前浜地形の耐波侵食性向上に資する 砂礫混合養浜手法の検討

野口 賢二¹・加藤 史訓¹・佐藤 慎司²

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室（〒305-0804 つくば市旭1番地）

E-mail:noguchi-k92fu@mlit.go.jp, katou-f92fr@mlit.go.jp

²フェロー 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻（〒113-8656 文京区本郷7-3-1）

E-mail:sato@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

自然の力による侵食状態からの回復が期待できなくなった海岸では、施設と養浜との組合せによる侵食対策が主流となっており、総合土砂管理も見据えた効率的な養浜手法の確立が必要である。本研究では養浜の構成する材料や盛土構造の違いがもたらす前浜地形保全への効果を検証した。これを耐波侵食性として評価するために、砂と細礫、中礫を養浜基本材料として構成される養浜盛土に波を作用させる水理模型実験を行い、前浜に盛土として投入された養浜の侵食量、汀線位置の変化、形成された陸部の面積、静水面下の堆積断面積を解析し、効果的な養浜手法を検討した。その結果、砂・細礫・中礫を均等な構成とすることで前浜地形の耐波侵食性を向上可能であることを示した。

Key Words : beach nourishment, hydraulic physical model test, mixed grain size

1. まえがき

我が国では、漂砂系へ土砂が供給されないために砂浜の侵食が深刻な状況へ進み、自然の力による回復が期待できない海岸が続出している。このような海岸では、漂砂制御構造物のみの侵食対策には限界があり、施設と養浜との組合せによる対策が行われる必要がある。戦略的に養浜を持続するには、総合土砂管理も見据えた効率的な養浜手法の確立が必要である。つまり、養浜計画では、調達先の確保や養浜材料、歩留まり良さ、投入方法、養浜により得られる効果、状況監視の検討が必要である。

養浜の歴史として、不足する海浜材料と同等材料の投入から始まり、侵食が進行した海浜では歩留まり向上のため粒度を大きくしてきた。施設と養浜の組合せで海浜安定化を図っている茨城県鹿島灘海岸では、粒径20 mm程度の細礫を投入する粗粒材養浜が行われている¹⁾。投入材料が最大級のものとしては、富士海岸の粒径150 mm～300 mmの養浜がある²⁾。一方で、神奈川県茅ヶ崎海岸のように、流砂系から得られる異なる粒径集団を混合した材料を意図的に用いる場合もある³⁾。現場では、このような材料に関する取り組みが行われているが、養浜材料の特性や養浜盛土の構造が前浜地形の保全に果たす役割について取り扱った基礎的な研究は、野口ら⁴⁾や浅野ら⁵⁾が行っているほかは見当たらない。そこで、本研究では養浜盛土を構成する材料や養浜盛土構造の違い

がもたらす前浜地形保全への効果を検証した。

養浜が完了すると、盛土の侵食は損失、汀線の前進は効果として受け止められる。しかし、両者は需給の関係にあるので、養浜盛土から汀線までの範囲を「前浜地形」として一括して評価する必要がある。本研究では、養浜盛土の材料と構造による前浜地形の耐波侵食性について、養浜盛土の持久性から盛土断面積の減少が緩やかであること、汀線が後退しないこと、堆積性の波による回復性を有することの3点から評価した。養浜基本材料として砂と細礫、中礫から構成される養浜盛土に波を作用させる水理模型実験を行い、盛土および形成された陸部の面積、静水面下の堆積断面積を解析して、投入された養浜が効率よく発揮される手法を検討した。

2. 実験方法

実験は、長さ33 m、幅0.3 m、深さ0.8 mの小型造波水路を用いて、図-1に示すように1/10勾配のモルタル製固定床を設置しその陸部分に養浜盛土を導入した。本研究においては、養浜材料と原地形の相互間の地形変化への影響を排除して、全てのケースで同一の条件で比較するために固定床とした。このため、碎波により生じるトラフが形成されないことに留意する必要がある。

