岩盤上に載る礫浜の堆積侵食判定に係る 礫層厚の閾値に関する実験

西村 亜子¹・小林 昭男²・宇多 高明³・野志保仁⁴

¹ 三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒141-0032 東京都品川区大崎 1-11-1 15 階)
E-mail: nishimura-ako@mccnet.co.jp

² 正会員 日本大学理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: kobayashi.akio@nihon-u.ac.jp

³ 正会員 (一財) 土木研究センターなごさ総合研究所兼日本大学海洋建築工学科
(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)
E-mail: uda@pwrc.or.jp

⁴ 正会員 日本大学理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: noshi.yasuhito@nihon-u.ac.jp

前浜に岩盤または beach rock など不透過の物体が埋まっている場合、波の遡上時の戻り流れおよび浸透流が変化し、前浜の堆積侵食状況に変化が現れる可能性がある。本研究では、礫浜下に岩盤がある状況を想定し、岩盤上の礫層厚と岩盤の先端位置を変化させたときの前浜の侵食堆積機構を2次元移動床模型実験により調べた。礫層厚と岩盤の先端位置を全体で25通り変えた実験により、前浜の堆積侵食の判定に係る礫層厚の閾値を明らかにした。

Key Words : foreshore change, beach rock, gravel beach, cross-shore sand transport, movable bed experiment

1. まえがき

砂浜に岩盤やbeach rockなど不透過の物体が埋まっている場合、波の遡上時の戻り流れおよび浸透流が変化し、前浜の堆積侵食状況に変化が現れる可能性がある。例えば、神奈川県七里ヶ浜東端の稲村ヶ崎周辺では、近年侵食が急速に進んできているが¹⁾、この付近の海岸では、以前は砂浜下に埋まっていた岩盤が露出した場所が急激に広がってきている。図-1は、稲村ヶ崎の西400 m、遠方に江ノ島を、また近景に照明塔(破線の○印)を望む同一地点での2017年10月5日と2018年11月14日の海浜状況の変化を示す。2017年には岩盤がわずかに現れていたのみであったが、2018年には国道下にあった植生帯が消失するとともに、わずかに見えていた岩盤の汀線側の砂浜が消失している。この事例は、侵食とともに岩盤上の砂礫の層厚が減少し、遡上波の戻り流れが強まったことが侵食助長の一因となった可能性を示唆する。同様に、石川ら²⁾は、遠州灘海岸東部の御前崎付近では汀線近傍に岩礁域が広がり、その上に薄く砂礫が載っていたが、この海岸でも岩盤により砂礫層への浸透が妨げられた結果侵食が進んだと推定し、これに伴い土砂の動きやすさが増すと考えてモデル化を図った。しかしながらその物理

機構はなお十分明らかではなかった。本研究では、礫浜下に岩盤が埋まっている状況を想定し、岩盤の位置と岩盤上の礫層厚を様々変えた場合の前浜の堆積侵食機構について2次元移動床模型実験により調べた。なお、全体のうち7ケース分の実験結果は既に報告した³⁾が、本研究では、岩盤上の礫層厚と岩盤の先端位置を様々変化させて25ケースの実験を行い、前浜の堆積侵食を判定に係る礫層厚の閾値を明らかにした。

図-1 侵食による前浜での岩盤の露出(神奈川県七里ヶ浜)

