

等深線変化モデルによる波の遮蔽域周辺における 3 次元海浜変形予測

宇 多 高 明* ・ 西 隆一郎**・ 山口慶一郎***
古 池 銅****・ 堀 口 敬 洋*****

等深線変化モデルについて、沖合人工島の建設によって地形変化の生じた鹿児島県柏原海岸での実測海浜変形との比較を行い、その実用性を確認した。等深線変化モデルによる海浜変形予測は、沖合浚渫および人工島建設前の条件を比較の基準として座標系を定め、その座標系に乗る展開座標を考え、沖合浚渫・人工島の有無により生じる碎波波高と碎波波向の差の沿岸方向分布を与えて計算を行った。その結果、周辺海岸の侵食、突堤の効果/影響、水中部を含む舌状砂州の形成、養浜砂採取箇所への土砂落込みなど、3 次元的な海浜変形の特徴が実用上十分の精度で再現され、等深線変化モデルの実用性が実海岸で確認された。

1. ま え が き

各種人工改変時における周辺海岸への影響予測のうち、海浜変形予測は最も重要な要素の一つである。良好な海岸の環境や利用は、海浜が安定的に存在してこそ成立するものであるからである。従来から、3 次元海浜変形予測については種々のモデルが提案されているが、それらの多くは短期予測を目指すもので終局的に安定な海浜の予測はできず、実用性に欠ける。一方、汀線変化モデルは実用的ではあるものの縦断形予測ができない欠点がある。また、汀線変化モデルの発展形である等深線変化モデルでは、3 次元海浜変形予測は可能なものの、実海岸への適用性検討はまだまだ十分ではなかった(宇多, 2004)。

本研究では、等深線変化モデルの実海岸への適用性を検討するため、沖合人工島の建設によって地形変化の生じた鹿児島県柏原海岸での実測海浜変形との比較を通じ、その実用性を確認する。

2. 深 浅 データの分析

(1) 分析方法

柏原海岸では 1984 年から深淺測量が定期的に実施されてきている。これらのうちデータが揃っており、かつ柏原海岸における地形変化に関する代表時期として、1987 年(沖合人工島外郭施設完成直後)、1990 年(侵食対策実施前)、1993 年(侵食対策実施直後)、1997 年(台風 9719 号による大規模な侵食発生直後)、2002 年(最新)のデータを抽出し、これらのデータの分析を通じて海浜変形特性を明らかにする。

(2) 等深線図の比較

図-1 には柏原海岸における 2002 年の深淺測量結果とともに、深淺測量の測線配置を示す。測線は波見港の北側に No. 7 があり、そこより北向きに 200 m 間隔で配置されている。深淺データの数値化に際しては、各測線ごとに基準点から 1 m 間隔で並んだ等深線までの沖向き距離を測り、それらの平面分布図を描いた。柏原海岸では 1993 年に防砂突堤の建設と侵食区域への養浜が行われた。このため 1992 年以前の深淺データは沖合人工島の影響評価に、また 1993 年以降の深淺データは、対策としての防砂突堤の建設と養浜の効果の評価に用いることができる。

図-2, 3 は 1987 年と 1990 年の等深線の平面分布図である。沖合人工島の建設は 1985 年から始まり、1987 年には外郭施設が完成している。図-2 の 1987 年の等深線分布図には既に沖合人工島建設の影響が含まれている。No. 14 付近の汀線近傍では規模の大きな舌状砂州が発達しているが、これは沖合人工島の建設による波の遮蔽域形成に伴うものであり、No. 14 をピークとする舌状砂州の形成に必要な土砂は、No. 15~20 区間の汀線近傍から運び込まれたことが凹状となった等深線の形状から読み取れる。また No. 14 付近では、汀線だけではなく -5 m 付近の等深線にも大きな膨らみが形成されており、とくに -2~-5 m の等深線の南側斜面は非常に急勾配となっている。これはそこで土砂の落込みがあったこ

