

浜崖形成予測のための擬似三次元海浜 変形モデルの開発と応用に関する基礎的研究

QUASI 3-D MODEL FOR BEACH SCARP GENERATION BASED ON
LONGSHORE SEDIMENT TRANSPORT CONCEPT UNDER AN IDEALIZED
CONDITION

西 隆一郎¹・山口 博²・細谷和範³

Ryuichiro NISHI, Hiroshi YAMAGUCHI and Kazunori HOSOTANI

¹正会員 博 (工) 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

²工修 (株) 中村測量設計 (〒160 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

³ (元) 財団法人鹿児島環境技術協会 (〒160 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

Beach and dune scarps can be seen often after a typhoon, hurricane and northeaster. In general, beach scarp and resulted shoreline recession are computed using a cross-shore sediment transport model in EU countries and US. On the other hand, beach scarp due to longshore sediment transport mechanics has been often estimated using N-line model in Japan. There is still unknown factor to distinguish which process is dominant to cause beach and dune scarp in natural condition. Here, field studies were conducted after typhoons to clarify that at least longshore process could cause beach scarp in sandy beach. Then, a quasi 3-D model to simulate a beach scarp generation is developed based on longshore sediment transport calculation and resulted shoreline position. The new concept is applied to an idealized bathymetry condition.

Key Words : Beach and dune scarps ,longshore sediment transport, 1-line model, quasi 3-D model ,idealized simulation condition

1. まえがき

わが国では、海岸管理上および利用上問題となる浜崖地形が発生している海岸が多数ある。写真-1に示すような浜崖地形は、台風時にその発生が顕著である。浜崖の形成予測モデルとしては、高波浪作用時の岸沖漂砂によるもの(西ら, 1994)¹⁾と、沿岸漂砂を対象としたnラインモデルによるもの(宇多ら, 1990)²⁾が既に提案されている。岸沖漂砂に伴う浜崖地形を取り込んだモデルは、特に欧米において高潮を伴う高波浪によりどの程度砂丘侵食および汀線後退が生じるかを予測することに主眼がおかれたものが多い(例えば, Larson, 1988³⁾を参照)。これに対して、宇多(1997)⁴⁾によれば、わが国の海岸侵食では沿岸漂砂系の中に境界条件として働く海岸構造物が数多く設置された結果生じるものが多い。よって、宇多らは沿岸漂砂の不均衡により沿岸漂砂量の局所勾配が負になるところで汀線後退が生じ結果として

浜崖が生じやすくなる現象を、海底地形をある程度再現できるnラインモデルにより再現している。浜崖が岸沖漂砂、沿岸漂砂のどちらにより生じるかということに関しては、欧米では一般に前者の機構が一般的なコンセンサスを得ている。ただし、岸沖漂砂、沿岸漂砂のどちらの概念を用いようが、漂砂量の局所勾配がマイナスになれば汀線近傍の海浜斜面勾配が徐々に陰しくなり、最終的には浜崖が生じることになる。沿岸漂砂を対象としたnラインモデルで浜崖を予測する手法は宇多らによりすでに開発されているが、一方、海岸保全の実務的問題解決手法としては、1ラインモデルが汎用的に使われる実状がある。例えば、写真-2, 3に示すような離岸堤周辺での汀線変動を予測するには1ラインモデルは利便性という意味で最も優れている。よって、写真-3に示すような浜崖の形成に関しても1ラインモデルが応用できれば、技術支援としての価値が高まることになる。そこで、本研究では汀線変動を予測する1ラインモデルを応用し

