粗粒材養浜時における礫浜上での砂層形成予測モデル

Model for Predicting Formation of Sand Layers on Gravel Beach after Beach Nourishment using Coarse Materials

古谷真広¹・小林昭男²・宇多高明³・野志保仁⁴

Masahiro KOYA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA and Yasuhito NOSHI

Field observation on sand deposition on the gravel beach was carried out on the Jinkoji and Akashi coasts facing the Pacific Ocean. On the basis of the contour-line-change-model, a model for predicting sand deposition on the gravel beach under the calm wave conditions was developed, taking into consideration that the equilibrium slope of sand is increased due to the percolation effect of gravel bed and its effect depends on the thickness of sand layer. Furthermore, landward movement of gravel due to storm waves was explained by the model. Predicted results were in good agreement with measured values.

1. はじめに

茨城県の神向寺海岸では、径3～13mmの礫を用いた粗粒材養浜が行われ、これにより過去に消失した砂浜の復元が可能ながことが明らかにされた(松浦ら, 2009)。神向寺海岸での粗粒材養浜の成功を受けて、神向寺海岸の北に隣接する明石海岸でも2008年11月より同じ粒径の礫による養浜が開始された。古谷ら(2010)は、明石海岸の養浜後定点写真撮影を行い、これより静穏時に礫浜の表面に砂が堆積する一方、荒天時には砂層が消失すると同時に礫が岸側へと打込まれることを明らかにした。また、細砂中砂の平衡勾配を計算開始時から急勾配で与える手法により縦断形変化のモデル化を図った。しかし、実際には礫浜上に堆積する砂の平衡勾配は、砂層厚に応じて変わると考えられる。また、荒天時の砂層消失と礫の打込みの計算も行われたが、静穏時に形成された砂層を構成している土砂の空間的広がりや粒径含有

率、さらには埋没礫層の空間分布の予測はできていない。本研究では、野志ら(2009)のモデルを基礎として、これらを考慮した縦断形変化予測モデルを開発した。

2. 礫浜に関する現地調査

(1) 礫浜上への砂の堆積

縦断形予測モデルの構築に先立ち、神向寺海岸での粗粒材養浜後の縦断形や砂層厚の変化を調べた古谷ら(2010)の結果に加え、他の時期における海浜状況変化の観察結果も加えて考察する。図-2は、図-1に示す神向寺海岸の7号HLの南側隣接部における2008年12月4日と2009年8月8日における海浜状況の変化を示す。投入粗粒材は色が黒いことから、図-2(a)では汀線からバームまで全体に粗粒材が堆積していたことが分かる。海浜利用面から見ると素足では歩きづらい状態にあった。しかし2009年8月8日の調査では図-2(b)に示すように礫浜上に砂が堆積して海浜の色が白くなり、海浜利用面から

図-1 神向寺・明石海岸の位置と砂層調査の測線No.32の位置

図-2 冬季と夏季の海浜状況の変化
(神向寺海岸の7号HLの南側隣接部)

1	修(工)	栗田工業株式会社
2	正会員	工博 日本大学教授理工学部海洋建築工学科
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
4	正会員	博(工) (有)アイコムネット

図-3 2009年2月10日と2009年3月26日の海岸状況の変化 (古谷ら, 2010)

図-5 2009年8月8日～2009年9月1日の海岸状況の変化

図-4 2009年2月10日～2009年3月26日の波浪条件

大きく改善されていた。とくに前浜の水際線に近い部分では、礫浜上への堆砂の層厚は最も薄い地点でも20～30cm、厚い場所では1m以上もあって、礫床は完全に隠されていた。礫浜上への砂の堆積は夏季の比較的静穏な波浪条件下で起きており、砂浜での波浪の強弱に伴う冲向き岸向きの漂砂と、礫浜の持つ高い浸透性が関係していることを示唆する。図-3は、2009年2月10日と2009年3月26日の神向寺海岸の海岸状況の変化を示す (古谷ら, 2010)。2009年2月までに粗粒材養浜が行われ、緩傾斜護岸ののり先と平行に設置されていた消波堤の半ばを埋めて礫が堆積していた。消波堤の海側では白く見えるように礫層の上に砂が堆積していたが、消波堤の陸側はほとんどの区域が礫で覆われていた。しかし46日経過後の2009年3月26日には消波堤の岸側に白い砂が堆積した。黒い礫浜から白い砂浜への変化は、図-2に見られた変化と全く同様である。図-3(a), (b)において、消波堤に突き刺さった流木をA、その下部の異形ブロックをBとして比較すると、2月10日にはBの頭が砂礫上に突き出ていたが3月26日には頭の部分を残してほぼ砂に埋まったことから、砂礫の上に岸向きに運ばれた砂が堆積し約0.4m地盤高が上昇したことが分かった。また消波堤沖に大量の砂が堆積して前浜が広がると同時に、消波堤の異

