海岸線急変部に設置された突堤と離岸堤の漂砂制御効果の比較

芹沢 真澄¹・宇多 高明²・宮原 志帆³

¹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)

E-mail:coastseri@nifty.com

²正会員 (一般財団) 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)

E-mail:uda@pwrc.or.jp

³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)

E-mail:qqqu4vdd@aroma.ocn.ne.jp

急勾配海岸において海岸線方向が急変する場所で発達する円弧状砂州の特性を移動床模型実験によって調べた。8時間の波作用後、砂州上に突堤を設置することにより突堤の沿岸漂砂阻止効果を調べた上で、実験結果に対してBGモデルを適用したところ、海岸線急変部での砂州の変形がうまく計算された。さらに、海岸線方向の急変部にできた砂州上に離岸堤が設置された場合の地形変化についても実験と計算を行い、突堤と離岸堤の漂砂制御効果の比較を行った。

Key Words : *Cusplate foreland, BG model, movable bed experiment, groin, detached breakwater*

1. はじめに

汀線沖に海底谷が迫るような海岸では、入射波高・波向の場所的变化が大きく、また急勾配斜面を経た海底谷への土砂落ち込みも起こり得ることから、直線状海岸とは異なるパターンの海浜変形が起こる。このような条件を満足する海岸では、従来から海岸保全のために使われてきた突堤や離岸堤の建設は条件によっては海底谷への土砂流出を助長することになる。日本三大急深湾のひとつである駿河湾の西岸に位置する清水海岸では、L字突堤の北側で海底谷への細砂の流出が観測された¹⁾。また富山湾に面した下新川海岸の荒俣地先では、海底谷近傍の陸棚上に造られた離岸堤が、結果的に海底谷への土砂流出を促していることが見出された²⁾。さらに相模湾に面した森戸川河口沖の海底谷背後の海岸では、従来から海底谷への土砂落ち込みが見られたが、海底谷背後の海岸で突堤を延ばすと海底谷への土砂落ち込みが助長されることが数値モデルにより明らかにされた³⁾。このように汀線沖に海底谷が迫る海岸での海岸保全については、直線状のフラットな海岸とは大きく異なる現象が見られる。宇多・山本⁴⁾は、この種の問題に関連して、砂の堆積域が急深な場合には海岸線急変部で円弧状砂州が形成されることを移動床模型実験により示した。またこのよ

うな場での海浜変形予測は従来困難であったが、芹沢ら⁵⁾は、BGモデル(Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル)を上記実験結果に適用することにより、3次元的地形変化の予測を初めて可能とした。本研究では芹沢ら⁵⁾が提案したBGモデルを、円弧状砂州の周辺で海岸保全のために突堤あるいは離岸堤を設置した場合の海浜変形予測に適用し、急深海岸におけるこれらの構造物の設置が周辺海浜へ及ぼす影響の相互比較を行った。

2. 円弧状砂州の発達に関する模型実験

芹沢ら⁵⁾は、宇多・山本⁴⁾が幅16 m、長さ21 mの平面水槽を用いて行った円弧状砂州の発達に関する移動床模型実験結果を4で述べるBGモデルの検証材料として用いた。本研究でも自然状態での円弧状砂州の形成についてはこれと同じデータを用いた。この場合の模型海浜材料には中央粒径0.28 mmの砂が用いられ、水槽中央より右側には砂の供給源を造る一方、左側には1/5の急勾配海岸を造った上で、左向きの沿岸漂砂により下手側へと砂が運ばれる条件とされた。初期汀線への法線と波の入射方向とのなす角は沿岸漂砂が十分発達する条件として20°が選ばれた。また砂の供給源となる海浜の高さは水面上10

cmとした。実験波は換算沖波波高が $H_0=4.6$ cm, 周期が $T=1.27$ sの規則波, 作用時間は8時間であった。

図-1(a), 1(b)は初期形状と造波開始8時間後の海浜形状を示す。なお, 図-1(a)には造波開始直後に測定した碎波点(矢印の先端), 碎波波高(矢印の大きさ)および入射方向(矢印の向き)を示す。砂の堆積域の水深が大きいため砂が急勾配をなして堆積し, 8時間後には海岸線急変部に円弧状砂州が形成された。