水路内沖側に2本の容量線式波高計を設置して入射波とともに反射率を測定した。波浪条件は、表-1に示す2

図-1 実験模型と計測器位置

図-2 断面積の算出区分

種類の規則波とした。波浪条件は、実験材料の粒度から堀川・砂村⁹⁾のC値が異なるように設定した。ただし、装置の性能から堀川・砂村の海浜変形タイプをまたがる条件は実施できなかった。

この実験は、養浜盛土を含めた前浜地形の変化過程を見ることに主眼をおいた基礎実験であり、特定の海岸を対象とした模型実験ではない。しかしながら、後述するように、野口ら⁷⁾のトレンチ調査との対比を念頭においたため、縮尺を1/4～1/8程度に想定して、波や底質の条件を決定した。水路の制約から、沖波としてはやや小さな条件しか設定できなかったものの、養浜盛土の侵食や、汀線部における海浜の回復など、現地で観察される前浜部の土砂移動と地形変化を概ね再現することができた。

各ケースでは、初めにC値が大きい波1を作用させ、40分を目安として海浜変形の進行が小さくなった時点で停止したのちに、波2を作用させた。水路側面のガラス観測面から高速度カメラにより毎秒120コマで撮影し、5分ごとに盛土の侵食状況と固定床上の堆積状況をトレースした。トレースした断面形状を図-2に示すように養浜盛土、遡上区間（汀線から最大遡上高の間の静水位より上）、静水位以下に分けて、断面積を測定した。

養浜の盛土に用いた材料は、盛土の崩壊や礫の移動の性質が重要となることから、海岸近傍の河道内で採取された玉砂利および砂とし、図-3に示すように粒度分布が重ならない3つの粒度調整となるようにふるい分け済みの材料を用いた。中礫を材料a、細礫を材料b、砂を材料cとして基本材料として、材料aとbを混合した材料d、材料aとb、cを混合した材料eを作成した。養浜盛土は、図-4に示すように、これらの基本材料単独の3ケースとこれらを混合した2ケース、砂の間に礫層を設けた盛土構

表-1 波浪条件と堀川・砂村の地形変化タイプ

	波浪条件		養浜材料	d50 (mm)	堀川・砂村	
	波高(m)	周期(s)			C値	地形変化
波1	0.1	1.3	材料a	8.2	1.0	III
			材料b	2.3	2.3	III
			材料c	0.82	4.6	II
波2	0.06	2.6	材料a	8.2	0.4	III
			材料b	2.3	0.9	III
			材料c	0.82	1.7	III

図-3 材料の粒度分布

図-4 養浜盛土の構成図

表-2 養浜盛土の材料構成

養浜盛土に含まれる割合	実験ケース番号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
材料a (中礫)	100%			50%	33.3%			13.3%
材料b (細礫)		100%		50%	33.3%	40%	30%	13.3%
材料c (砂)			100%		33.3%	60%	70%	73.3%

造として3ケースの計8ケースとした。各ケースに含まれる基本材料は、表-2に示す割合（体積比）とした。混合材料のケース4～8で最も砂（材料c）の割合が多いのがケース8の73.3 %で、中礫（材料a）の割合が多いのがケース4の50 %となっている。

3. 養浜盛土の耐波侵食性

養浜盛土が侵食されて元の形状から欠損した部分の断面積（図-2の盛土侵食断面積）の時系列を図-5に示した。途中で侵食断面積が減少するのは、侵食された材料が打ち上げられて堆積した面積が含まれるためである。また、波2のケース1の20分で急激に侵食断面積が増加しているが、これは汀線から沖側の20 cm間にステップ地形を形成するために、盛土を侵食面が平行となるように崩したためである。

各ケースの侵食断面積が増加の傾向にある造波開始15分後で比較する。侵食断面積が小さい順に、波1ではケース1, 2, 4, 3, 8, 5, 7, 6, 波2ではケース1, 4, 2, 3, 5, 7, 6, 8となっている。ケース1, 2, 4は、波1と波2ともに侵食断面積が小さい。これらは砂を含まない材料aと材料bにより構成されている。それら以外は砂を主体としたケースであり、その中でも砂単独のケース3と5が侵食されにくい。砂を多く含んだケース6～8は、砂単独のケース3よりも急速に侵食が進行したのち、時間に差はあるものの安定に向かい盛土の侵食が収束する。

