

## 前浜養浜時における礫の拡散抑制手法

### Controlling Diffusion of Gravel in Foreshore Nourishment Using Groins and Detached Breakwaters

宇多高明<sup>1</sup>・石川仁憲<sup>2</sup>・古池 鋼<sup>3</sup>

Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA and Kou FURUIKE

Method controlling the diffusion of gravel in foreshore nourishment using short groins and small-scale detached breakwaters were investigated, taking into consideration the fact that the gravel movement concentrates on the foreshore. When beach material composed of mixed grain sizes is nourished on the foreshore, the discharge of the gravel component may be reduced when these structures are installed, while supplying fine sediment to downcoast. The mechanism was investigated using the contour-line-change model considering the change in grain size under the conditions beach nourishment is carried out on a dynamically equilibrium beach with a constant longshore sand transport.

#### 1. はじめに

海岸侵食問題への対処においては、流砂系全体を俯瞰した上での土砂管理が必要である。その具体的事例として、遠州灘海岸を含む天竜川流砂系ではダム再編事業が進められ、ダム堆砂を下流へ流す計画が進められている(宇多ら, 2009)。検討結果によると、ダム建設以前の流下土砂量に匹敵する土砂を流すことができれば河口部汀線を再び大きく前進させることができる。しかしその事業規模が大きいことから、実現までには長い年月を要すると考えられる。その間も侵食は進むので、侵食の軽減には養浜も必要となる。その場合養浜材料は現況河道からの土砂採取に多くを依存することになるが、天竜川などの急流河川の河床堆積土砂は礫混じりの粗粒土砂が主である。このような粗粒土砂が細砂中砂からなる海岸に大量に投入されると、礫は汀線付近より陸側に急勾配をなして堆積するので、前浜環境を劇的に変化させる恐れがある。一方で混合粒径土砂から細砂中砂をフルイ分けすれば調達コストが著しく高まることから、混合粒径材料を用いつつ波による自然分級を利用して礫分の拡散を抑制する手法が開発されればその有効性は高いと考えられる。具体的には、礫分が前浜を中心に移動することを考慮し、小規模な突堤や離岸堤などを設置した区間で混合粒径土砂による養浜を行えば、礫分の流出を抑制しつつ下手側への細粒分の供給が可能となり、粒径の大きな礫が砂浜海岸に拡散することによる環境変化を防ぐことが可能と考えられる。本研究では、粒径を考慮した等深線変化モデル(熊田ら, 2003)を用いてこの課題について検

討するものであり、動的平衡状態にある海浜を数値モデル上に作り出し、そこで混合粒径土砂による養浜が行われた場合の施設の有無による礫の広がり抑制効果を調べた。

#### 2. 計算方法

遠州灘に面した馬込川河口右岸の地域を想定し、展開座標を用いて海底地形を平行等深線に置き換える。この海岸において、波が汀線に対して直角に入射する条件と、 $30 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ (宇多ら, 2006)の沿岸漂砂が連続的に流れる条件のもとで養浜を行った場合の10年後の海浜変形予測を行った。養浜を行う前の粒径については、宇多ら(2007)をもとに $0.1 \leq d < 0.25 \text{mm}$ と $0.25 \leq d < 0.85 \text{mm}$ の粒径レンジの土砂がそれぞれ0.5の割合で含まれているとする。これらの粒径レンジについて前者は中央粒径 $0.25 \text{mm}$ の砂(粒径 $d_1$ )で、また後者の粒径レンジを中央粒径 $0.425 \text{mm}$ の砂(粒径 $d_2$ )で代表させ、砂の平衡勾配が $\tan\beta=1/100$ と $1/40$ であったと仮定する。これらの仮定の下では、陸上部の+3mから-3mの水深帯には $d_2$ の砂が、-3m以深には $d_1$ の砂が堆積し、それぞれの堆積域の海底勾配が岸側で $1/40$ 、沖側では $1/100$ と二つに折れた縦断形となる。

