

水理模型実験による現地海岸に適用する 透水層海浜安定化工法の検討

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE APPLICATION OF GRAVITY
DRAINAGE SYSTEM FOR BEACH STABILIZATION TO THE FIELD

藤井 敦¹・小椋 進²・竹内泰弘²・橋本雷士³・三原正裕⁴・長谷川巖⁵

Atsushi FUJII, Susumu OGURA, Yasuhiro TAKEUCHI, Raishi HASHIMOTO, Masahiro MIHARA
and Iwao HASEGAWA

¹正会員 工修 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 (同下)

²国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町 1-57-2)

³国土交通省 中部地方整備局 四日市港湾工事事務所 (〒510-0051 四日市市千歳町 9-1)

⁴株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 10-35)

⁵正会員 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 10-35)

The seawall has been constructed at Karasu district of Tsu-Matsusaka port on the west side of Ise bay, because of the present seawall is getting decrepit. In front of the seawall is sandy beach, however, the sand fill will be done as an Integrated Shore Protection System at the part where less beach width, and also the Gravity Drainage System for beach stabilization will be constructed to keep the fill sand. Gravity Drainage System is the beach protection technique of controlling a groundwater level by burying a permeable layer under the foreshore. The design method of Gravity Drainage System is not established because there are less construct precedents of this system at the field. Accordingly, they buried permeable layer partially at the field and carried out the field observation for designing the Gravity Drainage System. But they could not take enough data to investigate the plane arrangement because of the field observation carried out narrow area. This three dimensional hydraulic model experiment were done to investigate the necessity of beach protection works and the adequate plane arrangement.

Key Words : gravity drainage system for beach stabilization, hydraulic model experiment, integrated shore protection system, sand fill

1. はじめに

伊勢湾の西側に位置する津松阪港香良洲地区では護岸の老朽化が進んだため、既存の護岸の海側に新たな護岸を建設中である。護岸の前面は砂浜であるが、浜幅が狭い部分には、面的防護工法として護岸の前面に養浜を行い、養浜砂を維持するために透水層埋設による海浜安定化工法を適用する予定である。透水層埋設による海浜安定化工法は現地への適用事例が少なく、設計法が確立されていない。そこで、現地海岸に部分的に透水層を埋設して、設計に用いる基礎データの収集を行った。しかし、現地試験施工は狭い範囲でしか実施できなかったため、透水層の平面的な配置を検討するのに十分なデータは得ら

れなかった。そこで、三次元水理模型実験を実施し、海浜安定化工法の必要性の検討と、透水層の適切な配置に関する検討を行った。

2. 現地自然条件

香良洲地区の現況は写真-1のとおりである。海岸延長は約2.8kmで、河川にはさまれた河口デルタのような立地条件である。北側端部から海浜延長の1/3程度の部分は浜幅が広く、写真-1において砂浜部が白く見える。これに対し、南側の2/3程度は浜幅が狭く、護岸の建設と共に養浜を実施する予定である。

香良洲地区は伊勢湾の西奥にあるので、外洋の波浪の影響はほとんど受けず、設計波が $H_{1/3}=3.9\text{m}$ で

$T_{1/3}=6.3s$, 5年確率波が $H_{1/3}=2.2m$ で $T_{1/3}=5.0s$ である。H.W.L.が T.P.+0.94m で、L.W.L.は T.P.-1.02m であるので、潮位差は約 2m である。前浜の砂は中央粒径 D_{50} が 0.4mm, 密度は $2.6g/cm^3$ である。養浜材料は現地と同じ $D_{50}=0.4mm$ の砂にする予定である。

