

モンテカルロ法を用いた海浜変形の数値計算

橋本 誠也* ・ 入江 功**・ 村上 啓介***
小野 信幸****・ 小島 治幸*****

1. ま え が き

自然の海浜は、長い年月にわたってその海浜固有の波の作用を受けて形成されたものである。その自然の力の微妙なバランスの上に形成されている海浜に沖合土捨てや海底砂採取などの新たなインパクトを与えると、そのバランスが一時的に崩れて新しい平衡状態に変化すると考えられる。本論文では、その様な平衡海浜断面の特性を再現し、また海浜断面の形成に関係のある要因を可能な限り忠実に取り入れ、海浜断面変形のモデル化を試みている。なお、本計算では沖浜領域を対象としており、碎波帯内の現象は取り扱っていない。

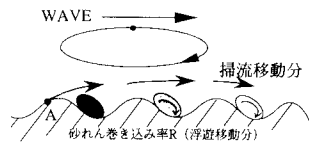
2. 数値計算の方法

2.1 現象の分離

本計算では、岸沖漂砂機構のモデル化に当たって砂れん表面砂の掃流移動、砂れん後流渦への巻き込み、上方水中への浮遊などの漂砂に関係あると思われる全ての過程をモデル内に取り入れるように努めた。そこで、実際の移動床で起こっている現象を模式的に表すと図一1のようになり、A点をせん断された掃流砂の内、Rの割合で砂れん後流渦に巻き込まれるもの（浮遊移動分）と、巻き込まれずに掃流のみで移動するもの（掃流移動分）に分離して考えることが出来る。

a) 掃流移動分

後流渦に巻き込まれずに掃流のみで移動し、そのまま海底に落ちる分である。今回は、底面での流速の有限振幅性を考慮して、後述する既往の実験式より求める。



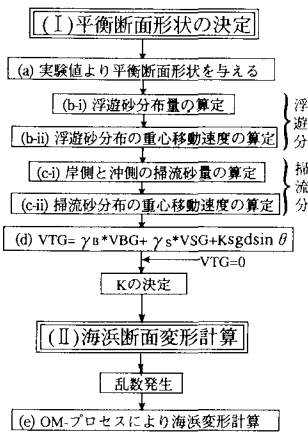
図一1 現象の分離

b) 浮遊移動分

砂れんの後流渦に巻き込まれた砂は、流れが反転すると巻き上げられ、浮遊砂として移動に寄与する。固定床砂れんに砂を置いた場合は、せん断によりA点から取り込まれる砂はなく、砂れんの谷から直接渦に取り込まれ、浮遊により移動する量が支配的であると考えられるが、岸沖方向の移動の寄与は同じと考えた。浮遊移動分による岸沖移動特性は固定床実験により求めた。

2.2 計算プロセス

本計算方法の概略を述べる。まず、二次元実験によりこの計算の基本となる平衡断面をつくった。次に固定床砂れん実験から得られる浮遊移動分の重心移動速度VSGを経験式により求め、Skafelら(1984)の浮遊砂量を掛け合わせることで浮遊移動分の岸沖移動量を算定した(一般に沖向き)。波の非線形効果による掃流移動分は、Madsen and Grant (1976)による掃流砂量式を用いて計算により求めた(一般に岸向き)。それに重力(勾配)による沖向きの移動を加えた3つの項のバランス条件により、全漂砂の正味の移動速度VTGを求めた。平衡断面においてはVTG=0と考えられ、断面が平衡断面から変化する程移動も激しくなる。また、砂れん相互の移動砂混合現象を再現するために、計算する砂れん位置を乱数によって選び(モンテカルロ法)、海浜断面計算を行った。



図一2 計算方法のフローチャート

* 工修 福岡県庁
** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
*** 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科
**** 学生員 九州大学大学院 工学研究科
***** 正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科

