

3次元海浜変形予測モデルによる構造物周辺の地形変化予測

宇多高明・芹沢真澄・宮原志帆

1. まえがき

現在では海岸に漂砂制御施設が新設される事例も少なくなり、既存施設の維持管理に主眼が移っている。しかし海浜の安定性を考慮しての適切な維持管理を進める上でも、各種施設周辺の地形変化についての理解は重要と考えられる。筆者らは、長期的な海浜地形変化予測が可能なモデルとして、平衡勾配概念に基づいて等深線の変化を予測するモデル（等深線変化モデル）を2002年に提案した¹⁾。このモデルは各地での地形変化予測に広く用いられてきている。しかし、このモデルは等深線の移動を追跡するモデルであるがゆえに、複雑な海底地形・構造物の条件を考慮しにくい欠点があった。そこで等深線変化モデルと同様に平衡勾配概念を用いるものの、平面メッシュ上で地形変化を算出するBGモデル（Bagnoldの提唱した平衡勾配と波による仕事量に基づく漂砂量式を用いた3次元海浜変形予測モデル）を開発した²⁾。本報告は、BGモデルの基本形を示した上で、海岸に突堤および離岸堤を設置した場合の海浜地形変化の予測結果を示し、BGモデルの有用性を明らかにする。

2. 3次元海浜変形予測モデル（BGモデル）

BGモデルは、平面メッシュ上の各点での水深変化を数値的に解く方式を用いており、複雑な海底地形や構造物の条件を計算に取り入れやすいという利点を有している。直角座標系を用い、静水面を基準として鉛直上方を正とした海浜の地盤高 $Z(x, y, t)$ を解くべき変数とした時、基礎式は式(1)~(3)で与えられる。ここに、式(1)は漂砂量式、式(3)は土砂量の保存則を表す式である。式中の $\vec{e}_w = (\cos\theta_w, \sin\theta_w)$ は波向方向の単位ベクトル、 θ_w は波向角、 $\nabla Z = (\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ は Z の勾配ベクトルで、その方向は等深線直角方向岸向き、その大きさは局所海底勾配 $\tan\beta$ に等しい。 $(EC_g)_b$ は碎波点

$$\vec{q} = \frac{G}{\tan\beta_c} \left[\tan\beta_c \vec{e}_w - \nabla Z \right] \quad (1)$$

$$G = C_0 K_1 \varepsilon(Z) (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \tan\beta \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (3)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(Z) dZ = 1 \quad (4)$$

におけるエネルギーフラックス、 α_b は碎波角、 K_1 は沿岸漂砂量係数（無次元係数）、 C_0 は水中重量表示から体積表示への換算係数である。 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R は陸上の地形変化の限界高さ（バーム高）である。式(2)の $\varepsilon(Z)$ は沿岸漂砂量の水深方向分布で、宇多・河野³⁾の3次式を用いる。 $\varepsilon(Z)$ は h_c から h_R までの積分値が1となるように汀線での変化量を基に基準化された分布である（式(4)）。 $\tan\beta_c$ は平衡勾配であり、計算では構造物建設前の現地海浜勾配がほぼ安定状態にあったと考えられるのでこれを平衡勾配として使用することができる。数値計算は、計算領域を Δx 、 Δy のメッシュでセルに分割し、上記漂砂量式と連続式（式(3)）を連立して解く。

BGモデルの漂砂量式は、海浜の安定化機構を有している¹⁾。すなわち波が汀線直角方向から入射するとき、局所勾配が砂の平衡勾配より急であれば重力作用の増加により冲向き漂砂が、逆に局所勾配が平衡勾配より小さければ重力作用の減少により岸向き漂砂が発生すると考えるものであり、海浜縦断形は最終的にその勾配が平衡勾配と等しくなれば安定する。一方、波が斜め入射する場合、沿岸漂砂が発生し、等深線が波向と直角になるまで変形するとしている。

3. 突堤群周辺での海浜変形予測

3.1 計算条件

図-1(a)に示すように、海底勾配が1/20で与えられる平行等深線海岸を考える。この海岸に2基の突堤が設置された条件下で、碎波波高3mの波が左斜めに 10° ($\theta_w = 10^\circ$) から入射した場合の

