福井県水島の海浜変形の実態と地形変化予測

Beach Changes of Mizushima Island in Fukui Prefecture and their Prediction

宇多高明¹・野志保仁²・星上幸良³・辻岡雄樹⁴・西村隆吉⁴

Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI, Yukiyooshi HOSHIGAMI
Yu-uki TSUJIOKA and Takayoshi NISHIMURA

Mizushima island located in Tsuruga Bay is a famous recreational beach in Fukui Prefecture. This beach has been eroded in recent years. The topographic changes and tide level changes at Tsuruga Port were measured. On the basis of these field data, the contour-line-change model proposed by Noshi et al. was applied to the prediction of beach changes. It was concluded that beach changes closely relate to the wave action along with the increase in tide level during passage of low pressure in summer.

1. はじめに

わが国では各地で海岸侵食が進んできている。その直接的原因是波浪の作用にあるが、多くの場合人為的改変の影響がその引き金になっている（Uda, 2010）。とくに長い海岸線を有する砂浜海岸での侵食では、人為改変の影響を無視できない。著しい侵食をもたらす海浜変形の主な要因として、宇多（2004；2010）は、①河川流出土砂量の減少に伴い沿岸漂砂との均衡が失われて河口周辺海岸で侵食が進む場合、②卓越沿岸漂砂が防波堤など海岸線と直角方向に延ばされた構造物により阻止され、下手側海岸で侵食が進む場合、③防波堤が沖合に伸ばされて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誘起され、これによって周辺域が侵食される場合などに分類した。これらの要因によって海浜変形が起きた例は数多いが、島の周辺でも同種の海浜変形が生じることもある。福井県敦賀半島先端部に位置する水島がその例である。この島は半島先端部にある小島であり、上記侵食原因の分類に乗りにくい例である。水島は福井県有数の自然豊かな島の海水浴場として利用されてきており、1980年代以降その変形が大きな問題となった。宇多ら（2011）は、過去からの水島の変遷を空中写真の比較、深浅測量などにより調べるとともに、波浪・海浜流の計算を行いその変形の原因について考察し、海浜変形が突堤建設に起因することを突き止めた。本研究は前報に続くものであり、水島での海浜地形変化を実測するとともに、地形変化と密接に関連する低気圧通過時の潮

図-1 敦賀湾内における水島の位置

図-2 敦賀発電所における通年の方向別出現頻度と方向別平均風速（2006～2008年）

位の変動を調べ、これらをもとに野志ら（2008）の等深線変化モデルによる計算を行い、実測の海浜変形が低気圧襲来時の潮位上昇と深く関係することを明らかにする。

2. 水島の地形と風特性

水島は福井県の敦賀湾湾口部に位置し、若狭湾国定公園に含まれる面積約 $1.5 \times 10^4 \text{m}^2$ の小島である（図-1）。敦

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 正会員 博(工) (有)アイコムネット 環境コンサルティング部
3 正会員 博(工) 国際航業株式会社河川環境部
4 福井県土木部砂防海岸課

賀湾は東西の幅が7.1km、奥行きが11.8kmの細長い湾であり、湾口は北西方向に開いている。湾口には立石崎があり、海岸線は立石崎からほぼ南東方向に伸び、その先端の立石崎から約3.6kmに水島が位置する。立石崎から南東方向に伸びた半島はその南側には浦底地溝（浦底湾）を抱える。また半島のほぼ中央には礫堤で囲まれた猪ヶ池を擁する。半島の南東端は明神崎であり、水島との間には狭い開口部がある。地形的に見て冬季の風浪は湾口から南東方向へと侵入するため、立石崎からほぼ南東方向に伸びる海岸線に沿って南東方向への沿岸漂砂が発達する。水島は立石崎から伸びる岩石海岸から沿岸漂砂により運ばれた砂礫が堆積して形成されたと推定できる。地質的には花崗岩地域に位置する（福井県，2010）ため海岸線には固い岩が堆積している。

敦賀湾は南北に細長い形状であり、水島への来襲波は湾口（NW）からの冬季風浪と、SEまたはSSE方向の風により発達する湾内風波が卓越する。水島の北西約3.4 kmに位置する日本原子力発電（株）敦賀発電所構内で観測された2006～2008年の気象観測データによる、通年の方向別出現頻度と方向別平均風速を図-2に示す。風向の出現頻度はSEが16%で最も高く、NNWが13%でこれに次ぐ。方向別平均風速はSEおよびSSEがほぼ4m/sと他の方向より強風である。また季節別にはSEまたはSSE方向の風は5月から8月までほぼ似たパターンで出現することから、湾内風波は夏季の風により強く支配されることが分かる。

