高波浪時における礫浜の変形と越波・浜崖形成 防止に有効な養浜形状の検討

LONGITUDINAL CHANGE OF GRAVEL BEACH UNDER STORM WAVE
CONDITION AND BEACH PROFILE PREVENTING WAVE OVERTOPPING

岡田昌之¹・田中浩充²・宇多高明³・石川仁憲⁴・三波俊郎⁵・
芹沢真澄⁶・神田康嗣⁷

Masayuki OKADA, Hiromitsu TANAKA, Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA,
Toshiro SAN-NAMI, Masumi SERIZAWA and Yasuji KANDA

¹国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所長 (〒311-2424 静岡県静岡市葵区田町3-108)

²国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所海岸課長 (〒311-2424 静岡県静岡市葵区田町3-108)

³正会員 工博 (財) 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)

⁴正会員 工修 (財) 土木研究センターなごさ総合研究室 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

⁵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)

⁶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)

⁷正会員 (株) 水域ネットワーク (〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-8-10 朝日生命西葛西ビル6F)

On October 8, 2009, storm waves with a significant wave height of $H_{1/3}=6.51$ m ($T=12.8$ s) associated with Typhoon 18 attacked the Suruga coast facing Suruga Bay. The site observation was carried out after the storm. High beach ridge was formed on the gravel beach due to the shoreward sand transport. Wave overtopping to the seawall occurred at the site where the difference between the top of the seawall and the ground elevation of the nourishment beach is small. Measured beach profile changes were reproduced using the contour-line-change model. The effect of the difference in the backshore height to wave overtopping was investigated using the CADMAS-SURF model.

Key Words : Suruga coast, gravel beach, wave overtopping, beach nourishment, profile changes

1. はじめに

近年、海岸保全対策として各地で養浜が行われているが、その手法は十分確立してはならず、様々な課題が残されているのが現状である。宇多・石川¹⁾は、沿岸漂砂が卓越する海岸において、自然環境や海浜利用への影響を抑えつつ養浜により早期に砂浜を回復する手法として、漂砂の上手側にバーム高程度の高さで砂を投入し、波の作用による投入砂の広がり期待する手法を提案した。しかし多くの養浜では高盛土形式で養浜砂が投入され、さらにその天端を重機により敷き均す工事が行われている。本研究で対象とする駿河海岸にあっても、侵食対策として大井川河口部の土砂約 6 万 m^3/yr を用いた養浜が行われてきたが、その方法は後浜において T.P.+5m までの高盛土形式で養浜を行う手法であった。このような状況下で、2009 年 10 月 8 日に台風 18 号が駿河海岸に襲来し、 $H_{1/3}=6.51\text{m}$, $T=12.8\text{s}$ (駿河海洋観測塔) の高波が作用した。この結果、台風後の現地調査によれば、堤防天端と養浜盛土の天端高との標高差が小さい場所では、堤防天端を越えた越波や

陸側への礫の打ち込みが観察された。また、駿河海岸の測線 No. 13 付近の消波堤が並べられた区域では消波堤開口部において高波の作用により高さ 1.7m の浜崖形成も観察された。本研究では、台風 18 号来襲前後の 2009 年 3 月と 10 月に実施したレーザーによる前浜地形測量結果をもとに、まず台風来襲前後の前浜の地形変化について調べた。次に、堤防天端と養浜盛土の天端高との標高差が小さい場所で起こる越波、さらには盛土養浜時における浜崖形成について、現地踏査や現地データの分析に加え等深線変化モデルと数値波動水路を用いて検討した。

2. 台風 18 号後の海岸現地踏査

台風 18 号による高波の作用の結果、背後地への越波とともに盛土養浜区間での浜崖形成が観察された。例えば、図-1 は台風来襲後の吉永放水路西側の海岸状況であるが、盛土養浜により嵩上げされた後浜と、堤防天端との比高が小さな場所では、堤防天端を越えて陸側に礫が打ち込まれた。一方、礫の打ち込み