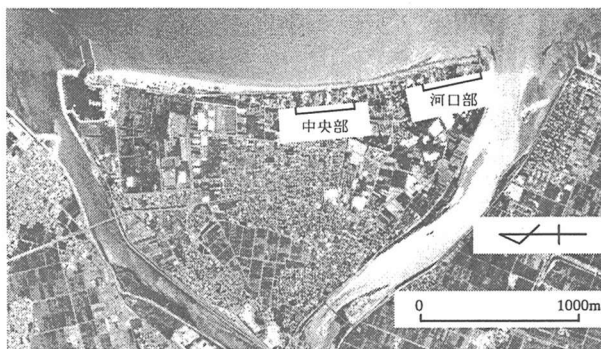


写真-1 香良洲地区海岸周辺の空中写真 (1995年)

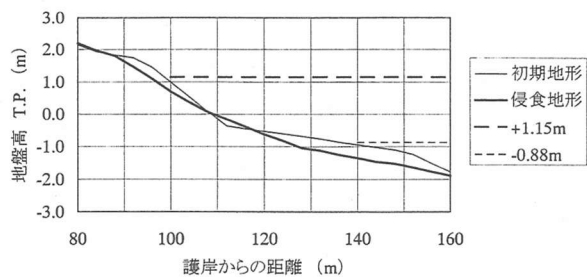


図-1 現地で観測された侵食事例

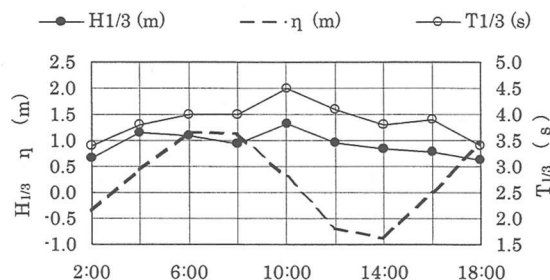


図-2 侵食事例の波高・周期・潮位の経時変化

3. 実験条件と実験方法

模型実験は、現地の侵食事例を実験水槽に再現し得る実験波高を決定するための再現実験と、養浜地形の変化を確認する養浜実験の2種類を実施した。

造波水槽は、規則波と不規則波の発生が可能な造波板長 19m のピストン型造波機を備えた、長さ 30m × 幅 19m × 高さ 1.2m を使用した。19m 幅の実験水槽に延長が 2.8km の砂浜全体を再現することはできないので、実験水槽を2つに仕切り、写真-1 に中央部および河口部として示した部分を 1/40 縮尺で再現した。現地の海底地形は汀線とほぼ同様な形状の等深線であること、汀線に対してほぼ直角入射となる ENE~E~ESE の波浪発生頻度が 81.7% であること、深浅測量結果や汀線変化計算の結果より沿岸漂砂は極めて緩やかであること、などから、実験水槽においては平行等深線の海底地形に対して直角方向から波を入射させる条件とした。

(1) 再現実験の条件と方法

再現実験では、導波板を使って実験水槽内に 2.5m 幅 (現地換算で 100m) の水路をつくり、この中に再現対象の初期地形を作成した。図-1 の細線が侵食前の初期地形で、太線が侵食後の地形である。この侵食は 2000 年 8 月 31 日の時化によるもので、当日の 2 時から 18 時に対象海岸前面の水深 10m 地点で観測した有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$, および津松阪港で観測された潮位 η の経時変化は図-2 のとおりである。図-1 の破線は、対象期間中の最大潮位と最低潮位である。再現実験の波浪条件は、この時化の有義波高の最大値を採用して、 $H_{1/3}=1.32m$ で $T_{1/3}=4.5s$ (10 時) とした。実験波浪は侵食や堆積のコントラストが明確に現れやすい規則波とした。

