

前浜養浜時の浜崖形成のモデル化

A MODEL FOR PREDICTING SCARP FORMATION IN FORESHORE NOURISHMENT

芹沢真澄¹・宇多高明²・星上幸良³

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA and Yuki Yoshi HOSHIGAMI

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)

² 正会員 工博(財) 土木研究センター 理事 なぎさ総合研究室長 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

³ 正会員 国際航業(株) 河川砂防・海岸部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘3-6-1)

Analytical and numerical models for predicting beach changes in the foreshore nourishment were developed. In the foreshore nourishment, high beach scarp is formed due to wave action and it is very dangerous for recreational usage of the beach and spoils scenic beauty of the shoreline. The contour line change model was applied for predicting three dimensional beach changes. It is shown that the larger the supplied sand volume to the sea, the higher the scarp height.

Key Words : Foreshore nourishment, scarp, contour line change model, equilibrium slope

1. まえがき

新海岸法においては、砂浜の有する海岸保全効果が従来よりも明確に打ち出された。この結果、各地の海岸では海浜維持のためのサンドバイパスやサンドリサイクルなどの養浜工が広範に行われる機運にある。このような場合、一般には前浜・後浜でただ単に養浜すればよいと考えがちであるが、実際には、前浜で盛土養浜を行ったとしても十分な量の砂を海域へ供給できないこともあり、前浜に大量の養浜砂が残されて飛砂の原因となり、あるいは盛土の海側のり面に急な浜崖が形成されて盛土上からの転落の危険性や盛土基部での土砂崩れによる生き埋め事故の危険性が高まることなどが危惧される。例えば、千葉県一宮海岸で行われている前浜養浜では、写真-1の状況が観察された。養浜盛土の基部に高さ約3mの浜崖が形成されていたのである。斜面勾配は非常に急で、斜面の放置は危険と見られた。この他、皆生海岸、富士海岸、清水海岸の現地踏査でも同様な事例が見られた。

このことから、養浜ではただ単に前浜・後浜に盛土すればよいのではなく、前浜養浜の効果やその影響について十分検討することが必要であるが、従来このような研究は少ない。宇多ら¹⁾は、西湘海岸において前浜盛土方式の養浜実験を行うとともに、沿岸漂砂の卓越する海岸において波による粒径の淘汰作用も考慮した海浜変形を等深線変化モデルにより予測した。しかし、この当時の等深線変化モデルでは、芹沢ら²⁾のように海浜縦断形



写真-1 養浜盛土の基部に形成された浜崖

の安定化機構が考慮されていなかったために、岸沖方向漂砂に起因する地形変化の再現はできていない。本研究では、養浜土砂の粒度構成が対象海岸と同じ場合を対象として、局所勾配が平衡勾配で安定すること、土砂収支が成立することを仮定して、養浜量に対する浜崖規模の予測式を導く。また様々な粒径からなる場合について等深線変化モデルによる予測法を示す。

2. 前浜養浜時における浜崖形成の基本メカニズム

前浜・後浜上において盛土養浜後に波が作用すると、盛土前縁部が削り取られて浜崖が形成される。この時、入射波はバーム高 h_R まで遡上するので、 h_R より標高の低い場所に落ち込んだ砂は波の作用によって沖向き・沿岸方向に運び去られる。養浜土砂の粒度構成が対象海岸と