図-1 吉永放水路西側の堤防背後への砂礫の打ち込み状況（2010年1月8日）

図-3 部分的に枯れた植物より推定される背後地の越波痕跡（2010年1月8日）

図-2 背後地への越波が生じた場所の堤防天端と地盤との比高（2010年1月8日）

図-4 栃山川東側（測線No. 13）における浜崖形成状況（2009年10月14日）

がない箇所では、堤防天端と後浜の間かなりの標高差があった。図-2は吉永放水路の北側で撮影したものであるが、ここでは盛土養浜の結果後浜高が高く、かつ平坦で堤防天端高と差が小さかったため、その背後地では越波が起こり塩分の侵入により植物が枯れているのが見出された（図-3）。さらに図-4は栃山川東側の測線No. 13付近での浜崖形成状況を示す。後浜が高く、固く締め固められた養浜区域では、高波浪により1.7mの浜崖が形成され、海岸利用に支障を来していた。このように盛土養浜時の地盤が平坦で、堤防天端との比高が小さい場合越波が助長され、同時に浜崖形成が著しいとの観察結果が得られた。

3. 台風18号時の高波浪に起因する地形変化

(1) 区域Aでの変形

レーザーによる前浜地形測定の観測区域は図-5に示すA～Gの矩形区域であるが、自然海浜の区域Aと盛土養浜が行われている区域Bを対象とした。また区域A、Bから測線No. 9とNo. 36を選び、2007年1月実

図-5 区域A～Gと測線No. 9とNo. 36の配置

施の深浅測量データも併せて縦断形の変化を調べた。まず、区域Aの海浜形状と地形変化量を図-6, 7に示す。図-6のNo. 9以南で見られる波状の海岸線はその沖に離岸堤が設置されていることによる。また2009年10月においてNo. 9とNo. 13間に形成された矩形形状の堆積域は盛土による。海浜地の標高はほぼ5mにあるが、小川港隣接部では埋め立てが行われたため約7mと高まる。図-7の地形変化図で見られる最も著しい特徴は、汀線に沿って約2mの堆積が起きたことである。図-8は2010年1月15日におけるNo. 9の前浜状況を示すが、汀線近傍に高い礫堤が形成されており、礫堤頂部は沿岸方向に一樣な高さを有していた。図-9はNo. 9の縦断形変化を示すが、2009年3月には高さ2mの礫堤であったが、高波浪の作用により礫堤の頂が陸向きに10m移動するとともに高さが2.8mまで高まった。このことから図-7に示す汀線に沿った細

(a) 2009年3月

(b) 2009年10月

図-6 2009年3月と10月の海浜形状 (区域A)

図-7 2009年3月～10月の地形変化量 (区域A)

図-8 バーム頂部から北側を望む (2010年1月15日)

長い堆積は礫バームの形成に起因することが明らかになった。

次に、2010年3月測量のNo. 9の縦断形と d_{50} および粒度組成の水深方向分布を図-10に示す。礫堤は汀線のすぐ陸側に形成されたが、汀線から-5mまでの海底勾配は1/6と急であり、-5m以深では1/3とさらに急になる。海底勾配が急なため d_{50} も大きく、バーム頂付近では20mmであり、汀線ではいったん10mm程度と小さくなるが、海面下では増大し、-5m以深では約40mmと大きくなる。粒度組成で見ても海底面全体が礫で覆われている。このようにNo. 9では礫が集中的に堆積しており、それが高波浪の作用で岸向きに移動し、同時に遡上高の増大にあわせてバーム高が上昇するという結果が得られた。

(2) 区域Bでの変形

区域Bの海浜形状と地形変化量を図-11, 12に示す。この付近では消波堤が連続的に並び、しかもNo. 36以南では盛土養浜が行われた結果、堤防前面の地盤

図-9 測線No. 9の縦断形変化

図-10 測線No. 9の縦断形と d_{50} 、粒度組成の水深方向分布

高が5.5mと高い。海岸線が消波堤で固定されているため地形変化は小さいが、消波堤の開口部では侵食が確認できる。図-13は侵食が起きたNo. 36の縦断形変化を示す。堤防前面から高盛土されたのり面は、汀線から2mまでが侵食され、一部の土砂は打ち上げられたものの大部分は流出し、浜崖が形成された。

図-14は、顕著な前浜侵食が観察されたNo. 36の縦

図-11 2009年3月と10月の海浜形状 (区域C)

