

下新川海岸の下飯野（園家）地先での 礫養浜の現地実験

宇多 高明¹・工藤 裕之²・高村 裕一³・辺見 聡⁴

¹ 正会員 （一財）土木研究センターなぎさ総合研究所兼日本大学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 (Corresponding Author)

² 国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所（〒380-0903 長野県長野市鶴賀字峰村 74）

E-mail: kudou-h2gy@mlit.go.jp

³ 国土交通省北陸地方整備局黒部川河川事務所（〒938-0042 富山県黒部市天神新 173）

E-mail: takamura-y84sy@mlit.go.jp

⁴ 正会員（株）東京建設コンサルタント海岸・海洋事業本部（〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6）

E-mail: henmi-s@tokencon.co.jp

下新川海岸において、主要な漂砂源であった黒部川の河床掘削土砂を用いて、下飯野地先において養浜の現地実験を行い、緩傾斜護岸ののり先に礫浜を復元する計画の妥当性について調べた。現地実験では、粒径 $d_1 = 20 \sim 100 \text{ mm}$ の礫 $1,000 \text{ m}^3$ と、粒径 $d_2 = 100 \sim 200 \text{ mm}$ の礫 $5,000 \text{ m}^3$ を離岸堤開口部に投入し、その移動状況を調べた。礫の投入後、深浅測量や UAV 調査などにより、礫浜の変形状況を追跡した。この結果、径が $d_1 = 20 \sim 100 \text{ mm}$ と $d_2 = 100 \sim 200 \text{ mm}$ と粒径が大きな礫は、礫径が大きいため平衡勾配も $1/2.4$ と大きく、礫は前浜にうちあげられてバームが形成された。礫は、離岸堤開口部背後から離岸堤端部背後へと移動して堆積した。これより、礫養浜により緩傾斜護岸ののり先に礫浜を形成できることが分かった。

Key Words : beach nourishment, gravel, Shimo-niikawa coast, topographic changes, detached breakwater

1. まえがき

下新川海岸は、急深な富山湾に突出した黒部川扇状地の外縁をなす海岸である。このため、主に冬季の高波浪が海岸線への法線に対して右回りの方向から斜め入射し、これにより西ないし南向きの沿岸漂砂を発達させている。過去には、黒部川の氾濫に伴って黒部川の流出土砂が扇状地の外縁に直接供給されることもあったが、氾濫防除のために黒部川の流路が原位置に固定されて以降、現況の黒部川河口より北側区域への漂砂の供給が停止した。また、扇状地の東端に1951年以降宮崎漁港が建設され、これにより西向き沿岸漂砂が阻止されたことにより、海岸北東部から侵食が発生し、侵食域が時間経過とともに南側へと広がってきた。さらに黒部川の河口右岸に隣接する入善漁港の近傍には海底谷が発達しており、この海底谷による西向き沿岸漂砂のトラップ、および深海への土砂流出も起きており、これもまた海浜土砂量の一つの損失原因となっている²⁾。こうした状況下で、下新川海岸では侵食対策として当初護岸の整備が進められ、その

後1976年からは離岸堤の建設も行われ、現在では護岸、離岸堤、副離岸堤、人工リーフなどの防護施設によりようやく海岸防護が図られている。現在では、ほぼ全域に離岸堤・副離岸堤が設置されて防護が図られているが、扇状地の東端近くに流入する小川(Ogawa R.)からのわずかな土砂供給を除けば、海岸への土砂供給がほぼ途絶えているため前浜はほとんどなく、離岸堤背後にある緩傾斜護岸に直接波が打ち寄せる状況となっている。このため、前浜の存在しない地先では、高波浪時の越波や護岸基部の水深増加に伴う護岸の被災の危険度が増している。さらに緩傾斜護岸の前面に砂浜がないため、汀線に人が近づきにくく、背後の公園と海岸との一体的利用もできない状態となっている。そこで下新川海岸への主要な漂砂源であった黒部川の河床掘削土砂を用いて養浜を行い、離岸堤背後にある緩傾斜護岸ののり先に礫浜を復元する計画を立て、その第一歩として、礫養浜の現地実験を行った。この現地実験では、粒径 $d_1 = 20 \sim 100 \text{ mm}$ の礫 $1,000 \text{ m}^3$ と、粒径 $d_2 = 100 \sim 200 \text{ mm}$ の礫 $5,000 \text{ m}^3$ を下飯野地先の離岸堤開口部に投入し、その移動状況を調べることに

