

粒径を考慮した等深線変化モデルによる細砂・粗砂養浜の効果検討

Evaluation of Effect of Beach Nourishment using Fine and Coarse Sand by Contour-line-change Model Considering Change in Grain Size

宇多高明¹・吉添高兆²・町井 靖³・山本剛史⁴・古池 鋼⁵・芹沢真澄⁶・石川仁憲⁷

Takaaki UDA, Takayoshi YOSHIKOE, Yasushi MACHII, Takeshi YAMAMOTO
Kou FURUIKE, Masumi SERIZAWA and Toshinori ISHIKAWA

The contour-line-change model considering change in grain size given by Kumada *et al.* (2005) was applied to the Enshu-nada coast, where beach erosion has taken place due to the effect of decrease in fluvial sand supply from the Tenryu River. Bottom sampling was carried out in an extensive area of the coast. Depth distribution in median diameter and longitudinal profiles were measured. The grain size was divided into three dominant grain size populations such as fine sand, medium sand and gravel. The effect of beach nourishment using materials of different grain sizes was predicted. Optimum beach nourishment is the nourishment using coarse materials in a zone, where beach erosion is severe and protected by detached breakwaters, and simultaneously, beach nourishment using fine sand on downcoast.

1. はじめに

わが国では海岸侵食対策として構造物対応が長く行われてきたが、2000 年施行の新海岸法では砂浜の保全効果が強く打ち出された。しかし法律に記載されはしたもの、なお侵食対策としての継続的養浜に対して根強い反対論があり、その実現は厳しい状態にある。その一因として、養浜時の砂移動や養浜効果の予測が十分でなく、「投入土砂は単に流れてしまうから無駄である」との誤解がある。この壁を破るには、様々な粒径を持った土砂による養浜効果を定量的に評価することが必要である。しかしこのような検討は従来実用に耐える予測手法がなかったため十分でなかった。このことから、本研究では熊田ら (2005) の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いてこの種の問題に取り組むものである。具体的には、上流域に建設された多数のダム群によって流出土砂量が激減した結果、河口両翼の海岸で侵食が進む遠州灘海岸 (長島ら, 2005) を事例として選び、侵食対策としての養浜の効果を数値モデルにより予測評価する。このためまず広域で底質粒径データを取得し、それをもとにモデル化を進めた。

2. 対象区域の特性

検討対象地域は、図-1 に示すように遠州灘に面した天竜川河口から今切口導流堤までの 20 km 区間である。この区域では天竜川からの流出土砂が西向きの沿岸漂砂によって運ばれている。この区域において図-1 に示すように 14 測線を設定し、+3 m から -12 m までの範囲において 1 m 間隔で底質採取を行うとともに、縦断測量を行った。

図-2 は d_{50} の水深分布である。この海域での波による

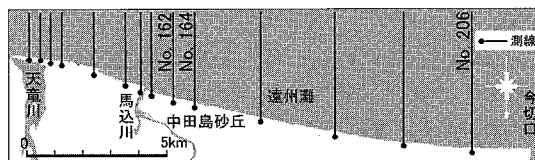


図-1 検討対象地域 (天竜川河口以西)

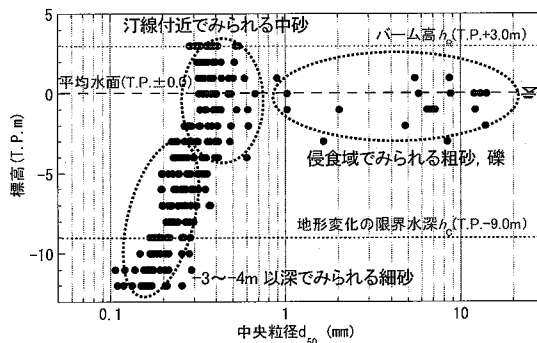


図-2 d_{50} の水深分布

- | | | |
|-------|----|--|
| 1 正会員 | 工博 | (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 |
| 2 | | 静岡県建設部建設管理局企画監 |
| 3 | | 静岡県建設部河川海岸整備室主任 |
| 4 | | 静岡県浜松土木事務所工事第 1 課主任 |
| 5 | | 海岸研究室(有) |
| 6 正会員 | | 海岸研究室(有) |
| 7 正会員 | 工修 | (財)土木研究センターなごさ総合研究室主任研究員 |

