

3 次元 Hsu モデルによるポケットビーチ内の 護岸周辺の静的安定海浜形状の予測

酒井 和 也* ・ 小林 昭 男** ・ 熊 田 貴 之***
芹 沢 真 澄**** ・ 宇 多 高 明***** ・ 三 波 俊 郎*****

ポケットビーチ内の安定海浜形状の予測手法として、Hsu and Evans (1989) は 2 次のオーダーによる回帰分析により、直接的に安定汀線形状を求めるモデルを開発した。このモデルは波浪場の計算の必要性がないため、計算が容易という利点がある。その後芹沢ら (1996; 2000) は、3 次元地形変化が直接計算できるように Hsu モデルを拡張した。これにより、ポケットビーチ内の 3 次元海浜安定形状が予測可能となった。しかしこのモデルでは侵食域に護岸が設置されている場合の予測ができないという課題があった。一般には、ほとんどの現地海岸では護岸があることから、計算モデルの適用性に大きな制約があった。そこで、本研究では護岸の存在する場合における安定海浜形状の予測モデルを開発した。

1. 結 言

ポケットビーチ内の静的安定汀線形状の予測手法として、Hsu・Evans (1989) は、極座標表示の汀線形状に関して 2 次のオーダーまでの回帰分析により直接的に安定汀線形状を求める手法を構築した。この手法は波浪場の計算と、繰り返し計算が必要ないため、非常に短時間で最終安定汀線形状が求められるという利点がある。しかし、土砂収支が満足されていないため養浜時の汀線変化予測などには使用できないという問題点があった。そこで芹沢ら (1996; 2000) は土砂量保存式を導入して、土砂収支を満足させるとともに、等深線変化モデル(宇多・河野, 1996) において仮定されている沿岸漂砂量の水深方向分布関数を考慮することにより、3 次元の地形変化を直接的に予測可能なモデルへと拡張した。また熊田ら (2001) は千葉県の大洗川浜に、3 次元 Hsu モデルを適用し将来形状を予測している。

しかし、このモデルでは護岸を考慮していないため、大洗川浜のような護岸が設置されている海岸での計算を正確に行うことができないという課題があり、実海岸の安定汀線予測等への利用において制約があった。また、近年侵食が進行している海岸では、護岸の露出(写真-1)による景観の悪化や、土砂流出による護岸の倒壊などの問題があり、護岸を考慮した予測を可能とすることは、これらの問題への対策案を検討する上で、非常に重要である。

そこで本研究では、Hsu の方式に護岸の境界条件を付加することで、護岸を考慮した 3 次元地形変化を直接的に計算する手法を開発した。



写真-1 大洗海岸の護岸露出状況
(2002 年 5 月 6 日撮影)

2. 計 算 方 法

2.1 護岸考慮の安定汀線の計算法

図-1 のように、両端は突堤や岬などによって囲まれたポケットビーチ内で、護岸線と平行な初期汀線を設定した場合、両端の逆 L 突堤付近では波の回折効果によって波の遮蔽域が形成される。汀線は波の遮蔽域では前進し、中央部では後退する。この場合、安定汀線は Hsu の式で計算可能である。しかし、従来の計算では海浜中央部では護岸があるにもかかわらず、それより陸側まで予測安定汀線が後退する。護岸線より陸側に後退した部分の侵食面積を A_1 とすると、この部分は実際には護岸があり侵食が起こらないため、両端部における堆積域の汀線はその土砂量に相当する分だけ汀線の前進量が小さくならなければならない。このため、式 (1) のように A_1 と等しい分だけ堆積域の面積 A_2 を減少させ、汀線の前進量を式 (2) のように ΔY だけ小さくする (後退させる) ことで土砂収支が満足できる。このとき、護岸より岸側の汀線は護岸上に位置を修正する。堆積域においては護岸考慮時の土砂収支を満足する汀線上の Q 点 ($Y_{Q(i)}$) を式 (3) により算定し、従来の基礎式で汀線形状を算出する。

