混合粒径土砂の盛土養浜時の広がり予測

Prediction of Nourishment Material Composed of Mixed Grain Size in Foreshore Nourishment

宇多高明¹・田代洋一²・石川仁憲³・古池 鋼⁴・三波俊郎⁴・芹沢真澄⁵

Takaaki UDA, Yoichi TASHIRO, Toshinori ISHIKAWA, Kou FURUIKE
Toshiro SAN-NAMI and Masumi SERIZAWA

On the Hamamatsu-shinohara coast facing the Pacific Ocean, beach has been severely eroded, resulting in the shoreline recession of 210 m between 1962 and 2004. As a measure against beach erosion, beach nourishment using the mixture of sand and gravel was begun in 2005. Since then, $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ of sediment was supplied to the coast. In this study, we proposed a model for predicting the movement of gravel by waves. The predicted and measured results were in good agreement.

1. まえがき

遠州灘海岸では、天竜川からの流出土砂量の激減に伴い河口両翼の海岸で侵食が進み、河口の西4kmに位置する浜松篠原海岸では1962年から2004年までに汀線が最大210m後退した(長島ら, 2005)。この対策として、離岸堤3基と $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の維持養浜による保全対策が提案され(宇多ら, 2006)、計画は実施に移されてきた。本来細砂中砂で構成されている遠州灘海岸においては、海浜の質的(粒径)変化を防止する上では細砂中砂による養浜が必要であるが、一方で養浜により効果的な海岸保全を図るには粗粒材の投入も有効と考えられる(宇多ら, 2007)。現実には両者のバランスを取ることが求められるが、実際に現地海岸では2009年までに計 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ の礫を多く含む粗粒材養浜が行われた。この結果養浜による海岸保全効果が現れつつあるが、同時に海浜の質的变化が生じている。前述したように、海浜の質的变化を防止する観点からは、その海岸にあると同様な粒径特性を持つ土砂により養浜を行うことが望ましい。しかし材料の調達上礫材が混じる場合もあり、また浜松篠原海岸のように防護機能の早期発現を図るために汀線付近に歩留る相対的に粗な粒径の土砂を用いなければならない場合もある。そこで本研究では浜松篠原海岸で行われた粗粒材養浜による海浜変形の実態データを検証材料として、熊田ら(2003)の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて礫の移動状況の再現計算を行った。

2. 粗粒材養浜に伴う海浜変形

浜松篠原海岸における粗粒材養浜前の2005年と、養浜後の2009年の空中写真を図-1に示す。養浜は馬込川河口西側の長さ400m区間で比高7mの盛土形状で行われ、2005年1月より2009年6月までに合計 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ の養浜材が投入された(静岡県, 2009)。またこの間に馬込川河口の西1.6kmには堤長100mの離岸堤も設置された。比高7mで汀線付近に盛土された礫を含む養浜土砂は、波の作用により盛土斜面の基部から土砂が運び去られると上部の土砂が崩落し、再び波の作用で削り取られるという過程を経て、養浜土砂は次第に養浜区域から西向きに運ばれた。養浜は天端高T.P.+7mの盛土状に行われたため、全量が海へ供給された訳ではないが、図-1に示すように2005年と養浜後の2009年1月の汀線形状を比較すれば、馬込川河口から砂丘前面にかけて海浜が大きく広がったことが分かる。養浜が開始された2005年1月から2009年9月16日までの竜洋波浪観測所における有義波高と周期の観測によると、期間中のエネルギー平均波は $H=1.2\text{m}$,

図-1 粗粒材養浜前後の空中写真(静岡県撮影)

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		(財)土木研究センター河川・海岸部長
3 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)
4		海岸研究室(有)
5 正会員		海岸研究室(有)

図-2 2005年基準とする2009年9月までの汀線変化

養浜材 1,2,3 のデータ: 静岡県

図-3 養浜材の粒度組成

データ: 静岡県

図-4 養浜前後の底質の水深方向分布の比較 (静岡県)

$T=6.2s$, $\theta=S10^\circ E$ であった (石川ら, 2010). 浜松篠原海岸では, 海岸線に立てた法線の方法は $S16^\circ W$ なので, 26° 東寄りからの入射となり, 西向きの沿岸漂砂が卓越する条件であった.

