海岸線から突出した構造物による海岸侵食機構と サンドバック突堤の侵食制御性能

Beach Erosion Mechanism by a Structure Protruding from Shoreline and the Performance of a Sand-packed Jetty against Beach Erosion

西口幹人¹・佐藤慎司²・坂下大輝³・田島芳満⁴・関口陽高⁵・土橋和敬⁵

Kanto NISHIGUCHI, Shinji SATO, Taiki SAKASHITA, Yoshimitsu TAJIMA
Yoko SEKIGUCHI and Kazutaka TSUCHIHASHI

Significant beach erosion has been developed on Nagayama-hama, Irabu Island, Okinawa Prefecture due to change of sediment movement by the construction of a bridge connecting the Irabu Island and the Miyako Island. This study aims at describing the erosion mechanisms on the basis of bathymetry measurements as well as numerical modeling of waves, currents and sediment movement. The performance of a sand-packed jetty tentatively introduced against beach erosion is also discussed by comparing beach topographies before and after the construction. It is found that the sand-packed jetty keeps its performance to reduce downdrift erosion although it tends to settle gradually owing to the local scour.

1. はじめに

沖縄県宮古島市では宮古島本島とその西側にある伊良部島を結ぶ伊良部大橋の建設が2006年に着工し、現在も建設が続いている。伊良部島東端の長山浜ではこの橋の付け根に土砂が堆積し、周辺が侵食されるという現象が起こっている。宇多ら(2011)は空中写真と汀線測量データを基に南西からの土砂の運搬を海浜変形の要因と分析し、複数の突堤の設置と養浜による対策を提案している。橋に集まる漂砂を制御する手法を検討するとともに、コンクリートに代わる新素材の開発も検討するために、長山浜には堤長およそ20mのサンドバック突堤が試験的に導入された。サンドバックに関しては潜堤への使用を想定した平松・佐藤(2010)の研究により、接地部で局所洗掘が生じること、平坦な形状であるほど安定することが明らかにされているが、現地での設置経験とその効果の監視事例は少ない。サンドバックのみで突堤を施工する場合、先に述べた安定性の問題上天端の高さには限界がある。またサンドバック間の洗掘とサンドバック自身のたわみによる沈下も予想される。サンドバックは洗掘や沈下に対しても柔軟に変形して対応するという特徴がある。よって設置後の時間経過や潮位によっては天端が部分的(もしくは全体的)に海水面よりも低くなると考えられる。

以上の背景のもとで本研究では、伊良部島長山浜の現地調査と数値計算によって、波浪場・流況場の変化と橋の建設による海岸侵食の機構を明らかにすること、サンドバック突堤の効果を明らかにすること、さらにサンドバック突堤が水没した場合を想定して天端が水没したときにサンドバック突堤の沿岸漂砂捕捉機能がどのように変化するかを評価することを目的とした。

2. 対象地域

対象地域は伊良部島長山浜である。伊良部大橋は図-1の様に伊良部島側の橋の付け根から670m(中間部に70mの開口部あり)は盛土方式となっている。この地域には夏期は南からの波、冬期は北西からの波が入射する。

3. 現地調査

2010年8月、2011年3月、2011年9月の3回にわたってサンドバック突堤による侵食対策が施された伊良部大橋南側の領域東西およそ100m、南北200mの領域でラジコンボートによる水深の測定を行った。サンドバック突堤が設置されたのは2011年3月である。サンドバック突堤がない場合の地形変化とサンドバック突堤がある場合の地形変化の違いを分析するために各水深データの差をとった。結果を図-3に示す。図-3より、サンドバック突堤が設置されていなかった2010年8月～2011年3月では橋の南側で一樣に海底面が上昇しているのに対し、サンドバック突堤が設置された2011年3月～2011年9月では橋の近傍と突堤周囲で海底面が上昇し、橋と突堤の間の領域で海底面が低下していることが確認できた。このことから、調査時点でサンドバック突堤は通常の突堤設置

