

茨城県神向寺海岸での 粗粒材養浜による砂浜の安定化

FIELD EXPERIMENT ON STABILIZATION OF SANDY BEACH USING COARSE MATERIALS AT JINKOJI COAST IN IBARAKI PREFECTURE

石井秀雄¹・中村友和²・宇多高明³・大木康弘⁴・熊田貴之⁵・芹沢真澄⁶

Hideo ISHII, Tomokazu NAKAMURA, Takaaki UDA,
Yasuhiro OHKI, Takayuki KUMADA and Masumi SERIZAWA

¹茨城県潮来土木事務所道路河川整備第二課長 (〒311-2424 茨城県潮来市潮来1086-1)

²茨城県潮来土木事務所道路河川整備第二課 (同上)

³正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なぎさ総合研究室長
(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

⁴ (株) 水圏科学コンサルタント (〒145-0064 東京都大田区上池台1-14-1 明伸ビル)

⁵正会員 博 (工) (株) 水圏科学コンサルタント (同上)

⁶正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ロイヤル若葉301)

Numerical simulation using the contour line change model was carried out to predict the difference in movement of fine and coarse materials in beach nourishment. Coarse materials were stable, while accumulating at the shoreline with negligible offshore discharge, whereas fine materials such as the grain size of 0.1 mm were easily washed away. On the basis of these results, field experiment on stabilization of sandy beach using coarse materials was carried out at the Jinkoji coast facing the Pacific Ocean. Stability of nourished coarse sand was confirmed.

Key Words : Beach nourishment, grain size, coarse materials, Jinkoji coast

1. はじめに

鹿島灘沿岸では1980年代から海岸侵食が顕著となり、特に下津海岸から明石海岸に至る区間では砂浜の消失に伴い背後地への越波などが生じた。こうした状況に対し、侵食防止と海浜の安定化を目的として1984年よりヘッドランド工法による侵食対策が施され、現在では一部の海岸を残してヘッドランドは概成し、侵食対策として一定の効果をあげている。しかし、6,7号堤間に位置する神向寺海岸では依然として侵食が続いており、砂浜の回復は見られず背後地への越波や飛沫の飛散が問題となっている。過去に海浜を広げるための養浜も行われたが、養浜砂は沖合へと流失し、効果は上がっていないのが現状である。これには養浜砂の粒径に関する検討が不十分であったこと、また養浜材の粒径に応じた海浜変形予測ができなかったことが関係している。すなわち、従来の海浜変形モデルでは養浜材と現地海浜砂とも同じ単一粒径で扱っていたが、実際にはこの条件は成立しないため、養浜材の粒径に応じた海浜変形予測ができなかったことにある。本研究では、ま

ず空中写真と底質粒径データの解析を行った上で、養浜砂の粒径に応じた海浜変形を予測可能なモデル^{1) 2)}を用いて粗粒材養浜の可能性を検討した上で、実際に神向寺海岸で現地実験を行った。

2. 対象海岸の漂砂特性

2.1 空中写真による汀線変化比較

1965, 1984, 2002年撮影の鹿島灘沿岸 (鹿嶋海岸) の空中写真をもとに汀線変化を調べた。図-1はこれら3時期の空中写真から判読した汀線について、1965年を基準とした汀線変化を算出したものである。鹿島港の防波堤の建設が既に始まっていた1984年では、鹿島灘漁港との接点で最大180mの汀線前進が見られ、逆にこれに隣接するX=7.0~13.5km区間では汀線の後退が生じた。汀線の最大後退量はX=11.5km付近での約60mであった。対照的にX=3.5~7.0kmでは汀線が前進している。侵食域から削り取られた土砂の大部分は鹿島灘漁港方向へと流出したが、一部は北側に移動してこの部分にも堆積した