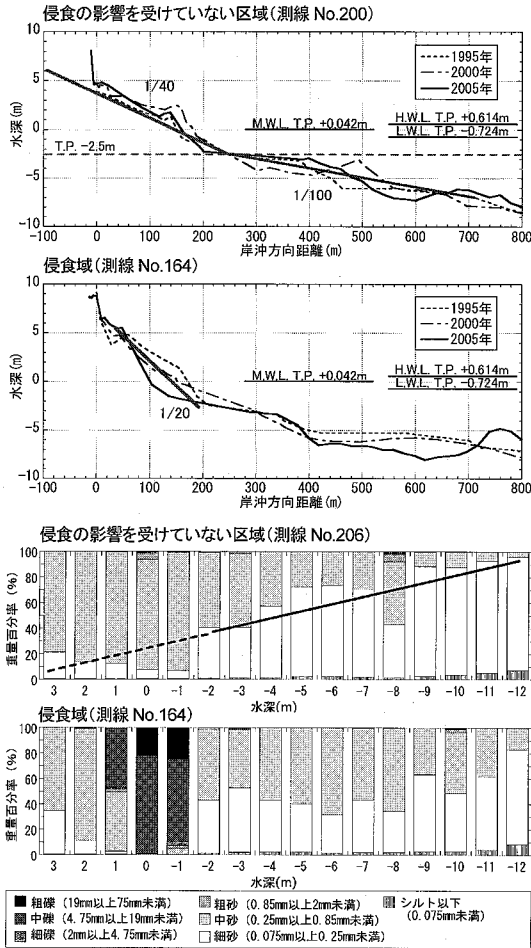


図-3 堆積域と侵食域の特徴的な海底勾配と水深方向の底質組成 (2006年調査)

地形変化の限界水深 h_c は約 9 m にある (長島ら, 2005) が, これを考慮すると d_{50} はほぼ 3 グループに分かれる。まず侵食域では粗砂, 礫が多く含まれている。また侵食域を除いた区域の汀線付近では中砂が主であるが, 水深の増加とともに粒径は減少し, h_c 付近では $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$ 程度の細砂へと収束している。そこで, 図-3 に示すように, 侵食の影響を受けていない区域の縦断面と底質の水深方向の組成を調べると, 海底勾配は -3 m 付近を境にそれ以浅は約 $1/40$, -4 m 以深は約 $1/100$ であり, そこでの底質は主に細砂 ($0.075 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.25 \text{ mm}$) と中砂 ($0.25 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.85 \text{ mm}$) の 2 成分で構成され, $-2 \sim -3 \text{ m}$ 付近を境に, それ以深は細砂が多く占めるという特徴がある。一方, 侵食域においては, 汀線付近は $1/20$ 程度の急勾配であり, その付近の底質は粗砂 ($0.85 \text{ mm} \leq d_{50} < 2.0 \text{ mm}$) 以上で, 礫 ($2.0 \text{ mm} \leq d_{50} < 75.0 \text{ mm}$) を多く含む。

図-4 は, d_{50} の観測結果のうち, 沿岸方向距離と水深

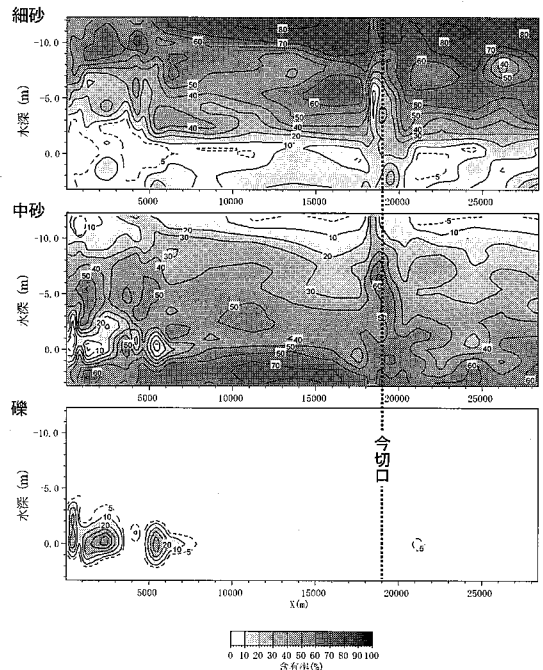


図-4 細砂, 中砂, 礫の含有率の平面分布

表-1 代表粒径, 代表勾配, 含有率

分 類	代表勾配 $\tan \beta$	含有率	備 考
細粒	$0.10 \leq d < 0.25 \text{ mm}$	$1/100$	0.5 細砂
中粒	$0.25 \leq d < 0.85 \text{ mm}$	$1/40$	0.5 中砂
粗粒	$0.85 \leq d < 75.0 \text{ mm}$	$1/20$	— 粗砂, 礫

