浸透流による礫浜のバーム高と前浜勾配の 低減効果

宇多 高明¹・石川 仁憲²・野志 保仁³・芹沢 真澄⁴・石野 巧⁵
鈴木 悟⁵・岡本 光永⁵

¹正会員 一般財団法人土木研究センター常務理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋
建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

²正会員 一般財団法人土木研究センター河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

E-mail: ishikawa@pwrc.or.jp

³正会員 日本大学助教授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

⁴正会員 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

E-mail: coastseri@nifty.com

⁵静岡県沼津土木事務所工事第1課 (〒410-0055 静岡県沼津市高島本町1-3)

E-mail: takumi1_ishino@pref.shizuoka.lg.jp

外海・外洋に面した砂礫海岸における放水路の吐口ではしばしば閉塞が起こり、治水上の問題が生じる。本研究では、礫浜のバーム背後に設置され、閉塞が起こらずに有効に機能している放水路の排水メカニズムについて現地調査と移動床模型実験により調べた。これにより、礫浜を浸透して流れる吐口からの浸透流量が大きいほど前浜勾配とバーム高が低下し、放水路吐口からの排水が容易になることを見出した。さらに、実験で得られた地形変化が等深線変化モデルにより再現できることを確認した。

Key Words : seepage flow, gravel beach, berm height, field observation, movable-bed experiment

1. まえがき

外海・外洋に面した砂礫海岸、例えば静岡県の富士海岸や三重県の七里御浜海岸などでは、背後地の排水を行うために汀線を横切る放水路が設置されているが、放水路の吐口ではしばしば閉塞が起こり、治水上の問題が生じている。一方、外海・外洋に面した砂礫海岸では、入射波高が高いため高いバームが発達するが、バーム背後に吐口が設置された富士海岸の新中川放水路では閉塞を免れ、有効に機能している。本研究では、放水路の閉塞対策を考える上での基礎研究として、新中川放水路での排水メカニズムについて、現地調査(2014年12月24日)と二次元水路を用いた縮尺1/50の移動床模型実験により調べた。この結果、吐口からの排水が礫浜を浸透して流下する条件では、浸透流量が大きいほど前浜勾配とバーム高が低下し、放水路吐口からの排水が容易になること

を突き止めた。

2. 新中川放水路での観察

図-1には新中川放水路周辺の衛星画像を示す。新中川放水路は沼津港の北北西1.45 kmに位置する。この放水路は、東側の馬蹄形の旧吐口と西側の新吐口からなり、現況汀線に対してやや左回り(沿岸漂砂の下手)の方向に伸ばされている。また、東側の旧吐口では段落ち流れが出ており、吐口前面から新吐口へと繋がる池が形成されているが、この池の海側には幅12 mの砂州が連続して伸びており、吐口から砂州を横断して海へと伸びた流路は存在しない。旧吐口から段落ち流れによりある流量が流れ込んではいるが、海へ繋がる流路が形成されていない点は、吐口からの流水の全量が砂州を横切る浸透流として海へ流出していることを示唆する。一方、放水路の吐

図-1 新中川放水路周辺の衛星画像

写真-1 新中川放水路の旧吐口（馬蹄形）と新吐口

写真-2 旧吐口からの流水の浸透

口前面では汀線がやや凹状となっているが、このことは上記の砂州を横断する浸透流の発達と密接な関係があるように思われる。現地踏査ではこの点を考慮しつつ吐口周辺の海浜状況を詳しく調べた。

まず、写真-1は旧吐口（馬蹄形）と新吐口（矩形）の状態を示す。旧吐口は沖向きに開口しているが、新吐口はこれと直角、すなわち汀線方向（東向き）に開口している。新吐口の前面には大量の礫が堆積し、吐口のほぼ1/2を砂礫が埋めている。一方、旧吐口では写真-2のように流水は吐口近傍で急速に浸透していた。なお、旧吐口の敷高はT.P.+0.34 mにあり、踏査当日の流量は0.8 m³/s

