暗渠型放水路の吐口内への堆砂機構 -現地実測と移動床模型実験-

石野 巧¹・鈴木 悟¹・岡本 光永¹・宇多 高明²・石川 仁憲³・
田中 博通⁴・居波 智也⁵・櫻田 哲生⁵

¹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

²正会員 一般財団法人土木研究センターなぎさ総合研究所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)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

³正会員 一般財団法人土木研究センターなぎさ総合研究所 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

E-mail: ishikawa@pwrc.or.jp

⁴正会員 東海大学海洋学部教授環境社会学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

⁵東海大学海洋学部環境社会学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

富士海岸にある沼川第二放水路では、東向きの沿岸漂砂によって運ばれてきた砂礫が放水路吐口から水路内へと侵入し、吐口を埋めて排水不良となる事態が発生している。本研究では、この放水路を対象として、高波浪時の水路内への堆砂実態を調べるとともに、水路が満砂状態に至る過程や維持流量を流した場合の水路内での堆砂状況を移動床模型実験により調べた。この結果、水路内の堆砂は、水路天板につくまで堆砂が進むとほぼ安定状態に達することが分かった。また、維持流量を流すと水路内の堆砂量が低減し、流量を与えた水路のみならずそれに隣接する水路の堆砂対策にも効果的であることが分かった。

Key Words : Numakawa-daini floodway, Fuji coast, sand deposition, movable-bed experiment

1. はじめに

富士海岸に設置されている沼川第二放水路では、東向きの沿岸漂砂によって運ばれてきた砂礫が放水路吐口から水路内へと侵入し、吐口を埋めて排水不良となる事態がしばしば発生している。この放水路は3つの水路からなる暗渠型放水路で、先端水深は2 m、吐口の敷高は1.1 mである。現地調査によれば、この放水路では漂砂下手側（東側）の1号水路での堆砂が最も著しく、たびたび満砂状態となる。これに次いで堆砂が著しいのが漂砂上手側（西側）であり、中央の水路ではこれまでにほとんど堆積しないという結果が得られている。この水路内の堆砂機構について、宇多ら¹⁾はBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形予測モデル）を用いて検討した。この結果、放水路吐口内へと波浪が侵入する際、土砂が波により運び込まれる機構がBGモデルによりある程度まで予測可能なことが明らかにされた。しかし、水路が満砂状態に至る過程や、維持流量を与えた場合の水路内での堆積状況などの予測はできていない。そこで本研究では、高波浪時における水路内での堆砂実態を調べるとともに、移動床模型実験により水路内での堆砂機構につ

いて解析した。

2. 沼川第二放水路内の堆砂の実態調査

沼川第二放水路が位置する富士海岸では、2014年8月7日24時に台風11号に伴い最大有義波高4.2 m（周期14.6 s）の高波浪が作用した。このとき江線に沿って発達していたバームが削り取られて緩勾配の海浜が形成され、同時に高波浪に伴い水路内では堆砂が生じた。図-1は、高波浪来襲前の2014年7月3日と、高波浪の作用後の8月14日における1号水路内の堆砂状況を示す。これより高波浪後吐口から陸側へ94.5 mまで堆砂が起き、約60 m間では水路の天井に付くまで堆砂が進む満砂状態となったこと

図-1 高波浪に伴う沼川第二放水路1号水路内の堆砂状況

写真-1 高波浪時の沼川第二放水路の状況（2014年8月7日）

写真-2 バームの海側斜面（2014年8月13日）

写真-3 西端に位置する3号水路の下流端での堆砂状況

写真-4 東端に位置する1号水路の下流端での堆砂状況

が分かる。

2014年8月7日～8月13日には放水路周辺と水路内の堆砂状況を調べた。写真-1には高波浪作用中の沼川第二放水路の空気孔基部の状況を示す。既に高波浪の襲来が始まっていたため、2014年8月7日には空気孔全体が現れ、基部を波が洗っていた。このとき空気孔の基部の高さはTP+3 mであった。一方、この海岸では、常時は砂礫の堆積によりバームの発達が良いが、高波浪時にはバームが削り取られ、バームを形成していた礫は汀線沖へ運ばれる。移動床模型実験ではこのような沖向き漂砂

