

波・流れ共存場における底質分級の数値計算

田中 仁*・吉竹豊尚**・首藤伸夫***

1. 研究の目的

近年、海浜変形予測に関する研究が数多くなされているが、これらの研究において海浜は均一砂からなるものと仮定されている。現実の海浜は混合砂からなり、その移動特性は均一砂のそれと異なるものと考えられる。特に、河川におけるアーミングと同様な現象が発生して、表層が粗砂で覆われた場合、当該箇所の侵食速度が低減し、均一砂の場合とは異なる移動特性を有すると考えられる。そこで、著者の一人は先に波による混合砂の移動現象について検討を行い、粒径別の底質移動限界式および漂砂量式を実験的に定めた(田中ら, 1988)。

本研究では、波・流れ共存場において同様な漂砂量式を実験的に定める。さらに、得られた漂砂量式をもとに、混合砂移動現象の数値シミュレーションを行い、実験結果との比較を行う。

2. 実験方法

実験には、水路長 18 m、幅 30 cm、高さ 50 cm の二次元水平床造波水路を用いた。上流より一方向流を供給し、下流側から波を発生させた。波と流れが同方向に進行するケースは扱っていない。

水路固定床部の中央部 2.0 m を深さ 3.8 cm に掘り下げ、この部分に混合砂を敷いた。実験に使用した底質は一種類のみであり、平均粒径 $d_m = 1.75 \text{ mm}$ であった。その粒度分布を図-1に示す。なお、底質は粒度毎にそれぞれ異なる色の蛍光塗料で着色した。これは、後で述べるように底質表層の粒度組成測定を容易にするためである。

今回の実験では常に掃流状態で砂移動が生じ、固定床部に移動する砂を捕砂することにより、net の砂移動量を測定した。砂の移動方向は波と流れの相対的強弱によって変化した。

実験では、まず各種の水理条件のもとで各粒径毎の

net の砂移動量を求め、これをもとに粒径別移動限界式および漂砂量算定式を定めた。この実験の概要についてはすでに別報で報告した(吉竹ら, 1989)。

つぎに、長時間にわたって波と流れを作用させ、固定床に移動してくる砂量とその粒度組成の変化を調べた。また、適宜波と流れを停止して底面地形の測定を行い、さらにブラック・ライトを当てて砂面表層の写真撮影を行った。前述のように底質には粒径毎に異なる色の蛍光塗料が塗布されているので、撮影された画像を解析することにより、底質表層での各粒径毎の面積比が得られる。さらにこれを体積比に換算して、表層の粒度組成を求めた。従来、底質表層の粒度組成を測定する際には、直接表層の砂をサンプリングする手法が取られてきた(例えば、平野, 1971)が、粗粒化した層は薄いので、砂の採取が困難である。また、この方法では資料採取によって砂層を攪乱してしまうために、表層粒度組成の時間変化を連続的に測定することが出来ない。本研究の手法を用いることによって、これらの難点が改善された。実験は1ケースのみ行われた。実験条件は、水深 29.3 cm、波高 11.2 cm、周期 1.85 sec、定常流の断面平均流速 25.1 cm/sec である。本ケースは定常流成分が卓越し、冲向き(波の進行方向と逆向き)の砂移動が生じた。

なお、撮影された砂層表面写真の解析には東北大学大型計算機センターの画像処理システムを用いた。

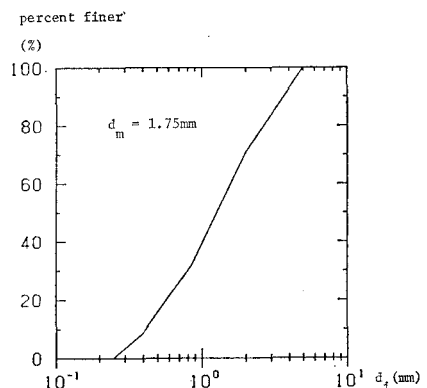


図-1 底質の粒度分布

* 正会員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科

** 学生員 東北大学大学院 工学研究科

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

3. 計算方法

計算には、平野(1971)により提案された砂の連続式・粒度の連続式を用いる。水路幅を一定とし、また、交換層厚 a 、砂の空隙率 λ の時間変化を無視すれば、基礎方程式は以下になる。