2. 実験方法

幅0.4 m, 長さ8 mの2次元造波水路を用いて移動床実験を行った³⁾。実験時の水深は0.35 mとし, 水路端に十分強い浸透流が起こるように中央粒径7 mmの礫を敷いた模型海浜を製作した。実験縮尺は1/30を想定し, フルードの相似則に基づいて模型諸量を定めた。実験には規則波を作用させ, 汀線沖3 mに容量式波高計を設置して波浪条件を設定した。実験では, 波の作用で岸向き漂砂が卓越してバームが形成されるよう底質材料として礫を用い, これに入射波高5 cm, 周期1.5 sの波浪を作用させた。その際の初期勾配は1/5とした。この条件では, 堀川・砂村の前浜の堆積侵食の判定基準のC値³⁾は0.6となり, 岸向き漂砂の卓越条件を満足する。予備実験によれば, 礫バームは30分程度の作用時間で十分発達し, 安定状態に達することが確認されたことから, 本実験での波の作用時間は30分とした。いずれの実験でも波を作用させて縦断形変化を起こした後, ガラス張り水路の側面からの写真撮影により縦断形を測定した。なお, いずれの実験も同じ条件で2回実験を繰り返し, 実験結果の再現性を確認した。

実験では, 図-2にその定義を示すように, 礫層厚 D を0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 cmと8通り変化させるとともに, 岩盤の先端位置 (L) を初期汀線の陸側7.5 cm ($L = -7.5$ cm) より初期汀線の沖10 cm ($L = 10$ cm) まで

図-2 礫層厚 D と汀線から岩盤の先端までの距離 L の定義

表-1 実験条件

ケース1 ($D = 0$ cm)	1	2	3	
L (cm)	-10	-7.5	0	
ケース2 ($D = 0.5$ cm)	1	2	3	
L (cm)	-7.5	-5.0	-2.5	
ケース3 ($D = 1.0$ cm)	1	2	3	4
L (cm)	-5.0	-2.5	0	5.0
ケース4 ($D = 1.5$ cm)	1	2	3	4
L (cm)	-2.5	0	2.5	5.0
ケース5 ($D = 2.0$ cm)	1	2	3	4
L (cm)	-10	-7.5	-5.0	-2.5
ケース5 ($D = 2.0$ cm)	5	6	7	8
L (cm)	0	2.5	5.0	7.5
ケース6 ($D = 3.0$ cm)	1			
L (cm)	15			
ケース7 ($D = 4.0$ cm)	1			
L (cm)	20			
ケース8 ($D = 5.0$ cm)	1			
L (cm)	25

図-3 岩盤なしの場合の縦断形変化

8通り変化させ, D と L の組み合わせにより全体で25ケースの実験を行った。表-1には全25ケースの条件をまとめて示す。

3. 岩盤なしの場合の実験結果

岩盤なしの条件で礫浜に波を作用させた場合の縦断形変化を図-3に示す。図の上段は写真撮影結果を, 下段は写真から読み取った縦断形変化を示す。波を作用させると, 汀線沖が掘られて礫は岸向きに運ばれ, 高さ6.4 cmのバームが形成された。この時バームの前浜勾配は1/1.5, バームの陸側斜面の勾配は1/1.9であった。また, バーム背後の斜面と初期斜面との交点を遷急点と定義すると, 遷急点の高さは3.2 cmにあった。さらに波による地形変化の限界水深 h_c は5.2 cmにあった。図-3に示す海浜変形では, 前浜堆積量が汀線沖の侵食量より多いが, この理由は, 断面実験ではあるものの水路内での3次元変化が重なったことによる。図-3のように岩盤が埋まっている自然条件では, 前浜上に礫が堆積して三角形のバームが形成された。以下の実験では, この実験結果を比較の基準とし, 礫層厚と岩盤の先端の位置を変えた場合の前浜の堆積侵食状況の変化について調べた。

4. 岩盤上の礫層厚 D の違いが前浜変形に及ぼす効果

(1) 岩盤の先端を初期汀線の陸側5.0 cm ($L = -5.0$ cm) とした場合

岩盤の先端位置を初期汀線の陸側5.0 cmに保ちつつ, 礫層厚 D を0.5, 1.0, 2.0 cmと次第に大きくしたケース2-2, 3-1, 5-3の縦断形変化を, 岩盤なしの基本実験の結果とともに図-4に示す。岩盤なしと比べて D が0.5 cmと岩盤上の礫層厚が小さいケース2-2では, 礫層への浸透が十分起こらず, 結果的に戻り流れが強くなったこと