の発生条件を選定した。写真-2は高波浪作用から6日後の8月13日撮影の放水路東側の前浜状況を示す。汀線からバーム頂へと1/10程度の一様勾配が形成され、空気孔基部は8月7日には露出していたが、8月13日までにはバームの再形成に伴い砂礫により埋まりつつあった。これより高波浪が襲来するとバームは短時間のうちに消失するが、その後の波浪作用によれば砂礫の堆積によりバームの復元もまた急速に進むことが分かる。8月13日における西端に位置する第3号水路の下流端（吐口）の状況を写真-3に示す。写真-2に示した汀線からバームに至る斜面と同様に、水路内は大量の堆砂によってほぼ一様勾配の斜面が形成され、表面には多数の大礫が水路東側側面から斜め西向きに斜交する区域に多く堆積していた。また、3号水路は完全閉塞していたが、水路の最奥部には浜崖が形成され、その直下到大礫が多数見られた。このような水路内の堆砂は、写真-4に示すように東端に位置する1号水路でも見られた。

3. 実験方法

実験には、東海大学海洋学部の長さ22 m、幅23 m、深さ1.2 mの平面水槽を用いた。平面水槽内に10 mの間隔を設けて導波板を設置し、この間を模型海浜とし、その中央に放水路模型を設置した（図-2参照）。この水槽には多方向不規則波造波装置が装着されており、 $H_{max} = 20$ cm、 $T = 0.5 \sim 5$ sの造波が可能である。模型縮尺は1/50とし、水理諸量はフルード則に従って縮小した。実験は不規則波実験とし、実験では修正Bretschneider-光易型のスペクトルを設定した。波浪条件の設定法の詳細については次節で述べるが、2013年の台風18号時に沼川第二放水路背後の後浜で撮影された遡上波の動画画像より汀線からの遡上距離を計測し、これを再現可能な波浪条件として、 $H_{1/3} = 13.3$ cm、 $T_{1/3} = 1.5$ sの模型波浪を設定した。

実験時の水位は平均海面とし、透明アクリル製の放水路模型を模型海浜に設置した。実験砂は、石野ら²⁾の実験と同様、 $d_{50} = 0.26$ mm（現地13 mm）の細砂を用いた。石野ら²⁾は、現地海浜の前浜勾配1/7、およびバーム高TP+3 mを縮率1/50の移動床模型実験で再現可能な波浪条件として、波高3.0 cm、周期1.2 s（現地 $H = 1.5$ m、 $T = 8.5$ s）の波浪を選定した。本研究でも、高波浪襲来前の初期地形としては、この条件で形成された沿岸方向に一様な縦断形を設定し、左向きの沿岸漂砂が卓越するよう汀線を波の入射角に対して10°傾けた。波の作用時間は90分間とした。予備実験によれば、この間水路内への堆砂が十分起こることが確認された。海浜形状は、台車上に固定したレーザー測位計を用い、沿岸方向0.5 m間隔の測線に沿って初期、造波30、60、90分後に岸沖方向5 cm間隔で測定した。入射波高は、容量式波高計を用いてサン

図-2 平面実験の計測範囲

図-3 沼川第二放水路の形状

ブリング間隔0.05 sで測定した。

実験は、維持流量の有無が図体内の堆積状況に及ぼす効果を調べるために2ケース行った。Case 1は維持流量を与えない実験であり、Case 2では維持流量として1, 3号水路の流入口を閉じた上で2号水路にのみ $Q_p = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_m = 110 \text{ ml/s}$)を与えた。沼川第二放水路は図-3に示すように3つの水路が先端部で繋がっているが、先に述べたように、東側(漂砂下手側)から西側の順に1, 2, 3号水路と呼ぶ。水路内の堆砂状況は、放水路の天板を撤去した後、1～3号水路の中央断面をレーザー測位計により計測

図-4 2013年9月の台風18号襲来時の波高と周期の経時変化

写真-5 高波浪時の波の遡上状況 (2013年9月16日)