図-12 2009年3月～10月の地形変化量 (区域C)

図-13 測線No. 36の縦断形変化

断形と d_{50} 、および粒度組成の水深方向分布を示す。この測線では前浜から-4mまでは1/6と急勾配であるが、-5m以深ではほぼ1/90と非常に緩くなる。 d_{50} の水深方向分布はこの勾配変化にきれいに对应し、-1mより陸側では礫が多いのに対し、-2m以深では礫は存在せず海底面は細砂と中砂のみによって覆われている。また、侵食が起きた汀線～2m間は礫のみで覆われているのではなく、中砂が平均で48% (T.P. $\pm 0, 1, 2$ mの平均) 含まれている。宇多ら²⁾が西湘海岸の海浜変形で明らかにしたように、高波浪の作用時には砂礫の持つ平衡勾配が一時的に緩くなり、冲向き移動が起こることを考慮すれば、図-13に示した前浜の侵食ではこの点を考慮すれば説明が可能と考えられる。

4. 高波浪時の前浜侵食の機構

(1) 等深線変化モデルによる検討

図-14 測線No. 36の縦断形と d_{50} 、粒度組成の水深方向分布

盛土養浜個所での浜崖形成機構に関し、No. 36の縦断形変化を対象として等深線変化モデルを用いて検討した。ここでは粒度ごとの移動特性ではなく、前浜全体を対象として高波浪の作用時砂礫の平衡勾配が小さくなり、冲向きに砂礫が流出して変形が起こるという単純なモデル²⁾を用いた。水深方向の計算範囲は $Z = +5.5\text{m} \sim -20.5\text{m}$ とした。また、粒径は2成分とし、-5m以深に堆積している細砂・中砂を代表する粒径1を $d_1 = 0.25\text{mm}$ 、-5m以浅の前浜の礫を代表する粒径2を $d_2 = 2\text{mm}$ とし、試行計算に基づき、前浜勾配が1/6から1/18まで緩くなると仮定した。波浪条件としては、台風時の有義波高の最大値 $H_{1/3} = 6.51\text{m}$ を与え、また波による地形変化の限界水深 h_c は12mとした。表-1にそのほかの計算条件をまとめて示す。

No. 36の再現計算の結果を図-15に示す。初期の汀線付近の勾配1/6と沖合の1/90が、高波浪時に1/18、1/270と緩まると仮定すると、波の作用により前浜が侵食され、5mの高さの盛土との間に浜崖が形成される。なお、図-15は前浜の変形を見やすくするため計算範囲を切り出している。実際は図の右端を通して水深の大きな部分への砂移動も起きているの

表-1 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 ³⁾
計算ケース	大井川工区 測線 No.36
代表粒径と平衡勾配	代表粒径 (2 粒径) と平衡勾配 粒径 1 : 細粒 代表粒径 $d_1=0.25\text{mm}$ 常時平衡勾配 $\tan\beta_1=1/90$ 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_2 \doteq 1/3 \tan\beta_1$ 粒径 2 : 粗粒 代表粒径 $d_2=2\text{mm}$ 常時平衡勾配 $\tan\beta_1=1/6$ 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_2 \doteq 1/3 \tan\beta_1$
初期地形	-5m 以浅 1/6 -5m 以深 1/90
初期粒径の含有率	$Z > -5\text{m}$: 細粒 $\mu_1=0$, 粗粒 $\mu_2=1$ $Z < -5\text{m}$: 細粒 $\mu_1=1$, 粗粒 $\mu_2=0$
入射波条件	砕波波高 $H_b=6.5\text{m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=A/\sqrt{d}$ 係数 $A=1.0$ 岸沖漂砂量係数 $K_z=0.01K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野の 3 次式
波による地形変化の限界水深	$h_c=12\text{m}$
バーム高	$h_R=4.5\text{m}$
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	$Z=+5.5\text{m} \sim -20.5\text{m}$
計算メッシュ	鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間ピッチ	$\Delta t=0.1\text{hr}$
計算ステップ数	10000 ステップ
境界条件	岸沖端 : $q_z=0$ (漂砂の流入出なし)

