指宿港海岸における再養浜後の 養浜砂流出防止工の効果

土屋 洋¹・津田 宗男²・児島 和之³・小島 治幸⁴

¹正会員 若築建設株式会社 技術研究所 (〒299-0268 千葉県袖ヶ浦市南袖31番地)

E-mail:hiroshi.tsuchiya@wakachiku.co.jp

²正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町一丁目3)

E-mail:m_tsuda@toa-const.co.jp

³正会員 水工技研株式会社 (〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東二丁目6-28 (203))

E-mail:kojima@suikougiken.co.jp

⁴正会員 九州共立大学 総合研究所 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘一丁目8)

E-mail:kojima@kyukyo-u.ac.jp

砂蒸し温泉で親しまれる指宿港海岸の砂浜は、環境、観光資源として、また防災面においても重要な役割を担うが、近年の海岸侵食によりその機能喪失が危ぶまれている。これを受け、指宿港海岸では、養浜工に加えて補助突堤と歪み砂れんマット(DRIM)による漂砂制御を用いた面的な防護工法が適用された。養浜は2009年と2011年に行われ、毎年平面地形モニタリングが行われてきた。本研究は、2010年から2015年までのデータを用いて、南部湯ノ浜地区海岸の変形状況および養浜砂流出防止工の効果を明らかにすることを目的とした。地形変化量と地形データのトレンド計算および経験的固有関数法を用いた海浜変形の評価を行ったところ、養浜砂流出防止工が有効に機能していることが確認された。

Key Words : beach nourishment, distorted ripple mat(DRIM), field surveys, empirical eigenfunction

1. はじめに

古くから砂蒸し温泉で親しまれてきた指宿港海岸に広がる砂浜は、背後に多数のホテル、民家を抱えており、環境、観光資源としてのみならず防災面においても重要な役割を担っている。一方、近年の海岸侵食によりその機能喪失が危ぶまれており、離岸堤、突堤、護岸、養浜を用いた面的防護工法を用いてその機能を保持している。

最近では、2009年、2011年の2度にわたり養浜工が施工された。2009年の養浜直前には、護岸の嵩上げに加えて養浜北端部に補助突堤が整備され、法尻付近には歪み砂れんマット^{1,2,3)} (Distorted Ripple Mat, 以下DRIM) を用いた養浜砂の岸沖方向流出防止工が施工された。養浜砂流出防止工の効果については、2009年養浜直後から1年間の外力を含めた詳細なモニタリングの成果を津田ら⁴⁾ が詳細に整理している。その後も養浜領域とその周辺では毎年地形測量が行われており、貴重なデータが蓄積されてきた。

本研究は、2010年から2015年までの地形モニタリング成果を用いて、指宿港海岸の変形状況および養浜砂流出防止工の効果を明らかにすることを目的とした。

2. 養浜砂流出防止工とモニタリング調査の概要

(1) 指宿港海岸の概要

指宿海岸は、図-1に示すように薩摩半島の鹿児島湾の湾口部西側に位置し、北の田良浜から南の大山崎までの延長約6kmの砂浜海岸である。ほぼ中央に指宿港が築造されており、その南側が「指宿港海岸」と称されている。さらに、指宿港の南側は湯の浜地区とも呼ばれ、砂浜から温泉が湧出する砂蒸し温泉を形成している。

図-1 指宿港海岸の位置

(2) 養浜砂流出防止工とその要素技術の役割

指宿港海岸の海浜変形を支配する波は、主に台風由来の南方系高波浪および冬季季節風による北方系波浪および志布志湾からの吹き込み風による風波²⁾で、沿岸漂砂の卓越方向は南方系の高波浪による北向きである¹⁾。また、在来の砂浜は、平均的な粒径が0.7～1mm程度の砂で形成されていた¹⁾。

