低天端突堤による砂礫海岸の漂砂制御の評価

Evaluation of Sand Transport Control on Gravel-Sand Beach Using Groins with Low Crown Height

渡辺国広¹・諏訪義雄²・宇多高明³・五十嵐竜行⁴・石川仁憲⁵・酒井和也⁶

Kunihiro WATANABE, Yoshio SUWA, Takaaki UDA, Tatsuyuki IGARASHI
Toshinori ISHIKAWA and Kazuya SAKAI

A numerical simulation of the beach changes on the Seisho coast was carried out using a contour-line-change model considering changes in the grain size. The applicability of the simulation model to a gravel-sand beach with protruding rocks was verified by comparing the calculated and observed changes after storm waves generated by T0709. The sand transport controls achieved by different types of coastal facilities were estimated and compared under an imaginary wave condition that could occur in future. A newly-designed groin with a low crown height was found to be most effective in preserving a straight coastline, if a sufficient amount of sand will be supplied by beach nourishment.

1. はじめに

相模湾の湾奥に位置する西湘海岸は、2007年9月に来襲した台風9号に伴う高波浪によって広い範囲で侵食が起り、特に西湘バイパス大磯IC付近の延長約1.1kmでは前浜が消失して道路擁壁が倒壊する被害が発生した。急激な前浜の消失は、高波浪により西向き沿岸漂砂と沖向き漂砂が大規模に発生したことが原因と考えられるが、沖へ運ばれた中砂はその後の常時波浪によって戻ってきたのに対して、西に運ばれた砂礫の一部は戻ってこず、森戸川河口沖の海底谷へと流出したと考えられている(宇多ら, 2008)。同様の被災を繰り返さないためには、養浜によって砂浜の回復を図るとともに、高波浪時の西向き漂砂を制御することが求められている。

西湘海岸の砂礫層の下には岩盤が点在しており(図-1)、葛川河口では2007年9号台風の来襲時、それまで砂中に埋没していた岩盤が露出することで静穏時汀線より陸側の前浜部分で起きる漂砂(以下、浜漂砂)を抑制し、周辺の侵食を低減したことが報告されている(宇多ら, 2008)。この現象を踏まえて西湘海岸保全対策検討委員会では、常時の景観にも考慮して、高波浪時の沖向き漂砂によって前浜の地盤高が低下した時にのみ姿を現す岩盤を模倣した施設(以下、低天端突堤)を設置することで、高波浪時の西向き漂砂を選択的に抑制する方法が提案された(図-2)。

今後、海岸保全策の一案として具体的に低天端突堤の検討を進めるには、まずはどの程度の漂砂制御効果を見込むことができるかを定量的に把握することが不可欠である。類似の施設として合田ら(2009)が潜り突堤を提案しているが、砂浜海岸沖における漂砂が対象とされており、西湘海岸で卓越するバーム付近の浜漂砂の制御については評価されていない。そこで本研究では、西湘海岸における低天端突堤の漂砂制御効果を評価することを目的として、高波浪来襲時およびその後の常時波浪を想定した海浜変形計算を低天端突堤、従来型突堤およびヘッドランドについて実施した。

図-1 葛川河口の岩盤の状況(2014年5月2日撮影)

図-2 低天端突堤による漂砂制御の模式図

1 正会員	博(農)	国土技術政策総合研究所海岸研究室
2 正会員		国土技術政策総合研究所海岸研究室長
3 正会員	工博	(一財)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		(一財)土木研究センター河川・海岸研究部
5 正会員	工修	(一財)土木研究センターなごさ総合研究室
6 正会員	修(工)	(一財)土木研究センターなごさ総合研究室

図-3 研究の対象範囲と海底谷の位置

表-1 現地試験結果再現の計算条件

計算対象範囲	試験体周辺の延長500 m
入射波条件	$H_b = 1.8$ m, 波向 $\theta_w = -17.7^\circ$
再現期間	2010年12月10日～12月27日 (17日間)
代表粒径と平行勾配	代表粒径 $d_1 = 1$ mm (中粒・粗粒の砂), 平衡勾配 $\tan\beta_{cl} = 1/13$ (12/10の前浜勾配)
初期地形	直線平行等深線 ($z = +3 \sim -2$ m)
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $A = 0.05$, 岸沖沿岸漂砂量比 $\gamma = 0.15$
バーム高・限界水深	波による地形変化の限界水深 $h_c = 7.5$ m, バーム高 $h_R = 2.5$ m
計算等深線範囲	$z = +3$ m $\sim$ -2 m
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 5$ m, 鉛直方向 $\Delta Z = 0.1$ m
境界条件	左右端: 漂砂通過境界, 岸沖端: $q_z = 0$ (沿岸漂砂の沿岸方向変化率 $dq_x/dx = 0$)

