

砂でできた人工島の変形予測

宇 多 高 明*

1. ま え が き

近年、海浜変形の予測手法に関する研究が数多く行われ、この結果この分野においてもかなりの進歩が見られるようになった。中でもいわゆる一次元汀線変化モデルはその実用性より数多くの場合に利用されて来たが、著者は、この方法の、より一般化されたモデルとして新しい海浜変形モデルを提案した。このモデルは、まず最初に河口における砂州の変形予測に適用され、実験的に得られた砂州の変形に関して、実験値と予測値とが良好に対応することが明らかにされた。また相模川河口砂州の変形予測に対してもモデルの適用が図られた¹⁾。

これらの検討によって当モデルは現地及び実験データを問わず、砂嘴などのように直線的でない海岸線形状を有する海岸における汀線の変形予測に有効であることが明らかになった。

一方著者は、まったく新しい問題として、アラスカで石油採取のため砂でできた人工島が建設され、またその変形が詳しく調べられていることを知った^{2),3)}。

既に述べたように、当モデルはいくつかの場合について適用されて来たが、一般的なモデルとするためには更に多くの検討が必要である。したがってこの種の問題に上記モデルが適用しうかどうか、またその場合どの程度まで実測値が再現しうかどうかを調べることは、モデルの一般化に役立つと考えられた。このため本論文では、当モデルをこの人工島の変形予測の問題に適用し、実測値との比較を図ることにした。

2. 砂でできた人工島の変形

人工島は図-1に示されるように、米国のアラスカ州のビュフォート海に面したブルドー湾の近傍で建設された。この人工島は石油掘削基地を作るための試験施工として作られたものであり、1976年に建設された。人工島は水深約 0.91m の浅海域で作られ、その長さは約 137 m、幅が 99m の矩形島であった。用いられた材料は中央粒径が約 5mm の砂利である。図-2 は建設直後の1976年12月における人工島の形状を示している。ただ

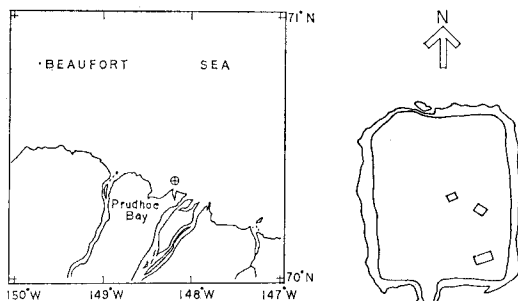


図-1 人工島の建設位置図³⁾

し図-2において人工島の形状は2本の実線で示されているが、外側にあるのが近似的な汀線を示し、一方内側と外側の線の間の領域は干潮時に水面上に露出する部分を示している。この人工島は、夏期の7、8月の結氷しない時期に生ずる北東からの入射波によってその姿が次第に変形していった。なおこの海域では北極海のきびしい気候が1年間のうち約10カ月間続き、この間の大部分、人工島は氷におおわれてしまう。

図-3は約8ヶ月後の1977年8月7日の形状であり、人工島の3つの角の部分に早くも小さな砂嘴が形成され始めていることがわかる。更に建設後約13カ月の1978年6月28日の形状は図-4に示される通りであ

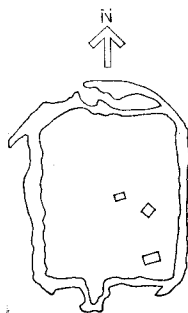


図-3 1977年8月7日の人工島の形状³⁾

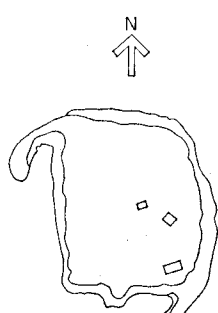


図-4 1978年6月28日の人工島の形状³⁾

* 正会員 工修 建設省土木研究所河川部海岸研究室主任研究員

る。島の南東及び北西端では砂嘴が更に発達し、また北東端では侵食が進んでいる。

図-5 は 1 年 9 カ月後の 1978 年 9 月 28 日に測定された最終形状である。人工島は北東端が大幅に侵食され、侵食された土砂は北西及び南東端における砂嘴の形成をもたらした。この結果、人工島はその原型を南西端に残すのみで、非常に大きな地形変化が生じた。

