では、より優れた透水層材料を見つけるため、従来からの石材の他に、透水パイプ(後述)を使用した透水層の実験を行い、両者の効果を比較した。排水方法は集中排水としたが、水路幅が十分でなく詳細な検討が行えないので、集中排水方法により排水が可能であるかの検討にとどめた。

(2) 実験条件・方法

長さ38m、幅1m、高さ1.5mの造波水路を2分割し、ガラス壁側の水路内に中央粒径 $d_{50}=0.135\text{ mm}$ (透水係数 $k=6.28\times 10^{-3}\text{ cm/s}$)の砂で、海底勾配1:10、天端幅1.15mの移動床断面を作った。この断面内に、透水層上の砂層厚が5cmになるように、透水層を埋設した。透水層として2種類の材料を使用した。その1つである石材透水層は(図-1中段)、粒径 $d=20\sim 30\text{ mm}$ の石材を使用して、5cmの厚さとした。この場合の透水層の透水係数は $k=9.41\times 10^{-1}\text{ cm/s}$ である。なお、透水層内に砂が

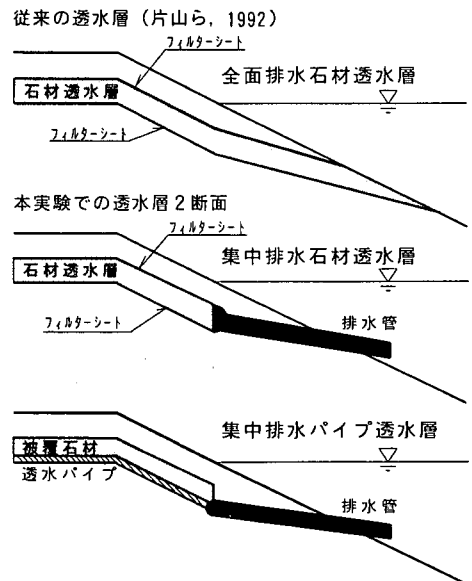


図-1 実験断面

* 正会員 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所
.. 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
... 運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所
**** 株式会社 エコー 横浜事務所 技術課

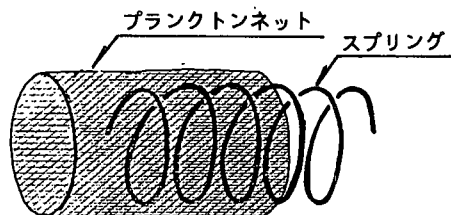


図-2 透水パイプの構造

混入しないように、砂と石材の境界にプランクトンネットを挟んだ。もう1つの透水層は(図-1下段)、図-2に示すφ15 mmのスプリングにプランクトンネット巻いた透水パイプを4本(横断方向15 cm間隔)使用して作った。透水パイプは、管壁からパイプ内に水が流れ込む構造になっている。透水パイプを固定するために石材(石材透水層と同じもの)で層厚5 cmになるように被覆した。ただし、この被覆石材の間隙には実験砂を充填してある。

以上の2種類の断面と、透水層を埋設しない断面それぞれに、波高10 cm, 周期1.79 sの規則波を2.5時間作用させた。

造波機前面および砕波帯内の波浪は、容量式波高計で測定した。地下水位の測定はビニールチューブで作ったマンオメータにより、岸沖方向に0.25 m間隔(1測線)で測定した。地形断面は砂面計を使用し、岸沖方向0.10 m間隔(3測線)で測定した。さらに、電磁流速計を用いて、集中排水管内の流速を測定した。

3. 透水層の効果及び透水層種類による違い

図-3は、三種類の断面内の波作用開始10分後(この時点までに断面変化はほとんど生じていない)の地下水位と wave set-up を、初期静止水位を基準にして示したものである。同図には、前浜断面も示しているが、縦横のスケールを極端に歪ませているため、急勾配になっていることに留意されたい。この波浪条件での、汀線位置の水位上昇量を合田(1975)の理論で計算した結果は1.8 cmである。透水層なしのケースでは、理論値とほぼ同程度の水位上昇量(1.5 cm)となっていて、地下水位の上昇はさらに多く、汀線の岸側75 cmの位置で3.7 cmである。