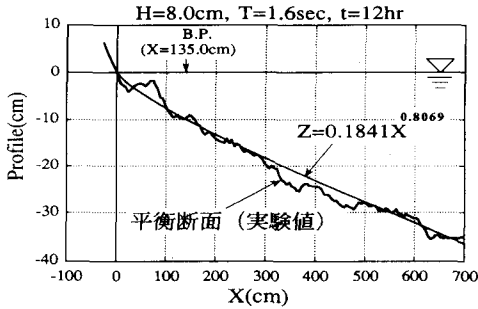


図-3 平衡断面形状

以下に、図-2のフローチャートに従って具体的に計算方法を述べることにする。

a) 平衡断面形状の決定

二次元造波水路 (長さ 28 m, 幅 0.3 m, 深さ 0.5 m) の一端に前浜勾配 1/5, 沖浜勾配 1/20 の複合勾配断面を持つ移動床海浜モデル (砂の中央粒径 0.16 mm) をつくった。その断面に、入射波高 $H=8.0$ cm, 周期 $T=1.6$ s の波を汀線の移動がなくなったと思われる時間まで作用させて、平衡断面を形成させた。その断面を超音波砂面計により読み取り、Bruun (1954) の表示にならって $Z=AX^m$ の曲線で回帰計算させて、図-3 の様な平衡断面形状を求めた。

b) 浮遊移動分の算定

i) 浮遊砂分布量 (QSS)

Skafel ら (1984) は、浮遊砂濃度分布が片対数グラフ上で直線で近似的に表示できるとして次式の実験式を提案している。

$$C=C_a \times \exp\{-1/\beta_c \times (y-a)\}$$

ここで、 C_a : 基準点高さ $a (=3.0 \times d_{50})$ での浮遊砂濃度、 w : 底質の沈降速度 ($=g(s-1) \times d_{50}^2 / (18 \times \nu)$)、 s : 底質比重、 ν : 動粘性係数、 U_f : 摩擦速度 ($=\sqrt{f_w/2} \times U_b$)、 f_w : Jonsson の摩擦係数、 U_b : 底面最大流速、 d_0 : 水粒子軌道振幅、 β_1 : Skafel らの実験定数 ($=8.7 \times (U_f \times d_{50}/\nu)^{-2.2}$)、 β_c : 濃度分布勾配 ($=1/w \times U_f \times \beta_1 \times d_0$)

また、入江ら (1985) は、複雑な運動をしている砂れん近傍の浮遊砂濃度が上方水中の濃度と共に片対数直線上にあると考え、シーلز数 $\phi_m (=f_w U_b^2 / 2(s-1)gd_{50})$ を用いて次式の様に表せると述べている。

$$C_b=5000(\phi_m^3)^{0.6}$$

今回は底面での浮遊砂濃度 C_b を上式で与え、Skafel らの式を水深で積分することにより浮遊砂量 (QSS) を算定した。

ii) 浮遊砂分布の重心移動距離 (VSG)

著者ら (1993) は昨年まで実施してきた固定床砂れんを用いた実験結果より、浮遊砂分布の重心移動速度 VSG が図-4 に定義される波形上下非対称歪率 $S_1=$

$(H_c-H_b)/H$, 波形前後非対称歪率 (前傾度) $S_2=(L_R-L_F)/L$, 砂れんの歪率 (前傾度) $S_3=(\lambda_R-\lambda_F)/\lambda$ を用いて次式の様に定式化できることを示した。

$$[V_g]^*=\sum a_i S_i \quad (i=1, 2, 3)$$

ただし $[V_g]^*$ は無次元数 (冲向き正) で、

$$[V_g]^*=(VSG/U_m) \times (W/U_m) \times (h/\eta)$$

U_m : 底面での水粒子軌道最大速度, W : 砂の沈降速度, h : 水深, η : 砂れん波高, a_1 : 経験定数 ($a_1=0.044$, $a_2=-0.028$, $a_3=0.033$) である。