て、浜崖という三次元海浜地形を数値計算する概念の提案と、その具体的な数値計算例、および海岸保全構造物の端部処理への応用計算について検討する。

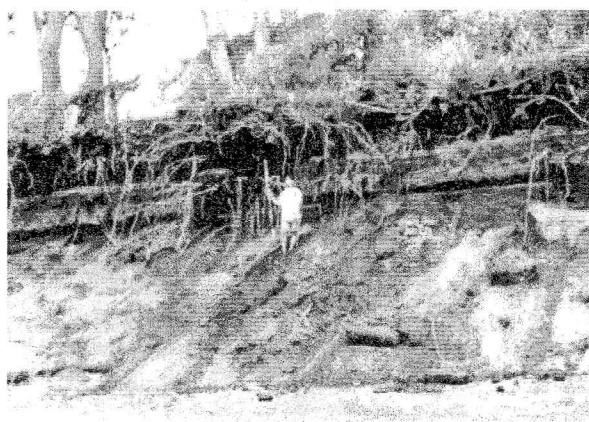


写真-1 高波浪による浜崖の形成状況

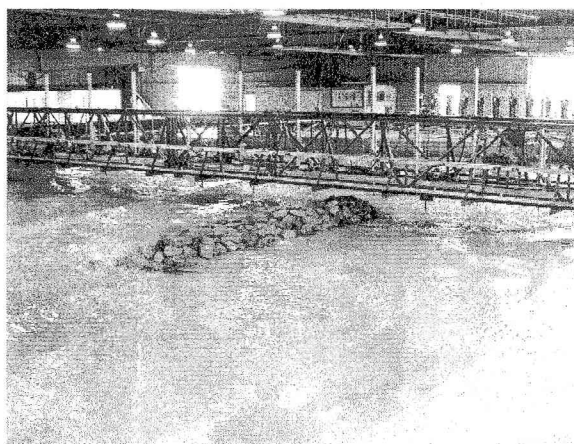


写真-2 離岸堤近傍の沿岸漂砂上手側海浜状況



写真-3 離岸堤近傍の沿岸漂砂下手側海浜状況

2. 浜崖の現地観測

現状では、浜崖が形成される場合にどれだけの底質が沖に移動し、どれだけの底質が沿岸方向に移動しているかは定量的に明らかでない。したがって、浜崖の形成予測に岸沖漂砂モデルを使うべきかあるいは沿岸漂砂モデルを用いるべきかという議論は本研究では行わない。ただし、少なくとも沿岸漂砂機構により浜崖が形成されるかどうかを現地データで明らかにした上で、沿岸漂砂に立脚した1ラインモデルを用いて数値シミュレーションモデルを作成することにした。そのために、台風0416号の来襲後に形成された浜崖の地形調査を、鹿児島県東串良町柏原海岸で行った。本海岸は、沖合に建設された人工島や沖合浚渫孔形状に伴う波浪変形により、人工島背後で堆積が、北側海域で侵食が従来から生じている。1985年から1992年の間の汀線変化状況は図-1に示される。図中で最も汀線後退が大きい箇所を中心に2004年も浜崖地形が形成されていた。そこで、この付近の汀線位置と浜崖規模(高さ)を測量した結果を、図-2に示す。

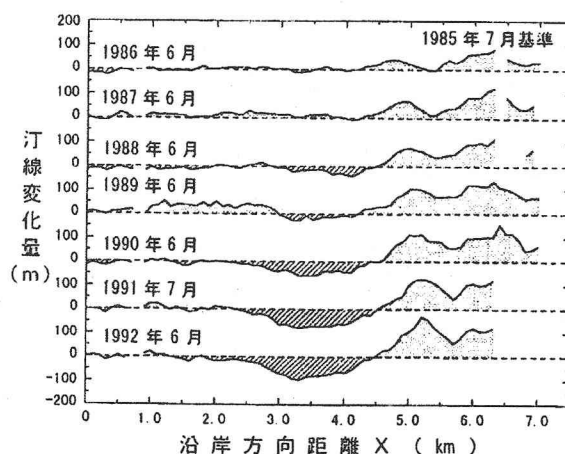


図-1 柏原海岸の汀線変動 (西等, 1998⁵)