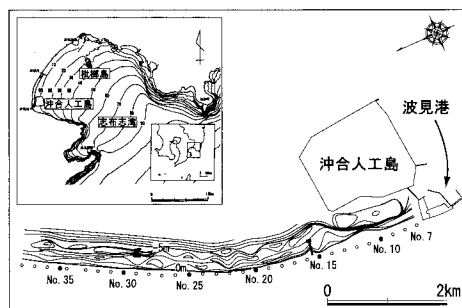


図-1 調査位置

* 正会員 工 博 (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長

** 正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
前 鹿児島県土木部河川課防災海岸係長
海岸研究室(有)
(株)アイ・エヌ・エー 海岸部

とを示している。

図-3に示す1990年では、-5mの等深線がNo. 14付近において1987年時点と比較して50mも前進している。同時に-5mの等深線と併せて-3~-6mの等深線にも大きな突出が認められる。さらに汀線は1987年にはNo. 14にピークを持つ舌状砂州であったが、1990年には500m南側のNo. 12にピーク位置がずれるとともに、汀線変化の絶対値も約50m増大している。ピーク位置がずれた理由としては、沖合人工島背後の静穏域の規模が大きいため波の回折効果が顕著に現れ、入射波が汀線近傍へと伝わる間、沖合人工島背後へとより深く入りこんだためである。

これらの堆積と全く対照的に、No. 18~No. 25付近では汀線付近の等深線にとどまらず沖合の等深線全てを含んで等深線の大きな後退が生じた。また最も著しい汀線後退が生じたのはNo. 20付近であった。これより沖合人工島背後の堆砂は、No. 18~No. 25区間で広範に侵食された土砂が運ばれ、堆積したものであることが分かる。

1993年には、沖合人工島建設に伴う海浜変形を軽減するために、沖合人工島による波の遮蔽域とその外側との境界付近に堤長が230m、先端水深が約2.5mのT字形の防砂突堤が建設され、同時に沖合人工島背後の堆積土砂を浚渫して得られた土砂115万 m^3 を用いた養浜が行われた。養浜の実施区域は防砂突堤の北側区域である。

図-4は、比較の基準となる1993年の等深線図である。No. 15の北側に伸びるのが不透過型の防砂突堤である。防砂突堤南側のNo. 8~No. 13の-3m以深にある

窪みは養浜砂採取箇所である。また1990年の等深線図(図-3)と比較すれば分かるように、1990年までに著しく侵食が進んだNo. 18~No. 25付近における-1~-4mの等深線が前進したのはそこで養浜が行われたことに起因する。この図と、図-5に示す1997年の等深線図を比較すると、1997年では防砂突堤の南側のNo. 15において-3m以深の等深線が沖向きに突出した。これは防砂突堤の先端水深が約2.5mであったために、その先端部を沿岸漂砂が通過し、防砂突堤を超えて南側で砂が堆積したことによる。また1993年に養浜砂の採取を行った箇所のうち北側側面(No. 13)でも埋め戻しが進んだ。しかし穴の南部は養浜砂採取時の形状がほぼそのままの形態で残されている。防砂突堤の南側隣接部の汀線付近では、突堤の基部では汀線がやや後退したが、No. 11付近を中心とした舌状砂州の形成が著しくなった。これは防砂突堤の先端部から波が斜め入射したためである。