本計算では S_1 は Goda (1964) の実験値を次式の様に定式化したものを用いた。 $Y=h_c/h$, $X=H/h$ と置くと、

$$Y=0.7219X^2+0.2952X+1.0195$$

ここで、 h_c : 水底から波峰までの高さ, h : 水深, H : 波高である。

S_2 は石田ら (1983) の理論値に我々の実験値を加味して、次式のような二次曲線を用いて定式化した。沖波波形勾配 $Z=H_0/L_0$, 沖波相対水深 $X=h/L_0$, 石田らの定義する前傾度 $Y=K_g$ (海底勾配 $\tan \theta=1/10$ のみ) とすると、

$$Z=a+bX+cX+dX^2+eXY+fY^2$$

この時、 $a=0.0048$, $b=0.5170$, $c=0.0327$, $d=-13.1352$, $e=1.5945$, $f=-0.1079$ である。ただし、計算では海底勾配がゼロと 1/10 の間は直接的に内挿し、 S_2 の定義の違いも考慮した。

S_3 は今回の二次元実験の測定値より与えた。

c) 掃流移動分の算定

i) 掃流砂分布量 (QBO, QBF)

掃流砂量は、Brown の公式を準定常の仮定の下に適用した $\phi(t)=40\psi^3(t)$ ($\phi(t)$: シールズ数) (Madsen・Grant (1976)) を用いて、図-5 の様に流速の有限振幅性を考慮して、岸向きと冲向きの分布を別々に求めた。その分布から砂れん巻き込み率 R で後流渦に巻き込まれる分を差し引いて掃流砂量 (QBO, QBF) を算定した。

ii) 掃流砂分布の重心移動速度 (VBG)