表-2 CADMAS SURF の計算条件

項目	設定値
入射波高(m)	5.15
周期(s)	11.0
潮位(m)	1.65
成分波数	512
計算領域(m)	800×40
格子間隔(m)	水平 : 0.5~2.0 鉛直 : 0.2~0.4
格子数	775×132
計算時間	500s
断面地形	No.13, No.36
出力条件	0.5s間隔

表-3 CADMAS SURF による測線 No.36 における越波流量の計算結果

断面	越波水位(m)	延長(m)	水量(m^3)	湛水時間(s)	越波流量($\text{m}^3/\text{s/m}$) (現況に対する比率)
現況	0.3	41	12.3	350	0.035
後浜高を下げた場合	0.2	41	8.2	350	0.023 (66%)

図-15 台風18号来襲時の地形変化の再現計算 (No. 36)

で、図示する範囲では土砂収支は成立していない。このように、本モデルにより対象断面における高波浪作用時の前浜地形変化の特徴を概ね再現することができる。そこで次に後浜高の違いによる地形変化の相違について検討した。予測計算は、後浜高を T.P. +3, 4, 5m と変えた (ケース 1~3)。図-16 には計算結果を示す。盛土の高さが低い場合、高波浪により前浜は削り取られるものの浜崖は形成されない。しかし後浜高が高くなるに従い浜崖の高さが増大することが分かる。すなわち、海浜利用上障害となる高い浜崖の形成防止のためには、盛土高を通常時の波の遡上高 (バーム高) までとするのが望ましいと考えられる。

(2) 数値波動水路 (CADMAS-SURF) による検討

現地踏査結果によれば、越波防止には堤防天端と後浜間に適切な標高差が必要と考えられる。そこでこの効果を調べるために、No. 36 を対象として現況断面と、後浜高を T.P. +3m まで掘り下げ、その土砂を前浜に養浜した場合における越波状況の差について数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて検討した。計算条件を表-2 に示す。図-17 には越波計算の結果を示す。また、堤防背後のプールに流入した水量を水位×延長 (42m) × 単位幅 (1m) で求め、湛水までに要した時間より越波流量を求めた結果を表-3 に示す。これより現状の盛土養浜形状では No. 36 の越波流量 $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ に対し、後浜高を下げた場合は $0.023 \text{ m}^3/\text{s}$ と 66% に低減した。これより後浜高を下げて堤防天端高との差を設けることが高潮対策として有効なことが分かった。

図-16 盛土養浜の高さを変えた場合の浜崖形成状況の差（計算）

5. まとめ

駿河海岸では2009年10月8日に台風18号が襲来し、 $H_{1/3}=6.51\text{m}$ 、 $T=12.8\text{s}$ の高波が作用した。このとき海浜材料が礫で構成されている駿河海岸では礫の急激な岸向き移動が起こり、バーム高が台風前の2mから2.8mまで上昇し、バームの形成位置が陸側に約10m移動したことが分かった。また、前浜が礫で構成された急勾配海岸において、後浜に盛土養浜を行った場合、高波浪の来襲によって前浜とともに盛土部が

図-17 CADMAS SURFによる台風18号来襲時の越波状況（現況と掘削時）

削り取られ浜崖が形成されることが現地踏査と数値モデルにより明らかになった。高波浪による地形変化の発生頻度は小さいが、盛土養浜は浜崖の形成要因のひとつとなる。浜崖形成を避けるには、盛土養浜時の後浜天端高を現地のバーム高程度とすることが望ましいと考えられる。さらに、後浜高が高く堤防天端との差が小さいと、越波が助長されることも明らかになった。高潮対策には盛土養浜による後浜の嵩上げ時にその高さあまり高めず、堤防天端との間に標高差を設けることが有効である。

参考文献

- 1) 宇多高明, 石川仁憲: 「実務者のための養浜マニュアル」, (財) 土木研究センター, p. 170. 2005.
- 2) 宇多高明, 丸山将吾, 高野弘之, 芹沢真澄, 三波俊郎, 石川仁憲, 宮原志帆: T0709 号時の高波浪による西湘海岸の急変形の再現計算, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 561-565, 2009.
- 3) 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄, 小林昭男: 混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 596-600, 2003.