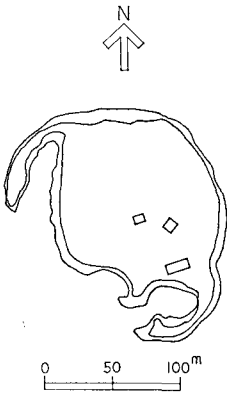


図-5 1978 年 9 月 28 日の人工島の形状³⁾

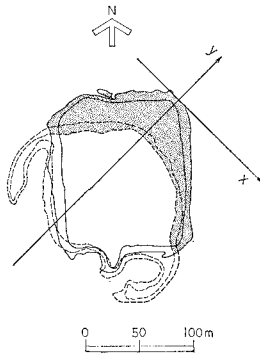


図-6 建設直後 1976 年 12 月と 1978 年 9 月の人工島の形状比較³⁾

図-6 は、地形変化の状態をわかり易く示すため、人工島建設直後の 1976 年 12 月と 1978 年 9 月の形状比較を行ったものである。ただし比較を行うに際して基準点は必ずしも明らかではないために、一応南西端がほぼ重なり合うようにして比較を行った。図-6 に示された特徴は、次のように解釈される。すなわち、卓越方向である北東からの波が人工島の汀線に沿って砕波したとき、北東端では南及び西方向へ土砂が移動し、また南東及び北西端では波の回折によって漂砂の運搬能力が低下するため、その部分に土砂が堆積し、砂嘴が形成される。

図-6 においてハッチで示された部分は侵食域を示しているが、この部分の体積の変化量は堆積域の変化量よりも大きく、堆積域の体積は侵食域の 58% であった²⁾。このことは細粒の土砂は洗い流されてしまい、砂嘴の形成には粗粒の土砂のみが役立ったことがわかる。また、損失土砂量は約 2 年間で全土砂量の 14%、すなわち年平均では 7% であったと報告されている²⁾。ただし図-6 において注意されなければならないことは、図の侵食域と堆積域の面積を比較すると、侵食域の方が堆積域よりはるかに大きい点である。このことは、細粒の土砂が洗い流されて失われたとともに、漂砂の移動限界水深が侵食域よりも堆積域で大きかったことを意味している。したがって測定値との比較を厳密に行うためには移動限界水深の場所的変化を考慮する必要がある。しかしながら、ここでは海浜断面形状の変化に関する資料を入手することができなかったため、以後の計算では地形変化の代表高さは一定値とすることにした。

最後に、図-6 の変形は x 軸を SE 方向、 y 軸を NE 方向にとったとき、現象は y 軸に対してほぼ対称的であることがわかる。このため、以下に述べる予測計算ではその右半分のみを取り上げることにした。

3. 新しい海浜変形モデル

新しい海浜変形モデルについては、既に前報¹⁾で明らかにしたので、ここではその概要のみ述べることにする。まず、図-7 に示すように固定した直角座標 (x, y) を定

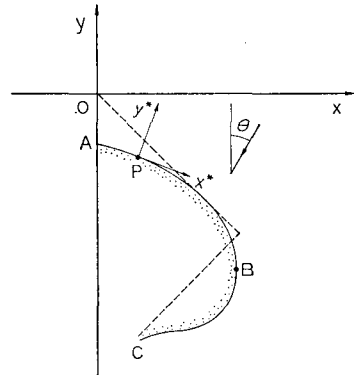


図-7 座標系の定義

める。次に汀線上の任意の点 P において接線方向に x^* 軸これと直交する方向に y^* 軸をとる。このとき接線方向の漂砂量を q 、また y^* 方向に測った汀線位置の変化量を y_s^* とすれば、局所的な漂砂量の連続式は式 (1) によって表わされる。

$$\frac{\partial q}{\partial x^*} + h \frac{\partial y_s^*}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに h は地形変化の代表高さとする。また汀線の傾きは、汀線の座標を (x_s, y_s) とすれば式 (2) のように書ける。

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに添字 s は P 点における量を示す。

更に、波向 θ は図-7 に示されたように y 軸からの角度として定義し、また角 β 及び角 θ は共に反時計回りを正とする。

漂砂量公式は、砕波点における入射角を α_b とすれば式 (3) のように与えられる。

$$q = F \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに F は式 (4) で表わされる係数である。

$$F = f \cdot \frac{w}{8} (H^2 C_g)_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし f : Savage 係数、 w : 水の単位体積重量、 $(H^2 C_g)_b$: 砕波点におけるエネルギーフラックスである。また式 (3) の入射角 α_b は、浅海長波近似を用いれば Snell の法則より、

$$\sin \alpha_b = \left(\frac{h_b}{h_0} \right)^{1/2} \sin (\theta - \beta) \quad \dots\dots\dots (5)$$

