

モーリシャス国における 礫養浜の有効性に関する検討

大中 晋¹・市川 真吾²・橋本 宏³・遠藤 秀文⁴

^{1,2}正会員 日本工営 (株) コンサルタント海外事業本部 開発事業部港湾空港部
(〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)

E-mail: onaka-ss@n-koei.jp

³正会員 セントラルコンサルタント (株) (〒104-0053 東京都中央区晴海 2-5-24 晴海センタービル 10F)

⁴正会員 (株)ふたば (〒963-0115 福島県郡山市南 2-76)

インド洋のモーリシャス国において、顕在化しつつある海岸侵食や高波浸水被害、および今後の気候変動に対する適応策を検討するための我が国の技術協力事業が実施された。その中で、低標高の海岸エリアに対する高波越波対策として、当国で実施事例のなかった礫養浜を、パイロット事業として実施した。実施後のモニタリング調査より、海岸防護面、海岸利用および環境面における改善効果が図られ、本手法の有効性が確認されるとともに、地域主導による海岸維持管理が構築された。

Key Words : *gravel beach, nourishment, wave overtopping, coral reef, climate change, adaptation, Mauritius*

1. はじめに

インド洋に面したモーリシャス国 (以下「モ」国) は、アフリカ大陸から東に約2,300 km離れたインド洋に浮かぶ、南北約65 km、東西約45 kmのサンゴ礁に囲まれた島であり、主にヨーロッパ方面から年間約100万人を超える観光客が訪れるビーチリゾートの島である。約330 kmの海岸線の大部分はサンゴ礁に覆われ、このうち150 kmを超える海岸線が、サンゴ砂で形成される白砂海岸である。しかし1990年代以降の観光業の発展、それに伴う海岸域の土地利用の拡大により、海岸侵食や高波浸水被害等の海岸災害が顕在化していた。また今後予想される気候変動に伴う波浪の増大や海水位の上昇による、更なる海岸災害の甚大化と頻発化が懸念されていた。これより我が国の援助による技術協力事業が3年間にわたり実施され、その一環として「モ」国における海岸に面した低標高の居住エリアに対する高波・越波災害対策として、礫養浜をパイロット事業として実施した。礫養浜は、人や自然に優しい海岸保全対策として、通常の砂養浜とともに国内外でその事例が増しているが^{1) 2) 3)}、「モ」国で適用された事例はこれまでほとんどなかった。

そこで本研究は、当国で実施した礫養浜の計画・設計の考え方を示すとともに、約1.3ヶ年間にわたり実施されたモニタリング結果を元に、礫養浜の当国への適用性を

検討することを目的とする。

2. 事業概要と実施海岸の状況

(1) 事業概要

本事業は、「モ」国における海岸の実態把握とその要因を検討し、今後のあるべき海岸保全計画を策定するとともに、またそれらの活動を通じて「モ」国の海岸事業や海岸活動に関わる関係者への技術移転および能力向上を図ることを目的とし、我国の技術協力プロジェクトとして実施されたものである。

(2) 実証事業の目的と位置づけ

実証事業は上記の活動プログラムの1つであり、特定された1海岸において、提案される海岸保全対策を実際にパイロット的に施工し、施工後のモニタリングを通じてその適用性を調べるものである。

「モ」国での海岸侵食や高波・越波対策として、従来は貧コンクリート不透過護岸や蛇籠による防護対策がほとんどであったが、最近では捨石護岸を多用するケースが増している。捨石護岸による対策は、背後域の防護対策としての一定の効果はあるものの、それほど強固な対策の必要性がない所での適用や、必要以上の過大断面で作