を変数として細砂 ($0.106 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.25 \text{ mm}$), 中砂 ($0.25 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.425 \text{ mm}$), 礫 ($9.5 \text{ mm} \leq d_{50} < 19 \text{ mm}$) の平面分布を示す。図示する今切口では, 強い入退潮流の作用により中砂域が沖合まで楔状に広がっているが, これ以外の区域では, 中砂が前浜から $-3 \sim -4 \text{ m}$ にあるバー付近まで, また細砂がバー付近から h_c まで広く分布する。一方, 礫は汀線付近にのみ分布する。以上のように, 現地海岸の底質は主に細砂 ($0.075 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.25 \text{ mm}$) と中砂 ($0.25 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.85 \text{ mm}$) の 2 成分で構成されており, 侵食域についてのみ礫を多く含む砂礫 (0.85 mm 以上) がみられる。したがって計算では, 底質条件を細粒 (細砂), 中粒 (中砂), 粗粒 (粗砂・礫) の 3 粒径成分とし, それぞれの平衡勾配, および初期含有率を表-1 に示すように設定した。

3. 予測モデル

予測モデルは熊田ら (2005) の粒径を考慮した等深線変化モデルである。基礎式は, 沿岸・岸沖漂砂量式, 等深線変化量の計算式および粒径毎の含有率変化の計算式が

らなる。粒径毎の沿岸および岸沖漂砂量式は式(1)、(2)で表わされる。

$$q_x^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cdot \left(\cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} - \xi \frac{1}{\tan \beta} \cdot \cos \alpha_{bs} \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \cdots \cdots (1)$$

; $k=1, 2, \dots, N$

$$q_z^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c^{(k)} - 1) \cdots \cdots (2)$$

$$K_1^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}} \cdots \cdots (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left(\frac{h_c}{2} - z \right) (z + h_c)^2 \cdots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \cdots \cdots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \cdots \cdots (4)$$

ここに、 x は沿岸方向座標、 z は等深線の地盤高、 $q_x^{(k)}$ 、 $q_z^{(k)}$ は粒径毎(N 粒径)の沿岸・岸沖漂砂量($k=1, 2, \dots, N$)、 $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎の含有率、 $\varepsilon_x(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ は宇多・河野(1996)の漂砂量の水深方向分布関数、 $d^{(k)}$ は底質粒径を示す。 A は未知数とし対象海岸の変形過程に応じて設定する。なお、式(3)の $d^{(k)}$ の単位はmmである。また $\xi = K_2^{(k)} / K_1^{(k)}$ とし、 ξ も A と同様対象海岸の変形過程に応じて設定する定数である。 α_{bs} は碎波点における波峰線が等深線となす角、 $\tan \beta$ は海底勾配、 H_b は碎波波高である。 β は、初期縦断形におけるバーム高(h_R)から波による地形変化の限界水深(h_c)までの平均勾配角、 β は等深線毎の勾配角、 γ は漂砂量係数の比率であり、沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを示す。 $\beta_c^{(k)}$ は粒径毎の平衡勾配角を示す。

粒径毎の等深線変化量 $\Delta y^{(k)}$ は各等深線につき粒径毎の土砂量保存則(連続式)により次式で算定する。

$$\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(k)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(k)}}{\partial z}; k=1, 2, \dots, N \cdots \cdots (5)$$

混合粒径(全粒径)に応じた等深線変化量 ΔY は等深線毎に粒径毎の等深線変化量 $\Delta y^{(k)}$ を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} \cdots \cdots (6)$$

等深線毎の交換層内での粒径毎の含有率の算定は、熊田ら(2005)の交換層内での粒径毎の土砂収支式を使用した。すなわち堆積時での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(k)} \right\}; k=1, 2, \dots, N \cdots \cdots (7)$$