したがって、ケース1や2, 4のように礫のみで構成されるものは盛土の耐波侵食性が高い。一方、盛土構造を互層とした場合には、砂だけで構成した場合よりも耐波侵食性が低くなるので気をつける必要がある。ケース5のように材料を幅広い粒度を包含するようにすると、耐波侵食性は砂だけの場合と同程度が確保できかつ、侵食後の回復が期待できる。

図-5 養浜盛土の侵食断面積の時系列

4. 前浜地形の耐波侵食性

波により盛土から削られた土砂は、その波と粒径に適合した地形を形成するために費やされ、バーやステップを形成して碎波帯から遡上域までの断面積を増加させ、ついには汀線の前進として現れる。本研究では、汀線から盛土部分までを「前浜地形」として、養浜効果の評価の対象とした。

(1) 汀線位置の変化

図-6（波1）および図-7（波2）に海浜変形の状態を表す変数として、汀線位置、汀線から最大遡上位置までの遡上域断面積、 $x=0$ mから沖側の静水面以下で堆砂した部分を合計した断面積について、時系列で示した。

図中最上段のグラフで汀線位置の違いを比較する。波1においては、造波開始後から30分までの汀線の前進は、中礫単独のケース1は3.4 cmと小さく、砂単独のケース3は17.7 cmと突出し、その他のケースは14.0 cmを平均として13.3 cm～15.4 cmの範囲に収まっている。

周期が長い波2においては、構成する主な粒度の違いによって、汀線の前進効果に明瞭な違いが現れた。つまり、礫を主体とするケース1, 2, 4は前進量が小さく、砂が主体となっているケース3, 6, 7, 8は前進量が多い。中礫と細礫、砂が同量ずつであるケース5は、初めは礫主体のケースを下回るが後に上回る。

中礫のみで構成されるケース1の汀線の前進効果は、波1と波2のどちらでも低い。ケース1は、前述したように波2の15分から20分にかけて盛土を掘削してステップ地形に整形した。このステップによる沖出しした分の汀線が前進したものの、60分後には養浜盛土ののり先である $x=0$ cmを割り込んだ。このことから、たとえ礫の供給量を増やしたとしても汀線の前進効果は限定的と言える。

以上から、礫のみに比べて礫に砂が添加された材料である方が、汀線の前進に有利である。

(2) 前浜地形とバー・ステップの断面積の変化

侵食された土砂と前浜地形の変化とバー・ステップの変化の関係を見るために、地形変化の推移を静水面より上と下に分けて算出（図-2）し、図-6（波1）および図-7（波2）の上から2段目に遡上域の断面積を、同図の上から3段目に静水面より下の断面積を示した。ここで、遡上域の断面積は、図-2に示したように汀線から遡上高までの静水面から上側の断面積である。この遡上域の断面積には、侵食されていない盛土部分も含まれる。また、収支の議論を行なう上では、系外への損失を把握しておく必要があるが、延長2 mの1/10斜面より沖側へ土砂が損失したケースの損失量は、ケース1, 4, 5では約13 cm²、ケース8で約24 cm²で、どのケースも材料aのみが沖に損失していた。他のケースで、沖側への損失はなかった。

図-6 波1の汀線位置，遡上帯面積，水中面積

波1において，遡上域の断面積は時間が経過しても大きな変化はないが，養浜材が礫主体であるケース1，2，4は小さく，砂が主体のケース3，6，7，8は大きくなっている．静水面以下の堆砂の断面積の変化は，30分後まで増加したのちにほぼ安定している．波2では，静水面以下の堆砂の断面積は同様に30分後まで増加するが，中礫を多く含むケース1，4，5は断面積の減少が大きく，ケース5では遡上域の断面積も同時に減少している．