られているケースもあった。その結果、海岸域との不連続性、それによる利用・アクセス面の低下、砂浜消失の加速、等、逆に弊害を招いているケースも見受けられた。一方、海岸は「モ」国の重要な観光資源でもあることから、防護機能とともに、観光客や地域住民の海岸利用や自然の景観・海岸環境に配慮した保全対策が求められた。そこで、本来の自然海浜の持つ「防護」・「利用」・「環境」の3つの要素を満たし、かつ経済性も考慮し、「モ」国で豊富に産出される石材を有効活用した礫養浜を、高波・越波のリスクに曝されている海岸において、実証事業として実施した。本事業の計画から設計・施工、施工後の継続的モニタリングを、当国の実施機関と一緒に検討し実施することにより、これらの作業を通じた関係機関への技術移転と能力向上を図った。また事業実施後の海岸管理を地域主導で実施するための、コミュニティー・住民への環境啓蒙活動を合わせて実施した。

(3) 実施海岸の状況

対象海岸の Grand Sable は島南東部の沿岸に位置する居住地エリアである。沖には図-1 に示すように、幅 3 km を超える広大なリーフが存在し、対象海岸は丁度その切れ目付近に位置する。背後に急峻な山が存在するため、沿岸域の海拔 1~2 m 程度の僅かな低標高エリアに海岸道路や居住家が密集している (図-2)。このため、高波・越波災害に曝されているとともに、今後の気候変動に伴う更なるリスク増大が懸念されていた。また海岸は十分なスペースがなく、海岸道路で遮断されているため、人々が海岸を利用することはほとんどなく、生活ごみや漂流ごみが散乱している状況にあった (図-3)。地域の住民からは、背後域の防護と合わせて海岸の利用を可能とする対策が望まれるとともに、「モ」国側より、今後の気候変動による不確定要素にも対応可能な柔軟性を有する対策であることが望まれた。当海岸は、砂浜はほとんど存在せず、海岸は泥土と当海域に多く繁茂している海草の漂着物で覆われている。1967年と2012年の45年間における空中画像の比較結果からは、顕著な汀線変化は見られなかった。これより当海岸は、従来それほど居住地として人々が住んでいなかった沿岸域の低標高エリアに、沿岸域の開発とともに徐々に人々が住みついた結果、海岸災害リスクに曝されることになったと考えられる。

3. 礫養浜の計画・設計

(1) 実施範囲の設定

実施対象エリアを選定するにあたり、図-1 に示す対象海岸において、過去の高波・越波に対する住民からの聞き取り調査結果、および背後域の地盤高のレベル測量結

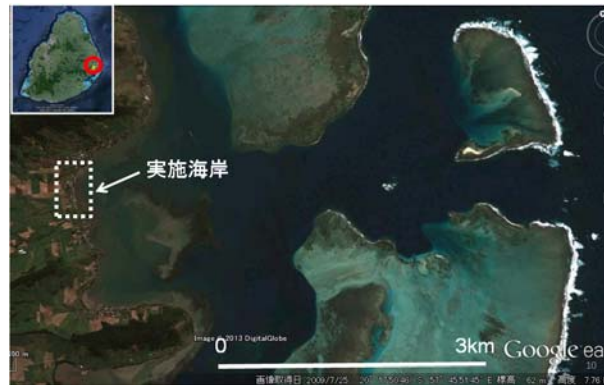


図-1 実証事業実施海岸(Grand Sable)



図-2 事業実施前の背後域の状況



図-3 事業実施前の海岸状況

果より、高波・越波のリスクが高くかつ沿岸方向への礫材移動の可能性の低い範囲として、図-4 に示す沿岸方向 240 m 間と設定した。なお、養浜材の構成の違いによる礫浜の安定性の違いを検討するため、南側の 95 m 区間では単一サイズの粗礫材のみの断面とし、残りの 145 m 区間では、粗礫+細礫の複合断面とした。