① 底面が上昇する場合

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial \bar{q}_B}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial (i_B \bar{q}_B)}{\partial x} - i_b \frac{\partial \bar{q}_B}{\partial x} \right\} \dots\dots (2)$$

② 底面が低下する場合

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial \bar{q}_B}{\partial x} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial (i_B \bar{q}_B)}{\partial x} - i_{b0} \frac{\partial \bar{q}_B}{\partial x} \right\} \dots\dots (4)$$

ここに、交換層とは砂面の表層で粒度組成が変化する層をさす。この層より下では、粒度分布が不変である。また、 z ：基準面から測った砂面の高さ、 $\bar{q}_B$ ：波による単位幅単位時間当りの net の漂砂量、 i_B および i_b ：それぞれ、ある粒径範囲の砂粒が漂砂中および交換層中に占める割合、 λ_0 ：交換層より下の層の空隙率、 i_{b0} ：交換層より下の層における、ある粒径範囲の砂粒の存在割合である。漂砂量の算定方法については次節で述べる。

本研究では、基礎式を差分によって解いた。計算に際しては、局所的な地形の凹凸を平滑化するために渡辺ら(1984)と同様に、漂砂量式に対して斜面勾配の効果を考慮した。すなわち、

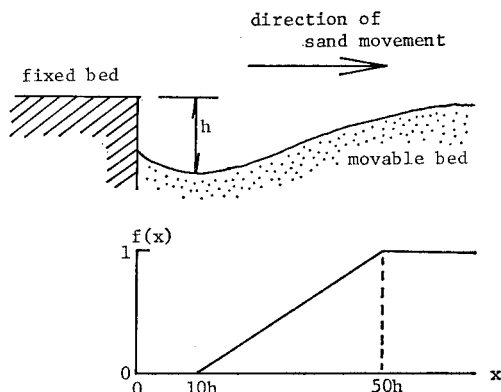
$$\bar{q}_B = \bar{q}_{B0} - \alpha \left[\bar{q}_{B0} \right] \frac{\partial z}{\partial x} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、定数 α は 2.0 とした。上式は全粒径にわたって合計した漂砂量に対する補正式である。実際の計算において、式 (2)、(3) からわかるように、各粒径毎の漂砂量が必要になる。したがって、勾配補正は粒径別の漂砂量式に対して行う必要がある。そこで、式 (5) を粒径別の式に拡張し、次式を得る。

$$i_B \bar{q}_B = i_B \bar{q}_{B0} - \alpha \left[i_B \bar{q}_{B0} \right] \frac{\partial z}{\partial x} \dots\dots\dots (6)$$

上式を全粒径について合計すると式 (5) と一致することとは明らかである。

本研究では固定床から急に移動床に変化するため、上記の平衡状態の漂砂量式を用いると、漂砂の上手側の移動床端部において移動量が過大評価されてしまう。流砂に関してはこのような不連続部における非平衡性について研究がなされている（たとえば、Bell and Sutherland, 1988）が、漂砂現象については現在のところ研究例がない。ここでは、Bradshaw and Wong (1972) による段落



図—2 移動床端部における漂砂量の補正

ち流れに関する実験を参照して、便宜的に次節の平衡漂砂量式 (11) から得られる値に、図—2 の重み関数 $f(x)$ を乗ずることによって計算点での漂砂量とした。

つぎに、数値計算の安定条件について考える。式 (2) を変形すれば次式を得る。

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} + \frac{\bar{q}_B}{a(1-\lambda)} \frac{\partial i_B}{\partial x} = -\frac{1}{a(1-\lambda)} (i_B - i_b) \frac{\partial \bar{q}_B}{\partial x} \dots\dots\dots (7)$$

式 (4) から同様な式が得られる。上式は一次元の波動方程式に類似したものになっている。すなわち、 $i_b = i_B$ の時、アーマー・コートは波速 $\bar{q}_B/a(1-\lambda)$ で x の正方向に伝播して行くことになる。この波速は砂層厚 a の範囲で漂砂 $\bar{q}_B$ (実質体積) が生じる際の砂の移動速度に対応している。