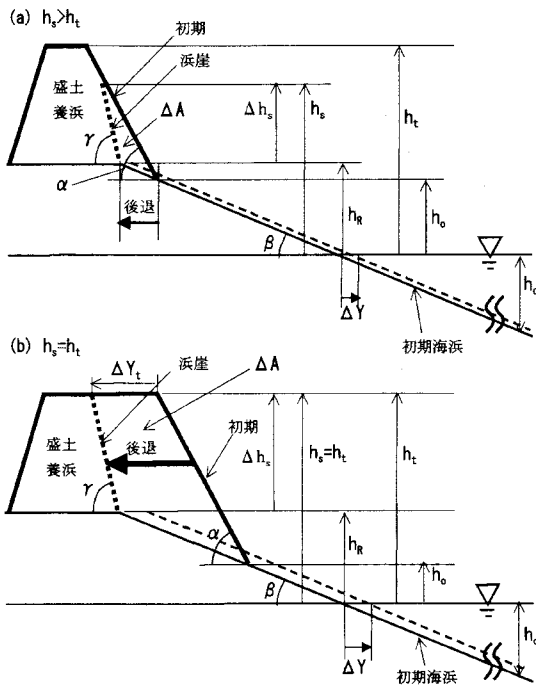


図-1 前浜養浜時の浜崖形成の模式図

同じであるとすれば、削られた土砂は地形変化の限界水深 h_c から、バーム高 h_R の範囲にとどまり、海浜はもとの縦断形を保ちつつ前進し、波の作用範囲にある等深線（汀線を含む）と等高線は一律に前進する。逆に、養浜砂の粒度構成が対象海岸のそれより小さければ、熊田らの粒径に応じた平衡勾配の概念⁴⁾より、全ての土砂は冲向きに流出することになる。

盛土からの供給土砂が海浜に一樣に堆積する条件下での汀線前進量は、岸沖方向の一次元問題であれば養浜部における侵食断面積 ΔA と堆積断面積が等しいことから算出できる。実際には、養浜区間は沿岸方向に有限長なことが多いが、その場合は両端を突堤で区切られた海岸線長 L_1 のポケットビーチで、養浜区間長 L_2 の盛土養浜を行ったと考えて定式化する。このときは冲向きの土砂流出だけではなく、沿岸漂砂による土砂流出も生じる。

3. 定式化

単純化された海岸条件として、養浜砂の粒度構成が対象海岸と同じ場合を対象として一樣勾配海浜への養浜を設定して定式化を進める。図-1(a)に示すように、バーム高を h_R 、前浜勾配を $\tan\beta$ とする。盛土養浜は、その表のり面が前浜上に来るようにしつつ台形状に行うこととし、盛土の天端高 h_t を一定に保つ。平均海面を基準に取ったとき、盛土ののり先地盤高を h_o 、表のり面勾配を $\tan\alpha$ とする。養浜砂が削り取られる場合には浜崖が形成されるが、浜崖の勾配は一般に盛土時の表のり面勾配 $\tan\alpha$ より大きくなる。そこでこの勾配を $\tan\gamma$ とする。土砂流出が縦断的变化ではなく、3次元の変形となる場合には、突堤やヘッドランド間で土砂が拡散する区間の延長

を L_1 、盛土区間長を L_2 とする。

以上のパラメータを設定したとき、浜崖の高さ h_s 、浜崖の比高 $\Delta h_s (= h_s - h_R)$ 、侵食断面積 ΔA 、海岸線全体の汀線前進量 ΔY は、幾何学的考察より次式で与えられる。なお、浜崖が盛土の表のり面内に留まる場合 ($h_s < h_t$: 図-1(a)) と、浜崖頂部が盛土天端にまで到達する場合 ($h_s = h_t$: 図-1(b)) それぞれについて定式化できる。

(1) 浜崖頂部が盛土の表のり面内に留まる場合 ($h_s < h_t$)

図-1(a)に破線で示すように三角形に浜崖侵食が進み、侵食土砂は沖合の広い区域へと運ばれ、海浜縦断形が平行移動しつつ前進する。この場合の各変数は次式で表される。

$$h_s = h_R + (h_R - h_o) \cdot \frac{\cot\beta - \cot\alpha}{\cot\alpha - \cot\gamma} \quad \text{.....(1)}$$

$$\Delta h_s = (h_R - h_o) \cdot \frac{\cot\beta - \cot\alpha}{\cot\alpha - \cot\gamma} \quad \text{.....(2)}$$