(2) 設計外力条件の設定

礫浜の設計に用いる設計水位および設計波高は 30 年の確率年とし、以下の手順で算定した。

1) 近隣の約 30 年間の潮位観測記録より、各年の最大潮

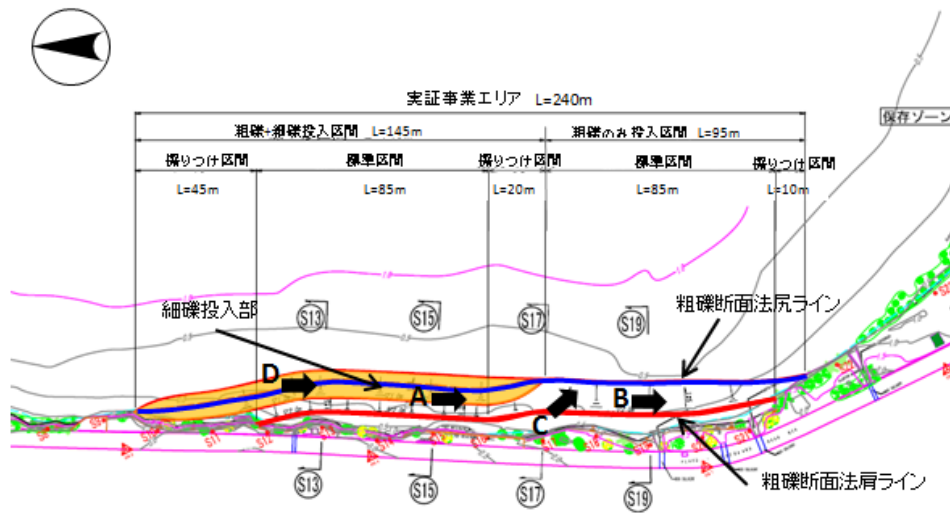


図-4 礫養浜の平面配置

位をサンプルデータとした極値解析を行い、対象再現期間（30年）における潮位（天文潮+気象潮）による水位寄与分を算定する。

- 2) 観測結果から得られた長期の平均水位のトレンドから長期間（30年間）の水位上昇量を算定する。
- 3) 波浪変形計算結果から得られる波によるセットアップの寄与分を算定する。
- 4) これらをすべて足し合わせたものを設計水位とする。
- 5) 波浪推算モデル（SWAN）を用いた沖波設計波浪および浅海域波浪変形計算を行い、設計波高・周期を算定する。

算定された設計条件を表-1に示す。図-1に示したように、当海岸の沖側には広大なリーフが存在するため、沖からの入射波はリーフエッジでの砕波およびリーフ上での波の減衰効果により、海岸に到達する波は極めて小さくなる。

(3) 浜高・浜幅・浜勾配の設定

礫浜の浜高・浜幅は、設定した設計条件に対して波が背後の海岸道路に打ち上がらないことを満たすように設定した。図-5は仮想勾配法⁴⁾を用いて算定された打上げ高と、背後の海岸道路の高さの関係を示すものである。これより道路部の地盤高が最も低いMSL+1.6m程度の場所で、設計潮位（MSL+1.34m）に対して、設計波浪（H=0.4m）が打ち上がらない程度の安全性を確保するものとした。背後の地盤高と海岸利用面を考慮し、天端高としてMSL+2.0mと設定し、上記の機能を満たすための必要天端幅を計算した結果、道路肩から7.6m以上必要との結果が得られた。これより礫断面の波による変形も考慮し、天端幅（海岸道路の肩からの浜幅）として10m以上を確保するものとした。

浜勾配は養浜材の粒径に大きく依存することから²⁾、

当エリアの近隣や島南部における、ほぼ同程度の粒径を持つ礫浜における浜勾配を参考に、礫断面の法勾配として1/5と設定した。また複合断面部における細礫断面の法勾配については1/8と設定した。

このようにして設定した単一粗礫断面、および粗礫+細礫断面の代表2地点の初期断面形状を図-6に示す。

(4) 礫材の材質・諸元

用いた礫材は、「モ」国における本工法の適用性および

表-1 算定された設計条件

設計諸元	設計値
30年確率潮位 (a)	MSL+0.67m
波による水位上昇量(b)	0.55m
長期水位上昇量 (c)	0.12m
設計潮位 (=a)+(b)+(c)	MSL+1.34m
設計沖波波高 (H_0) _{30年}	10.3m
設計沖波周期 (T_0) _{30年}	12.2 s
設計波高 ($H_{1/3}$) _{30年}	0.4m
設計周期 ($T_{1/3}$) _{30年}	8.0 s