以上より、式 (7) を風上差分で表現すれば安定な解が得られることがわかる。この時、安定条件は Courant 数 ≤ 1 である。一方、砂の連続式 (1)、(3) に式 (5) を代入すれば、放物型の方程式となる。よって、計算の安定条件は次式で与えられる。

$$\Delta t = \text{Min} \left\{ \frac{\Delta x a (1-\lambda)}{\bar{q}_{B \max}}, \frac{(\Delta x)^2 (1-\lambda)}{2 \alpha \bar{q}_{B \max}} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、Min は { } 内の小さい方の値を取ることを意味し、また、 $\bar{q}_{B \max}$ ：計算領域における漂砂量の最大値である。今回の計算条件では、安定条件は粒度の式より定まるものであった。

なお、実験前における移動床表層の底質粒度組成は理想的には図—1 に示したものに等しいはずであるが、現実には表層を平坦に敷きならすことの影響等で、図—1 に示したものと異なる粒度組成をもつ、そこで、数値計算での初期粒度組成には画像解析から得られた実測値を用い、交換層より下の部分に対しては図—1 の粒度を与えた。また、交換層厚は底質の 90% 粒径に等しいものとした。

4. 結 果

(1) 移動限界式と漂砂量式

波のみの場合の粒径別移動限界シールズ数 τ_{ci}^* については、すでに田中ら(1988)によって提案がなされているが、同式は波・流れ共存場においてもほぼ成立することが確認された(吉竹ら, 1989)。その式形は次の通りである。

$$\tau_{ci}^* = \tau_{cm}^* \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0.92} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 d_i : ある粒径範囲にある砂粒の平均粒径、 τ_{cm}^* : 平均粒径 d_m の移動限界シールズ数である。なお、式(9)は定常流による混合砂移動現象に対して提案された道上・鈴木(1988)の式とほとんど一致しており、また、よく知られた Egiazaroff (1965) の式と比べると、大粒径において差異が顕著である。

次に、漂砂量式について述べる。なお、以下に述べる漂砂量式は水平床におけるものであり、局所的な勾配補正を施したものではないが、簡単のために添字“0”を省略する。

漂砂量についてはやはり著者の一人によって提案されているものを基礎にして定式化する。波のみの場合の粒径別漂砂量 $q_{bi}^* = i_b q_b / (i_b \sqrt{sgd_i})$ は次式で表される(田中ら, 1988)。

$$\bar{q}_{bi}^* = \tau_i^{*0.5} (\tau_i^* - \tau_{ci}^*) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\tau_i^* = \hat{u}_w^{*2} / (sgd_i)$ であり、 $\hat{u}_w^*$ は波による摩擦速度の最大値である。粒径別移動限界シールズ数 τ_{ci}^* は式(9)により評価される。上式は掃流状態の砂移動に対するものであり、移動方向は岸向き(波の進行方向)である。

上式において $\hat{u}_w^*$ を波と流れによる値 $\hat{u}_{cw}^*$ に置き換えることによって、波・流れ共存場の算定式に拡張する。ここで、波・流れ共存場における剪断力は田中・首藤(1980)の摩擦係数によってもとめる。このようにして得られる総漂砂量に対する実測漂砂量の比 β を求め、 τ_c/τ_w との関係調べた結果が図-3である。ただし、 τ_c 、 τ_w はそれぞれ波・流れ共存時の底面剪断力の定常流成分および

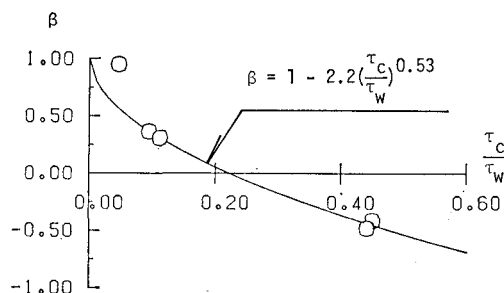


図-3 波と流れによる漂砂量

波動成分の最大値である。図より、定常流成分が卓越するにつれて漂砂量が減少し、 $\tau_c/\tau_w=0.2$ 付近で沖向き漂砂に転ずることがわかる。これは、今回の実験では波と流れが逆方向に進むため、流れは岸向きの剪断力を低減させる方向に作用するためである。本研究では、図中の曲線を当てはめ、次式によって波・流れ共存場の粒径別漂砂量を算定することとした。

$$\bar{q}_{bi}^* = \tau_i^{*0.5} (\tau_i^* - \tau_{ci}^*) \left\{ 1 - 2.2 \left(\frac{\tau_c}{\tau_w} \right)^{0.53} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $\tau_i^* = \hat{u}_{cw}^{*2} / (sgd_i)$ であり、また、上式は岸向きの移動量を正とする。

