霞ヶ浦浮島地区における湖浜安定化方策

Formation of Stable Beach at Ukishima Region in Lake Kasumigaura

宇多高明¹・望月美知秋²・鴨川 慎³・芹沢真澄⁴・三波俊郎⁵・渡辺宗介⁵・宮原志帆⁵

Takaaki UDA, Michiaki MOCHIZUKI, Makoto KAMOGAWA, Masumi SERIZAWA
Toshiro SAN-NAMI, Shusuke WATANABE and Shiho MIYAHARA

In the Ukishima region in Lake Kasumigaura, beach nourishment has been carried out to recover a sandy beach along with the construction of groins. After the beach nourishment a part of nourishment sand was transported away from the beach over the downcoast groin owing to oblique wave incidence in winter. To enhance the stability of the beach, the groins were extended and a spur dike was constructed. For the design of these structures, the numerical simulation using BG model was carried out, and the optimum shapes were determined under the seasonally-changing wave direction.

1. はじめに

霞ヶ浦(西浦)南東部に位置する浮島地区では、過去に西浦各地に存在した砂浜を復元する計画の一環として、安定な湖浜づくりの検討が行われてきた(宇多ら, 2007)。2007年には、実際に4基の突堤が施工され、西端の4号突堤とその東に隣接する3号突堤間において浚渫土砂を用いた養浜の試験施工が行われた。試験区間の湖浜は夏季には安定していたが、冬季の低気圧通過時WNW方向からの強い風浪の作用を受けて著しい地形変化が生じ、4号突堤の東側隣接部において汀線が大きく後退するとともに、堤防への覆土の一部が侵食された。堤防自体はコンクリート護岸で防護されているので心配はなかったものの、護岸の露出は想定外の変化であった。このことから、まず養浜後の地形変化を分析し、その結果をもとに芹沢ら(2006)のBGモデルを用いて再度の被災を免れる安定した湖浜づくりについて検討した。BGモデルについては、すでに霞ヶ浦の沖洲地区における湖浜づくりに適用されその有効性が確認されている(宇多ら, 2008)が、本報では沖洲地区と異なり、波向が著しい季節変動を示す浮島地区を対象として、湖浜変形の実態を明らかにした上で、モデルによる現況再現計算、および最終対策案の検討結果について述べる。

2. 空中写真と深淺データの解析

(1) 空中写真の判読と汀線変化

3, 4号突堤間における2007年6月14日から2008年3月27日までの湖浜状況の変化を図-1に示す。西側が4号, 東側が3号突堤であり, 両者の間は200m離れている。なおこれらの空中写真は, 斜め写真を幾何補正して垂直写真としたものである。

図-1 霞ヶ浦浮島地区の3, 4号突堤間における湖浜状況の変化

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		国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所長
3		国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所調査課長
4 正会員		海岸研究室(有)
5		海岸研究室(有)

図-2 2007年6月14日から3月27日までの汀線変化

施工直後（2007年6月14日）では，3，4号突堤間の汀線は堤防法線とほぼ平行に伸びていた．9月25日では夏季の東寄りの入射波の作用により西向きの沿岸漂砂が生じた結果，西端の4号突堤の背後に砂が堆積した．10月25日では4号突堤背後の舌状砂州の発達が続くとともに，東側の3号隣接部の汀線が前進している．このように10月25日までは比較的汀線変化が小さいまま推移したが，2008年2月29日では4号突堤の東側では汀線が大きく後退してフック状の汀線となり，同時に3号突堤の肩まで汀線が前進した．このように冬季には大きく西側に傾いた方向から波が作用した結果著しい湖浜変形が生じた．しかし3月27日には3号突堤の隣接部の汀線が再び後退したことから明らかのように西向きの漂砂が生じ，砂が逆流している．

図-2は2007年6月14日から2008年3月27日までの汀線変化を示す．ここに汀線は霞ヶ浦の平均水位Y.P.+1.1mと湖浜とが交差する線と定義する．6月14日には汀線が湖岸線とほぼ平行に伸びていたが，10月25日には突堤間が薄く削り取られて汀線が後退すると同時に，4号突堤の背後で舌状砂州が発達しトンボロが形成された．このような汀線変化は，夏季に東側からの波が入射したため西向きの沿岸漂砂が起きたことによる．しかし11月13日には4号突堤背後の舌状砂州は消失し，3号突堤の上手側の一部区間でのみ堆積が起り，突堤間の大部分の汀線は当初より後退している．このことは，11月13日までに沿岸漂砂だけではなく，沖方向への砂移動もあったことを示唆する．その後2008年2月15日までは4号突堤の東側区域で著しい汀線の後退が起き，3号突堤の西側隣接域では前進している．6月14日の汀線形状と比較すると汀線の伸びる方向が 18° 左回りに回転したことが分かる．さらに2月29日までこの傾向が続き，前浜の消失区間が広がったが，3月27日には逆モードの汀線変化が起り前浜の消失区間が狭まった．

