二宮海岸における粗粒材養浜の現地実験

Field Experiment on Beach Nourishment Using Coarse Materials on Ninomiya Coast

和泉恵¹・伊藤一十三²・武笠裕美³・宇多高明⁴・酒井和也⁵・石川仁憲⁶

Yoshiyuki IZUMI, Hitomi ITO, Hiromi MUKASA, Takaaki UDA
Kazuya SAKAI and Toshinori ISHIKAWA

On the Ninomiya coast, two groins of 50 m length with an opening of 300 m were constructed as a measure preventing longshore discharge of nourishment sand, and then beach nourishment using 16,400 m³ of the riverbed materials of the Sakawa River were carried out by July 9, 2012. Storm waves of Typhoon No. 5 hit the coast on June 19, 2012 and 10,900 m³ of beach materials discharged by storm waves. The effect of beach nourishment using coarse materials on this coast was investigated by field observation along with the numerical simulation using the contour-line-change model.

1. はじめに

西湘海岸では、2007年9月に襲来した台風9号に伴う高波浪により広い区域で侵食が起こり、西湘バイパス大磯IC付近の延長約1.1km区間では前浜が消失して道路護岸が倒壊するなど著しい災害が発生した(宇多ら, 2008)。前浜の消失は、高波浪により海浜から中砂が選択的に沖へ運ばれたことによるが、その後の通常波浪の作用で沖に堆積した中砂が再び前浜へと運ばれ、砂浜の回復が進んだ(元永ら, 2010)。しかしながら、沖向き漂砂と同時に発生した西向きの沿岸漂砂により、一部の砂が西側海岸を経て海底谷へと流出したため被災前の砂浜の回復までには至っていない。

一方、道路護岸が倒壊した被災区間では、護岸復旧工事が2011年には完了し、海岸保全工事へと移行しつつある。被災区間のうち砂浜が完全に消失し、背後に民家が近接する二宮海岸の金波・銀波橋高架区間350mでは、侵食前の砂浜復元の地元要望が強いことから、越波被害防止も兼ねて粗粒材養浜による浜幅30mの海浜の復元が計画された。福田ら(2012)は、被災区間の西側に隣接する山西地先で実際に行われた粗粒材養浜の効果検証データを基に、芹沢ら(2006)のBGモデル(Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル)を用いて粗粒材養浜による砂浜復元手法について検討し、最終的に沿岸方向へ

の砂流出防止施設として突堤案が採用された。

その後、2012年6月までに神奈川県により長さ50mの突堤2基が300mの間隔を開けて設置された後、7月9日までに酒匂川河床堆積物16,400m³による養浜が行われた。この間、2012年6月19日には台風4号が襲来し、台風時の高波浪により約10,900m³の養浜砂が流出した。本研究では、このように突堤間で進められてきた養浜の効果について現地調査により調べるとともに、海浜変形機構について等深線変化モデルを用いた追算を行った。

2. 観測方法

調査対象地域は、図-1(a)に示すように、2007年9月の台風9号により大きく被災した西湘バイパスの二宮IC近傍である。図-1(a)の矩形区域の拡大画像を図-1(b)に示す。画像は2011年3月撮影であり、西湘バイパスの復旧工事のための消波堤が連続的に設置されていたが、現在では大部分の異形ブロックは撤去され、それらのブロックの一部を転用して長さ50m、間隔300mの突堤2基が設置され、その背後で養浜が行われた。図-2には調査区域の詳細と測線配置を示す。突堤間の300m区間に東側から順に6測線A～Fを設定し、これらの測線に沿って縦断測量を行った。また、東突堤からそれぞれ25、125m

1	国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 所長
2	国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 海岸課長
3	国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 海岸課建設監督官
4 正会員	工博 (一財)土木研究センター常務理事なぎ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
5 正会員	修(工) (一財)土木研究センターなぎさ総合研究室
6 正会員	工修 (一財)土木研究センターなぎさ総合研究室

