世界文化遺産「富士山」の構成資産としての三保松原の海岸保全策の検討

Measures against Beach Erosion on Mihono-Matsubara Designated as a Constituent of World Culture Heritage of Mt. Fuji

杉保聡正¹・岩崎伸昭²・宇多高明³・石川仁憲⁴・芹沢真澄⁵・宮原志帆⁶

Toshimasa SUGIHO, Nobuaki IWAZAKI, Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA
Masumi SERIZAWA and Shiho MIYAHARA

At Mihono-Matsubara on the Shimizu coast, new measures against beach erosion which do not spoil the coastal scenery of Mt. Fuji from the shoreline were required since the designation of Mt. Fuji as the world culture heritage in 2013. In this study, the effect of some measures including L-shape groins against beach erosion was analyzed by numerical simulation using the contour-line-change model considering the grain size. The most effective measure was the installation of four L-shape groins with the sand back pass by a rate of $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ from the north end of the sand spit.

1. はじめに

安倍川からの流出砂礫が堆積して形成された三保松原砂嘴の外縁をなす清水海岸では、河床掘削に伴う流出土砂の激減に起因して侵食が進み、現在侵食域は三保松原前面に設置されたL型突堤を越え、砂嘴先端部まで広がりがつつある。砂嘴は沿岸漂砂により砂が連続的に供給され続ける条件においてのみ動的に安定な姿を持つことができるが、三保松原砂嘴ではこの条件が失われた。このような三保半島北端付近での海浜変形に関しては、これまで様々検討が行われ、既設L型突堤を通過する沿岸漂砂が2006年では $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定され、著しい侵食が起こる前の1998年の $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と比べて著しく減少していることが明らかにされた(宇多ら, 2010a)。その後、上手側での養浜の効果もあって、2013年の沿岸漂砂量は $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで回復したと推定された(市野ら, 2014)。一方、L型突堤の北側では、侵食対策として汀線付近に4基の消波堤が設置されているが、富士山が世界文化遺産に指定され、羽衣の松で有名な三保松原もその景観を構成する重要な要素となったことから、景観に悪影響を及ぼさない対策法の提案が求められるに至った。そこで、本研究では粒径を考慮した等深線変化モデル(熊田ら, 2007)を用いて、侵食が進むL型突堤北側における既設4基の消波堤に代わり、景観への配慮がなされた海岸保全

対策の検討を行った。

2. 計算条件

三保松原砂嘴の北端部の既設L型突堤以北では、急深な海底谷が汀線近くまで迫っている。このため、北端部に位置する飛行場前の汀線は大きく湾曲し、汀線の伸長方向が 90° も変化している(図-1)。このように海岸線方向が極端に変化する海岸の地形変化を定量的に予測するため、宇多ら(2010b)が静岡・清水海岸の海浜変形予測に用いた方法と同様、展開座標による計算を行った。図-1には展開座標上に定めたX軸と、現地汀線位置の関係を示す。汀線変化量は、曲線状汀線上の地点A～Gにおいて測線方向の距離の変化として表され、1998年の汀線位置が初期汀線に等しい。また、初期縦断面形は、1998年汀線上に定めた展開座標上の沿岸距離に応じて定めることとし、2013年の深淺図を基に、L型突堤から4号堤の南端まで($X=13.9 \sim 15.3 \text{ km}$)では海底勾配1/6、飛行場前($X=15.66 \sim 16.5 \text{ km}$)では砂礫の海中での安息勾配に

1	静岡県交通基盤部河川企画課長
2	静岡県交通基盤部河川企画課 主査
3 正会員	工博 一般財団法人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
4 正会員	工修 一般財団法人土木研究センター
5 正会員	博(工) 海岸研究室(有)
6	海岸研究室(有)

図-1 展開座標の定義

等しい1/2とし、4号堤の南端から飛行場前(X=15.3~15.66 km)では1/6勾配から1/2勾配へと直線的に擦り付けた。図-2にはこのようにして定めた初期地形を示す。砂の平衡勾配については、 $X \geq 15.3$ kmの消波堤区間では