(2) 縦断面変化

図-2に示す測線配置で行った縦断測量データの分析結果を図-3に示す．突堤間において著しい汀線後退が生じた測線No.4では，11月13日までは汀線からY.P.-0.2mまでの1/14の勾配で安定していたが，高波浪作用後の2月15日

図-3 測線No.4, No.6, No.7に沿う縦断面変化

は汀線が護岸のり先まで後退して高さ約1mの浜崖が形成され，陸域との境は鉛直面で落ち込んだ後，水面下では1/35と緩勾配の湖底面が形成された．この場合，Y.P.+0.4mを境としてそれ以深では堆積が生じており，砂が緩勾配を保って堆積していることから，養浜土砂のうち細粒分が流出したと考えられる．一方，汀線変化の不動点付近に位置するNo.6では，前浜付近においてバーム位置が変化する以外とくに大きな地形変化は見られなかったが，Y.P.+0.4m以深では土砂の堆積が進み，沖合にあった窪地が砂で埋った．また養浜当初より，汀線からY.P.-0.2mまでの勾配は1/14で安定している．3号突堤に隣接するNo.7では著しい堆積が生じ，11月13日までにあったY.P.+0.6～0.8mの緩斜面が砂で埋められ汀線が約15m前進した．この場合バーム高はY.P.+1.6mで，汀線から沖合のY.P.-0.2m付近まで1/14の勾配で砂が堆積している．測線No.7の縦断面図には3号突堤の先端位置（Y=-52m）も記入しているが，沖合における砂の堆積はほぼY.P.-0.4m（Y=-70m）付近まで生じ，突堤の先端を超えている．これより左回りに大きな角度で波が入射した結果，一部の砂が突堤の先端を回り込んで東側へと移動したことが分かる．

(3) 湖浜断面積の変化

7測線における縦断面変化から，2007年6月11日基準での2008年2月15日の断面積変化量を求め，その沿岸分布を図-4に示す．断面積の算出範囲は，鉛直方向についてはY.P.+0.4mを境に分割し，沖側については有意な地形変

図-4 断面積変化量の沿岸分布

化が見られなくなる場所までとした。Y.P.+0.4m以浅での断面積変化では、4号突堤近傍を除けば沿岸方向距離150mよりも西側では侵食、東側では堆積となっている。この変化は同期間の汀線変化とほぼ相似であり、主に沿岸漂砂による東向きの移動に起因する。これに対し、Y.P.+0.4m以深の断面積変化では、ほぼ一様な堆積が生じている。その堆砂量は4号突堤による波の遮蔽が効かない測線No.4よりも東側で相対的に大きい、堆積量が沿岸方向にほぼ一様である点は、このような土砂移動が、養浜土砂に含まれた細粒分が分級を受けて沖向きに移動したものであることを示している。

3. 浮島地区における外力特性

霞ヶ浦の浮島水位観測所における2007年1月から2008年5月における水位を図-5 (a) に示す。夏季の洪水時には一時的にY.P.+1.5mと水位の急激な増加が起きている。主なピーク水位は3回見られる。最初は2007年7月14日襲来の台風4号に伴う降雨、2回目は9月6日襲来の台風9号時の降雨、そして3回目は10月27日の台風20号の降雨に起因する。これらを除けば年間の水位変動は、夏季は管理水位のY.P.+1.1m付近にあるが、2007年12月から水位が上昇し、冬季は管理水位であるY.P.+1.3mに近づく。

湖心で観測された2007年1月1日から2008年4月22日までの風向風速データをもとに、浮島地区における方向別のフェッチを与えてSMB法を用いて推算した浮島地区での1時間ごとの有義波高を図-5 (b) に示す。夏季は相対的に静穏なのに対し、冬季には波高が高いという1年の季節変動がある。前述の湖水水位が夏季と比較して冬季のほうが約0.2m高いことと相まって著しい湖浜変形が生じるのは冬季であることが明らかである。

湖心観測所において1時間間隔で行われている風向観測データを用い、浮島地区にとってフェッチを持たない方向の風向は除き、ある時刻を挟んで前後24時間（1日）の移動平均として平均的な波向を求めた。この結果求められた2007年1月から2008年4月22日までの波向を図-5 (c) に示す。

