静岡・清水海岸全域を対象とした海浜変形予測

Prediction of Topographic Changes along Shizuoka and Shimizu Coasts

宇多高明¹・大橋則和²・岩本仁志³・宮原志帆⁴・芹沢真澄⁵・石川仁憲⁶

Takaaki UDA, Norikazu OHASHI, Hitoshi IWAMOTO, Shiho MIYAHARA
Masumi SERIZAWA and Toshinori ISHIKAWA

Long-term topographic changes since 1968 along the entire Shizuoka and Shimizu coasts with a 17 km stretch extending between the Abe River mouth and the tip of the Mihono-matsubara sand spit were reproduced using the contour-line-change model. Beach erosion of these coasts was triggered by the decrease in sediment supply from the Abe River due to excessive riverbed mining until 1967. After 1982/83 natural sand supply of the river increased and accretion occurred on these coasts. Measured topographic changes were reproduced using the contour-line-change model considering grain size change. Not only the movement of sand body but also the shoreline and bathymetric changes were numerically reproduced. The calculated results were in good agreement with the measured topographic changes.

1. はじめに

駿河湾に面した静岡清水海岸では、安倍川河道において1967年まで行われた大規模な砂利採取により流出土砂量が激減し、これに伴って北向きの沿岸漂砂とのバランスが失われ、侵食域が河口部から北向きに広がっていった(宇多, 1997)。しかし砂利採取の禁止とともに1982/1983年頃から流出土砂量が再び増加し、過去に著しく侵食されて護岸が波に曝された地先においても再び土砂の堆積が見られるようになった。一方、静岡・清水海岸では1970年代から始まった激しい侵食への対策として多数の離岸堤が設置されたが、離岸堤群の設置区域では土砂が塊となって北向きに移動し、その移動速度が約260 m/yrであることが明らかにされた(宇多, 1997)。土砂堆積は「砂の塊」が空間的に移動するという特徴を示すことから、sand bodyの移動現象として捉えることが可能であり、このsand bodyは時間経過とともに侵食箇所を埋めつつ漂砂下手側(北側)へ移動している。このようなsand bodyの移動に関し、宇多ら(2007a)は、砂の平衡勾配と海浜勾配との相対的關係から定まる岸沖漂砂と沿岸漂砂の作用を考慮した芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いてその発生機構について検討した。この研究では、sand body発生以前の1983年の海底地形を固定床で与え、計算領域の右(南)端から $1.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂流入(宇多, 1997)を仮定するとともに、左端には自由

境界を設定することにより sand bodyの移動状況を再現した。その後、福濱ら(2008)は、sand bodyは主に礫で構成されているが、離岸堤沖では細砂が堆積し、その堆積域が経年的に東向きに広がったことを実測データより明らかにした上で、sand bodyと沖の細砂の堆積域の移動を熊田ら(2007)の粒径を考慮した等深線変化モデルにより再現した。再現計算では、南端から細粒・粗粒土砂をそれぞれ $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 流入させた。以上の海浜変形予測では、いずれも計算範囲を安倍川河口近傍から北向きにほぼ直線状に伸びた部分とすると同時に、離岸堤群の設置区間のみを対象として sand bodyの移動現象の再現を試みた。しかし漂砂系全体での長期的海浜保全について考えるには、漂砂系全体を対象とした上で sand bodyの移動速度のみならず、地形変化までも再現する必要がある。このため本研究では、海岸の一部を切り出すのではなく、静岡清水海岸全域を含む漂砂系を対象として長期的地形変化の再現計算を行い、その上でサンドバイパスなどの効果について粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて検討した。

2. 実態データの分析

図-1に示すように、安倍川河口から三保松原に至る海岸線は安倍川河口部で突出したあと緩く湾曲し、清水海

図-1 展開座標系

1 正会員	工博	(財)土木研究センター常務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		静岡県静岡土木事務所主任
3		静岡県静岡土木事務所企画検査課主任
4		海岸研究室(有)
5 正会員		海岸研究室(有)
6 正会員	工修	(財)土木研究センターなごさ総合研究室