図-1 二宮海岸における調査対象区域

離れた測線A, Cでは縦断測量と同時に深さ方向に1m間隔での底質採取も行った。底質採取の方法としては、陸上部から碎波帯ではダイバーによる直接サンプリングにより、また沖合では船上からスミスマッキンタイア型採泥器を下ろして底質を採取した。縦断形測量と底質採取は、高波浪の襲来前と襲来後の2時期に行い、養浜土砂の粒径ごとの移動特性を調べた。また、図-2に示す地点①～③では定点写真を撮影し、画像を基に養浜土砂の挙動について調べた。高波浪前の測定は2012年8月17日に、また高波浪後の測定は2012年10月10日に実施した。この間、9月30日には台風17号に伴う $H_{1/3} = 5.15\text{m}$ ($T_{1/3} = 9.9\text{s}$)の高波浪が作用し、高波浪に伴う粗粒材の移動状況を調べることができた(図-3参照)。なお、この高波浪時における波の入射方向は明らかではないが、表-1には平塚沖総合実験タワーでの観測有義波高が2mを越えた時刻における風向を示す。これによれば、4m以上の波高が襲来した時刻における風向はSまたはSSWであり、とくに波高のピークが出現した9月30日23時における風向はSSW (S22.5°W)であった。一方、調査地区での海岸線への法線方向角はS14°Eなので、台風時の高波浪の波向が風向と同一であったと仮定すると、高波浪は西寄りに36.5°をなして斜め入射したと推定される。

図-2 突堤と測線の配置

表-1 高波浪襲来時の風向

時刻	$H_{1/3}$ (m)	風向
2012年9月30日20時	2.52	SSE
21時	4.35	S
22時	4.84	S
23時	5.14	SSW
2012年10月1日0時	4.35	SSW
1時	3.95	SW
2時	2.93	WSW
3時	2.57	WSW

写真-1 養浜盛土の施工状況 (2012年7月17日撮影)

養浜は、図-2に示すように西湘バイパスの高架区間下、調査区域の西側半分の長さ140m区間において盛土形式で行われ、高波浪時の波の打ち上げにより自然流出を待つという方法が採用された。写真-1は2012年7月17日撮影の現地状況を示す。養浜土砂は橋の下のコンクリート斜面上に置かれた。養浜材は、酒匂川河床堆積物で、中央粒径が14.7mmの土砂であり、粒度組成は図-4に示すように大礫が39%、中礫が23%、小礫が8%と礫のみで70%を占める。一方、粗砂が11%、中砂が15%、細砂が3%と、砂分も全体の29%を占める。このように礫分が全体の70%と大半を占める一方、砂分も約30%含まれていることから、高波浪時の遡上波が盛土ののり尻に作用した場合、分級しつつ冲向きに移動し、堆積する状況を調べることができると考えられた。

3. 定点写真による砂浜回復状況の調査

(1) 定点①から見た養浜盛土の流出状況

盛土後の海浜変形については、深浅測量と底質採取以外にも定点写真によっても調べた。写真-2は、金波橋直下の地点①から西向きに盛土の変化状況を撮影したもので、高波浪を受ける前の2012年8月17日と、9月30日の高波浪を受けた後の2012年10月10日における同一地点

図-3 観測期間中の波浪条件の変化

図-4 養浜材の粒度組成

写真-2 定点①から見た養浜盛土の変化

からの写真を示す。写真-2に矢印Aで示す橋脚は高波の作用前には支柱の上部が一部見えていたのみであったが、10月10日には支柱が大きく露出した。支柱幅2mを考慮して盛土高の低下量を概算すると、支柱位置での地盤高の低下量は約3mであり、この変化に応じた土砂が冲向き漂砂によって運び去られたことが分かった。