宇多ら⁶⁾は, 上記実験結果に加え, 波浪条件を同一に保ちつつ円弧状砂州の上手端に突堤を設置して左向きの沿岸漂砂を阻止した場合の海浜変形を調べた。自然状態で8時間の波の作用で形成された海浜(図-1(b))におい

図-1 海岸線屈曲部における円弧状砂州の発達と突堤設置後の地形変化(模型実験)

図-2 汀線変化(実験)

て, 突堤を設置しさらに8時間波を作用させた(図-1(c))。突堤により沿岸漂砂が阻止された結果, 突堤下手側では浅海域の等深線が大きく後退し侵食緩斜面が形成された。突堤設置後の汀線の時間的变化を図-2に示す。突堤を境に汀線が不連続となり, とくに突堤下手側では当初凸状であった汀線が時間経過とともに凹状となったこと, また突堤下手では著しい汀線の後退が起きたことが分かる。

3. 予測モデル

芹沢ら⁵⁾のBGモデルをもとに地形変化予測を行った。計算の基本式には, 碎波波高の沿岸方向勾配に起因する沿岸漂砂量を考慮するためのOzasa and Brampton項⁷⁾を付加した式(1)を用いた。

$$\vec{q} = C_0 \frac{P}{\tan \beta_c} \left\{ \begin{aligned} &K_n (\tan \beta_c \vec{e}_w - |\cos \alpha| \vec{\nabla} Z) \\ &+ \left\{ (K_s - K_n) \sin \alpha - \frac{K_2}{\tan \beta} \frac{\partial H}{\partial s} \right\} \tan \beta \vec{e}_s \end{aligned} \right\} \quad (-h_c \leq Z \leq h_R) \quad (1)$$

$$P = \rho u_m^3 \quad (2)$$

$$u_m = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (3)$$

ここに, $\vec{q}=(q_x, q_y)$ はネットの砂輸送フラックス, $Z(x, y, t)$ は地盤高, n および s は等深線直角方向(岸向き)および平行方向に取った局所座標, $\vec{\nabla} Z=(\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ は地形の勾配ベクトル, $\vec{e}_w$ は波向の単位ベクトル, $\vec{e}_s$ は等深線平行方向の単位ベクトル, α は波向と等深線直角方向のなす角, $\tan \beta=|\vec{\nabla} Z|$ は海底勾配, $\tan \beta_c$ は平衡勾配, $\tan \beta \vec{e}_s=(-\partial Z/\partial y, \partial Z/\partial x)$, K_s, K_n はそれぞれ沿岸・岸沖漂砂量係数, K_2 はOzasa and Brampton項の係数, $\partial H/\partial s=\vec{e}_s \cdot \vec{\nabla} H$ は等深線平行方向に測った波高 H の勾配, $\tan \beta$ は碎波帯の代表海底勾配である。また C_0 は水中重量表示から体積表示への換算係数($C_0=1/\{(\rho_s-\rho)g(1-p)\}$; ρ は海水の比重, ρ_s は砂の比重, p は砂の空隙率, g は重力加速度), u_m は波の底面振動流速振幅, H は波高, h は水深, h_c は波による地形変化の限界水深, h_R はバーム高である。

波浪場の計算には, 実験での規則波を不規則波と見なして, 不規則波の方向スペクトル $D(f, \theta)$ を変数とするMase⁸⁾によるエネルギー平衡方程式の数値計算法を用いた。波の打ち上げ領域での波浪場の計算には, 芹沢ら⁹⁾と同様仮想水深を設定し, 仮想水深 h' を式(4)で与えた。

$$h' = \left(\frac{h_R - Z}{h_R + h_0} \right)^r h_0 \quad (r=1) \quad (-h_0 \leq Z \leq h_R) \quad (4)$$