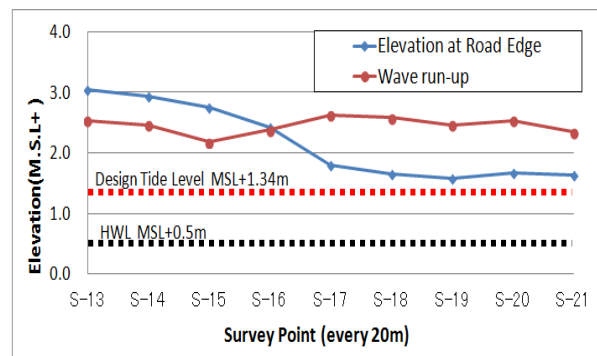


図-5 波の打上げ高と背後地盤高との関係

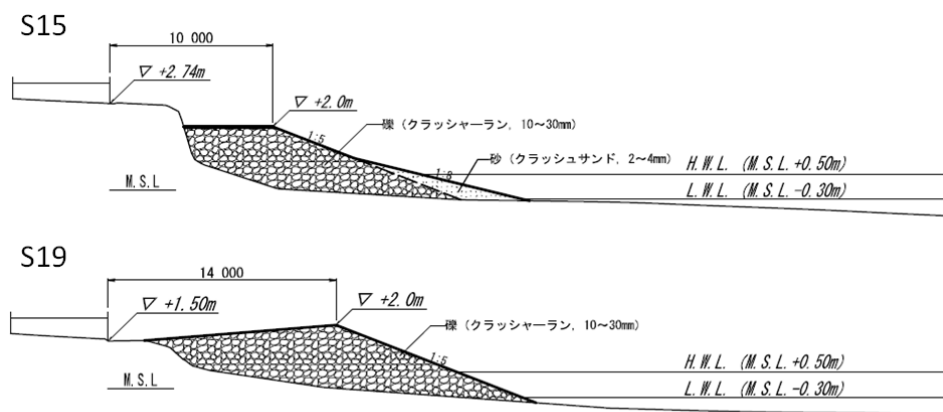


図-6 礫養浜の断面形状（上段：粗礫＋細礫（S15地点）、下段：粗礫のみ（S19地点））

発展性を考え、当国の陸域で豊富に産出されかつ安価な火成岩を砕いた碎石を用いた。粒径は、採石プラントで生成可能な粒径でありかつ海岸利用面を考え、粗礫については10～30 mm程度、細礫は中央粒径2～4 mm程度とした。投入された量は、粗礫が4,600 m³、細礫が340 m³であった。

4. 実施後のモニタリング結果

(1) モニタリングの概要

工事は2013年12月に完了し、その後継続的なモニタリングを約1年半にわたり実施した。モニタリング項目としては、海岸断面測量、定点写真撮影、底質採取、透明度チェックをほぼ3ヶ月毎に実施した。海岸断面測量は、養浜実施エリアの北側約50 m付近からの約300 m区間に約20 m毎にモニタリングラインを設け、定点写真撮影はこの20 m間隔で、海岸断面測量は40 m間隔で実施した。また工事開始の2013年10月よりモニタリング期間中にかけて、海岸から約600 m離れたリーフ岸側の水深3 m付近に海底設置型波高波向計（Wave Hunter）を設置し、波・流れ・水位の定点観測を実施した。なお、当海岸の北側約30 km地点のリーフ外側の水深46 m地点では、「モ」国によるブイ式波高計による波浪モニタリングが実施されているため、このデータも利用し、リーフ内外の波浪の関係を調べた。

(2) モニタリング期間中の波浪状況

両地点での波浪観測記録より、リーフ外での通常波浪は、有義波高2 m、周期8 s程度であった。一方、海岸に入射する波はリーフの存在により大幅に減衰し、0.1～0.15 m程度、周期2 s程度であった。約1年半のモニタリング期間中、サイクロンが4回ほどモーリシャス近海を通過した。このうち、2014年2月5日から7日にかけて