図-4 岩盤の先端を初期汀線の陸側 5.0 cm ($L = -5$ cm) に保って礫層厚を変えた場合の縦断形変化

図-5 岩盤の先端を初期汀線の陸側 2.5 cm ($L = -2.5$ cm) に保って礫層厚を変えた場合の縦断形変化

図-6 岩盤の先端を初期汀線上 ($L = 0$ cm) に保って礫層厚を変えた場合の縦断形変化

で前浜での堆積は起こらず、岩盤の海側端には戻り流れにより局所洗掘が起きた。このように冲向きに運ばれた礫は、沖合の-1.3 cm から-8.5 cm の間で広く堆積した。しかし D が 1.0 cm と増すと (ケース 3-1), $D = 0.5$ cm の場合と異なり、前浜には礫が打ち上げられバームが形成された。その際、バーム高は 6.1 cm, 前浜勾配は 1/1.7 であり、岩盤なしのバーム高 6.4 cm より低く、かつ前浜勾配も緩くなった。しかし遷急点の高さは、岩盤なしの場合の 3.2 cm から 4.0 cm まで増加した。さらに D を 2.0 cm と大きくしたケース 5-3 では、 $D = 1.0$ cm の場合と前浜勾配はほぼ同一となったが、バーム位置が $D = 1.0$ cm の場合よりわずかに汀線側となり、またバーム高もわずかに低下した。バーム背後の遷急点の高さも $D = 1.0$ cm の場合の 4.0 cm から 3.8 cm まで低下し、岩盤なしの 3.2 cm へと近づいた。一方、 h_c は $D = 1.0, 2.0$ cm の順に 5.2, 6.0 cm と、 D の増加とともに増大した。

(2) 岩盤の先端を初期汀線の陸側 2.5 cm ($L = -2.5$ cm) とした場合

岩盤の先端位置を初期汀線の陸側 2.5 cm ($L = -2.5$ cm) に保ちつつ、岩盤上の礫層厚を 0.5, 1.0, 1.5 cm と変えたケース 2-3, 3-2, 4-1 の縦断形を岩盤なしの実験結果とともに図-5 に示す。岩盤なしと比較して、 $D = 0.5$ cm (ケース 2-3) では、岩盤上の礫層厚が小さいため礫層への浸透が十分起こらず、戻り流れが強いためにバームは形成されず礫は冲向きに運ばれた。その際、 $D = 0.5$ cm,

$L = -5.0$ cm としたケース 2-2 では岩盤の海側端で最大 1.7 cm の局所洗掘が起きたが、同じ礫層厚であるものの岩盤の先端が汀線へと近づいたケース 2-3 では、局所洗掘量が 0.9 cm まで減少した。さらに、 $D = 1.0$ cm, $L = -5$ cm の場合 (ケース 3-1) では前浜堆積が起きてバームが形成されたのと全く異なり、 $D = 1.0$ cm, $L = -2.5$ cm の場合 (ケース 3-2) では礫は冲向きに運ばれた。同じ礫層厚でも、岩盤の先端が初期汀線に近づくとき侵食性に変わるのが分かる。これらに加え、ケース 2-3, 3-2 とともに礫の冲向き移動時の堆積域の沖側限界の水深は、3.7 cm (ケース 2-3), 5.1 cm (ケース 3-2) と、礫層厚の大きいほうが沖側限界の水深が増加した。しかし $D = 1.5$ cm (ケース 4-1) では、 $D = 1.0$ cm の場合と一転し、前浜に礫が打ち上げられてバームが形成された。その際、バーム高は 5.5 cm, 前浜勾配は 1/1.7 であり、岩盤なしのバーム高 6.4 cm より低く、かつ前浜勾配もやや緩くなった。しかし遷急点の高さは岩盤なしの 3.2 cm から 4.3 cm まで増加した。