掃流砂分布の重心移動速度 (VBG) は、岸向き掃流砂分布と冲向き掃流砂分布の正味の重心移動距離 (XBG) を一周期 T で割って求めた。

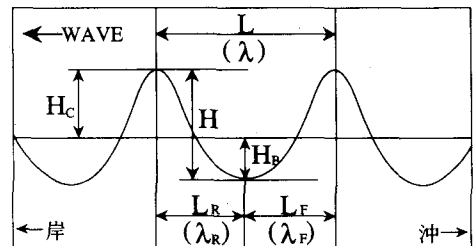


図-4 S_1 , S_2 , S_3 の定義図

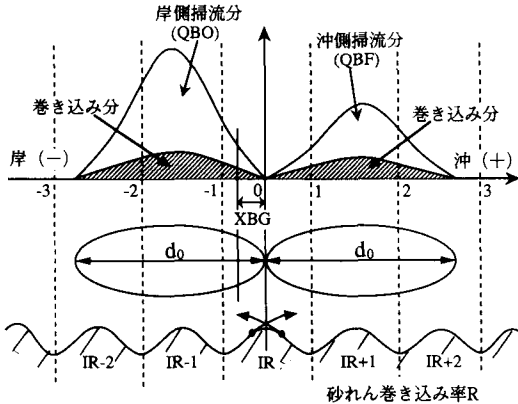


図-5 掃流砂分布図

d) 全漂砂の正味の移動速度 (VTG) の算定

全漂砂の移動速度 VT は、前述した諸量を用いて次の様に表せる。

$$(QBO + QBF + QSS) \times VT \\ = (QBO + QBF) \times VBG + QSS \times VSG$$

ここで、 $QT = QBO + QBF + QSS$ とおくと、

$$VT = (QBO + QBF) / QT \times VBG \\ + QSS / QT \times VSG$$

この VT が重力 (勾配) による冲向きの移動速度 $Ksgd \sin \theta$ と釣合って、平衡断面が形成されると考える。

$$VTG = VT + Ksgd \sin \theta$$

ここで、 k : 重力項の係数、 d : 底質粒径、 s : 底質の比重、 g : 重力加速度、 $\sin \theta$: 海底勾配である。

また、平衡断面においては正味の移動はないので $VTG = 0$ と考えられ、重力 (勾配) 項の係数 K が決まる。

$$K = -VT / sgd \sin \theta$$

以後の計算では、この平衡状態での K の値を使用するので、断面が平衡状態から変化する程、正味の移動速度 VTG も大きくなる。

e) OM-プロセスについて

図-6 の様に、ある砂れん I における全漂砂量 QT が左右均等に分配率 p で水粒子軌道全振幅の距離 (d_0) だけ分散すると考える。その分散した砂全てが正味の移動速度 VTG で移動すると考えて、各砂れんにたまる移動後の漂砂量を求める。次に、別の砂れん位置でも同様のことを繰り返し、分散移動後の漂砂量を加えていく。このプロセスを1プロセスで重複することなく全ての砂れんに施すが、その生起箇所はランダムに与える (モンテカルロ法の採用)。この一連のプロセスのことをOM-プロセス (Oscillatory Movement Process) と呼ぶことにする。OM-プロセスによって、平均的な移動速度 VTG だけでなく、個々の砂れんにおける拡散混合過程を再現することができる。

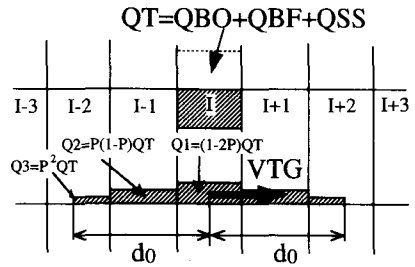


図-6 OM-プロセス概念図

3. 分配率 P の算定

二次元固定床実験 ($H=8.0$ cm, $T=1.5$ s, $h=19.5$ cm)での底質の広がり分布と、同じ条件下でOM-プロセスにより分配率 P を種々変化させた計算結果とを比較して実際の現象に最も近い P の値を算定した。比較は、図-7に示す分布量の最大値 AB の中点 M での広がり幅 BW により行い、図-8に P を変化させた時の波の作用時間と BW の関係を示す。分配率 P が大きくなると底質の広がり幅も広くなり、実際には P は水深の浅い所程大きくなる様な水深の関数と考えられる。しかし、今回の計算では、便宜上一定値として取り扱っている。図-9には実験値による底質の広がり分布を、図-10はその時の P の値 ($P=0.1$) を用いて描いたOM-プロセスによる計算結果を示してある。

4. 計算結果の検証と考察

4.1 養浜欠壤実験による検証

二次元水路実験により図-11の様な2つの場所 (B地点とC地点)で養浜欠壤実験を行った。まず、図-3に示

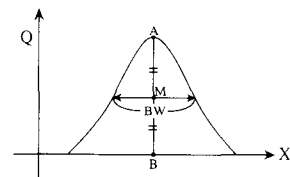


図-7 BW の定義図

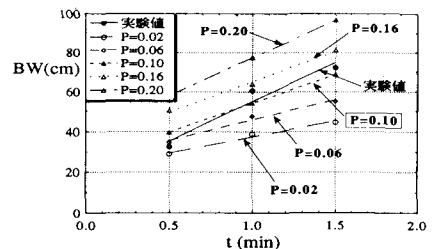


図-8 波の作用時間と BW の関係図

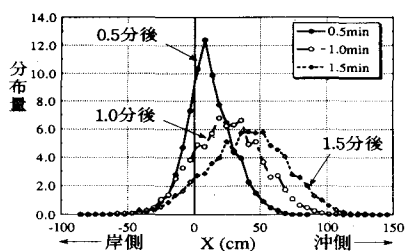


図-9 二次元実験による底質の広がり分布

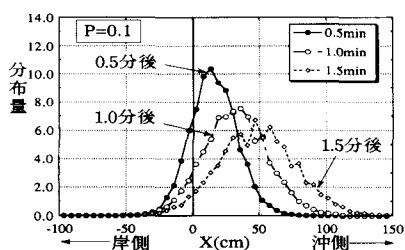


図-10 OM-プロセスによる底質の広がり分布

した平衡断面において汀線から約2mの位置から1/5の勾配で深さ6cm程掘削し、その後はほぼ平衡断面と同じ1/20の勾配で水深が約30cmの位置まで掘削し水平に平衡断面にすりつけた(B地点)。汀線から約3mの位置でも同様の実験を行った(C地点)。

