礫養浜と突堤による検見川浜の緩傾斜護岸の親水機能の向上

宮田 隆平¹・小林 昭男²・野志 保仁³・宇多 高明⁴

¹ 日本大学理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

E-mail: csry13134@g.nihon-u.ac.jp

² 正会員 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

E-mail: kobayashi.akio@nihon-u.ac.jp

³ 正会員 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

E-mail: noshi.yasuhito@nihon-u.ac.jp

⁴ 正会員 一般財団法人土木研究センターなぎさ総合研究所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)

緩傾斜護岸はその構造上のり先が砂礫で埋まっておれば安定であるが、侵食などによりり先が露出するとり先から裏込め土砂の吸出しが起き、それがもとでのり面や背後地での陥没が起こることが多い。また緩傾斜護岸のり先が直接波に曝されると、り先が生物付着のため滑りやすくなって転倒の危険性が増すなどの障害も起こり得る。本研究では、このような状況が見られる東京湾湾奥にある検見川浜を対象として、これらの障害を取り除く一つの方法として、護岸前面での礫養浜と突堤により砂浜を回復し親水機能を高める方策について BG モデルを用いて検討した。

Key Words : *gently sloping revetment, gravel nourishment, Kemigawa Beach, BG model, numerical simulation, beach changes*

1. まえがき

高潮・津波被害を防止するために海岸には古くから護岸が建設されてきた。様々な形式の護岸のうち、のり面勾配が1/3以下の護岸は緩傾斜護岸と呼ばれており、これらはのり面勾配が小さいため親水性の向上や景観への配慮を目的として各地で造られてきた。一方、海岸侵食や高波浪の作用に伴い各地で海岸護岸の被災も生じてきている。護岸の被災に関する実態調査¹⁾によれば、調査母数の約半数が緩傾斜護岸であるとされている。これらの護岸は、その構造上のり先が砂礫で埋まっておれば安定性の確保が可能であるが、侵食などによりり先が露出すると、のり先から緩傾斜護岸の裏込め土砂の吸出しが起き、それがもとでのり面や背後地での陥没が起こることも多い。また緩傾斜護岸のり先が直接波に曝されると、のり先が生物付着のため滑りやすくなって転倒の危険性が増すなどの障害も起こり得る。そこで本研究では、このような状況が見られる東京湾湾奥に位置する検見川浜を対象として、これらの障害を取り除く一つの方法として、緩傾斜護岸前面での礫養浜と礫の流出を防止する突

堤により砂浜を回復し、親水機能を高める方策について野志ら²⁾によるBGモデルを用いて検討した。

2. 検見川浜の現況

検見川浜は東京湾湾奥に位置し、東京湾を南西方向に望む人工海浜である。図-1には検見川浜の衛星画像を示す。海浜は沿岸方向に長さ 1.3 km を有しており、南端と北端

図-1 検見川浜の位置

図-2 深浅図 (2015 年 11 月測量)

図-4 緩傾斜護岸背後での陥没 (2016 年 12 月 21 日)

図-6 測線 5 の汀線際の底質

には曲突堤, さらに南曲突堤の北 800m には Y 字突堤が造られている。南曲突堤と Y 字突堤, および Y 字突堤と北曲突堤間の海岸線には直線状の緩傾斜護岸が伸びている。図-1 に示すように, 南北の曲突堤による波の遮蔽効果により, 両端の曲突堤の隣接部には広い前浜が形成されているのと対照的に, Y 字突堤の両側近傍では砂が曲突堤方向へと運び去られたため前浜が狭く, 緩傾斜護岸前面の砂浜の消失により護岸が波に曝された状態となっている。なお, 図-1 には南曲突堤から北曲突堤の間に配置した 9 測線の位置を示す。これらの測線上では 2016 年 8 月 3 日に縦断測量を行った。また, 図-2 には 2015 年 11 月測量による検見川浜の深浅図を示す。両端に位置する曲突堤と中央部の Y 字突堤がそれぞれ波の遮蔽効果を発揮するために, これらの施設の背後では等深線が前進する一方, それらに挟まれた区間では沿岸漂砂により砂が運び去られたため凹状の等深線となっている。この凹状の等深線を持つ深みの底に緩傾斜護岸が設置されている

図-3 測線 7 付近の海岸状況 (2016 年 8 月 3 日)

図-5 測線 5 付近の海岸状況 (2016 年 8 月 3 日)