図-5 湖心と浮島水位観測所における2007年1月から2008年5月における水位、有義波高および波向の経時変化

す。データが不連続な箇所は無風条件に対応する。平均変動（図の破線）に注目すると、夏季にはNE、冬季にはNWを中心として1年周期の規則正しい変動が生じている。また養浜後の2007年5月10日から2008年4月22日のエネルギー平均波向はN5°Wであり、これを中心に周期的変動が起きている。波向の極値としては夏季にENE (N67.5°E)、冬季にはWNW (N67.5°W)と、平均波向N5°Wより大きく傾いた方向からの波が入射している。ただし個々の変動の継続期間は1日程度と短く、大きく傾いた方向からの波は作用時間が短い。2007年3月から2008年4月のデータより算出したエネルギー平均波の一覧を表-1に示す。季節的なエネルギー平均としては夏季がN34°E、冬季がN32°Wである。

表-1 2007年5月から2008年4月のデータより算出したエネルギー平均波

期間		波高 (m)	周期 (s)	波向
養浜後全期間	2007/5/10-2008/4/22	0.25	1.5	N5°W
再現計算期間	2008/11/13-2008/2/29	0.29	1.6	N29°W
2007年春季	2007/3/1-2007/5/31	0.24	1.6	N5°W
2007年夏季	2007/6/1-2007/8/31	0.18	1.3	N34°E
2007年秋季	2007/9/1-2007/11/30	0.24	1.6	N6°E
2007年冬季	2007/12/1-2008/2/29	0.29	1.6	N32°W

4. 湖浜安定性の検討

(1) モデル構築（再現計算）

BGモデルを用いて再現計算を行った。計算領域は4号突堤および3号突堤周辺の沿岸方向に500m、岸沖方向に300mの矩形領域である。初期地形には図-6 (a) に示すように養浜前の湖岸地形を固定床で与え、そこに実際の養浜と同様、幅25mの矩形地形を移動床で与えた。表-2には主な計算条件をまとめて示す。養浜砂の粒径は $d_{50} = 0.6\text{mm}$ とし、平衡勾配はモニタリング調査の結果に基づいて1/14とした。入射波は表-1に示した再現期間のエネルギー平均波を与え、不規則波の場合は方向分散法を用いて求め、突堤による波の遮蔽効果を考慮した。この場合 $S_{\max}$ は10とした。水位は冬季の平均水位Y.P.+1.3mとした。また養浜の天端高はY.P.+1.6mとした（平均水面上0.3m）。そのほかの係数は表-2に示す。

図-6 (b) は初期地形に対しN29°W方向からの波浪を作用させて予測した2008年2月29日の実測地形の再現結果を示す。N29°W方向からの波は湖岸線に対して大きく

表-2 計算条件（現況再現計算）

計算モデル	BGモデル（芹沢ら, 2006） 回折計算：方向分散法
計算対象区域	浮島 4号突堤～3号突堤周辺 沿岸方向 500m×岸沖方向 300m
再現目標	2007年11月13日～2008年2月29日の地形変化
初期地形	2002年3月の深浅図＋養浜地形
入射波条件	エネルギー平均波（表-1参照） 波高 0.29m, 周期 1.6s, 波向 N29°W 方向集中度 $S_{\max}=10$
作用時間	108 days
水位	冬季管理水位 Y.P.+1.3m
メッシュ間隔	$\Delta X=\Delta Y=2\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=0.1\text{hr}$
粒径・平衡勾配	粒径 $d_{50}=0.6\text{mm}$ 平衡勾配 $\tan\beta=1/14=0.071$
安息勾配	1/2
漂砂の水深方向分布	宇多・河野の分布
波による地形変化の限界水深	$h_c=1.5\text{m}$ （Y.P.-0.2m）
バーム高	$h_R=0.5\text{m}$ （Y.P.+1.8m）
漂砂量係数	$K_1=0.2$, $K_2=1.62K_1$ ($\tan\beta=1/14$) 重力係数: 0.2 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	地盤高下限：養浜前の地形を固定床。 地盤高上限：1,000 m 左右端： $q=0$ （漂砂の流入出なし） 岸沖端： $q=0$ （漂砂の流入出なし）
養浜条件	養浜天端高 Y.P.+1.6 m 養浜量 6,000 m ³ /yr
構造物条件	構造物の波高伝達率 $K_t=0.0$

左側に傾いた方向からの入射となるため、東向きの沿岸漂砂が発生し、3号突堤側に砂が運ばれ、砂の一部は突堤の先端を回り込んで2、3号突堤間へと流れ込んだ。この状況は図-1の空中写真とよく一致している。3号突堤の先端を回り込んだ砂は突堤先端部から岸向きに移動し、2、3号突堤間に約700m³堆積した。BGモデルではこのような砂嘴状の砂の堆積を起こしつつ下手側へと砂が運ばれる現象の再現が可能である。図-6 (c) は汀線変化の比較であるが、実測と予測値はよい一致を示している。以上の結果より、N29°Wという斜めに大きく傾いた方向からの波が入射する条件では、3号突堤の長さが短いことが分かった。これより、同じ細砂を用いる場合、3号突堤の先端部に砂の流出を防止するspur dikeを設置する必要があることが明らかになった。