砂礫の流出制御のための施設としては突堤と離岸堤を考えた。養浜量は $5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ とした。施設はいずれも小規模なものを想定し、突堤の先端は前浜上の標高1mに置き、離岸堤は設置水深を1m、透過率を $K_t=0.4$ とした。離岸堤周辺の波の回折計算には不規則波の方向分散法(酒井ら, 2003)を用いた。入射波にはエネルギー平均波を用い、沖波波高を1.6m、周期を7sとし、波の入射方向は直角入射と左 $20^\circ$ の斜め入射を設定した。等深線の移動に伴い外力場も変化するが、これについては等深線上の任意点に対応する外力を方向分散法で求めた波浪の平面分布から1step毎に取り出して計算した。表-1に計算条件をまとめて示す。

1	正会員	工博	(財)土木研究センター常務理事 なぎ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	正会員	工修	(財)土木研究センターなぎさ総合研究室 海岸研究室(有)
3			

表-1 計算条件

計算モデル	粒径を考慮した等深線変化モデル (熊田ら, 2003) 回折計算: 不規則波の方向分散法 (酒井ら, 2003)
計算対象区域	遠州灘海岸の馬込川河口から西に3km区間
計算ケース	1. 混合比①で養浜+無施設 2. 混合比①で養浜+突堤 3. 混合比①で養浜+離岸堤 4. 混合比②で養浜+突堤 5. 混合比②で養浜+離岸堤
初期地形	直線平行等深線
入射波条件	沖波波高 $H=1.6m$ , 周期 $T=7s$ (エネルギー平均波) 波の入射方向 $\theta_0=0^\circ$ (直角入射)と $\theta_0=20^\circ$ $S_{max}=10$ 波高の低減率の最小しきい値: 0.4
潮位条件	M.S.L.=T.P.±0.0m
計算水深帯	$z=+3m \sim -9m$ $h_c=9m \sim$ バーム高 $h_R=3m$
空間メッシュ	沿岸方向 $\Delta x=100m$ , 鉛直方向 $\Delta z=1m$
計算時間間隔 $\Delta t$	50hr
計算ステップ数	175.2ステップ/yr
粒径	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粒径数 (5成分) と平衡勾配  <math>d_1</math>: <math>(0.1 \leq d &lt; 0.25mm)</math> <math>d_{50}=0.25mm</math>,  <math>\tan\beta=1/100</math>  <math>d_2</math>: <math>(0.25 \leq d &lt; 0.85mm)</math> <math>d_{50}=0.425mm</math>,  <math>\tan\beta=1/40</math>  <math>d_3</math>: <math>(0.85 \leq d &lt; 9.5mm)</math> <math>d_{50}=2.0mm</math>,  <math>\tan\beta=1/20</math>  <math>d_4</math>: <math>(9.5 \leq d &lt; 26.5mm)</math> <math>d_{50}=9.5mm</math>,  <math>\tan\beta=1/5</math>  <math>d_5</math>: <math>(26.5 \leq d &lt; 75mm)</math> <math>d_{50}=26.5mm</math>,  <math>\tan\beta=1/2</math></li> <li>・ 交換層厚: 底面長単位幅あたり  <math>1/100 : 0.5m, 1/40 : 1.25m, 1/20 : 2.5m,</math>  <math>1/5 : 10m, 1/2 : 25m</math></li> <li>・ 含有率                      1) 交換層A (<math>d_1 \sim d_3</math>)  <math>\mu_1=0.5, \mu_2=0.5, \mu_3=0.0, \mu_4=0.0, \mu_5=0.0</math>                      2) 交換層B (<math>d_1 \sim d_5</math>)  <math>\mu_1=0.5, \mu_2=0.5, \mu_3=0.0, \mu_4=0.0, \mu_5=0.0</math></li> </ul>
漂砂量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 沿岸漂砂量係数  <math>\ast K_x=A/\sqrt{d_{50}}</math> <math>A=0.0255</math>  <math>d_1 : K_x=0.0510, d_2 : K_x=0.0390, d_3 : K_x=0.0180,</math>  <math>d_4 : K_x=0.0059, d_5 : K_x=0.0035</math>  <math>\ast</math>沿岸漂砂量が<math>30 \times 10^4 m^3/yr</math>になるように係数Aを同定</li> <li>・ 沿岸漂砂量の水深方向分布: 一様分布</li> <li>・ 小径・Brampton係数: <math>K_2=1.62K_1</math> (<math>\tan\beta=1/30</math>)</li> <li>・ 岸沖漂砂量係数: <math>K_2=0.15K_1</math></li> <li>・ 安息勾配 (土砂落ち込みの限界勾配): 陸上1/2, 水中1/3</li> </ul>
境界条件	左右端境界: 汀線固定 (漂砂の流入出自由) 岸沖端: $q_x=0$ (漂砂の流入出なし)
養浜条件	混合比① ( $d_1 \sim d_3$ ) $\mu_1=0.7, \mu_2=0.0, \mu_3=0.1, \mu_4=0.1, \mu_5=0.1$ 混合比② ( $d_1 \sim d_5$ ) $\mu_1=0.2, \mu_2=0.2, \mu_3=0.2, \mu_4=0.2, \mu_5=0.2$