(2) 分級現象の実験結果と計算結果

図-4の丸印は波・流れを作用させてから75分後の砂層表面縦断方向の粒度組成を示したものである。図には、定常流と波の進行方向および砂の移動方向も示した。漂砂の上手ほど、最大粒径である3.5 mmの底質の割合が増加しており、粗粒化していることが分かる。また、移動床全体にわたって0.33 mmの細粒分が非常に多く存在している点特徴的である。図-1に示したようにこの粒径の存在比率は10%程度であるにもかかわらず、波と流れを作用させた結果、この粒度のものが選択的に表層に現れ、 $x=150\text{ cm} \sim 200\text{ cm}$ 付近では50%にも達している。

一方、数値計算では粗粒化の様子が比較的良好に再現されている。なお、 $x=200\text{ cm}$ 付近での各粒径の存在率は初期値のままであり、この時点ではアーマー・コートのフロントが $x=150\text{ cm}$ 付近に達している。波・流れを作用させた時点での平均粒径は1.75 mm程度であり、計算によればこれより細かい砂は大粒径のものとは逆に下流方向に増加傾向を示している。実験結果も定性的には同様な傾向を示すが、先に述べたように細粒分の割合がかなり大きくなっており、計算ではこのような選択的

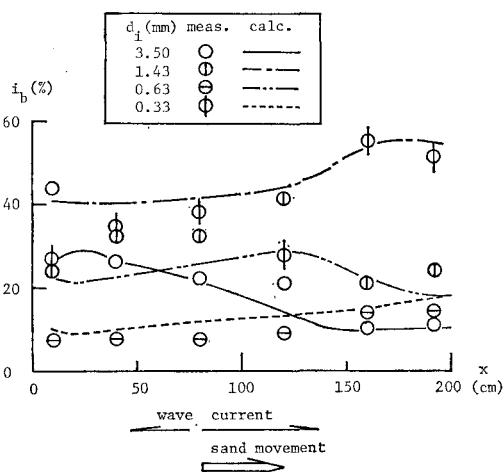


図-4 移動床表層の粒度組成 ($t=75$ 分)

な移動過程を予測することが出来ていない。これは、式(9)では移動限界摩擦速度の粒径に対する依存性が十分に表現されていないことによると考えられる。

図-5 は 165 分後の粒度組成分布を示したものである。図中の記号や線の意味するところは図-4 と同一である。やはり、漂砂上手での粗粒化と下手での細粒分の増加が顕著である。

次に、75 分および 165 分における平均粒径の分布を図-6 および図-7 に示す。時間の経過と共に、上流側から粗粒化していることがわかる。先の図-4、図-5 に比べ計算値の適合度が良好である。これは先の図において粒径 3.5 mm の底質の存在比率が比較的良好に予測されていたことによって、すなわち、このケースにおいては平均粒径の算出に際して、小粒径の比率の大小の影響は小さい。

図-8 は漂砂下手側の固定床で捕砂された漂砂の粒度

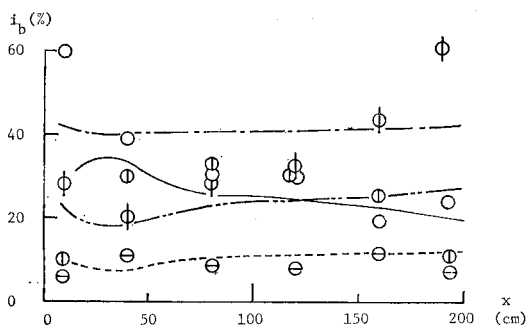


図-5 移動床表面の粒度組成 ($t=165$ 分)