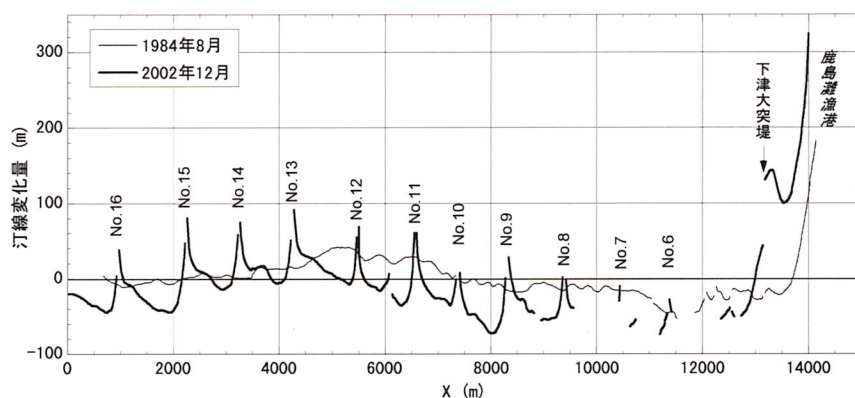


図-1 汀線変化量 (1965年基準)

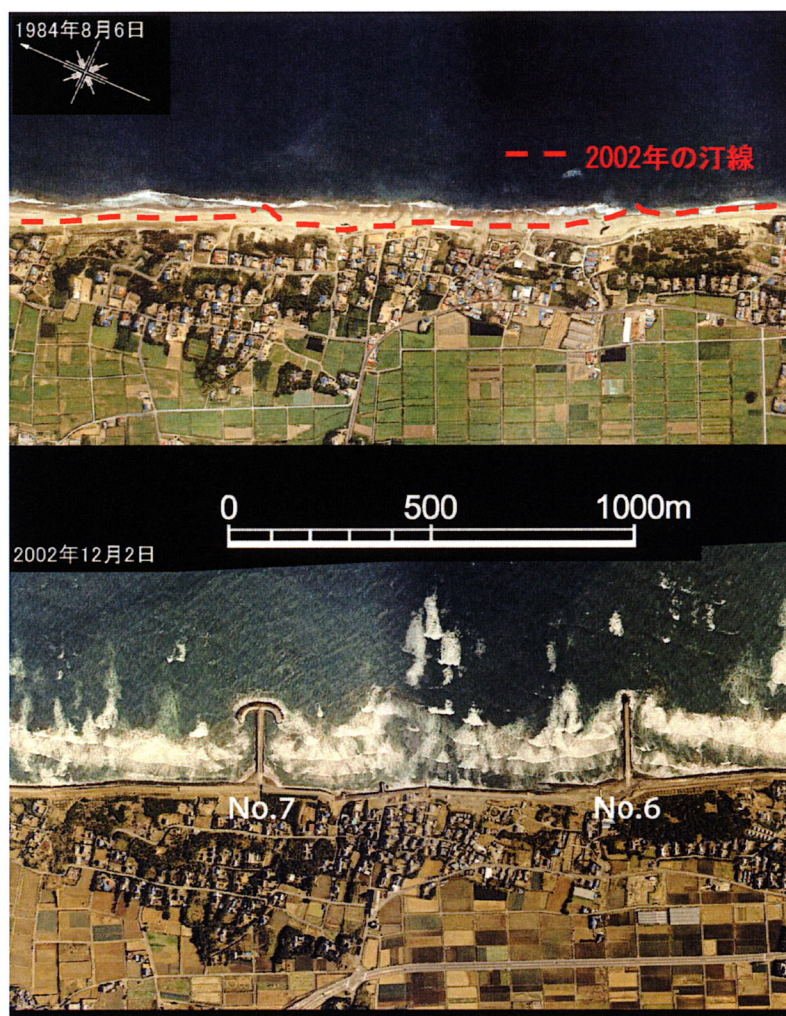


図-2 神向寺海岸の空中写真の比較 (1984年 vs. 2002年)