図-12と図-13は、B地点・C地点それぞれの掘削断面における波作用0.5時間後と6.0時間後の断面変化を示したものである。勾配の急な法面の部分が時間と共に徐々に崩れていく様子がわかる。また、B地点の方が水深が浅いので底質の運動も激しく崩れるスピードも早い。

次に、上記の二次元実験と全く同じ条件で断面変形計算を行った結果を図-14(B地点)と図-15(C地点)に示す。なお、計算では分配率 P を0.1、砂れん巻き込み率 R を0.4で計算してある。計算結果からも、時間によって断面が欠壊していく様子や水深による欠壊スピードの違いなど二次元実験の結果で見られた現象がよく再現されている。

計算では、1回のOM-プロセスで1周期($T=1.6$ s)と考えているが、実際の現象よりも計算の方が非常に早

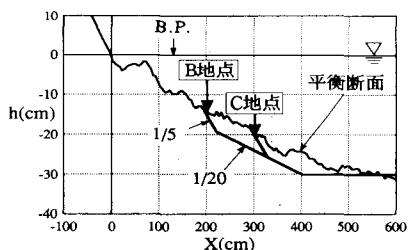


図-11 断面掘削位置

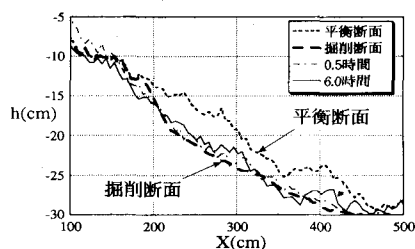


図-12 実験結果 (B地点)

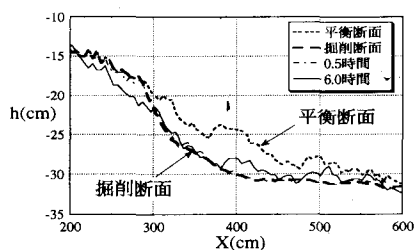


図-13 実験結果 (C地点)

い時間で起こっている。これは、今回計算に用いた浮遊砂量や掃流砂量等を既往の実験式により算定していること、今回は沖浜帯のみを対象とし、OMプロセスによる沖向き拡散移動を無視して、断面平衡条件を求めたことなどによるものと思われる。

4.2 計算による断面変化の速度について

既に述べた様に、流速の有限振幅性により掃流移動は岸向きの移動を示し、その量は砂れん巻き込み率 R に影響される。一方、浮遊砂は沖向きの移動を示し、さらに重力(勾配)による沖向きの移動がある。この重力項の係数 K は平衡条件($VTG=0$)により決定される。今、

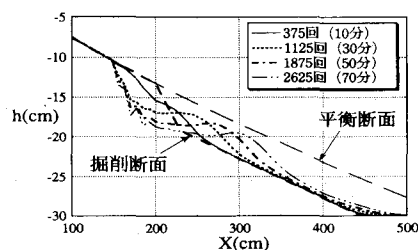


図-14 計算結果 (B地点)

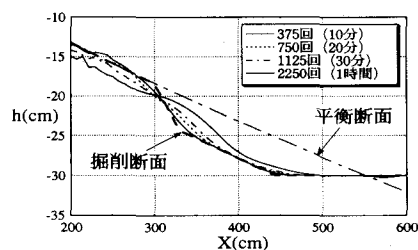


図-15 計算結果 (C地点)