図-2 モデル化された初期地形

$\tan \beta_c = 1/6$, $X \leq 15.66$ kmの飛行場前では1/2と設定した。波による地形変化の限界水深は、宇多ら(2010a)を参照して $h_c = 12$ m, パーム高 h_R は3 mとした。種々の計算条件は表-1に示すとおりである。

(1) 再現計算の条件

現況再現計算は、宇多ら(2010a)、市野ら(2014)の実態解析の結果より、1998年までは $Q_{in} = 9 \times 10^4$ m³/yrの沿岸漂砂が上手端(L型突堤)から流入し、それが連続的に流れることにより動的平衡状態が保たれていたと仮定した。その上で、1998~2006年では上手端からの流入漂砂量を $Q_{in} = 1 \times 10^4$ m³/yrまで減少させた。その後2006~2013年では沿岸漂砂量を $Q_{in} = 4.5 \times 10^4$ m³/yrまで回復させた。ここで、対象海岸では2007年以降飛行場前面でサン

表-1 計算条件

数値計算手法	粒径を考慮した等深線変化モデル(熊田ら, 2007)
再現計算	1998~2013年: L型突堤設置による漂砂流入阻止後の海浜変形の再現 1998年以前 $Q_{in} = 9 \times 10^4$ m ³ /yr 1998~2006年 $Q_{in} = 1 \times 10^4$ m ³ /yr, 1, 2号消波堤嵩上げ 2006~2007年 $Q_{in} = 4.5 \times 10^4$ m ³ /yr 2007~2011年 $Q_{in} = 4.5 \times 10^4$ m ³ /yr, 3号消波堤延伸 2011~2013年 $Q_{in} = 4.5 \times 10^4$ m ³ /yr, サンドリサイクル(砂礫採取32,300 m ³ /yr, 養浜量3,800 m ³ /yr) サンドリサイクル(砂礫採取30,000 m ³ /yr, 養浜量30,000 m ³ /yr)
予測計算	既設1~4号消波堤を撤去し、サンドバイパス 5×10^4 m ³ /yr(1号下手 3×10^4 , 2号下手 2×10^4)とともに以下の対策案を実施 ケース1: L型突堤(1, 2号先端水深: 6 m, 3, 4号: 4 m, 横堤70 m) ケース2: L型突堤(1, 2号先端水深: 6 m, 3, 4号: 2 m, 横堤70 m) ケース3: 有脚式離岸堤4基($K_t = 0.4 \rightarrow 0.6$, $z = -8$ m) ケース4: 人工リーフ4基($K_t = 0.4 \rightarrow 0.8$, 既設位置より-20 m沖出し) ケース5: 人工リーフ7基
初期地形	1998年地形を展開座標でモデル化した直線汀線に海浜断面を設定 海底勾配: 1/6(消波堤区間)~1/2(飛行場・下手)
粒径構成	$N=2$ 粒径, 代表粒径 細粒 $d^{(1)} = 0.2$ mm, 粗粒 $d^{(2)} = 2$ mm, 初期粒径含有率 細粒 $\mu_1 = 0.0$, 粗粒 $\mu_2 = 1.0$
平衡勾配	$\tan \beta_c^{(2)} = 1/6$ (消波堤区間: $X \geq 15.3$ km)~1/2(飛行場・下手: $X \leq 15.66$ km)(粗粒)
交換層の幅	$B = 1$ m
入射波条件	5%出現確率波: $H_o^* = 3$ m, $T = 9$ s, 碎波波高 $H_b = 3$ m, 初期碎波角 $\theta_w = 20^\circ$ (4号堤~飛行場: $\theta_w = -10^\circ$, 飛行場~左端部 $\theta_w = -25^\circ$)
潮位条件	M.S.L. T.P.+0.0 m
限界水深・パーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c = 12$ m, パーム高 $h_R = 3$ m(宇多ら, 2010a)
漂砂量係数	漂砂量係数 $A = 0.00358$ (L型突堤設置前の流入漂砂量が $Q = 9 \times 10^4$ m ³ /yrとなるよう調整) 岸沖・沿岸漂砂量比 $\gamma = 0.1$, 小笹・ブランプトン項の係数 $\xi = 1.62$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	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: 1/2
計算等深線範囲	$z = +3.5 \sim -50.5$ m(海底谷考慮)
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 20$ m, 鉛直方向 $\Delta Z = 1$ m
計算時間間隔	$\Delta t = 10$ hr
境界条件	右端(L型突堤下手): 上述の Q_{in} 値(含有率: $\mu_1 = 0.0$ (細粒), $\mu_2 = 1.0$ (粗粒)) 左(下手)端: 漂砂通過境界(沿岸漂砂の沿岸方向変化率 $dq/dx = 0$) 岸沖端: $q_c = 0$ (漂砂の流出入なし)
養浜・掘削	養浜: 現況再現および放置: 1号堤付近($X = 14.2 \sim 14.7$ km) ケース2~5: 1号L型堤の直下手100 m区間および2号L型堤の直下手100 m区間 土砂採取: 飛行場前($X = 15.7 \sim 16.0$ km) 養浜・土砂採取は土砂の湧き出し・吸い込みで考慮: +3~0 m等深線 養浜砂の含有率: $\mu_1 = 0.0$ (細粒), $\mu_2 = 1.0$ (粗粒)
数値計算法	陽解法による差分法
波浪計算法	不規則波の方向分散法(酒井ら, 2003) $S_{max} = 25$
その他	1) 波高伝達率 消波堤 $K_t = 0.4$ (1998~2006年の1号・2号消波堤は $K_t = 0.3$: 嵩上げのため), L型突堤 $K_t = 0.0$, 4号消波堤から下手に向かい波高を低減(波高補正係数 K) 3) 初期碎波角 θ_w は4号堤上手~飛行場で変化 注: 波高・波向は, 消波堤下手での汀線後退, 飛行場前での砂落ち込みによる汀線前進, および沿岸漂砂量分布を再現可能なよう試行計算により設定 4) 1998~2006年はL型突堤の補強工事による仮設堤の影響によりL型突堤の遮蔽効果が高まっていたことから, L型突堤直下手領域では小笹項を強めた。