状態となっているため, 緩傾斜護岸への波の作用が著しい。

例えば, 図-3 は, 図-1 の測線 7 付近において Y 字突堤を望んで撮影した海岸状況を示す。緩傾斜護岸の前面が露出し, 海水と接する面は付着生物で覆われ, 濡れた状態では歩行が危険であった。護岸のステップは滑りやすくやすく緩傾斜護岸の持つ海岸へのアクセスのしやすさからかけ離れていた。それだけでなく, 測線 7 付近では図-4 に示すように, 護岸の背後地盤において護岸裏込め土砂が吸い出されて陥没が起きていた。陥没穴の一つは直径 1.2m, 0.20m の深さを有しており, また吸出しにより陥没穴はいくつも確認できた (図-4)。一方, Y 字突堤の南側に隣接する測線 5 付近では緩傾斜護岸ののり先は礫で埋まっており, 測線 7 付近での護岸のり先が露出し, 生物付着が著しかったのと著しい対照を示した (図-5)。このように汀線付近に礫が潤沢にあれば緩傾斜護岸ののり先を礫が覆うことにより, 護岸ののり先が保護されることが分かる。しかしながら図-5 において礫浜の前方(南側)では, 測線 7 と同様護岸のり先が露出し, 潮間帯付近では生物付着が著しかった。これは汀線付近に堆積する砂礫の量が不足しているためその部分に堆積できなかったことによる。図-6 には測線 5 の汀線付近の海浜材料を示す。海浜材料は直径 15mm ほどの礫が大半を占めており, また礫は丸みを帯び 海浜利用上も障害にはなっていない。

図-7 縦断形および粒度組成 (測線 7)

図-9 粒度組成 (測線 5)

3. 海浜断面の特徴

2016年8月3日、図-1に示したように沿岸に9測線を設定し、RTK-GPSによる縦断形測量とともに代表地点で底質サンプリングを行った。また海岸状況の踏査を行い、海岸状況写真を撮影した。観測結果として、まず測線7上の地点Aで採取した底質の粒度組成を図-7に示す。緩傾斜護岸ののり先は波に曝されていたが、そののり先の海底面には中砂と細砂が堆積し、これら両者の含有率は全体の96%を占めていた。またA付近での海底勾配は1/42と緩やかであった。同じく図-8,9には測線5での縦断形と粒度組成を示す。緩傾斜護岸ののり先の標高1.2m以下で堆積が起きていた。この測線では図示する地点A~Fで底質を採取し粒度組成を調べたが、のり先の地点A~Eには主に礫が堆積し、のり先より沖の地点Fには中砂および細砂が堆積していた。地点E,Fの間が干潮時汀線であることから、干潮時汀線より陸側には礫が堆積し、その沖では中砂細砂が堆積していることが分かった。これは橋本³⁾が行った館山湾に面した那古船形海岸での観測において、前浜には相対的に粒径の大きな砂が堆積する一方、沖合では粒径の細かい砂が分かれて堆積していたのと同じ傾向である。検見川浜ではA~Eでの礫浜の勾配は1/6.8であった。また測線5上の地点F付近の勾配は1/14と緩くなり、粒度組成は測線7の地点Aのそれと酷似していた。

図-8 縦断形 (測線 5)

図-10 測線5,7における縦断形の重ね合わせ

表-1 計算条件

初期勾配		1/50
初期粒径と含有率		15mm,100%
平衡勾配		1/6.8
交換層幅 B(m)		1.35
入射波条件	砕波波高 H_b (m)	1
	周期 T (s)	4
	砕波波向 α (deg)	0
	潮位条件 M.S.L.(m)	0
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	3.5
	バーム高 h_R (m)	1.5
漂砂量係数	漂砂量係数 A	0.5
	小笠プランクトン項の係数	0.5
	岸沖・沿岸漂砂量係数比	0.2
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2
	海域	1/3
計算範囲	沿岸方向 X (m)	0~1370
	岸沖方向 Y (m)	-30~500
計算メッシュ	ΔX (m)	10
	ΔY (m)	10
計算時間間隔 Δt (h)		0.1
計算ステップ数		2,000,000

以上の観測結果をまとめ、図-10には測線5と7の縦断形の重ね合わせ図を示す。いずれの場所でも緩傾斜護岸の勾配は1/3であるが、測線5の緩傾斜護岸前面は砂礫で覆われているのに対し、測線7では砂礫の堆積はなく緩傾斜護岸ののり先が露出している。このことから、以下の検討では護岸ののり先が露出した測線7の状況を測線5のようにのり先が砂礫で覆われた状況に改良できないかとの視点から検討を進めた。