養浜砂流出防止工は、図-2に示すように沿岸漂砂による養浜砂の流出対策としての補助突堤および岸沖漂砂による養浜砂の流出対策としてのDRIM群から構成されている。DRIMは図-3のような砂れんを模した漂砂制御構造物であり、波の力で生じる低層の往復流を利用して、低層の高濃度浮遊砂を制御し、任意方向に直接砂の移動を制御することができる^{3,4,5)}。指宿港海岸では、波長1.2mのDRIMブロックを組み合わせた岸沖方向15m×沿岸方向20mのユニットが沖浜～外浜に該当する位置に6基設置された¹⁾。本稿では、これらを区別するため、北端から南側に向かって順番にDRIM1～DRIM6と呼称する。

突堤は沿岸漂砂卓越方向下手側(養浜領域北側)に設置されている。北向きの沿岸漂砂を捕捉し、飽和した時点である程度の浜幅を確保することを目的としている。

DRIMは天端高が50cm程度で、高波浪時はある程度の砂の沖側流出を許しつつも岸向きに漂砂を制御し、静穏時に砂が戻る際にその動きを補助することで、過剰な流出を抑制する。養浜工は、図-2に示す延長およそ400mの範囲で施工された。2009年の構造物整備時には養浜領域の岸側に養浜砂が投入され、汀線が12m沖出しされた。このとき、前浜付近には中央粒径0.3mmの細砂が投入された¹⁾。また、2011年12月の再養浜時には養浜領域の沖側で9500m³が追加投入され、このときは、中央粒径0.7mm程度の浚渫土砂が用いらた。

(3) モニタリング調査

養浜砂流出防止工施工後は、平面的な深浅測量および前浜～後浜にかけての陸上測量を含む地形モニタリングが2015年まで毎年実施されている。測量範囲は、図-2に示す北側T型突堤付近より南側大山崎付近までの沿岸方向600m、岸沖方向400m程度である。本研究で対象とする調査実施時期は図-4に示すとおりである。また、2010年、2014年の測量時には、潜水土による生物付着状況およびDRIMの移動や周辺の洗掘などの変状に関する調査が実施されている。

3. 地形変化量と土量変化量

(1) 全調査期間の海浜変形

地形変化量と土量変化量から、全調査期間全体を通じた海浜変形の特徴を調べた。

図-2 指宿港海岸の構造物配置

図-3 DRIMの漂砂制御機能概念と設置イメージ

図-4 モニタリング調査時期

図-5 地形変化量(2010～2015)

図-5は2010～2015年までの地形変化量である。コンターの実線は堆積、破線は侵食を示している。特徴的なのは、図中黒破線内のDRIM岸側を中心とした領域と、補助突堤周辺の堆積領域である。前者は、養浜範囲とほぼ一致

しており、DRIMが養浜砂の沖側流出を抑制した結果を示していると考えられる。後者は、補助突堤が北向きの沿岸漂砂を捕捉した結果を示すものであるが、図中青破線内に示すように、北側のT型突堤付近まで堆積領域が延びており、2015年時点までに沿岸漂砂捕捉機能が飽和していたものと思われる。

土砂移動量を定量的に把握するため、図-6に示す領域の土量を算定した。背景のコンターは、2015年9月に測量されたものである。計算は、図中の「北部」「DRIM設置領域」「南部」と大きく3分割した領域と、そのうち「DRIM設置領域」を岸沖方向、沿岸方向に各3分割(計9分割)した小領域に対して行った。「DRIM設置領域」内の小領域は、図に示すように沿岸方向に「DRIM1～2」「DRIM3～4」「DRIM5～6」、岸沖方向に「後浜～前浜」「前浜～外浜」「外浜～沖浜」と呼称する。

図-6 土量変化計算領域

図-7に「DRIM設置領域」内の各小領域における土量変化量を示す。DRIM岸側にあたる「前浜～外浜」領域においては堆積が見られ、その総量はおよそ7200m³であった。一方、「後浜～前浜」領域については「DRIM3～4」において土量が減少している。図-5の地形変化量からもDRIM3からDRIM6岸側の護岸際、後浜～前浜にあたる範囲に広い侵食が読み取れ、2015年測量時の現地踏査においてもこの範囲の浜幅が大きく後退していることが確認されている。

次に、領域を沿岸方向に区切って土量変化を算定した結果を図-8に示す。図中「北部」に示す土量は、補助突堤以北の養浜工程施工範囲外に流出した土量と考えること

図-7 DRIM設置領域の土量変化量(2010～2015)