と考えられる。

2002年では、ヘッドランドの建設はあったものの、汀線の後退がさらに進み、最大の汀線後退は $X=8.0\text{km}$ での70mとなった。またここより北側では、いずれもヘッドランド間の中央部で約20m以上の汀線後退が見られ、また中央部の汀線形状はヘッドランド間の海浜を二分する線に関し左右非対称であり、北側の汀線が海側にある。

一方、鹿島灘漁港隣接部での最大汀線前進量は320mにも達し、また下津大突堤と漁港に挟まれた

平井海岸にも大量の砂が堆積した。ここに堆積した砂はその北側区域から沿岸漂砂によって運び込まれたものである。全体として汀線後退域が $X=8.0\sim 13.5\text{km}$ から、 $X=6.0\sim 13\text{km}$ へと北側にずれ、とくに現在下津大突堤のある海岸では従来の侵食傾向から著しい汀線前進域へと傾向が逆転したことが見てとれる。

次に、侵食の最も著しい神向寺海岸を対象に、ヘッドランド工事前の1984年8月6日と、建設工事が進み少なくとも7号堤が完成していた2002年12月2日

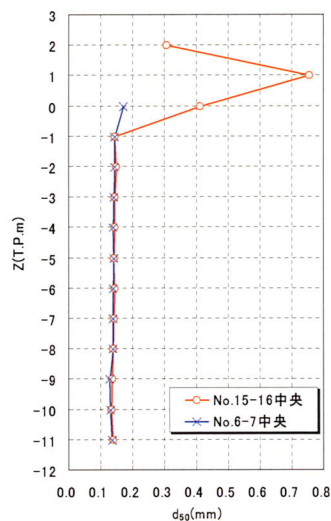


図-3 d_{50} の水深分布

表-1 計算条件一覧

数値計算手法	等深線変化モデル (熊田ら, 2004; 宇多ら, 2005)
計算対象	鹿島北海岸の6、7号ヘッドランド間の海浜
計算ケース	- ケース1: 現況 (安定形の計算) - ケース2: 細砂養浜 ($d=0.1\text{mm}$, 平衡勾配 $\tan\beta_c=1/150$) - ケース3: 離岸堤+細砂養浜 (平衡勾配 $\tan\beta_c=1/150$) - ケース4: 礫養浜 ($d=2\text{mm}$, 平衡勾配 $\tan\beta_c=1/8$) - ケース5: 同上 (海浜幅 60m→30m に縮小)
養浜前の海浜形状	- 展開座標を使用し現地形を直線平行等深線にモデル化 - 縦断勾配 $\tan\beta=1/30$ (陸上部), $1/60$ ($0\sim-5\text{m}$), $1/150$ (-6m以深)
養浜地形	- 盛土高 $\Delta h=3.5\text{m}$ ($z=0\sim-3.5\text{m}$) - 初期勾配 $\tan\beta=1/6$ - 養浜海浜幅 60m
入射波条件	- 砕波波高 $H_b=4\text{m}$ (年数回の荒天波 $H_o'=3.5\text{m}$, $T=9\text{s}$) - 砕波波向 $\alpha_b=0^\circ$ - 潮位条件 M.S.L. 0.0m
地形変化の水深範囲	- 地形変化の限界水深 $h_c=6\text{m}$ (宇多, 1997) - バーム高 $h_b=3\text{m}$
漂砂量係数	- 沿岸漂砂量係数 $K_1=0.2$ - 小値プラント項の係数 $K_2/K_1=0.1$ - 岸沖漂砂量係数 $K_3=0.2$
漂砂量の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: $1/2$, 水中: $1/3$
計算範囲	沿岸方向: 900m 鉛直方向: $z=5\text{m}\sim-10\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta x=10\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=0.01\text{hr}$
計算ステップ数	50,000steps
境界条件	海浜端: $q_b=0$, 左右端: $q_s=0$
数値計算法	陽解法による差分法
その他	- 波浪場の計算法: 方向分散法 - 離岸堤の波高伝達率 $K_r=0.4$