$$\Delta A = \frac{1}{2} (h_R - h_o)^2 \cdot \frac{(\cot\beta - \cot\gamma)(\cot\beta - \cot\alpha)}{(\cot\alpha - \cot\gamma)} \quad \text{.....(3)}$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \frac{\Delta A}{(h_c + h_R)} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \cdot \frac{(h_R - h_o)^2}{(h_c + h_R)} \cdot \frac{(\cot\beta - \cot\gamma)(\cot\beta - \cot\alpha)}{(\cot\alpha - \cot\gamma)} \end{aligned} \quad \text{.....(4)}$$

(2) 浜崖頂部が盛土天端にまで到達する場合 ($h_s = h_t$)

図-1(b)に示すように浜崖の形成が盛土の天端にまで進み、結果的に台形状の侵食域が形成される。この場合の各変数は次式で表される。

$$h_s = h_t \quad \text{.....(5)}$$

$$\Delta h_s = h_t - h_R \quad \text{.....(6)}$$

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{1}{2} (h_R - h_o) (2h_t - h_o - h_R) \cdot (\cot\beta - \cot\alpha) \\ &\quad - \frac{1}{2} (h_t - h_R)^2 (\cot\alpha - \cot\gamma) \quad \text{.....(7)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \frac{\Delta A}{(h_c + h_R)} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \left[\frac{(h_R - h_o)}{(h_c + h_R)} (2h_t - h_o - h_R) \cdot (\cot\beta - \cot\alpha) \right. \\ &\quad \left. - \frac{(h_t - h_R)^2}{(h_c + h_R)} (\cot\alpha - \cot\gamma) \right] \end{aligned} \quad \text{.....(8)}$$

さらに盛土天端ののり肩の後退量 ΔY_t は式(9)で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta Y_t &= (h_R - h_o) \cdot (\cot\beta - \cot\alpha) \\ &\quad - (h_t - h_R) \cdot (\cot\alpha - \cot\gamma) \quad \text{.....(9)} \end{aligned}$$