形ブロック間から陸向きに何本もの筋目模様が見えることから、ほぼ海岸線と直角方向に砂が運び込まれたことが明らかであり、このような地形変化がHLより離れた場所でも起きていることから、HLによる波の遮蔽域での局所的現象ではなく、2次元海浜変形として起きたと考えられる。

図-4は2009年2月10日～3月26日の波浪条件の変化を示す。2月10日から3月3日までの21日間、日平均の $H_{1/3}$ は1.31m (平均波形勾配0.016)と静穏な状態が続いた。したがってこの間には前浜での堆砂が進んだと考えられるが、その直後の3月4日から3月7日には低気圧の通過に伴って波高が高まり、3月6日には $H_{1/3}=3.01\text{m}$ の高波浪が来襲したことから、これ以前に前浜に堆積していた砂は冲向きに運ばれたと考えられる。しかし3月8日から3月24日までの16日間再び静穏となり、 $H_{1/3}$ は平均で1.24m (平均波形勾配0.013)となったことから、2月10日から3月3日の静穏時と同様、前浜への堆積が進んだと考えられる。さらに3月25日には $H_{1/3}=2.21\text{m}$ の高波が作用したため、前日までに前浜に堆積した砂は再び冲向きに運ばれた可能性はある。しかし3月3日から3月8日までの期間では $H_{1/3}=2\text{m}$ 以上の高波浪が4日間継続したのに対し、観測日直前の3月25日には最大波高が3月6日の $H_{1/3}=3.01\text{m}$ と比べて $H_{1/3}=2.21\text{m}$ と低く、かつ高波浪の継続時間が1日と短かったため、3月24日までに生じた前浜での堆積の影響が色濃く残されたと考えられる。結局、2月10日から3月26日までの間には堆積作用と侵食作用がそれぞれ2回発生しており、3月26日の前浜地形にはそれらの作用の履歴効果が残されているものの、観測日直前における波の作用の結果が強く現れていると考えられる。

(2) 礫の岸向き移動

粗粒材養浜におけるもう一つの特徴は、高波浪の作用時週上高の高まりに応じて礫が陸側に打ち込まれることである。この現象も2回観察された。第1回は2009年8月8日～9月1日に観察されたもので、観測期間中に台風11号に伴う最大有義波高5.12m (周期8.6s)の波の作用があった。第2回は、2009年9月17日～10月2日の期間であり、この間 $H_{1/3}=3.1\text{m}$ の高波浪が作用した結果、礫の岸向き移動が起きた。

図-6 2009年8月8日～2009年9月1日の海岸状況の変化
(7号HL上から北向きに望む)

図-7 2009年8月8日～2009年9月1日の波浪条件

図-5 (a) は2009年8月8日の海浜状況を示す。この時期は粗粒材の投入が行われていた時期であり、消波堤の海側には礫が敷き並べつつあったが、消波堤と緩傾斜護岸の間は砂礫が堆積し、砂の色が白かった。しかし2009年9月1日には図-5 (b) のように消波堤より陸側に大量の粗粒材が打ち込まれ、海浜全体が黒くなった。異形ブロックB付近での地盤高の上昇量は約0.7mであった。定点写真は、7号HL上から図-5 (a) の撮影位置方向を望んでも行われた。7号HL上から2009年8月8日と9月1日に北向きに望んで撮影された写真が図-6 (a), (b) である。8月8日には粗粒材養浜により高いバームが形成されていたが、9月1日にはバームを形成していた礫はほとんど全部削り取られ、岸向きに移動したことが分かる。このようにいずれの方向から見ても礫が岸向きに運ばれたことが明らかである。

図-7は、2009年8月8日～9月1日における波浪条件を示すが、観測開始21日目の8月29日までは平均の $H_{1/3}$ が0.97mと静穏な状態が続いた。したがってこの間は砂の堆積も起きたと推定されるが、8月30日には台風11号により $H_{1/3}$ が最大で5.12m (周期8.6s) という高波浪が襲来した。この結果、高波浪の作用により堆積していた砂は沖向きに流出すると同時に、バームを形成して堆積して

図-8 2009年9月17日～2009年10月2日の海岸状況の変化
(7号HL上から北向きに望む)

図-9 2009年9月17日～2009年10月2日の波浪条件

図-10 神向寺海岸の測線No.32における縦断形変化と砂層厚分布

いた粗粒材は短時間で岸へと打ち上げられたと考えられる。

第2回目の2009年9月17日～10月2日の観察における、図-6の撮影位置と同一地点から撮影した地形変化を図-8 (a), (b) に示す。9月17日には黒い礫が大量に堆積し高いバームが形成されていたが、10月2日には礫バームは消失し、礫は岸側へと打ち上げられた。しかし、その後汀線付近での砂の堆積が進みつつある。図-9はこの期間の波浪条件を示す。9月19日から22日まで4日間、 $H_{1/3}$ は2m以上の高波浪となり、とくに9月21日には $H_{1/3}=3.1$ mの高波浪が襲来している。このことから、高いバームを