写真-3 浸透流が汀線へと噴出している場所

写真-4 バームを形成している礫の径

程度であった。旧吐口からの流水はいったん東向きに流れた後、全量が礫層に吸い込まれていた。また旧吐口の東側隣接部には高いバームAが形成されていたが、このバームの吐口側は安息勾配斜面（B）で切られていた。斜面Bは旧吐口からの流量が増加して砂州がフラッシュされた場合、側方侵食により形成された流路の側面が残されたものである。現況で旧吐口の正面にもバームが形成されているが、バーム高は隣接部の自然状態のバームと比べて高さが低かった。写真-3は、新吐口の手端上から東向きに望みつつ、旧吐口からの浸透流が汀線へと噴出している付近の状況を示す。浸透流の流出箇所では汀線およびその陸側斜面が凹状となっている。この状況は、図-1で吐口前面の汀線が凹状となっていた点と整合的である。写真-4は、旧吐口前面に堆積している海浜構成材料を撮影したもので、礫の径は5～10 cmであった。

対象海岸に來襲する年数回波は $H_{1/3}=2\sim3$ m、 $T_{1/3}=11$ s程度であるが、現地調査ではとくに放水路周辺でのバーム高と前浜勾配の変化に着目した。まず、旧吐口前面でのバーム高は水面上2.1 mであった（写真-5）。これに対し、吐口の東側隣接部でのバーム高は写真-6に示すように水面上3 mと、旧吐口前面のほうが0.9 m低かった。一方、前浜勾配については、旧吐口の西側隣接地点では写真-7に示すように1/2.5であったのに対し、浸透流の流出箇所での前浜勾配は1/4（写真-8）と前浜勾配の低減が見られた。さらに礫層を通過して浸透流が流出している場所では、写真-9のようにカスプの中央と同様、強い戻り流

写真-5 ポール位置でのバーム高：水面上2.1m

写真-7 バームの海側勾配：1/2.5

写真-6 吐口の東側隣接地にあるバーム高：3m

写真-8 浸透流の流出地点でのバームの海側勾配：1/4

れが発生し、カスプのapexと同様な窪み¹⁾ができ、そこでは浸透流が冲向きに集中的に流れ出ているために沖からの寄せ波の波高低下も観察された。

以上のように、礫層を通過して浸透流が冲向きに流れ出る場所ではバーム高が低下するとともに前浜勾配が低減し、窪んだ地形が形成されることが確認された。ここで芹沢ら²⁾による平衡勾配概念を参考にすれば、浸透流は返し波の作用を強め、結果として斜面勾配が緩やかになる作用をもたらすと考えられる。すなわち浸透流は砂礫の持つ平衡勾配を小さくする効果を発揮し、バームの海側の斜面の勾配が緩くなるように変形するため結果的にバーム高の低下を招いたと推察される。

3. 実験方法

2.で述べた現象を二次元移動床実験により調べた。実験には、長さ8 m、幅0.4 m、水深35 cmの2次元水槽を用い、水槽中に中央粒径 $d_{50}=3.3$ mmの礫を用いて初期勾配1/5の模型海浜を整形した。実験縮尺は1/50とし、水理諸元はフルードの相似則に従って定めた。海浜部には図-2に示すように10 cm間隔のメッシュを付け、側面のガラス面からの写真撮影により縦断形変化を測定した。既往研究によれば、この種の小規模移動床模型実験では実験特有の漂砂が起こる。これについては、砂の粒径 d 、波高 H 、周期 T 、海浜勾配 $\tan\beta$ を用いて、次の堀川ら³⁾の C パラメータを導入して検討した。

写真-9 浸透流の流出による強い戻り流れ

$$H_0/L_0 = C(\tan\beta)^{0.27} (d/L_0)^{0.67} \quad (1)$$

式(1)によれば、 C が4以下では砂礫は岸向きに移動しバームが形成される一方、8以上では冲向きの砂移動が起こるとされている。本研究では、放水路吐口への堆砂を問題とすることから、岸向き漂砂が発生する条件としなければならない。実験は規則波で行うこととし、まず予備実験を行い、バーム高が6 cm（現地換算3 m）となる波浪条件を選定した。これによると、波高3 cm、周期1.3 sの波の場合上記条件が満足された。この波浪条件は、現地換算では $H=1.5$ m、 $T=9.2$ sとなる。さらに、バームは実験時間3時間程度で十分発達したことから、実験時間は3時間とした。表-1には実験条件をまとめて示す。