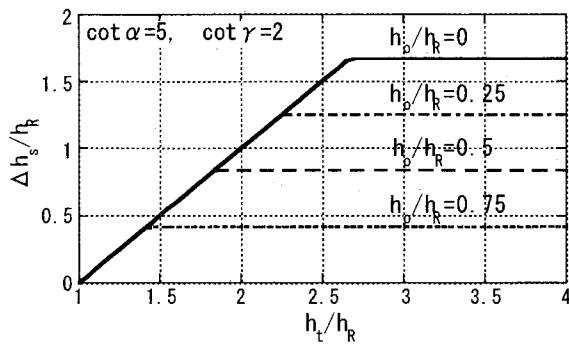


図-2 相対浜崖高 ($\Delta h_s/h_R$) と盛土の相対天端高 (h_t/h_R) の関係

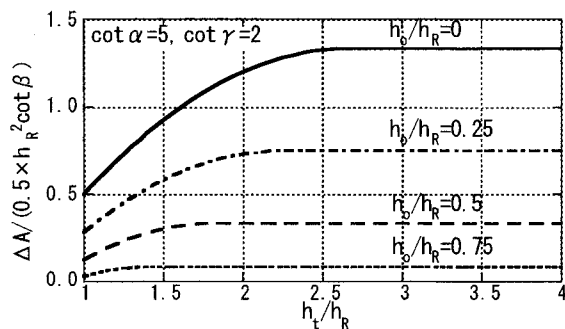


図-3 相対侵食断面積 ($\Delta A/0.5h_R^2 \cot \beta$) と盛土の相対天端高 (h_t/h_R) の関係

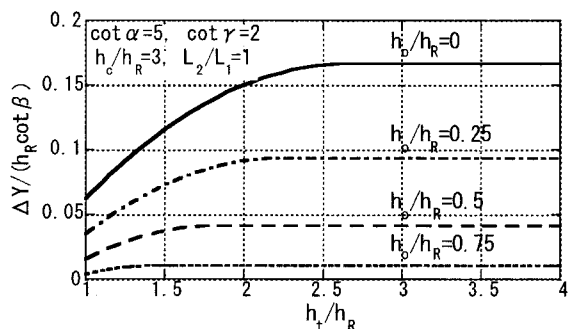


図-4 相対汀線前進量 ($\Delta Y/h_R \cot \beta$) と盛土の相対天端高 (h_t/h_R) の関係

4. 具体的計算例

4.1 前浜勾配, 盛土の表のり勾配および浜崖の勾配を一定とした場合

具体例として $\tan \beta = 1/10$, $\tan \alpha = 1/5$, $\tan \gamma = 1/2$ と仮定する。また結果の表示においては、一般性を高めるために浜崖高 h_s は h_R で、侵食断面積 ΔA は養浜前の前浜断面積 ($0.5h_R^2 \cot \beta$) で、そして汀線前進量 ΔY は養浜前の前浜幅 ($h_R \cot \beta$) で割って無次元化した。 Δh_s , ΔA , ΔY と h_t/h_R の関係を図-2, 3, 4 に示す。なお、図-4 では上述の定数値に加えて $h_c/h_R = 3$, $L_2/L_1 = 1$ と仮定している。

この条件では、図-2 のように相対浜崖高は盛土の相対天端高が高くなるに従い増大し、また盛土ののり先が汀

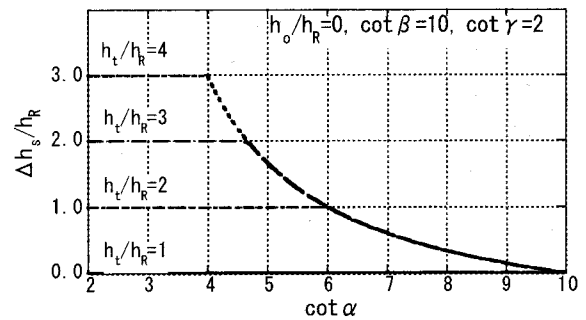


図-5 相対浜崖高 ($\Delta h_s/h_R$) と盛土ののり面勾配の関係

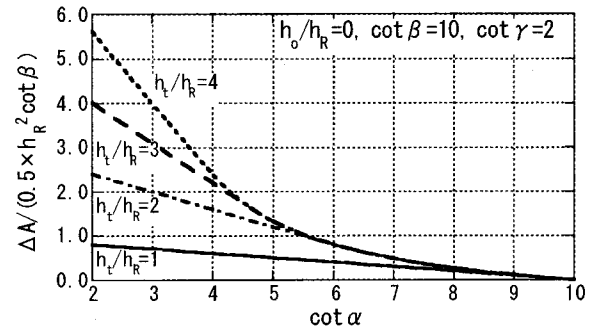


図-6 相対侵食断面積 ($\Delta A/0.5h_R^2 \cot \beta$) と盛土ののり面勾配の関係

線に近づくほど (h_o/h_R : 小) 浜崖高は高まる。そして浜崖の後退が著しくなると相対浜崖高は一定のまま侵食が続く。

図-3 に示す相対侵食断面積は、天端高 h_t に対し非線形的な変化となる。盛土ののり先が汀線に近づくほど (h_o/h_R : 小) 侵食断面積は増大する。逆に盛土がバーム頂に近い部分 ($h_o/h_R = 0.75$) で行われた場合、侵食断面積は急激に小さくなる。侵食断面積は、沿岸方向の単位長さ当たりの可能養浜土砂量に等しいので、海域に十分な砂を供給するには、盛土ののり先をできるだけ汀線に近づけなければならないことになる。

図-4 に示す、前浜幅で無次元化した汀線前進量は、盛土ののり先が汀線にまで到達する場合で 0.17 であり、のり先が汀線から陸側に離れるに従い汀線前進量は急激に小さくなる。この場合も盛土の天端高との関係で言えば非線形的変化であり、盛土の相対天端高を高めても汀線前進量は頭打ちとなる。