(3) 岩盤の先端を初期汀線 ($L = 0$ cm) とした場合

岩盤の先端位置を初期汀線にそろえた上で ($L = 0$ cm), 岩盤上の礫層厚 D を 0, 1.0, 1.5, 2.0 cm と変えたケース 1-3, 3-3, 4-2, 6-5 の縦断形を岩盤なしの実験結果とともに図-6(a),(b)に示す。 $D = 0, 1.0, 1.5$ cm の場合、岩盤上の礫は全て沖へと運び去られ、バームは形成されなかった。しかし $D = 2.0$ cm では礫が岸向きに運ばれ、バー

ムが形成された。このときバーム高は 5.5 cm, 前浜勾配は 1/1.7 であり, 遷急点の高さは岩盤なしの 3.2 cm から 4.4 cm と大きく増加した。 $D = 2.0$ cm の場合, 他のケースと比べ浸透流量が多く, 戻り流れが小さくなることでバームが形成されたと推察される。

(4) 岩盤の先端を初期汀線の沖 5 cm ($L = 5.0$ cm) とした場合

岩盤の先端位置を初期汀線の沖 5 cm ($L = 5.0$ cm) に定めた上, 礫層厚 D を 1.0, 1.5, 2.0 cm と変えたケース 3-4, 4-4, 5-7 の縦断形変化を岩盤なしの実験結果とともに図-7 に示す。 $D = 1.0, 1.5$ cm の条件では, 岩盤上の礫は沖へ運ばれたが, 礫層厚が 2.0 cm の場合バームの形成が進んだ。その際, バーム高は 5.5 cm, 前浜勾配は 1/1.7 であり, 前浜勾配は岩盤なしの 1/1.5 と比べて減少した。一方, 遷急点の高さは岩盤なしの 3.2 cm から 5.7 cm まで増加した。岩盤の先端が汀線より沖にある場合, $D = 1.0, 1.5$ cm では礫の沖向き移動が顕著であったが, $D = 2.0$ cm と礫層厚が大きくなると前浜では侵食から堆積へと逆モードの地形変化が起きたことが分かる。すなわち, 岩盤が汀線より沖まで広がっていた場合, 岩盤上の礫層厚が大きければ前浜堆積が起こるが, 礫層厚が 1.5 cm 程度の限界値を下回ると, 斜面上の礫は戻り流れの増大のため急激な前浜侵食をもたらすことが分かった。

図-7 岩盤の先端を初期汀線沖 5.0 cm ($L = 5.0$ cm) に保って礫層厚を変えた場合の縦断形変化

5. 汀線から岩盤先端までの距離 L の違いが前浜変形に及ぼす効果

前節では, 岩盤の先端位置を固定した上で礫層厚を変えた場合の前浜の堆積侵食状況について調べた。次に, 礫層厚 D を 1.0, 1.5, 2.0 cm と保ちつつ岩盤の先端位置を初期汀線の陸側 2.5 cm, 汀線, 海側 2.5, 5.0 cm と変えて岩盤上の礫層厚の違いが前浜の変形に及ぼす効果について調べた。ケース 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 がこれに該当する。

(1) 礫層厚 1.0 cm の場合

礫層厚 D を 1.0 cm に保ちつつ岩盤の先端位置を初期汀線の陸側 2.5 cm, 汀線, 海側 2.5, 5.0 cm と変えたケース 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 の縦断形変化を, 岩盤なしの実験結果とともに図-8(a),(b) に示す。岩盤の先端を初期汀線より 5 cm 陸側としたケース 3-1 では, 前浜に礫が堆積してバームが形成された。しかし岩盤の先端位置が初期汀線より 2.5 cm 陸側, 初期汀線およびその沖側としたケース 3-2, 3-3, 3-4 ではいずれの場合もバームは形成されず, 前浜の礫は沖向きに運ばれた。このように礫層厚が同じ 1.0 cm であっても, 岩盤の先端位置が前浜の堆積侵食に大きな違いをもたらすことが分かった。バームの形成が起こりやすい礫であっても, 岩盤の先端が初期汀線の陸側 2.5 cm より海側にある場合, 沖向き漂砂が顕著となることが明らかで, 岩盤が礫層の一部と置き換わることで礫層への浸透が妨げられる結果, 沖向き流れが助長されて前浜上の礫の沖向き移動が助長されたと考えられる。