ここで，ケース5波2の造波後30分以後において，汀線が前進しているのに遡上域の断面積が減少する状況进行分析する．先ず盛土の侵食断面積の変化に合わせて状況を確認する．図-5において25分以降に侵食断面積が減少したのは，波の遡上により侵食された範囲まで堆砂が生じ，断面積が回復したためである．その後の50分以降には，侵食断面積はほとんど変化せず，遡上域と静水面以下の断面積が減少しているにもかかわらず汀線は前進している．これは，堆積により断面形全体が前進しており，遡上域も前進することになるので盛土の侵食面に波が到達せず，盛土が侵食されなくなり土砂供給もなくなる．初期状況と異なり土砂供給がない漂砂環境となり，遡上帯から沖側までに存在する土砂に対して動的安定から静的安定となるように土砂移動が生じた．このため，静水面以下では岸沖全体に堆積していた土砂のほとんどが陸側へ移動した．この沖側で侵食された土砂は，遡上域の最背後に次々と堆積して，斜面の上部を沖側に移動させる．この変化により前浜勾配が急になることで岸沖方向の長さが減り，遡上域の断面積が減少する．

図-7 波2の汀線位置，遡上帯面積，水中面積

(3) 各材料が果たす役割

各ケースの30分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況を堆積した材料の違いとともに示したのが，図-8（波1）と図-9（波2）である．図中のハッチの違いは，堆積した材料の違いを示している．水色の線は，岸側が遡上時の水面形，沖側が砕波後の波の状況を示す．ただし，波の遡上高が最大となる時刻と砕波の特徴を良く表す時刻は異なるので，同一の時刻ではない．

波1では，表-1に示したように材料cのみが堀川・砂村の海浜変形のタイプⅡのバーを形成する条件であり，他の材料についてはバーが存在しないタイプⅢである．しかし，本実験では，全ケースでバーを形成する堆砂が生じた．また，波2については全ての材料に対して陸側への大きな堆砂が特徴であるタイプⅢとなるが，本実験ではケース3以外は沖側にステップもしくはバーが存在する地形となっている．堀川・砂村の変形タイプは海浜地形が変形の供給源となる設定であるが，本実験は陸側から土砂が供給される模型設定であることが異なる．

巻波砕波後の波の先端部が固定床を叩き，その沖側にはバーが形成される．材料a，b，cが含まれるケース5と8で，波1と波2ともに材料aはバーの砕波位置側に多く存在している．形成の初期においては，材料aが先行してバーの位置で往復運動するうちに，まとまった量となるとバーとしての形状をなして材料も移動し難くなる．また，ケース1では材料aは砕波が突入する位置を含めて固定床全体に薄く分布していることが他のケースと異なる．

図-8 波1の30分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況

波2では、遡上高が大きいために盛土の侵食量も大きい。このために、堀川・砂村の海浜変化のタイプでは岸側へ移動するⅢの条件であるが、全てのケースで沖側に広く堆砂が生じている。また、材料aや材料bの粗い粒径は、細かい粒径のものに被さる形で堆積したり、沖側に堆積している。砂の層の表面に粗い材料が被さると、表面の粗い材料は活発に往復運動を行うが、下の材料はほとんど動かなくなる。

5. 盛土構造が礫と砂の互層である影響

ケース6～8は、砂の間に材料bもしくは材料eを挟み込んだ構造の盛土としている。これは、盛土の崩壊状況が異なる層で侵食の進行が緩和することを期待したものである。互層とした場合の侵食の進行をケース6と7について、ケース5とともに図-10に示す。示したのは遡上高が大きくなる波2のものである。ケース6と7のどちらも礫層がえぐられるように侵食形状となっている。このような、えぐられるような侵食形状はケース5では見られず、礫層を設けた場合に特徴的に生じる現象である。

この侵食の進行は、図-9の最大遡上時の水面形から、ケース6も7も上から2段目の砂の層に遡上波の先端が当たっているのがわかる。これにより、砂層が侵食して、

図-9 波2の30分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況

図-10 盛土の構造における礫層の効果

礫層を支える下側の砂層が侵食を受けると土台を失った礫層は自然崩壊する。しかし、礫層の上にある砂層は遡上波が到達していないために締め固め状態が保たれてオーバーハングが生じる。