表-1 計算条件

計算ケース		1	2		
		静穏時	荒天時		
初期勾配		Z=5.0~-0.5	1/6		
		Z=-1.0~-5.0	1/60		
		Z=-5.5~-10	1/150		
初期粒径含有率	Z=5.0~-0.5	礫, 7.0mm	100%		
		中砂, 0.425mm	0%		
		細砂, 0.106mm	0%		
	Z=-1.0~-10	礫, 7.0mm	0%		
		中砂, 0.425mm	30%		
		細砂, 0.106mm	70%		
平衡勾配		礫, 7.0mm	1/6		
		中砂, 0.425mm	1/30		1/100
		細砂, 0.106mm	1/100		1/100
浸透効果により 急勾配化した平衡勾配		礫, 7.0mm			
		中砂, 0.425mm	1/6		
		細砂, 0.106mm	1/6		
交換層幅B (m)		0.5			
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	1.2	2.5		
	碎波波向 α_{bs} (deg.)	0.0			
	潮位条件M.S.L. (m)	0.0			
地形変化の 水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	6.0	8.0		
	バーム高 h_R (m)	2.5	3.5		
漂砂量係数	漂砂量係数 A	0.3			
土砂落ち込みの 限界勾配	陸域	1/2			
	海域	1/3			
計算範囲	鉛直方向Z (m)	-10~5			
計算メッシュ	ΔZ (m)	0.5			
履歴メッシュ	メッシュ数R	200.0			
	メッシュ間隔 ΔXR (m)	0.5			
計算ステップ	計算時間間隔 Δt (hr)	$5.0 \times (10^4)$	$5.0 \times (10^6)$		
	計算ステップ数	$5.0 \times (10^4)$	$1.0 \times (10^7)$		
	時間換算 (hr)	250	5

図-11 各標高の砂層厚とその閾値

形成していた礫はこのときの高波浪の作用で岸向きに打ち込まれたが、9月23日～10月2日では $H_{1/3}$ が1.5m以下の静穏な状態が続いたことから、汀線付近では再び砂の堆積が起きたと考えられる。以上に示した土砂移動においては、砂の堆積に要する時間が2週間程度かかるのに対し、高波浪時の砂の沖向き移動および礫の岸向き移動は1日程度で完結し、応答時間が異なることも特徴のひとつである。

図-10は神向寺海岸の測線No.32 (図-1) での測量結果と底質粒度組成を示す。海浜表面の砂層を鉛直方向に掘削し、地中の礫層に達した深さを▲印で示した。×印は掘削中に礫層に達する前に地下水位に達してしまったため掘削を終えた深さである。ここで砂層厚はバーム頂部

の $Z=2.0\text{m}$ で約0.3m、 $Z=0.0\text{m}$ で約0.8mであった。また地中の礫層勾配は1/5であるのに対し、砂層勾配はバーム頂部ではほぼ同等の1/6であった。さらに標高が低くなり汀線へ近づくほど勾配が緩く、汀線付近の $Z=0.5\text{m}$ での勾配は1/17、海面下の $Z=-1.0\text{m}$ 以下では1/45勾配となった。砂層厚と併せて見ると、勾配が急なバーム頂部では砂層厚が小さく、逆に勾配が緩くなる汀線付近では砂層厚は大きくなる特徴があるが、これらは前報では予測できなかった。砂層の粒度組成は、中砂粗砂が80%、細砂が20%程度を占める。

3. 縦断形変化の予測モデル

現地観測の結果によれば、次の推定が可能である。まず、礫浜では浸透が顕著に見られたことから、浸透により戻り流れが弱まり、これに伴い砂の平衡勾配が急となって礫斜面上での砂層形成が可能になったと考えられる。また、地下水位との水頭差が最も大きく、浸透効果が著しいと考えられるバーム頂部では前浜勾配が急なのに対し、礫浜への浸透が弱まる汀線付近では海浜勾配が緩くなったと推定される。本研究では、これらの推定に基づいてモデル化を進め、礫床上に堆積する砂の平衡勾配を砂層厚に応じて変化させた。ここで調査結果を参考として、各標高の砂層厚とその閾値を図-11に示すように S_L 、 S_{LM} とし、浸透効果が生じた場合の平衡勾配を式(1)から算出した。

$$\cot \beta_c = (\cot \beta_0 - \cot \beta_p) \times \frac{S_L}{S_{LM}} + \cot \beta_p, \quad \frac{S_L}{S_{LM}} \leq 1 \quad (1)$$