(2) 礫層厚 1.5 cm の場合

同様にして礫層厚 D を 1.5 cm に保ちつつ初期汀線から岩盤の先端までの距離を -2.5, 0, 2.5, 5.0 cm と変えたケース 4-1, 4-2, 4-3, 4-4 の縦断形変化を岩盤なしの結果とともに図-9(a),(b) に示す。岩盤の先端が初期汀線ないしそれより沖側としたケース 4-2, 4-3, 4-4 ではバームは形成されず, 前浜の礫は沖向きに運ばれた。礫の沖向き移動状況は図-7 に示した $D = 1.0$ cm の場合とよく似た結果が得られた。すなわち, 礫層厚が 1.0, 1.5 cm の場合, 岩

図-8 礫層厚を 1.0 cm に保って L を変化させた場合の縦断形変化

盤の先端が汀線の陸側2.5 cmにある場合にのみ前浜堆積が起き、岩盤の先端が海側に移ると前浜の侵食が助長されたことが分かる。

図-9 礫層厚を1.5 cmに保って L を変化させた場合の縦断形変化

図-10 礫層厚を2.0 cmに保って L を変化させた場合の縦断形変化

図-11 バームの面積 S 、バーム背後の遷急点の高さと L の関係

(3) 礫層厚2.0 cmの場合

礫層厚 D を2.0 cmに保ちつつ岩盤の先端位置を汀線の陸側5.0 cm, 汀線, 海側5.0 cmと変えたケース5-3, 5-5, 5-7の縦断形変化を図-10に示す。礫層厚が2.0 cmと大きい場合、いずれのケースとも汀線沖が掘られ、そこから礫が岸向きに運ばれてバームが形成された。その場合、岩盤の先端位置が海側となるほどバームが陸側奥深くまで発達し、遷急点の高さもケース5-3, 5-5, 5-7の順にそれぞれ3.8, 4.4, 5.7 cmと高まった。図-10では、岩盤の先端位置が海側となるほど前浜堆積量が増し、礫層厚が2.0 cmと最も大きい場合、岩盤が海中へと突き出るほど前浜堆積が促進される傾向が認められる。そこでケース5-3, 5-5, 5-7でのバームの断面積 S を算出し、これと汀線からの岩盤の先端までの距離 L 、およびバーム背後の遷急点の高さの関係を調べた結果を図-11(a),(b)に示す。バームの面積およびバーム背後の遷急点の高さは L と比例関係にあり、岩盤の先端が海側にあるほどバームの堆積土砂量が増大することが分かる。同時に遷急点の高さも増加し、奥深い位置まで礫が運び込まれたことが分かる。図-11(c)はバームの断面積 S とバーム背後の遷急点の高さの関係を示すが、バーム背後の遷急点の高さとバームの堆積量は正比例の関係にあり、岩盤の先端が沖側にあるほど岩盤上への波の遡上高が高まり、前浜により多くの礫が運ばれることが分かった。

6. 前浜の堆積侵食の判定に係る礫層厚の閾値と岩盤の先端位置の関係

上記の実験によれば、岩盤上の礫層厚と、初期汀線を基準とした岩盤の先端位置を様々変化させたとき、前浜に礫が堆積してバームが形成される場合と、逆に前浜上の礫が沖へと運び去られる場合とに二分されることが分かった。礫層厚と岩盤の先端位置によりこれらが明瞭に区分されたことから、全25ケースの実験結果を基に前浜の堆積・侵食の限界条件を求めたのが図-12である。図