図-2 展開座標系で見た深浅図と1985年基準の地形変化量の平面分布

図-3 海浜縦断面と粒度組成の水深方向分布
($X=4.8\text{km}$ (No.30)) 図-4 1985年を基準としたsand bodyの土砂量変化
($X=0.2\sim 8.8\text{km}$, T.P.+5~-8m)

岸北部から三保松原砂嘴の先端にかけて海岸線曲率が大きくなる。このような海岸線形状は砂嘴の発達とともに長い年月をかけて形成されてきたものなので、本来であれば砂嘴形成の再現計算を行った上で近年の地形変化を予測することが理想である。しかし砂嘴形成に至るまで数千年間の地形変化予測は困難なので、図-1に示すように現況海岸線に沿って座標系を定め、それを直線座標に展開する手法を用いて海浜変形予測を行うこととし、まずこの座標系のもとで実態データの分析を行った。

図-2は、この展開座標系で求めた1985年基準での1995年と2010年までの地形変化量の分布を示す。右端には安倍川が位置しており、安倍川からの流出土砂が離岸堤群の背後に堆積しているが、堆積域は時間経過とともに北側へと広がっている。これが宇多ら(2007a)や福濱ら(2008)の研究でsand bodyの移動としてその移動状況が分析されたものである。一方、離岸堤設置区域の北側の清水海岸では著しい侵食が生じるとともに侵食域が北側へと広がり、また $X=14\text{km}$ にあるL字突堤の設置とともにその上手側で集中的な堆砂が生じている。

図-2の地形変化に対応する縦断面変化と底質粒径調査(2006年8月実施)の結果のうち、一例として図-2に示す $X=4.8\text{km}$ 断面での結果を図-3に示す。この断面では-4m以浅に粗砂と礫が堆積し、前浜勾配は約1/10と急である。これに対して-8m付近は細砂で構成され、海底勾配も1/100と緩やかである。他の測線でも、汀線付近から1/10

と急傾斜で落ち込むものの、沖合は緩勾配となっている。

次に、図-2の矩形区域について、1985年を基準として $Z=+5\text{m}$ から -8m の範囲の堆積土砂量を求めた。積分範囲についてはほぼ-4m以浅では主に礫が堆積し、沖合では細砂が堆積していることから、-4m以深と以浅に分けて土砂量を計算すると、汀線に近い部分に堆積しているのは礫に相当する土砂量と、沖合に堆積している細砂の堆積量が求められる。静岡海岸は過去に侵食され、侵食対策として造られた護岸の前面に砂礫が新たに堆積するという過程をたどった。また、静岡海岸への土砂供給は安倍川からであるが、現況で安倍川河口右岸の田尻地区は護岸と離岸堤で覆われており、侵食が起こる条件にないので、田尻地区からの侵食土砂が河口左岸へと供給されることはない。このため、安倍川河口からsand bodyの先端が到達した場所までの区間における砂礫の堆積は、安倍川からの供給によってのみ生じることになり、その総土砂量の変化より安倍川からの供給土砂量の推定が可能と考えられる。そこで、変動の著しい安倍川河口部を除く $X=0.2\text{km}$ から、2010年になってようやくsand bodyが到達し始めた $X=8.8\text{km}$ までの間において砂礫の堆積土砂量の変化を調べた。この場合、礫と細砂の堆積域の境界の水深がほぼ-4mにあることを考慮し、+5m~-4mの水深帯と-4m~-8mの水深帯に区別して土砂量を求めた。結果を図-4に示す。これによれば、総土砂量は1985~1995年の10年間で $2.0 \times 10^6\text{m}^3$ 増加している。よってこの間での