石材透水層の場合には、0.6 cm程度の wave set-up および地下水位の上昇が生じた。パイプ透水層では、wave set-up も地下水位の上昇も生じていない。つまり、石材透水層や透水パイプと沖への集中排水方法(排水パイプ使用)を組み合わせることによって地下水位の上昇を抑えることができる。その効果は、今回の実験ケースでは、透水パイプを用いた方が優れていた。

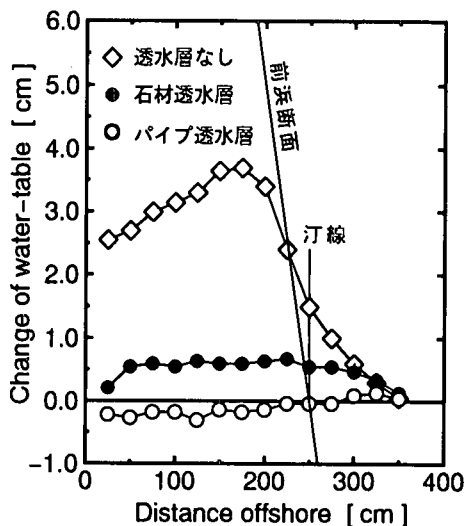


図-3 二次元実験での地下水位上昇量

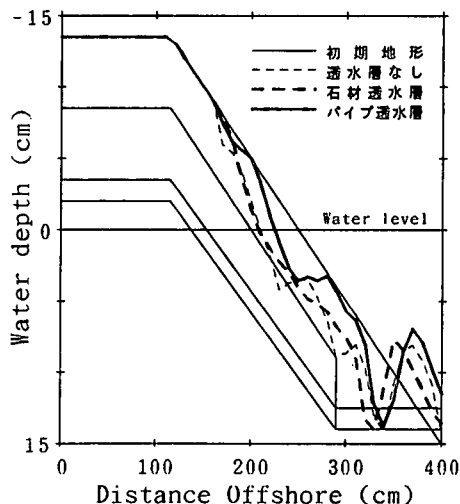


図-4 二次元実験での断面変化

図-4には、実験を行った3断面の断面変化を示す。透水層なしは、岸沖距離150 cmから350 cmの範囲にかけて侵食を生じ、その最大値は深さ5.0 cmを越えており、部分的に透水層より深いところまで掘れている。これに対し、パイプ透水層は全体的に侵食深さが浅く、特に、潮上の先端付近(200 cm前後)や、透水層の沖端付近(300 cm前後)においてその傾向が強い。石材透水層の断面では、透水層の露出には至らないものの、透水層なしとほぼ同等の侵食を生じている。石材透水層の侵食制御効果が弱いことは、図-3で述べた地下水位上昇の制御が透水パイプに較べて弱かったことと対応している。

4. 三次元実験の目的と実験内容

(1) 実験目的

二次元実験で地下水位制御効果・侵食制御効果の良好であった透水パイプについて、さらに三次元実験を実施した。この実験の目的は2つあり、第一の目的は、2次元実験では十分検討できなかった集中排水方法の効果を検討することである。第二の目的は、本研究の最も重要な目的であり、海浜安定化効果を定量的に評価することである。

(2) 実験条件・方法

三次元実験は、基本的に二次元実験と同一の実験条件とした。二次元実験との条件の違いは次の通りである。実験水槽は、長さ35m、幅46m、高さ1.1mの水槽内に、長さ35m、幅7.5mの水槽を2つ造り、パイプ透水層と、透水層なしの2条件の実験を同時に行った。パイプ透水層の概略を図-5に示しているが、実際は長さ2.9m、内径1.5cmの透水パイプ100本を沿岸方向7.5cm間隔で、そして内径4.4cmの排水パイプ8本を間隔94cmで埋設した。排水パイプの沖側端は砕波点とした。実験に使用した砂の特性は、中央粒径 $d_{50}=0.16$ mm、透水係数 $k=1.14 \times 10^{-2}$ cm/sである。