実験においては、水路側壁に沿わせて幅10 cmの透明アクリルを用いて放水路模型を設置し、縦断形はガラス面の位置で測定した。放水路の吐口を汀線付近とすると

図-2 実験装置と初期地形

図-3 放水口の形状と放水ポンプとの連結

(a) 側面写真

(b) 正面写真

図-4 水路の設置状況

吐口前面での堆砂量が大きいと考えるため、吐口は初期汀線から50 cm（現地換算25 m）セットバックさせ、バームの陸側とした。放水路模型の敷高は平均水面下4.5 cmとした。放水路からの放流は、ポンプからホースを通じて一定流量が流れるようにした（図-3）。図-4は放水路の設置状況を示す。実験では、バーム高6 cmを再現できる波浪条件下で一定流量を与えた場合の縦断形変化を測定した。実験流量は、現地流量0.3 m³/s（実験値17 l/min）を基本として与え、その倍数で流量を6段階変えた（表-2）。また実験でのバーム背後の内水位は画像解析により測定した。

4. 実験結果

吐口前面にバームが十分発達した状態において放水路から一定流量を流すと、まずバーム背後の内水位が上昇

表-1 実験条件

水槽	2次元水槽 長さ8m, 幅0.4m, 水深35 cm
造波機	多方向不規則波造波方式（スネーク式）, $H_{max}=10$ cm, $T=0.5\sim 2.0$ s
実験方法	移動床模型実験（バーム高6 cmを再現）
実験縮尺	1/50
実験時間	3時間（予備実験より設定）
実験波浪	規則波： $H=3$ cm, $T=1.3$ s （現地 $H=1.5$ m, $T=9.2$ s）
粒径	$d_{50}=3.3$ mm（現地 $d_{50}=16.5$ cm）
海浜模型	移動床, 初期海底勾配1/5
放水路模型	アクリル製, 幅10 cm, 高さ7.1 cm, 長さ30 cm, 吐口敷高4.5 cm

表-2 実験ケース

ケース	1	2	3	4	5	6	7
流 模型値 Q_m (ml/s)	0	17	34	68	102	136	170
量 現地 Q (m ³ /s)	0	0.3	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0

した。内水位は次第に高くなり、バーム高より低いものの、波の遡上点より高い水位まで上昇すると、海側の水位と差ができ、この水位差により汀線への浸透流が生じた。ケース1～7の3時間経過後までの縦断形変化を図-5に示す。ケース1（維持流量なし）の場合、波の作用下で岸向き漂砂が起こり、高さ6.2 cmのバームが形成され、前浜勾配は1/1.8となった。このケースは他のケースとの比較の基本となる。ケース2（ $Q_m=17$ ml/s）では、バーム高は5.8 cm、前浜勾配は1/1.7であり、バーム高はケース1よりも0.4 cm低下したが、前浜勾配には大きな変化はなかった。ケース3（ $Q_m=34$ ml/s）の場合、バーム高は5.9 cm、前浜勾配は1/1.8で、バーム高はケース1と比べて0.3 cm低下したが、前浜勾配には変化が認められなかった。実験流量をさらに増加させ、ケース2の流量を倍増させ $Q_m=68$ ml/sとしたケース4では、バーム高は5.7 cmと、ケース1より0.5 cm低下しただけでなく、前浜勾配も1/1.9まで減少した。流量を $Q_m=102$ ml/sまで増加させたケース5では、バーム高は5.2 cmとケース1と比べ1.0 cm低下し、また前浜勾配は1/2.4まで緩くなった。流量を $Q_m=136$ ml/sまで増加させたケース6では、バーム高は5.0 cmとケース1と比べ1.2 cm低下し、また前浜勾配は1/2.3まで緩くなった。最後に、流量 $Q_m=170$ ml/sとしたケース7では、バーム高は4.0 cmとケース1と比べ2.2 cm低下し、また前浜勾配は1/2.5まで緩くなった。以上のように流量の増加とともにバーム高が低下し、前浜勾配が緩くなるという結果が得られた。表-3には測定結果をまとめて示す。なお、前浜勾配はガラス面に沿う測線で測定したが、横断方向に見ると前浜勾配が沿岸方向に変化するため循環流が生じていた。しかしながらここでは地形変化の3次元性は無視した。

図-5 3時間後の縦断面形 (ケース 1~7)

表-3 測定結果

ケース	1	2	3	4	5	6	7
流量	0	17	34	68	102	136	170
前浜勾配の逆数	1.8	1.7	1.8	1.9	2.4	2.3	2.5
バーム高 h_R (cm)	6.2	5.8	5.9	5.7	5.2	5.3	4.0
バーム高比 h_R/h_{R1}	1	0.93	0.95	0.92	0.84	0.86	0.64
内水位 (cm)	—	0.97	1.36	2.50	3.46	4.60	5.20