緩傾斜護岸前面に砂浜を復元する方策について検討した。礫の投入は、2020年10月23日～12月15日に行い、その後、深浅測量やUAVによる映像撮影などにより、礫浜の変形状況を追跡した。

2. 下飯野（園家）地先の海岸特性と礫養浜の概要

図-1(a)には下新川海岸の全体形状と、試験施工を行った下飯野（園家）地先の位置を2014年5月28日のGoogle Earth画像により示す。下飯野地先は黒部川河口の北東1.7 kmにあり、入善漁港の北東側に隣接している。この付近には離岸堤とその開口部沖に副離岸堤が設置されている。試験施工を行ったのは2,3号離岸堤（堤）の開口部の矩形区域である（図-1(b)）。

下飯野地区の2014年5月28日のGoogle Earth画像（図-1(b)）によれば、排水路の南西側に位置する3号堤背後の汀線付近に砂礫が舌状砂州を形成しつつ堆積していることが見て取れる。これより、3号堤背後では離岸堤による波の遮蔽効果により、養浜前から砂礫が堆積していたことが確認できる。しかし、勾配1/5の緩傾斜護岸の前面に形成されていた前浜はごく狭いものであり、離岸堤の端部背後では前浜は形成されていなかった。これは、離岸堤の背後ではその消波効果により前浜を形成させることはできても、漂砂の上手（北東）側からの砂礫の供給量が少ないことに起因して緩傾斜護岸の前面に前浜が形成され得ない状況にあるためと考えられる。このことから、

新たに土砂投入を行って土砂量を増加させれば離岸堤背後での海浜の創生が可能と考えた。

そこで、2,3号堤の開口部の、図-1(b)に破線で示す、沿岸方向に85 m、岸沖方向に45 mの矩形区域において、礫養浜の現地実験を行うこととし、2020年10月23日～12月15日には黒部川の河床に堆積した径 $d_1 = 100 \sim 200$ mmの礫5,000 m³と、径 $d_2 = 20 \sim 100$ mmの礫1,000 m³を用いた養浜の試験施工を行った。礫は2,3号堤の開口部の、海岸線に沿って1/5勾配で造られている緩傾斜護岸ののり先付近に盛られた。図-2には試験施工時の平面形と断面形を示す。2種類の礫のうち、粒径の大きな径100～200 mmの礫は緩傾斜護岸の根固め工として有効と考え、水面下のマウンド（下層）として投入し、その上層の平均海面からT.P.+2 mの間には主に礫浜を創出するために径20～100 mmの相対的に径が小さい礫を投入した。

3. 観測期間中の波浪条件

下新川海岸では、田中観測所（入善町沖の水深13 m）において波浪観測が行われている。調査期間中の波浪データについては、この観測結果を参照した。図-3には有義波高と周期の経時変化を示す。下新川海岸は日本海に面しているため、冬季には高波浪が襲来し波高が高まるが夏季は静穏となる。しかし低気圧の通過に伴い春季、