表-1 計算条件

Wave conditions	Incident waves: $H=4.6$ m (4.6 cm), $T=12.7$ s (1.27 s), wave direction $\theta_f=20^\circ$ relative to normal to initial shoreline
Berm height	$h_b=5$ m (5 cm)
Depth of closure	$h_c=2.5H$ (H : wave height)
Equilibrium slope	$\tan\beta_e=1/5$
Angle of repose slope	$\tan\beta_g=1/2$
Coefficients of sand transport	Coefficient of longshore sand transport $K_s=0.045$ Coefficient of Ozasa and Brampton ⁷⁾ term $K_2=1.62K_s$ Coefficient of cross-shore sand transport $K_n=0.1K_s$
Mesh size	$\Delta x=\Delta y=20$ m
Time intervals	$\Delta t=0.001$ hr (0.0001 hr)
Duration of calculation	80 hrs (8×10^4 steps) (8 hrs)
Boundary conditions	Shoreward and landward ends: $q_x=0$, right and left boundaries: $q_y=0$
Calculation of wave field	Energy balance equation ⁸⁾ <ul style="list-style-type: none"> Term of wave dissipation due to wave breaking: Dally et al.⁹⁾ model Wave spectrum of incident waves: directional wave spectrum density obtained by Goda¹⁰⁾ Total number of frequency components $N_f=1$ and number of directional subdivisions $N_\theta=8$ Directional spreading parameter $S_{\max}=75$ Coefficient of wave breaking $K=0.17$ and $I=0.3$ Imaginary depth between minimum depth h_0 and berm height h_R: $h_0=2$ m (2 cm) Wave energy $=0$ where $Z\geq h_R$ Lower limit of h in terms of wave decay due to breaking $\Phi: 0.7$ m (0.7 cm)
Remarks	Numbers in parentheses show experimental values. Space and time scales in the calculation are 100- and 10-fold those in the experiment, respectively.

またバーム高より標高の高い地点では波エネルギーを0とおいた。本研究では、地形変化に応じた波浪場変化のフィードバック計算を繰り返し行い、地形変化計算10ステップごとに波浪場を計算し直した。さらに計算の便宜上、フルード則により宇多・山本⁴⁾の砂嘴形成に関する実験模型の100倍スケール（時間は10倍スケール）を対象とし、計算結果を1/100に縮小して図化した。初期形状は実験と同様とし、入射波は $H_f=4.6$ m, $T=12.7$ s, 波向は初期汀線に対して20°の斜め入射とした。また波による地形変化の限界水深は、任意点の波高を H として $h_c=2.5H$ で与えた。バーム高は5 m, 砂の平衡勾配は実験結果に基づいて1/5, 安息勾配は1/2とした。計算は沿岸方向、岸沖方向に20 m間隔のメッシュで分割し、 $\Delta t=1\times 10^{-3}$ hrの時間間隔で80時間（ 8×10^4 steps）まで計算を行った。詳細な計算条件を表-1に示す。

4. 円弧状砂州における沿岸漂砂阻止の影響検討

(1) 円弧状砂州における沿岸漂砂阻止の影響検討

図-3は、実験と同一条件を与えて計算した急深海岸での円弧状砂州の発達予測の結果を示す。初期に海岸線急変部で平行に延びていた等深線が波の作用とともに変化し、8時間後には円弧状の等深線が形成された。さらに8時間波を作用させると、円弧状の砂の堆積域の下手端付近に形成されていた等深線のくびれは消失し、沿岸方向の等深線勾配が緩くなった（図-3(c)）。一方、砂の供給源側では侵食されて平坦面が残された。

次に、実験同様図-3(b)に示した8時間後の地形において、図-4(a)のように $X=8$ mに突堤を設置し、その後8時間波を作用させた場合の予測結果を図-4(b)に示す。ここに突堤は不透透の壁体として与えた。突堤が沿岸漂砂を阻止するため上手側では砂が堆積し沖合の急斜面と連続的に繋がる急斜面が形成された。これに対して突堤のすぐ下手側の海岸線曲率が大きく、沿岸漂砂量が大きい場所で沿岸漂砂が遮断されたため、汀線が大きく後退し侵食緩斜面が形成された。これらの特徴は図-1(c)の実験結果

図-3 海岸線屈曲部における円弧状砂州の発達の予測計算結果

図-4 海岸線屈曲部に突堤を設置した場合の地形変化予測結果

図-5 汀線変化 (計算)

をよく説明している。

図-5は初期から8時間まで2時間間隔での汀線変化の予測結果と、初期および8時間後の実験結果を示す。計算では突堤未設置の状態で8時間波を作用させ、この条件で形成された初期地形に突堤を配置して地形変化予測を行った。この場合、計算による突堤未設置状態での汀線変化量は実験結果と比べてやや過小となったため、計算の開始時点で実験・計算の汀線形状には差異が残された。このため実験・計算の0, 8時間後両者の値を示し、それらの変化に注目した。図-5によれば突堤上手側での予測・実測汀線の変化状況はほぼ一致している。同様に下手側でも汀線が凹状に後退していく状況について実験と計算でよい一致を示す。図-6は、図-1に示す4測線の実験・計算による縦断形変化を示す。突堤上手側の測線A-A'では縦断形の一致度は低い、変化量で見ればほぼ妥当な計算結果となっている。また突堤下手側の3測線ではいずれも実験と計算はよく一致している。