侵食時での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right\} \cdots \cdots (8)$$

ここに、 $\mu_B^{(k)}$ は等深線変化前の交換層より岸側位置の含

有率を示す。交換層幅 B はKraus(1985)を参考に算出する。本モデルにおいては全等深線で交換層幅 B は一定とし、時間経過によらないとする。計算は、粒径毎の沿岸・岸沖漂砂量 q_z を式(1)~(4)で計算し、これを用いて連続式(5)、(6)を解くことで等深線変化量が計算され、さらに交換層内の含有率の変化が式(7)、(8)より計算される。これを繰り返すことで海浜地形の経時変化が計算される。限界水深で深への重力による土砂の落ち込み、および陸上部での浜崖形成による地形変化の計算方法は熊田ら(2003)を用いた。数値計算にはスタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いた。表-2には計算条件をまとめて示す。

4. モデルの適用

(1) 計算条件

2.で述べた粒径集団(1:細粒, 2:中粒, 3:粗粒)の分布域の平均的な海底勾配を縦断測量データから求めると、集団1, 2, 3に対し1/100, 1/40, 1/20であった。よって以下の計算ではこれらをモデルに組み入れた。計算条件として、中田島海岸での離岸堤3基の建設と粗粒材養浜5万 m^3/yr を前提とする(宇多ら, 2006)。予測計算では河川からの土砂供給が減る前の自然状態の海浜が動的安定状態にあったと考え、その状態を再現した。境界条件として、まず計算領域両端の等深線位置を固定する。この領域に、波高1.6m(周期7s)の波が波向20°で斜め入射するとする。このとき、宇多・河野の沿岸漂砂量の水深分布に見合った粗粒・細粒の土砂が上手側から流入するが、全漂砂量が河川流入量と一致する定数 A を同定する。こうすれば等深線ごとの流入量は自動調整される。この状態で計算を進めると岸沖方向に底質の完全分級が起こる。完全分級後の等深線ごとの漂砂量は、漂砂量の水深方向分布に粒径ごとの漂砂量係数を乗じたものとなり、上手端部からの等深線ごとに流入漂砂量は異なる。計算は図-5に模式的に示すように、投入土砂の種類(粗粒材 or 細粒材)、土砂投入地点(馬込川河口左岸 or 3号離岸堤下手)、および10年後における追加養浜時の材質(粗粒材 or 細粒材)を変え、全体で6ケース行った。ここに粗粒材養浜では細粒, 中粒, 粗粒砂の含有率を0.15, 0.15, 0.70とし、細粒材養浜では0.50, 0.50, 0.0とした。前者は緊急養浜時の粒径含有率にほぼ等しく、後者は現地の自然海浜の海浜構成である。

(2) 計算結果

図-6には馬込川河口左岸での粗粒材養浜を継続した場合(ケース1)の30年後までの砂浜幅の予測結果を示す。5万 m^3/yr という制約条件のもとで、中田島海岸では10年以降目標浜幅を満足している。一方、細粒