(2) 定点②、③から見た海浜の広がり状況

養浜土砂は高波浪の襲来により流出したが、これに伴って汀線付近では砂礫が堆積した。写真-3は養浜区域の東側に位置する地点②から見た変化状況を示す。8月17日には、汀線に近傍の矢印Bで示す平ブロックは空中に露出していたが、高波浪後にはこの平ブロックは砂礫で埋まった。このことから投入した粗粒材は高波浪時に流出したが、その一部は汀線付近に残り、コンクリート斜面を埋めたことが分かった。一方、コンクリート面上には重量が数十kgと推定される捨石が多数散乱しているが、これらは高波浪により打ち上げられた根固め捨石である。写真-4は、西突堤の基部に位置する地点③から東向きに海岸状況を撮影したものである。8月17日から10月10日までに橋梁下部にあった盛土は削られた。この間、矢印Cで示す異形ブロックは高波浪の襲来前には大部分が空中に出ていたが、高波浪後には砂礫に埋まった。その手前に見える異形ブロックも砂に埋まったことが分かる。

(3) 西突堤の西側隣接部での堆積状況

試験養浜は突堤間で行われたが、西突堤の西側、二宮漁港との間の梅沢地先では神奈川県により酒匂川水系の砂礫37,750m³を用いた養浜が2008年3月～2011年3月に行われた。西突堤の西側隣接部ではこの養浜により投入されたと考えられる土砂の一部が、高波浪により岸へ打ち上げられた。写真-5は、西突堤西側の斜路上から試験区間を撮影したものである。矢印Dに示す異形ブロック付近には8月17日に砂浜はなくブロックは水面下にあっ

たが、10月10日には前面に砂浜が形成されるとともに、左端に見える擁壁の基部が砂に埋まり、地盤高が高まったことが分かる。

4. 縦断形と底質粒度組成の変化

縦断形測量と底質採取は、2012年9月30日に襲来した台風17号を挟んで、8月17日と10月10日に行ったことから、主としてこの台風による養浜土砂の流出・海浜の回復状況について海浜形状のみならず、粒径分級の視点からも調べることができた。まず、図-5には東突堤の西25mに位置する測線Aの縦断形と二時期での海底地盤高の変化量、および局所縦断勾配の逆数を示す。海底地盤高の変化量は、初期形状となる8月17日の縦断形を基準とした水深変化量として算出した。また、局所縦断勾配は水深方向に0.5m間隔での勾配として算出し、勾配の逆数を表記した。また、図-6には、同じ測線Aについて二時期に測定した底質粒度組成の水深分布を示す。

図-5、6を併せて参照しつつ地形変化特性を調べると、測線Aでは汀線から-4m付近まではほぼ1/8と急勾配で落ち込んだ後、-5m以深ではほぼ1/30と緩勾配となり、二つに折れた縦断形を有している。汀線近くの急斜面の粒度組成は8月17日には-2mではほとんど全部礫で構成されていたが、-3、4m付近では粗砂と中砂で構成されていた。粗砂および中砂の有する平衡勾配は1/10程度であるが、実測勾配は1/8と急である。したがって粗砂・中砂はこの急斜面上では不安定となると考えられるが、観測を行った8月17日以前には図-3に示したように静穏な条件が続いていたため、海底表面に一時的に粗砂中砂が堆積したと考えられる。しかし、その下層には礫が堆積していたと考えられる。このような条件で高波浪が作用し、養浜土砂の流出が起きた。

同様に、東突堤の西125mに位置する測線Cにおける縦

写真-3 定点②から見た試験区間東端部の砂礫の堆積状況の変化

写真-4 定点③から見た西突堤の東側隣接部の堆積状況の変化

写真-5 西突堤の西側隣接部での堆積状況の変化

図-5 測線A, Cの縦断形状および局所縦断勾配の変化

図-6 測線A, Cの粒度組成の変化

図-7 測線D, E, Fの縦断形状の変化

断面と、二時期での海底地盤高の変化量、および局所縦断勾配の逆数を図-5に、また粒度組成の水深方向分布を図-6に示す。この測線では汀線～-4m付近の急勾配斜面での堆積量は少ないが、-4～-6m付近で顕著な堆積が生じている。この付近での局所勾配は $1/20 \sim 1/30$ 程度であるが、10月10日測定の日粒度組成によれば、-5m付近では粗砂の含有率が14%から39%へと増加し、同様に-6mでも粗砂の含有率が1%から14%へと増加している。このことから-4～-6m付近には主に養浜土砂のうち粗砂が分級されて堆積したことが分かる。