(a) 下新川海岸の下飯野地先の衛星画像



(b) 下飯野地先の拡大衛星画像



図-1 下新川海岸の衛星画像と下飯野地先の拡大画像

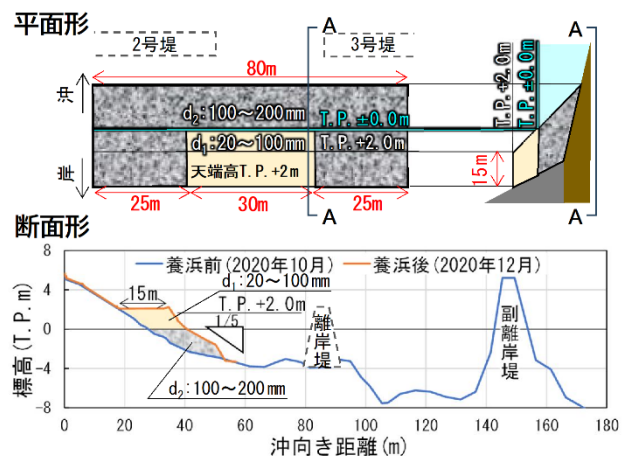


図-2 礫養浜の平面形と断面形

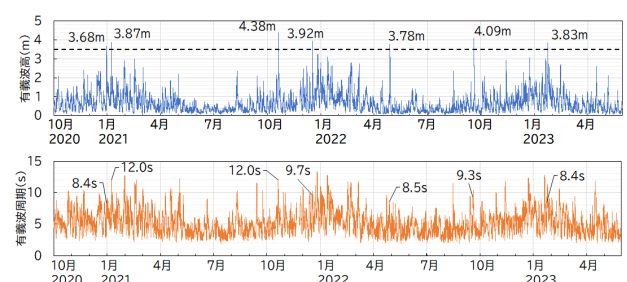


図-3 試験期間中の有義波高・周期の変化

秋季にも時々高波浪が襲来している。後述するように、縦断形測量によれば、高さ3 m近いバームが形成されたことから、礫浜の変形は主として高波浪時に起きたと推定される。そこで下新川海岸での年数回程度の来襲波高が約3.5 mであったことから、高波浪の閾値を3.5 mとし、これより高い波浪の出現した観測日、観測された有義波高と周期を表-1に取りまとめた。これによれば、2020年10月23日～2023年5月31日の調査期間中、高波浪は7回出現し、最大有義波高は2021年10月20日の4.38 mであった。またそれに対応する周期は12.0 sであった。さらに、波向は大部分がN方向であり、西向き沿岸漂砂を生じさせる条件であった。

4. 礫養浜の追跡調査の概要

礫の投入後、離岸堤端部での波の回折に伴い、離岸堤開口部から背後方向へと進行する波の作用により、離岸堤背後へと礫が運ばれた。この時の礫盛り土の変形状況をUAV（ドローン：DJI Phantom 4 Pro V2.0）により海岸線方向の画像を取得して調べた。UAV画像は、2020年12月23日を初回とし、冬季風浪の作用が著しい2021年1月25日、同年2月24日、さらに3月24日に撮影を行った。また、礫養浜前の2020年12月と養浜直後の2020年12月23日に深浅測量を行い、その後2023年5月26日までにさらに5回の深浅測量を行った。なお、深浅測量は5回行ったものの、2021年3月24日実施の深浅測量は、養浜直後の2020年12月23日の測量結果と比較して地形変化量が小さかったため除き、他の4時期の測量結果を基に地形変化を解析した。

5. 礫養浜の追跡調査結果

(1) UAVによる養浜箇所の斜め画像の判読

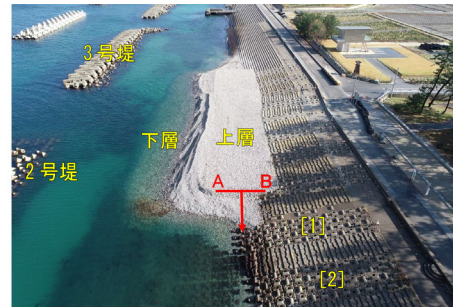
UAVによる斜め画像は、2020年12月23日を初回とし、冬季風浪の作用が著しい期間である2021年1月25日、同年2月24日と3月24日に撮影を行った。取得映像のうち、養浜区域を西側から斜めに見下ろした画像を図-4に示す。なお、以下のUAV画像は飛行高度がそれぞれ異なるので、各画像からの礫の広がり区域の特定はできないが、同一形状の緩傾斜護岸が沿岸方向に並んでいることから、養浜区域の西側に設置されている護岸を護岸列[1]、[2]、[3]と呼び、それらと礫の広がり区域の西端との相対関係から礫の西向き移動距離を把握した。ここに、各護岸列の幅は5.5 m、間隔は4.5 mである。