表-2 計算条件

計算モデル	混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデル (熊田ら, 2005) 回折計算: 方向分散法 (酒井, 2003)
初期地形	初期地形: 直線平行等深線地形 (海底勾配 1/50) 構造物: 五島海岸の離岸堤・消波堤, 馬込川導流堤, 将来対策施設
潮位条件	M.S.L. (T.P. ± 0.0)
限界水深 バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c = 9$ m バーム高 $h_R = 3$ m
計算等深線	$z = +3$ m $\sim$ -9 m
計算空間 メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 100$ m, 鉛直方向 $\Delta Z = 1$ m
計算期間	再現期間: 43 年間 予測期間: 10 年, 20 年, 30 年
Δt	$\Delta t = 200$ hr
波浪条件	エネルギー平均波 $H = 1.6$ m, $T = 7$ sec, 波向 S (1962 年汀線への入射角 $\theta_w = 20^\circ$) $S_{max} = 25$
漂砂量	沿岸漂砂量係数 粒径 1: $K_x = 0.0511$ 粒径 2: $K_x = 0.0391$ 粒径 3: $K_x = 0.01803$ $K_x = A/\sqrt{d_{50}}$, $A = 0.0255$, $K_2 = 1.62 K_x (\tan \beta = 1/30)$ $K_x = 0.15 K_x$ 安息勾配 (土砂落ち込みの限界勾配): 陸上 1/2, 水中 1/3
粒径	粒径数 (3 成分) と平衡勾配 粒径 1: 細粒 ($0.10 \leq d < 0.25$ mm), $\tan \beta = 1/100$ 粒径 2: 中粒 ($0.25 \leq d < 0.85$ mm), $\tan \beta = 1/40$ 粒径 3: 粗粒 ($0.85 \leq d < 75.0$ mm), $\tan \beta = 1/20$ 含有率 (粒径 1 = μ_1 , 粒径 2 = μ_2 , 粒径 3 = μ_3) 交換層 A $\mu_1 = 0.5$, $\mu_2 = 0.5$, $\mu_3 = 0.0$ 交換層 B $\mu_1 = 0.0 \sim 1.0$, $\mu_2 = 0.9 \sim 0.0$, $\mu_3 = 0.1 \sim 0.0$ 3 m 以上の盛土養浜 $\mu_1 = 0.23$, $\mu_2 = 0.37$, $\mu_3 = 0.40$ 動的養浜砂 (粗粒材) $\mu_1 = 0.15$, $\mu_2 = 0.15$, $\mu_3 = 0.70$ 動的養浜砂 (細粒材) $\mu_1 = 0.5$, $\mu_2 = 0.5$, $\mu_3 = 0.0$
境界条件	左端 (天竜川河口): $q_x = (\text{土砂供給なし})$, 右端 (今切): 漂砂通過境界 (等深線固定), 岸沖端: $q_x = 0$ (漂砂の流出入なし)
構造物	離岸堤 $K_t = 0.4$

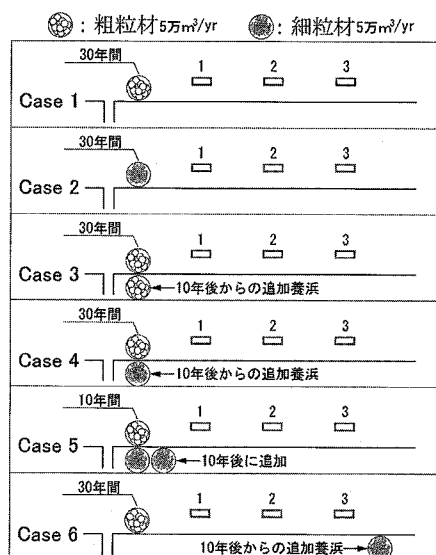


図-5 計算ケース

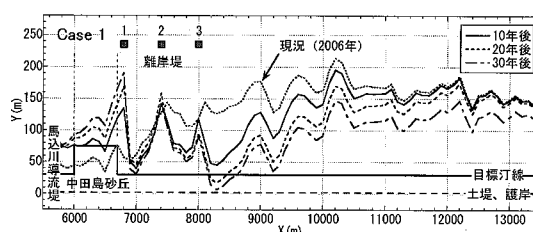


図-6 ケース 1 (粗粒材) の砂浜幅

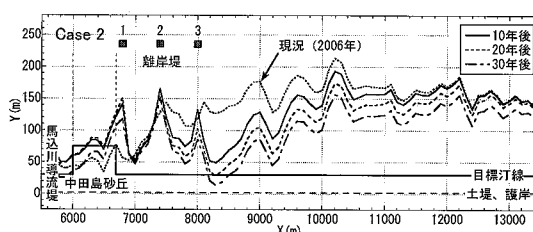


図-7 ケース 2 (細粒材) の砂浜幅

材を用いた場合 (ケース 2) には, 図-7 に示すように目標浜幅を満足しない。また細粒材および粗粒材のいずれの場合も, 3 基目の離岸堤より下手側の汀線が大きく後退し, 30 年後は目標浜幅を割る。この場合細粒材では後退量が少ないという特徴がある。これより, 粗粒材は歩留まりがよいことから中田島海岸における目標浜幅を達成するには有効なもの, 長期的には 3 基目離岸堤より下手側の汀線後退を防ぐことはできない。一方, 細粒材では 3 基目離岸堤より下手の後退は粗粒材よりも低減するものの, 汀線が後退することには違いがない。したがって 10 年以降の 3 基目離岸堤下手側の汀線後退につ