図-3 2013年までの再現計算結果

ドリサイクルが開始され、2011年までは $32,300 \text{ m}^3/\text{yr}$ の掘削が行われ、 $3,800 \text{ m}^3/\text{yr}$ が養浜材として使用された。また、2011～2013年では、飛行場前での掘削量が $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで増量され、検討対象区域で $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜が行われたことから、これらも考慮して海浜変形の再現計算を行った。このほか2000～2003年に1, 2号堤が嵩上げされたことから、これも考慮し、該当期間での既設消波堤の透過率を $K_t = 0.3$ とした。なお、将来予測計算では再び沈下するとして $K_t = 0.4$ とした。

(2) 予測計算の条件

予測計算では、中長期対策として現況（2013年）から20年後までを計算期間とし、全ての消波堤を撤去し、代わりに各種対策案を選択した場合の対策効果の比較を行った。サンドリサイクル量は $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、砂礫採取に伴う上手側への影響をなくするため砂礫の採取位置は現位置より下手側（ $X = 16.0 \sim 16.3 \text{ km}$ ）とした。計算は5ケースからなる。なお、上手端からの流入漂砂量は現状の $Q_{in} = 4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ が今後も継続するものとした。ケース1, 2は、横堤長70 m、天端高T.P.+1.5 mのL型突堤とし、 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ のサンドリサイクルを行う案である。この場合、