透水層埋設による海浜安定化工法では、砂層内の浸透流を取り扱うため、模型実験に適用する砂の選定にあたっては、地形変化の相似性の他に砂の透水性についても現地との相似性に配慮する必要がある。模型縮尺 1/40 の場合に、現地の養浜に適用される $D_{50}=0.4mm$ の砂と透水係数が相似になる実験砂の粒径を、山口¹⁾による透水係数 $k=100D_{10}^2$ を適用して検討すると $D_{50}=0.16mm$ となる。周期はフルードの相似則にしたがって縮小し、Sunamura and Horikawa²⁾の海浜安定化定数 C を用いて 0.16mm の砂の場合に汀線変化が相似になる実験波高を検討すると、波形勾配が 0.12 を超える結果となり、適用不可能と判断した。そこで、波高と周期をフルードの相似則で縮小した場合に C 値により汀線変化が相似になる砂の粒径 $D_{50}=0.03mm$ と、砂の透水係数が相似となる $D_{50}=0.16mm$ の平均的な粒径として、 $D_{50}=0.1mm$ の実験砂を適用した。実験波高は、この砂の場合に C 値による汀線変化が相似になるように算定した 6.9cm を基本とした。ただし、結果的に透水係数が相似になっておらず、また、この波高を適用しても地形変化が相似になるかが不明である。そこで、現地で観測された海浜断面変化を実験水槽に再現する実験を実施して、養浜地形の変化予測実験に適用する実験波高を決定することとした。

地形変化を相似にするために、実験波高はフルード則による波高よりも大きく設定した。したがって、実験潮位は時化の期間中の最高潮位よりやや低い H.W.L.とした。

再現実験では、3 測線の海浜断面、地下水位の岸沖方向分布、及び波高の測定を行った。海浜断面はレベルを用いて測定を行った。地下水位測定には自作の地下水位計とマンメータを使用した。波高測定

には容量式波高計を使用した。

香良洲地区は河川に囲まれているので、砂浜の地下水位は河川水位の影響を受けている。現地観測結果から侵食再現対象とした時化の際の護岸周辺の地下水位を調べると T.P.+0.5m であったので、これも実験水槽に再現することとした。ただし、前述のとおり砂の透水性が相似になっていないので、 $v=k \cdot i$ (v ; 浸透流速, k ; 透水性係数, i ; 動水勾配) の式で浸透流速 v が相似になるような動水勾配 i を求め、これを満足するように陸側地下水位を調整した。

(2) 養浜実験の条件と方法

養浜実験は、幅 19m の実験水槽を 2 つに仕切って、中央部と河口部の実験を同時に実施した。実験は、透水層なしの場合と透水層の配置を 3 種類に変更した透水層ありについて実施し、香良洲地区に最適な透水層配置の検討を行った。波浪条件は、侵食再現波浪と 5 年確率波の 2 種類とし、それぞれ 5 時間ずつ作用させた。潮位が高いほうが養浜の安定に対して厳しい条件となることから、実験潮位は H.W.L. とした。なお、5 年確率波の場合にも遡上の高さが T.P.+2m 程度であり、養浜の天端高+2.5m には届かなかった。そこで、5 年確率波の場合に養浜の天端まで波が遡上するように、潮位を T.P.+1.78m まで高めたケースも実施した。ただし、このケースは波作用時間を 1 時間とした。

佐藤ほか³⁾などに示されているように、砂浜の地下水位が潮位よりも高い状態では、水位差がない状態よりも砂浜の侵食を受けやすいことが知られている。そこで、砂浜の安定に対して厳しい条件として、護岸背後の水位を潮位より高くすることにした。現地における 14 ヶ月間の地下水位観測によると、護岸より内陸側の地下水位が T.P.+1.5m を超える頻度が 3%、T.P.+1.2m を超える頻度が約 10% であったので、護岸背後の水位を 5 年確率波では+1.5m、侵食再現波浪では+1.2m に設定した。なお、実験水槽においては、砂中浸透流速が現地と相似になるように、再現実験と同じ方法で護岸背後の水位を調整した。

実験に適用した海浜断面は図-3 のとおりである。養浜断面は、計画断面どおり天端高は T.P.+2.5m で、前浜勾配を 1:15 とした。透水層の二次元的な配置は図-4 のとおりで、透水層の陸側端部は護岸の根入れ部とし、沖側端部は Kanazawa ほか⁴⁾の方法を参考に、L.W.L. の水際線の直下に設定した。柳嶋ほか⁵⁾によって示されているように、排水口は汀線付近に設置することが可能であり、香良洲地区における試験施工でも、この方法で透水層の効果が得られることを確認済みであるので、排水口位置は汀線のやや沖側に設定した。

