福井県浜住海岸の地形変化予測と養浜効果検討

Prediction of Bathymetric Changes of Hamaju Coast in Fukui Prefecture and Effect of Beach Nourishment

野口賢二¹・諏訪義雄²・宇多高明³・三波俊郎⁴・西村隆吉⁵・古池 鋼⁴・石川仁憲⁶

Kenji NOGUCHI, Yoshio SUWA, Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI, Takayoshi NISHIMURA
Kou FURUIKE and Toshinori ISHIKAWA

On the Hamaju coast in Fukui Prefecture, beach changes were triggered by large-scale land reclamation and the construction of port breakwater due to their wave sheltering effect. Bathymetric changes were investigated using the past aerial photographs and bathymetric survey data. The effect of beach nourishment using beach materials composed of various grain sizes was predicted by the contour-line-change model considering grain size change, as a soft measure against beach erosion. It is concluded that beach nourishment using coarse sand deposited offshore of the Kuzuryu River is most effective.

1. はじめに

防波堤や埋立地など波の遮蔽構造物が造られると周辺の波浪場が変化し、波の遮蔽域の外側から内側へと沿岸漂砂が生じ、遮蔽域の外側では侵食が進む。このような場合、従来の対策では侵食域に離岸堤または人工リーフが設置されることが多いが、設置箇所ではある程度まで侵食が抑えられるとしても、その隣接域で侵食が進むという悪循環がしばしば起こる。このような悪循環を防止するには、養浜による対策が有効と考えられる。しかし、それを実現するには、投入土砂の質と量を様々変えた場合の効果を定量的に示すことが求められる。福井県の浜住海岸では、図-1に示すように過去に福井港の埋立地が造成されるとともに、南端の鷹巣港に防波堤が伸ばされた結果上記の地形変化が起き、中央部では侵食が進んだため15基の離岸堤が設置された(宇多ら, 2007)。一方、当海岸は鷹巣海水浴場としても知られているが、海水浴の利用上離岸堤が障害となったため5号離岸堤の人工リーフ化が進められた。しかし人工リーフ化とともに波浪の侵入度が増し、その背後で汀線が再び後退するという事態も起きている。本研究では、このような海浜変形が起きた浜住海岸を対象として、構造物に頼らない手法としての養浜の効果について熊田ら(2007)による粒径を考慮した等深線変化モデルにより検討する。なお、宇多

ら(2007)でも浜住海岸の海浜変形予測が行われたが、その際計算は展開座標系で行われた。本研究では、現象の理解を容易にするために実座標を用いて検討した。具体的には、地形変化の再現計算を行った上で、九頭竜川河口と福井港の航路への堆砂をサンドバイパスした場合や、埋立地の南側隣接部の前浜砂を浜住海岸にサンドリサイクルした場合の効果と影響について検討した。

2. 浜住海岸の汀線変化の実態

空中写真から求めた浜住海岸の汀線変化を図-2に示す。図-2(a)は自然状態にあった1968年を基準とした汀線変化を示す。1968年は福井港の埋立地の建設以前であり、九頭竜川河口から鷹巣港まで長さ約11kmの砂浜(三里ヶ浜)がほぼ直線状に伸びていた。その後1985年までに福井港の埋立地が造られた結果、現況と同様北端は埋立地の護岸で仕切られ、浜住海岸は約4kmのポケットビーチとなった。埋立地が大きく突出したことにより、その南端部では波の遮蔽域が形成され、備蓄基地の南側隅角部では三角形状に汀線が大きく前進し、1995年までには隅角部で汀線が170m前進した。また、1995年までに15基の離岸堤が建設されたために海岸南部では汀線が

1 正会員	国土交通省国土技術政策総合研究所海岸室
2 正会員	国土交通省国土技術政策総合研究所海岸室長
3 正会員	(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
4 非会員	海岸研究室(有)
5 非会員	福井県土木部砂防海岸課
6 正会員	(財)土木研究センターなごさ総合研究室

図-1 浜住海岸の位置

図-2 浜住海岸の汀線変化 (1968~2010年)

固定される一方、離岸堤の北側隣接域の長さ1900m区間では汀線が最大50m後退した。詳細には浜住海岸の離岸堤のうち南端から10基目までの離岸堤背後では舌状砂州が安定的に形成されており、これと対照的に11号堤から備蓄基地の南側のX=4500mまでは汀線が凹状に後退している。図-2(b)は、1995年基準での2010年までの汀線変化を示す。この間で起きた最も著しい汀線変化は、5号離岸堤の人工リーフ化に伴い波浪の侵入度が増したために、人工リーフとその両側の離岸堤背後の汀線が最大17m後退したことである。また、離岸堤の設置区域と、離岸堤と備蓄基地の間では汀線の変動量が大きいことも特徴である。