一方、防砂突堤の北側区域ではNo. 18~No. 25区間で

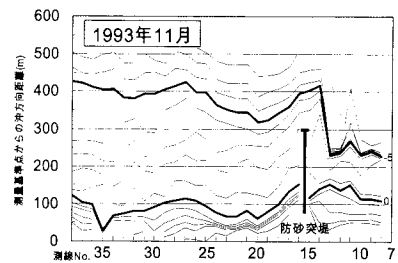


図-4 1993年11月の等深線平面分布図

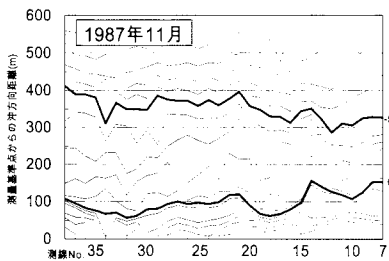


図-2 1987年11月の等深線平面分布図

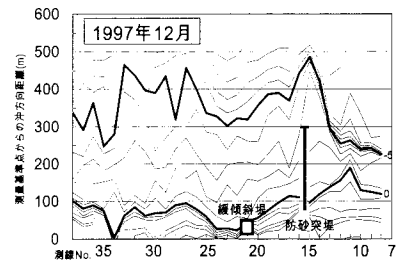


図-5 1997年12月の等深線平面分布図

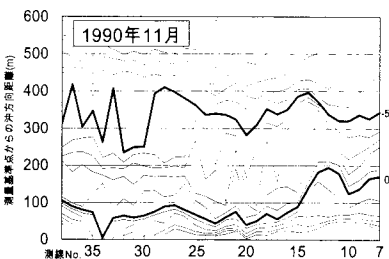


図-3 1990年11月の等深線平面分布図

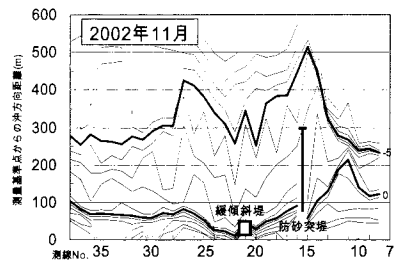


図-6 2002年11月の等深線平面分布図

等深線の後退が進んだ。この結果この区間では後浜（砂丘地）の一部までが侵食された。図中の黒い長方形は緩傾斜堤の設置区域であるが、この護岸が直接波に晒される条件となった。侵食土砂の大部分は、防砂突堤の先端を通過して3 m 以深の舌状の突出部に落ち込んだと推定される。

図-6には2002年の等深線図を示す。1997年と比較すると、No. 15を中心とする突出部の発達は続いているものの変化は小さくなった。このことはNo. 15付近の突出部の形成はほぼ安定状態に近づいたことを意味する。一方、汀線近傍ではNo. 11付近を中心として舌状砂州の発達が続いている。これと対照的に防砂突堤の付け根では汀線が後退している。したがってNo. 11付近での舌状砂州の形成に預かった土砂の一部は、防砂突堤の南側付け根付近から供給されている。しかしこの図のみからは防砂突堤を回り込んだ砂が舌状砂州形成に寄与したかどうかは判断できない。

(3) 測線 No. 12 における海浜縦断形の比較

突堤の南700 mに位置し、沖合人工島背後で舌状砂州が著しく発達した測線 No. 12 における海浜縦断形の変化を図-7, 8に示す。図-7は侵食対策の実施前の変化として1987~1990年の縦断形変化を、また図-8は侵食対策後の変化として1993~2002年の縦断形変化を示す。

図-7に示す侵食対策前の変化では、約1.5 m から-6.5 m までの範囲で集中的な堆積が生じている。注目されるのは前浜勾配が約1/17で-1.7 m まで落ち込んだ後、-1.7 m には幅約70 mの平坦面が形成され、その先で再び落ち込んでいることである。1987年と1990年の前浜勾配はそれぞれ1/9, 1/14, 沖浜勾配は1/17, 1/14であり、勾配がほぼ一定値を保ちつつ海浜断面が前進している。また汀線の68 mの前進と、沖浜の勾配変化点までの沖向き距離の前進量70 mはほぼ一致し、岸沖断面が平行移動したことを示す。さらに、この断面では侵食箇所は全く見られず、堆積のみ生じていることから、測線 No. 12 には沿岸漂砂によって運ばれてきた土砂が堆積したことが分かる。