撮影の空中写真を選び、同一区域を切り出して両者の比較を行った。図-2が切り出された空中写真である。1984年の空中写真には、比較のために2002年の空中写真から判読される汀線位置を記入してある。1984年では海岸線に沿って幅約60mの前浜が存在した。背後地の家屋と汀線との間に広い前浜があったことから、越波や飛沫の飛散はあまり問題ではなかったと考えられる。越波や飛沫の防止の意味から1984年当時の海浜の姿は一つの目標を与え、目標前浜幅は約60mとなる。

2002年までには海岸状況は一変した。海岸線に沿って護岸や消波ブロックが全線に設置され、1984

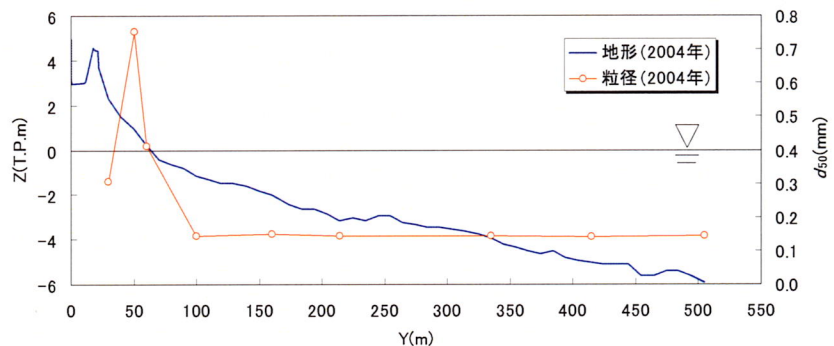


図-4 15、16号堤間の海浜縦断形と d_{50} の岸沖分布

年当時存在した前浜は完全に消失した。侵食対策としてヘッドランドが建設されたものの、砂浜は7号堤による波の遮蔽域にごくわずかに見られる程度となった。対象区域全体から砂が運び去られたことが明らかである。

ヘッドランドの建設に長い時間がかかり、効果の発現が遅れたことを考慮したとしても、なお著しい侵食状況を考慮するとヘッドランドのみでは対応が十分でないことは明らかである。そこで考えられるのが養浜である。実際過去に浚渫土砂を用いた養浜が行われたが、いずれも土砂は急速に流出した。これより養浜を行うにしても粒径など質的に見た工夫が必要なが分かる。

2.2 底質粒径の特性把握

底質粒径特性を把握するため、侵食の著しい6、7号堤間と侵食影響をあまり受けておらず比較的広い浜幅が維持されている15、16号堤間において、縦断方向の底質採取により粒度分析を行った。15、16号堤間の底質は結果的に、計算で使用する初期値となる。

図-3には対象2海岸の d_{50} の水深分布を示す。6、7号堤間は、侵食で地盤が下がりほとんど前浜がないため陸上部データはないが、水中部では2海浜ともほぼ同じ約0.15mmに収束している。図-4には、15、16号堤間の海浜縦断形と d_{50} の岸沖分布を示す。底質が粗粒化している浅い部分では急勾配となり、細粒で覆われた海底面は緩勾配である。すなわち粒径に応じて勾配が変化することが明らかである。

以上の解析結果は、養浜砂の粒度組成に応じて砂が安定する位置を特定する上で重要な材料になると考えられる。すなわち、 d_{50} が0.1mm程度の養浜砂は沖へ移動し緩勾配の海底面上に堆積し、1mm程度の粒径の粗い砂は汀線付近に分布し急勾配で安定する可能性が高いと考えられる。

3. 養浜砂の粒径に応じた海浜変形予測

3.1 計算条件

鹿嶋海岸では鹿島港や航路浚渫の影響により、通年を通じて南向きの沿岸漂砂が卓越しており、これ

により神向寺海岸は侵食を受ける過酷な環境にある。したがって沖に存在する0.1mm程度の細砂で養浜したとしても直ちに流出するが、1mm程度の粗砂であれば汀線付近に分布し急勾配で安定する可能性が高いと考えられる。