### 3. 計算結果

#### (1) 直角入射

初期海浜の縦断形は沿岸方向に一様であるが、水深3mに勾配変化点を持ち、その岸側・沖側の勾配は1/40と1/100である。この初期地形に波が直角入射する条件を考え、 $X=5.6km \sim 6.2km$ 区間において $5 \times 10^4 m^3/yr$ の土砂を標高+3mから0mの範囲に矩形状に連続的に注入した。10年間の養浜継続後の海浜形状を図-1(a)に示す。養浜区域では等深線が沖向きに突出すると同時に、波が直角入射するため養浜砂は養浜区域の両側へと運ばれ等深線が前進している。図-1(a)に示す等深線変化は、均一粒径土砂による養浜の場合にもよく似た結果が得られるが、この計算では礫分の広がり予測が可能である。最も大きな粒径 $d_5$ 成分 ( $d_{50}=26.5mm$ )は平衡勾配が1/2と大きいため前浜上で集中的な堆積が起こる。このことから $d_5$ 成分の拡散状況は標高3m位置における含有率 $\mu$ の沿岸方向分布により把握できる。図-1(b)には養浜後10年の含有率の沿岸分布を示す。混合比①の養浜土砂は、粒径 $d_1 \sim d_3$ に対する含有率が $\mu_1=0.7, \mu_2=0.0, \mu_3=\mu_4=\mu_5=0.1$ であり、細砂の含有率が0.7と高く、残りの成分は $d_3=2.0mm, d_4=9.5mm, d_5=26.5mm$ の礫のみとし、それぞれが含有率0.1ずつ含まれる条件である。この条件では $d_5$ 成分は急速に岸向きに移動し前浜に堆積するので、養浜区間ではその含有率が時間とともに増加し、含有率の沿岸分布は釣鐘状となり10年後には養浜区域の両側400mまで礫分が広がる。

養浜量などの条件をケース1と同様として先端を前浜上の標高1mに置いた突堤を $X=5600m$ と $6200m$ に設置し、その間で混合比①の土砂を養浜したケース2の予測地形を図-2(a)に示す。ケース1(無施設)では養浜区域の両側で等深線がなだらかに突出しつつ養浜砂が堆積したが、ケース2では突堤間で養浜が行われたことから、養浜区域両側への養浜砂の広がりは抑制されている。最も大きな違いは $d_5$ 成分の含有率 $\mu_5$ の沿岸方向分布(図-2(b))に現れる。波が直角入射する条件下で突堤間において養浜が行われたため、 $d_5$ 成分の含有率 $\mu_5$ は当初突堤間で鋭く立ち上がり、両側への礫分の拡散は無施設の場合と比較して大きく抑制される。堆積量が多くなると突堤先端まで堆積した礫分が両側へと流出するが、礫の拡散域は大きく抑制されたことが分かる。