によって θ, β と関係付けることができる。ただし h_0 は砕波水深, h_0 は沖合の波向が与えられる地点の水深とする。

式 (1) の基準座標は (x^*, y^*) であり, 一方式 (2)~(5) の座標は (x, y) なので閉じた座標系とするためには両者の関係を定義しなければならない。このため 図-8

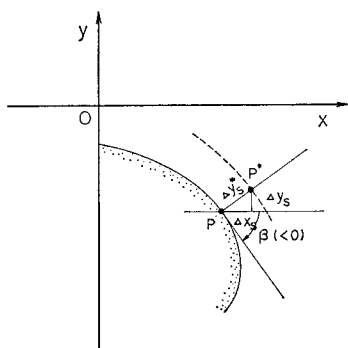


図-8 座標点の移動

に示されたように座標点 P が接線と直角方向に Δy_s^* だけ移動した場合を考える。このとき固定座標系より見た汀線位置の変化量 $(\Delta x_s, \Delta y_s)$ は式 (6) によって与えられる。

$$\Delta x_s = \Delta y_s^* \cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right), \quad \Delta y_s = \Delta y_s^* \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって移動後の点 P の位置は $(x_s + \Delta x_s, y_s + \Delta y_s)$ と定まる。ただし 図-8 に示された汀線形状の場合, 角 β は図示されているように負であり, またその絶対値は $\pi/2$ より小さい。このため式 (6) では符号の混同を避けるため $\pi/2 + \beta$ という形で書かれている。

数値計算は陽形式差分法を用いて行う。まず初期汀線に沿って汀線を N 組の微小区間に分割し, 座標 (x_s, y_s) と漂砂量 q を与える点を交互に配置する。なお, 座標点は必ずしも等間隔である必要はない。また角 β は漂砂量 q と同一点で定義する。次に角 β を漂砂量 q を求める点で算定する。ただし角 β の決定法は当計算法の最も重要な点ではあるが, これらの点については既報で詳しく述べられているので, 本報では省略することにする。

角 β が求まれば, これと既知の入射角 θ とを用いて式 (5) より角 α_0 が求まり, 更に各点の漂砂量 q を式 (3) によって算出する。なお, この場合差分法の安定性を増すために漂砂量 q は式 (7) によって平滑する。

$$\bar{q}_n = 0.25(q_{n+1} + 2q_n + q_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

漂砂量が求まれば, 汀線位置の変化量は次の方法によって決定される。すなわち式 (1) を差分化すると, まず,

$$\Delta y_{s,n}^* = -\frac{\Delta t}{h} (q_{n+1} - q_n) \cdot \frac{1}{\Delta x_n^*} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。ただし添字 n は n 点における量を示し,

また Δx_n^* は次式で定義される。

$$\Delta x_n^* = \sqrt{(x_{s,n+1} - x_{s,n})^2 + (y_{s,n+1} - y_{s,n})^2} \quad \dots\dots (9)$$

漂砂量 q_n が各点で与えられていたとすれば, $\Delta y_{s,n}^*$ は式 (8) より求まるから, 式 (6) によって $\Delta x_{s,n}, \Delta y_{s,n}$ の計算が可能である。この結果, 移動後の新座標は式 (10) によって定められる。

$$x_{s,n} = x_{s,n} + \Delta x_{s,n}, \quad y_{s,n} = y_{s,n} + \Delta y_{s,n} \quad \dots\dots (10)$$

新しい座標が求まれば, 再び式 (2) を用いて角 β を求める。以後, 計算は同様なステップが繰り返して行われることになる。なお問題の種類によっては, 座標点の移動に伴う累積誤差を完全に除去することができない場合もある。このような場合には座標点に関しても式 (11) 及び式 (12) による平滑化を時々行えば良い。

$$\bar{x}_{s,n} = 0.25(x_{s,n+1} + 2x_{s,n} + x_{s,n-1}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\bar{y}_{s,n} = 0.25(y_{s,n+1} + 2y_{s,n} + y_{s,n-1}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

また以上の計算は陽形式差分法を用いているため, 差分法の安定条件としては少くとも次式が成立しなければならない。

$$\Delta t \leq \Delta x_n^* \frac{h}{F} \quad \dots\dots\dots (13)$$

4. 実測値と計算結果の比較

まず最初に実測値に対応させた人工島の変形予測を行うことにする。数値計算を行うためには, いくつかの計算定数と境界及び初期条件が定められなければならない。

初期条件としては, 図-7 に破線で示されたように, 人工島の東及び南側面をそれぞれ直線で与え, この直線に沿って汀線を約 4m 間隔で 59 点に分割し, その座標値 (x_s, y_s) を与えた。境界条件としては, 汀線の両端 (図-7 の点 A, C) における漂砂量を 0 とおいた。計算の諸定数, すなわち地形変化の代表高さ h , 係数 F , 入射角, 計算時間間隔 Δt は次のように定めた。