表-1 計算条件

数値計算手法	等深線・粒径変化モデル (熊田ら, 2007)
計算対象範囲	静岡海岸・清水海岸: 17km
計算期間	1968～2010年 (42年間) 5段階: 1968～1983～1990～1994～1998～2010年
初期地形	1968年地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線 (海底勾配: -4m以浅1/10, -4m以深1/50)
粒径構成	・ $N=2$ 粒径 ・ 代表粒径 細粒 $d^{(1)}=0.2\text{mm}$, 粗粒 $d^{(2)}=2\text{mm}$ ・ 初期粒径含有率 ・ +3～4m: 細粒 $\mu_1=0.0$, 粗粒 $\mu_2=1.0$ ・ -5～7m: 細粒 $\mu_1=1.0$, 粗粒 $\mu_2=0.0$
平衡勾配	$\tan \beta_c^{(1)}=1/50$ (細粒), $\tan \beta_c^{(2)}=1/10$ (粗粒)
交換層の幅	混合層幅 $B=1\text{m}$ ($B=\Delta h/\tan \beta$: 混合層厚 $\Delta h=0.03H_b \approx 0.1\text{m}$, $\tan \beta=1/10$)
入射波条件	・ 碎波波高 $H_b=3\text{m}$, 初期碎波角 $\theta_w=7^\circ \sim 37^\circ$ ・ 波向分布 ・ 安倍川河口～静岡清水海岸境界 $\theta_w=7^\circ$ ・ 静岡清水海岸境界～1号 HL～L字突堤間 $\theta_w=7^\circ \sim 17^\circ \sim 37^\circ$ ・ L字突堤～真崎 $\theta_w=37^\circ$
潮位条件	M.S.L. T.P.+0.0m
限界水深 バーム高	地形変化の限界水深 $h_c=7\text{m}$ バーム高 $h_R=3\text{m}$
漂砂量係数	漂砂量係数内の $A=0.01752$ 岸沖・沿岸漂砂量比 $\gamma=0.1$ 小笹・プランプトン項の係数 $\zeta=1.62$
沿岸・岸沖漂砂 の水深分布	宇多・河野の3次式 (熊田ら, 2007)
土砂落ち込みの 限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/2
計算等深線範囲	$z = +3.5 \sim -7.5\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=100\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=1\text{hr}$
境界条件	・ 右端 (上手端): 安倍川供給土砂 1968～1983年: $Q_w=2.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ (細粒: $2.5 \times 10^3 \text{m}^3/\text{yr}$, 粗粒: なし) 1983～2010年: $Q_w=2.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ (細粒: $5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$, 粗粒: $1.5 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$) ・ 左端 (下手端): 漂砂通過境界 $dq_s/dx=0$ ・ 岸沖端: $q_s=0$
養浜	養浜箇所・養浜量考慮 (養浜は土砂の湧き 出しで考慮: +3m～0m 等深線) 養浜砂の含有率: $\mu_1=0.25$ (細粒), $\mu_2=0.75$ (粗粒)
数値計算法	陽解法による差分法
波浪場の計算法	方向分散法, $S_{\max}=25$
その他	・ 波高伝達率: 離岸堤群: $K_t=0.7$ (群堤 全体を連続堤として設置)、 1号HL～5号HL: $K_t=0.5$, L字突堤 $K_t=0.0$ ・ 護岸 (安倍川～1号HL間に設置): $x=0 \sim -9.0\text{km}$: 設置位置 $y=-35\text{m}$ $x=-9.0 \sim -11.0\text{km}$: 下手に向かって斜めに 後退させて設置 ・ 離岸堤群: $y=+30\text{m}$ (護岸からの離岸距離 65m)

安倍川からの供給土砂量は平均 $2.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ であったと推定される。またこのうち沖合の-4m以深での土砂増加割合は $1.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ であって、この付近には細砂が堆積

していることから細砂の供給量の下限値は $1.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ となる。