した。なお、計測を行うために放水路天板の一部は取り外し可能であるが、強度上天板を取り外せない部分では、その上流・下流側での測定値より補間した。

4. 実験における高波浪の設定方法

2014年8月7日の台風11号来襲時の波の遡上状況は明らかでなかったため、実験では、2013年9月13日に小笠原諸島近海で発生し、9月16日に富士海岸に来襲した最低気圧960 hPaの台風18号による高波浪を対象とした。図-4は富士海岸の原観測所と久能沖での波浪観測による台風18号襲来時の有義波高と周期の経時変化を示す。原観測所では $H_{1/3} = 5.6 \text{ m}$ ($T = 13.5 \text{ s}$)、久能沖では $H_{1/3} = 8.0 \text{ m}$ ($T = 13.1 \text{ s}$)の高波浪が観測され、いずれも周期の長い高波浪であった。高波浪来襲時の沼川第二放水路での波の遡上状況は、2013年9月16日にVTR撮影により調べた。撮影中に波が最も遡上した午前10時59分の状況を写真-5に示す。これによれば、平均汀線からの遡上距離は147 mであった。実験ではこれを再現対象とし、実験波浪を $H_{1/3} = 13.3 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}$ としたとき模型上での遡上距離が291 cm (現地145.5 m) となって現地条件がほぼ再現された。なお、実験で設定した $H_{1/3} = 13.3 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}$ の波浪条件と、初期勾配1/7、および粒径0.26 mmを与えて堀川ら³⁾のC値を計算すると、 $C = 13.6$ となり、冲向き漂砂が卓越するタイプIの地形変化となった。

5. 実験結果

(1) 地形変化

図-5にはCase 1の初期地形、波作用90分後の海浜形状、および初期地形から90分後までの地形変化量を示す。高

図-5 初期地形および90分後の地形と地形変化量 (Case 1)

波浪が作用したため、急速な沖向き漂砂が起こり、初期汀線と平行に伸びていたバームが削り取られて砂が沖合へ運ばれ、-15 cm付近に堆積してバーが形成された。波が右回りの方向から斜め入射しているために、左向きの沿岸漂砂も生じ、放水路上手側から削り取られた砂は左向きにも運ばれた。また、放水路先端では局所洗掘により馬蹄形の深みが形成された。放水路両側の $X = \pm 100$ cm断面の縦断形変化を図-6に示す。図には放水路形状をグレーの線で示す。上手側の $X = 100$ cm断面では、初期に形成されていた高さ6 cmのバームは30分後までに完全に

図-6 $X = \pm 100$ cm断面における縦断形変化 (Case 1)

消失し、フラットな縦断形となった。この間、沖合の $Y = 440$ cm付近ではバーが形成された。 $X = -100$ cm断面でも $Y = 410$ cm付近にバーが形成されるとともに、 $Y = 370$ cm付近を中心として岸沖方向に $Y = 300 \sim 440$ cm区間では堆砂が進んだ。結果として $X = \pm 100$ cm断面の汀線付近は砂が削り取られて凹状の縦断形となった。汀線が後退して砂が沖合へと運ばれた点、および波の遡上点付近で局所的な堆砂が起きたことから、実験での海浜縦断形変化は汀線が後退し、バーが形成される堀川ら³⁾のタイプIの縦断形変化であったことが分かる。なお、 $X = 100$ cm断面では沖合のバーの発達にはほぼ停止する一方、海浜部の-10 cm以高では侵食が続いている。これに対し、 $X = -100$ cm断面では海浜部の-10 cm以高では侵食が停止したものの、沖合のバーは成長し続けている。これより、放水路上手側の海浜部が削られ、そこから放水路の下手方向へと運び去られた砂は沖合に堆積してバーの規模の増大に繋がっていることが分かる。次に、Case 2の波作用90分後の海浜形状と初期から90分後の地形変化量を図-7に、縦断形変化を図-8に示すが、Case 2はCase 1とほぼ同様な地形変化が起きたことが分かる。

(2) 水路内の堆砂状況

Case 1の水路内の堆砂状況を図-9に示す。各図には波作用後30, 60, 90分後の1, 2, 3号水路内の堆砂形状を示すとともに、 $X = 100$ cm断面での海浜縦断形を併せて示す。 $Y = 225$ cm付近にある凹部は、その上部の空気孔位置に対応している。空気孔位置ではいずれの水路でも堆砂量の局所的減少が起きている。水路内には30分後までに海側から砂が運び込まれ、 $X = 100$ cm断面での前浜勾配1/8.6

図-7 90分後の地形と地形変化量 (Case 2)

図-8 $X = \pm 100 \text{ cm}$ 断面における縦断形変化 (Case 2)

より緩い勾配を保ちながら堆砂が進んだ。1～3号水路の比較では、下手端の1号水路での堆砂が著しく、天板との間に1.1 cmの間隙を保ったまま水路奥へと砂が運び込

図-9 水路内の堆砂状況の変化 (Case 1)