ができる。その土量はおよそ3100m³であった。「DRIM設置領域」に保持された土量と併せて考えると、2011年の養浜量とほぼ一致している。この結果から、養浜砂は主に沿岸方向(北向き)に流出したと思われる。

図-8 調査範囲全域の土量変化量(2010～2015)

(2) 再養浜後の海浜変形

再養浜後の海浜変形を抽出するために、2012年の地形を起点とした検討を加える。図-9は再養浜後の2012年から2015年の地形変化量の平面分布を示している。DRIM岸側の黒破線内では、DRIM2～3の開口部、DRIM6の岸側付近に若干の局所的侵食領域が認められるものの、おおむね堆積傾向にある。2012年は再養浜後1年弱であり、養浜断面の初期変形がある程度進行した後と考えられることから、この堆積領域は、DRIMが養浜砂の沖側流出を一定量抑えた結果を含むと考えられる。

図-9 地形変化量(2012～2015)

次に、図-6の領域においてこの期間の土量変化を算定した。図-10に「DRIM領域内」を9分割した小領域における土量変化量を示す。「前浜～沖浜」では堆積傾向を示す一方、「後浜～前浜」での侵食が目立つ。

図-10 DRIM設置領域の土量変化量(2012～2015)

図-11に全領域を沿岸方向に3分割した場合の土量変化を示す。北部への流出量が4000m³を上回っており、当初の養浜の2010年を起点として算定した量よりも多い。これは、2010年から2012年までに南方向の沿岸漂砂が卓越した期間があった可能性を示している。

図-11 調査範囲全域の土量変化量(2012～2015)

図-12に養浜前の2011年、養浜後の2012年および2015年の「DRIM設置領域」内の平均断面を示す。2015年までに後浜～前浜付近は侵食しているものの、DRIM岸側の前浜～外浜の断面は維持されていることがわかる。前浜付近の侵食要因として、測量時期がほぼ台風シーズン直後であり、侵食型断面であったことが予想される。小野ら^{6,7)}は、沖浜帯に設置したDRIMにより高波浪時の沿岸砂州の大規模化を促進することで、沖側への砂の流失を抑えつつ静穏時に前浜に供給される砂を確保し、海浜断面の動的平衡状態の維持に寄与できることを示している。指宿港海岸においてもDRIM岸側に相当量の養浜砂が残っており、同様の現象が期待できるものと考えられる。

図-12 「DRIM設置領域」内の平均断面(2012, 2015)

(3) DRIM埋没後の地形変化

2014年に実施された潜水目視調査では、南北端のDRIM1, DRIM6端部の一部以外はほぼ埋没していたことが確認されている。すなわち、2014年末以後DRIMは埋没し、ほぼ効果を失った状態であったと考えられる。そこで、2014年～2015年までに絞った考察を加えた。

図-13に2014年12月～2015年9月までの地形変化量を示す。DRIM岸側近傍の堆積傾向が弱まり、DRIM設置領域外(図-6「北部」「南部」)にあたる領域にも広く堆積が見られる。特に、DRIM設置領域北側(図-6「北部」)の外浜～沖浜における堆積領域の広がり、この期間に限ったもので、それ以前のデータを含めた地形変

化には見られなかったものである。

図-14に2013年～2014年、図-15に2014年～2015年の図-6中の「DRIM設置領域」の小領域におけるそれぞれの土量変化量を示す。この結果より、2014年を境に外浜より岸側の堆積傾向が侵食傾向に転じていることがわかる。これがDRIM埋没の影響によるものと仮定するならば、逆説的にDRIMの漂砂制御効果を示す結果とも言える。一方、DRIMが埋没したことは海底面が上昇したことと同義であり、今後DRIMが露出した場合は、再び埋没するまで漂砂制御効果を発揮し続けることが期待される。

図-13 地形変化量(2014～2015)

図-14 DRIM設置領域の土量変化(2013～2014)

図-15 DRIM設置領域の土量変化(2014～2015)