図-8に示す侵食対策後の変化では、まず侵食対策の一環としての養浜土砂の確保のために沖合部で1993年までに-10 m まで浚渫されて沖合部が平坦になっていることである。1993年の養浜砂採取箇所の最急勾配は約1/3であった。こうした状況で防砂突堤の建設と養浜が行われたために、防砂突堤の北側での養浜土砂が防砂突堤先端を回り込んで南側へと移動し、養浜砂採取箇所を埋める現象が生じた。1993~1997年では汀線付近で堆積が起これると同時に、養浜砂採取箇所の急勾配を埋めるようにして海底面まで土砂が落ち込んでいる。このような土砂の落ち込みは2002年まで継続しており、-2 m 以深

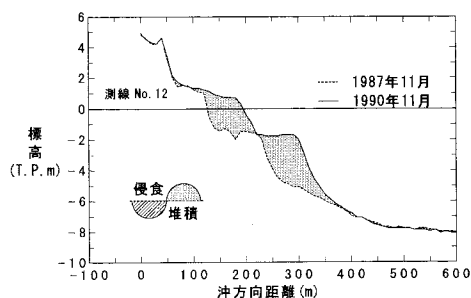


図-7 No. 12 の海浜断面変化 (1987-1990 年, 侵食対策実施前)

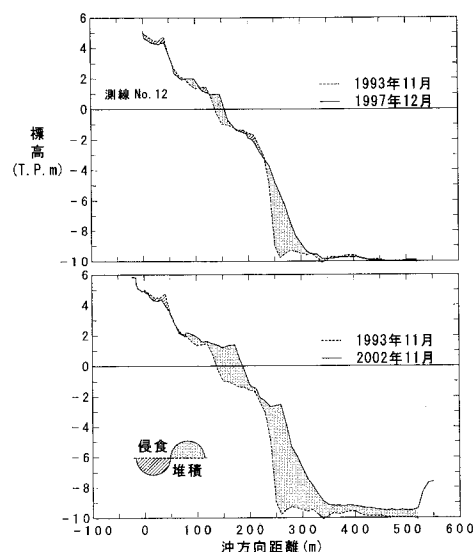


図-8 No. 12 の海浜断面変化 (1993-2002 年, 侵食対策実施後)

へと土砂が落ち込んでいる。養浜砂採取箇所の側面では2002年の-2.6 m から底面付近の-9.2 m までの平均勾配を求めると1/15となる。同じ水深領域において1997年の縦断形から同様に縦断勾配を求めると1/14となっており、両者はほぼ一致する。このことは、養浜砂採取箇所へ土砂が落ち込んで埋め戻しが起こる場合、その海底勾配がほぼ一定値を保ちつつ海浜縦断形が前進していくことが分かる。

3. 等深線変化モデルによる海浜変形予測

(1) 波浪場の計算

等深線変化モデルによる海浜変形予測は、まず波浪場を磯部 (1986) による放物型モデルを用いて計算した。柏原海岸への入射波浪は時間的に変動しているが、海浜変形は年数回程度の発生確率を有する高波浪時に著しい変形が起こることを考慮し、ここでは沖波として $H_0=5$

m, $T=12$ s の波浪を卓越方向である SE 方向から入射させた。沖合浚渫・人工島が存在しなかった時期の 1982 年と、沖合浚渫・人工島建設後の 2000 年の深浅図を用いて波浪場の計算を行い両者の比較を行った。

波浪場の計算により、柏原海岸全体の任意地点の波高・波向分布が得られる。一方等深線変化モデルでは、砕波点における波高・波向の沿岸方向分布が必要となる。このため砕波波高は波による地形変化の限界水深 ($h_c=9$ m) 付近の換算沖波波高 $H_0=K_r K_d$ (屈折・回折係数) $\times H_0$ で与えた。計算結果をもとに砕波波高と波向分布の沿岸分布を求めたのが図-9, 10 である。図には沖合浚渫・人工島の両者がある場合と、個々の施設のみがある場合についての計算結果も示し、それぞれが波高分布に及ぼす影響の評価も同時に行った。沖合浚渫・人工島ありの場合、沖合人工島背後で急激な波高低下が起こるが、緩傾斜堤の左 (北) 側では沖合浚渫に起因して波高が局所的に増大している。なお計算の都合上、沖合人工島背後の静穏域における限界波高は 0.5 m とした。