て、モーリシャス島の東側の沿岸を通過したサイクロン Edison 通過時には、最大有義波高で4.3 mの波がリーフ沖側で観測された。しかし海岸への入射波高は0.25～0.3 m程度と沖波波高の5～8%程度であった。またリーフ岸側に設置した波高計より得られた水位データからは、Wave Set-up はほとんど観測されなかった。このような波高比および水位変化は、観測期間を通じてほぼ同様の傾向であった。

(3) 海岸変化状況

工事開始前、完成直後および完成1年後の3時期における、2地点での定点写真撮影を図-7に、また海岸道路の海側端部を起点とした海浜断面測量結果を図-8に示す。ここでS15地点は粗礫＋細礫を投入したエリア、S19地点は粗礫のみ投入したエリアに対する測線である。図-7の海岸写真より、礫浜の構築によって海岸の様相が大きく変わるとともに、海岸スペースが広がった様子が分かる。また図-8の断面変化より、少なくともモニタリング期間中の出現波浪に対し、変形が生じているのは前浜勾配部の一部であり、その変形の上限はHWL+0.6 m程度であった。これは、HWLから本モニタリング期間中に出現した最大有義波高の約2倍程度に相当する。これを表-1に示す設計条件に当てはめると、設計クラスの波浪に対してはMSL+2.14 m程度まで変形することが想定され、設定した浜高・浜幅で背後域の波の遡上がほぼ防げるものと考えられる。また各測線での断面変化を、施工完了直後の6ヶ月間とその後の6ヶ月間で比較すると、後者の断面変化量が小さくなっている。季節的な波浪条件の違いもあるものの、徐々に断面が安定化傾向に向かったと考えられる。波が作用した範囲での勾配変化を見ると、S15地点では粗礫断面部で設定した1/5勾配となっており、S19地点では平均的には同じ1/5勾配となっているが、若干凹型に変形した。

つぎに、各測線でのモニタリング結果から沿岸方向の



図-7 海岸の変化状況（上段：S15地点（図-4のA地点），下段：S19地点（図-4のB地点））

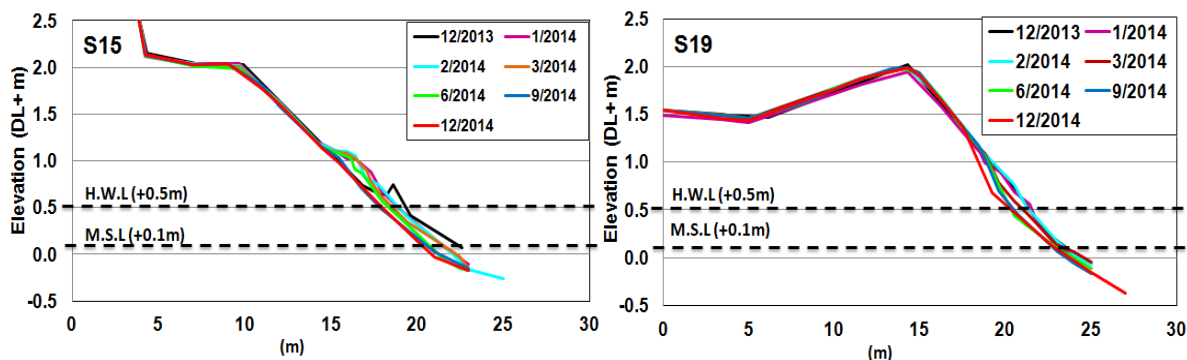


図-8 断面地形変化（左：S15地点，右：S19地点）

変化状況を調べた。工事完了後の2013年12月から2014年3月頃までは、投入した細礫が南側に移動し、3月以降は粗礫および細礫は北側へ移動した。これは、当海岸の風向の季節変動とよく対応している。

粗礫+細礫の複合断面とした北側エリアは、当初明確な両断面の識別ができたが、時間経過とともに特に細礫部のはっきりとした識別ができなくなっていった。この要因として、細礫の投入量が粗礫（碎石）の1割程度と少なく、また礫よりも動きやすいため、沿岸方向の移動や一部沖側への移動した可能性、それとともに、波の作用により礫断面の空隙内に充填された可能性がある。