Prediction of Beach Changes Around Structures Using a 3-D Model for Predicting Beach Changes

海浜変形予測を行った。計算では、 h_R を3m、 h_c を10m、突堤の先端水深を5mとした。先端水深が h_c より小さいので、沿岸漂砂の一部が突堤先端を回り込んで下手へと流れうる条件である。砂の平衡勾配 $\tan\beta_c$ は初期勾配と同じ1/20とし、沿岸方向に2km、岸沖方向に600mの矩形域を計算領域として定め、 $\Delta x = \Delta y = 10\text{m}$ でメッシュ分割した。計算領域の左右端および岸沖端では砂の出入りがない条件とした。計算時間間隔 Δt を0.05hとして 2×10^4 steps (10^3 h)までの計算を行った。計算において必要な沿岸漂砂量係数 K_1 は0.2、陸域で浜崖ができる際の安息勾配は1/2とした。

3.2 計算結果

図-1には初期から 2×10^4 ステップ (10^3 h)までの地形変化計算の結果を示す。ここにxは初期汀線にとった岸沖距離である。左斜めから波が入射するため右向きの沿岸漂砂が生じ、突堤の左(上手)側では砂が堆積して等深線が前進し、下手側は侵食されて等深線が後退し、陸では浜崖の形成が進む。一方、突堤沖では、突堤の先端水深が h_c より小さいので漂砂の一部が突堤先端を回り込んで突堤下手側へと流れ、このため突堤沖では