養浜量などの条件を一定に保ったまま、設置水深1mの離岸堤を $X=5600m$ と $6200m$ に設置し、その間でケース1と同様混合比①の土砂を養浜したケース3では、細砂分は離岸堤沖を通過するが、汀線付近では離岸堤背後に形成された舌状砂州が沿岸漂砂を部分的に阻止するため、前浜上に養浜砂が留まりやすくなる(図-3(a))。また $d_5$

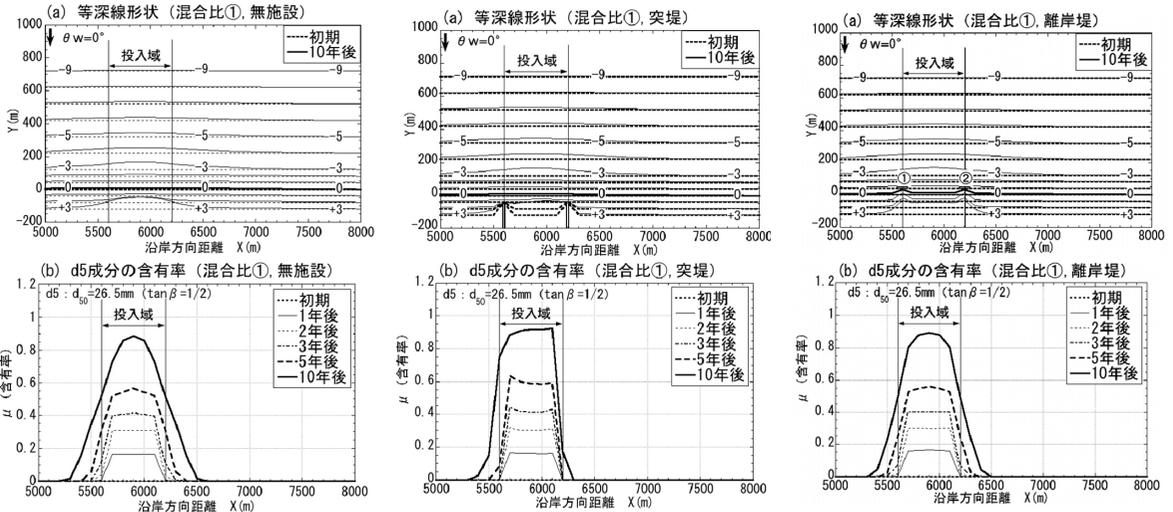


図-1 ケース1 (混合比①で養浜+無施設)の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布  
 図-2 ケース2 (混合比①で養浜+突堤)の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布  
 図-3 ケース3 (混合比①で養浜+離岸堤)の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布

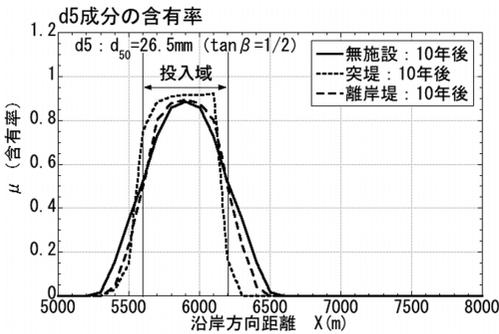


図-4 10年後における $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布の比較 (混合比①)

成分の含有率の沿岸分布は、図-3 (b) に示すようにケース1と同様に釣鐘状となるが、沿岸方向の広がり幅は狭まっている。

しかし離岸堤の背後を砂礫が通過できるため突堤と比べて礫の広がり抑制効果は劣る。

図-4は、無施設、突堤、離岸堤 (ケース1,2,3) の10年後における $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布の相互比較である。混合比①のように細砂の含有率が0.7と高く、残りが $d_3=2.0\text{mm}$ ,  $d_4=9.5\text{mm}$ ,  $d_5=26.5\text{mm}$ の礫が含有率0.1ずつ含まれるという条件では、突堤および離岸堤を設置してその間で養浜すると無施設の場合と比べいずれの場合も $d_5$ 成分の含有率の沿岸方向の広がり量が抑制されることが分かる。またこの混合比の条件では、礫の広がり抑制効果は突堤が優れていることも分かる。