そこで神向寺海岸を対象に予測計算を行った。表-1には計算条件をまとめて示す。計算手法には熊田ら¹⁾、宇多ら²⁾を用いた。計算は全体で5ケース行った。ケース①は基本計算で、平行等深線形状を与えて現況再現を行った。ケース②では養浜砂の粒径を0.1mmの細砂とした。ケース③では離岸堤を設置した上でケース②と同じ砂を投入した。ケース④では養浜材料の歩留まりを考慮して2mmの礫を用いた。養浜砂の平衡勾配は、野志ら³⁾を参考に1/150 (0.1mm)、1/8 (2mm) とした。本計算では、ほぼ安定状態にある海浜に、新たに投入した養浜材料が投入海域に残るかどうかについて検討することを主目的とするため、長期的意味から波の遮蔽域へと向かう緩やかな南向きの沿岸漂砂は再現対象とせず、投入材の波への応答にのみ主眼を置いた。なお、神向寺海岸を含んだ鹿嶋海岸のマクロ的な地形・粒径変化計算については、住谷ら⁴⁾を参照されたい。

モデル海岸の縦断形は2003年10月の深浅図をもとに定めた。陸上部の海浜勾配は $\tan\beta=1/30$ 、0~-5mが1/60、そして-6m以深が1/150の勾配である。図-5には計算の初期等深線形状を示す。鹿嶋海岸では長期

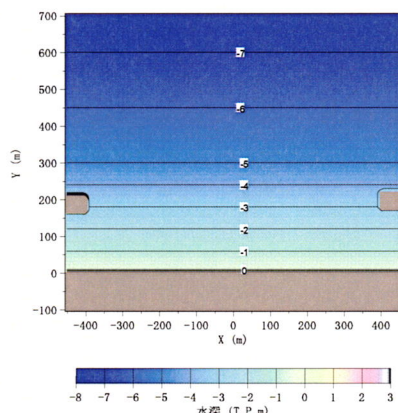


図-5 再現計算時の初期海浜形状

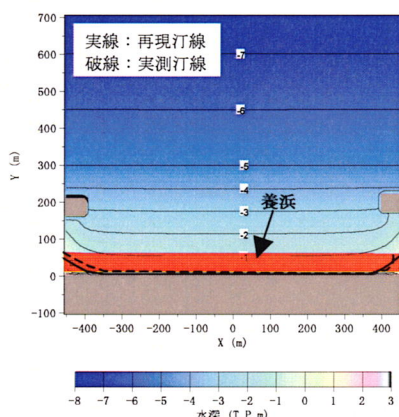
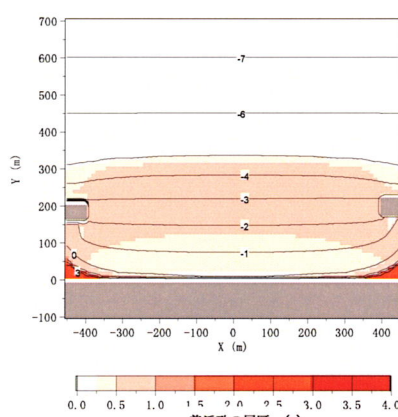
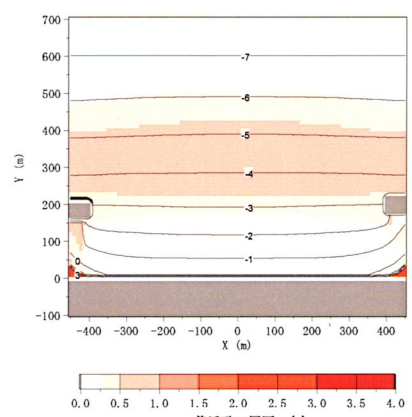


図-6 現況再現時の等深線 (ケース①)



(a) 20,000ステップ



(b) 50,000ステップ

図-7 細砂 ($d=0.1\text{mm}$) 養浜時の予測結果 (ケース②)