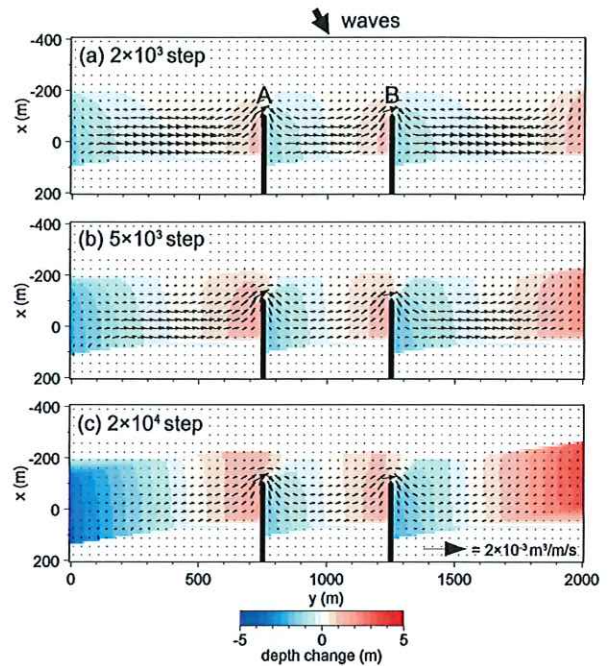


図-2 突堤群周辺の地形変化と漂砂フラックス

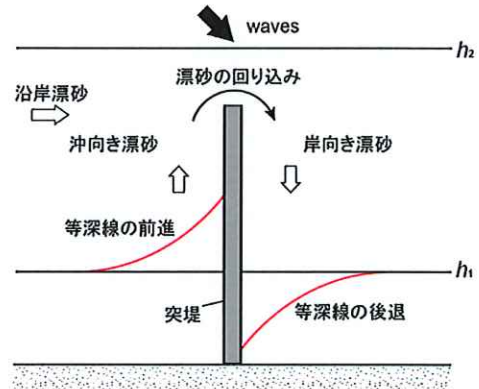


図-3 突堤近傍での等深線の挙動を示す模式図

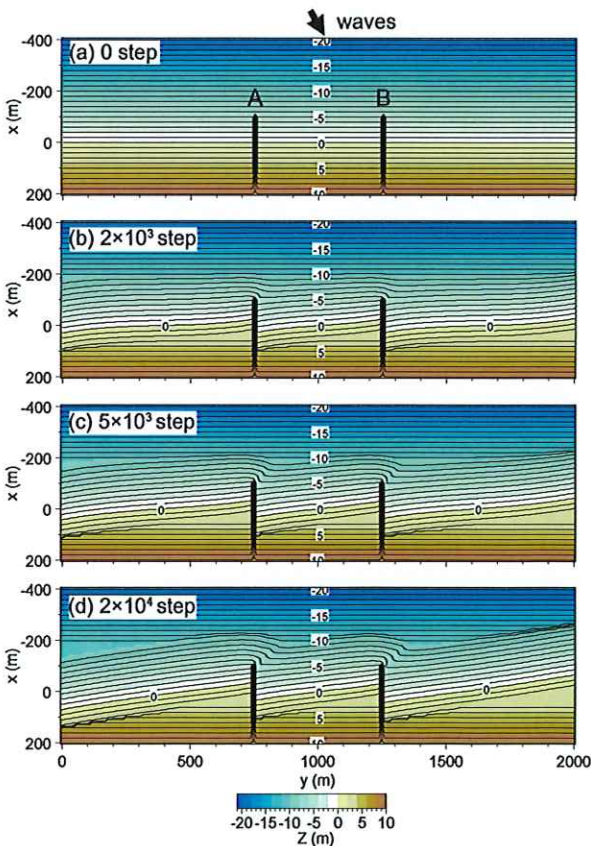


図-1 突堤群周辺での海浜変形

等深線の蛇行が起こる。

突堤の上手・下手側で堆積・侵食が進んでいく状況と、突堤周辺での漂砂フラックスの平面分布を図-2に示す。突堤が沖向きに突出しているため、突堤の上手側ではその先端へ向けて漂砂が集中し、突堤先端を漂砂が通過すると漂砂は岸向きとなった。このような漂砂量の分布に応じて、突堤上手側では堆積が、突堤下手側では侵食が進んだ。この場合の水深 h_1 、 h_2 間の水深 h_1 に相当する等深線の移動状況は図-3の模式図にまとめることができる。左斜め方向から波が斜め入射する場合、突堤上手側では沿岸漂砂が阻止されるため突堤に近づくほど等深線の前進量が大きくなる。等深線が前進すれば初期勾配(平衡勾配と同一)と比べてその地点での局所海底勾配が急となるので、その勾配を平衡勾配に戻そうとする復元力が働き、結

土研センター

果的に沖向き漂砂が発生する。突堤下手側ではこれとちょうど逆の変化が起こる。これら両者の条件を満足しつつ突堤両側での砂量のバランスを保つために、突堤先端を下手側へと漂砂が回り込むことになる。

突堤周辺での汀線変化を図-4に示す。時間経過とともに直線状であった汀線は両端と突堤により漂砂が止められるため、それらの上手側では汀線が前進し、下手側では後退するという結果が得られた。突堤A、Bでは汀線がジグザグな形状となっているから、突堤A、Bが右向きの沿岸漂砂を阻止していることが明らかではあるが、左端境界の上手側隣接部では汀線が大きく後退する一方、右端境界の上手側隣接部では汀線が大きく前進している。このように突堤A、B間の汀線変化のみから判断すると右向きの沿岸漂砂は完全に阻止されているように見えるが、実際には、突堤A、Bの沖を右向きに一部の沿岸漂砂が通過しているためこのような結果が得られたものである。

4. 離岸堤群周辺での海浜変形予測

4.1 計算条件

一般に離岸堤は異形ブロックを積み上げて造られる。このため沖から岸へと向かう波のエネルギーは離岸堤で減衰するが、一部は離岸堤を透過して岸側に達する。また離岸堤の開口部では波が

岸側へと通過する。このような場では波高が平面的に変化するが、そのような波浪場の変化は不規則波の方向分散法により算定可能であり、波浪の平面場は回折係数 K_a の分布により表される。

