

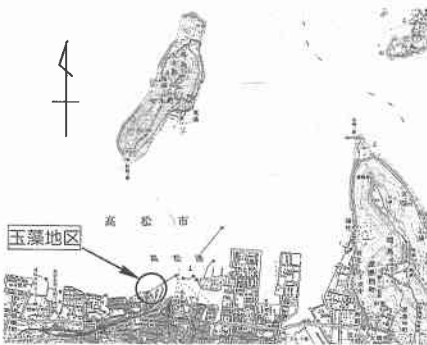
人工海浜への透水層埋設工法適用に関する検討

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*****

1. はじめに

砂浜に透水層を埋設して海浜の安定性を高める透水層工法は、透水層を岸沖方向に埋設することで沖向き漂砂を抑制する効果が潮位に関係なく発揮され、かつ透水層自体が砂浜に埋設されるので景観的に優れていると共に、天然の砂浜海岸と同様な海浜利用が可能である特徴を有している。従って、具体的に現地に適用するにあたっては、このような透水層工法の特徴を最大限生かすことが望まれる。

本工法を適用した人工海浜を建設する予定の高松港玉藻地区海岸は、潮差が約2.3mと大きく、瀬戸内海に位置する周辺再開発の事業区域内であるので景観的な配慮が必要であるなど、従来の離岸堤工法や潜堤工法よりも透水層工法の適用が適していると言える。ところが、これまでの透水層の効果に関する検討は基礎的なものであるため、高松港玉藻地区における具体的な施工に向けて、従来工法との比較、二次元水理模型実験による効果の確認、数値シミュレーションによる三次元的な配置の検討を行った。



図一 高松港玉藻地区位置図

2. 適用地域の自然条件

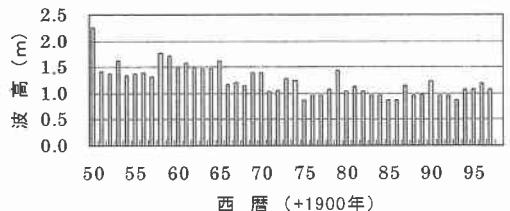
2.1 海岸性状

当該海岸はかつて砂浜海岸であったが、埋め立てによって砂浜を失った。埋め立ては背後の土地利用を考慮して計画されたため、護岸法線は波向に対して直角ではなく、また、埋め立てで護岸を沖出したため、前面水深が約13.5mと大きくなっている。

対象海岸周辺は、人工構造物による整備が進んでおり、自然のままの状態に残されている海浜を見つけることができない。そこで、当海域の平面的な安定海浜形状を探る目的で、過去の空中写真・地形図・海図を収集した。空中写真・地形図では汀線位置を特定できる情報は得られなかった。1910, 1930年の海図に記録されている汀線によると、対象地区の安定汀線方向はN49°Eである。

2.2 波浪条件

一般的に、人工海浜の安定性の検討には年数回程度発生する波浪が適用されることが多いが、当該海岸においては施設の重要性を考慮して年最大波を適用することにした。ところが、現地においては波浪の観測が実施されていないため、過去38年間(1950年～1987年)の風資料および10年間分のアメダスデータ(1988年～1997年)を用いて波浪推算を行った。推算結果から各年の有義波高の最大値を抜き出すと、図一2のとおりである。図一2によると、1970年以前の年最大有義波高は1.4m程度で、最近20年は1.0m程度である。最近波高が小さくなっている事の原因が不明なので、安全側として、1970年以前の平均的な年最大波(有義波高)1.4m、これに対する周期4.6sを採用した。なお、設計波の諸元は、50年確率



図二 年別最大有義波高の経年変化

- * 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
- ** 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科
- *** フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報処理工学研究科
- **** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所
- ***** 正会員 運輸省第三港湾建設局高松港湾空港工事事務所
- ***** (財)沿岸開発技術研究センター調査部
- ***** 株式会社 エコー 設計部

波として沖波有義波高 $H_{1/3}=2.02$ m, 周期 $T_{1/3}=5.5$ s である。

2.2 その他の条件

H.W.L.とL.W.L.の潮位差は約2.3 mと大きい。ただし、海岸近傍の潮流は上げ潮、下げ潮時ともに10 cm/s以下と、比較的小さな流速値である。前述のアメダスデータによると、風は四季を通じてSE方向が卓越している。ただし、大きな風速は冬季節風の影響によるW系の出現が最も多く、風速5 m/s以上の出現は冬期のW系が卓越する。