にわたって海浜変形が進んできており、海底地形はほぼ安定状態に近づいていると考えられる。このようにして形成された海浜に波浪の強弱や波向の変化による地形変動が重なっていると考えられる。そこで変動分を除去し、できるだけ現象の本質部分に注目するために、現況の等深線を直線平行等深線に置き換え初期地形とした。この地形に対しヘッドランドや護岸を設置した上で波浪を作用させて海浜変形を生じさせ、得られた安定な海浜を養浜前の地形とした。

また、ケース③の場合離岸堤設置後直ちに海浜変形が起こるので、現況再現に用いた直線平行等深線を初期地形としてまず舌状砂州の再現を行い、その上で養浜を行って将来予測を行った。

養浜形状については、盛土高を $\Delta h=3.5\text{m}$ 、初期勾配を $\tan\beta=1/6$ とし、養浜の海浜幅を60mとした。入射波条件として年数回の来襲波を考え、碎波波高は $H_b=4\text{m}$ 、周期を9sとした。また波向は構造物建設前の自然状態として形成された海岸線法線方向とした。潮位条件は平均海面とした。地形変化の水深範囲はバーム高($h_R=3\text{m}$)から波による地形変化の限界水深($h_c=6\text{m}$)までの範囲とした。本計算では、予測期間は礫の挙動が不明なため、ステップ表示としている。

3.2 計算結果

(1) 現況再現 (ケース①)

現況再現計算の結果が図-6である。ヘッドランドによる波の遮蔽効果により、その隣接部では水深2m以浅の等深線が大きく湾入した。ヘッドランド隣接部では等深線の曲率が大きい、中央部の等深線は沿岸方向にほぼ平行である。現在、実海岸の汀線は中央部では護岸線と完全に重なり、前浜はヘッドランドの隣接部で三角形にのみ残されているが、図示する2003年の実測汀線と再現汀線は良好な一致を示す。

(2) 細砂による養浜 (ケース②)

図-6に斜線で示すように汀線付近に集中的に細砂で養浜し、これに波を作用させて 2×10^4 、 5×10^4 ステップ後の等深線形状を求めたのが図-7(a)、(b)で

ある。汀線付近にあった砂の高まりは波の作用下で沖向きに大きく移動し始めた。結果として汀線付近の砂の高まりは消失し、汀線付近から削り取られた土砂はヘッドランド間を結ぶ線より沖の水深6m以浅に広く拡散した。注目されるのはヘッドランドの沖合では等深線が沿岸方向に中央部で最も突出し、ヘッドランド位置では等深線の突出量が小さくなっており、等深線の沿岸方向勾配が形成されたことである。このような等深線形状では、ヘッドランド沖の海底において、ヘッドランド間から両側へと向いた沿岸漂砂が生じ、養浜土砂が運び去られて投入位置沖にとどまることはできない。図-7(b)の 5×10^4 ステップ後、十分長い時間が経過したために、汀線付近にあった盛土はヘッドランド背後の一部を除いてほとんど全部消失している。またヘッドランド沖に流出した土砂も沿岸方向に広く拡散し、対象領域の外側へと流出したことが分かる。

(3) 離岸堤設置後細砂で養浜(ケース③)

図-8は離岸堤を設置後 5×10^4 ステップの海浜形状である。堤長100mの離岸堤が水深2mに設置されている。離岸堤の設置によって離岸堤背後の波の静穏域では砂が堆積して小規模な舌状砂州が形成された。図-9には離岸堤設置後細砂で養浜する場合の初期海浜形状を示す。離岸堤背後も含めてケース②と同様沿岸方向に一樣に養浜が行われている。この状態で波を $2 \times 10^4, 5 \times 10^4$ ステップ作用させた結果が図-