(4) 海岸利用面・環境面の向上

礫浜構築後の海岸利用状況の一例を示したものが図-9である。海岸は、漁船の係留・荷揚げ、地域住民の魚釣りや憩いの場として利用されるようになり、完成後に実施した住民へのアンケート結果からも高い満足度が確認された。図-10は後浜域における自然の植生の成長状況

を示す。このような植生は、後浜の安定化にもつながるものと考えられ、他の構造物対策では得られない自然派生的効果である。水質については、以前は海岸付近の海水は微細なシルト砂が巻き上げられて常に濁っていたものが、養浜材投入による覆砂効果により、このシルト砂の巻き上げが大幅に抑えられ、海岸付近の海水の透明度は大幅に向上した。生態系への影響についての定量データは得られていないものの、礫浜形成後は海岸付近で魚がよく釣れるようになったとの住民からのヒアリング結果であった。

5. 地域主導による自主的海岸管理の実現

本実証事業では、海岸保全工法としての技術的視点での適用性の検討とともに、長期的、持続的な維持を目指した海岸管理の構築も目的の1つであった。事業実施前は、海岸には多くのゴミが山積し、人々の海岸に対する

興味も低かった。そこで事業実施前から実施中にかけて、地域住民に対する環境啓蒙活動として、海岸清掃イベントの開催や、自主的海岸管理の必要性・重要性の理解向上を目的とした数回の住民説明会を実施し、住民の理解向上を図るとともに、海岸管理の官民の役割の明確化と必要な体制を構築した。事業経過から約2年後の2015年11月に実施した現地での事後確認において、本事業完了後から現在までにかけて、地域による自主的な清掃活動の毎月の実施、およびコミュニティーによる海岸利用の自主的管理の実施、その結果、海岸が依然として良好な状態が維持されていることが確認された。



図-9 海岸利用の様子 (図-4 のC地点)

6. おわりに

本事業の成果を受けて、「モ」国で同様の問題を抱える他海岸への展開を計画中である。一方、ここで得られた結果は、事業実施から2年程度の限られた期間におけるモニタリング結果に基づくものである。今後、より特異な波浪条件での耐波性を確認するとともに、地域主導による海岸管理が今後も持続的に実施されていくかどうかについて、更なる長期的視点での検討・確認が必要である。

謝辞: 本成果は、2012年5月～2015年6月の約3年間にわたり、独立行政法人国際協力機構 (JICA) により実施された開発計画調査型技術協力プロジェクトの成果の一部を取りまとめたものである。本事業の実施に係った各関係機関の方々に感謝の意を表します。



図-10 後浜域での自然の植生 (図-4 のD地点)

参考文献

- 1) Ahrens, J. P. : Dynamic revetments, *Proceedings 22nd Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1837-1850, 1990.
- 2) Allan, J. C., P. D. Komar and R. Hart : A dynamic revetment and reinforced dune as "natural" forms of shore protection in an Oregon state park, *Coastal Structures, Conference, Portland, Oregon, ASCE*, pp. 1048-1060, 2003.

- 3) 石川仁憲, 宇多高明 : 閉空間と開空間での粗粒材養浜がもたらす効果・影響の相互比較, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol. 67, No. 2, p.I_1153-I_1158, 2011.
- 4) 中村充, 佐々木康雄, 山田穰二 : 複合断面における波の打上げ高に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.309-312, 1972.

(2016.2.4 受付)

STUDY ON APPLICABILITY OF GRAVEL BEACH NOURISHMENT IN MAURITIUS

Susumu ONAKA, Shingo ICHIKAWA, Hiroshi HASHIMOTO and Shubun ENDO

The Technical Cooperation Project was undertaken in Mauritius to examine the applicability of coastal conservation/protection measures against coastal disaster as an adaptation measure for future climate change. The demonstration project of gravel beach nourishment was implemented at the specific coastal area with the low elevation land to prevent wave overtopping to the hinter area. The contiguous monitoring has been carried out to justify the effect of this type of measures. The result shows high applicability on protection function and improvement on coastal use and environment.