まず、養浜直後の2020年12月23日には、図-4(a)に示

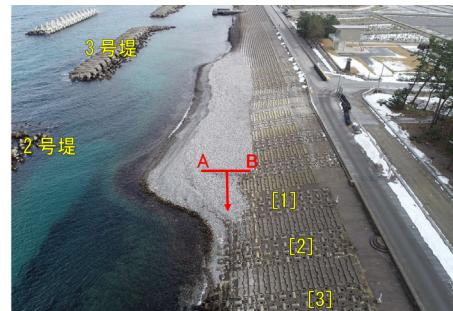
表-1 有義波高が閾値の3.5 mを超えた発生日と波浪条件

観測年月日	有義波高(m)	周期(s)	波向
2020/12/30	3.68	8.4	N
2021/01/08	3.87	12.0	N
2021/10/20	4.38	12.0	N
2021/12/17	3.93	9.7	NNW
2022/04/29	3.78	8.5	N
2022/09/20	4.09	9.3	N
2023/01/24	3.83	8.4	N

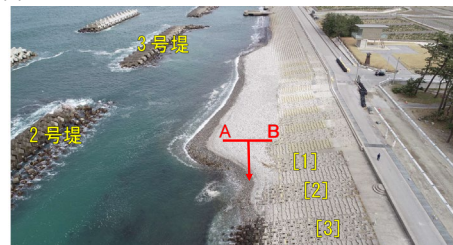
(a) 2020年12月23日



(b) 2021年1月25日



(c) 2021年2月24日



(d) 2021年3月24日



図-4 UAVによる礫浜の斜め画像

すように、下層の径100～200 mmの大礫の上に径20～100 mmの相対的に小さい礫が盛られていたが、この時、下層の盛り土には変化がなかったものの、上層の盛り土の海側側面には下層から立ち上がる急勾配の斜面ができおり、離岸堤開口部を中心に汀線が後退し、凹状の汀線が形成されていた。一方、盛り土の西端は、初期には

直線 AB で示す位置にあったが、既に 2020 年 12 月 23 日には盛り土の西端を回り込んで、西側の護岸列 [1] ののり先に礫が到達し始めていた。この時期には、汀線が最も海側へと前進した位置は直線 AB と汀線との交点付近にあり、礫は直線 AB から西側にわずかな距離移動したのみであった。

2021 年 1 月 25 日までは 2 号堤の西端部付近で礫の堆積域が沖向きに突出し、護岸列 [1] ののり先の全面を覆ったことから、緩傾斜護岸ののり先に沿った礫の西側への移動距離は 14.5 m であった (図-4(b))。また、護岸ののり先沖の水面下にも一部の礫の堆積が見られる。その後、2021 年 2 月 24 日には、護岸ののり先付近での礫の堆積域はさらに西側に広がり、水面下では護岸列 [3] ののり先でも礫の堆積が進んだ (図-4(c))。さらに同年 3 月 24 日には、護岸ののり先での礫の堆積域は護岸列 [3] にまで到達し、2020 年 12 月 23 日からの礫堆積域の総移動距離は 30 m となった。一連の斜め画像は東向きに撮影されているが、前方に見える 3 号堤の背後にあっても 3 号堤の西端よりわずかに東側にピークをもって汀線が突出していたことから、3 号堤側でも 2 号堤と同様な礫の移動が起きたことが分かる。以上のように、試験養浜で投入された礫は、緩傾斜護岸ののり面に押し付けられる

ようにしつつ、沿岸方向に運ばれたことが明らかになった。礫は平衡勾配が大きいために 1/5 勾配の緩傾斜護岸ののり先の汀線付近に集中的に堆積し、沖への移動はほとんどなく、この意味より、礫養浜によれば緩傾斜護岸の基部を防護する効果が期待できることが確認された。

(2) UAV の垂直画像の判読

下飯野地先での礫養浜の現地試験では、養浜前の 2020 年 11 月 5 日を初回として、2023 年 5 月 26 日まで UAV による垂直画像が述べ 11 回取得された。これらのうち、2021 年 2 月 24 日と 12 月 23 日の画像は分解能が低かったことから除き、全体で 9 時期の垂直画像を基に解析を行った。試験養浜は 2, 3 号堤の開口部で行われたが、養浜礫は前述のように波の作用で 2, 3 号堤の背後へと徐々に運ばれた。その場合、礫の移動は汀線近傍の狭い区域で起きた。したがって画像解析では、対象範囲を包含して適切な範囲を定め、その範囲の画像を拡大表示して礫の移動状況を調べた。図-5(a)~5(i)には初回の 2020 年 11 月 5 日から、最終の 2023 年 5 月 23 日まで 9 時期の垂直画像を示す。