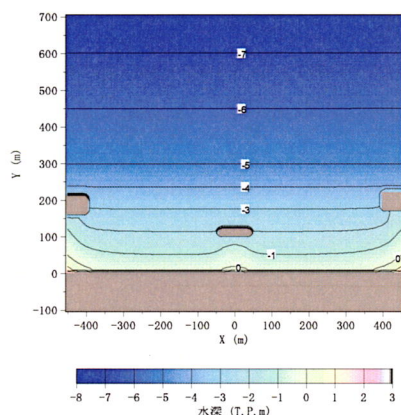


図-8 離岸堤設置時の予測結果(ケース③)

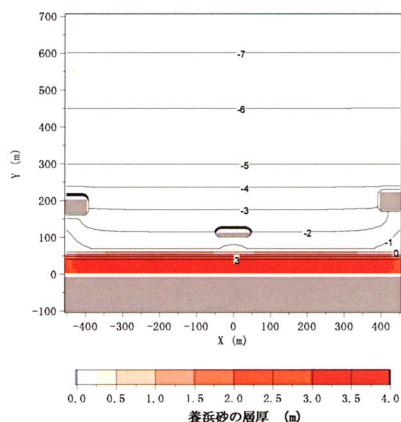
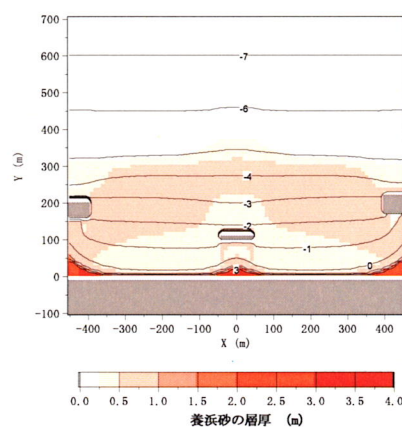
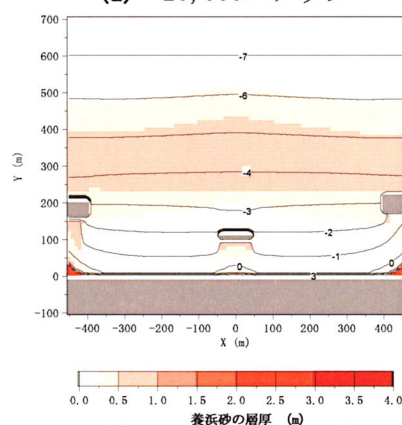


図-9 離岸堤+細砂($d=0.1\text{mm}$)養浜時の初期海浜形状(ケース③)

10(a), (b)である。図-7(a), (b)に示した離岸堤がない場合と同様、投入土砂は沖向きに移動し、ヘッドランド沖に広がった後さらに沿岸方向へ拡散していく。その際離岸堤が存在するため、離岸堤部分では沖向きの土砂移動が阻害され、離岸堤とヘッドランドを結ぶ斜めの開口部から集中的な沖向き移動が起こる。沖向きの土砂移動は、離岸堤両側からやや斜めのフラックスとなるため、離岸堤沖ではそれらが合体し、等深線が沖向きに突出する。離岸堤背後の静穏域では投入土砂が一部は残されるものの、ほとんど全部の投入土砂は沖に流出する結果となった。



(a) 20,000ステップ



(b) 50,000ステップ

図-10 離岸堤+細砂($d=0.1\text{mm}$)養浜時の予測結果(ケース③)

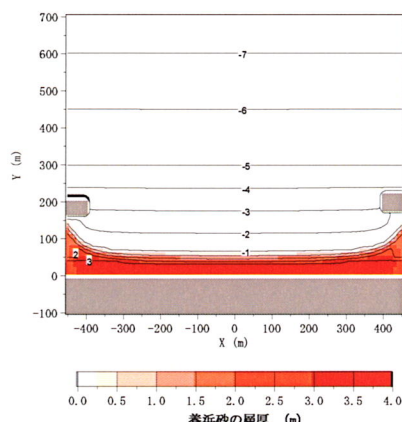


図-11 礫($d=2\text{mm}$)養浜時の予測結果(ケース④)

(4) 礫養浜(ケース④)