ここに、 β_p は浸透効果によって急勾配化した勾配角、 β_0 は本来の平衡勾配である。礫層の勾配は約1/6であり、また沖合の勾配は約1/65であることから、石井ら(2006)を参考に $Z=-0.5\text{m}$ で折れた複断面を初期縦断面とした。粒径含有率の初期値は、沖浜底質の砂の含有率(細砂:中砂=7:3)を与えた。砂層厚は現地測量結果に基づき、浸透効果が発揮されるであろう $Z=0\text{m}$ 以上の標高毎に層厚の閾値を設定し、ある標高における層厚が閾値を超えた場合、それより1つ上の標高の層厚を参照するものとした。これにより標高の低い礫斜面上から徐々に砂層が形成されていく過程の再現が可能となる。そして礫斜面上の各標高全ての層厚が閾値に達した場合、浸透効果は発揮されず砂の平衡勾配は本来のものに戻るものとした。古谷ら(2010)によれば、礫層上での砂層形成は静穏波条件で起きたことから、沖の細砂中砂の平衡勾配は、砂層が全くない場合は浸透効果により礫斜面の勾配と等しいが、砂層厚が厚くなると細砂中砂の有する平衡勾配に漸近するとした。

一方、高波浪作用時の縦断形変化については、福濱ら

図-12 静穏時の砂層形成の再現計算結果

図-13 静穏時の計算結果と測量結果の比較

(2008)を参考に砂の平衡勾配を減少させ、かつ高波浪に伴い波の遡上高が増大するとし、バーム高を2.5mから3.5mに高めた。また、荒天時には地下水位が上昇することから、浸透効果による砂の平衡勾配の増大は起こらないとし、一方で礫は急な平衡勾配を保ったままなので、砂層は消失するが礫はより高い標高へ打込まれると考えた。このとき静穏時に記憶した堆積土砂の履歴を考慮することにより、砂層を形成していた細砂中砂と、埋没した礫の土砂収支をそれぞれ満足させることが可能となる。計算では、表-1に示すように静穏波の作用後に高波浪を作用させた。

4. 予測計算の結果

静穏時における砂層形成の縦断形変化と、標高ごとに整理した海浜表面の粒径含有率の分布を図-12に示す。浸透効果により砂の持つ平衡勾配が急になることで礫斜面上に砂層が形成され、砂層は緩やかな縦断形を持って初期断面にすり付く分布となった。また、当初の汀線より陸側の海浜表面は礫のみで覆われていたが、波の作用とともに礫上に中砂と細砂が載り+2mまで礫の含有率が低下したことが分かる。実測縦断形と計算縦断形を図-13に示すが、計算された砂層形状および汀線位置は両者で良い一致を示している。図-14は、高波浪時における礫の打ち込みと砂の沖向き移動状況の計算結果として、縦

図-14 荒天時の礫打込みの再現計算結果

断形変化と、標高ごとに整理した海浜表面の粒径含有率の分布を示す。高波浪の作用により護岸前面に礫が集中的に堆積して地盤高が上昇することが見て取れる。また、当初礫は前浜のバーム直下の+2m以上にのみ存在し、+2m以下は中砂または細砂で覆われていたが、波の作用により砂が沖へと運び去られた結果、ほぼ-1mまで礫が現れた。このように高波浪時に礫が護岸前面へとうちあげられる状況は図-5の観察結果をうまく説明している。

5. まとめ

野志ら(2009)のモデルを基礎として、静穏波条件での礫浜への堆砂について礫浜の浸透効果により砂の平衡勾配が砂層厚に応じて変わると考えてモデルを図った。また、荒天時の砂層消失と礫の打ち込みの計算のモデル化も行った。このモデルに実測勾配を与えて計算したところ、静穏時に形成された砂層を構成している土砂の空間分布と粒径含有率、さらに埋没礫層の空間分布をある程度まで計算できた。このことから、少なくとも観察に基づいたモデル化が実現現象をかなりうまく表現していると考えられる。

参考文献

- 石井秀雄・中村友和・宇多高明・大木康弘・熊田貴之・芹沢真澄(2006):茨城県神向寺海岸での粗粒材養浜による砂浜の安定化, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.887-892.
- 古谷真広・小林昭男・宇多高明・野志保仁(2010):明石海岸における礫養浜後の海浜状況変化, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.1053-1057.
- 野志保仁・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2009):滑らかな縦断形を予測可能な3次元モデルを利用した養浜効果検討, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.691-695.
- 福濱方哉・宇多高明・山田浩次・芹沢真澄・石川仁憲(2008):前浜勾配と汀線の短期変動の予測モデル, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1237-1242.
- 松浦健郎・宇多高明・諏訪義雄・山田浩次・福本崇嗣(2009):砂浜の海岸保全施設指定に向けた粗粒材養浜の有効性の検討, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.1119-1124.