4. 地形変化傾向の解析

(1) 地形変化のトレンド

地形変化の傾向を明らかにするために、最小二乗法を用いて地形変化量のトレンドを計算した。計算では、格子間隔を5mとし、下向きを正とする水深値を用いた。

図-16に2010年～2015年までのデータを用いた地形変化のトレンドを示す。DRIM2～DRIM6岸側、特にDRIM3岸側を中心として堆積傾向が見られ、補助突堤周辺～北側の後浜～前浜部にも局所的な堆積が見られる。また、

DRIM3岸側以南の後浜～前浜の侵食傾向も顕著である。

図-17に2012年～2015年に得られた4データを用いてトレンド計算を行った結果を示す。図中黒破線内のDRIM岸側の堆積傾向は、養浜後もDRIMが漂砂制御機能を発揮していたことを示すものと考えられ、DRIMの漂砂制御機能が再確認された結果と言える。また、この期間に限れば、青破線で示した突堤岸側の堆積傾向も明確にわかる。これは、2012年以降、補助突堤が飽和した可能性を示すものと推定される。

図-16 地形変化量のトレンド計算結果(2010～2015)

図-17 地形変化量のトレンド計算結果(2012～2015)

(2) 経験的固有関数法による地形変化傾向の解析

経験的固有関数法による解析⁸⁾を用いて養浜砂流出防止工周辺に生じる変形に着目した評価を試みた。データは、調査期間2010～2015年の全6データを用いた。計算格子間隔は5mとし、下向きを正とする水深値を用い、経験的固有関数の展開においては平均値を除いて計算している。モード1の寄与率は61.3%，モード2の寄与率は22.6%であった。主要2モードで全体の変動の83.9%が説明できていることから、ここではこの主要2モードについて検討を行う。図-18に各モードの時間係数 $c_n(t)$ の時系列を示す。再養浜前～後にかけて両モードの c_n が逆符号で大きく変化しているが、2012年以降においては、変化量は異なるものの同位相の変化を示している。

図-19はモード1の固有関数 e_1 の平面分布を示している。ここでは、水深変化を対象として解析しているため、固有関数 e_n が正の領域では、時間関数 c_n が減少している期

間は海底面上昇(堆積)が、 c_n が増加している期間は海底面の下降(侵食)が、それぞれ生じていることになる。

DRIM岸側と突堤周辺に広く正の領域が見られるが、局所的に値が大きいのはDRIM2～5岸側のみである。 c_1 との関係から、この領域は2010年から2011年まで全体的に海底面が下がり、その後養浜により大きく堆積したことがわかる。2013年から2014年にかけても海底面が下がっているが、その変動幅は小さく、全体的には養浜後の初期変形を経た海底面の変動が、養浜砂を一定量維持した状態で落ち着いていく様子を示しているものと思われる。

図-18 時間係数 $c_n(t)$ の時系列(2010～2015)

図-19 固有関数 $e_1(x,y)$ の平面分布(モード1, 寄与率61.3%)

図-20 固有関数 $e_2(x,y)$ の平面分布(モード2, 寄与率22.6%)

図-20はモード2の固有関数 e_2 の平面分布を示している。 e_2 の符号は e_1 とはほぼ逆の分布を示しているが、DRIM4岸側、補助突堤および突堤北側の前浜付近に局所的に大きな値が見られる。モード2は局所的な増減をより明確に示すものと考えられることから、これらは主にDRIMと補助突堤の局所的効果を表現しているものと思われる。 c_2 との関係を見ると、海底面は2012年まではモード1と同

様の変化を示しており、養浜工施工の影響を含むものと考えられる。2013年～2014年の堆積傾向は、この期間の養浜砂流出防止工による堆積効果と、補助突堤の沿岸漂砂補足機能が飽和して北側に堆積した結果を含むものと思われる。2014年以降の大きな侵食傾向は、前章第3節で述べたDRIM埋没後の状況を示すものと思われる。

4. おわりに

指宿港海岸における養浜砂流出防止工の効果を、2010年～2015年までの地形測量成果を用いて、地形および土量の変化量、トレンド計算、経験的固有関数法による解析により評価した。