実験に使用した波浪諸元は、表-1の通りであり、波の作用時間は1時間である。なお、表-1の右側の3つの欄

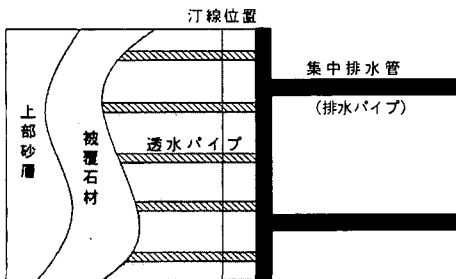


図-5 パイプ透水層配置の概略

表-1 三次元実験の波浪条件

周期(s)	波高(cm)	砂村堀川の定数C	実験結果のタイプ分け	
			透水層なし	透水層あり
1.34	1.5	2.0	II, III	III
	3.0	4.0	I, II	II, III
	4.5	6.0	I	II
	6.0	8.0	I	I
	7.5	10.0	I	I
	☆8.4	11.2	I	I
2.01	1.8	1.8	III	III
	3.6	3.7	I, II	II, III
	5.4	5.5	I	II
	7.2	7.4	I	I
	9.0	9.2	I	I
	☆12.5	12.8	I	I

については後述する。

地下水位の測定は、沿岸方向の分布を把握できるように、初期断面の汀線（静水時の水際線）と遡上の先端付近の2測線について沿岸方向1.25m間隔で行った。地形の測定は、沿岸方向に2.25m間隔に設定した3測線に沿って岸沖方向間隔0.125mで行った。ただし、表-1に示した波高に☆を付けたケースに限って、沿岸方向に0.25m間隔、岸沖方向に0.125m間隔の格子状の測定を追加し、地形変化の平面分布を確認した。

5. 集中排水方法の効果について

汀線位置での地下水位の測定結果の一例として、波高12.5cm、周期2.01sのケースを図-6に示す。図中の↑印が排水パイプの設置位置である。地下水位の測定地点と排水パイプの相対位置関係は各点において微妙に異なる。なお、比較のために、同じ波浪条件の下での透水層がないケースの地下水位も示してある。図によると、平均的には約0.5cmの水位上昇量となっている。沿岸方向に若干のばらつきがあるものの、透水層がない状態での地下水位と比較すると、沿岸方向にほぼ一様に地下水位を制御できているといえる。同様な傾向は、他の実験ケースにも認められた。したがって、透水パイプによって沿岸方向幅0.94mの範囲から集水した地下水を、排水パイプ1本で排水するという集中排水方法が可能である。

図-7上段は、透水パイプを埋設した海浜に、波高8.4cm、周期1.34sの波を1時間作用させた後の地形変化量である。図中には、8本の排水パイプ設置位置も明示してある。なお、排水パイプは砂中に埋設してあるので、実際は目に見えない。地形変化は、二次元的であり、8本の排水パイプで沖へ排水したことによる三次元的な影響は認められない。

図-7に示したケースは、表-1を見ても分かるように、波浪条件が厳しいため、前浜部で侵食が生じ、沖4m付近に沿岸砂州が形成されている。しかしながら、このような前浜侵食にも透水パイプによる地下水位制御効果は現れている。このことを示すために、同じ波浪条件で

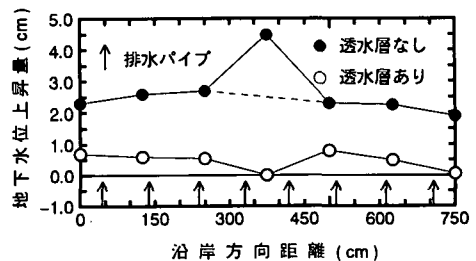


図-6 汀線位置での地下水位上昇量

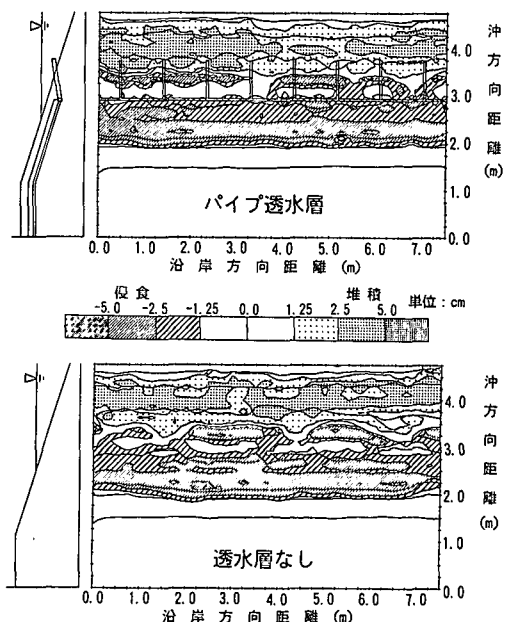


図-7 地形変化量分布

透水層がないケースの地形変化を図-7下段に示す。透水層がない場合には、前浜の侵食量が多く、同時に沖の沿岸砂州への堆積量も多くなっていることが分かる。

なお、図-7で、沿岸砂州のすぐ岸側に排水パイプの出口があるが、もともと排水パイプの沖側端を底面から少し浮かして設置してあった(図-1参照)ので、出口が砂で塞がることはなかった。