波向分布では、無施設であった 1982 年の深浅図での計算結果から得られた砕波波向に対し、図-9 と同じケースについて波向角の変化量を求め、沿岸方向分布として整理した。突堤周辺では、沖合人工島による回折の影響により、沖合人工島背後へ向うにつれて波向が反時計回りに変化している。また、緩傾斜堤の左 (北) 側では沖合浚渫による波の屈折により波向の局所の変化も生じている。なお、海浜変形の計算においては、沖合人工島直背後の静穏域での波向角の変化量は反時計回りに 45° の一定値を与えた。

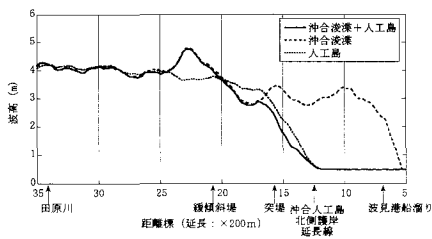


図-9 砕波波高の沿岸分布

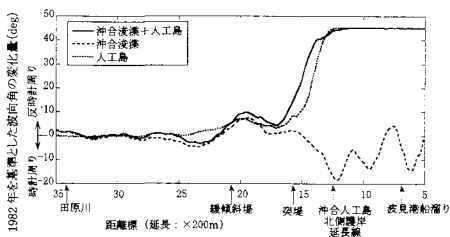


図-10 砕波波向角の変化量の沿岸分布

(2) 等深線変化モデル

一般に汀線 (等深線) 変化モデルでは実地形をそのまま与えて予測計算を行う手法と、初期汀線に沿って座標系を設け、それを展開した座標系で計算を行う手法とがある (宇多ら, 1998)。いずれの方法もほぼ同様な結果を得ることができる。ここでは沖合浚渫・人工島の有無の影響を調べることに主眼があるので、1982 年の沖合浚渫・人工島が存在しない条件を比較の基準として汀線に沿った座標系を定め、その座標系に乗る展開座標を考え、沖合浚渫・人工島の有無で変化の生じた砕波波高と砕波波向の差の沿岸方向分布を与えて計算を行った。具体的には汀線に沿って引き伸ばした直角座標を考え、そこに一定勾配 (1/50) の海浜縦断面形を考えて海浜変形予測を行った。人工構造物建設前の等深線はそれなりに安定状態に近くになっているが、この当初段階の地形の数値モデルによる再現性が悪いことによる誤差の混入を避ける意味で、このような展開座標を用いた計算は有効である。

まず 1993 年までの変化の再現を行った。数値計算にはスタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いた。さらに沖合人工島背後の h_c (波による地形変化の限界水深), h_R (バーム高) の計算には波高の低減率 (屈折・回折係数) に比例させて低減した。浜崖の形成や波による地形変化の限界水深に深への重力による土砂の落ち込みの処理法、および構造物周辺の境界処理法は芹沢ら (2002) に従った。