* 学生会員	日本大学大学院 理工学研究科 海洋建築工学専攻
** 正 会 員 工 博	日本大学理工学部 海洋建築工学科専任講師
*** 学生会員 工(修)	日本大学大学院 理工学研究科 海洋建築工学専攻
**** 正 会 員	海岸研究室(有限会社)
***** 正 会 員 工 博	国土交通省 国土技術政策総合研究所 研究総務官

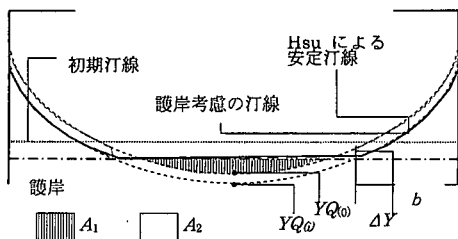


図-1 護岸考慮時の汀線形状の計算方法

$$A_2 = 2 \cdot \Delta Y \cdot b \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta Y = A_2 / 2 \cdot b = A_1 / 2 \cdot b \dots\dots\dots (2)$$

$$YQ_{(i)} = YQ_{(0)} - \Delta Y \dots\dots\dots (3)$$

3次元計算においては、芹沢ら(2000)と同様に、等深線変化モデル(宇多・河野, 1996)において仮定されている沿岸漂砂量の水深方向分布関数を用いて各等深線の変化量を算定し、初期等深線に変化量を加えることで各等深線位置を求める。護岸の境界条件については、各等深線に汀線と同様の手法を用いて考慮する。すなわち、その位置が護岸より陸側となる等深線については、護岸より岸側部分が侵食されないで、その分土砂量を減じて計算範囲全体の土砂収支を満足させる。

2.2 護岸考慮時の海浜縦断面形の補正方法

海底勾配が海面下の限界勾配を越えた場合には、等深線変化モデルと同様な手法により、岸沖方向の土砂収支を満足させつつ沖方向へ土砂を落ち込ませる。このとき各等深線に対し、鉛直方向に同座標である護岸の岸沖方向位置をその水深における後退限界として設定して限界勾配による補正を行う(図-2)。海面上においても限界勾配を越えた場合には、同様に断面の補正を行う。

2.3 計算の手順

図-3に計算のフロー図を示す。入力データは初期地形、防波堤(ヘッドランド)の諸元、護岸の諸元、入射波向、碎波波高(分布)、陸上・海面下の限界勾配である。3次元 Hsu モデル(芹沢ら, 2000)と同様に、まず最初に沿岸方向に等間隔で計算範囲を分割し、碎波波高から $h_c, h_R, D_s, \varepsilon(z_k)$ を求める(h_c : 波による地形変化の限界水深, h_R : バーム高, D_s : 漂砂の移動高, $\varepsilon(z_k)$: 沿岸漂砂量の水深方向分布)。次に Hsu の方式より土砂収支を満足させつつ安定汀線位置を計算し、汀線変化量 $\Delta Y_{(0)}$ を求める。 $\Delta Y_{(0)}$ から各水深の等深線変化量を求められ、等深線変化量を初期値に加えれば新たな等深線位置が定まる。

ここまでの計算で、土砂収支を満足した等深線位置が定まる。これらの等深線に、式(1), (2), (3)で示した護岸考慮の手法を適用し、護岸を考慮した等深線位置を求める。この段階で護岸を考慮し、かつ土砂収支を満足する各等深線の位置が決まるが、計算された等深線