透水層の材料は Kanazawa ほかと同様にエキスパンドメタルを箱型に整形して、土木シートとプランクtonネットを巻きつけた構造とした。土木シート

とプランクtonネットは実験に適用する砂の透水性係数よりも透水性が十分に高いものを使用した。透水層の平面的な配置は、透水層の埋設密度が 50% で透水層幅が 6m と 24m (いずれも現地換算) の場合と、透水層の埋設密度が 30% (透水層幅が 10m で透水層隙間部の間隔が 24m) の場合の 3 種類とした。

養浜実験では、地形、地下水位、波高分布、流況分布の測定を行った。地形はレベルを使用して岸沖方向に 10cm (現地で 4m) 間隔、沿岸方向に 50cm (現地で 20m) 間隔で測定した。ただし、50%、24m のケースと 30% のケースでは、沿岸方向の測線を透水層の中心と隙間部の中心に変更した。

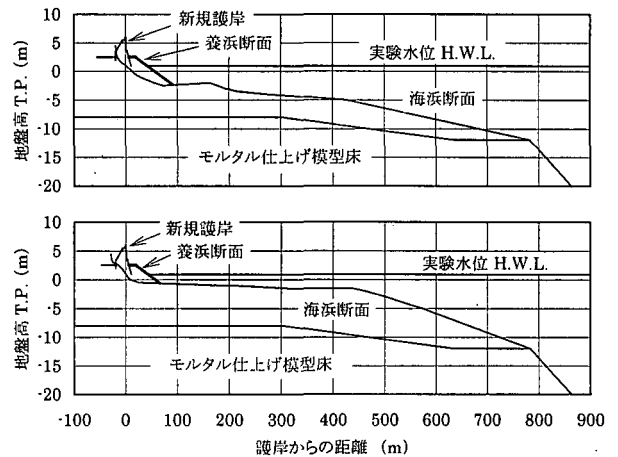


図-3 実験に適用した海浜断面形状

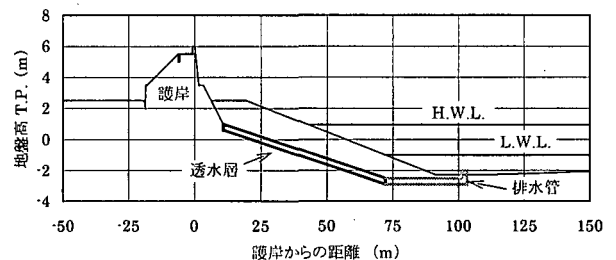


図-4 透水層と排水管の二次元的配置

4. 実験結果

(1) 地形変化の再現性

地形変化量を波作用時間で割って単位時間あたりの地形変化量としたものを地形変化速度と定義し、模型時間で 5 時間の波作用の経時変化を見ると図-5 のとおりである。地形変化量は堆積を正の値とした。地形変化量と護岸からの距離はフルード則で現地換算してあるが、波作用時間は模型時間のままである。

図-5 を見ると、波作用の初期段階では地形変化速度が大きいが、波作用時間の経過と共に徐々に小さくなっていく。5 時間後にはかなり小さな値となっていることから、模型実験においては波作用を 5 時間で終えることにした。