4.2 盛土ののり先を汀線位置に保ったままのり面勾配を変化させた場合

養浜効果が最も期待される条件、すなわち盛土ののり先を汀線位置 ($h_o = 0$) とした場合について、前浜勾配 $\tan \beta$ を $1/10$ 、浜崖勾配 $\tan \gamma$ を $1/2$ として計算を行った。まず、図-5 に示すように、相対浜崖高は前浜勾配が大きくなると急激に増大するが、バーム高で無次元化した盛土の相対天端高によって上限が定められる。

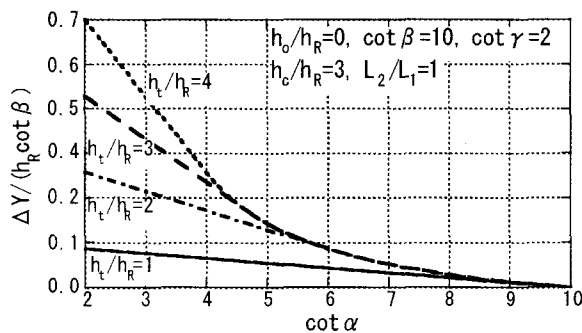


図-7 相対汀線前進量 ($\Delta Y/h_R \cot \beta$) と盛土のり面勾配の関係

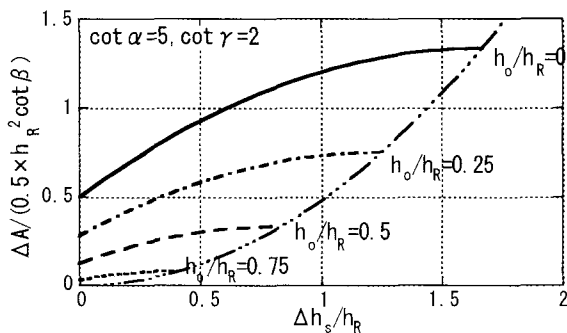


図-8 h_o/h_R をパラメータとした相対侵食断面積 ($\Delta A/0.5 h_R^2 \cot \beta$) と相対浜崖高 ($\Delta h_s/h_R$) の関係

盛土の相対天端高をパラメータとした相対侵食断面積と盛土のり面勾配の関係は図-6 のようである。相対侵食断面積は盛土のり面勾配が大きくなると増加し、盛土天端高の増大 (h_t/h_R : 大) とともにその変化がきつくなる。

図-7 は盛土の相対天端高をパラメータとした汀線前進量と盛土のり面勾配の関係であるが、汀線前進量を大きくするには、盛土の相対天端高を著しく高める必要が出てくる。しかし一方で、これは図-5 に示したように浜崖高を大きくし、相互にトレードオフの関係にある。

4.3 浜崖高を低く保ちつつ海域への供給土砂量を増やす方法

一般に、養浜に際しては後浜に残される土砂量を最小とし、より多くの土砂を海域へ供給する必要があるが、全く同時に、海浜利用の面から見れば浜崖の高さが異常に高まった結果としての、浜崖上部からの転落や崩落土砂による浜崖基部での生き埋め事故の防止についての配慮も必要である。図-2, 3 では、横軸はともに h_t/h_R と共通であるから、ある h_t/h_R ごとに Δh_s と ΔA の関係が定まる。図-8 は $\tan \beta = 1/10$, $\tan \alpha = 1/5$, $\tan \gamma = 1/2$ の条件下での、 h_o/h_R をパラメータとした Δh_s と ΔA の関係である。さらに、図-5, 6 においても横軸は $\cot \alpha$ が共通なので、 Δh_s と ΔA の関係が定められる。図-9 は $h_o/h_R = 0$, $\tan \beta = 1/10$, $\tan \gamma = 1/2$ の条件下で計算した、 $\cot \alpha$ をパラメータとした Δh_s と ΔA の関係である。図-8, 9 の各曲線は $\Delta h_s/h_R$ につい