3. 養浜効果検討の基本的考え方

地形変化計算に先立ち、図-1に示したように沿岸方向に15km、岸沖方向に7kmの矩形領域において不規則波の方向分散法(酒井ら, 2003)を用いて波浪場の推定を行った。次に、鷹巣港~福井港埋立地の4.0km区間を対象として粒径を考慮した等深線変化モデルにより海浜変形計算を行った。この場合Y軸は卓越波向(NW)方向に、またX軸はこれと直角方向に取っている。計算では、まず自然状態にあったと考えられる1968年地形を与えて2007年地形を再現した。2007年までには、鷹巣港防波堤と福井港の埋立地に石油備蓄基地(以下、備蓄基地)が完成し、さらに15基の離岸堤が設置されていたが、その直後5号離岸堤の人工リーフ化が行われた。したがって2007年は離岸堤の人工リーフ化直前の状況に対応する。さらに2007年の計算結果を基に5号堤が撤去され、人工リーフ化された後の2010年地形の再現計算を行った。こ

図-3 実測と計算汀線の差の二乗平均値

のような再現計算により海浜変形モデルの浜住海岸への適用性を確認した後、養浜土砂の粒径と量を変えて10年後までの予測計算を行った。

養浜土砂の調達については、1985年以前には浜住海岸と九頭竜川河口とが一続きの砂浜であったことから分かるように、当海岸の漂砂源は九頭竜川にある。しかし福井港の防波堤および埋立地建設によって浜住海岸への漂砂供給が絶たれる一方、福井港の航路と九頭竜川河口には過剰な堆砂が起きていることから、これらの地域の土砂を浚渫して利用する方法について検討した。一方、備蓄基地の南側隣接区域でも過剰な堆砂が起きていることから、その土砂によるサンドリサイクルの効果・影響についても検討した。

4. 計算条件

養浜工の検討では最初に放置案について検討し、それに続いて福井港の航路、九頭竜川河口の堆砂を浜住海岸沖で養浜する案について検討した。養浜案は、航路堆砂と河口堆砂に相当する細粒と中粒土砂をそれぞれ $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で養浜する案、福井港の浚渫実績から航路浚渫土砂全量を $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ で、河口浚渫土砂を $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ で、さらに両者の和を $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で投入する案を設定した。

波浪条件については、福井港での観測結果に基づき冬季のエネルギー平均波として、 $H_o' = 2.2 \text{ m}$ 、 $T = 7.4 \text{ s}$ を与えた。福井港での卓越波向はNWであるが、これを参考としつつN44°WからN50°Wまで1°間隔で入射方向を変化させ、X=1.1km~4.9km間において1968年の実測汀線形を最もよく表現できる波向を求めた。図-3は、上記区間における実測と計算汀線の差の二乗平均値を示すが、実測との差が最も小さいのはN45°Wであり、この値は福井港で観測された卓越波向と一致した。よって以下の計算ではこの波向を用いた。

漂砂量分布については、当海岸では粒径が細かい砂で構成されていることから、水深方向に一様分布を仮定した。本計算は、様々な粒径の土砂を用いた養浜時の効果検討を行うために、粒径は3成分からなるとし、それぞ