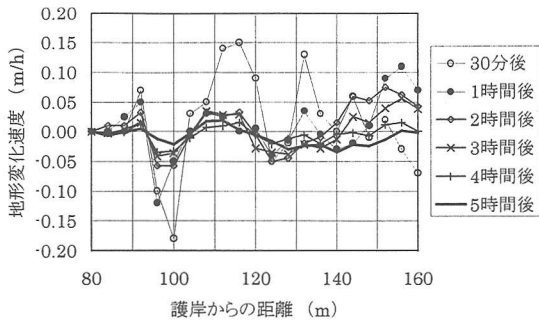


図-5 地形変化速度の経時変化

波高 6.9cm の波浪を模型時間で 5 時間作用させた場合の地形変化速度を、現地の地形変化速度と比較すると図-6 のとおりである。現地侵食事例の波浪の経時変化は前掲図-3 に示したとおりで、波高が 0.8m を超えている期間が 10 時間であることから、現地侵食事例の地形変化速度は、時化の継続時間を 10 時間として求めた。実験結果は現地侵食事例と比べて地形変化速度の絶対値が小さいが、堆積や侵食を生じる位置は非常に良く一致している。

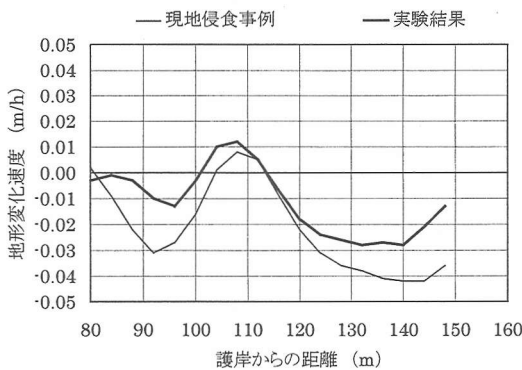


図-6 現地侵食事例と実験結果の地形変化速度の比較

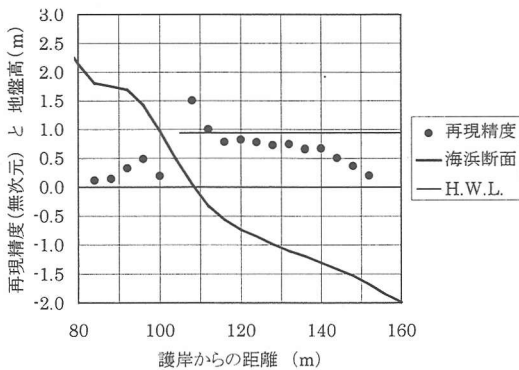


図-7 地形変化の再現精度

実験結果の地形変化速度を現地侵食事例の地形変化速度で割ることによって地形変化の再現精度を求めると、図-7 のとおりである。位置関係を把握できるように、図中には海浜断面も示した。遡上の先端付近で再現精度がやや落ちるが、その他の部分では再現精度が比較的高く、遡上域も含めた全体の平均

値は 0.59 である。全体に地形変化量が不足しているので実験波高を大きくする実験も実施したが、碎波を生じるために養浜部に到達する波高に差が現れず、地形変化量が大きくなることはなかった。したがって、養浜地形の変化を予測する養浜実験には、侵食再現波浪として 6.9cm の波高を作用させるものとし、再現精度を考慮して、現地においては模型実験の 2 倍程度の地形変化を生じる可能性があるものとして実験結果を評価することにした。

(2) 波高・流速分布と地形変化

養浜実験において、中央部に侵食再現波浪を 5 時間作用させたケースで地形と波高を測定した結果を、透水層なしと埋設密度 50% で埋設間隔が 24m の透水層ありの場合とで比較すると、図-8 のとおりである。右図の下の方に書いた 7 個の四角い箱が透水層設置位置である。透水層工法は構造物を砂浜に埋設するので、波浪を制御する効果はない。したがって、透水層なしとありで波高分布に違いは見られない。

平行等深線の海底地形に対して直角方向から波を入射させているので、沿岸方向に波高分布の大きな差はなく、沖側から岸に向かって波高が徐々に小さくなっている。したがって、地形変化量分布を調べても、沿岸方向の漂砂は少なく、地形変化は二次元的であった。