 図-6 実験流量 Q_m と内水位 WL の関係

表-3に示す測定結果より、流量 Q_m (ml/s) と内水位 WL (cm) の関係を調べたのが図-6である。両者には、

$$WL = 0.033 Q_m \quad (2)$$

の関係が成立し、流量の増加とともに内水位が上昇することが分かった。内水位の上昇は礫浜内を浸透し、海へと流出する流れを強める結果をもたらす。図-7には実験流量 Q_m とケース1に対するバーム高の比 (h_R/h_{R1}) の関係を示す。両者の間には、

$$h_R/h_{R1} = 1.0 - 0.0016 Q_m \quad (3)$$

の関係が得られ、流量の増加とともにバーム高が次第に低下する結果が得られた。さらに前浜勾配の逆数と実験流量 Q_m の関係を図-8に示す。この場合、

$$\cot\beta = 1.79 + 0.004 Q_m \quad (4)$$

という関係が得られた。すなわち実験流量 Q_m の増加とともに前浜勾配が緩くなるとともに、バーム高が低下することが分かった。この結果は、2で述べた新中川放水路での観察結果と一致している。

5. 等深線変化モデルによる再現計算

実験によれば、実験流量 Q_m の増加とともに前浜勾配が緩くなるという結果が得られた。そこで実験で得られた流量の違いによる前浜勾配を平衡勾配と置き換えて、芹沢ら²⁾の等深線変化モデルを用いて縦断面形変化の再現計算を行った。計算は、実験の100倍スケールで行い、計算結果を1/100に縮小して図化を行った。漂砂量の水深方向分布については、水面下では宇多・河野⁴⁾の3次式を、陸上部では三角形分布 (汀線で1, バーム頂で0) を与えた。なお、陸上部で宇多・河野の式を用いると、Z

図-7 実験流量 Q_m とケース 1 に対するバーム高の比 (h_R/h_{Ri}) の関係

図-8 実験流量 Q_m と前浜勾配の逆数 ($\cot\beta$) の関係

$>0.5h_c$ のとき関数値が負となり、この範囲の砂が動かなくなる。これを防ぐため陸上部では三角形分布を用いた。流量なしのケース 1 と、 Q_m を 170 ml/s としたケース 7 を対象とした計算結果を図-9 に示す。維持流量を増加させると前浜でのバーム形成時に緩勾配の斜面が形成されることが計算でも再現された。

6. まとめ

実験で用いた粒径 3.3 mm (現地換算 16.5 cm) と、新中川放水路吐口周辺での海浜構成材料 (粒径 5~10 cm の礫) は、オーダー的に同一の粒径レンジにあったことから、実験結果により新中川放水路での観察結果がほぼ説明できたと考えられる。海浜構成材料の粒径が大きいと、吐口からの排水による浸透流速が大きくなるので、寄せ波

図-9 流量の有無でのバーム形成状況の違い

時の作用が弱まり、この結果バーム高の低減と前浜の緩勾配化が起きたと推察される。礫浜に設置される放水路では、吐口をバーム位置より陸側に設けることで、波浪により直接水路内に土砂がうち込まれず、また水路前面のバーム高も低くなり、排水が容易になると考えられる。この結果は、閉塞問題に苦慮している他の放水路の対策立案にも参考になる。

参考文献

- 1) 柴崎 誠, 宇多高明, 芹沢真澄, 小林昭男, 前田友司: ビーチカスプの形成・維持機構, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.416-420, 2005.
- 2) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼, 熊田貴之: 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.496-500, 2002.
- 3) 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.
- 4) 宇多高明, 河野茂樹: 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.121-139, 1996.

(2015.3.18 受付)

REDUCTION IN BERM HEIGHT AND FORESHORE SLOPE DUE TO SEAPAGE FLOW UNDER GRAVEL BEACH

Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Yasuhito NOSHI, Masumi SERIZAWA,
Takumi ISHINO, Satoru SUZUKI and Mitsunaga OKAMOTO

Field observation was carried out on December 24, 2014 to investigate the closure conditions of the mouth of the floodway due to the deposition of gravel by waves, taking the Shin-nakagawa floodway flowing into the Fuji coast facing Suruga Bay as an example. A movable bed experiment with a model scale of 1/50 using a two-dimensional flume was conducted, while changing the discharge of the floodway. It was found that the berm height and foreshore slope were reduced due to the seepage flow under gravel beach.