まず, 地形変化の代表高さに関しては, 本来海浜断面形状の変化と汀線変化量との関係を明らかにした上で決められなければならないが, ここでは海浜断面形状の変化が明らかではないため, これらの関係より代表高さを定めることはできなかった。しかしながら人工島の建設された場所の水深は約 91 cm であることから, 代表的に $h=1\text{m}$ とおくことにした。

入射角については, まず人工島より離れた地点における波向は 図-7 において $\theta=0$ すなわち y 方向からと仮定する。この場合 x が最大値をとる位置より下手側は, 島自身による遮蔽領域となるので, 図-7 に示されたように人工島の周りを二つの領域すなわち区間 AB, BC に分割して議論する必要がある。区間 AB では入射方向は y 方向とする。区間 BC での波向分布は地形変化が急であるために理論的にその分布形を求めることは相当困難

である。このため簡単な仮定を設けることにした。すなわち、入射波は砂嘴に沿って接線方向より入射するとし、

$$\theta - \beta = \pi/2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

と置く。また式(5)の $(h_b/h_0)^{1/2}$ については計算の安定性を考慮して $\theta - \beta$ が式(14)のように与えられたとき絶対値最大の漂砂量を与える条件として $(h_b/h_0)^{1/2} = 0.71$ と仮定した。この条件は式(5)によって α_0 を求めたとき $\alpha_0 = \pi/4$ を与える。

係数 F については、その場所的变化を考慮しなければならないが、図-7の区間 AB では一定値(F_0)をとるとし、区間 BC では主に回折によってその分布形が変化すると考える。まず F_0 については次のように定められる。いま砕波波高が仮りに 0.1m とし、砕波水深が 0.14m, Savage 係数を $\alpha = 0.217 \text{ m}^3/\text{t}$ とおくと、 F_0 として $27.5 \text{ m}^3/\text{d}$ という値が得られる。しかしながらこの値を用いて実際に計算を行った場合、地形変化が過大であったために、以後に述べる計算では実測値とより良く適合するようという $F_0 = 16 \text{ m}^3/\text{d}$ 値を選択した。

区間 BC について回折・屈折によって波高が急速に減少する条件として次のように仮定した。まず軸方向に最も突出した点 B の座標を $(x_{s \max}, y_{s \max})$ とすれば、係数 F はこの点からの距離とともに式(15)のように減衰する。

$$F = F_0 / (1 + cl^2) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$l^2 = (x_s - x_{s \max})^2 + (y_s - y_{s \max})^2 \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに F_0 は遮蔽領域外の F_0 である。また c は定数であり、 $c^{-1/2}$ は回折による波高減衰に関する長さのスケールを表す。ただし以後の計算では代表的に $c = 0.002$ とおいた。

計算に際して、計算法自体は比較的安定であるために、計算の良否は安定性よりも累積誤差で評価する必要がある。このため計算においては、各ステップごとに総土量(V)を求め、この値と初期値(V_0)との差の V_0 に対する比を累積誤差の指標として利用することにした。

図-9 は 100 日(200 ステップ)おきの計算結果を示している。なお計算時間間隔は $\Delta t = 0.5$ 日とおき、式(11), (12)による座標点の平滑化は 80 ステップごとに行った。計算においては、ステップ数の増加とともに総土砂量が次第に減少し、累積誤差が増加した。この原因は堆積域で座標点間隔が広くなり過ぎることにあると考えられたため、200 日(400 ステップ)でまず一度計算を打ち切り、この時点で座標点の再配置を行った。この時点での誤差は -4.3% であった。その後計算は合計で 600 日(1200 ステップ)まで行ったが、この時点では誤差が -20.7% と非常に大きくなったため、図としては誤差が -12.0% と -10% をわずかに越えた 400 日(800 ステップ)までの結果を表示した。また、実測され

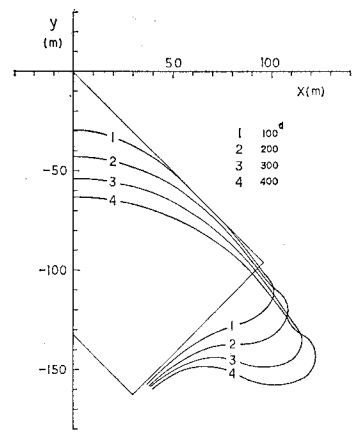


図-9 人工島の変形(予測値)