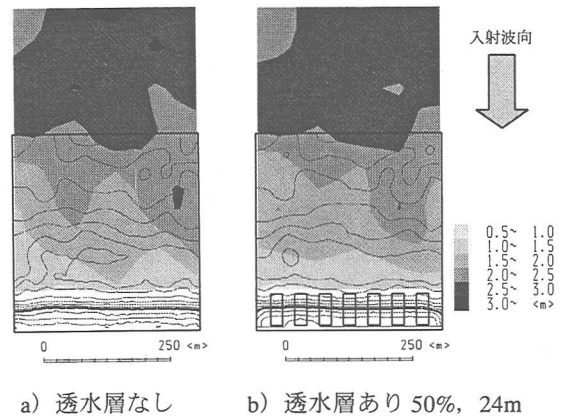
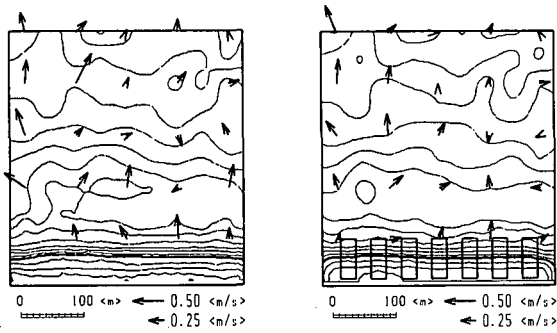


図-8 波高分布と海浜地形の比較

同じケースにおいて、電磁流速計で測定した底層流速の分布を見ると図-9 のとおりで、透水層なしとありの間に有意な差が認められない。この他にも、フロートの観察による表層の流況と、染料の観察による中層の流況を比較したが、いずれも透水層なしとありの差は認められなかった。佐藤ほか⁶⁾には突堤で囲った人工海浜においては、透水層の設置によって wave set-up を生じさせないことにより沿岸流の発生を抑制し、その結果として沿岸漂砂を軽減できることが報告されている。これに対し、今回の実験結果は、仮に斜め入射で実験を実施したとしても、構造物のない開かれた海浜に透水層を埋設する場合

には、沿岸漂砂を抑制する効果は得られない可能性が高いことを示唆しているものと考えられる。



a) 透水層なし b) 透水層あり 50%, 24m

図-9 底層流速分布と海浜地形の比較

(3) 地下水位上昇の抑制

中央部に侵食再現波浪を作用させた場合の透水層なしの地下水位上昇量は、図-10の×印のとおりで、透水層を50%の密度で6m間隔で埋設した場合は◇印である。◇印は地下水位上昇量が小さく、細かい間隔で透水層を設置しているために沿岸方向にほぼ均一に地下水位上昇が抑制されている。これに対し、透水層の埋設密度が50%で間隔を24mとした場合、埋設密度30%で隙間部の幅を24mとした場合には、○印と△印の透水層上では地下水位上昇が抑制されているものの、●印と▲印の隙間部では地下水位の上昇を生じている。ただし、隙間部の地下水位上昇量は透水層なしの場合よりは小さく、十分ではないながらも透水層による地下水位上昇抑制効果が及んでいることがわかる。

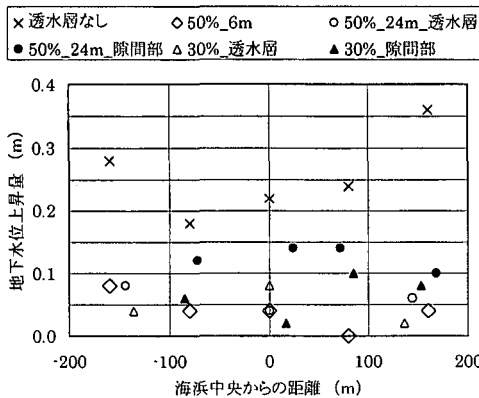


図-10 養浜法肩位置における地下水位上昇量の比較

(4) 香良洲地区に適した透水層条件の検討

a) 中央部の検討

中央部において透水層なしと3種類の透水層を埋設した場合の、侵食再現波浪5時間の波作用後の海浜断面を比較すると、図-11のとおりである。透水層なしでも初期汀線位置には砂が堆積しているが、透水層ありでは透水層なしよりやや高い位置に堆積