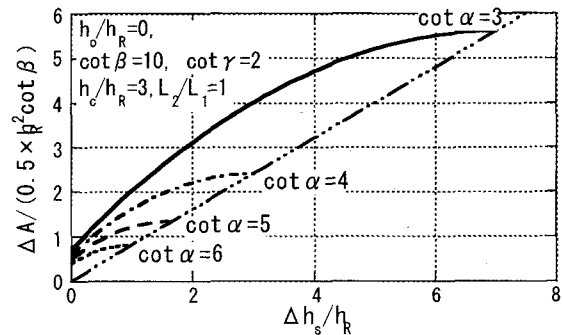


図-9 盛土のり面勾配をパラメータとした相対侵食断面積 ($\Delta A/0.5 h_R^2 \cot \beta$) と相対浜崖高 ($\Delta h_s/h_R$) の関係

て上限を有する。破線はそれらの包絡線であるが、この線は盛土の天端高を変化させたときの相対浜崖高の上限値を与える。

図-8 によれば、盛土のり先標高が低い (h_o/h_R が小さい) ほど、侵食断面積 (単位長さ当たりの漂砂供給量) は増大するが、同時に浜崖の相対高さも増大している。すなわち、海域への土砂供給量を大きくすると、同時に相対浜崖高も必ず増大することになる。

一方、図-9 では盛土のり面勾配が大きければ海域への供給砂量も大きくすることができ、り面勾配の減少とともに供給可能砂量も急速に減少することも分かる。

一般に外海・外洋に面した多くの海岸のバーム高は 2m 程度であり、また浜崖高の上限を例えば 2m と考えて図-8 で $\Delta h_s/h_R = 1$ とおくと、盛土のり先をよほど汀線に近づけない限り十分な量の砂を海域に供給できなくなることが分かる。

5. 等深線変化モデルによる検討

5.1 計算条件

計算には、海浜縦断形の安定化機構と沿岸漂砂に起因する海浜変形予測が可能なモデル²⁾を用いた。延長 400m のポケットビーチにおいて、全海岸線の 1/2 区間で養浜を行う場合を想定した。初期海底勾配は $\tan \beta = 1/10$ とし、前浜養浜において最も多くの土砂を海域に供給可能な条件である、盛土のり先が汀線位置となる場合を考え、盛土の天端高を 5.5m、前浜勾配を 1/5、浜崖の勾配を $\tan \gamma = 1/2$ と仮定した。また養浜砂の平衡勾配は 1/10 を基本とし、また養浜砂の粒径が対象海岸の粒径よりも細かい場合には、対象海岸の平衡勾配 1/10 に対して、養浜砂の平衡勾配を 1/30 とした。

予測計算には粒径分級を考慮したモデルではなく、対象海岸を平衡勾配 1/10 の固定床でできた海岸と考え、そこに平衡勾配の異なる粒径をもつ砂を盛土してその変形を予測するという手法を用いた。固定床の扱いは、芹