た人工島の変形は、夏の約2カ月間に生じたものと考えられるが、計算では年間を通じて平均的な波が作用したと考えている。

図-9の計算値と図-6の実測値とを比較すると、侵食域での侵食量が計算値は過大であるが、その変化状況は相当良好に予測されていることがわかる。

堆積域については砂嘴形状が相当異っており、実測値では小さな湾入部ができていますが、計算では湾入部は存在しない。この点は回折条件の取扱いが不十分なことを意味する。計算では回折条件を式(15)のように仮定したが、実測値と適合させるためには、回折による変化が更に急激であると仮定する必要があると考えられる。しかしながら、数値計算ではあまり急激な場所的变化は取り扱うことができず、したがってこの点は今後解決されるべき基本的問題点として残されている。ただし堆積部の形態を詳しく調べるのではなく、人工島全体の形状変化について大略の変化を予測したいのであれば、ここで述べた計算法で十分と考えられよう。

図-10は、汀線に沿う沿岸漂砂量の分布と、汀線の傾きの沿岸方向分布の一例を示したものである。ただし図の横軸は距離ではなく、一定間隔の座標点番号であることを注意する必要がある。なお No. 1 は図-7の点 A 地点を示している。また図には初期と 200 日後の分布形

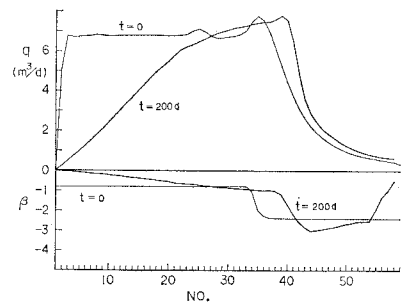


図-10 漂砂量と汀線の傾きの沿岸方向分布

状が示されている。 $t=0$ において No. 1 にあった漂砂量の不均衡は、下手方向への漂砂によって次第に滑らかなものへと変化して行くことがわかる。このことはまた汀線の傾きが次第に 0 に近づくことを意味している。

図-11 は人工島の一边に直角に、すなわち y 軸方向より波が入射した場合の予測結果の一例を示したものである。なお計算にあたっては、回折領域を x が最大値をとる位置より下手側と変更した以外は、先の計算結果とまったく同一の条件を用いている。また図には 50 日及び 100 日後の形状が示されている。この場合、上手部分で侵食が生じ、侵食された土砂は人工島の背後部に堆積することがわかる。

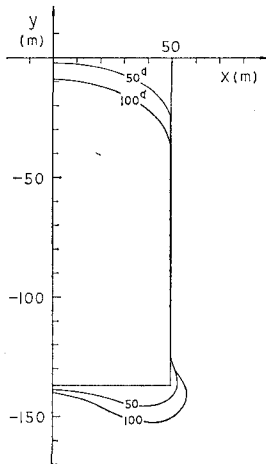


図-11 矩形島の変形（人工島に対して波が直角入射する場合）

その変形予測を試みた。この結果、外力条件の選定には問題が残されているものの、人工島の全体的変化については、相当良好な予測値を得ることができ、当モデルの工学的な意味での実用性がほぼ確認された。ただし問題点も多くあり、特に回折領域について厳密な検討を加えることが今後必要であろう。

謝 辞： 本研究は科学技術庁の在外研究として著者が米国のスクリップス海洋研究所の Dr. R. J. Seymourのもとで行った研究の一部である。本研究にあたって Dr. R. J. Seymour には多くの有益な助言を受けたことに感謝します。また本研究は、著者が TEKMARINE 社の Dr. C. J. Sonu を尋ねた際得られたヒント及び資料がその発端となったものであり、Dr. C. J. Sonu には多くの助言及び資料をいただいたことに対して感謝します。また同社に滞在中の日本テトラポッド社の越智裕氏とは、論文をまとめるに際して多くの有益な議論をしていただいた。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明：新しい海浜変形モデルによる河口砂州の変形予測，土木学会論文報告集，第 322 号，pp. 77~88，1982。
- 2) Gadd, P. E., C. J. Sonu, and M. T. Czerniak: Gravel island slope protection, Beaufort Sea, Alaska, Tetra Tech. Report, TC-3285, 49 p., 1979.
- 3) Gadd, P. E., and M. T. Czerniak: Production island slope protection, Beaufort Sea, Alaska, Tetra Tech. Report, TC-3310, 70 p., 1979.

5. あとがき

本論文では砂でできた人工島の変形について実測値を中心に議論を進め、また新しい海浜変形モデルを用いて