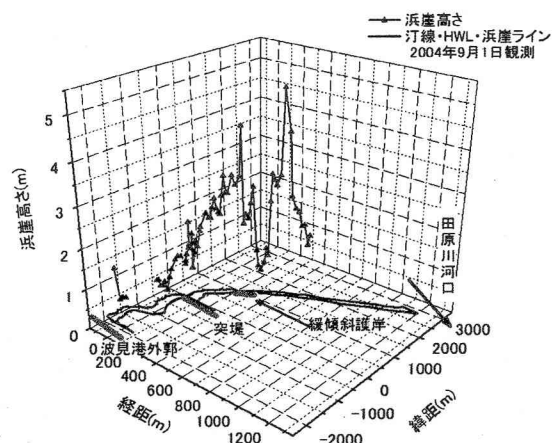


図-2 浜崖高さおよび汀線位置

図-2では、突堤から北東方向（図中右側）に浜崖の高さが徐々に高くなり、緩傾斜護岸周辺および直近の養浜箇所で急激に浜崖高さが低下し、そして、再度浜崖高さが約4.5mまで増加し、そこから北東方向に徐々に低下している。なお、緩傾斜護岸で浜崖が形成されているというのは奇異に感じるが、緩傾斜護岸天端に土堤が築造されており、台風時の遡上波でこの土堤が侵食されて浜崖地形が形成されたものである（写真-4参照）。したがって、浜崖自体の天端は周辺の浜崖と同様な標高であるが、その基礎部分が緩傾斜護岸上部のコンクリート面を基準に測られていることに注意する必要がある。また、緩傾斜護岸の北側直近には鹿児島県土木部（鹿屋土木事務所）において約2万m³の養浜が2004年4月に行われているが、写真および計測データを見てもこの養浜箇所では形成された浜崖が小さいことがわかる。これは、養浜により大量の土砂が前浜付近に存在したために、高波浪の作用時でも隣接海浜に比べて前浜勾配が比較的緩やかに保たれたために、結果として浜崖規模が養浜箇所です小さく押さえられたものと考えられる。また、養浜箇所の浜崖規模が小さいことの一因は、養浜箇所南側で緩傾斜護岸および消波ブロックが突堤状の側方境界条件として作用し、南側への沿岸漂砂を低減しているためであろう。緩傾斜護岸部分と養浜箇所部分を除外して考えれば、汀線後退が最も激しいところを中心に浜崖高さがあがる種円弧状の分布をしていることになり、巨視的には沿岸漂砂に基づいた浜崖形成機構が存在することになる。



写真-4 緩傾斜護岸周辺での浜崖形成状況

3. 数値計算手法

細部においては今後改良の余地があるが、柏原海岸およびその他の海岸での浜崖形成状況の現地調査にもとづいて、第一近似として1ラインモデルにより汀線変動を求めて、汀線後退領域では浜崖が形成されると仮定する計算モデルを作ることにした。なお、浜崖は三次元地形なので、計算の過程で3次元座標データが存在しなければ浜崖の規模（高さ）を推定できない。一方、1ライ

ンモデルでは経時的な汀線位置データ（x-y座標値）だけが存在するような勘違いが生じやすいが、仮定された初期海浜断面が汀線移動に伴い平行移動しているわけであり、擬似的には三次元地形データを包含している。そこで、1ラインモデルで使用する初期汀線形状を持つ初期三次元海岸地形を平衡海浜断面理論に基づき計算して、計算開始時の三次元地形データを用意する。ただし、汀線背後の前浜地形に関しては、当面水面上の前浜が一樣勾配を持つものとして地形の計算を行い、陸域を含む三次元海浜地形を合成する。よって実海岸を対象にする場合には、ここで作成した仮想地形を実海岸の測量データで置換すればよいことになる。

初期汀線データを対象に、所定の計算条件を持つ波浪条件と海岸構造物設置条件に対して、経時的な汀線位置を求める。そして、最終計算時間の汀線位置に対して計算された汀線の海側（水面下）領域では、平衡海浜断面の概念に基づいて再度三次元海底地形の計算を行う。ただし、計算された汀線背後域の陸側地形（水面上地形）は、建前上漂砂が生じていない領域になるので初期海浜断面形状が保持された海岸地形とする。なお、ここで作成された擬似三次元海浜地形は、汀線後退が生じた箇所で段差を持つ地形になっている。