4. BGモデルによる養浜時地形変化予測

(1) 計算条件

本研究では野志³⁾によるBGモデルを用いて検討を進めたが、それに必要な諸条件は現地状況を基に設定し

た。礫養浜のモデル計算を進める上で必要とされるパラメータを一括して表-1に示す。投入礫の粒径は現況の検見川浜に堆積している礫と同じ15mmとし、平衡勾配は測線5で実測した前浜勾配1/6.8が安定していると判断できるので、これを平衡勾配に等しいとした。波は直角入射とし、バーム高を1.5m、波による地形変化の限界水深を3.5mとした。また、図-2に深浅図を示す現況の検見川浜は、施設が1999年に完成後十分長い時間が経過していることから地形変化はほぼ終息していると考えられる。そこで図-2に示す海底地形を固定床とみなし、その状態で礫を投入して礫の移動による地形変化を調べた。

礫養浜の計算は、礫の流出防止を図る突堤のない場合と、突堤ありの場合に分けるとともに、養浜量を2種類変え、全体で4ケースの計算を行った。Case 1, 2は礫の流出防止のための突堤のない条件で、Case 1では、緩傾斜護岸の面積の30%に相当する前浜の創出を目指して、南側、北側の緩傾斜護岸の前面に7,000m³、3,000m³の養浜を行った。この場合、南側の緩傾斜護岸の前面では10m幅で長さ390mの範囲に礫を敷き詰め、北側の護岸前面でも同様に10m幅で長さ190mの範囲に礫を敷き詰めた。また養浜時の海浜の高さは2mとした。Case 2では養浜量を増加させ、南北の緩傾斜護岸の前面に護岸で覆われた面積の100%相当分の前浜の増加が得られるよう、南側、北側の護岸前面にそれぞれ26,000m³、9,000m³の養浜を行った。この場合の土砂投入は、南側の緩傾斜護岸の前面では幅30mで長さ390m区間で、また、北側の護岸前面でも同様に幅30mで長さ190m区間に礫を敷き詰めた。また養浜時の海浜の高さはCase 1と同様に2mとした。

Case 3, 4ではCase 1, 2と養浜量、養浜区域を同一として、養浜区間の南端と北端に突堤を設置して養浜礫を投入区域に留める手法について検討した。この場合、図-8によれば礫は汀線より陸側に集中的に堆積しており、水深2mではみられなくなること、また同様な特徴は神向寺海岸でも観察されたこと⁴⁾から、本研究でも突堤の先端水深が2mとなるよう突堤長を80mとした。なお、いずれのケースでも養浜材料に礫を用いた理由は、例えば粒径が0.2mm程度の細砂では平衡勾配が1/30程度と緩やかで、安定な砂浜を造るためには岸沖方向の長い距離にわたって砂が広がることを許す必要があるのに対し、礫では実際に図-10に示したように緩傾斜堤ののり面勾配1/3よりは緩やかで、かつ細砂と比べて1/7と急な勾配で堆積し、護岸ののり先をうまく砂礫に埋めることが可能なことによる。このことはまた礫の調達量が少なくて済むことも意味している。

(2) 計算結果

南側の緩傾斜護岸の前面に7,000m³、北側の護岸前面

に3,000m³の礫養浜を行ったCase 1の計算結果を図-11に示す。北側の護岸前面に投入された礫は、沿岸漂砂により投入点から南北両側に広がった。前浜は広がったものの前浜の拡幅が最も望まれる護岸中央部での礫の堆積量は少なく、中央部で前浜を拡げるという目的を達成できなかった。また、南側の護岸前面においても投入礫は南北方向に移動し、中央部での護岸のり先の露出は防ぐ

図-11 養浜後の深浅図および水深変化量(Case 1, 10,000 m³養浜)

図-12 養浜後の深浅図および水深変化量(Case 2, 35,000 m³養浜)

図-13 養浜前後の汀線変化

図-14 養浜前後の縦断形変化

ことができなかった。同様にして養浜量を南北それぞれ $26,000 \text{ m}^3$, $9,000 \text{ m}^3$ と養浜量を増した Case 2 の計算結果を図-12に示す。Case 2でも北側の護岸前面では、礫の養浜を行ったとしても投入礫は沿岸漂砂により南北方向に運ばれてしまい、緩傾斜護岸中央部への堆積はわずかとなった。また、南側の護岸前面では北側よりも沿岸漂砂による影響が明確に出ており、護岸中央部への堆積量は少なかった。投入礫の大半は曲突堤背後の波の遮蔽域方

図-15 突堤設置後の深浅図および水深変化量(Case 3, $10,000 \text{ m}^3$ 養浜)

図-16 突堤設置後の深浅図および水深変化量(Case 4, $35,000 \text{ m}^3$ 養浜)