まれ、最奥部に急勾配斜面をなして堆積した。1号水路に比べ2, 3号水路では堆積速度が遅く、かつ天板との間隙も1.9 cmと大きい。下手端に位置する1号水路での堆砂が著しいという結果は、BGモデルによる計算結果¹⁾とよい対応を示す。60分経過後、1号水路では天板につくまで堆砂が進み、堆砂の海側勾配は1/7.7と $X = 100 \text{ cm}$ 断面での前浜勾配1/8.8と近い値まで増加した。2, 3号水路でも堆砂が進み、水路奥へと砂が運び込まれた。最終的に、90分後では2, 3号水路では1号水路と同様に $Y = 190 \text{ cm}$ 付近（放水路先端から130 cm）まで砂が運び込まれた。この段階においては2, 3号水路では天板との間に隙間が残されているが、1号水路では60分後までに天板まで堆砂が進んだため堆砂状況に大きな変化は見られず、堆砂域の海側勾配は1/7.7を維持し、ほぼ安定状態に達した。このように1号水路では堆積速度が速いのに対し、2, 3号水路では1号水路に遅れつつも、ほぼ同一速度で堆砂が進み、90分後には各水路では $Y = 190 \text{ cm}$ 付近（放水路先端から130 cm）まで堆砂が進み、ほぼ同じ縦断形となった。

同様にしてCase 2の堆積状況を図-10に示す。沼川第二放水路は3つの水路からなるが、維持流量を流したのは2号水路のみである。この結果、維持流量を与えていない

図-10 吐口内の堆砂状況の変化 (Case 2)

1, 3号水路では次第に堆砂が進み、やがて1号水路は完全閉塞状態に近づいたのに対し、維持流量を与えた2号水路では90分経過後でも水路の天板と堆砂頂部の間に2.9 cmの間隙が保たれた。さらに維持流量の有無による影響を図-9と図-10で比較すると、図-3に示したように各水路は先端の吐口で繋がっているため、維持流量を流した場合に吐口からは冲向きの流れが起こる。この結果、維持流量なしのCase 1と比較してCase 2ではいずれの水路

も堆砂速度が低下した。維持流量を与えた2号水路ではCase 1と比べて堆砂量が大きく低減したが、それにとどまらず1, 3号水路でも堆砂量が低減した。このように、先端部で繋がった放水路で維持流量を流した場合、流量を与えた水路のみならずそれに隣接する水路でも堆積速度が低下し、堆砂量が低減した。

6. 結論

沼川第二放水路における高波浪時の水路内の堆砂機構について、現地調査と移動床模型実験により解析した。この結果、高波浪時に水路内では砂が海側から運び込まれて堆積するが、水路の天板につくまで堆砂が進んだ満砂状態になると、堆砂の海側勾配が自然海浜の前浜勾配に近づいてほぼ安定状態に達することが分かった。また、2号水路のみ維持流量を与えた場合、2号水路内の堆砂量を大きく低減できるだけでなく、維持流量を与えていない1, 3号水路でも堆砂速度が低下し、堆砂量が低減した。このことから、先端部が繋がった放水路で維持流量を流すと、流量を与えた水路のみならずそれに隣接する水路の堆砂対策にも効果的であることが分かった。

参考文献

- 1) 宇多高明, 石川仁憲, 芹沢真澄, 宮原志帆, 石野巧, 鈴木 悟, 岡本光永: BG モデルによる従来型暗渠放水路吐口への堆砂機構の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp.I_568-I_573, 2016.
- 2) 石野 巧, 岡本光永, 鈴木 悟, 宇多高明, 石川仁憲, 田中博通, 居波智也, 櫻田哲生: セットバック型放水路の機能性に関する移動床平面実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_709-I_714, 2015.
- 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.

(2017.3.15 受付)

SAND DEPOSITION INSIDE THE OUTLET OF ORDINARY-TYPE FLOODWAY-FIELD OBSERVATION AND MOVABLE-BED EXPERIMENT

Takumi ISHINO, Satoru SUZUKI, Mitsunaga OKAMOTO, Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Hiromichi TANAKA, Tomoya INAMI and Tetsuo SAKURADA

At the Numakawa-daini floodway located on the Fuji coast, sand originated from eastward longshore sand transport has been deposited into the outlet of the floodway, resulting in complete closure of the floodway. In this study, sand deposition inside the floodway owing to storm waves was investigated by field observation, and then a movable-bed experiment on the process of the deposition and the change in deposition given maintenance discharge was carried out. As a result, the deposition into the floodway was in a stable condition when the deposition reached the top of the floodway. Also, it was confirmed that the maintenance discharge was effective to decrease the amount of deposition of sand.