次に施設形状を同一に保ったまま養浜砂の混合比を変

えた場合の計算を行った。図-5は混合比を粒径 $d_1 \sim d_5$ とも均一の0.2とし、直角入射波条件を与えて突堤間で養浜した場合の計算結果を示す。混合比①と比べると細砂成分が0.7から0.2まで減少する一方、礫分が0.3から0.6に倍増している。混合比①の計算結果 (図-2 (a)) と比較すると、混合比①の場合には汀線より陸側では突堤先端を結ぶ直線と等深線がほぼ平行であったが、混合比②の場合には汀線付近から陸側に集中的に堆積する礫分が増加したため等深線の突出量が大きくなり、同時に突堤両側区域への $d_5$ 成分の広がり量も増大した。すなわち初期地形においては水深3m付近に勾配変化点があったが、この勾配変化点付近を砂礫が埋めると、 $d_5$ 成分もその地盤に乗って動き易くなるため、突堤両側への広がり量が助長されたと考えられる。

突堤の場合と同様、諸条件を一定に保ったまま離岸堤を設置してその間で養浜を行った場合の等深線形状を図-6 (a) に、 $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布を図-6 (b) に示す。この条件では突堤の場合と比較して離岸堤より岸側の礫の堆積空間が増えたことにより離岸堤間に大量の土砂が堆積する一方、 $d_5$ 成分の沿岸方向への広がり量は抑制されている。

(2) 斜め入射条件

斜め入射波条件でも同様な計算を行った。初期地形は図-1と同様とするが、左側境界から $30 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂が流入し、右境界から同量の沿岸漂砂が流れ去る条件である。図-7 (a) は斜め入射波条件のもとで、混合比①の土砂を養浜した無施設の場合 (ケース1) の地形変化予測結果を示す。斜め入射波条件のもとで右向き

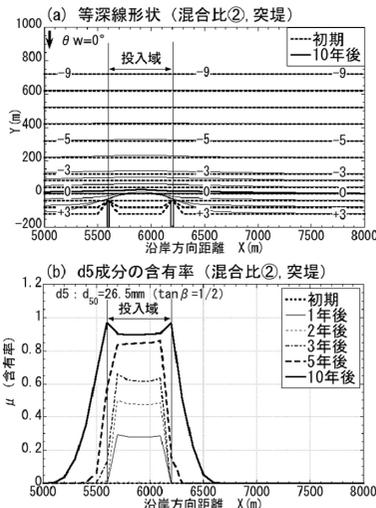


図-5 ケース4 (混合比②で養浜+突堤)の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布

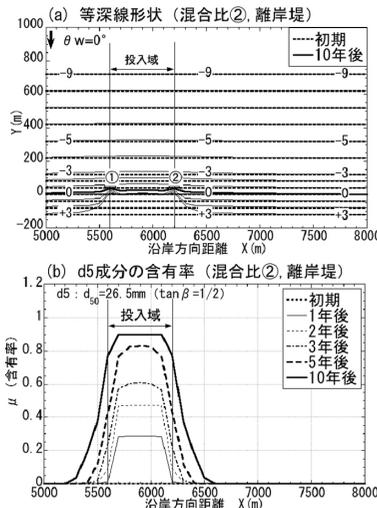


図-6 ケース5 (混合比②で養浜+離岸堤)の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布

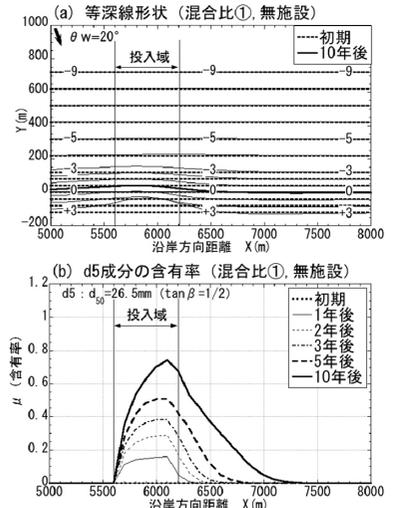


図-7 ケース1の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布 (斜め入射)