図-6 縦断形変化 (実験と計算)

(2) 離岸堤の場合

次に離岸堤を設置した場合の検討を行った。離岸堤の設置位置はその中心が $X=8$ mとなるようにし、設置水深は8 cmとした。図-6(a)の縦断形変化によれば、突堤上手側での地形変化は陸上部からほぼ $Z=-12$ cmまでで起きていることから、この漂砂帯の大部分の砂移動を抑制する位置とした。

図-7(a)は、図-3(b)に示す8時間後の海浜形状において、汀線と平行に長さ1.6 m、設置水深8 cmの離岸堤を設置した場合の初期形状を示す。この状態で波を8時間作用させた後の海浜形状を図-7(b)に示す。離岸堤の上手側では汀線が離岸堤端部に直線状に繋がる一方、-8 cmと-12 cmの等深線間隔が離岸堤沖で狭まり、逆に離岸堤の左端部では等深線間隔が広がっている。このような等深線間隔の場所的変化は、離岸堤の上手端では沖向きの、下手端では岸向きの漂砂が起きており、全体として離岸堤の上手側から下手側へ向かう漂砂が起きていることに対応する。離岸堤の上手側では等深線が直線状であるが、下手端ではフック状となっている。

図-7 海岸線屈曲部に離岸堤を設置した場合の地形変化予測結果

図-8 自然状態と、突堤・離岸堤を設置した場合の初期地形からの変化量

5. 円弧状砂州周辺に設置された突堤と離岸堤の機能の差

図-8(a), 8(b)は、自然状態と突堤を設置した場合における初期からの地形変化量の差、および8時間の波作用後における自然状態と突堤を設置した場合の地形の差を示す。自然状態では $X=8$ mより右側で著しい侵食が起き、そこから沿岸漂砂によって運ばれた砂が海岸線の隅角部付近に大量に堆積するという変化が起きた。これに対し突堤が設置されると突堤上手側では沿岸漂砂が阻止されて砂が堆積し、汀線が安定化に向かうため上手端付近での侵食量も大きく低減している。しかし対照的に突堤の直下手の侵食は激化する一方、 $X=11$ m付近での堆積量は減少している。このように突堤の設置は、その上手・下手に集中的な堆積・侵食を引き起こすことが分かる。

図-8(c)は、8時間の波作用後における自然状態と離岸堤を設置した場合の地形の差を示す。図-8(b), 8(c)を比較すると、突堤の場合には突堤を境として上手側での堆積と下手側での侵食がきれいに分かれていたが、離岸堤の場合には離岸堤の上手で堆積、下手で侵食は起こるものの、沿岸漂砂の一部が離岸堤の岸側沖側を通過可能なために、侵食・堆積量も突堤の場合と比べて小さくなった。また最も大きな違いは、離岸堤の沖合に砂が堆積しつつ沿岸漂砂の一部が下手側へと通過している点である。このように突堤と比べて離岸堤のほうが緩やかな地形変化となる。また図-8(c)に示すように、海岸線の屈曲部に形成された円弧状砂州の上手端付近に離岸堤を設置すると、一部の沿岸漂砂が離岸堤を迂回して下手側へと移動するが、漂砂の回り込みによる砂の堆積域は離岸堤直下手の侵食域を大きく囲むようにして延びることが分かる。

図-9(a), 9(b)はそれぞれ突堤と放置案の差、および離岸堤と放置案の差を示す。突堤と放置案の差では、突堤を境に左右で対照的な地形変化が生じている。一方、離岸堤と放置案の差では、離岸堤の上手側では堆積が起これと同時に下手側では侵食が起これるが、一部の沿岸漂砂が離岸堤沖を通過するがゆえに離岸堤沖でも堆積が起きた。

