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

Prediction of Beach Changes Due to Selective Discharge of Medium Sand during Storm Wave Conditions

> 元永 秀¹・丸山將吾²・磯貝朋之³・宇多高明⁴ 宮原志帆⁵・芹沢真澄⁶・石川仁憲⁷

Hide MOTONAGA, Shogo MARUYAMA, Tomoyuki ISOGAI, Takaaki UDA Shiho MIYAHARA, Masumi SERIZAWA and Toshinori ISHIKAWA

Uda et al. (2009) proposed a model for predicting beach changes due to rapid offshore sand transport during the storm wave conditions, assuming that the equilibrium slope of sand is reduced. In this model, the equilibrium slope was assumed to decrease regardless of the grain size, even though the beach material has a wide grain size range between gravel and fine sand. The sampling test after the storm revealed that gravel was remained on the foreshore and only medium sand was transported offshore. Therefore, the change in equilibrium slope corresponding to each grain size was incorporated in the contour-line-change model. The predicted and measured results were in good agreement.

1. はじめに

2007年9月6日に襲来した台風9号に伴う高波浪によ り, 西湘バイパスは延長約1.1kmにわたって被災し, 道 路護岸が倒壊するなど著しい被害が生じた(字多ら、 2008). この台風およびその後の海浜変形に関し、宇多 ら(2009)は高波浪の作用時には砂礫の持つ平衡勾配が 小さくなる結果沖向き漂砂が発達するが、その後の静穏 波の作用時には再び平衡勾配が急になるとの仮定のもと に岸沖漂砂のモデル化を行った.このモデルでは西湘海 岸の海浜構成材料が礫〜細砂まで広い粒径レンジを有す るにもかかわらず、粒径とは無関係に平衡勾配が変化す ると考えた.しかし台風前後の粒度調査によれば、バー ム付近に存在した礫は汀線付近に留まり、中砂成分の選 択的移動が見られたことから,モデル上課題が残されて いた. そこで、本研究では、海浜構成材料の粒径に応じ た平衡勾配の変化を等深線変化モデルに組み込み, 高波 浪時の粒径による応答の違いを考慮した海浜変形モデル の構築を行った.

1			国土交通省関東地方整備局京浜河川事務
2			周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 所建設監督官
4	正会員	工博	(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 6 7	正会員 正会員	工修	海岸研究室(有) 海岸研究室(有) (財)土木研究センターなぎさ総合研究室





2. 現地海岸の縦断形変化と粒度組成の水深方向 分布

西湘海岸では、図-1に示す測線に沿って縦断測量と水 深方向の底質採取が2008年2月に行われた.本研究では、 これらの測線における測定結果のうち、顕著な縦断形変 化が生じるとともに粒度組成も測定された測線の例とし て図-2には測線No.16での測定結果を示す. この測線で は前浜から後浜が侵食され、最大3m地盤高が低下しほ ぼ-4mから-8m間で堆積が起きたことから、地形変化は 沖向き漂砂に起因することが明らかである. 粒度組成を 調べると,著しい侵食が起きた標高+2mでは粗礫,中礫, 細礫の合計で57.8%,粗砂が10.4%,中砂が31.3%であ り,大部分は粗砂以上の粒径成分である.また汀線付近 も主に礫で構成されており、2007年10月と2008年3月の 汀線付近の縦断形に変化が見られないことから、台風9 号来襲後前浜には礫が選択的に残されたと推定できる. これと対照的に沖合地盤が上昇した-4mから-8mの間で は平均で中砂が62.9%、細砂が26%であり、中砂成分が 圧倒的に高い. 侵食域では中砂の割合が著しく低いのと, 砂が堆積して地盤高が上昇した沖合では中砂の割合が高 いことはよい対照をなすことから、高波浪による沖向き 漂砂が主に中砂成分の移動によってもたらされたと推定 できる.また、各測線の縦断形変化について注目すると、 台風9号による侵食後の前浜勾配は1/10と来襲前と変化 していないことが確認できる.以上より、台風9号によ る地形変化は、高波浪による急激な沖向き漂砂により、 礫と主に中砂で構成された1/10勾配の前浜が侵食され、 中砂成分が沖に移動し、選択的に残された礫が1/10勾配 で前浜に留まったと推定できる(図-3参照).