3. 海浜安定化工法の選定

対象海岸は前面水深が大きいため、養浜材料が人工海浜外に流出すると、波作用による砂浜の回復を期待することが難しい。このため、人工海浜建設にあたっては何らかの養浜材料流出防止対策が必要である。そこで、対策工として、離岸堤あるいは潜堤を使用する方法、小規模な砂止め堤と透水層を組み合わせる方法の3工法を検討した。透水層工法の場合に小規模な砂止め堤を適用したのは、水深の大きな海岸において養浜断面を小さくするための工夫である。一方、離岸堤や潜堤の場合には、これらの構造物に砂止め堤と同じ養浜端部処理の機能を持たせた。この3工法について、同等な海浜安定化効果を発揮するような断面とした場合の建設工費を見積り、比較を行なった。

ただし、3工法の海浜安定化効果を直接的に比較することは困難であったので、便法として波高伝達率で比較することとした。透水層工法については、Kanazawaら(1996)が波高伝達率60%の波浪制御構造物に匹敵する海浜安定化効果が得られると述べている。そこで、離岸堤と潜堤についても、波高伝達率60%を達成する断面を前提にすることにした。

以上の条件で工費比較を行った結果、離岸堤工法の場合の建設費用を100とすると、潜堤工法は120、砂止め堤と透水層工法の組み合わせは95であった。この結果は、前面水深が約14.5 m(満潮時)と大きいので離岸堤の高さが約16 mと大きくなったことや、潮差が大きい(2.3

m)のために、潜堤天端をL.W.L.とした場合、満潮時に波高伝達率60%を達成するのに、天端幅が約35 mにもなったことによるものである。

以上の工費比較をもとに、小規模な砂止め堤と透水層工法の組み合わせを選定した。

4. 透水層を埋設する人工海浜の断面形状

3.で選定した透水層工法の断面は、以下のようにして決めたものである。

人工海浜の養浜勾配の検討には年最大波を適用し、前浜勾配はRector (1954)の方法、外浜勾配はSunamura (1984)の方法で、それぞれ1/11, 1/17と決定した。養浜天端高の検討には、防災上の観点からH.W.L.における設計波の遡上高を考慮し、D.L.+4.0 mとした。なお、養浜断面を小さくするために、養浜断面の水深が佐藤・田中(1962)の方法で計算した表層移動限界水深と一致するところに小規模な砂止め堤を設置して、養浜の端部処理とした。この砂止め堤には消波機能を持たせていないので、安定性が満足される範囲内で最小規模とした。

透水層の配置はKanazawaら(1996)の方法を参考に、陸側端部を遡上先端位置の直下に、沖側端部をL.W.L.水際線の直下に設定した。なお、透水層沖側端部で排水管に接続し、砂止め堤の沖側に排水することとした。

以上の検討により、人工海浜断面は図-3のとおりとした。ところが、このように砂止め堤によって水深を急激に立ち上げる人工海浜断面に、従来の人工海浜設計方法が適用できるかが明らかでない。また、一様勾配の海岸について検討されてきた透水層工法に関するこれまでの模型実験や現地試験の結果を、図-3の断面に直接適用できるとは限らない。そこで、二次元水理模型実験によって、人工海浜断面の妥当性を検証することにした。さらに、透水層の効果の確認、透水層埋設密度の検討、大潮位差海岸への適用性も検討した。

5. 二次元水理模型実験による検討

5.1 実験内容

実験では長さ40 m幅、0.67 m、高さ1.5 mの造波水路

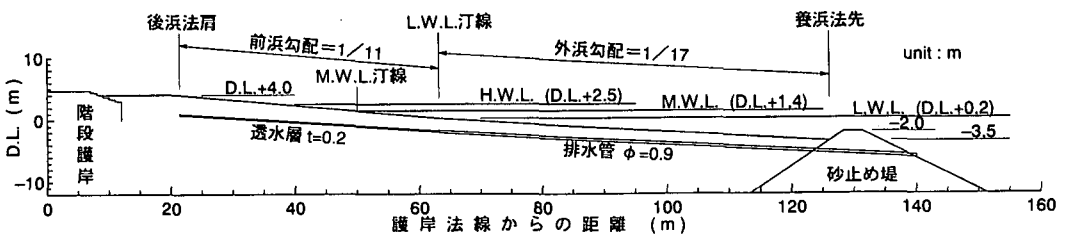


図-3 透水層を用いた人工海浜の標準断面形状

内に、 $D_{50}=0.23\text{ mm}$ の砂を用いて図-3の海浜断面を1/20縮尺でつくった。波の周期は年最大波をフルードの相似則で縮尺して、 1.03 s とした。波高の縮尺においては、Sunamura and Horikawa (1974)の海浜安定化定数Cを用い、汀線変化が相似になるような縮尺を検討し、実験波高を 11.0 cm とした。この規則波を5時間作用させ、透水層をストライプ状に0.37、0.52、0.82の密度で埋設する場合と、透水層なしの比較を行なった。実験潮位はH.W.L.、M.W.L.、L.W.L.の3種類として、潮位変動に対する効果の確認を行なった。