3. 海浜変形予測

(1) 計算方法

海浜変形予測には熊田ら (2007) の等深線・粒径変化モデルを用いた。計算範囲は、全長17kmの静岡清水海岸のうち、安倍川河口からL字突堤までとした。ここにL字突堤は礫の移動を抑止する一方、細粒分は沖の海底谷へ流出している (宇多ら, 2007b) ことから、漂砂境界とみなすことができる。1968年地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線を与え、海底勾配は実測縦断形を参照して-4m以浅を1/10, -4m以深を1/50とした。波による地形変化の限界水深 h_c は7m, バーム高 h_R は3mとした。また、粒径は2粒径とし、細粒を0.2mm, 粗粒を2mmで代表させ、初期粒径含有率は $Z=+3 \sim -4\text{m}$ では細粒 μ_1 が0, 粗粒 μ_2 が1.0, $Z=-5 \sim -7\text{m}$ では細粒 μ_1 が1.0, 粗粒 μ_2 が0とした。平衡勾配は細粒を1/50, 粗粒を1/10とした。

波浪条件としては、当海岸における5%程度出現頻度の波 $H_0'=3\text{m}$ ($T=9\text{s}$) を波向Sから入射させ、屈折を考慮して1号HL付近での碎波角を定めた。この結果と汀線の方角角の変化を考慮して、安倍川河口から静岡清水海岸の境界までは $\theta_w=7^\circ$, 静岡清水海岸の境界～1号HL～L字突堤間では $\theta_w=7^\circ \sim 17^\circ \sim 37^\circ$ と線形的に変化させた。なお自然状態での沿岸漂砂量 $Q=2.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ で動的安定状態が満され、沿岸方向にエネルギーフラックスが一定に保たれるよう碎波角が大きくなるに従って波高を低減させた。また、図-4に示した静岡海岸の1983年以降の土砂量変化より、右 (南) 端では $2.0 \times 10^5 \text{m}^3/\text{yr}$ の土砂流

図-5 1983年地形の再現計算結果

図-6 2010年地形の再現計算結果

図-7 1983年を基準とした各年の汀線変化量の沿岸方向分布

入とした。また清水海岸では、1989年以降、安倍川河道の掘削土砂や飛行場付近に堆積した砂礫を用いた養浜が行われてきているので計算ではそれを考慮した。

(2) 再現計算

図-5 (a) に示すように1970年当時の海底地形を平行等深線で与え、波を作用させたときの1983年地形を図-5 (b) に、また初期からの地形変化量を図-5 (c) に示す。この間、安倍川からの土砂供給量が $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで激減し

たとしている。土砂供給量と北向きの沿岸漂砂との均衡が崩れたために安倍川河口側から侵食が始まり、侵食域が北側へと広がり示す。同様にして1983年までの計算結果において安倍川河口から再び $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂供給が1983年から始まったとして2010年までの地形変化予測を行った。図-6 (a) は地形変化予測の結果を、図-6 (b) は地形変化量を、さらにこれに対応する実測地形変化量を図-6 (c) に示す。清水海岸で離岸堤群式HLが造られたため、各HLの上手側では等深線が三角状に前進し、下手側では楔状に後退している。またL字突堤は規模が大きいためその上手側に広い堆積域を形成している。安倍川からの流出土砂が離岸堤群の背後を埋めながら徐々に北向きに移動しているが、南部の離岸堤によって北向きの沿岸漂砂が抑制されているため離岸堤群の北側では侵食が進む状況がうまく計算され、予測結果は実測結果とよく一致している。

図-7は、1983年を基準とした1990～2010年における計算と実測汀線の比較結果を示す。安倍川からの供給土砂がsand bodyを形成しつつ北側へ広がっていくために、安倍川河口付近で汀線が最も前進し、北側に河口から離れるに従い汀線前進量が小さくなる点や、清水海岸においてHLとL字突堤建設に伴うジグザグ形状の汀線変化が生じる点についても実測と計算結果はよい一致を示す。