している。そのため、図-12に示した初期汀線位置の岸沖漂砂量を見ると、透水層なし（埋設密度0%）と比べて透水層ありのほうが大きな値を示している。岸沖漂砂量が正の値であるので、汀線よりも沖側から砂が流入していることになり、その流入量は透水層の密度の濃いほうが多い。つまり透水層埋設による堆積促進効果が現れている。

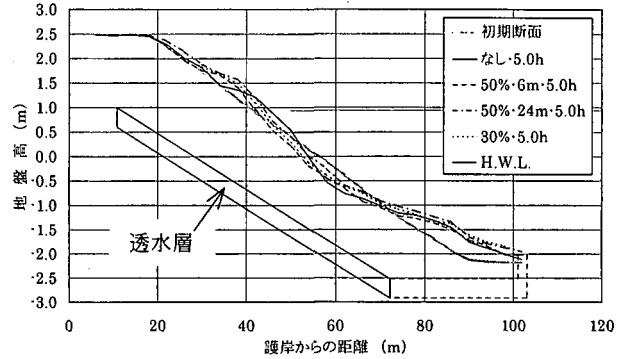


図-11 5時間後の海浜断面の比較（中央部）

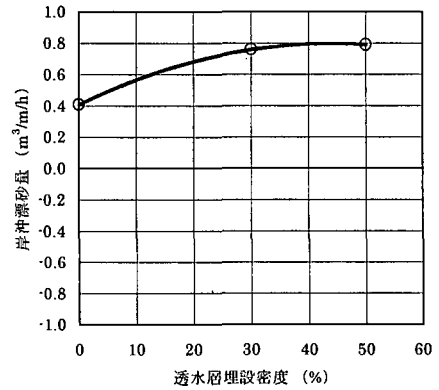


図-12 侵食再現波浪5時間の作用による初期汀線位置の岸沖漂砂量（中央部）

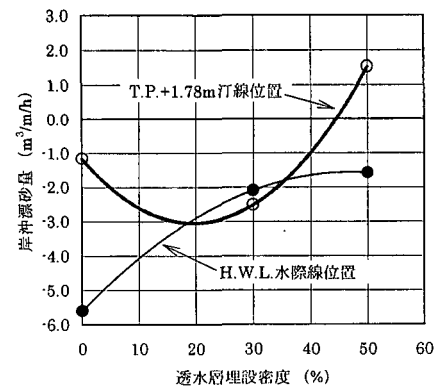


図-13 5年確率波・天端遡上潮位1時間の波作用による岸沖漂砂量（中央部）

侵食再現波浪では汀線位置で侵食を生じなかったが、5年確率波の場合には侵食を生じた。養浜の天端まで波が遡上する潮位 T.P.+1.78m の汀線位置と H.W.L.水際線位置での岸沖漂砂量は図-13 のとおり

で、透水層なしでは侵食しているのに対し、透水層ありでは侵食を堆積に転じさせる、あるいは侵食を軽減する効果が得られている。グラフの分布は基本的には右上がりの傾向を示しており、透水層の密度が濃いほど海浜安定化効果が高い結果である。この他にも、汀線変化や地下水位上昇抑制効果についても検討を行い、中央部における透水層の埋設密度は50%が適切であると判断した。

透水層の埋設間隔に関しても同様な検討を行った。一例として、地下水位上昇量による検討結果を図-14に示す。透水層なしを埋設間隔が無量大として取り扱い、図の横軸を埋設間隔の逆数としてゼロの位置にプロットした。24m間隔と6m間隔のデータは埋設密度50%のものである。24m間隔のデータは、透水層上と隙間部の上昇量の平均値を採用した。

24m間隔には隙間部分の上昇量がやや大きいデータを含んでいるので、地下水位上昇が均一に抑制されている6mと比べると、やや大きな値となっている。しかし、別途測定した排水口位置における0.05mのwave set-upを基準と考えれば、上昇量は0.05mだけと見ることができる。したがって、透水層の埋設間隔は24m程度まで広げることが可能と判断した。