3. 水島の浦底湾側の海浜変形

2009年10月測量の水島周辺の深淺図を図-3に示す。図には明神崎と島A、B、Cの位置を示す。島Aの北東側沖約145mに破線で示すのは長さ210m、天端幅25mの人工リーフである。また明神崎と水島の開口部北側の-2m付近にも長さ90m、天端水深1m、天端幅10mの潜堤が設置されている。図-3より水島周辺の海底地形を調べると、浦底湾側の-1～-2mには砂で覆われた平坦面が広がるが、-5m以深は1/5勾配の急斜面で落ち込む。水島の浦底湾側には砂で覆われた平坦面があるのと対照的に、明神崎の同じ側では平坦面が発達せずに急斜面へと続く点には、明神崎と島A間の開口部からの侵入波浪が強い指向性を有し、開口部から南に向かうことを示唆する。

水島を横断する5測線（T1-T5）の縦断形を図-4に示す。測線T2に示すように水島の浦底湾側ではほぼ1/150勾配の平坦面が続いた後-3mから急に1/5勾配で落ち込む。また他の測線においても水島は氷山のように水面上にその質量のごく一部を有して発達していることが分かる。2009年10月と2010年3月のT2における縦断形変化を図-5に示す。この間、浦底湾側では $Z=-0.4\sim+1.4\text{m}$ の範囲で

図-3 水島周辺の深淺図（2009年10月測量）

図-4 水島を横断する5測線（T1-T5）の縦断形

図-5 2009年10月と2010年3月のT2における縦断形変化

図-6 2009年3月12日撮影の水島の斜め空中写真

図-7 2004年と2009年の水鳥の汀線形状

図-10 土砂バランス

図-8 区域a～cの汀線変化

図-9 区域dにおける汀線変化

地形変化が起きた。侵食断面積変化と汀線変化より、漂砂の移動高を算出すると約1mとなる。

図-6は、2009年3月12日撮影の水鳥の斜め空中写真を示す。撮影時海水透明度が高かったために浅海部の海底地形状況が良好に判読できる。水鳥の敦賀湾側の海底面は磯でありそこに海藻が密生しているため黒い。海藻に覆われた部分は南西端に伸びた突堤1を超えて砂嘴のように浦底湾側へと伸びている。白い部分が砂の堆積域で、敦賀湾側にあつては砂の堆積域は陸上に限られ、そのすぐ沖は転石で覆われている。

図-7には2004年と2009年の汀線形状を示す。突堤3の南端よりも南側では汀線変化がほとんどないことから、図中の区域a～dでの汀線変化を調べた。図-8は区域a～cの汀線変化を示す。これによると区域aでは汀線が後退する一方、区域cでは汀線が大きく前進しており、汀線

図-11 突堤4の天端を乗り越える砂の流出状況（2009年8月29日撮影）

変化から見ると北向きの沿岸漂砂が起きたことが分かる。また $R_1 \sim R_4$ で示す岩礁からわずかに北側にずれた場所では舌状砂州の発達が見られる。汀線の変化面積に漂砂の移動高（1m）を乗じ、経過時間で除して沿岸漂砂量を算定すると、区域aの北端を通過した漂砂量は $330\text{m}^3/\text{yr}$ 、区域bでは $334\text{m}^3/\text{yr}$ であった。対象区域北部に位置する区域cの北端は漂砂の自由境界であり漂砂流出の可能性はある。一方、図-7に示すように区域cと敦賀湾側の区域dは背中合わせの関係にあって、その間は天端高がT.P.+0.5mの突堤4で区切られているのみである。よって突堤4を横切って浦底湾側から敦賀湾側へと砂が流出した可能性もある。この段階ではいずれとも特定できないが、区域cから $116\text{m}^3/\text{yr}$ の割合で漂砂が流出したことは間違いない。

上記漂砂の原因を特定するために、図-9には突堤4の敦賀湾側に設定された区域dにおける汀線変化を示す。これによると区域dでは区域cでの土砂損失量とほぼバランスする $120\text{m}^3/\text{yr}$ の割合で堆砂が起きていることが分かった。すなわち区域cへと運ばれたほとんど全量の砂が突堤4の天端を乗り越えて区域dへと流出したと推察できる（図-10）。このように突堤4の天端を乗り越えて砂が流出している状況は現地でも観測された（図-11）。

図-12 低気圧の来襲した2010年5月25日における敦賀港の潮位変化

4. 敦賀湾の湧水振動

図-5によれば、海浜変形は標高+1.4mまでの範囲で生じている。しかし浦底湾側に作用する平均波高は0.2m、高波浪でも0.5mであって、波浪条件と実際の地形変化範囲は対応しない。そこで低気圧来襲時の潮位について解析した。図-12は低気圧の来襲した2010年5月25日の潮位変化を示す。これによると天文潮位から0.3mの水位上昇が見られる。またMEMおよびFFT法によるスペクトル解析によれば、約1時間周期での副振動が起きていた。このことから、突堤4の天端を乗り越える砂の流出が起こった原因は、低気圧の来襲による高波浪および水位上昇によるものと推察される。すなわち浦底湾側の海浜においては、通常卓越するSSE方向からの風波の作用と、年数%確率で来襲する低気圧による急激な水位上昇とそれに伴う高波浪の作用により変形が起きたと考えられる。