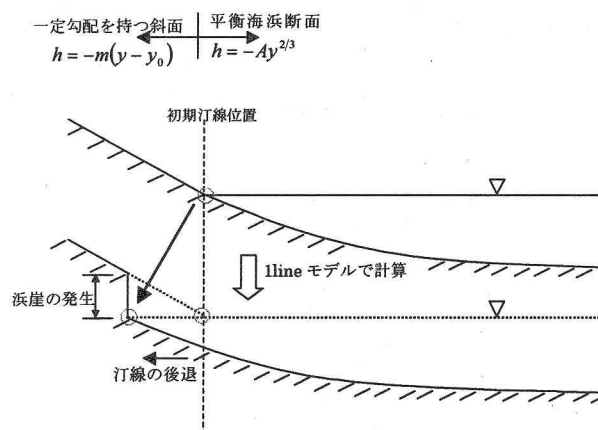


図-3 本計算手法での浜崖地形形成概念図

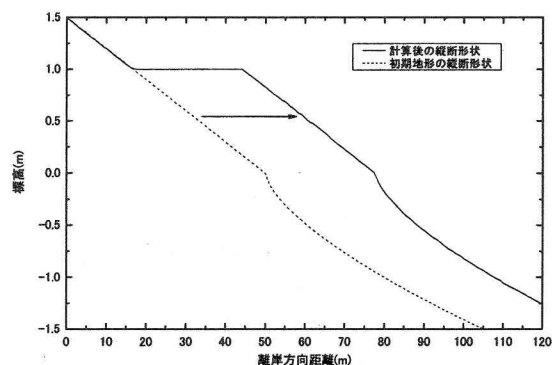


図-4 堆積領域での地形変化概念図

例えば、写真-2 に示されたようにこの段差部分が鉛直斜面でよいと仮定すれば、この段差を浜崖と定義し段差の高さを浜崖高さとするればよい。一方、現地海岸においてはこの段差部分で斜面崩壊が生じている場合も多々ある。よって、浜崖高さとして斜面崩壊も考慮して浜崖高さを定義する必要もある。数値計算の中では、この段差地形が斜面崩壊の生じる地形かどうかの判定を行い、もし斜面崩壊条件を満足していれば斜面崩壊による土砂の沖向き移動を生じさせ、その結果としての新しい浜崖地形を計算することにした。そして、最終的に計算結果を(x, y, z)フォーマットで外部出力し、出力データを可視化することにした。

1 ラインモデルでは海岸地形に関しては汀線情報しか持たないような錯覚があるが、原理上はある海岸縦断地形が計算で求まる汀線位置を保持しながら岸沖方向に平行移動しているわけであり、1 ラインモデルといえども海岸地形の三次元情報がある程度復元できると考えると、本モデルのキーポイントである。この様な概念に基づいて、(1) 初期三次元平衡海岸地形計算ルーチン、(2) 1 ラインモデルによる汀線変化計算ルーチン、(3) 計算汀線位置を持つ擬似三次元海岸地形計算ルーチン、(4) 擬似三次元海岸地形の汀線周辺での斜面崩壊計算と浜崖地形の確定ルーチン、(5) 計算結果の出力ルーチンよりなる数値計算手法を用いて、浜崖地形の発生箇所およびその規模を推定する数値計算を行った。

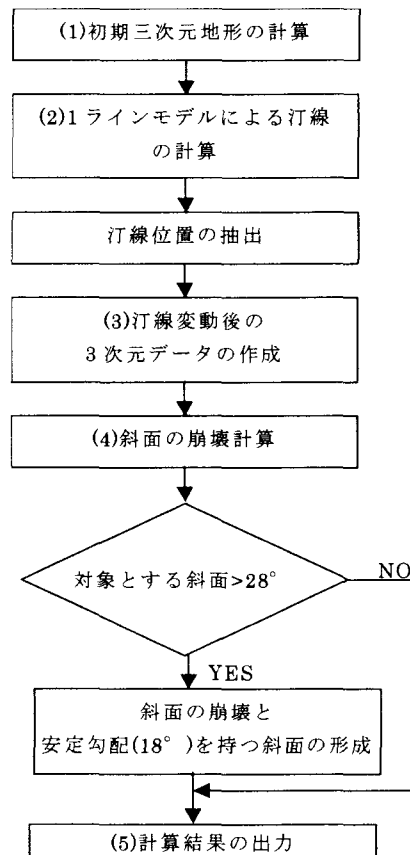


図-5 数値計算フロー

(1) 沿岸漂砂量式

コントロールボックスを用いた沿岸漂砂量の収支関係に基づいて、底質の連続式が(1)式ようになる。そして、連続式から汀線変化量を計算するためには、沿岸漂砂量 Q を計算する必要がある。本研究では(2)式に示す小笹・Brampton 型の沿岸漂砂量式(1979)⁶⁾を用いる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$Q = (H^2 C_g)_b (a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos 2\theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x})_b \quad (2)$$