回折係数を K_a とすると、離岸堤背後での H_b' は $K_a H_b$ で与えられる。ここに H_b は離岸堤のない場合の砕波波高である。また波向 θ_w' は構造物背後での回折波向 θ_a を用いる。波浪場の計算に必要な方向度集中パラメータ S_{max} は風波を考えれば10とおける。また、沿岸漂砂量係数 K_1 を0.2、砕波波高が沿岸方向分布を有する場合に誘起される沿岸漂砂量成分については式(1)にOzasa・Bramptonの式⁴⁾を加え、その係数 K_2 を $1.62K_1$ で与えた。また、離岸堤による波の透過率 K_t は0.3とした。図-5は、この方法により左斜めに 10° の方向から波が斜め入射した場合の離岸堤群背後の波浪場(K_a と波向)の計算結果を示す。2基の離岸堤背後では周辺と比較して波高が低下している。離岸堤背後では回折係数 K_a が小さく、また波向が変化するが、その状態が時間的に常に同一として計算を行った。

4.2 計算結果

図-6には波が左側から斜め入射する条件下で2基の離岸堤が設置された場合の地形変化計算の結果を示す。離岸堤の背後では波が遮蔽されて波高が低下すると同時に、波向が離岸堤の両端から離

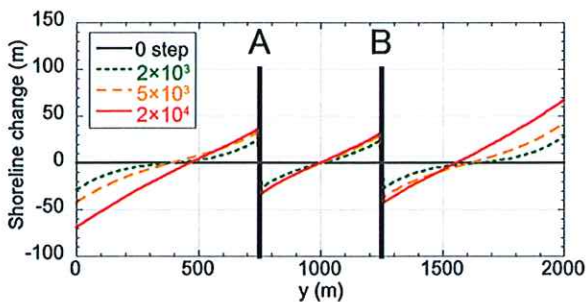


図-4 突堤群周辺での汀線変化

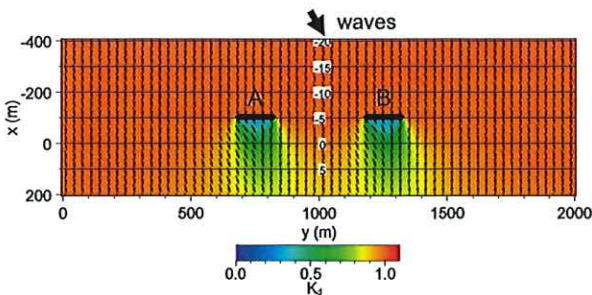


図-5 離岸堤群周辺の波浪場 (K_a と波向)