表-1 計算条件

等深線・粒径変化モデル(熊田ら, 2005)
大磯港~二宮漁港:6.5km
再現1:台風9号来襲時の侵食(来襲前9月13 日)
日) 再現2:台風後の復元(2007年9月13日,11月 21日,復旧仮設考慮)
再現1:4.5days, 再現2:83days
代表粒径 (3粒径) と平衡勾配
1) 粒径1:細粒材 代表粒径 d^{11} =0.2mm (d<0.25mm) 常時平衡勾配: $\tan\beta_c^{(1)}$ =1/30 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_c^{(1)}$ =1/30
2) 粒径2:中粒材 代表粒径 d^{2} =0.7mm (0.25mm< d <2mm) 常時平衡勾配 $\tan \beta_{c}^{(2)}$ =1/10 高波浪時平衡勾配 $\tan \beta_{c}^{(2)}$ =1/30
3) 粒径3:粗粒材 代表粒径 d^{3} =2mm (2mm <d) 常時平衡勾配$\tan\beta_{c}^{(3)}$=1/10 高波浪時平衡勾配$\tan\beta_{c}^{(3)}$=1/10</d)
再現1:来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1/10,-4m以深 1/30)
再現2:再現1の計算結果
再現1: z=+3-+2m:細粒:中粒:粗粒=0:0.5:0.5 (海底勾配tan $\beta=1/10$) z=+24m:細粒:中粒:粗粒=0:1:0 (海底勾配tan $\beta=1/10$) z=-49m:細粒:中粒:粗粒=1:0:0 (海底勾配tan $\beta=1/30$) 再現2:再現1の計算結果
波高は平塚観測塔の実測データより算出し た期間中のエネルギー平均波,波向は波浪変 形計算より設定
再現1:台風9号来襲時 (9/4 12:00–9/8 24:00) H_b =3.0m, 波向 θ_w =10°
再現2:台風後の復元 (9/9–11/21) H_b =0.61m, 波向 θ_w =0°
沿岸漂砂量係数内のA=0.2, 岸沖沿岸漂砂量比γ=0.15
宇多・河野 (1996) の3次式
波による地形変化の限界水深 h _c =9m, バー ム高h _R =3m
陸上:1/2, 水中:1/3
<i>B</i> =10m
z=+3.5m~-9.5m
沿岸方向 ΔX =50m,鉛直方向 ΔZ =1m
再現1:∆ <i>t</i> =0.05hr, 再現2:∆ <i>t</i> =2.4hr
大磯港: $q_s = 0$, 二宮漁港:漂砂通過境界 (再現2は $q_y = 0$) 岸沖端: $q_z = 0$

3. 海浜変形予測モデル

熊田ら(2005, 2007)による,粒径を考慮した等深線 変化モデルをベースに,高波浪が襲来した場合の粒径に よる応答の違いを考慮した海浜変形予測モデルを構築し た.字多ら(2009)では,高波浪作用時に砂礫の持つ平 衡勾配が小さくなる結果沖向き漂砂が発達するが,その 後静穏波の作用時には再び平衡勾配が急になるとの仮定 のもとに岸沖漂砂のモデル化を行った.しかしこのモデ ルでは,単一粒径に対する等深線変化モデルを用いてい たため,西湘海岸の海浜構成材料が礫から細砂まで広い 粒径レンジを有するにもかかわらず,粒径とは無関係に 平衡勾配が一様に変化する結果となり,中砂成分が選択 的に運ばれるという現地海岸の実態の再現が不十分であ った.本研究では粒径を考慮した等深線変化モデルを用 いて,高波浪時の中砂成分の選択的移動を,中砂成分の 平衡勾配の変化という観点からモデル化した.