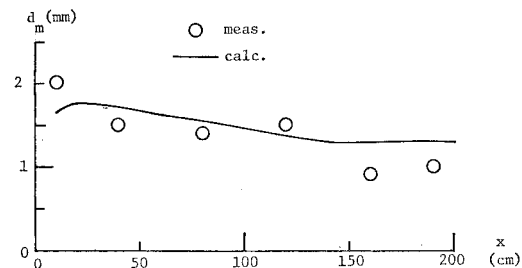


図-6 平均粒径の縦断分布 ($t=75$ 分)

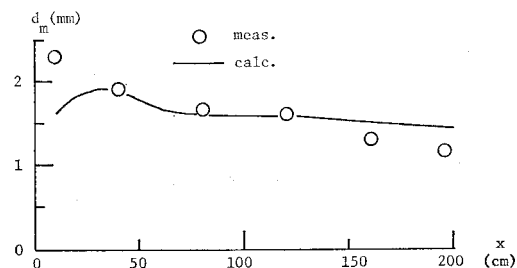


図-7 平均粒径の縦断分布 ($t=165$ 分)

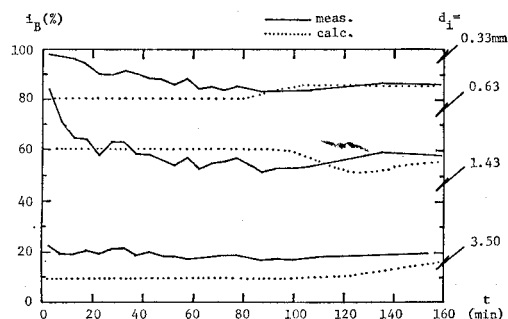


図-8 漂砂の粒度組成の経時変化

組成の時間変化である。実線が実測値であり、点線は計算値である。計算ではアーマコートが伝播して来る 80 分まで漂砂の粒度組成に変化が無いが、実測値は実験開始直後から変化がみられる。実験によれば、 $d_i=1.43$ mm の底質は当初かなりの量の移動がみられるが、20 分程度で落ち着く。一方、0.33 mm の砂粒は実験開始直後、きわめて小量であるが、長時間に渡って徐々に増えている。このように、実験では底質分級現象が波・流れの作用直後からかなり極端に起こっているのに対し、計算ではそれが十分に表現されていない。今後、この点についてさらに検討を行う必要がある。

5. おわりに

本研究で得られた成果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 波のみ場合に対して得られた粒径別漂砂量式を、波・流れが共存する場に拡張し、式(11)が得られた。
- (2) 混合砂移動床に長時間波と流れを作用させることにより、漂砂の上手にアーマ・コートが形成され、徐々に下流方向に伝播することを確認した。
- (3) (1) で得られた漂砂量式を用いて、(2) の底質分級現象の数値計算を行った。平均粒径についてはほぼ実測値に対応するものが得られたが、個々の粒径毎の存在比率については、特に小粒径で差が大きい。これは、移動限界摩擦速度算定式の粒径依存性が十分な精度で評価されていないためであると考えられる。今後、この点を考慮してモデルを改良すると共に、底質が浮遊するケースについても検討を行いたいと考えている。

謝辞： 本研究に対し、文部省科学研究費の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 田中 仁・首藤伸夫 (1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀寛三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 111-115.

- 平野宗夫 (1971): *Armoring* をともなう河床低下について, 土木学会論文集, 第 195 号, pp. 55-65.
- 道上正規・鈴木幸一 (1988): 混合砂礫河床における増水・減衰時の平衡流砂量, 土木学会論文集, 第 339 号/II-10, pp. 95-104.
- 吉竹豊尚・田中 仁・首藤伸夫 (1989): 波と流れの共存場における混合砂の粒度分布の効果, 第 44 回年講概要集 (II), (印刷中).
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の予測モデル, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Bell, R. G. and A. J. Sutherland (1983): Non-equilibrium bedload transport by steady flows, *J. Hydraulic Engng.*, Vol. 109, No. 3, pp. 351-367.
- Bradshaw, P. and Wong, F. Y. F. (1972): The reattachment and relaxation of a turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 52, No. 1, pp. 113-135.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of non-uniform sediment concentrations, *J. Hydraulic Div.*, Vol. 91, No. HY4, pp. 225-247.
-