いては, 養浜材の質ではなく, 養浜量が絶対的に少ないということが問題となる。

各ケースの 30 年後の砂浜幅の変化を図-8 に示す。10 年以降粗粒材をさらに $5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ 加えて計 $10 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ とするケース 3 では, 3 基目離岸堤の下手側の汀線後退への対策にならない。追加養浜 $5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ を細粒材としたケース 4 の場合は, 下手側の汀線後退量を軽減でき, 20 年以降 30 年後まで汀線位置はほとんど変わらないという結果となったが, 目標浜幅は満足できない。これは 10 年以降粗粒材養浜を中止し, $10 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ 全てを細粒材としたケース 5 の場合も同様である。これより, 養浜

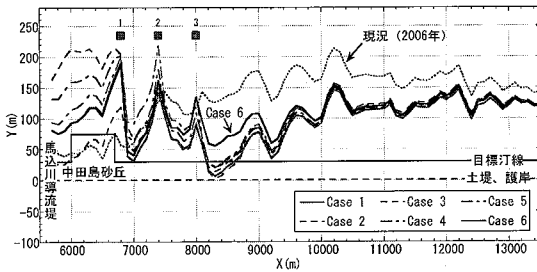
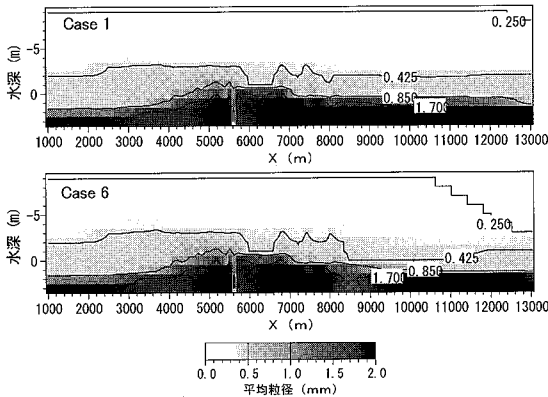


図-8 各ケースの30年後の砂浜幅の比較


 図-9 ケース1と6の30年後の d_{mean} の比較

量を増加させ、かつ細粒材を投入すれば、3基目離岸堤の下手側の汀線後退を軽減できることが明らかになった。次に、3基目離岸堤の下手側に細粒材 $5 \text{ m}^3/\text{yr}$ を直接投入するケース6の場合は、20年後も汀線を維持するだけでなく、30年後では若干の前進も期待できるものとなった。この手法は今切口上手側に堆積した砂を用いたバックパスなど、実現の可能性もあるものである。

計算によれば、粗粒材養浜では粗粒域が汀線に沿って下手側へと波及した。これは長期的に見て元々細砂中砂で構成された遠州灘海岸の底質の変化を招くことから望ましくない。一方、粗粒材に代わり現況と同様細粒材を用いた養浜では、前述のように目標浜幅は満足できないが、現状の底質分布に対し大きな質的变化は見られなかった。3号離岸堤の下手に細粒材を投入したケース6では、図-9に示すようにケース1と比較して粗粒域の下手側への広がりがかなり抑制される。以上のことから最適案はケース6となった。これによれば中田島海岸と3

号離岸堤下手の両方で目標レベルの達成が可能であり、他のケースと比較して粗粒域の3号離岸堤の下手側への広がりがかなり抑制できる。

5. 結 論

中田島海岸での実測値を基にした養浜検討によれば、粗粒材は投入箇所周辺に留まる割合が大きいたことが分かった。このことは、粗粒材は侵食危険箇所投入すればかなりの効果があることを示すが、下手側での侵食軽減には役立たない。一方、元々海岸を構成していた細粒材を侵食箇所投入しても前浜の拡幅には役立たず、対策効果は高くない。最適案は、侵食が著しく、離岸堤によって防護された場所に粗粒材養浜を行うと同時に、下手側に細粒材を投入する方法であることが分かった。また、計算結果より、細粒材が重要であることも明らかになった。細粒材はダムから下流に流し易い粒径であることを考慮すると、ダム再編事業においても細粒材の流下を主に考えることが有効である。

参 考 文 献

- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/ II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池 銅・石川仁憲(2006): 遠州灘海岸における長期的海浜変形予測と養浜の効果検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 666-670.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男(2003): 混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 596-600.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛(2005): 波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 1029-1034.
- 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一(2005): 遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 596-600.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.