図-2には2005年を基準とした2009年9月までの汀線変化を, この間に整備された2基の離岸堤の位置とともに示す. なお図-1では離岸堤は1基のみ示されているが, 残りの1基は空中写真撮影の行われた2009年1月から9月までの間に設置された. 養浜と離岸堤の建設により, 養浜箇所前面や離岸堤背後では30m程度汀線が前進したことが分かる. このように汀線は前進したものの, 同時に

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	天竜川河口から西30km地点まで
計算ケース	1. 2005年再現 (養浜前) 2. 2008年再現 (離岸堤設置直前) 3. 2009年再現 (現在) 4. 放置10年後
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) 波向: S 1962年初期汀線への波の入射角 $\theta_w=20^\circ$, $S_{max}=10$ 波高の低減率の最小きい値0.4 波の抽出回数1step毎
潮位条件	$M.S.L.=T.P.\pm 0.0m$
計算等深線	$z = +3m \sim -9m$ $h_c=9m$ バーム高 $h_R=3m$
計算空間メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=100m$, 鉛直方向 $\Delta Z=1m$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=50hr$
計算ステップ数	175.2ステップ/yr
粒径	粒径レンジ (5成分), 代表粒径 d および平衡勾配 $d1: 0.1 \leq d < 0.25mm$, $d=0.25mm$, $\tan \beta=1/100$ $d2: (0.25 \leq d < 0.85mm)$ $d=0.425mm$, $\tan \beta=1/40$ $d3: (0.85 \leq d < 9.5mm)$ $d=2.0mm$, $\tan \beta=1/20$ $d4: (9.5 \leq d < 26.5mm)$ $d=9.5mm$, $\tan \beta=1/5$ $d5: (26.5 \leq d < 75mm)$ $d=26.5mm$, $\tan \beta=1/2$ ・交換層厚 (再現性の高い値を選択): 底面長単位幅あたり 0.5m (1/100), 1.25m (1/40), 2.5m (1/20), 10m (1/5), 25m (1/2) ・海浜砂の含有率 (宇多ら, 2007) 1) 交換層A ($d1 \sim d5$) $\mu_1=0.5$, $\mu_2=0.5$, $\mu_3=0.0$, $\mu_4=0.0$, $\mu_5=0.0$ 2) 交換層B (岸沖方向に分布あり) $\mu_1=0.0 \sim 1.0$, $\mu_2=0.9 \sim 0.0$, $\mu_3=0.1 \sim 0.0$, $\mu_4=0.0$, $\mu_5=0.0$ ・盛土部分の含有率 (7~-1m) $\mu_1=0.27$, $\mu_2=0.25$, $\mu_3=0.12$, $\mu_4=0.16$, $\mu_5=0.21$ 養浜実績 (2006年10月16~17日)
漂砂量	・沿岸漂砂量係数 $K_s=A/\sqrt{d_{50}}$ 係数 $A=0.0255$, $K_s=0.0510$ ($d1$), 0.0390 ($d2$), 0.0180 ($d3$), 0.0059 ($d4$), 0.0035 ($d5$) ※沿岸漂砂量が30万 m^3/yr になるように係数Aを同定 ・沿岸漂砂量の水深方向分布一様分布 ・小笠・Brampton係数 $K_2=1.62K_s$ ($\tan \beta=1/30$) ・岸沖漂砂量係数 $K_c=0.15K_s$ ・エネルギー逸散率0.1 ・安息勾配 (土砂落ち込みの限界勾配) 陸上1/2, 水中1/3
境界条件	・1962年再現 (自然状態) 河口・右端では汀線固定 (漂砂の流入出自由) 岸沖端: $q_c=0$ (漂砂の流入出なし) ・2005年再現, 2008年再現, 2009年再現, 将来予測 河口 $q_m=0m^3/yr$ 右端 $q_m=$ 汀線固定 (漂砂の流入出自由) 岸沖端: $q_c=0$ (漂砂の流入出なし)
盛土養浜の条件	・養浜量 2005年1~3月 9.6万 m^3 (1回目) 2006年1~4月 0.5万 m^3 (※含む2回目) 2006年9~10月 5.9万 m^3 (2回目) 2007年11月~2008年2月 5.3万 m^3 (3回目) 2008年11月~2009年2月 13.7万 m^3 (4回目) 合計35万 m^3 ・盛土形状延長400m, 標高T.P.+7m~-1mの範囲で養浜