まず、養浜前には 3 号堤の背後にはわずかな砂礫の堆積が見られたものの、緩傾斜護岸ののり先を連ねる汀線

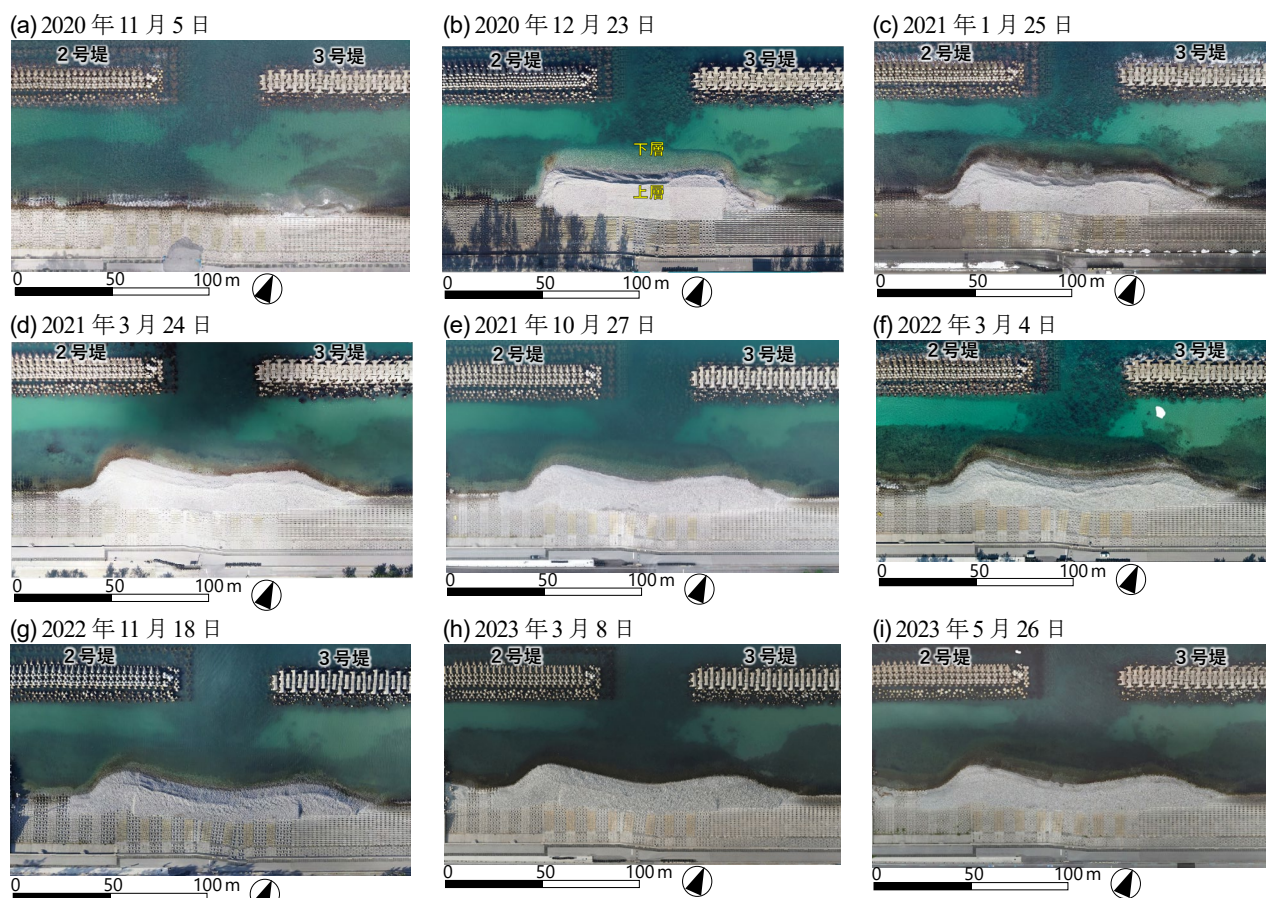


図-5 UAV による礫浜の垂直画像

は直線状であった (図-5(a)). 2020 年 12 月 23 日の養浜直後では、ほぼ台形状に土砂が堆積していたが、下層の投入礫はほぼ矩形区域にあったのに対し、上層の投入礫は離岸堤の開口部にあっては離岸堤端部からの回折波が作用するため、全体に凹状の汀線となり、また急勾配の海浜となった (図-5(b)). 2021 年 1 月 25 日では、開口部の汀線後退がさらに続いたが、西側の 2 号堤側の舌状砂州が東側の 3 号堤背後の舌状砂州と比べて発達が著しかった (図-5(c)). さらに冬季風浪後の 3 月 24 日にもほぼ同様な状況であった (図-5(d)).

2021 年 10 月 27 日でも、投入礫の全体形状は 2021 年 3 月 24 日当時と大きくは変わらず、2 号堤背後の舌状砂州の突出度が 3 号堤背後のそれと比べて大きかった (図-5(e)). また、この時期の画像では、汀線沖には汀線とほぼ平行な線が見える。この線は、汀線形状と相似形であることから、前浜からその沖端までが礫が一体的に移動している範囲と考えられる。2022 年 3 月 4 日には礫養浜区域の中央部分の浜幅が狭まり、2, 3 号堤の端部での舌状砂州の発達が続いた (図-5(f)). その後、2022 年 11 月 18 日、2023 年 3 月 8 日、および 2023 年 5 月 26 