図-12 前浜の堆積侵食を区分する限界線

-12 では前浜の堆積侵食を区分する限界線を破線で示す。この限界線は、初期汀線から陸側 10 cm 離れた高さ 2 cm の地点 (A) より海浜下となり、初期汀線下 2 cm の深さの地点 (B) まで線形的にその深さが増し、その後 2 cm の一定の厚さを保っており、この限界線より陸側に岩盤の先端がある条件で前浜堆積が起こる。逆に岩盤の先端がこの限界線より海側に突出する条件では、礫は冲向きに運ばれてバームが形成されることが分かった。岩盤の位置が初期汀線より陸側にある場合には、侵食堆積の判定に係る礫層厚が次第に低下し、岩盤の先端が陸側に 5 cm 以上離れると前浜の堆積侵食には岩盤が影響せず、前浜で堆積が起こる。岩盤の先端が図-12 の直線 AB より海側に突出すると礫層内での浸透が阻害され、結果的に戻り流れが強まって礫の冲向き移動が助長されたことが上記の原因と考えられる。

7. まとめ

二次元移動床模型実験により、模型海浜の礫浜に不透過の岩盤模型を埋め込み、岩盤の先端位置を変化させた場合の前浜堆積侵食の違いを調べた。岩盤上の礫層厚が 1 cm と薄い場合、岩盤の先端が汀線より陸側にあればバームが発達したが、岩盤の先端が汀線ないし汀線沖にある場合にはバームは形成されず、初期に岩盤上に載っていた礫は沖へ運び去られた。これに対し、岩盤上の礫層厚が 2 cm と厚い場合、岩盤の先端が汀線より陸側、汀線、汀線より沖のいずれのケースでも前浜での礫の堆積

が顕著であり、岩盤の先端が海側になるほど前浜上での礫の堆積量が増すという結果が得られた。すなわち、岩盤上の礫層厚が厚い場合には、それが薄い場合と逆の傾向となり、前浜堆積が助長された。このように岩盤上の礫層厚は前浜の堆積侵食に大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究は、小規模な模型実験において岩盤上の礫層の範囲と厚みを変えたとき、前浜の堆積侵食を区分する閾値があることを明らかにしたもので、この結果が実海岸の現象にどこまで適用可能かどうかは明らかにされていない。これらについては今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎, 細川順一, 蛸 哲之: 七里ヶ浜の長期的海浜変形と海浜置砂による砂浜振幅, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, pp.I_570-I_575, 2017.
- 2) 石川仁憲, 宇多高明, 古池 鋼, 貝沼征嗣, 戸田晃裕, 津島康弘: 複合 6 要因に起因する東部遠州灘海岸の侵食機構の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_847-I_852, 2018.
- 3) 西村亜子, 小林昭男, 宇多高明, 野志保仁: 砂浜下の岩盤による遡上波の浸透抑制に伴う冲向漂砂の助長, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I_331-I_336, 2019.
- 4) 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.193-199, 1974.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

CHANGE IN SAND TRANSPORT OWING TO CHANGE IN SEAPAGE FLOW DURING WAVE RUN-UP WHEN ROCKS ARE BURIED UNDER FORESHORE

Ako NISHIMURA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA and Yasuhito NOSHI

When impermeable objects such as rocks or beach rocks are buried under the beach face, the return flow and seepage flow during wave run-up will change, causing the change in sand deposition and erosion of the foreshore. A two-dimensional movable bed experiment was carried out to investigate foreshore changes under the condition that rocks are buried under the foreshore composed of gravel, while changing the location of the model rock and the thickness of gravel layer over the rock. From the experiment of 25 cases, it was found that the direction of the cross-shore sand transport strongly depended on the location and thickness of the gravel layer.