6. 海浜安定化効果の定量的評価

ここでは、透水層埋設による海浜安定化効果を定量的に評価することを試みる。本来ならば、図-7のように、平面的な地形変化について検討したいところであるが、三次元実験の時間と経費の制約から、ほとんどのケースは3測線に沿った断面を測定したに留まっている。そこで、この三断面の変化を式(1)で評価される Sunamura and Horikawa (1974) の海浜プロファイルタイプ分け定数 C の値で検討することにした。

$$C = (\tan \beta)^{0.27} (d/L_0)^{-0.67} (H_0/L_0) \dots\dots\dots (1)$$

Sunamura らによると、 C の値によって、断面変化は3つのタイプに分けられる。各タイプの特徴を汀線位置の変化に注目して述べると、

- | | |
|-------------|----------------|
| $C > 8$ | タイプ I : 汀線後退 |
| $8 > C > 4$ | タイプ II : 汀線不動 |
| $4 > C$ | タイプ III : 汀線前進 |

となる。

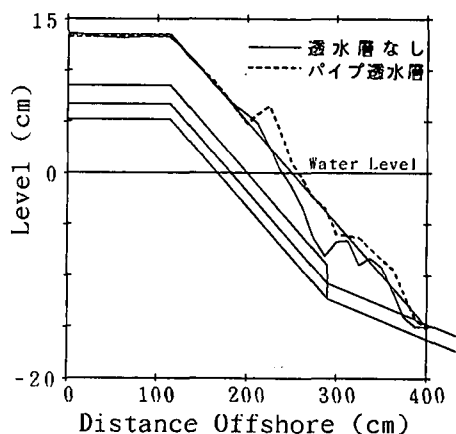
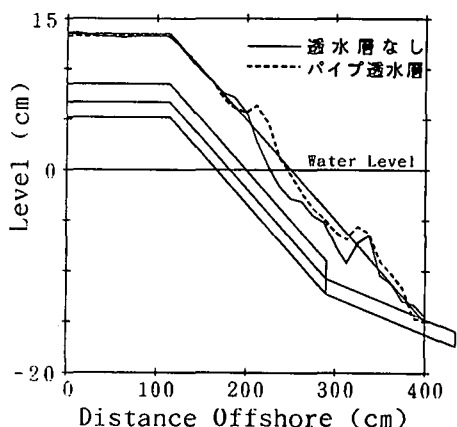
さて、式(1)で計算した各実験ケースの C の値を前出表-1 に示してある。波浪条件が同じであれば、透水層

なし・ありに係わらず C の値は当然同じである。ところが、 C の値が同じ条件であっても、透水層あり・なしで断面変化のタイプが異なる結果になった。その具体的代表例を周期 2.01 s の波浪条件について以下に示す。

図-8 は、 $C=3.7$ (波高 3.6 cm) の条件の時の断面変化を透水層なし・ありで比較したものである。透水層なしでは、汀線後退がわずかに生じており、タイプ I と II の中間的な変化となっている。これに対して、透水層ありでは、汀線のわずかな前進が認められ、タイプ II と III の中間的な変化になっている。つまり、透水層を設置することによって、堆積型ヘシフトしたことになる。

図-9 は、 $C=5.5$ (波高 5.4 cm) について同様の比較をしたものである。透水層なしでは明らかに汀線が後退しているが、透水層ありでは汀線位置の変化は生じていない。つまり、透水層設置によって断面変化は、タイプ I からタイプ II へとシフトした。