基礎式は原論文(熊田ら,2005,2007)に詳しいので, ここでは沿岸・岸沖漂砂量式のみ示す. 粒径毎の沿岸漂砂 量式は式(1)で,また岸沖漂砂量は式(2)で表される.

$$K_{1}^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}}$$
 (3)

ここに,xは沿岸方向座標,zは等深線の地盤高, $q_x^{(k)}$, $q_z^{(k)}$ は粒径毎の沿岸・岸沖漂砂量 $(k = 1, 2, \cdots, N)$, $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎の含有率, $\varepsilon_z(z)$, $\varepsilon_x(z)$ は字多・河 野 (1996)の漂砂量の水深方向分布関数, $d^{(k)}$ は底質粒 径を示す.Aは未知数とし対象海岸の変形過程に応じて 設定する.なお,式(3)の $d^{(k)}$ の単位はmmである.ま たξは小笹・Brampton項の漂砂係数と沿岸漂砂係数の比 を与える係数であり $\xi=K_2^{(k)}/K_1^{(k)}$ とし、ξもAと同様対象 海岸の変形過程に応じて設定する定数である. α_{bs} は砕波 点における波峰線が等深線となす角 tan β は海底勾配, H_b は砕波波高である. β は、初期縦断形におけるバーム高 (h_R) から波による地形変化の限界水深 (h_c) までの平均 勾配角, β は等深線毎の勾配角, γ は漂砂量係数の比率で あり、沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを示す. $\beta_c^{(k)}$ は粒径毎の平衡勾配角を示す.

4. 再現計算

(1) 平面的地形変化

海浜が細粒材、中粒材および粗粒材で構成されるとす



図-5 高波浪,常時波浪作用後の水深変化量

る.ここに細粒材とは、代表粒径が $d^{(1)}=0.2$ mmで、 d<0.25mmの細砂からなる底質である、中粒材とは代表 粒径が $d^{(2)}=0.7$ mmで、0.25mm<d<2mmの間に分布し、粗 砂までを含む粒径レンジとする、さらに粗粒材とは代表 粒径が $d^{(3)}=2$ mmで、2mm<dの礫を表す粒径レンジとす る、これら3粒径区分に関し、常時の平衡勾配 $\tan\beta_c^{(k)}$ が 細粒、中粒、粗粒の順にそれぞれ1/30、1/10、1/10であ るが、高波浪の作用時にはそれぞれの平衡勾配 $\tan\beta_c^{(k)}$ が1/30、1/30、1/10となると仮定する、すなわち、細粒



では常時・高波浪時とも1/30で変わらない.中粒では常 時では1/10と急であるが,高波浪時には1/10が1/30まで 緩くなる.さらに粗粒では常時・高波浪とも平衡勾配が 1/10で変わらないとする.この条件は,台風9号時汀線 付近に堆積していた礫はほとんど移動せず,海浜変形は 主に中砂成分が沖向きに移動したという事実に基づいて いる.

図-4 (a) (b) (c) は中粒材の平衡勾配が常時は1/10であ るが,高波浪の作用により1/30と緩くなるという仮定の もとに予測した地形変化である.(a) (b) (c) の順に初期 地形,高波浪作用後,および常時波浪作用後の地形を示 す.初期(a) と比較すると,高波浪の作用後(b) には 土砂は沖向きに移動し沖合に堆積する.このため前浜が 大きく狭まり,X=4000mに位置する葛川の東側隣接部で は天然の岩盤が現れる.また道路の被災区域(X=5800~ X=7000m)の大部分では護岸が直接波に曝される状態と なる.このように侵食された海浜も,常時波浪の作用を 受ける(c) と土砂が岸向きに移動する結果海浜は再び 広がる.



図-4の地形変化を水深変化量から見たのが図-5である. 初期から高波浪作用後(a)では海浜全域で砂が削り取られ,その砂が沖向きに運ばれ堆積している.しかしその後常時波浪が作用する(b)と再び岸向き漂砂が起こり前浜の復元が進む.さらにこのような変化を汀線変化から調べたのが図-6である.併せて図-6には高波浪および常時波浪作用後に測定した実測汀線も示す.これによれば,高波浪作用後とその後の常時波浪作用後の汀線形状が計算によりうまく再現できたことが分かる.