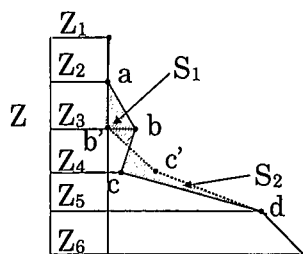


図-2 護岸考慮時の海浜縦断面形の安定化機構

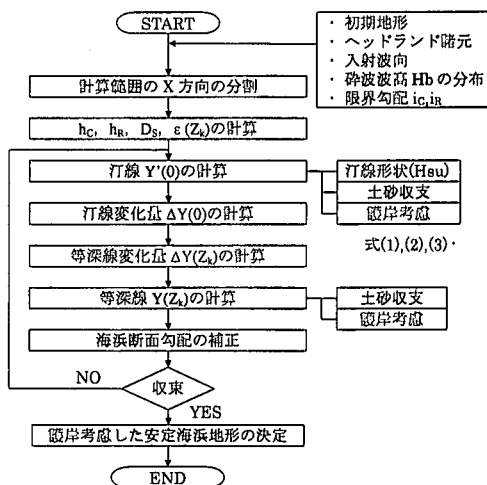


図-3 計算のフロー

の岸沖方向の間隔、すなわち海底の局所的な勾配が、陸域または海中での砂の安息角から定まる限界勾配より急角度となることもあり得る。そこで、局所的な海浜勾配が限界勾配よりも急な場合には、海浜断面内で土砂収支を保ったままで沖向きの土砂移動が生じるようにして各等深線の位置を計算し直す。等深線の新しい位置が決まったならば、等深線位置の変化からみた収束条件と比較し、収束条件を満足するようならば計算を終了する。満足しなければ汀線の計算からやり直す。以上が計算の概要である。

2.4 計算諸元

計算は大きく分かれて3つのケースからなる。それぞれ、モデルの特性を把握するためのテスト計算、モデルの有効性を確かめるための実海岸との検証計算、さらに現在も侵食が進行している海岸の将来予測計算である。表-1に条件を一括して示す。

a) 試計算

試計算は全体で3ケースからなる。ケース①は初期海底勾配を1/10の一定として、左右に防波堤がある場合を対象とする。護岸形状は沿岸全域にわたり初期汀線より20 m 陸側に直立護岸がある場合を対象とする。また碎波波高は2 m で沿岸方向に一定とする。陸域、海域にお

表-1 計算条件の一覧

テスト計算ケースの一覧							
ケース	護岸形状	初期地形	H_b (m)	h_c (m)	h_R (m)	i_c	i_R
1	直立	1/10	2.0	6.0	2.0	1/2	1/2
2	緩傾斜	//	//	//	//	//	//
3	直+緩	//	//	//	//	//	//

大洗検証計算の条件一覧					
初期汀線	安定汀線	突堤形状	Q点	波向	土砂変化量
1975年1月	1992年10月	左片突堤	$X=5500$ m	10度	153559 m ²

検見川浜将来予測計算の条件一覧					
初期地形	H_b (m)	h_c (m)	h_R (m)	i_c	i_R
1999年	1	-4	1.5	1/5	1/2

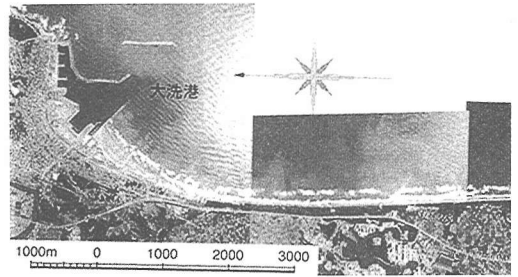


写真-2 大洗海岸の空中写真 (1992年)

る限界勾配は1/2に設定した。ケース②は、ケース①の護岸形状を緩傾斜護岸に変更したものである。緩傾斜護岸の勾配は1/5であり、岸沖方向距離 $Y=-15$ m で標高 $Z=0$ m となり、沿岸方向に一樣な形状であるとする。ケース③は、ケース①の砂浜中央部において緩傾斜護岸を付加したものである。緩傾斜護岸の天端は、直立護岸の天端と同位置であり、勾配はケース②と同様1/5とする。

b) 検証計算 (2次元)

護岸を考慮した安定汀線の計算については、汀線の後退によって護岸の露出が確認されている大洗海岸を検証海岸に選んだ。

大洗海岸は写真-2のように大洗港建設に伴い設置された沖防波堤による波の回折効果で、防波堤背後の遮蔽域では南から北に向かう沿岸流が発生することで、大洗港付近で沖方向に大きく汀線は前進した。一方大洗港より南約2 kmほどの砂浜では汀線が大きく後退した。侵食域では護岸の露出(写真-1)も確認されている。また写真-1の背後地では、護岸前面の土砂の侵食により護岸背後の土砂の吸い出し(写真-3)が起きており、護岸の倒壊が危惧される。