測定は地下水位、海浜断面、排水管内流速、砂止め堤天端上流速等について実施した。

5.2 透水層の効果の確認と埋設密度の検討

図-4は、M.W.L.の場合の波作用開始60分後の地下水位上昇量と wave set-upである。透水層なしでは砂浜内部の地下水位が最大で 1.75 cm まで上昇している。一方、透水層を埋設したケースでは地下水位の上昇と wave set-upが抑制されている。特に、透水層の埋設密度0.52と0.82では地下水位及び wave set-upが静止水位よりも低下している。これは排水口を設定した砂止め堤位置において、波高の急激な増加によって約 0.4 cm の wave set-downが生じていたことによるものである。

図-5は、M.W.L.の場合の5時間の波作用による海浜断面変化の比較である。図中では海浜断面が重ならないように縦方向にずらして示した。透水層なしでは汀線付近で大きく侵食を受けているが、透水層ありの3ケースでは明らかに侵食が抑制されている。特に、透水層の埋設密度0.52と0.82のケースでは汀線よりも陸側にバームが形成されている。

M.W.L.の場合の汀線位置における wave set-up (○印)と冲向きを正とした漂砂量(●印)を図-6にまとめ

た。wave set-upに関しては、透水層密度0.37、0.52や0.82で、ともに水位ゼロ以下に低下している。漂砂量に関しては、透水層密度0.37では冲向きの漂砂を軽減できるものの、その効果が十分ではないと言える。ところが透水層密度0.52や0.82の場合には岸向き漂砂に転じていることがわかる。

以上の結果から、透水層の埋設密度は50%以上に密にすると、透水層埋設の効果が十分得られることがわかった。

実験では、透水層をストライプ状に埋設する際の、ストライプ間隔までは検討できなかった。そこで佐藤ら(1998)の浸透流シミュレーションによって、埋設密度50%でストライプ間隔を5m、10m、20m、50mとする場合の地下水位上昇抑制効果を比較した。数値計算においては、海浜勾配1/11の砂浜に波高1.4m、周期4.6sの波が汀線に対して直角に入射する条件を与えた。また地下水位上昇量は岸沖方向にも異なるので、静止水位時の初期汀線から陸側に2m、4m、10m、20m、30m位置で行った。

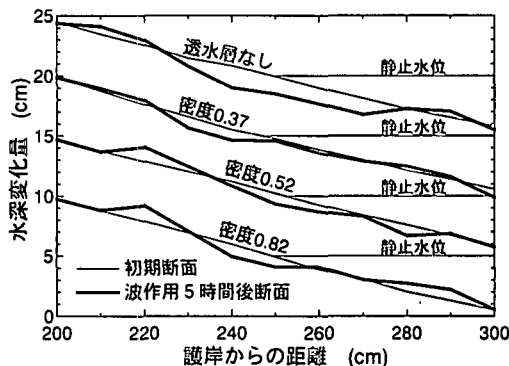


図-5 5時間の波作用による海浜断面変化

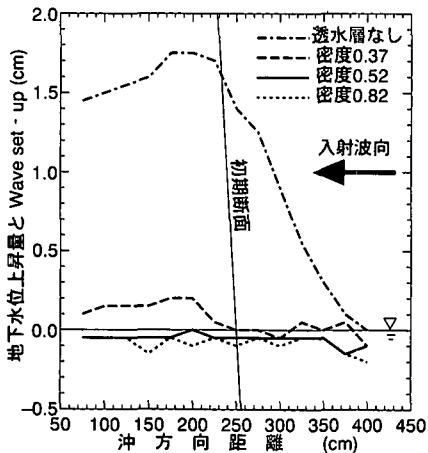


図-4 60分後の地下水位上昇量と wave set-up

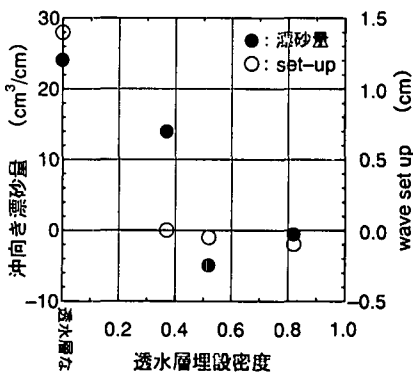


図-6 漂砂量と wave set-upの比較

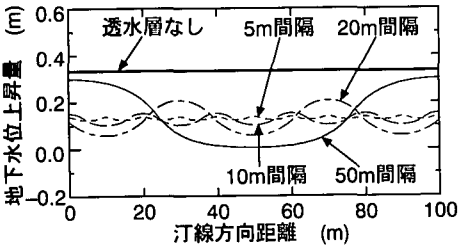


図-7 地下水位分布の計算結果 (汀線の陸側 10 m)