図-4 実測・計算汀線の比較

図-5 測線No.29における縦断形変化の比較

1, 2号堤の先端水深は6 mと一定に保つが、3, 4号堤の先端水深は4 m（ケース1）、2 m（ケース2）と変えた。ケース3は駿河海岸での実施事例を参考に有脚式離岸堤とし、設置水深は沖浜の緩勾配の海底に設置することとし-8 mとした。この消波効果は、天端幅 $B=20 \text{ m}$ の場合に5%出現確率波浪（ $H=3 \text{ m}$, $T=9 \text{ s}$, $L=125 \text{ m}$ ）が計画潮位（HHWL=T.P.+1.66 m）で作用した場合の透過率（スリット式構造）として $K_t=0.6$ とした。ケース4, 5は人工リーフ案で、それぞれ4, 5基の人工リーフを設置した。人工リーフの天端高は漁業利用を考慮しT.P.-2 m、のり面勾配は1/3、のり先位置を-8 m以浅とすると岸沖方向の天端幅は $B=20 \text{ m}$ となる。この場合の5%出現確率波浪と計画潮位におけるリーフの透過率は $K_t=0.8$ となるので、計算ではこの値を用いた

3. 再現計算結果と実測値の比較

図-3には2013年までの再現計算の結果を示す。上手端（L型突堤）からの沿岸漂砂量が1998年以前の $Q_{in} = 9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ から最終的に $Q_{in} = 4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となったため、図-3(a)に示すように、とくに右端（既設L型突堤）の北側隣接域が著しく侵食され、1～4号堤の北側隣接部はいずれもフック状に汀線が後退した。図-3(b)の1998年を

基準とした2006, 2011, 2013年までの汀線変化量より, 実際の地形変化と同様, 既設L型突堤から下手(北)側, 4号堤と飛行場前までの区域で汀線後退が次第に進むという結果となった. この時, 沿岸漂砂量は, 図-3(c) より2006年にはL型突堤で $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であり, 北向きに増加して4号堤の北側隣接部で最大値 $9.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ を有していた. しかし2013年には, L型突堤の通過漂砂量が $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ へと増加する一方, 4号堤の北側隣接部での漂砂量の最大値は $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで減少する分布となった. また北向きの沿岸漂砂によって運ばれた砂礫は, 飛行場前の急斜面を経て深海へと落ち込むために, 飛行場前では汀線が次第に前進した. 1~4号堤の北側隣接部ではいずれもフック状の汀線後退が起こった. 図-4には2013年の実測と計算汀線を示す. 計算結果は実測値とほぼ一致している. 図-5には, 清水海岸の測線No.29における1998~2013年の実測縦断形変化と, 計算による縦断形変化を示す. 実測の汀線後退量83 mに対し計算では82 mであり, また侵食が進むに従い次第に縦断勾配が小さくなる点など, 計算により実測縦断形変化が再現できた. 以上のことから, 本モデルにより清水海岸の将来地形の予測が可能と考えられた.

4. 地形変化予測の結果

各ケースについて初期(2013年)から20年後までの水深変化量を図-6に示す. また各ケースの20年後の汀線変化の比較を図-7に示す. これらの結果より, L型突堤(ケース1, 2)は, 過度な堆積, 侵食を起こさず必要浜幅を確保できることが分かる. なお, 1, 2号堤は同じ条件のため, L型突堤~2号堤間での違いは見られないが, 2号堤下手側では先端水深4 m(ケース1)の方が4号堤上手側の堆積をわずかに促進する結果となった. 有脚式離岸堤(ケース3)の場合, 北向きの沿岸漂砂を強く抑制するため, 3号堤の上手側で著しい堆積が生じるとともに, 4号堤下手側では著しい侵食が起きた. 4号堤の下手の最大地盤高低下量は8 mにも及び, 4号堤の下手側汀線がフック状に後退した場所での20年後までの汀線後退量は25 mとなった. 人工リーフ(ケース4, 5)の場合, 施設が海面下にあるため景観面で優れ, L型突堤(ケース1, 2)と同様にほぼ全域で堆積傾向となるが, 漂砂制御機能が低いため1号堤上手側で侵食が進み, 20年後までに最大20 m程度の汀線後退が起きた. この侵食は人工リーフを増やすことで軽減されるが, その一方で4号下手側の侵食が助長された. ただしこの場合でも1号堤の上手側でわずかに必要浜幅を確保できない.