計算初期値の汀線は1975年の汀線を、計算結果との比較には1992年の汀線を使用した。ヘッドランド形状は左片突堤とし、Hsuの計算におけるP点、Q点の設定においては、沖防波堤の先端部をP点、Q点は汀線固定の計算結果と海浜形状との曲率が一致する点を波の遮蔽域の限界点として設定した。波向は三村ら(1991)より沿岸方向に対し半時計回りで10度と算定した。また1975年から1992年にかけては、大洗港における西防砂突堤などの建設により、埋め立てによる土砂量変化があった。そのため、空中写真による汀線変化解析を行い土砂の変化量を測定し、土砂収支の面積計算時に変化分として考慮することで土砂量保存の条件を満足させた。

c) 将来予測 (3次元)

千葉県の見見川浜を対象として将来予測を行った。計算諸元は熊田ら(2001)を参考に与えた。計算の初期値



写真-3 護岸背後地の土砂吸い出し状況 (2002年5月6日撮影)

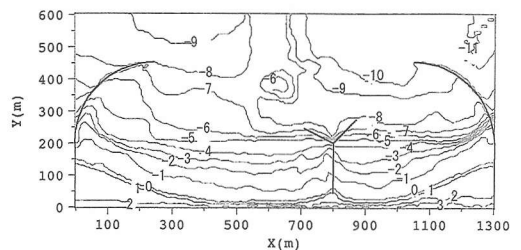


図-4 検見川浜の深淺図 (1999年)

である等深線の位置は、1999年の検見川浜の深淺図(図-4)を参考に、一樣勾配斜面で与えた。深淺図の海浜縦断面分析により、波による地形変化の限界水深(h_c)は-4 m、バーム高(h_R)は1.5 mとした。陸域、海域における限界勾配は、同様の分析によりそれぞれ1/2、1/5とした。

3. 計算結果と考察

3.1 試計算の結果

図-5, 6にケース①~③の結果を示す。図-5は安定海浜の等深線図、図-6は $X=0\sim 250$ m の範囲で10 m間隔の測線に沿う海浜縦断面の重ね合わせ図である。ケース①から順に特徴を述べる。

図-5(a), 図-6(a)には初期汀線より20 m 背後に直立護岸を設置したケース①の計算結果を示す。ケース①においては、防波堤による波の回折効果によって、防波堤背後の汀線は大きく湾曲しつつ前進し、それに合わせて等深線も前進している。このとき舌状砂州では海中での安息勾配を保ちつつ、土砂が深い場所まで落ち込んでいく。舌状砂州では汀線から海中では非常に急勾配となるが、陸上部には波のうちあがり高さに応じた平坦面が形成される。一方、防波堤による波の遮蔽域外では、浅海部から陸上部で等深線または等高線が後退している。しかし、直立護岸の位置で、等深線または等高線の後退は停止している。また、標高3~5 mの等高線においては、初期地形においては護岸位置より陸側にあったが、直立護岸の設置により護岸位置まで等高線が前進している。すなわち、浜中央部の侵食域の中で $X = -100 \sim 100$ m の箇所で汀線上で護岸が露出する結果となった。結局このケースでは、直立護岸を設置したことにより等深線の後退が護岸位置で停止し、侵食域で護岸の露出がうまく計算されている。

図-5(b), 図-6(b)にケース①の護岸を緩傾斜護岸に変更した場合(ケース②)の計算結果を示す。ケース①と同様に、舌状砂州では海中では急勾配となり、陸上部には平坦面が形成されている。侵食域においては $X = -120 \sim 120$ m の間で、汀線上での護岸の露出が予測されており、 $Z = 1$ m の等深線も露出する結果となった。結局このケースでは、緩傾斜護岸の設置による防波堤背後の堆積域と侵食域の現象を良く再現できた。