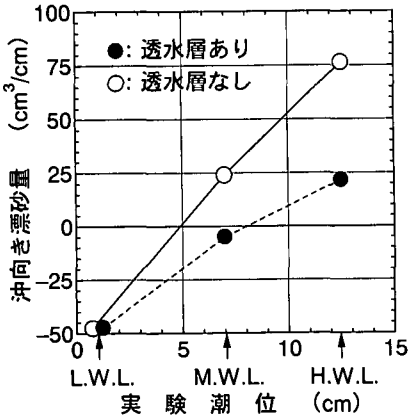


図-8 潮位の違いによる漂砂量の比較

図-7 は初期汀線位置から陸側 10 m 地点の計算結果である。ストライプのピッチ 5 m (点線) と 10 m (破線) ではほぼ均等に地下水位の上昇を抑制できているが、ピッチ 20 m (一点鎖線) と 50 m (細い実線) では透水層のある部分とない部分の地下水位上昇量の差が大きい。そこで、透水層のピッチは 10 m までは広げることが可能であると判断した。

5.3 潮位変化の影響

図-8 は、3 種類の潮位での実験結果から透水層なしと透水層あり (埋設密度 0.52) の沖向き漂砂量を計算した結果である。ここで、漂砂量はそれぞれの潮位の汀線位置 (水深ゼロ) での量である。潮位が L.W.L. のときは、両者は岸向きで同じ程度である。これは、入射波が砂止め堤のところで碎波し、海浜部には小さな波しか到達しないためである。これに対し、潮位が高くなるにつれて入射波が直接海浜まで届くようになるため、透水層なしでは沖向き漂砂に転じる。透水層ありでは M.W.L. のときでも依然として岸向き漂砂であり、H.W.L. で沖向きになるものの、その量は透水層なしの場合の 28% である。透水層の海浜安定効果は高潮位ほど強く現れる。

6. 汀線のコントロール

図-9 は、One-Line モデルで汀線変化を予測した結果である。計算では、風データから推算した波高、周期、波向の月毎の発生頻度に基づいて、8 方向からの波を作用させている。点線が初期汀線であり、波を 20 年間相当作用させた最後の 1 年間について毎月の汀線位置を重ねて示してある。予測された汀線は、中央より左側の海浜で汀線から護岸までの浜幅が非常に狭くなり、また右側の突堤近くでは汀線が突堤先端位置まで前進しており、砂が右方向に流出しそうである。さらに、図-9 中に実線で描かれた汀線は、左右の突堤付近で線の太さが太くなっている。これは、季節的に変動する波向きに対応して汀線が変化していることを示している。つまり、左右の突堤近くでは、透水層上の砂層厚が変化することになる。したがって、この変動幅を少なくして透水層の埋設レベルまで砂面が低下することを避けるか、逆に変動幅を考慮に入れた深さに透水層を埋設する (平野ら, 1997) 必要がある。

護岸から汀線までの距離が沿岸方向にほぼ一定になるように汀線の方向を少し回転させるため、左側突堤を曲げさらに先端部を砂止め堤に沿って 50 m 延長した。また、右側突堤を 33 m 延長した。図-10 が、予測された最終汀線形状であり、ほぼ一定の浜幅が得られている。この図でも、月毎の汀線位置を重ねて描いているのだが、