地形変化量では、測量期間全期にわたりDRIM岸側の養浜工施工範囲には有意な堆積領域が見られ、養浜後においても大きな侵食は見られなかった。前浜付近には広い侵食領域が見られたが、その大半が補助突堤より北側に沿岸漂砂として流出しているものと推定された。ただし、岸沖漂砂に関しては相当量の砂がDRIM岸側に堆積しており、静穏時に前浜付近に供給される可能性があることを示した。また、DRIM埋没後の地形および土量の変化量がDRIM露出時の傾向と大きく異なっていたことから、DRIM露出時の漂砂制御効果が逆説的に示された。

トレンド計算の結果から、養浜砂流出防止工周辺の局所的な堆積傾向が再確認できた。一方、突堤北側の養浜領域外に流出した時期が養浜後の2012年であることが示唆された。これは、突堤の沿岸漂砂補足能力が飽和していた可能性を示すものである。

経験的固有関数法を用いた解析により、調査期間における海浜変形の傾向を明らかにした。その結果、海浜全体においては養浜砂は維持されていることが示された。また、局所的な養浜砂流出防止工の働きと、DRIM埋没後の変動を示す結果が得られた。

これらの結果より、指宿港海岸に設置されたDRIMが

岸沖方向の養浜砂流出防止工として岸向き漂砂制御機能を発揮し、有効に機能していたことが確認された。また、再養浜後に補助突堤の沿岸漂砂補足機能は早い段階で飽和し、養浜砂が補助突堤よりも北側の領域に流出していたことが確認された。

謝辞：本研究では、鹿児島県南薩地域振興局指宿支所の多大なるご支援をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 津田宗男, 土屋洋, 児島和之, 浅野敏之, 小島治幸, 入江功: 指宿港海岸における人工海浜の変形と養浜砂流出防止工の効果, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No.2, pp.I_646-I_650, 2011.
- 2) 山下隆男, Hendri, Ding Fei, 三島豊秋: 台風 0416 号による指宿海岸への外洋侵入波浪・湾内発生波浪の数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.2, pp.I_126-I_130, 2012.
- 3) 入江功, 辻利徳, 村上啓介, 藤井研一, 牛房幸光: 歪み砂れんマットによる底層流の制御とその応用, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.476-480, 1992.
- 4) 山口洋, 小野信幸, 入江功, 渡部耕平, 村瀬芳満: 歪み砂れんマット(DRIM)による 3 次元的漂砂制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.601-605, 2003.
- 5) 山口洋, 小野信幸, 入江功, 小島治幸, 茶谷正明, 五明美智男, 児島和之: 芦屋海岸における DRIM の漂砂制御機能に関する現地試験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.646-650, 2005.
- 6) 小野信幸, 入江功, 横田雅紀: 歪み砂れんによる海浜断面安定化工法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.676-680, 2001.
- 7) 小野信幸, 入江功, 緒方菊, 山口洋: ビーチサイクルを考慮した養浜断面の安定化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.626-630, 2002.
- 8) 加藤一正, 吉松晃: 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法, 港湾技術研究所報告, Vol.23, No.2, pp.27-47, 1984.

(2016.3.16 受付)

THE EFFECTS OF A COUNTERMEASURE WORK AGAINST COASTAL EROSION AFTER ADDITIONAL NOURISHMENT IN IBUSUKI COAST

Hiroshi TSUCHIYA, Muneo TSUDA, Kazuyuki KOJIMA and Haruyuki KOJIMA

Ibusuki coast has been the most popular spot for the sand steamed hot spring. In addition, its sandy beach has important functions in the environment and disaster prevention. However, the loss of its functions has been threatened by the recent coastal erosion. Integrated shore protection system composed of beach nourishment, groin and distorted ripple mat (DRIM) has been applied to prevent the nourished sand from being washed away. The beach nourishment was constructed in 2009 and 2011 with topographic monitoring surveys. The present study discusses the effects of the countermeasure work comprised of DRIM and groin based on the survey results from 2010 to 2015. Evaluation of the beach deformation was carried out through topographic change, deformation trend and empirical eigenfunction analysis. From the results of the evaluation, it was confirmed that the countermeasure work is effective in retaining the nourished sand.