(2) 予測計算（対策案）

再現性が確認されたBGモデルを用い、3号突堤において波の入射方向に長さ57mのspur dikeを建設する案を考え、その効果を予測した。その際、4号突堤の東側隣接区間は冬季風浪の作用時汀線が大きく後退することが再現計算結果から明らかになっているので、護岸の露出を防ぐために幅100m、長さ100mにわたって波で移動することがない礫層を敷く案を考えた。入射波は湖心で観測された1978年～2004年の風向風速データより推算したエネル

図-6 再現計算結果

表-3 計算条件 (将来予測計算)

計算ケース	3号突堤 spur dike 57m延伸+礫層100m
入射波条件	冬季エネルギー平均波* 波高 0.25m, 周期 2.0s, 波向 N29°W 夏季エネルギー平均波* 波高 0.17m, 周期 1.3s, 波向 N12°W *1978年~2004年観測データより推算
作用時間	3ヶ月後 (安定形)
養浜条件	養浜天端高 Y.P.+1.8m, 養浜量 14,000m ³

ギー平均波とした。再現計算と異なる計算条件を表-3に示す。

図-7 (a) は対策検討における初期地形を示す。水位条件を冬季管理水位のY.P.+1.3mとして冬季エネルギー平均波浪 (波高 $H=0.25$ m, 周期 $T=2.0$ s) をN29°Wの方向から3ヶ月間作用させ、湖浜形状が安定状態に達した段階での計算結果を図-7 (b) に示す。西側に大きく傾いたN29°Wの方向から波が入射したため東向きの沿岸漂砂が起き、4号突堤の東側では汀線が大きく後退する一方、延伸された3号突堤の先端部まで等深線が前進している。この湖浜変形ではspur dikeの設置により、東側への砂の流出は防止できている。また4号突堤の東側隣接部で汀線が大きく後退した結果、礫層が沿岸方向に20mの区域で露出しているが、波の作用で移動しにくい粒径の大きな礫を用いれば、礫は一部東側に汀線に沿って移動するとしてもほぼ初期形状は保たれることになる。

この状態で夏季エネルギー平均波 (波高 $H=0.17$ m, 周期 $T=1.3$ s) がN12°Wの方向から作用すると、図-7 (c) に示すように沿岸漂砂の方向が東向きから西向きに変わるために3号突堤に沿って大きく前進していた等深線が後退し、西側の4号突堤側へと移動する。全体として等深線の延びる方向が時計回りに回転 (rotation) し、4号突堤の東側隣接部において冬季エネルギー平均波の作用後狭かった前浜が広がる。この結果、冬季風浪によって一時期露出していた礫層は再び砂に埋まる。同じ期間での汀線変化を示すのが図-7 (d) である。一部の砂は4号突堤を超えて西側に運ばれたものの、3、4号突堤間では波向の季節変動によってシーソーのような汀線変化が起こることが分かる。細砂分の岸沖分級を除けば、海浜はほぼ動的安定状態に達すると考えられる。

5. まとめ

浮島地区の3、4号突堤間では養浜後、波向変動に併せたシーソーモードの汀線変化が観察され、西側の4号突堤の東側隣接部では著しい汀線後退が起きた。本研究ではその実態を明らかにした上で、BGモデルを用いて冬季エネルギー平均波をN29°Wの方向から、夏季エネルギー平均波をN12°Wの方向から入射させた場合の湖浜変形を調

図-7 将来予測計算結果

べ、著しい波向変動条件下では下手側の3号突堤の長さが不足すること、またその対策として3号突堤にspur dikeを設置すればよいことを明らかにした。これらの工夫を行ったとしても、養浜材に細粒分が含まれる浚渫土砂を用いていることから、細粒分の沖への損失は継続的に起こると推定される。これがいかなる状態で安定するかを明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

- 宇多高明・木暮陽一・平野一彦・大内香織・三波俊郎・熊田貴之 (2007): 霞ヶ浦浮島地区における湖浜再生に関する検討, 水工学論文集, 第51巻, pp.1325-1330.
- 宇多高明・木暮陽一・銭谷秀徳・芹沢真澄・渡辺宗介・石川仁憲 (2008): BGモデルによる養浜時3次元湖浜変形予測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.741-745.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼 (2006): Bagnold概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.