表-1 計算条件

計算モデル	粒径・等深線変化モデル(熊田ら,2007) 波浪場:方向分散法(酒井ら,2003)
計算対象区域	地形変化計算:7km(鷹巣港~福井港埋立地) 波浪場の計算15km(鷹巣港~雄島)
計算ケース	再現計算
	再現1 自然状態にあった1968年地形(1984年とみなす)
	再現2 2007年当時の地形(鷹巣港,福井港,離岸堤15基)
	再現3 2010年地形(6号離岸堤を撤去し人工リーフ化)
	10年後の予測計算
	ケース1 放置
	ケース2 航路浚渫土砂: $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
	ケース3 河口浚渫土砂: $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
初期地形	ケース4 航路浚渫土砂: $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
	ケース5 河口浚渫土砂: $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
	ケース6 航路・河口浚渫土砂: $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
	ケース7 備蓄基地南側の前浜砂(サンドリサイクル): $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$
	直線平行等深線
	$H_0 = 2.2\text{m}$, 周期 $T=7.4\text{s}$, 波向NW(冬期エネルギー平均波), $S_{\max}=10$
	波高の低減率の最小しきい値:0.0, 波の抽出1step毎
潮位条件	M.S.L.=T.P. $\pm 0.0\text{m}$
計算等深線	$z=+3\text{m} \sim -16\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=20\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=5\text{hr}$
計算ステップ数	自然状態 $3.2 \times 10^5 \text{ step}$
	※安定形まで(1752ステップ/yr) 将来予測 $1.752 \times 10^4 \text{ step}$
粒径	粒径数(3成分)と平衡勾配
	$d_1=0.25\text{mm}$ (0.075~0.25mm) : $\tan \beta=1/80$
	$d_2=0.425\text{mm}$ (0.25~0.425mm) : $\tan \beta=1/30$,
	$d_3=1.0\text{mm}$ (0.425~2mm) : $\tan \beta=1/20$
	交換層幅(岸沖方向):10m
	鉛直方向換算の交換層
	$\tan \beta=1/80:0.125\text{m}$, $\tan \beta=1/30:0.333\text{m}$, $\tan \beta=1/20:0.5\text{m}$
	含有率
漂砂量	交換層A,B:-5~-16mでは $d_1(\mu_1)=100\%$, -4~ $\pm 0\text{m}$ では $d_2(\mu_2)=100\%$, +1~+3mでは $d_3(\mu_3)$ =100%
	ケース2以降 交換層B:ケース1の交換層Aの分布
	沿岸漂砂量係数 $K_x=A/\text{sqrt}(d)$
	係数 $A=0.025$
	小管・Brampton係数: $K_2=1.62K_x(\tan \beta=1/30)$
	岸沖漂砂量係数: $K_y=0.2K_x$
	安息勾配:陸上1/2, 水中1/2
	一様分布
境界条件	岸沖端,南端,北端 $q_n=0\text{m}^3/\text{yr}$
構造物条件	波高伝達率
	離岸堤 $K_t=0.6$ (10号堤: $K_t=0.2$)
	鷹巣港 $K_t=0.0$
	福井港埋立地 $K_t=0.0$
養浜条件	6号堤のリーフ化 $K_t=0.6 \rightarrow K_t=0.9$
	養浜区域 $X=1.6\text{km} \sim 2.0\text{km}$, 水深6~8m
	サンドリサイクルの採取区域 $X=4.6\text{km} \sim 4.9\text{km}$, 水深0~2m
	養浜材の粒度組成(シルト: $d_1:d_2:d_3$)
	航路浚渫土砂 (9.3:85.9:4.1:0.7)
	河口浚渫土砂 (6:21.7:39.6:32.7)
	サンドリサイクル (0:0.1:5.6:94.3)
	※シルトは流出分として考慮

れの代表粒径(平衡勾配)は, $d_1=0.25\text{mm}$ ($\tan \beta=1/80$), $d_2=0.425\text{mm}$ ($\tan \beta=1/30$), $d_3=1.0\text{mm}$ ($\tan \beta=1/20$) とした. 表-1には種々の計算条件をまとめて示す.

5. 再現計算の結果

最初に平行等深線地形を設定し, 方向分散法で求めた波浪を十分長い時間(180年間)作用させ, 埋立地造成前の自然状態にあったと考えられる1968年地形を再現した. 図-4が計算された海底地形を示す. 埋立地は存在しないから端部近傍でも等深線は平行に伸びている. これに対して鷹巣港側では波の遮蔽効果により湾曲した等深線形状となっている. 図には1968年の実測汀線も重ねて示すが, 計算と実測汀線はよく一致し, 再現性が高いことが分かる.

次に, 1968年地形を与えて2007年地形の再現計算を行った. 2007年には鷹巣港, 福井港の埋立地, および15基の離岸堤が完成している. 図-5(a)は計算された海底地形を, また1968年から2007年までの水深変化量を図-5(b)に示す. 離岸堤群のうち南端部と中央の10号堤の背後では顕著に堆砂が生じるとともに, 福井港の埋立地の隅角部では著しい堆砂が生じた. 堆積土砂は主に離岸堤群と埋立地の間の1.8km間から運ばれたために, この区間では著しい侵食が生じた. 一方, 鷹巣港の沖防波堤による波の遮蔽効果に伴いその背後域でも堆砂が生じたことが分かる. 図-5(c), (d)には等深線の拡大図と1968年基準での汀線変化を示す. 図-5(c)に示すように離岸堤群の北側では侵食されて窪地が形成されており, そこが汀線後退区域と一致している. 実測汀線は2004年であるのに対し, 計算は2007年と3年間の差はあるが, 各種構造物の建設後長時間が経過しているの2004~2007年の変化は少ないと考えられる. これを考慮すると汀線変化はかなりよく一致しているといえる.