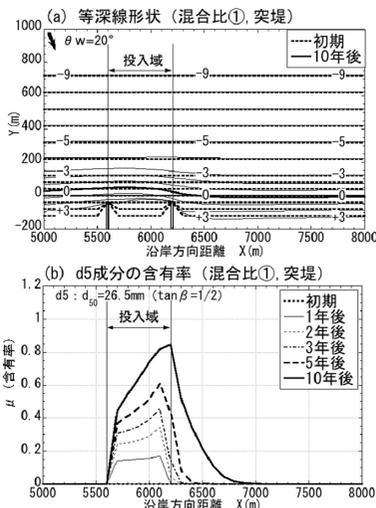


図-8 ケース2の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布 (斜め入射)

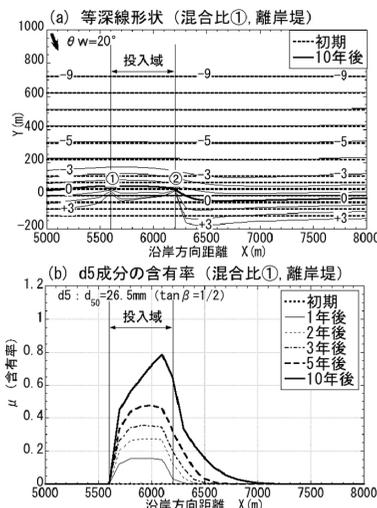


図-9 ケース3の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布 (斜め入射)

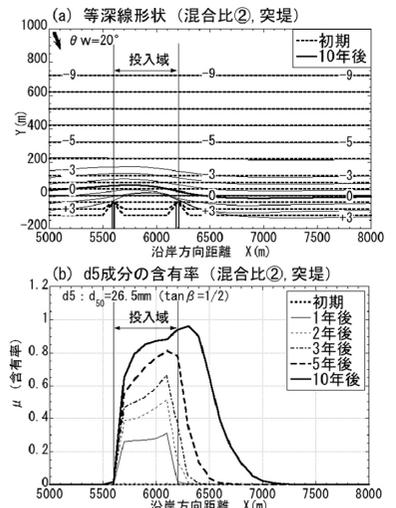


図-10 ケース4の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布 (斜め入射)

岸漂砂が生じるが、礫を含む土砂が養浜された結果、養浜区間では堆積した礫が沿岸漂砂を部分的に阻止するため養浜区間の上手では等深線が前進し、下手側では緩やかに等深線が後退するという結果となる。対応する $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布を図-7(b)に示すが、 $d_5$ 成分の礫は養浜区間で含有率が增大するとともに、下手側への拡散域が時間経過とともに広がる。

ケース1と同じ条件のもとで混合比①の土砂を養浜し突堤を設置した場合(ケース2)の計算結果を図-8(a)(b)に示す。 $d_5$ 成分は突堤を設置した条件でも下手側へと含

有率の高い部分が広がるものの、広がり区域がケース1と比べて大きく抑制されている。礫の広がりも抑制された一方、突堤が前浜上での漂砂を阻止する効果が強く出るため、突堤の下手側での+3mの等高線が後退を示す。このように突堤を用いれば礫の拡散防止上効果がある一方、施設下手側の前浜部分が著しく侵食されるというtrade-offの関係にあることが分かる。