表-2 低天端突堤による漂砂制御効果についての計算条件

予測期間	高波浪4.5日 $\times$ 2回, 通常波浪: 83 days
初期地形	表-1の初期地形に対し, 金波橋周辺2 km区間で最低浜幅30 mを確保するために, 来襲前の汀線を25 m前進させ, 1/10で養浜した地形
養浜材	酒匂川飯泉堰下流側の堆積土砂実測値 細粒材: 中粒材: 粗粒材 = 0.06 : 0.56 : 0.37
養浜量	73万 m^3

波波高 $H_b = 3.0$ m ($T = 9.1$ s), $H_b = 0.61$ m ($T = 5.5$ s)である。台風9号来襲時の波向は波浮観測所における観測値をもとにした波浪変形計算により碎波波向 $\theta_w = 10^\circ$ 、回復期間の波向は元の海岸線に対して直角方向とした。結果の比較に用いる汀線の実測データは、葛川以西については2007年9月13日撮影の空中写真から判読し、大井港～葛川間については、2007年11月21日撮影の空中写真から識別されたバーム陸端位置 (標高約1.5 m) から前浜勾配 (1/8) の斜面を考慮して推定した。

(2) 試験体による現地試験結果の再現計算

2010年11月から2011年4月にかけて大磯町国府新宿地先において岩盤を模した試験体による現地試験が実施された (土橋ら, 2012)。設置された3体の試験体は、長さ12～15 m, 幅8～12 m, 高さ1.5 m, 先端位置はT.P.+1.8 mとしたうえで、試験体の地盤面からの突出高を0.5, 0.8, 1.2 mと変えて設置された。試験期間中には定期的に試験体周辺の前浜地形変化の観測がおこなわれた (丸山ら, 2011)。

本研究ではこれらのうちレーザーによる面的測量が実施された2010年12月10日～12月27日の前浜地形変化を対象に、(1)と同じモデルによる再現計算をおこなった。計算条件は表-1のとおりで、汀線より陸上側の高波浪時の海浜変形を対象としているため、代表的な単一粒径 (1 mm) とし、前浜勾配は計算範囲のT.P.+3 m $\sim$ -2 mまで1/13で同様とした。入射波条件は、平塚波浪観測所における上記期間中の最大級の波高および12月13日～31日の平均波向とした。試験体は不透透の構造物として扱った。

(3) 低天端突堤による漂砂制御効果の評価

葛川河口から二宮漁港にかけての区域に低天端突堤を設置した場合と従来型突堤やヘッドランドを設置した場合の海浜変形計算を行った。計算は (1) と同じモデル

2. 方法

(1) 低天端地形を考慮した海浜変形計算の試行

西湘海岸で2007年に起きた海浜変形は、高波浪時における中砂成分の選択的移動をモデル化することでよく再現できることがわかっている (元永ら, 2010)。低天端突堤では絶妙な天端高の設計が求められることから、施設の天端高を変えた場合の海浜変形への影響を把握し、結果を解釈するうえでの留意点を整理しておく必要がある。そこで、葛川河口の岩盤の天端高をT.P.+2m (現地再現), +1m, 0mと変え、天端高の違いが計算結果に与える影響の感度分析をおこなった。岩盤は砂中に埋もれている部分の形状が不明であるため、平坦な天端を持ち、砂表面に露出している形状がそのまま砂中まで続き、沖側および側面は勾配を有しない柱状と設定した。岩盤周辺の漂砂については特別な扱いをせず、岩盤は不透透な地形として扱った。

計算範囲は大磯港～二宮漁港間の6.5kmとし (図-3)、計算手法は熊田ら (2007) の粒径を考慮した等深線変化モデル、計算条件は元永ら (2010) と同じ条件とし、2007年9月の台風来襲時 (再現1) とその後の常時波浪による回復過程 (再現2) を再現した。波高は平塚観測塔の実測データより算出した台風9号来襲時および台風後の回復期間のそれぞれの期間中のエネルギー平均波の碎