日と波の作用を受けたが、この間、砂州形状はほぼ一定形状を保った (図-5(g), 5(h), 5(i)). すなわち 2, 3 号離岸堤の開口部に置かれた礫は離岸堤端部での波の回折に伴い、離岸堤開口部から背後方向へと進む波の作用を受けて、離岸堤開口部から 2, 3 号堤の背後へと徐々に運ばれて堆積した。

しかし 2 号堤の東端から西向きに波高が急減するため現況の 2 号堤の背後に見られる位置より西側奥へと礫は運ばれることがなく、このためそこは水域として残された。全く同様なことが東側にある 3 号堤の背後でも起きた。最終的に 2, 3 号堤の開口部背後では緩く湾曲した汀線が形成された。

6. 深浅測量データに基づく地形変化解析

養浜前の 2020 年 12 月 23 日から 2023 年 5 月 26 日まで 5 回の深浅測量結果のうち、2021 年 3 月 24 日実施の深浅測量は、養浜直後の 2020 年 12 月 23 日の測量結果と比較して地形変化量が小さかった。そこで 2021 年 3 月 24 日を除く、他の 4 時期の測量結果より地形変化解析を行った。まず、礫養浜前の 2020 年 12 月の深浅図を図-6(a)に示す。この深浅測量では、海底地形測量のみが行われており、陸に最も近い等深線は-1m である。図-6(a)には以後の解析の便を考慮して 2 号堤の西側に原点を定め、沿岸方向に X 軸、これと直角方向に Y 軸を定めている。図-6(a)によれば、東側の 3 号堤背後の護岸前面では砂礫が堆積し、-1m の等深線が冲向きに突出している。等深線の最も突出した位置は、3 号堤の中心線 (破線) より