1 学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
2 フェロー 工博 東京大学大学院 教授 同上
3 修(工) 国土交通省
4 正会員 Ph. D. 東京大学大学院 准教授
5 正会員 前田工機(株)

(a) 2002年 (b) 2007年

図-1 対象海岸の変形状況

図-2 現地サンドバック突堤
(左：2011年3月，右：2011年9月)

時に予想される効果と同様に沿岸漂砂を捕捉して周囲に土砂を堆積させる一方で、下手側では侵食を引き起こしていることがわかった。また、現地調査では沿岸方向に約50m間隔で水深1m程度の地点で粒径分布調査を行った。この結果、構造物付近では中央粒径1.165mmの均一な粗粒砂が堆積している一方、構造物から約300m離れた領域では中央粒径が0.228mmと最も細くなり、300m以遠では再び中央粒径0.5mm程度へ粗くなる傾向が見られた。

4. 数値計算

伊良部大橋建設および突堤設置が流況場および地形変化に与える影響を明らかにする目的で、沖縄県より提供を受けた地形データをもとにした広い領域と、現地調査で得た水深データをもとにした狭い領域で波浪場・海浜流場・沿岸漂砂量の数値計算を行った。さらに低天端サンドバック突堤の侵食制御機能を推定するために、天端の低下を想定して突堤先端から堤長の1/4ずつ天端を水面より低くして再び計算を行い、沿岸漂砂量分布の比較を行った。

(1) 数値モデルの概要

ここでの波浪場の計算は波の回折、屈折を同時に考慮でき、なおかつ広範囲の計算が比較的短時間で可能な定常エネルギー平衡方程式を用いた。次に波浪場の計算によって得られたradiation stressに基づいて海浜流場の計算を行った。最後に海浜流場の計算によって得られた流速・流向をもとに沿岸漂砂量の計算を行った。本研究では沿岸漂砂量の相対的な比較を目的としているため、局所漂砂量 $\bar{q}$ は波による底面せん断応力 τ と沿岸流速 $\bar{u}$ との積から以下に示すパワーモデルで評価した。局所漂砂量を岸沖断面で積分したものを沿岸漂砂量とした。沿岸漂

(a) 2010年8月-2011年3月(突堤なし)

(b) 2011年3月-2011年9月(突堤あり)

図-3 伊良部大橋南側の地形変化

表-1 波浪場の計算条件

	波高 (m)	周期 (s)	波向き (rad)	方向集中度
南からの入射波	0.40	8.00	1.003	25.0
北からの入射波	0.40	8.00	0.175	25.0

砂量は和田ら (2010) の手法の一部を参考にして計算を行った。

$$\bar{q} = (\psi - \psi_c) \bar{u} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\psi = \frac{\tau}{\rho s g D} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ψ は波による流速振幅と摩擦係数を用いて評価したシールズ数、 $\psi_c (=0.11)$ は限界シールズ数、 τ は底面せん断応力、 s は底質の水中比重、 g は重力加速度、 D は粒径で $D=0.3\text{mm}$ とした。

(2) 広領域の計算

伊良部大橋の建設が流況場に与える影響を検証するために広い領域で波浪場と海浜流場の計算を行った。伊良部大橋の南側では南からの波が、北側では北東からの波が卓越している。これを踏まえて広領域では南北それぞれの入射波について波浪場の計算を行った。

伊良部島東端から宮古島西端に及ぶ5.7km四方の広領域で波浪場の計算を行った。計算結果を図-4に示す。計算結果から、橋の建設によって橋の南側では北からの波が、橋の北側では南からの波が遮蔽されているのがわかる。

続いて伊良部大橋周辺の領域を拡大し、東西800m、南北1000mの領域で南北からの入射波のそれぞれで海浜流場を計算した。計算結果を図-5に示す。橋がないときに

図-4 広領域の波浪場（波高）

図-5 広領域の海浜流場

図-6 狭領域の海浜流場

図-7 沿岸漂砂量分布

は南北の波でそれぞれ沿岸方向に一直線に流れる海浜流が発生した。一方で伊良部大橋が建設されると、南北の沿岸流の動的な平衡状態は崩れて橋の両側で橋に沿って流れる循環流が発生しているのがわかる。