表-3 漂砂制御手法による海浜保全効果の違い

	設置施設	最大汀線 後退量(m) (高波浪2回後) $X = 3.95 \sim 7.45$	浜幅30 m以下の箇所 $X = 1.35 \sim 7.7$				土砂変化量(m^3) (T.P.+3.5m ~ -9.5m) $X = 3.95 \sim 7.45$ (除く突堤等設置箇所)		
			高波浪2回後		常時波浪後		初期～ 高波浪1回後	高波浪1回目 ～2回目	初期～ 常時波浪後
			箇所数	延長 (km)	箇所数	延長 (km)			
1	低天端突堤6基	59.6	8	1.15	3	0.30	-29,014	-27,234	-51,887
2	従来型突堤6基	59.6	8	1.35	5	0.65	-18,577	-15,526	-22,834
3	ヘッドランド6基	45.6	7	1.40	5	0.70	-14,535	-16,133	-25,669

図-4 低天端突堤周辺の初期断面地形

図-5 岩盤の天端高による海浜変形の違い（岩盤周辺を抜粋）

図-6 試験体周辺の地形変化再現結果

を用い、計算条件は表-2に示した項目以外は元永ら(2010)と同じとし、表-3に示す3ケースの施設設定について実施した。保全対象範囲に73万 m^3 の養浜が実施されて必要浜幅が確保された状態を初期地形とし、台風9号相当の高波浪が2回来襲し、その後に常時波浪によって短期変動分の地形が回復することを想定した。天端高T.P.+2.0 m、沖側のり勾配1/6、堤脚水深T.P.-4 m (図-4)、従来型突堤とヘッドランドはいずれも堤脚水深T.P.-5 m、堤長100 mとし、ヘッドランドの横堤の長さは100 mとした。いずれの漂砂制御施設も不透構造物として扱った。

3. 結果

(1) 岩盤の天端高の違いによる海浜変形の違い

2007年台風9号来襲時の再現では、岩盤の天端高の違

いによる影響は岩盤の両側約300 mに限られた (図-5)。実測では岩盤から約300 mの地点から緩やかに岩盤の海側先端にすりつくような汀線形状であったのに対して、天端高を実物の岩盤と同じT.P.+2 mとして計算した結果は、岩盤近くで急激に汀線の角度が変わる結果となった。また、下手における汀線後退も実際よりも大きくなった。一方で、岩盤の天端高を低くした場合には、上手における汀線は岩盤に向けてなだらかになる傾向にあり、後退天端高T.P.+0 mの時に最も実態と近くなった。

(2) 試験体による現地試験結果の解析

海浜変形計算では、漂砂の上手側では試験体先端付近を中心に地盤高が上昇し、漂砂の下手側ではやや陸側で地盤高が低下する結果が得られた (図-6)。これは、丸山ら(2011)による現地試験で観察された変化傾向と同じであった。しかし、現地試験では試験体の天端高に応じた地盤高変化量の違いが観測されたのに対して、計算では天端高に応じた結果の違いはほとんど表れなかった。

(3) 低天端突堤による漂砂制御効果の評価

a) 低天端突堤による漂砂制御

低天端突堤を6基設置したケースでは、葛川河口右岸で汀線が大きく後退し、2回の高波浪後には1基目の突堤の西側(3.95 km)において59.6 mの後退となった (図-7)。4.6 kmより西側区間については1回目の高波浪で汀線全体が後退したが、2回目の高波浪では大きな変化は起きなかった。常時波浪作用後には初期汀線との中間点まで汀線が前進し、全体的に緩やかな汀線形状となった。常時波浪による回復後の段階で浜幅が30 m以下となる延長は計算した3ケースの中で最小であった (表-3)。

b) 従来型突堤による漂砂制御

突堤の東側では漂砂制御によって汀線が初期よりも前進したものの、全ての突堤で西側における汀線の後退が顕著となり、2回目の高波浪作用後には、3.9～4.0 km、6.1～6.2 km、6.8 km地点の3箇所で砂浜がほとんどなくなる結果となった (図-8)。突堤西側における汀線は常時波浪によって前進して初期汀線との中間位置程度まで回復したものの、突堤東側の汀線が前進したままであるために、突堤を挟んで汀線が不連続となる状況は解消されなかった。常時波浪後の養浜区間(3.95～7.45 km)にお