図-5(c), 図-6(c)にケース①において砂浜中央部に緩傾斜護岸を付加させた場合(ケース③)の計算結果を示す。砂浜中央部では、緩傾斜護岸の設置により侵食は抑えられたが、 $Z = -3$ m までの護岸が露出する結果となった。また、 $X = 100 \sim 250$ m, $-100 \sim -250$ m までの直立護岸の前面域において、ケース①の直立護岸のみの場合と比較し、等深線の後退が予測された。これは砂浜中央にある護岸によって、本来侵食域である砂浜中央の侵食が抑えられた分、堆積域の土砂量が減少したためと考えられる。このケースでは、砂浜中央部に護岸を付加させたことによる、砂浜全域への影響がうまく計算されている。

3.2 検証計算 (2次元)

大洗海岸での検証結果を図-7に示す。図-7は実測汀線と計算結果の比較したものである。計算汀線形状は、1992年の汀線形状と同様に、1975年の初期汀線と比べて北側の港付近で沖向きに前進し、南に進むに従い岸方向へと後退していることが良く再現できている。汀線が護岸に接する点に注目すると、計算では $X = 3100$ m, 実測汀線では 3500 m 付近から護岸に接しており、計算領域

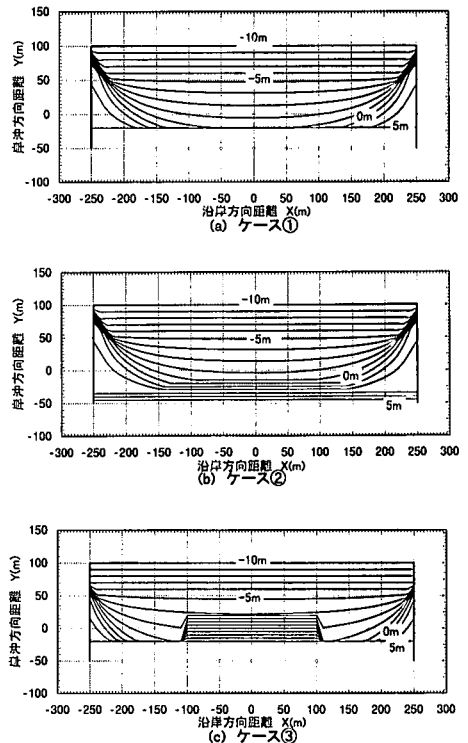


図-5 ケース①~③の安定海浜形状の比較

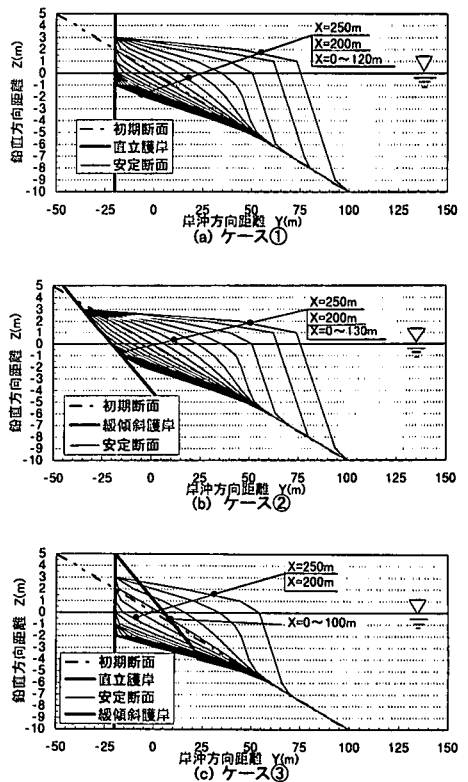


図-6 ケース①~③の海浜縦断形の比較

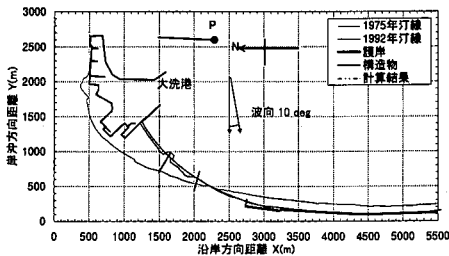


図-7 大洗海岸の汀線形状の比較

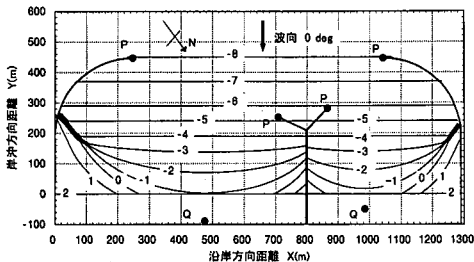


図-8 検見川浜の予測等深線形状

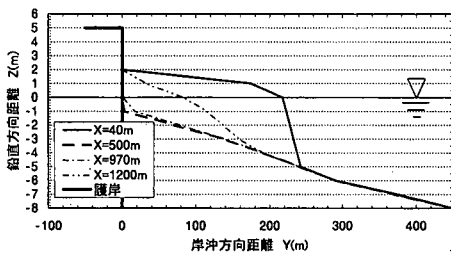


図-9 検見川浜の予測安定海浜の縦断面

のオーダーとしては約5%程度、計算結果が沿岸方向に過大に予測された。すなわち、1992年汀線は安定形に至っておらず、堆積域ではさらに前進し、護岸との接点は北側に移動し、侵食域は増大すると予測できる。

3.3 将来予測 (3次元)

図-5に示した1999年の検見川浜の深浅図に対する計算結果が図-8である。計算結果は安定形状であるため、現況よりもやや過大に予測されている。しかし、波の遮蔽効果が発揮され端部では等深線が前進し、南側海岸の中央部では-1m以浅の等深線は護岸位置と重なり、北側海岸においても汀線と1, 2mの等高線は護岸位置と重なった。護岸のある安定地形は、実測結果とよい対応を示した。図-9は堆積域($X=40$ m, 1200 m)、侵食域($X=500$ m, 970 m)の断面の海浜縦断面の比較で