よって図-4、図-5から、伊良部島長山浜では伊良部大橋建設前には南から北に運搬された土砂が再び北から南に運ばれて土砂収支のバランスが取れていたために海岸地形が安定していたと考えられる。一方で伊良部大橋の建設によって片側の波が遮蔽されると上のようなサイクルはなくなり、橋の両側で循環流によって土砂が橋に向かって運搬され、橋に沿うように堆積していくのみとなる。つまり盛土方式の橋の建設による海岸地形の変化は波および沿岸流が橋によって遮蔽されてしまうことが原因であるということが確認できた。

(3) 狭領域の計算

突堤設置が流況場に与える影響を検証するために、現地調査で得た伊良部大橋南側の水深データおよび広い領

表-2 狭領域の入射条件

波高 (m)	周期 (s)	波向き (rad)	集中度
0.35	8.00	-0.20	25.0

域の地形データをもとに200m×200mの狭い領域の地形データを作成し、波浪場・海浜流場・沿岸漂砂量の計算を行った。

突堤が設置されていない場合は、海浜流は沿岸方向に橋に向かっていき、橋の根元で橋に沿って沖に向かって流れている。一方で突堤を設置することによって突堤の上手側では橋に向かう強い沿岸流は砂浜から遠ざけられ、突堤前後で突堤に沿って沖に流れる循環流が発生している。つまり、突堤周囲では小さいスケールで伊良部大橋周囲と同じ流れができていると言える。よって、突堤設置によって突堤の上手側（南方）からの沿岸漂砂を捕捉できる反面、橋と突堤の間の砂浜では突堤に向かう

図-8 サンドバック突堤中央部の標高の変化

表-3 比較ケース

波高 (m)/堤長 (m)	20	40
0.35	4/4, 3/4, 2/4, 1/4, 0/4 水没	4/4, 3/4, 2/4, 1/4, 0/4 水没
0.55	4/4, 3/4, 2/4, 1/4, 0/4 水没	4/4, 3/4, 2/4, 1/4, 0/4 水没

図-9 水没の設定方法

沿岸流と橋に向かう沿岸流の境界となる領域で侵食が予測される。

(4) 水没による沿岸漂砂量の変化

上で述べた橋の建設による海岸侵食の機構および突堤設置時の効果をふまえて低天端のサンドバック突堤の侵食制御性能について検討する。図-8は現地サンドバック突堤の中央部の標高の変化である。調査期間中の5月28日には台風2号、8月4日～6日には台風9号が来襲しており、近隣の平良港では台風2号のときは有義波高4.68m、周期11.5sの波、台風9号のときは有義波高4m、周期11sの波が観測されている。図-8で台風が来襲した期間に標高の低下が大きくなっていることから、高波浪時にサン

ドバック突堤の大きな沈下が起こると考えられる。

サンドバック突堤の沈下による影響を検討するために、突堤を上から見て先端から何mまでが水面より天端が低くなっているかで分類して沿岸漂砂量分布を比較する。水没部分の水深は、突堤が周辺の底面と同じ勾配であると仮定して境界の水深が0mになるように設定した。突堤は現地で設置されている堤長20mのものとその2倍の40mのもの、入射波高は現地の波高データをもとに0.35m、0.55mで計算を行った。天端の水没面積は堤長の1/4ごとで比較した。表-3に計算したケース、図-9に水没する様子のイメージを示す。

図-10はX軸が狭い領域における西端からの沿岸方向の

(a) 波高0.35m, 突堤20m

(b) 波高0.55m, 突堤20m

(c) 波高0.35m, 突堤40m

(d) 波高0.55m, 突堤40m

図-10 沿岸漂砂量の岸沖方向の和

距離, Y軸が橋に向かう沿岸漂砂量を表している. $X=108, 109\text{m}$ の位置に突堤, $X=203\sim 205\text{m}$ の位置に橋がある. Y軸正が北(橋)向き(グラフでは右向き)の沿岸漂砂, 負が南向き(グラフでは左向き)の沿岸漂砂である.