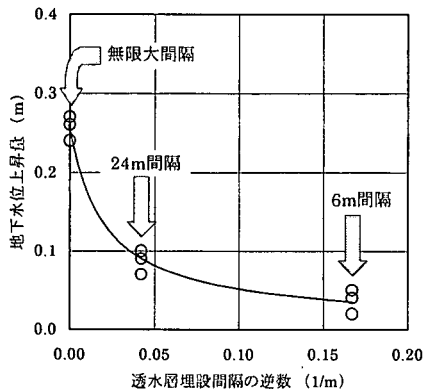


図-14 透水層埋設間隔の検討（中央部）

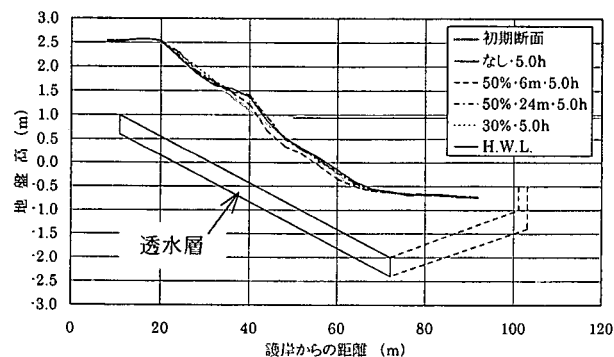


図-15 5時間後の海浜断面の比較（河口部）

b) 河口部の検討

河口部において透水層なしと3種類の透水層を埋設した場合の、侵食再現波浪5時間の波作用後の海浜断面を比較すると、図-15のとおりである。同時

に実験を実施しているので波浪条件は中央部と同じであるが、河口部の地形変化は図-11の中央部より明らかに小さい。これは、河川からの流下土砂が遠浅の河口砂州を形成しているために、かなり沖合いで砕波することによって、養浜部に到達する波高が小さくなるためである。5年確率波のケースでも同様な結果であったので、河口部においては海浜安定化工法を適用する必要性が低いと判断した。

5. まとめ

この検討によって得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- ①定量的には1/2程度の精度であるが、定性的には非常によい精度で実験水槽の地形変化を現地と相似にすることができた。
- ②透水層埋設は岸沖方向の漂砂に対して有効であり、透水層を密に埋設するほど海浜安定化効果が高い。ただし、構造物のない開かれた海浜において沿岸漂砂を抑制することは難しいと考えられる。
- ③透水層はストライプ状に埋設することが可能で、香良洲地区の中央部の場合には、最適な埋設密度が50%で、ストライプの間隔は24m程度まで広げることができる。

今回の模型実験によって津松阪港香良洲地区の養浜に適用する透水層工法の配置を検討した。今後は模型実験の成果を生かして現地試験施工と現地調査を実施し、最適な透水層条件の検討を続ける予定である。

参考文献

- 1)山口柏樹：土質力学，技報堂出版，389p.
- 2)Sunamura, T. and Horikawa, K. : Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.920-937, 1974.
- 3)佐藤道朗，銀賀一博，口ノ町誠，福島博文，森 芸：摺ヶ浜の砂流失に関する現地観測，第29回海岸工学講演会論文集，pp.314-318，1982.
- 4)Kanazawa, H, Matsukawa, F, Katoh, K, and Hasegawa, I.: Experimental study on the effect of gravity drainage system on beach stabilization, Proc. 25th ICCE, pp.2640-2653, 1996.
- 5)柳嶋慎一，加藤一正，荒田昌潔，松本 茂，平戸誠一郎，堀 謙吾：透水層工法における排水口土被りと排水流量の関係，海岸工学論文集，第46巻，pp.721-725，1999.
- 6)佐藤恒夫，榎 俊博，柴田 悟，込山 清，平松和也，長谷川巖：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.711-715，1999.