図-10 は、 $C=7.4$ (波高 7.2 cm) の結果である。いず

図-8 定数 $C=3.7$ での断面変化図-9 定数 $C=5.5$ での断面変化

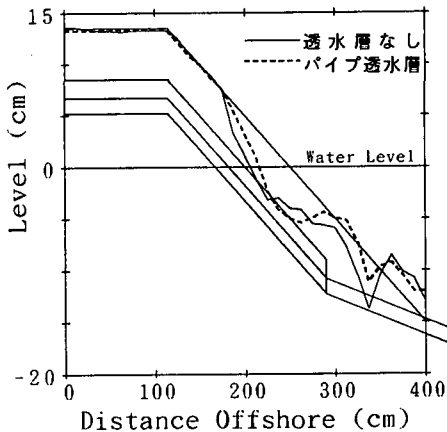
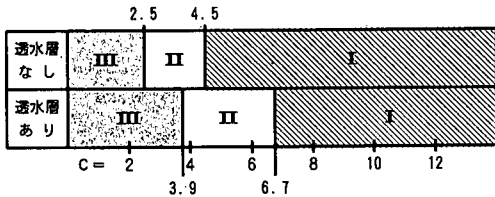
図-10 $C=7.4$ における地形変化

図-11 実験結果のプロファイルタイプ分け

れの汀線位置も後退していて、タイプはシフトするほどの効果はない。ただし、若干ではあるが、透水層ありの汀線後退量が少ないので、透水層設置によって侵食量が軽減されるという効果はあるといえる。

すべての実験ケースについて、透水層なし・ありの汀線変化のタイプを調べ、表-1の最後の欄に示し、さらに図-11に図示した。図-11によると、まず、透水層なしの場合のタイプ分けの基準となる C の値が、Sunamura and Horikawaのそれより小さくなっている。この原因の可能性として、以下の実験条件の違いが指摘できる。本実験は、①三次元実験(Sunamuraら：二次元実験)、②前浜勾配1/10(同じく：1/10より緩勾配が多く含まれている)、③波作用時間1時間(同じく：全て40時間以上)のもとで行っている。このような違いがあるので、透水層設置の効果を、Sunamuraらの結果との比較で評価することは避け、ここでの透水層なし・ありの実験結果を比較することによって評価する。そうすると、図-11より、透水層を設置したことによって、タイプを規定する C の値が透水層なしの C の値の約1.5倍になっていることが分かる。

C の値の変化を逆にとらえると、以下ようになる。

ある値 C_a の条件の波浪が透水層設置の断面に作用したときの断面変化は、 $C_a/1.5$ の波浪が自然海浜(透水層なし)に作用したときと同じになる。つまり、透水層には、 C_a の値を約65%に減少させる効果がある。この効果は、波浪制御構造物の効果に置き換えることができる。一般に、波浪制御構造物で制御できるのは、波の周期ではなく波高である。そこで、式(1)において、海底勾配一定、粒径一定、波長(周期)一定とすると、 C の値は波高だけに正比例する。したがって、 C の値が約65%に減少するということは、透水層設置は波高を約65%に減少する消波構造物と等価な機能を持つといえる。これは、天端水深のやや大きい、あるいは天端幅の広くない、潜堤程度の消波機能である。ただし、透水層には、汀線付近での水位上昇がほとんど生じないという、潜堤にはない機能がある。

7. おわりに

透水層埋設・集中排水方法の効果、および海浜安定化効果の定量的評価は、以下の通りである。

① 透水層材料として透水パイプを用いる方法によっても、地下水位を制御できる。

② 碎波帯内の透水層をパイプに置き換えて、集中排水する方法は、前浜と碎波帯内全域に透水層を設置した場合と同じ効果がある。これが確認できたことによって、本工法の現地施工性の向上が期待できる。

③ 透水層設置は、汀線変化に関して波高を約35%減殺するのと等価な効果がある。

以上のように、室内模型実験により透水層の効果の確認が行えた。そこで現在は、本工法の確立を目指し、現地海岸における実験を行っている。

なお、本研究では、運輸省港湾技術研究所加藤漂砂研究室長に終始有益なご助言をいただいたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 井上雅夫・島田広昭・梶元淳二(1989): 新しい置砂法によって造成された海浜の波による変形過程, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 464-468.
- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川巖(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.
- 合田良實(1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 田中則男(1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152-157.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-Dimensional Beach Transformation Due To Waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-937.