図-7には、西側に位置する測線D, E, Fの縦断形変化を示す。これらの測線では汀線～-4mの急斜面での堆積はほとんど生じていないのに対し、いずれも-6m付近で堆積が起きているのが特徴であって、この特徴は中央部の測線Cで観察された特徴と同一である。測線D, E, Fでは底質調査は行っていないが、縦断形が測線Cと変わらないことを考慮すれば、測線D, E, Fの-6m付近では測線Cと同様に粗砂が選択的に堆積したと推察される。

5. 等深線変化モデルを用いた再現計算

(1) 計算方法

二宮海岸で実測された粗粒材養浜時の海浜変形につい

て、等深線変化モデルを用いた再現計算を行った。計算時の初期形状は直線平行等深線地形とし、両端には現地に設置された突堤を考慮して不透過壁を配置した。初期海浜断面は複合断面とし、水深4m以浅の海底勾配は $1/8$ 、4m以深では $1/30$ とした。海浜材料としては、 $d_1 = 0.2\text{mm}$ の細砂、 $d_2 = 0.7\text{mm}$ の粗砂、および $d_3 = 2\text{mm}$ の礫の混合物とし、それぞれの平衡勾配は、順に $1/30$ 、 $1/30$ 、 $1/8$ と仮定した。これらの底質の混合状態を考え、初期状態として水深4m以浅では細砂：粗砂：礫の含有率を $0 : 0.5 : 0.5$ 、水深4m以深では細砂：粗砂：礫の含有率を $1 : 0 : 0$ とした。これに対し、養浜土砂の粒度組成は、細砂：粗砂：礫の含有率を実績値にあわせて $0.03 : 0.27 : 0.70$ とし、 $0 \sim +3\text{m}$ 等深線位置より投入した。投入量は実績量の 2000m^3 とした。なお、養浜土砂量 2000m^3 は、台風前後の盛土養浜の流出土砂量を踏査写真から推定した値とし、盛土のり先の後退量を $4 \sim 5\text{m}$ と判定して見積もった。この方法は便法として用いたが、実施の予測計算では背後地の形状を与え、浜崖形成を含んだ計算が必要である。表-2には計算条件を示す。

入射波高は計算対象地点の東8kmに位置する平塚沖総合実験タワー（水深20m）において9月30日23時に観測された台風17号に伴う高波浪 5.15m 、周期 9.9s を考慮し、

表-2 計算条件

数値計算手法	粒径を考慮した等深線変化モデル (熊田ら, 2007)
計算対象範囲	二宮海岸養浜区域
入射波条件	高波浪: 台風17号に伴う高波浪 (2012.9.30 23:00: 平塚沖総合実験タ ワーでの観測値) $H_b=5.15\text{m}$, 波向 θ_w $=15^\circ$
作用時間	6時間
代表粒径 (3粒径) と平衡勾配	粒径1: 細粒材代表粒径 $d_1=0.2\text{mm}$ ($d<0.25\text{mm}$) 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_1=1/30$ 粒径2: 中粒材代表粒径 $d_2=0.7\text{mm}$ ($0.25\text{mm}<d<2\text{mm}$) 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_2=1/30$ 粒径3: 粗粒材代表粒径 $d_3=2\text{mm}$ ($2\text{mm}<d$) 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_3=1/8$
初期地形	束襲前の地形を展開座標でモデル化 した直線平行等深線 (-4m以浅1/8, -4m以深1/30)
初期粒径含有率	$z=+3\sim-4\text{m}$ $\mu_1:\mu_2:\mu_3=0:0.5:0.5$ (海底勾配 $\tan\beta=1/8$) $z=-4\sim-9\text{m}$ $\mu_1:\mu_2:\mu_3=1:0:0$ (海 底勾配 $\tan\beta=1/30$)
養浜材	含有率実績値細粒材: 中粒材: 粗粒 材 $=0.03:0.27:0.70$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数の $A=0.2$, 岸沖沿岸 漂砂量比 $\gamma=0.15$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c=9\text{m}$, バーム高 $h_R=3\text{m}$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
交換層の幅	$B=10\text{m}$
計算等深線範囲	$z=+3.5\text{m}\sim-9.5\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=10\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
境界条件	左右端: $q_x=0$, 岸沖端: $q_z=0$