図-6(a), (b)には5号離岸堤が人工リーフ化される直前の2007年の海底地形を与えたときの2010年の等深線と水深変化量の平面分布を示す. 離岸堤の人工リーフ化に伴い開口部からの波浪侵入度が高まったために5号堤の背後で侵食が進んでいる. 図-6(c), (d)には等深線の

図-4 1968年地形の再現計算結果

図-5 2007年地形の再現計算結果

図-6 2010年地形の再現計算結果

拡大図と1968年基準での汀線変化を示す。汀線変化で見ると離岸堤が人工リーフ化された区域周辺で汀線が後退したことが分かる。

6. 養浜の効果検討

同定された海浜変形モデルを用いて養浜の効果検討を行った。養浜では、いずれのケースにおいても沿岸方向に $X=1.6\text{km} \sim 2.0\text{km}$ 区間の水深 $6 \sim 8\text{m}$ に土砂を投入した。まず10年間放置のケース1の地形変化量の分布を図-7(a)に、汀線変化を図-8に示す。放置では、5号離岸堤を人工リーフ化した部分でわずかながら侵食が進み、海岸の南端付近で堆積が起こるが、地形変化量および汀線変化量ともに小さい。航路浚渫土砂を $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ の割合で養浜したケース2では、養浜砂の粒径が細かいため投入砂は広く拡散し、同時に投入量も小さいため汀

線の前進もほとんど見られない(図-7(b), 8)。しかし河口浚渫土砂を同量投入したケース3では、粒径が相対的に大きくなったため離岸堤群の岸側での堆砂が著しく、10年間で最大20m汀線の前進を図ることができる(図-7(c), 8)。このように河口堆砂は航路浚渫土砂と比べると粒径が相対的に大きいため、明らかに養浜効果が出ている。航路浚渫土砂を $2.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ の割合で養浜したケース4では、養浜量が増加したにもかかわらず投入土砂は広く拡散し、汀線の前進を図ることはできない(図-7(d), 8)。一方、河口浚渫土砂を同量養浜したケース5では、ケース3に見られた離岸堤岸側での堆砂がいつそう強調されており、相対的に粗な粒径の河口部堆積土砂の養浜材として有効性が見とれる(図-7(e), 8)。さらに航路と河口浚渫土砂の両者の和を $5.7 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ で投入したケース6では、離岸堤の岸側での集中的な堆砂と、沖合での

図-7 2010年地形の再現計算結果

図-8 汀線変化量の比較 (ケース1～7)

緩やかな堆積が同時に起こる (図-7(f), 8). 汀線前進量はケース5の場合と同じであることから、汀線前進を図るには粒径が相対的に大きい河口浚渫土砂が有効であり、また沖合での緩やかな堆積を期待するのであれば航路浚渫土砂による養浜が有効である。最後に、備蓄基地の南側隣接部の堆積域から $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で砂を採取し、南部で養浜するケース7では、他のケースと異なり過剰に砂が堆積している部分では汀線が最大10m後退するが、南部の離岸堤背後では汀線を10～15m前進させることができる (図-7(g), 8).

7. まとめ

福井県浜住海岸を対象として、福井港の埋立地と鷹巣港の防波堤、さらには浜住海岸における15基の離岸堤建設に伴って生じた地形変化を、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて再現した。さらに同定されたモデルを用いて、福井港の航路浚渫土砂と河口浚渫土砂を用いたサンドバイパスの効果検討を行った。また埋立地南側隣接部の堆積土砂を用いたサンドリサイクルの効果検討も行った。この結果、浜住海岸の離岸堤背後の汀線前進のためには九頭竜川河口の浚渫土砂が有効なこと、一方、福井港の航路浚渫土砂は粒径が相対的に小さいため汀線前進には効果的でないが、離岸堤沖の海底地盤の底上げには役立つことが分かった。またサンドリサイクルも浜住海岸の前浜拡大に有効なことも明らかになった。

参考文献

- 宇多高明・山本 学・三波俊郎・古池 鋼・星上幸良・石川 仁憲 (2007) : 福井県浜住海岸の侵食実態と離岸堤群の漂砂制御効果, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 561-565.
- 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.