沖合人工島の外郭施設が概成した 1987 年から、防砂突堤の建設や養浜が行われた 1993 年までの実測等深線変

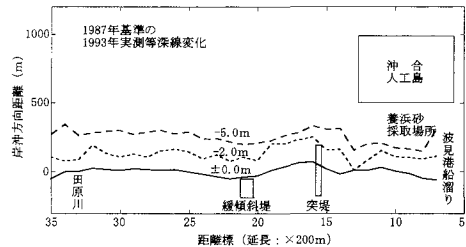


図-11 沖合人工島の建設後～防砂突堤建設までの実測等深線変化

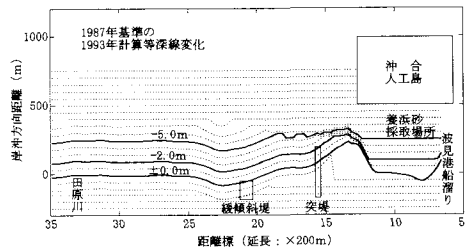


図-12 沖合人工島の建設後～防砂突堤建設までの等深線変化の計算結果

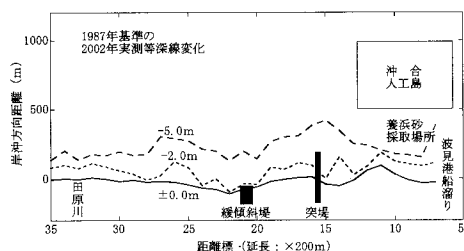


図-13 防砂突堤の建設から現在までの実測の等深線変化

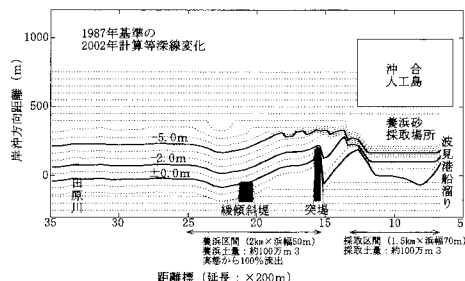


図-14 防砂突堤の建設から現在までの等深線変化の計算結果

化を図-11に示す。その再現計算の結果を図-12に示す。

計算結果は実測の地形変化の特徴をほぼ再現できている。沖合人工島背後の波の遮蔽域では+1m～+5mの等深線が急激に進進し、急勾配の海底面が形成され、規模の大きな舌状砂州の形成も進んでいる。これと対照的に緩傾斜堤の北側では、沖合部を含めて等深線が後退し、凹状の海底形状が形成されたことが分かる。

次に、防砂突堤の建設と養浜が行われた1993年から2002年までの地形変化の再現計算を行った。図-13に実測の等深線変化を示す。再現計算の結果を図-14に示す。計算結果によれば、緩傾斜堤両側での侵食、およびその沖での大規模な凹状地形の形成など数値計算により再現されている。同時に、この侵食域から削り取られた土砂が南向きの沿岸漂砂によって沖合人工島背後へと運

ばれ、急勾配の海底斜面を形成しつつ舌状砂州を形成したことが分かる。また防砂突堤の建設により、その南側隣接域では-2mまでの等深線が後退している。このような特徴はすでに深浅測量データから明らかになっている点であり、等深線変化モデルにより基本現象の再現がうまくできていることがわかる。なお、計算期間に対応する地形測量データにおいて、土砂収支に減少が認められたため、計算においてもこの土砂の減少分を考慮した。

4. 結 論

柏原海岸の海浜変形の実態と原因について以下のことが分かった。

- 深浅測量データの分析より、汀線付近の凹状地形の形成は局所的なものではなく、沖合部も含む大規模な凹状地形の形成と関係していることが明らかとなった。
- 等深線変化モデルによる数値シミュレーションによれば、緩傾斜堤周辺の浜崖侵食は、防砂突堤を超えて南側の人工島背後へ向かう沿岸漂砂の流出、および沖合浅瀬による波の屈折変形に伴う沿岸漂砂の変化に起因することが明らかとなった。
- 柏原海岸への適用を通じて、この種の問題に対する等深線変化モデルの実用的意味からの適用性が確認された。

参 考 文 献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
- 宇多高明 (2004): 海岸侵食の実態と解決策, 山海堂, 304 p.
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次 (1998): 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 541-545.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002): 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.
- 西隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・脇田政一・大谷靖郎・堀口敬洋 (1998): 沖合人工島建設に伴う海浜変形過程と侵食対策, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 561-565.