向へ移動し、護岸前面には礫がわずかししか堆積しないという結果となった。

養浜前後の汀線変化を図-13に示す。Case 1, 2ともに、養浜直後には緩傾斜護岸前面で汀線が前進したものの時間経過とともに養浜土砂が主に沿岸方向に流出したために汀線が後退した。その際、Y字突堤の北側では護岸前面の深みを礫が埋めたため、Y字突堤近傍での汀線の前進量は小さくなった。さらに、Case 1,2について、図-13

図-17 初期からの砂浜幅増加量

に示す $X=400$ m 断面における養浜前後の断面変化を図-14 に示す。護岸全面にあった凹状部分を埋めて養浜が行われた後、再び土砂が流出したが、最終的に平衡勾配に等しい勾配の断面となった。

養浜礫は沿岸漂砂により両端部へと運ばれたことから、Case 3, 4 では養浜区間の南端と北端に突堤を設置することにより養浜礫を投入区域に留める方向についても検討した。Case 3 の計算により得られた深浅図と初期からの水深変化量を図-15 に示す。北側の護岸前面ではもともと北側への流出礫が少なかったため、突堤先端を超えて土砂が流出することはなかった。一方、南側の護岸前面中央部は露出したことから、より多くの養浜が必要となる。これを検討した Case 4 の結果を図-16 に示す。南側の突堤先端まで土砂が堆積しているが、突堤先端を超え、流出することはなかった。緩傾斜護岸設置区域における初期からの砂浜幅の増加量を図-17 に示す。Y 字突堤の北側では突堤の有無による差はあまりないが、南側では中央部付近の浜幅が大きく広がり、突堤の設置効果が顕著に現れたことが分かる。

5. まとめ

検見川浜では、南北緩傾斜護岸の前面に総量 $35,000\text{m}^3$ の養浜を行うとともに、養浜区域の両端に礫の流出防止のために先端水深 2 m、長さ 80 m の突堤を設置すれば、現況で波に曝された緩傾斜護岸ののり先を礫で覆うことにより防護・利用条件の向上に役立つことが分かった。一方で、突堤を設置したことによる突堤自体への生物付着や突堤からの転落の危険性が考えられるが、これらに対しては柵を設ける等の対策が必要と考えられる。なお、両側に波の遮蔽構造物が造られた場合に海浜中央部で砂浜幅が大きく狭まり、海岸利用上の障害となったり、あるいは護岸からの越波が増すなどの現象は各地で起きている。このような場合、そこに消波構造物を設置すると景観の低下を招くことから、海浜中央部の砂浜幅を広げることが望ましい。粗粒材養浜の行われた茨城県の神向寺海岸の 6, 7 号ヘッドランド間中央部でも同様な現象が起き、本論文と同様な検討が行われた⁴⁾。これより本研究で述べた手法は他の海岸での同種の問題にも適用が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄: 海岸堤防・護岸の被災に関する実態調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, p.I_7-I_12, 2011.
- 2) 橋本佳樹, 小林昭男, 宇多高明, 野志保仁: 砂浜干潟併存場において前浜と干潟面を分ける遷急線と汀線との斜交現象, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_559-I_564, 2016.
- 3) 野志保仁, 宇多高明, 芹沢真澄, 熊田貴之, 酒井和也: 粒度組成を考慮した平衡勾配概念および Bagnold 概念に基づいた地形・粒径変化予測モデル, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.501-505, 2009.
- 4) 宇多高明, 芹沢真澄, 宮原志帆, 大木康弘: 神向寺海岸の 6, 7 号ヘッドランド間中央部の前浜拡張手法, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, p.I_748-I_753, 2015.

(2017.2.2 受付)

IMPROVEMENT OF WATERFRONT FUNCTION OF GENTLY SLOPING REVETMENT BY GRAVEL NOURISHMENT

Ryuhei MIYATA, Akio KOBAYASHI, Yasuhito NOSHI and Takaaki UDA

The gently sloping revetment is stable when the toe of the revetment is buried beneath the sandy beach. However, when the toe of the revetment is exposed to waves as a result of beach erosion, fill material under the revetment is drawn out through the gap between the toe and sandy beach, resulting in the damage of the entire gently sloping revetment. Furthermore, when the toe of the revetment is exposed to waves, the revetment tends to be slippery because of the attachment of marine organisms, causing the increase in danger of the falling. In this study, the recovery method of sandy beach in front of the gently sloping revetment using gravel nourishment is discussed as a measure to improve the waterfront function, taking Kemigawa Beach in Tokyo Bay as an example. Numerical simulations were carried out using the BG model.