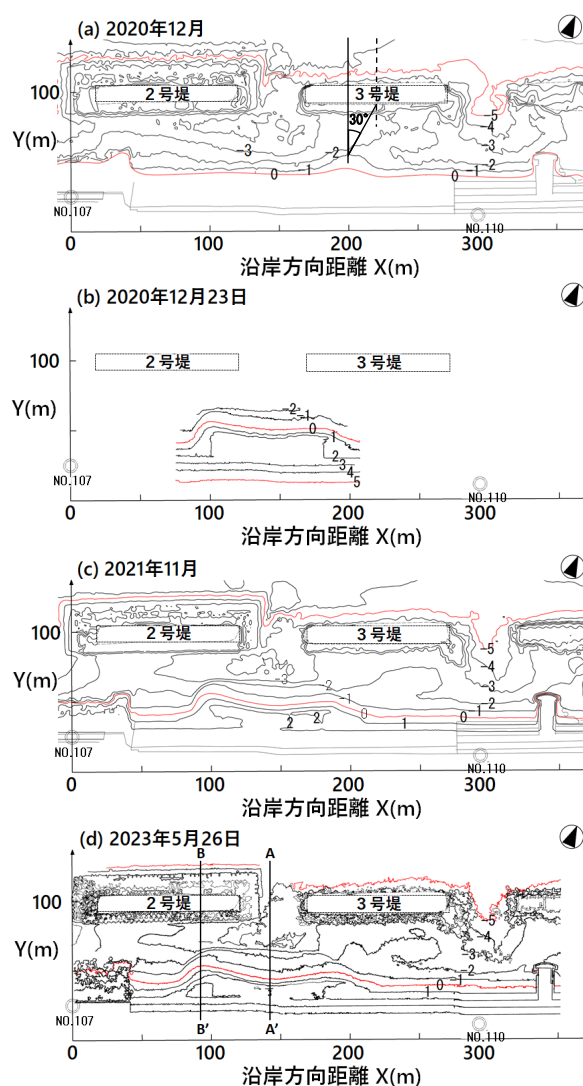


図-6 試験施工区域の海底地形

18.5 m 西側であった。波が離岸堤の中心方向から入射する場合、離岸堤背後では両端からの波の回折効果が同等なので、離岸堤背後の舌状砂州の頂点は離岸堤の中心線と重なる。これに対して、図-6(a)の場合 3 号堤背後の舌状砂州の中心線は 3 号堤を二分する線の位置よりも西側にずれている。これより、この付近での卓越波の入射方向が舌状砂州を囲む-1 m の等深線の沖端と 3 号堤の中心を結ぶ線のなす角(30°)だけ右回りに傾いた方向からとなることが分かる。このように卓越入射波が海岸線に立てた法線の方角に対して右斜め方向から入射しているために、2, 3 号堤の開口部背後の-3 m の等深線は東西非対称となり、3 号堤の背後ではフック状となったと考えられる。卓越波の入射方向が右斜めに傾いた方向であることは、養浜礫が西向きに運ばれる結果をもたらす。続いて養浜開始後の深浅測量として、まず図-6(b)には養浜直後の 2020 年 12 月 23 日の深浅図を示す。この深浅測量は、2, 3 号堤の開口部のみの狭領域を対象として行われた。汀線形状に着目すると、汀線は東西非対称で、2 号堤背後での汀線の突出量が 3 号堤の背後と比べてやや大きい。

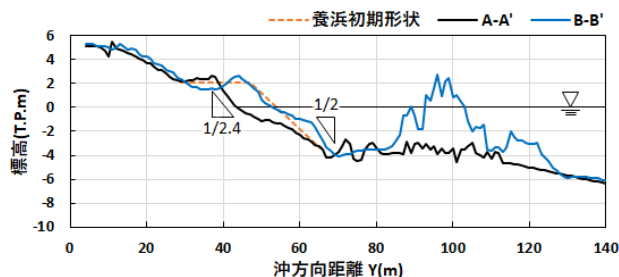


図-7 測線 A-A' と B-B' の縦断形比較

これは上述のように、卓越波の入射方向が海岸線に立てた法線に対して右回りに傾いていることによると考えられる。続いて 2021 年 11 月の深浅図を図-6(c)に示す。2,3 号堤の開口部を中心に投入された礫は、2020 年 12 月 23 日にはほぼ矩形形状に堆積していたが、-2 m の等深線は原位置を保ちつつも、-1~+2 m 間の等深線が中央部で凹状に後退し、2 号堤端部背後では原位置をほぼ保った。同様に、東側の 3 号堤の背後でも汀線は原位置を保っていた。さらに図-6(d)には 2023 年 5 月 26 日の深浅図を示す。図-6(c)に示した 2021 年 11 月の深浅図と比較すると、ほぼ同じ形状となっており、投入礫の移動はほぼ停止し、安定状態に至ったことが分かる。