	・投入方法 ※再現は2回に分けて投入 1) 2008年再現時 2005年投入分 (1~3回まとめて盛土幅80m) $80 \times 400 \times 8 = 25 \text{万m}^3$ 2) 2009年再現時 2008年投入分 (離岸堤2基同時設置後) 4回目を残存している盛土に対して、追加盛土 幅30m $30 \times 400 \times 8 = 10 \text{万m}^3$
構造物条件	1) 既設構造物 (2005年再現で考慮) 離岸堤 (6基) $K_t = 0.4 \sim 0.6$ 消波堤 (15基) $K_t = 0.2 \sim 0.3$ 導流堤 (2ヶ所: 馬込川, 今切口) $K_t = 0.0$ 2) 新設離岸堤 (2009年再現で考慮) 2007年11月着工 2008年2月末完成 (2号離岸堤) 2008年11月着工 2009年3月末完成 (1号離岸堤) 新設離岸堤 (2基) $K_t = 0.4$

質的 (粒径) 変化も起きた。海浜の質的変化は、細砂中砂で構成されていた海岸に図-3に示すように粒径19mm以上の大礫を多く含む養浜材が大量に投入されたことによる。図-4は図-1に示す測線No.12とNo.162における養浜前後の底質の水深方向分布 (静岡県, 2009) を示すが、大きく前進した汀線付近で礫の含有率が著しく高まったことがわかる。

石川ら (2010) は、2009年9月15、16日、延長400mの養浜区間を含む馬込川河口西側の2.5km区間で前浜～砂丘の地形測量を行うとともに、堆積礫の分布状況を調べた。この調査によれば、礫の移動に関し図-5の結果が得られている。ここに大礫、中礫、細礫の区分は、粒径 d がそれぞれ $19 < d < 75 \text{mm}$ 、 $4.75 < d < 19 \text{mm}$ 、 $2 < d < 4.75 \text{mm}$ である。図-5によれば、大礫は養浜区間西端から西へ0.7kmまで到達したが、細礫中礫は約2倍の1.6kmまで広がりを示している。

3. 計算方法

礫を含む盛土養浜の変形予測では、砂～礫に至る広い粒径レンジを持った土砂が浜崖を形成しつつ投入点から運び去られるという現象を再現する必要がある。このた

め本研究では熊田ら (2003) の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて予測計算を行った。計算対象は、天竜川河口から西30km地点までの海岸とした。最初に自然状態にあり、水深2.5mを境としてその陸側勾配が1/40、沖側が1/100であった1962年当時の海浜縦断面が沿岸方向に一樣に続くと考え、1962年当時の汀線への法線に対して左斜めに $\theta_w = 20^\circ$ の方向から波が入射するとし、沿岸漂砂量が $3.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ となるように漂砂量係数を同定した。この条件で動的平衡海浜を造り出した。

予測計算では、このようにして求められた動的平衡海浜に各種施設を配置し、天竜川からの土砂供給量が0となったと仮定して2005年までの海浜変形予測を行った。この計算の後、4ケースの予測計算を行った。ケース1では2005年の養浜前の海浜形状を再現した。ケース2では2008年の離岸堤設置直前の海浜形状を、ケース3では2009年の現況再現を、そしてケース4では現況のまま放置して10年後の海浜形状を予測した。計算に用いた波浪条件は、対象期間のエネルギー平均波 ($H_0 = 1.6 \text{m}$, $T = 7 \text{s}$) とし、またメッシュ間隔は $\Delta X = 100 \text{m}$, $\Delta Z = 1 \text{m}$ とした。再現計算においては離岸堤の建設経緯を考慮し、また離岸堤の透過率は0.4とした。表-1には計算条件をまとめて示す。

4. 計算結果

図-6(a) は、馬込川河口付近と2基の離岸堤を含む3km区間の初期形状 (1962年) と2005年の等深線の計算結果、および2005年測定の前浜形状を示す。初期の平行等深線は、左境界 (天竜川河口方面) からの沿岸漂砂量の枯渇と、馬込川導流堤による沿岸漂砂の阻止などの影響により導流堤の西側直近で大きく後退しているが、汀線変化の予測結果は実測結果とよく対応している。図-6(b) は図-6(a) に位置を示す $X = 5.9 \text{km}$ 断面の縦断面を示す。初期粒径として $d = 0.25 \text{mm}$ の砂 (平衡勾配1/100) と、 $d = 0.425 \text{mm}$ の砂 (平衡勾配1/40) が均等に混ざった状態

図-5 礫の分布状況と粒径別の移動距離 (石川ら, 2010)