5. 急激な水位上昇を伴う場合の地形変化予測

潮位上昇の影響を考慮するために図-13に示すように平常時と低気圧来襲時の2種類の波による地形変化範囲を設定するとともに、水位に合わせて漂砂量の水深方向分布関数を変えた。計算で使用する波については、磯部(1986)の放物型モデルから得られた波向を区域a~cのそれぞれの範囲において平均化するとともに、遮蔽を考慮するために区域a~cそれぞれでの平均波向を入力値として酒井ら(2002)の方向分散法によって波高・波向を算出し、重み付け平均を行った波を使用した(図-14)。図-15は2004年の実測地形を示す。計算ではこれを初期地形とした。図の破線で囲む区域の拡大図が図-16である。計算では現地状況に合わせるために、低気圧来襲時に潮位が上昇した場合、波の作用期間に対応させて116m³/yrの割合でc区間から砂を吸い込む条件を設定した。さらに、岩礁R₁~R₄の透過率は現況再現においても

図-13 平常時と低気圧来襲時の地形変化範囲

図-14 方向分散法によって求めた波浪場

図-15 2004年の実測地形

図-16 図-15の矩形域の拡大図

図-17 2009年の再現計算結果

図-18 実測と計算の汀線変化

地形変化の一致度が最も高い値を使用し、透過率をそれぞれ0.9とした。底質粒径は現地砂の粒径0.3mmを、また、平衡勾配については現地の前浜勾配1/10をそのまま用いた。その他の計算条件を表-1に示す。

図-17は2009年の地形の再現計算の結果を示す。突堤3の前面に堆積していた砂が突堤4方向に移動するという現象の再現ができています。図-18は実測と計算の汀線変化を示す。岩礁による波の遮蔽効果によりトンボロ形状が残されつつ、汀線変化が起こる現象がうまく再現できている。また、トンボロの形成位置および汀線変化量のオーダーも一致している。このようにして急激な水位上昇を伴う場合の海浜変形予測が可能となった。

6. まとめ

敦賀湾北部に位置する水島では近年変形が続いてきたが、水島での海浜形状の実測データや低気圧通過時の潮位の変動を調べ、これらをもとに野志ら（2008）の等深線変化モデルによる計算を行ったところ、実測の海浜変形が低気圧通過時の水位上昇を伴う波浪条件に主に起因することが明らかになった。

表-1 計算条件

数値計算法	粒度組成と個々の粒径に対応した複合平衡勾配を考慮した海浜地形・粒径変化予測モデル(野志ら,2008) 放物型モデル(磯辺,1986) 方向分散法(酒井ら,2003)
計算対象	突堤3南端～突堤4北端の浦底湾側(X=250～657 m)
計算ケース	現況再現
初期地形	2004年の実測地形
底質粒径	0.3 mm
平衡勾配	1/10
入射波条件	常時波浪 $H_1=0.2$ m, 低気圧来襲時波浪 $H_1=0.5$ m, 碎波角 α_0 磯辺(1986)および酒井ら(2002)の結果を用いて重み付け平均を行った波向を使用(図-14)
水位条件	常時波浪 T. P. +0.2 m (M. W. L.) 低気圧来襲時波浪 T. P. +0.5 m
地形変化範囲	常時波浪:バーム高 $h_b=+0.4$ m, 波による地形変化の限界水深 $h_c=-0.4$ m, 低気圧来襲時波浪: $h_b=+1.2$ m, $h_c=-0.4$ m
境界条件	左右端を固定境界, 低気圧来襲時 X=550 mにおいて116 m ³ /yrの吸い込み
漂砂量係数	漂砂量係数 $A=0.03$ 小笹・ブランプトン項の係数 $\zeta=0.7$ 岸沖漂砂量係数 $K_d/K_s=0.1$
漂砂量の水深分布	一様分布
土砂落ち込みの限界勾配	陸上:1/2, 水中:1/3
計算範囲	X=250～675 m, Z=1.5～-1 m
計算メッシュ	$\Delta X=1$ m, $\Delta Z=0.1$ m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=1$ h
計算ステップ数	1年間:8,760ステップ
数値計算法	陽解法による差分法

参考文献

- 磯辺雅彦（1986）：放物型方程式を用いた不規則波の回折・屈折・碎波変形の計算法：海岸工学講演会論文集，第33巻，pp.134-138。
 宇多高明（2004）：海岸侵食の実態と解決策，山海堂，p. 304。
 宇多高明・辻岡雄樹・西村隆吉・西岡陽一・星上良幸・小澤弘樹・野志保仁（2011）：福井県水島における防波堤の建設に伴う海浜変形，地形，第32巻，pp.29-48。
 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。
 野志保仁・小林昭男・宇多高明（2008）：粒度組成と個々の粒径に対応した複合平衡勾配を考慮した海浜地形・粒径変化予測モデル，地形，第29巻，第4号，pp.399-419。
 福井県地質図2010年度版（2010）：財団法人福井県建設技術公社，電子版CD。
 Uda, T. (2010): Japan's Beach Erosion - Reality and Future Measures, World Scientific, p. 418.