ここで、 y が汀線位置、 t は経過時間、 D_B はバーム高さ、 D_C は地形変化の限界水深、 x は沿岸方向座標、 H は波高、 C_g は群速度、 θ は波角、 a_1 と a_2 は経験的定数、 $_b$ は碎波点を意味する添え字である。

(2) 汀線近傍での斜面崩壊機構

本数値計算手法の中で浜崖地形の定義は前述したように、汀線近傍に生じる鉛直面を持つ段差を浜崖として定義する方法と、鉛直面を持つ段差が斜面崩壊した後の斜面高さを浜崖高さとして定義する方法である。後者については、図-6 に示す斜面崩壊機構の概念を採用する。この斜面崩壊のルーチンでは、斜面の局所勾配に関する二つの限界勾配角を用いる。ひとつは、初期降伏角で、もうひとつが斜面崩壊後の安息角である。もし、局所勾配が初期降伏角を超えれば斜面崩壊が生じ、その結果、浜崖斜面上部の底質が斜面に沿って崩落し斜面上で再配分され、新しい安定勾配の斜面が形成される。この過程で、斜面上部の砂が斜面下手側にどこまで再配分されるかは、繰り返し計算で求めている。なお、本プログラムでは初期降伏角を 28° 、そして、斜面崩壊後の安息角を 18° と経験的に仮定し計算を行っている。

斜面崩壊のチェック(Avalanching)

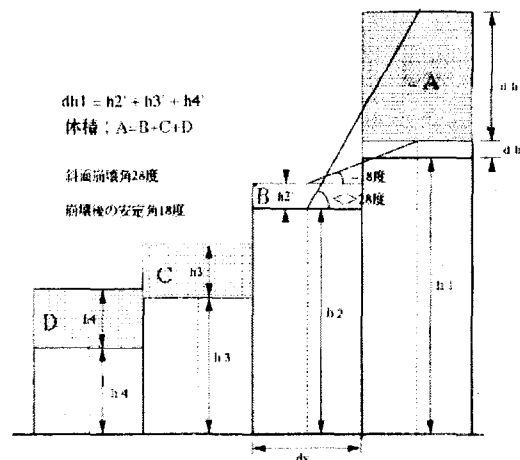


図-6 斜面崩壊による底質再配分

4. 数値計算結果

本数値計算手法により、離岸堤がある場合、突堤がある場合、突堤群がある場合の汀線変化および浜崖形成状況について求めた。入射波浪条件は波高が $H=1.5\text{m}$ 、周期が $T=5.0$ 秒、波角が $\theta=6.0^\circ$ で、海浜底質は粒径 $d_{50}=0.23\text{mm}$ である。時間ステップは4時間に設定し、波浪の作用時間としては5年後までを計算した。

また、海岸保全構造物の沿岸漂砂下手側には顕著な汀線後退とその結果として浜崖が形成されやすいことは良く知られている。例えば、回折効果の効かない短めの防砂突堤を1本海岸に設置すると、沿岸漂砂上手側の堆積地形の鏡像のような侵食地形が沿岸漂砂下手側に形成される。このような、海岸保全構造物の沿岸漂砂下手側端部に通常発生する顕著な浜崖地形を抑制するための工夫例として、保全構造物端部で突堤群の延長を徐々に短くして端部域の海浜にすり付けるテーパ型の突堤配置も検討することにした。さらに、侵食対策としては養浜も可能であるために、最も浜崖形成の著しい侵食域に養浜を実施した後の浜崖形成状況についても数値計算により求めた。

なお、以下に代表的な数値計算例について示すことにする。なお、本研究の数値計算はすべて仮想的な条件下での計算であり、現時点では実海岸を対象としたものではないことを断っておく。また、すべての計算で計算領域両端の境界条件を通称 pin beach と言われる汀線固定型の境界条件にしてある。実海岸への応用では、現場の測量データに基づいて計算領域両端部での汀線変動量を入力する形で、境界条件が設定されるようになっている。