円弧状砂州部分では左向きの沿岸漂砂が連続的に流れており、汀線は動的意味で保持されている。これが静的安定に近い海岸線と根本的意味で異なる点である。このため強い沿岸漂砂を阻止する施設が造られた場合、その下手側では著しい侵食が起これる。また突堤の上手側では沖合の緩斜面上に砂が堆積して海底勾配が急になるにしたがい沖への土砂損失を招きやすくなる。例えば図-6に示したA-A'断面における計算結果によれば、初期状態で -10 cm付近の勾配は $1/20$ であったが、4時間後には汀線から続く $1/5$ の急な一様勾配斜面となり、縦断面形は深海部へと連続している。縦断面形における平衡勾配は粒径に対応し、粗な粒径では大きく細い粒径では小さくなるこ

図-9 突堤・離岸堤と放置案との比較

とを考慮すると、図-6に示す突堤上手のA-A'断面では海底勾配が急になったことから、細い粒径成分は安定性を失い急勾配斜面を経て深海へと落ち込みやすい条件が造り出されていることが分かる。実際、この原理に基づく細砂の深海への落ち込み・損失は清水海岸のL突堤の下手側で観測された¹⁾。この結果と比較すると、本実験のように比較的設置水深が小さい離岸堤の場合、沿岸漂砂の一部が離岸堤の岸側沖側を通過可能なために、侵食・堆積量が突堤の場合と比べて緩やかになる。

6. まとめ

芹沢ら⁵⁾によって提案されたBGモデルを、宇多ら⁶⁾が示した急勾配海岸における円弧状砂州の形成と、そこに突堤および離岸堤が設置された場合の海浜変形予測に適

用した。この結果、突堤の場合には宇多・山本⁴⁾による移動床模型実験の結果をBGモデルにより定量的意味から再現が可能となった。また海岸線が急変する海岸に形成された円弧状砂州に離岸堤を設置した場合には、突堤と異なり沿岸漂砂の一部が下手方向に流れることから相対的に緩やかな海浜変形が起こることが明らかになった。

参考文献

- 1) 宇多高明, 大橋則和, 芹沢真澄, 三波俊郎, 石川仁憲, 宮原志帆: 清水海岸北部の侵食実態とその再現, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.641-645, 2009.
- 2) 諏訪義雄, 山田浩次, 宇多高明, 古池鋼, 三波俊郎, 石川仁憲, 横澤綾: 下新川海岸荒俣地先における沖合への土砂損失機構, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.631-635, 2009.
- 3) 宇多高明, 高尾治海, 秋田和枝, 芹沢真澄, 三波俊郎, 石川仁憲, 横澤綾: 海底谷への土砂落ち込みの予測モデル, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.626-630, 2009.
- 4) 宇多高明, 山本幸次: 砂嘴形成海域の海底地形と砂嘴形態の関係について, 地形, 第 13 巻, pp.141-157, 1992.
- 5) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 横澤綾: 海岸線が急変する場での砂嘴の発達予測, 地形, 第 31 巻, pp.403-422, 2010.
- 6) 宇多高明, 山本幸次, 佐口光明, 片岡賢一: 砂嘴地形の安定化工法に関する実験的検討—駿河海岸の和田鼻砂嘴を例として—, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.466-470, 1992.
- 7) Ozasa, H. and Brampton, A. H.: Model for predicting the shoreline evolution of beaches backed by seawalls: *Coastal Eng.*, 4, 47-64, 1980.
- 8) Mase, H.: Multidirectional random wave transformation model based on energy balance equation, *Coastal Eng. J.*, Japan Society of Civil Engineers, 43(4), 317-337, 2001.
- 9) Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A.: A model for breaker decay on beaches, *Proc. 19th International Conference on Coastal Engineering*, 82-97, 1984.
- 10) Goda, Y.: *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyo Press, Tokyo, 323p., 1985.

COMPARISON OF BEACH CHANGES AROUND CUSPATE FORELAND CAUSED BY INSTALLATION OF A GROIN AND DETACHED BREAKWATER

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA and Shiho MIYAHARA

The development of a cusped foreland on a steep coast with abrupt change in coastline orientation was investigated by a movable bed experiment. After 8-hour wave generation, a groin was installed at the cusped foreland and the effect of obstructing continuous longshore sand transport was also experimentally investigated. The results of the experiment were reproduced using the BG model which was proposed by the present authors. The beach changes around the cusped foreland were successfully predicted. The experimental and numerical results were in good agreement. The installation of a detached breakwater on a steep coast with abrupt change in coastline orientation was also predicted using the model and both results were compared.