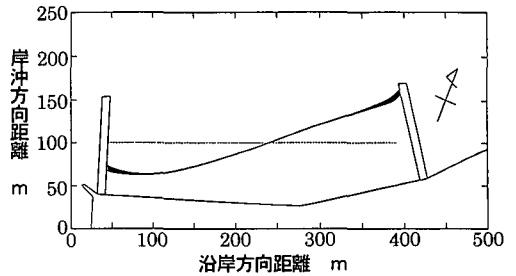


図-9 直線的な突堤の場合の汀線変化予測結果

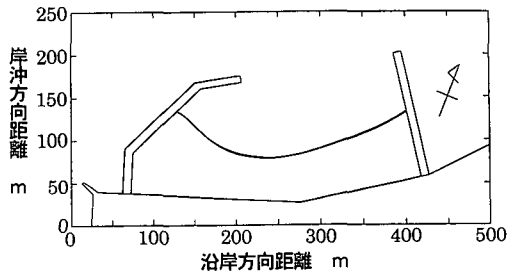


図-10 突堤配置を工夫した汀線変化予測結果

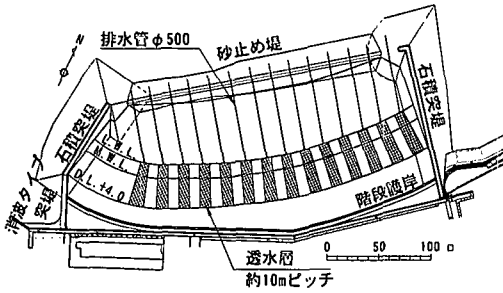


図-11 平面配置図

汀線の太さが細く、したがって、左右突堤付近の汀線の季節変動が少なくなったといえる。

One-Line モデルによって汀線変化予測計算を実施したものの、実は、One-Line モデルでは透水層埋設の効果を計算することができない。そこで、図-10の人工海浜に透水層を埋設した三次元水理模型実験を実施した(佐藤ら, 1999)。透水層の密度は、二次元実験で確認した0.50とした。

三次元実験の結果から、二次元実験によって得られた成果に加えて、①透水層を埋設することにより人工海浜内で発生する海浜流によるLocalな沿岸漂砂が抑制できること、②透水層を埋設すると突堤を開放的にできること、③排水口はwave set-downを生じる位置(砂止め堤の沖側)にするべきであること、などが明らかとなった。この結果を受けて概略設計を実施し、図-11の平面配置を採用することとした。

7. 現地試験の必要性

通常の人工海浜の建設では、施工後しばらく経過したときの海浜地形が当初設計と異なっても、海浜の安定や防災、利用上の支障がなければ、特に問題とはならない。これに対して、透水層を埋設して人工海浜を建設する場合、出来る限り当初設計どおりにならなければならない。つまり、高精度の地形変化予測が求められている。というのは、施工後の最終地形および変動幅などを考慮して透水層の埋設深さが決められるからであり、したがって、予測精度が悪いと施工後の地形変化によって透水層が露出する箇所が発生することになるからである。

しかし、ここで使用したOne-lineモデルのキャリブレーションでは、近くにまったく砂浜がないので、1930年の海図に記載されている砂浜を使用せざるを得なかったし、計算に用いている波は実測データではなく風データを基にした推算値あり、さらには波向きの変動

考慮したものの、入射波のエネルギーフラックスの変動によって生じる岸沖漂砂の変化まではこのモデルでは予測できない等、予測精度向上に関して様々な障害がある。

そこでこれらの障害を人工海浜施工の過程で克服することにした。つまり、左右両突堤と砂止め堤を建設し、その中に養浜砂を投入し、最終地形にはまだ至っておらずまた透水層も埋設されていないが砂浜は形成されている状態になったところで、施工を中断する。そして、自然に放置し海浜が外力に対してどのように応答するかを詳細に調査することにした。調査期間は少なくとも1年間はとる予定である。

8. 結 論

主要な結論は、以下のとおりである。

- ① 水深と潮位差の大きい対象海岸においては、離岸堤工法や潜堤工法よりも、透水層工法のほうが経済的である。
- ② 透水層密度を50%まで粗くしても透水層を密に埋設する場合と同様に、沖向き漂砂量やwave set-upの抑制効果を得ることができた。
- ③ 汀線方向の全延長で防災上必要な浜幅を確保するには、片側の突堤をL型に曲げる必要がある。また透水層の埋設深さの設定には、季節的な汀線の変動幅を考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 佐藤昭二・田中則男 (1962): 水平床における波による砂移動について, 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 95-100.
- 佐藤勝弘・野口雄二・長谷川巖 (1998): 透水層埋設海岸における長周期波による浸透流計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 631-635.
- 佐藤恒夫・榑 俊博・柴田 悟・込山 清・平松和也・長谷川巖 (1999): 海浜安定化に関する透水層埋設の三次元的効果, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 711-715.
- 平野浩一・千田昌平・和田信昭・宇多高明・見附敬三 (1997): 茅ヶ崎海岸におけるBMSの被災原因とその改良方策, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 981-985.
- Kanazawa, H., F. Matsukawa, K. Katoh and I. Hasegawa (1996): Experimental study on the effect of gravity drainage system on beach stabilization, Proc. 25th ICCE, pp. 2640-2653.
- Rector, R. L. (1954): Laboratory study on equilibrium profiles of beaches, Beach Erosion Board, Tech. Memo, No. 41.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slopes, Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 242-245.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-937.