作用時間は6時間とした。また、波向については実測値がなかったことから、 $5^\circ\sim 20^\circ$ の範囲で変えた試行計算を行い、東側の測線Aでは岸側の急斜面と沖合の緩斜面の両方で堆積が生ずる一方、中央部の測線Cでは急斜面上のみ堆積したという実測結果の再現性の高い波向を選択した。試行計算によれば最適波向は 15° であった。

(2) 計算結果

図-5に示した測線A, Cに沿った縦断面変化について実測と計算の比較を行った。計算と実測の比較は東突堤近傍の測線Aと、中央部の測線Cで行ったが、計算ではメッシュが10m間隔のため測線Aについては $X=30\text{m}$ 断面と、Cについては $X=130\text{m}$ 断面との比較を行った。図-8は、初期地形において、4m以浅での細砂:粗砂:礫の含有率を $0:0.5:0.5$, 4m以深では細砂:粗砂:礫の含有率を $1:0:0$ とし、これに対し養浜土砂の粒度組成を、細砂:粗砂:礫を実績にあわせて $0.03:0.27:0.70$ とした場合の計算結果を示す。右斜めからの入射波のため盛土から流出した土砂は全体に東(左)向きに移動し、東突堤側で多く堆積した。その際、縦断面変化を調べると、東側の測線Aでは水深4m以浅の急斜面上に厚さ約1.1mで堆積が起こる一方、沖合の水深7m付近まで幅広

図-8 高波浪前後の縦断面変化 (計算)

く堆積が起きた。中央部の測線Cでは水深4m以浅での堆積量は小さいが、沖合の1/30勾配の海底面には広く堆積しており、実測縦断面変化が計算でうまく再現された。

6. まとめ

縦断面測量の結果によれば、二宮海岸では-4~-5mで海底勾配が変化し、陸側は1/8と急勾配で落ち込んだ後、-5m以深ではほぼ1/30と緩勾配となるが、このような海底勾配の変化にあわせて陸側は礫が、沖側は中砂・細砂から構成されていた。台風17号時の高波浪は西寄りから入射したが、この条件では汀線付近で強い東向きの沿岸漂砂が生じ、これにより養浜土砂のうち礫分が東向きに運ばれ、東突堤の隣接部に急斜面を形成しつつ堆積する一方、粗砂はより広い区域に拡散されつつ堆積した結果、上記の粒度分布が得られたと推察された。西湘海岸ではこのような漂砂特性を考慮して養浜を行う必要がある。

参考文献

- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼 (2006): Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.
- 宇多高明・今井雄二・三波俊郎・石川仁憲・古池 鋼・芹沢真澄 (2008): 西湘バイパスの被災原因の検討, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1285-1290.
- 元永 秀・丸山将吾・磯貝朋之・宇多高明・宮原志帆・芹沢真澄・石川仁憲 (2010): 高波浪時における中砂成分の選択的流出に起因する海浜変形の再現, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, p.I_581-I_585.
- 福田 実・原 康寿・宇多高明・石川仁憲・宮原志帆・芹沢真澄 (2012): 粗粒材養浜による二宮海岸の砂礫浜の回復方策の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, p.I_681-I_685.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄 (2007): 卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル, 土木学会論文集B, Vol.63, No.2, pp.154-167.
- 宇多高明・河野茂樹 (1996): 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.