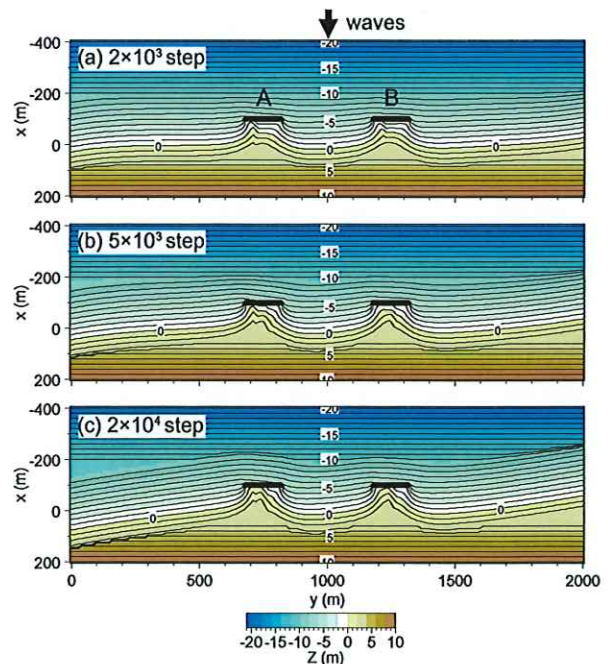


図-6 離岸堤群に波が斜め入射する場での海浜変形

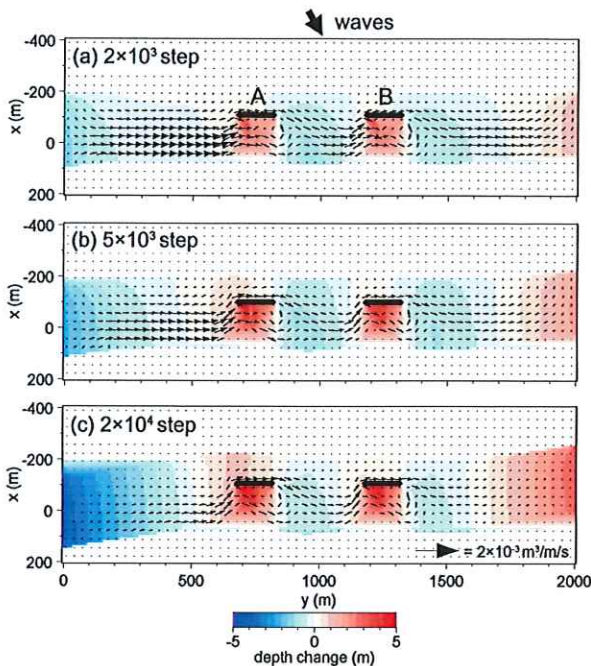


図-7 地形変化と漂砂フラックス

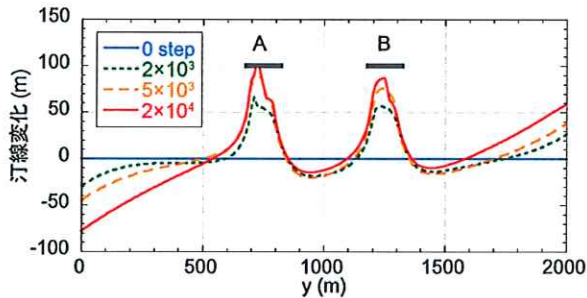


図-8 離岸堤群周辺での汀線変化

岸堤の中央へと向かう方向となるために、離岸堤背後には砂が溜まり舌状砂州が発達する。この結果、左端境界から離岸堤Aへと汀線が直線状に伸び、同様に離岸堤Bから右端境界へも直線状の汀線が形成された。左端境界と離岸堤Aの間では陸域が削り取られて浜崖の形成が進み、浜崖の形成区域は時間とともに陸側へと広がっていく。一方、右端境界の上手側では運ばれてきた漂砂が堆積して前浜が広がった。

図-6に示す初期から各ステップまでの地形変化量と、漂砂フラックスの分布を図-7に示す。図-6、7を併せてみると、左斜めからの入射のため 2×10^3 ステップ後には左端から離岸堤Aの背後へと強い漂砂が起きている。離岸堤Aの背後では漂砂の向きが大きく蛇行したのち離岸堤Bの背後では再び離岸堤A背後と同様な漂砂の蛇行が起きた。図-8には離岸堤周辺の汀線変化を示す。

5. まとめ

3次元海浜変形モデル（BGモデル）の実際問題への適用では、海底地形や構造物の条件、さらには底質粒度組成が異なる場合の計算も行われているが、ここでは現象の理解が容易となるよう、できるだけ単純な条件を設定して計算を行った。この結果、突堤・離岸堤周辺での地形変化をうまく計算することができた。BGモデルについては、2006年以後様々な工夫が行われ、波浪、構造物、底質粒度組成、強制流の効果など、様々な効果を取り入れられ、現在では複雑な条件下での地形変化予測が可能となっている。

参考文献

- 1) 芹沢真澄、宇多高明、三波俊郎、古池 鋼、熊田貴之：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル、海岸工学論文集、第49巻、pp.496～500、2002
- 2) 芹沢真澄、宇多高明、三波俊郎、古池 鋼：Bagnold概念に基づく海浜変形モデル、土木学会論文集B、Vol.62、No.4、pp.330～347、2006
- 3) 宇多高明、河野茂樹：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、1996
- 4) Ozasa, H. and Brampton, A. H.: Model for predicting the shoreline evolution of beaches backed by seawalls, Coastal Eng., Vol. 4, pp. 47-64, 1980

宇多高明



(一財) 土木研究センター
なぎさ総合研究所長、工博
Dr. Takaaki UDA

芹沢真澄



海岸研究室有限公司、
博士 (工学)
Dr. Masumi SERIZAWA

宮原志帆



海岸研究室有限公司
Shiho MIYAHARA