養浜盛土を砂と礫または礫混じりの層の互層で形成すると、礫層の安定性に関する脆弱な性質を強調すること

図-11 造波終了後に残存した境界と形成時刻（ケース5波2）

となり望ましくない。

6. 現地トレンチ調査との対比

図-11は、ケース5波2の造波終了後に撮影された堆積状況に各時刻で測定された海浜地形表面を比較して残存しているはずの表面のみを残したものである。野口ら⁷⁾は、静岡県静岡・清水海岸においてトレンチ調査を実施し、定期測量結果を同じ手法で重ね合わせた。養浜の下手の海岸の駒越南町地先では、養浜の礫材が砂層の上にバームを形成しており同様な堆積状況を実験においても再現できている。また、現地トレンチ調査の結果によるとほとんどの砂層の境界面は直線状であったが、これは波による切削で形成されることが実験で確認された。

7. まとめ

本研究で行なった水理模型実験は、沿岸漂砂から切り離された水路実験であり、かつ固定床で高波浪が造波できないという制約された条件であったが、養浜材料と養浜構造の特性を把握することができた。

盛土材料と盛土構造の前浜地形への耐波侵食性をまとめると表-3のようになる。砂のみの場合は、沿岸漂砂に起因する侵食海岸への養浜において高波浪時に耐えられない実績から、総合評価を下げた。砂ばかり、礫ばかりでなく粒度の特性を生かして、海浜の回復であれば砂・細礫・中礫を均等な構成とする等により、目的に応じて前浜地形の耐波侵食性を向上可能であることが示された。

表-3 盛土材料と盛土構造に関する前浜地形の耐波侵食性に対する評価

材料と構造	ケース	盛土侵食	汀線後退	回復性	総合評価	理由
砂	3	△	◎	○	○	高波浪時に持たない
礫のみ	1,2,4	◎	×	△	△	盛土は侵食され難いが、浜は回復しない
砂と礫の互層	6,7,8	×	○	△	×	材料が持つ崩れ易い性質を助長
砂と礫の混合	5	△	◎	○	◎	高波浪時の懸念があるが、バームの形成で耐波性向上

参考文献

- 1) 石井秀雄, 中村友和, 宇多高明, 大木康弘, 熊田貴之, 芹沢真澄: 茨城県神向寺海岸での粗粒材養浜による砂浜の安定化, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.887-892, 2006.
- 2) 國村一郎, 丹羽秀一, 熊切良行, 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎: 富士海岸の吉原工区における礫養浜の効果検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, pp.I_701-I_705, 2014.
- 3) 石川仁憲, 三波俊郎, 宇多高明, 細川順一, 和田昌明: 茅ヶ崎中海岸における養浜の海岸保全効果の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 68 巻, pp.I_686-I_690, 2012.
- 4) 野口賢二, 福濱方哉: 養浜材料の質の評価に向けた養浜と海浜の変形に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.651-655, 2007.
- 5) 浅野泰史, 佐藤慎司, 劉海江, 高川智博: 粗粒径材料を用いた養浜の効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 66 巻, pp.631-635, 2010.
- 6) 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右: 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp.193-200, 1974.
- 7) 野口賢二, 諏訪義雄: 静岡・清水海岸でトレンチ掘削調査により得られた砂と礫の堆積構造, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, pp.I_681-I_685, 2014.

(2017.3.15 受付)

SAND-GRAVEL MIXED FORESHORE NOURISHMENT TO IMPROVE EROSION RESISTANT PERFORMANCE

Kenji NOGUCHI, Fuminori KATO and Shinji SATO

Laboratory experiments were conducted to investigate the effectiveness of foreshore nourishment with a mixture of sand and gravel. Deformation of a nourished bank on the foreshore was measured by using moderate and mild waves. Sands with three different sizes were used to form the nourishment bank. The effectiveness of the nourishment was discussed on the basis of measurements of bank erosion volume, shoreline change, subaerial beach width and submarine beach volume. The most significant erosion resistant performance was found for a mixture of three sands in equal proportion.