初期汀線位置から沖合 200mの位置に長さ 100mの離岸堤を設置し5年後に生じる汀線変化、三次元地形、および最も侵食の激しい地点での浜崖地形の形成状況を、それぞれ図-7、8、9 に示す。沖波は離岸堤の左斜め方向から 3° の入射角で作用している。よって、図-7 では離岸堤の左側が沿岸漂砂の上手で、右側が漂砂下手側になる。図-7 に示される汀線変動では沿岸漂砂上手側で徐々に汀線が前進し、下手側で汀線が最大約 40m後退している状況が分かる。

開発された数値計算法の中では、基本的に格子間隔は任意に設定できるが、本論文に示す計算例では、計算領域内の空間格子が沿岸方向 10m間隔、離岸方向 1m間隔に設定されている。したがって、沿岸方向 2,000m (200 個)、離岸方向 200m (200 個)、つまり 40,000 個の格子点において水深および標高を求めている。図-6 に示す立体地形は、奥が陸地側で手前が沖側である。作図時間を節約するために一部データを間引いてあるが、堆積域 (図中右側) でバームが成長し、侵食域 (図中左側) で水深が低下していることが分かる。この様な計算結果の中で、汀線が最も後退した領域の断面変化が図-7 に示されている。結果として、本計算法により鉛直データである浜崖高さが推定可能なことが理解できる。

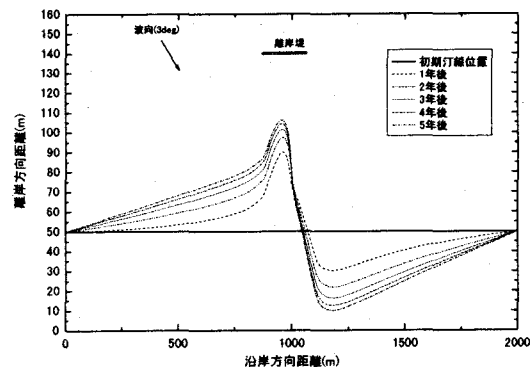


図-7 離岸堤設置に伴う汀線変動図

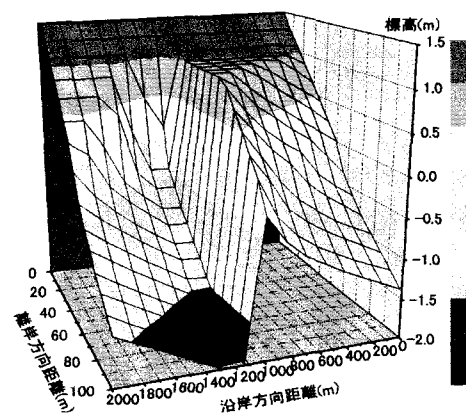


図-8 離岸堤設置に伴う地形変化

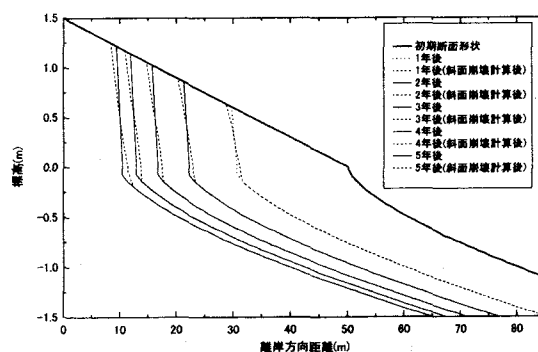


図-9 離岸堤設置に伴う浜崖の形成状況

図-7 から 9 に示す以外の構造物条件 (突堤群、テーパ型突堤群、突堤と離岸堤の組み合わせ) や養浜工に関しては、計算条件を設定する入力ファイルを所定の条件に書き換えることで、数値計算を行っている。

一例として、突堤群の端部に位置する各突堤長を変えたテーパ型の突堤配置についての数値計算を示す。本数値計算ケースの構造物条件としては、沿岸方向距離

750mの位置に初期汀線から長さ100mの突堤、その後順次、沿岸方向距離1,050mの位置に初期汀線から長さ50mの突堤、沿岸方向距離1,350mの位置に初期汀線から長さ25mの突堤、沿岸方向距離1,650mの位置に初期汀線から長さ12mの突堤を設置して計算を行った。