図-10より, 突堤よりも南側の領域での沿岸漂砂量はいずれのケースでも突堤のありなし, および天端の水没面積によって変化は現れなかった. 突堤背後ではいずれも水没している割合が大きいほど北向きの沿岸漂砂量が大きくなっている. しかしいずれも突堤がない場合の北向き沿岸漂砂量よりは小さい. また, 突堤背後の循環流による南向きの流れが弱い波高 0.35m , 堤長 20m のケース以外は水面上出ている天端の長さが 20m 前後のところ南向きの沿岸漂砂が北向きの沿岸漂砂にかわっている. 沿岸漂砂の変化がわかりやすい波高 0.35m , 堤長 40m のケースの沿岸漂砂量の分布を以下に示す.

図-11より, サンドバック突堤の天端が先端から水没していくと南向きの沿岸漂砂が発生する領域は小さくなっていき, 検証したケースの中では堤長の $3/4$ が水没したところで南向きの沿岸漂砂はほとんどなくなっている.

以上の結果から, 天端の水没が沿岸漂砂量の分布に与

図-11 天端の水没による沿岸漂砂量分布の変化

える影響について考察する. 突堤の天端が水没すると, 沿岸漂砂が突堤上を通過するようになるだけでなく突堤下手の沿岸漂砂量も変化することが判明した. このことからサンドバック突堤を設置する場合は, 時間経過や潮位によって性能が変化するため, 定期的な調査と必要に応じた交換が必要であるといえる. 一方で突堤背後の沿岸漂砂の向きが変わることによって, 将来的には通常突堤設置時に侵食が予想される領域の地形が安定するというメリットもあると考えられる.

5. おわりに

本研究では, 数値計算によって盛土方式の橋の建設が周辺の侵食・堆積を引き起こす機構を明らかにし, さらにその対策としてサンドバック突堤を導入した場合の効果について検討した. 主要な結論は以下の通りである.

- (1) 伊良部島長山浜では, 盛土方式の橋の建設によって橋の南側では北からの波, 橋の北側では南からの波が遮蔽された. これによって橋の両側で橋に向かう沿岸流が卓越し, 周辺の土砂が橋に向かって運搬され, 橋の付け根で堆積, 周辺で侵食がおこったことが確認できた.
- (2) 橋周辺の海岸侵食対策として突堤を導入すると, 上手側からの沿岸漂砂を捕捉できる反面, 下手側で発生する循環流の影響によって橋と突堤の間で侵食が進むことが予想される.
- (3) 突堤の天端の水没が進むと, 通常の突堤と比べて上手からの沿岸漂砂の捕捉力は落ちるものの, 突堤下手の循環流がなくなり, 橋と突堤の間の領域の地形を安定させると考えられる.

謝辞: 現地調査では筑波大学武若 聡教授の協力を得た. 広領域の地形測量データは, 沖縄県より提供いただいた. 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費戦略的萌芽研究(研究代表者: 筑波大学武若 聡 教授)の助成を受けて実施したことを付記する.

参考文献

- 宇多高明・宮原志帆・宜 保勝・勢理客武・奥間 章・嶺井治男・三波敏郎・芹沢真澄・菊池昭男(2011): 伊良部島長山の浜の侵食実態とBGモデルによる海浜安定化検討, 海岸工学論文集, 第58巻, pp. 586-590.
- 土木学会海岸工学委員会(1994): 海岸波動, 土木学会.
- 服部昌太郎(1987): 海岸工学, コロナ社.
- 平松遥奈・佐藤慎司(2010): サンドバック潜堤の安定性と海岸侵食緩和機構, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第66巻, pp. 656-660.
- 本間 仁・堀川清司(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会.
- 和田麻美・田島芳満・佐藤慎司(2010): 天竜川河口テラス地形と沿岸域への土砂供給過程の長期変化, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第66巻, pp. 611-615.