ある。南側海岸では、 $X=40$ mの断面では砂が堆積して高さ1mのバームが形成されたのに対し、 $X=500$ mの断面では護岸があるため陸域の侵食は防がれているが、護岸前面の水深が最大-1mと深くなった。これは、侵食された土砂が沿岸方向に流出した結果である。また北側海岸では $X=1200$ mで高さ1mのバームが形成されたのに対し、 $X=970$ mでは汀線上で護岸の露出が予測された。結果として現況よりも波の遮蔽域においてさらに土砂が堆積し、蔽域外では侵食の進行による護岸の露出が予測された。

4. 結 論

Hsuの方式による安定汀線計算において、土砂収支計算の際に護岸背後地が侵食されないようにし、その分の土砂量を堆積域より減じることで、護岸を考慮するモデルを開発した。この方式により、護岸がある場合においても安定海浜形状を直接計算することが可能となった。また、大洗海岸で検証計算を行ったところ、計算結果と実測値の汀線はよい一致を示し、護岸の露出状況も的確に表現できた。さらに、検見川浜の将来予測では海浜中央部の侵食域で護岸の露出が予測された。最も侵食の激しい箇所では水深1mまでの護岸の露出が予測され、護岸倒壊などの災害の危険性があると考えられる。

実務においては、護岸のある海岸での養浜計画における必要養浜量の算定、防波堤延伸計画における護岸のある隣接海岸への影響予測などに本方式が利用できる。

参 考 文 献

- 宇多高明(1997): 日本の海岸侵食—海岸侵食の実態, pp. 75-91.
- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・星上幸良(2001): 千葉県検見川浜の海浜変形と3次元Hsuモデルによる変化予測, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 536-540.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣(1996): 修正Hsuモデルによるヘッドランド周辺の最適安定海浜形状の計算法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 646-650.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣(2000): Hsuモデルの3次元海浜変形予測モデルへの拡張, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 601-605.
- 三村信男・加藤 始・角田義紀・宮本英明・伊佐治進(1991): 大洗における港湾構造物の建設に対する海岸地形の応答, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 401-405.
- Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989): Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intn. Civ. Eng. Part 2, 87, pp. 557-570.