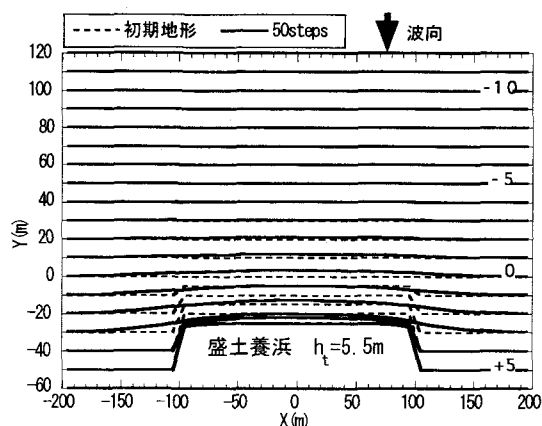


図-10 初期形状と50ステップ後の等深線形状

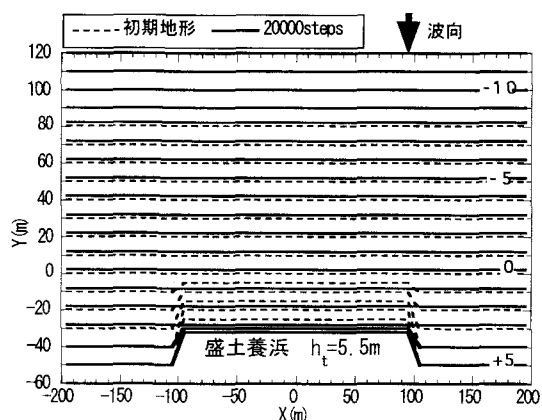


図-11 20,000ステップ後の等深線形状

沢ら²⁾が緩傾斜護岸の計算に使用した護岸の境界処理法を用い、養浜前の海岸を勾配1/10の緩傾斜護岸とみなして等深線が後退して固定床に接すると漂砂量が0になるように低減率を乗じて漂砂量を低減させた。

作用波浪は、時化時の波浪として碎波波高が3mを想定し、波は直角入射させた。地形変化の範囲は、波による地形変化の限界水深 $h_c=9m$ からバーム高 $h_R=3m$ までとした。沿岸・岸沖漂砂の水深方向分布については宇多・河野の3次式を用いた。また沿岸漂砂量係数は $K_x=0.2$ 、岸沖漂砂量係数は $K_z=0.2K_x$ とした²⁾。陸上および海中において安息角をなして土砂が落ち込む場合の限界勾配は、陸上にあつては1/2、海中にあつては1/3とした。計算対象範囲は陸上の+10mから海面下の-15mまでとした。計算メッシュは沿岸方向が $\Delta x=10m$ 、鉛直方向が $\Delta z=1m$ である。また計算時間間隔は $\Delta t=0.1hr$ とし20,000ステップまで計算した。境界条件として境界壁では漂砂の出入りを0とした。

5.2 予測計算の結果

盛土養浜において等高線が台形状に突出した形状に対し波を作用させてから50ステップ後の等深線形状を初期形状とともに図-10に示す。盛土養浜部分が波の作

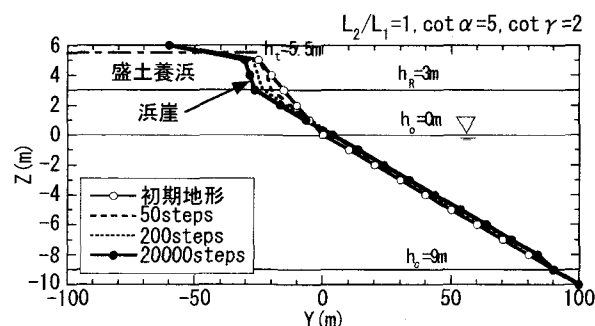


図-12 X=5m断面における海浜縦断形の変化

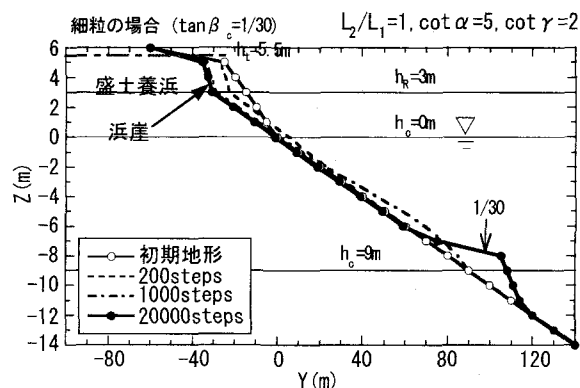


図-13 細粒土砂を用いた一様養浜後の縦断形変化

用で削られて浜崖が形成され、侵食土砂は沿岸方向および沖向きに運ばれた。盛土部分の侵食はその端部で著しい。20,000ステップ後では図-11のように波の作用を受ける範囲での浜崖形成が進み、浜崖侵食がそれ以上進まなくなった。盛土養浜のほぼ中央に位置するX=5m断面において海浜縦断形の変化を調べたのが図-12である。X=5m断面では経時的に浜崖侵食が進み、沖合では緩やかな土砂堆積が進む。侵食面積は堆積断面積より大きい、これは土砂が沖向きだけではなく、沿岸方向にも運ばれたためである。