4. 将来予測

(1) 現況の養浜を継続

HL群周辺で行われてきた養浜について、1998年から2009年の実績平均である $5.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜をそのまま継続した場合の20年後までの地形変化予測の結果を図-8に示す。図-8 (a) は予測地形を、初期からの地形変化量を図-8 (b) に示す。安倍川から供給された土砂が離岸堤群の背後を北向きに移動し静岡清水海岸の境界付近に至るまで土砂の堆積が進む。しかしその北側のHL群周辺では依然として侵食が進むことが分かる。汀線変化と浜幅の分布(図-8 (c), 8 (d))で見ても汀線が前進して浜幅が増加するのは離岸堤群背後のみであり、北端の飛行場付近では汀線後退が続く。浜幅で見ると、静岡海岸南部の大谷川と安倍川河口間では1983年当時と比べて浜幅の増加が大きく、最大150mもの浜幅の増加が起こる。この付近では既設離岸堤が砂礫に埋まるといった状態となる。

(2) 安倍川からの流出土砂量を増加させた場合

長期的意味から見た安倍川の流出土砂量はほぼ $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ である。したがって現実的にはこの値より大きな供給土砂量を設定することは流域土砂管理の視点から見れば不合理である。しかし海岸で過去に失われた土砂量を回復するという意味では自然状態での供給土砂量より大きな土砂量を供給することも意味があると考えられ

図-8 $5.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を継続した場合の地形変化予測 (20年後)

る。そこで安倍川の土砂供給量を $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 増加させて $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ として20年後の地形変化予測を行った。

図-9 (a) は予測地形を、初期からの地形変量を図-9 (b) に示す。安倍川から大量の土砂が流入するため河口の北側に並んだ離岸堤を埋めるようにして河口デルタの等深線が前進する。しかし土砂供給量が増加した効果は河口周辺域に集中し、HL群がある場所までは効果が及ばない。この状態は汀線変化を示す図-9 (c) にも明らかである。このように安倍川河口から自然状態で流れ込んでいた土砂量よりも大きな土砂量を流入させてもその効果は河口周辺部に限られ、北部海岸で効果が出るまでには至らない。この結果は、宇多ら (2008, 2009) による天竜川ダム再編事業に伴い天竜川の流下土砂量を増大させた場合の計算結果において、供給量を増加させた土砂は河口周辺部に集中的に堆積するという結果と同じである。

5. 結論

安倍川からの流下土砂によって形成された静岡清水海岸の侵食と堆積について、漂砂系全体を対象として等深線変化モデルを用いて1968年から2010年まで42年間の長期的な地形変化の再現計算を行った。この計算では、

図-9 安倍川流出土砂量を $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ 増加させた場合の地形変化予測 (20年後)

sand bodyの移動現象のみならず、汀線変化、水深変化量の平面分布まで含めた再現計算を行った。これまでの研究では、sand bodyの発達直前の侵食されきっていた1983年の海底地形を固定床として与えたが、本研究では侵食以前の、自然状態にあった1968年を初期状態とし、それから2010年までの地形変化の再現を行った。この結果、計算結果により実測地形変化をうまく説明できた。また今後20年程度の時間スケールにおいては安倍川からの供給土砂量を増加させても河口から離れた清水海岸の侵食・堆積とは独立であることも明らかになった。

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997) 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p.442.
- 宇多高明・西谷 誠・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2007a) : 等深線変化モデルによる sand body 移動の数値解析, 地形, Vol.28, pp.399-414.
- 宇多高明・吉添高兆・町井 靖・西谷 誠・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2007b) : 清水海岸のL字突堤沖における細砂の移動帯の形成機構, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.421-425.
- 宇多高明・長島郁夫・古池 鋼・宮原志帆・石川仁憲 (2008) : 天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.656-660.
- 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・宇多高明・芹沢真澄 (2007) : 卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル, 土木学会論文集B, Vol. 63, No.2, pp.154-167.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断面の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, 496-500.
- 福濱方哉・山田浩次・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2008) : 静岡海岸における sand body の発達と移動および沖合での細砂移動の予測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.676-680.