図-7 低天端突堤6基の場合の汀線変化

図-8 従来型突堤6基の場合の汀線変化

図-9 ヘッドランド6基の場合の汀線変化

図-10 ヘッドランド6基の場合の汀線変化

る砂礫の移動形態としては、岩盤の先端水深よりも深所での移動と岩盤の側面から天端を乗り越える移動の2通りが考えられる。このうち前者については、もともと深所にあった砂礫が移動する場合と、岩盤の先端水深よりも浅所にあった砂礫が岸沖漂砂によって深所に移動することで起こるものがある。後者の天端を乗り越える移動については、汀線付近を礫が占める西湘海岸では浮遊砂によるものはほとんど無視でき、波力を受けて礫が岩盤の側方斜面を転がり上がる形が主流と考えられる。

今回の計算に用いた等深線変化モデルは、岸沖漂砂も再現されるモデルであるため、岩盤先端をまわり込む砂礫の移動も含めて先端水深よりも深所における砂礫の移動は考慮されている。この点は、岩盤から300m以上離れた地点における海浜変形がよく再現されていることからわかる。しかし岩盤の側方斜面を転がり上がるような砂礫の移動については、砂中の岩盤の形状が不明な上に計算上の地形を鉛直方向1 m、沿岸方向50 mのメッシュで表現せねばならない制約から、計算上は岩盤の側面が壁状に設定されているため再現されていない(図-10)。

また試験体設置による現地試験では、観測された浜漂砂による地盤高変化を計算で再現するには期間中の最大波高に相当する1.8mの波浪を作用させる必要があった。これは浜漂砂が、ある程度以上の波高に対してしか起こらない断続的な現象であり、対象期間の平均的な波高を用いた計算では過小評価となることを示唆する。これらの結果として、再現計算では下手側直下に砂礫を供給する浜漂砂が実際よりも小さく見積もられたものと考えられる。

今回使用した等深線変化モデルでこうした課題に対処するには突堤の透過率を補正するのが最も簡便ではあるが、十分な根拠をもって調整するには現地観測結果が不足しているのが現状である。本研究における漂砂制御効果の評価では、結果として低天端突堤下手近傍の汀線後退が若干大きめに算定され、低天端突堤による対策が防災上は厳し目に評価されるので、無理に補正する必要はないと考えた。

(2) 漂砂制御手法による海岸保全効果の違い

a) 汀線変化

低天端突堤を設置した場合には、2～6基目間では従来

る最終的な土砂減少量は、低天端突堤の場合の1/2以下であったが、浜幅が30 m以下である延長は低天端突堤の場合の2倍以上になった(表-3)。

c) ヘッドランドによる漂砂制御

ヘッド部の影響により、施設の西側面に砂礫が留まったことで局所的な汀線後退量は従来型突堤の場合よりも緩和され、最大汀線後退量は3ケース中で最小となった(表-3、図-9)。しかし施設の東側面でも砂礫を留める効果が発揮されることで、施設間の海浜中央の砂礫量が減少し、浜幅が30 m以下となる延長は増加した(表-3)。高波浪によって形成された汀線の傾きは常時波浪の作用後も解消されることはなく、ヘッドランドを挟んで不連続な汀線形状となった。

4. 考察

(1) 海浜変形計算で岩盤を考慮する際の留意点

台風9号来襲時の再現計算では、葛川河口の岩盤の天端高を実物と同じT.P.+2 mとした時に岩盤下手における汀線後退が過大となった。岩盤を越えて沿岸方向に起こ

型の場合に比べて汀線変化が緩やかであった(図-7, 図-8)。これは、突堤の海中部分が海底勾配に近い勾配を有するために、従来型突堤に比べて海中における砂礫の移動が確保され、漂砂下手では汀線後退が緩和され、上手では汀線の前進が抑制されたためと考えられる。1~2基目間で従来型突堤と同様に汀線が大きく後退したのは、上手に存在する葛川河口の岩盤が西向き漂砂を阻害したためと考えられる。