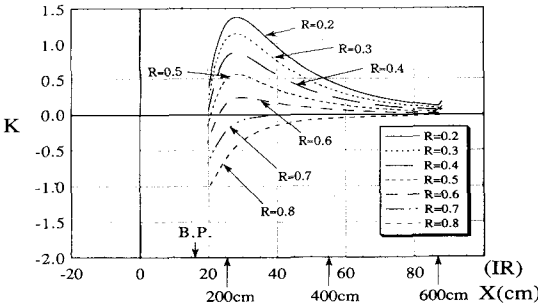


図-16 R の変化による K の変化 (IR は、砂れん毎に付した番号)

砂れん巻き込み率 R を大きくするとすれば、相対的に岸向きの掃砂量が減少するので平衡断面条件 ($VTG=0$) を適用すると、 K の値が減少する。すなわち、このモデルでは R と K の値の選択に今一つの自由度があり、平衡条件の下で R を増大させ K の値を減少させるにつれ、掘削後の平衡バランスの崩壊により断面変化速度は遅くなる。しかし、 R を一方的に大きくしていくと沖向きに移動しようとする力が強くなり過ぎ、本来沖向きに引っ張るはずの重力が岸向きに押し上げる様な格好になり説明がつかなくなる。この様子を説明したのが、図-16である。(横軸は汀線からの距離、縦軸は K の値である。) R を大きくしていくと重力項の係数 K がだんだん小さくなり、やがて負の値 (計算では沖向きを正にとっている) を取るようになる。そこで、沖浜帯において K が正值を取るように沖向きの浮遊移動量に係数をかけて減じてやる必要がある。

図-11 に示した B 地点の中心位置を通過した沖向きの漂砂量を、 R の値を変化させて求めたのが図-17である。なお、 $R=0.5$ の時には浮遊砂量 $\times 0.8$ 、 $R=0.6$ の時には浮遊砂量 $\times 0.6$ としてある。これより、 $R=0.6$ で、計算による浮遊移動量を 6 割掛けにした場合が、今回の実験値に最も近くなっている。

5. あとがき

複雑な方程式などを用いずに、平衡断面の特性を利用

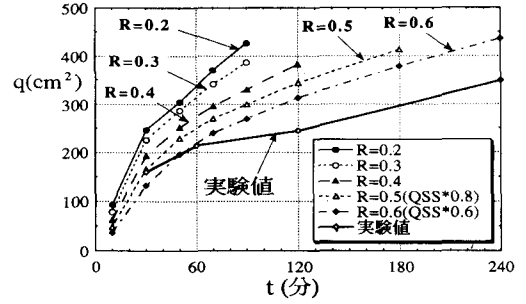


図-17 B の中心位置を通過した沖向き漂砂量

し水深や波の条件により算定した漂砂量が OM-プロセスによって分散移動していくという比較的簡単な方法で、海浜断面変形をある程度再現することが出来た。しかし、今回の計算では碎波帯内での現象についてはほとんど手つかずであった。今後の課題としては、水位上昇・下降時や構造物設置後の碎波帯を含めた断面変化計算、3 次元への拡張などが考えられる。

参考文献

- 石田 啓・山口 登 (1983): 斜面上の碎波の一理論とその応用, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 34-38.
- 入江功・寺崎賢次・加藤一正 (1985): 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究, 港研報告, 第 24 巻, 第 2 号, pp. 123-156.
- 入江 功・小野信幸・村上啓介・橋本誠也 (1993): 歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御, 第 40 回海岸工学講演会論文集, 掲載予定
- Bruun, P. (1954): Coast Erosion and the Development of Beach Profiles, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 44, 1954.
- Goda, Y. (1964): Wave forces on a vertical circular cylinder, Experiments and a proposed of a wave force computation, Report of Port and Harbour Technical Research Institute, No. 8., 74 p.
- Madsen, O. S., and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by wave, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan (1984): Suspended sediment distribution in wave field, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 215-230.