7. 縦断形変化

2,3 号堤の開口部を通過して汀線が最も後退した測線 A-A' と、3 号堤背後で舌状砂州が最も沖に突出した位置に測線 B-B' を定め、これらの測線における縦断形変化を調べたのが図-7 である。離岸堤の開口部を通る測線 A-A' では礫が運び去られたが、その際、ほぼ -1.0 m 以浅が削られて凹状の縦断形となるとともに、+2.5 m にはバームを有する縦断形となった。この時の前浜勾配は 1/2.4 であり、これは平衡勾配に等しいと考えられる。これに対し、測線 B-B' では、-1 m 以浅の縦断形は測線 A-A' の縦断形を平行移動させて前進させたときの縦断形となったが、-1 m 以深には勾配が 1/2 と急勾配斜面が残された。これは、礫は -1 m 以浅の水深帯で移動しているが、礫の移動帯の沖端水深がほぼ -1 m で与えられ、-1 m より水深が大

きい場所には安息勾配に近い角度をなして礫が落ち込んだためと考えられる。なお、上層の養浜材の平均天端高は 2020 年 12 月には T.P.+2.17 m であったが、2023 年 5 月までに平均天端高は T.P.+2.27 m まで高まった。

8. まとめ

今回の礫養浜の現地実験では、径が $d_1=20\sim100\text{ mm}$ と $d_2=100\sim200\text{ mm}$ と粒径が大きな礫による養浜が行われたが、礫径が大きいため平衡勾配も 1/2.4 と大きいため、礫は前浜にうちあげられ高いバームが形成された。投入後、礫は汀線に沿って緩やかに移動し、離岸堤開口部背後から離岸堤端部背後へと移動して堆積し、緩傾斜護岸ののり先に礫浜を形成した。したがって離岸堤背後に最初から礫を投入すれば、礫は移動せずにそのまま残されるので、広い連続的な砂（礫）浜の形成が可能と考えられる。また、 d_2 の礫は波の作用を受けても非常に動きにくく、投入時の形状を保ったことから、 d_2 の礫は緩傾斜護岸などの根固め工の材料に適していると考えられる。今回の現地実験では養浜材料として礫を用いたが、波浪の作用下で礫が緩傾斜護岸ののり先付近で移動すると礫による摩耗が起り得る。今回の試験ではこの点を調べる事ができなかったが、長期的な海岸保全を考える場合にはこの点についての検討も必要と考えられる。

REFERENCES

- 1) 宇多高明：「日本の海岸侵食」、山海堂、p.442、1997. [Uda, T.: Beach erosion in Japan, Sankaido Press, Tokyo, p. 442, 1997.]
- 2) 宇多高明、山田義仁、村井寛昌、大谷靖郎、五十嵐竜行、大木康弘、宮原志帆：下新川海岸東部（宮崎漁港～入善海底谷）の陸棚における長期的侵食、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.73, No.2, pp.1_733-I_738, 2017. [Uda, T., Yamada, Y., Murai, H., Ohtani, Y., Igarashi, T., Ooki, Y. and Miyahara, S.: Long-term prediction of shelf erosion between Miyazaki fishing port and Nyuzen submarine canyon, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 73, No. 2, pp. 1_733-I_738, 2017.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

FIELD EXPERIMENT OF GRAVEL NOURISHMENT IN SHIMO-IINO AREA OF SHIMO-NIIKAWA COAST

Takaaki UDA, Hiroyuki KUDO, Yu-ichi TAKAMURA and Satoshi HENMI

A field experiment of beach nourishment using riverbed gravel of the Kurobe River, one of the origins for the formation of the Shimo-niikawa coast, was carried out at Shimo-iino area. The applicability of beach nourishment at the toe of the gently sloping revetment to recover the foreshore was investigated. In the field experiment, 1,000 m³ of gravel with the grain size $d_1 = 20\sim100\text{ mm}$ and 5,000 m³ of gravel

with $d_2 = 100\text{--}200$ mm were placed at the opening of the detached breakwaters, and successive movement of gravel due to waves was monitored by bathymetric survey and UAV. Because large gravel with $d_1 = 20\text{--}100$ mm and $d_2 = 100\text{--}200$ mm had large equilibrium slope of $1/2.4$, nourishment gravel was deposited to form a high berm. Then, gravel was transported alongshore by waves from the opening of the detached breakwaters to the location behind the detached breakwaters. Gravel beach was formed at the toe of the gently sloping revetment, implying the effectivity of gravel nourishment.