2回の高波浪後および常時波浪後に浜幅が30 m以下になる箇所に着目すると、低天端突堤の方が従来型突堤よりも箇所および延長が少なかった(表-3)。前節で述べたように、現状の計算手法では天端を越えての砂礫移動が過小評価であるので、実際には1基目の低天端突堤の西側には本計算結果よりも砂礫が供給され、局所的な汀線後退はさらに緩和されることが予想される。背後地の防護を考えた場合には、極端な汀線後退箇所を発生させない点で低天端突堤の方が有効であると考えられる。

いずれのケースでも汀線変化の大部分は1回目の高波浪で起き、2回目の高波浪による変化は大きくなかったが、養浜区間の土砂量は2回目についても1回目と同程度の減少が見られた(表-3)。このことは、1回目の高波浪時に起きた汀線変化は汀線付近の平衡勾配の変化に伴うものであり、沿岸漂砂による土砂の消失は海中では2回目以降も続いていることを示唆する。汀線付近に粗粒分が急勾配を形成して留まり、沖に細粒分が緩勾配で堆積する砂礫混合海岸に特徴的な変化と考えられる。海中部分の侵食がさらに続けば、いずれ汀線付近にも影響を及ぼすことも考えられるので、長期的な保全には土砂量変化にも留意する必要がある。

b) 土砂量変化

常時波浪を経た後の最終的な土砂減少量は、低天端突堤の場合は従来型突堤の場合の2倍以上であった(表-3)。前節で述べたように、今回の計算では低天端地形を越える砂礫の移動が過小評価であるので、実際には低天端突堤の場合の土砂減少量はさらに大きくなる可能性がある。当該地域へ新たな土砂供給がなければ低天端突堤には海浜を維持するために必要な養浜量が大きくなるというトレードオフがあることを認識せねばならない。

従来型突堤の代わりにヘッドランドを設置した場合には、2回の高波浪後の最大汀線後退量は従来型突堤の場合より小さくなる。しかし、浜幅30 m以下となる範囲については低天端突堤よりも広くなるのに加えて、費用が増大する上に景観や地曳き網による海面利用の点ではデメリットとなることから、現実的には採用されにくい案と考えられる。

5. まとめ

本研究では西湘海岸における2007年台風9号時および

試験体設置時の海浜変形の再現計算および低天端突堤等の漂砂制御施設を設置した場合を想定した海浜変形計算を実施し、以下の結果を得た。

- ・低天端突堤は従来型突堤やヘッドランドに比べて高波浪時の局所的な汀線の後退が起こる範囲を抑えることができるので、海中における土砂減少量を補償する常時の土砂供給や維持養浜量を確保できれば有効な海岸保全手法となる。
- ・粒径を考慮した等深線変化モデルでは、砂礫海岸における広域的な海浜変形をよく再現できるものの、岩盤のような低天端地形を越えて通過する砂礫の浜漂砂を過小評価済みであることに留意する必要がある。

本研究では現時点では知見不足との判断から、東向きの漂砂による酒匂川からの土砂供給を見込んだ計算は実施していない。静穏時の土砂供給を阻害しない点も低天端突堤の長所の一つであるので、最終的にはその点も考慮したうえで現場への適用を考える必要がある。また、低天端突堤を含む岩盤状地形の周辺の局所的な地形変化については計算手法の改善の余地がある。現地試験も実施しながらこれらについても検討したうえで判断することが求められる。

謝辞：本研究の実施にあたっては、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所の皆様から助言をいただいた、また本論文のとりまとめにあたっては、国土交通省国土技術政策研究所の鳥居謙一氏からも有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

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・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.
- 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, No.63, No.2, pp. 154-167.
- 合田良実・小野伸幸・宇野喜之 (2009)：数値計算による潜り突堤群の沿岸漂砂制御特性に関する検討。土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 686-690.
- 土橋和敬・弘中淳市・梶原幸治・渡辺国広 (2012)：西湘海岸におけるサンドバックの現地試験施工。ジオシンセティック情報誌, 2012年3月号, pp. 20-30.
- 丸山将吾・磯貝朋之・元永 秀・宇多高明・酒井和也・石川仁憲 (2011)：大磯海岸における砂詰試験体周辺の前浜地形変化の観測。土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp. I_651-I_655.
- 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, pp. 581-585.