ケース1と同じ条件のもとで離岸堤を設置した場合(ケース3)の計算結果を図-9(a)(b)に示す。突堤の場合とよく似た結果であるが、突堤が陸上の+1mに設置さ

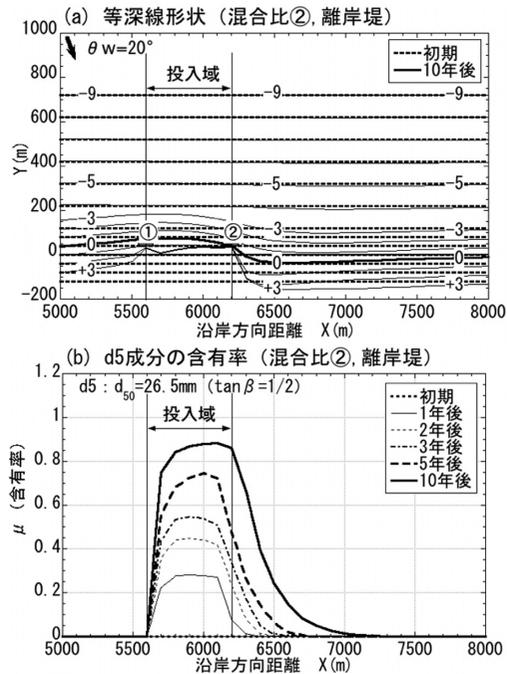


図-11 ケース5の等深線形状と $d_5$ 成分の含有率の沿岸分布 (斜め入射)

れたのに対し離岸堤は水深1mに設置されたため沿岸漂砂阻止能力が向上した結果、離岸堤下手側での侵食が突堤の場合より大きくなった。 $d_5$ 成分の広がり抑制効果はわずかに高まったが、下手側侵食が著しいことから礫の流出制御施設は汀線より陸側に限るほうが望ましいと考えられる。

次に養浜土砂の混合比を②として同様に養浜した場合の計算を行った。突堤を設置した場合(ケース2)の計算結果を図-10(a)(b)に示す。混合比②では、混合比が粒径 $d_1 \sim d_5$ とも均一の0.2としたが、この条件では図-8(a)の場合より突堤沖での等深線の突出量が增大すると同時に、図-8(b)と図-10(b)の比較から明らかなように $d_5$ 成分の下手側への広がりが著しくなった。また図-11に示すように離岸堤の場合にもほぼ同様な結果が得られた。

#### 4. まとめ

波が斜め入射する条件のもとで礫を多く含む材料で養浜を行うと、礫分は平衡勾配が大きいため岸側に堆積し、前浜を下手方向に移動する。このため陸上の+1mより陸側に設置した突堤や、水深1m付近に設置した離岸堤間で養浜を行うと、礫分の広がりをかなり抑制できることが分かった。その場合細砂の含有率が0.7と高く、残りが $d_3=2.0\text{mm}$ ,  $d_4=9.5\text{mm}$ ,  $d_5=26.5\text{mm}$ の礫が含有率0.1ずつ含まれる混合比①の条件と、粒径 $d_1 \sim d_5$ とも均一の0.2とした混合比②では相対的に礫分の量が0.3から0.6まで増加したことにより施設の下手側への礫分の広がりが著しくなった。突堤・離岸堤による礫分の下手側への拡散抑制効果は投入土砂の粒径に依存して変わるので、実際の粒度組成に併せた施設配置が必要と考えられる。

謝辞：本研究においては、静岡県浜松土木事務所より資料を提供していただいた。ここに謝意を表します。また、本研究は文部科学省科学技術・学術政策局の科学技術振興調整費による重要課題解決型研究等の推進「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」の研究成果であることを付記し、研究の推進に預かった方々に感謝します。

#### 参考文献

- 宇多高明・吉添高兆・町井 靖・山本剛史・古池 鋼・芹沢真澄・石川仁憲 (2007)：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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 641-645.
- 宇多高明・古池 鋼・宮原志帆・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2009)：ダム再編事業に伴う天竜川河口デルタの長期変形予測, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 651-655.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄 (2003)：沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 481-485.
- 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池鋼・石川仁憲 (2006)：遠州灘海岸における長期的の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.