(2) 縦断形変化と粒径含有率の岸沖分布

上述の計算結果より前浜が広く残されているX=2.5km 断面と道路被災区域を通るX=6.5km断面を選び,初期, 高波浪作用後および常時波浪作用後の縦断形変化を調べ るとともに,対応する粒径含有率の岸沖分布も調べた. 図-7はX=2.5km断面の縦断形変化を示す.初期縦断形は-4mで折れ点があり,これより岸側では1/10勾配,沖側で は1/30であったが,高波浪襲来後には前浜土砂が削り取 られ,汀線が30m後退した.侵食された土砂は沖合の-3mから-8m間で堆積した.しかし台風後常時波浪が作用



すると、もとの2つに折れた縦断形に近い状態まで復元 した.この間の粒径含有率の岸沖分布を図-8に示す.初 期(a)には前浜(+3m)は中粒と粗粒が1/2ずつで構成 されているが、そこから-4mまでは中粒が、さらに沖合 には細粒が堆積するという現地海岸の粒径分布に近いも のが設定されている.この状態で高波浪が襲来すると (b)、中粒が沖向きに移動するため広い海底面が中粒で 覆われ、逆に粗粒は侵食された前浜の最奥部にのみ堆積 することになる.同様に初期に細砂で覆われていた沖合 海底面は広く中砂で覆われる(b).しかしこの状態で常 時波浪が襲来すると、中粒分が岸向きに移動するため沖 合の海底面には細粒が現れ、中粒は岸側に運ばれて初期 とほぼ同じ粒径分布となる.

道路の被災区域を通る X=6.5km 断面での計算結果を図-9に示す.この断面では、高波浪の襲来により護岸前面 の前浜は完全に消失し、護岸の基部での水深が2mとなった.また、この断面では、道路の被災後仮設護岸が前 出しして造られた.この結果、仮設護岸前面の水深が増 加したため、前浜の復元は良くない.

図-10は初期と高波浪襲来後における平均粒径の平面 分布を示す。初期には沿岸方向には一様で,水深方向に は急激に減少する粒度分布であるが,高波浪作用後には 中粒分が広い範囲に広がる。その後常時波浪が作用する と初期状態に近い分布形となる。

5. まとめ

前浜構成材料が主に礫で構成される西湘海岸では, 2007年の台風9号襲来時急激な侵食が起きた.この台風 前後の粒度調査によれば,バーム付近に存在した礫は汀 線付近に留まり,中砂成分の選択的沖向き移動が見られ た.本研究では,これを考慮し海浜構成材料の粒径に応 じた平衡勾配の変化を等深線変化モデルに組み込むこと により,高波浪時の粒径に応じた応答の違いを考慮し, 実態に即した海浜変形予測が可能なモデルを構築した. モデルを西湘海岸へ適用した結果,実測値と比較してほ ぽ妥当な結果を得ることができた.



図-10 初期と高波浪襲来後における平均粒径の平面分布

一方,下山ら(2010)は西湘海岸の大磯地先における 時化前後の礫浜で堆積状況変化を実測し,有義波高2.1m の高波の作用時,後浜には再び砂成分が堆積したことを 明らかにした.本研究はこのような砂と礫の選択的移動 の予測モデルとして実用的に使用できる.

参考文献

- 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.
- 宇多高明・住谷廸夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998) 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地 形変化予測、海岸工学論文集、第45巻、pp.541-545.
- 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.
- 宇多高明・丸山將吾・高野弘之・芹沢真澄・三波俊郎・ 石川仁憲・宮原志帆(2009):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.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛(2005):波の遮蔽 域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法,海洋開発論 文集,第21巻,pp.1029-1034.
- 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.
- 下山陽平・小林昭男・宇多高明・石川仁憲・遠藤将利 (2010):西湘海岸の大磯地先における礫の堆積状況調査, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.546-550.