一般に海浜材料の粒径が小さくなると平衡勾配も小さくなる。そこで現況の海浜材料より小さな粒径を用いて養浜を行った場合の例として、平衡勾配が1/30とした場合の計算結果を図-13に示す。養浜土砂は沖向きに運ばれ、波による地形変化の限界水深付近に堆積した。この場合、少なくとも汀線付近で見える限り養浜効果はないことが分かる。

6. 考察

養浜砂の侵食量と浜崖比高の算定式の検討は、盛土部から海へと運び込まれた土砂が波による砂移動の起こる範囲全体に広がるという考えに基づいている。侵食と堆積は独立した現象として検討している。しかし、厳密には海へ流出した土砂が堆積して汀線が前進する際には、図-1の破線に示すようにバームも同時に前進するの

で、この効果を見込むと盛土の侵食量は式(3), (7)で与えられる値より小さくなり、それに応じて汀線前進量も式(4), (8)による算定結果より小さくなる。この効果を見込むには、宇多・芹沢³⁾と同様、新たなバーム位置に応じて侵食断面積を求め、それからさらに汀線前進量およびバーム位置の計算を繰り返し、それらの収束計算を行う必要がある。ただし、このような海浜過程には不明な要素があること、浜崖形成が非可逆的变化である点を考え、ここでは危険側の解を与えることとした。浜崖形成が利用者に危険をもたらすという点を考慮すると、実務上は安全側の評価が妥当である。

一方、汀線前進量の評価では、盛土からの流出土砂が全て $h_R \sim h_c$ の区間にとどまると仮定している。これには養浜土砂の粒径が対象海岸のものと同一か、あるいは粗粒であることが必要とされる。粒径が現地海岸のそれより細かい場合には、浜崖の高さ、侵食断面積は上述の式で算定できるが、汀線前進量の予測は必ず過大評価となる。養浜砂が現地海浜の粒径より細かなものを含む場合には、歩留まり率を考慮しなければならず、盛土の侵食量に現地海浜の粒径範囲より細かな粒径区分の割合(歩留まり率)を乗じたものを海浜の前進に寄与する土砂量とする必要がある。この時の汀線前進量は式(4), (8)に歩留まり率を乗じたもので与えられる。

また、複雑な条件のもとでの盛土養浜時の浜崖形成と、そこから供給された土砂の沖向き・沿岸方向移動に伴う海浜変形は等深線変化モデルで予測できることが明らかになった。本研究で提示した盛土養浜の手法は一度に土砂を盛り上げ、その後波の作用で土砂の削り取りが起こるというものであったが、海域への土砂供給量を大きくすると浜崖の形成が進み、海浜利用上の危険度が増すことが明らかになった。これを防ぐには初期盛土の後、適切な時期に浜崖斜面を重機で崩すという維持工事が必要とされる。

参考文献

- 1) 宇多高明・小杉俊夫・平岡孝恵・加藤憲一・山形 宙：波による粒径の淘汰を考慮した養浜時海浜変形モデル，海岸工学論文集，第44巻，pp. 516-520, 1997.
- 2) 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.
- 3) 宇多高明・芹沢真澄：浜崖の形成機構に関する一考察，海洋開発論文集，第12巻，pp. 409-414, 1996.
- 4) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男：混合砂による養浜時縦断形予測モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp. 596-600, 2003.