図-8には各ケースの20年後の予測汀線と防護上必要な浜幅(80 m)を示す. L型突堤(ケース1, 2)は必要浜幅を確保することができている. なお, L型突堤は先端

図-6 水深変化量(2013年基準:20年後)

図-7 汀線変化比較(2013年基準:20年後)

水深を4 mとしたケース1の方が3号上手側での汀線の前進を促進でき, ケース2と比べて20 m程度広い浜幅が確保された. 一方, 有脚式離岸堤(ケース3)の場合, 北向きの沿岸漂砂を強く抑制するため, 4号堤下手側でわずかに必要浜幅を確保できない. 人工リーフ(ケース4,

図-8 20年後の予測汀線と必要浜幅

5) は、いずれも1号堤上手側で必要浜幅を確保できない。また、L型突堤から4号下手側にかけて汀線形状の凹凸がより少ないのはL型突堤（ケース1、2）であり、L型突堤から北側の富士山を望む眺望が他のケースよりも優れていると考えられる。この場合、L型突堤（3、4号堤）の先端水深が小さいケース2の方が、1～4号堤間で汀線とL型突堤の横堤がほぼ重なることから、横堤が露出しないという点でより景観面で優れている。

また、通常の突堤では汀線が突堤位置で不連続となるが、本研究の場合L型突堤の上手側での養浜土砂が下手側に連続的に流れることが可能なために、汀線の不連続は生じることがないという結果となった。

以上のことから、景観に劣る既設消波堤の代替案は、

過度な堆積、侵食を起こさずに必要浜幅の確保が可能で、汀線形状の凹凸が小さく、将来的には砂礫に覆われる4基のL型突堤の設置が最適である。有脚式離岸堤は、場所的に堆積、侵食状況の大きな変化をもたらすとともに、北端の4号堤の北側で著しい侵食を引き起こす。また、人工リーフはL型突堤に比べて海岸保全効果が低いことから、これらは対策案として不適と考えられた。

5. まとめ

侵食が進む清水海岸のL型突堤北側における景観に配慮した海岸保全対策として、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて最適案の検討を行った。この結果、景観に劣る既設消波堤の代替案として、過度な堆積、侵食を起こさずに必要浜幅の確保が可能で、将来的には砂礫に覆われるL型突堤（4基）の設置が最適と考えられた。ただし、下手側の3、4号堤の先端水深を大きくすれば上手側の浜幅が広くなり海岸保全機能が高められるが、先端水深が小さい突堤では先端部が砂礫に覆われ、景観面に優れるというtrade-offの関係が確認された。

一般に、わが国のみならず世界的に見ても砂嘴先端部を構造物で安定化させる案は多くの場合失敗しており、砂州が多数の構造物で覆われてしまった例が多い。これは、砂が移動しつつ、ある形が保たれていることを忘れ、砂嘴の形（汀線）にばかり目を奪われた結果とも言える。現況の三保松原の砂州は、上手側からの連続的な漂砂供給、およびサンドリサイクルによる養浜を大前提として「砂が流れている」ことでその姿が保たれており、また、飛行場前では急勾配斜面を通じた深海への土砂流出が起きている。このようなことから対象海岸の海浜安定化は動的意味でのみ達成可能であることに十分注意を払う必要がある。

参考文献

- 市野智一・水野良幸・宇多高明・石川仁憲・三波俊郎（2014）：世界文化遺産として指定された三保松原周辺での侵食の実態，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70，（印刷中）
- 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・三波俊郎・石川仁憲・平田邦夫・大橋則和・岩本仁志（2010a）：清水海岸北部における2006年以降の海浜変形の実態，海岸工学論文集，第57巻，pp.571-575.
- 宇多高明・宮原志帆・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲・平田邦夫・大橋則和・岩本仁志（2010b）：清水海岸の砂嘴北端部でのサンドリサイクルの影響評価，海岸工学論文集，第57巻，pp.576-580.
- 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.
- 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.