波作用5年後までの汀線変化を図-10に示す。また、上述した2種類の定義による浜崖高さの経時変化を図-11に示す。テーパー型の突堤配置を用いることで、沿岸漂砂量分布の不連続性を低減できるために、数値計算上は汀線後退量を低下させ、その結果、浜崖高さも抑制される。ただし、汀線後退量を減らすことのトレードオフとも言えるが、侵食領域の区間延長は長くなっている。

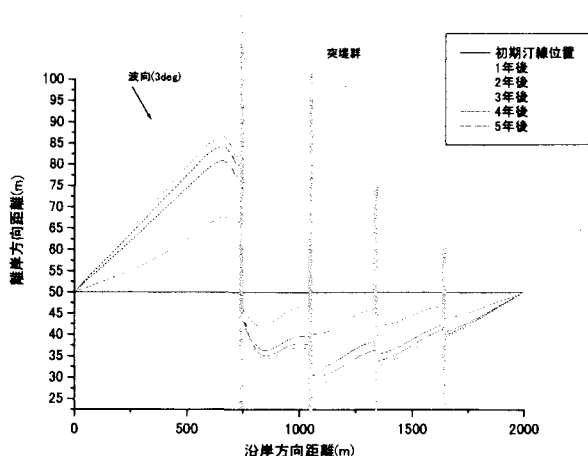


図-10 テーパー型突堤群周辺での汀線変化状況

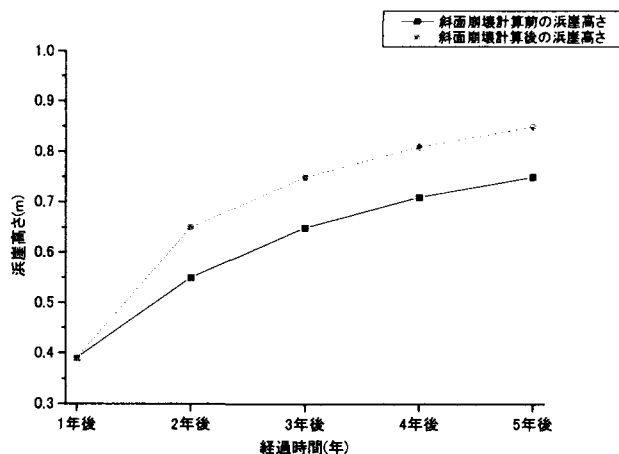


図-11 汀線後退最大箇所での浜崖高さの経時変化

5. 結論

本研究で提案した数値計算手法は、1 ラインモデルを組み込んだ簡易的擬似三次元海浜地形変化モデルであるが、離岸堤や突堤（群）による浜崖の形成状況を簡便に数値的に計算できることが確認された。また、突堤群を用いた端部処理法としてテーパー型の突堤配置状況を用いた数値計算や、侵食箇所への養浜による浜崖抑制効果確認の数値計算にも応用できることも確認された。ただし、実海岸への応用に関しては当然ながら個別に境界条件の検討が必要になる。

なお、本研究では数値計算しか検討していないが、今後は、実海岸データを用いてモデルのキャリブレーションを行う必要がある。また、浜崖形成時にどれだけの底質が沖側に移動し、どれだけの底質が沿岸方向に移動しているかについての基本的な疑問に対する検討も今後の研究として残されたままである。

謝辞：本研究は、平成14～16年度科学研究費補助金基盤研究（C）（2）「自然海岸・養浜海岸における海岸構造物設置後の浜崖形成予測モデルに関する研究」、課題番号14550514の助成を受けて実施した研究であり、紙面を借りて謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 西 隆一郎, 佐藤道郎: 砂丘-海浜系の侵食に関する現地観測と数値実験について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 541-545, 1994.
- 2) 宇多高明, 山本幸次, 河野茂樹: 沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 304-308, 1990.
- 3) Larson, M.: Quantification of Beach Profile Change, Report No.1008, Lund, Sweden, pp.192-194, 1988.
- 4) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p, 1997.
- 5) 西 隆一郎, 宇多高明, 佐藤道郎, 大石靖郎, 堀口敬洋, 脇田政一: 沖合人工島建設に伴う海浜変形過程と侵食対策工法, 海岸工学論文集, pp. 561-565, 第45巻, 1998.
- 6) 小笹博昭, ブランプトン, A.H.: 護岸のある汀線変化計算, 港湾技術研究所報告, 第 18 巻, 第 4 号, pp. 77-104, 1979.