図-6 2005年の予測等深線変化とX=5.9km断面における海浜縦断面形

図-7 2008年の予測等深線変化とX=5.9km断面における海浜縦断面形

を設定しているため、初期縦断面は水深3mより岸側では1/40勾配、これより沖合では1/100勾配となる複合断面を有する。この初期断面は、馬込川河口導流堤の西側隣接部での等深線の後退とともに縦断面が大きく後退したことが分かる。2008年の離岸堤設置直前の地形変化予測では、盛土養浜が3回（養浜土砂量 $1.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ ）行われたことを考慮した。図-7(a)は2005年（初期）と2008年の等深線の予測結果を2008年の実測汀線形状とともに示す。これによれば、養浜区域から離れると一致度が低下するが、養浜区間近傍では実測・予測汀線はよく一致している。図-7(b)にはX=5.9km断面における縦断面変化を示すが、盛土養浜によって形成された突出部では浜崖を形成しつつ2008年まで汀線が40m後退している。浜崖部分から汀線に供給された土砂は沿岸漂砂により次々と運び去られるため水面下での堆積はほとんど見られない。

2008年地形条件のもとで4回目の養浜が行われた後の2009年の同様な予測結果を図-8(a) (b)に示す。図-8(a)に示す予測等深線形状のうち汀線について計算と実測形状を比較すると、計算のほうが実測より侵食量がやや過大な結果を与えているが、離岸堤周辺での汀線の場所的变化はうまく説明されている。また図-8(b)に示すX=5.9km断面における縦断面変化によれば、2008年までに浜崖の形成を伴いつつ後退した汀線が養浜によって再び前進したが、それも波の作用で侵食され、2009年9月

図-8 2009年の予測等深線変化とX=5.9km断面における海浜縦断面形

図-9 礫の移動距離の比較

の縦断面形は2008年養浜直前の縦断面形とはほぼ等しくなるまで後退したことが見てとれる。投入土砂の粒径が大きいため、盛土養浜区間から沖向き漂砂は起こらず、したがって沖合には砂礫の堆積域が形成されていない。以上より、養浜土砂は西向き沿岸漂砂によって運ばれたことが分かる。

一方、石川ら（2010）に詳細を示したように、礫は前浜上に堆積しつつ次第に沿岸方向に運ばれた。その場合粒径に応じて移動速度が異なるために、礫の沿岸方向の拡散域は粒径に依存して異なり、小粒径ほど拡散域が広いと考えられる。図-9は粒径レンジが $9.5 \leq d < 26.5\text{mm}$ で代表粒径が $d=9.5\text{mm}$ の礫（ d_4 ）と、粒径レンジが $26.5 \leq d < 75\text{mm}$ で代表粒径が $d=26.5\text{mm}$ の礫（ d_5 ）について、標高3m位置（バーム上）で沿岸方向の広がり区域の予測結果を実測結果と比較したものである。図には2009年8月に測定した d_4 、 d_5 相当の礫の広がり区域の西端位置も示すが、 d_4 の広がり区域は過小評価であるものの、 d_5 成分については実測値と予測値とはほぼ一致している。

5. まとめ

本研究では浜松篠原海岸で行われた粗粒材養浜による

海浜変形の実態データを検証材料として、熊田ら（2003）の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて礫の移動状況の再現計算を行った。計算結果によれば、繰り返し行われた盛土養浜に伴って海浜縦断面は前進したが、養浜後波の作用で浜崖を形成しつつ後退する状況について予測と実測でかなりよい一致を示すとともに、 $26.5 \leq d < 75\text{mm}$ で代表粒径が $d=26.5\text{mm}$ の礫（ d_5 ）の広がり区域の予測結果もほぼ妥当な結果が得られた。これらより実用的意味で本研究の方式が有効利用可能なことが分かった。一方、浜松篠原海岸での粗粒材を用いた盛土養浜では、浜崖を形成しつつ養浜土砂が海岸へと供給されるものの、浜崖の後退とともに波の作用が起こりにくくなり、結果として一定割合で下手側海浜へと砂礫を供給することが難しいことも明らかとなった。そのためには浜崖の後退とともに土砂を押し出す作業も必要になると考えられる。その海岸において流れることが期待される沿岸漂砂量に見合った土砂量をいかにスムーズに供給するかについて検討することが今後の課題である。

謝辞：本研究においては、静岡県浜松土木事務所より空中写真や粒径データなどの貴重な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の意を表します。

参考文献

- 石川仁憲・宇多高明・三波俊郎（2010）：粗粒材養浜時の海浜の質的变化と礫の移動特性，海洋開発論文集，第26巻，pp.1077-1082。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 静岡県（2009）：第12回 遠州灘沿岸侵食対策検討委員会資料。
- 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。