細砂の場合と同様にして礫を用いた場合の海浜変形予測を行った。養浜時の初期形状は図-6と同一である。波作用後 5×10^4 ステップでの海浜変形の予測結果を図-11に示す。細砂養浜と全く異なり、養浜礫はほぼ水深1m以浅に集中的に堆積し、沖合への流出はほとんど見られず汀線付近で安定化することが分かる。

4. 粗粒材養浜による砂浜の安定化の現地実験

以上の解析より、安定性の高い粗粒材養浜を侵食対策として選定し現地試験を行った。神向寺海岸では2005年12月15日より、細礫・中礫 $7,000\text{m}^3$ を用いた養浜の試験施工を7号堤近傍で開始した。この養浜の初期段階における砂移動特性を調べるために、12月20日午前現地踏査を行った。砂礫は7号堤の南側隣接部に投入された。写真-1は砂礫の投入状況である。ダンプトラックで輸送された砂礫が重機により浜側から投入されている。重機のすぐ脇には急勾配斜面が見えるが、養浜はこの急斜面より北側で行われている。したがってそこより手前側に見える帯状の砂の堆積は、投入砂礫が波浪の作用により運ばれてきたものである。養浜区間のすぐ隣には砂礫が小高いリッジを形成して堆積している。手前側に流れてきた砂礫は、緩傾斜護岸の前面に帯状に広がっている。

写真-2は、養浜部で最も強い波の作用を受けている南側隅角部の状況であるが、そこでは砂礫が急勾配をなして堆積している。観察によれば、この部分



写真-1 砂礫の投入状況



写真-2 南側隅角部での波の浸透状況

に打ち上がった波浪は急速に浸透し、その分波の打ち上げ高も低くなることが見出された。浸透性の効果が顕著に現れていた。また観察によれば、養浜砂礫が到達した部分と、その未到達区域では波の浸透状況に大きな違いがあり、細砂で覆われた場所では浸透に時間がかかるのに対し、養浜砂礫が堆積した場所では浸透が非常に急速であった。同時に、細砂で覆われた区域では前浜勾配が約1/40と緩く、砂礫で覆われた場所では前浜勾配が約1/10と急であるという断面変化の傾向は数値モデルによる予測とよく合い、養浜時の粒径選択の重要性をよく表している。

5. まとめ

神向寺海岸における深浅図や底質粒径の岸沖分布より粗粒材養浜の可能性を明らかにした上で、養浜材の粒径に応じた海浜変形予測を行った。この結果0.1mm程度の細粒土砂による養浜の場合養浜砂はヘッドランド間にとどまることはできず、沖へ流出した後沿岸方向に拡散した。この程度の粒径の土砂は前浜の拡幅に使用するのは困難である。一方、2mm程度の礫による養浜を行った場合、養浜土砂はヘッドランド間にとどまり前浜の拡幅に役立った。また離岸堤を設置してもこうした条件に大きな変化はなく、離岸堤は養浜土砂の沖への広がり速度を低下させることはできるが、最終的に沖への土砂損失が起こる点では離岸堤を設置しない場合と大差がないことが分かった。以上より、安定性能の高い粗粒材養浜を侵食対策として選定し現地試験を行った。粒径2~13mmの礫養浜後、計算同様、投入礫は汀線付近に集中的にとどまることが分かった。また礫浜上では空隙率が高いため浸透効果が高く、飛沫の拡散が抑制されることも確認された。

参考文献

- 1) 熊田貴之, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 野志保仁: 粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 441-445, 2004.
- 2) 宇多高明, 清野聡子, 大矢忠一, 安田武夫, 高橋 功, 古池 鋼, 星上幸良: 沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.641-645, 2005.
- 3) 野志保仁, 小林昭男, 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄: 底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 406-410, 2004.
- 4) 住谷勉夫, 松浦健郎, 宇多高明, 高橋 功, 大木康弘, 熊田貴之, 芹沢真澄: 粒度組成の平面変化を考慮した等深線変化モデルの鹿島灘海岸への適用, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.546-550, 2005.