

1. まえがき 砂礫堆形成河道では河床の三次元性や流水の蛇行のために、掃流力の大きさや作用方向が場所的に変化し、その結果、河床の粒度構成¹⁾や流砂量も場所的に変化する。このような河道における流砂量を把握するため、本文では砂礫堆河道における流砂量の場所的な変化特性について実験的に検討し、その結果をもとに平均流砂量および河道の縦横断方向の流砂量変動の算定を行った。

2. 実験の概要 実験には、長さL=20m、幅B=0.6mの側面ガラス張り鋼製可変勾配循環水路を用いた。実験は、図-1に示すような粒度分布を有する混合粒径砂を厚さ20cmに敷き詰め、全粒径が移動する条件で通水し、単列の砂礫堆を形成させた。なお、表-1は実験条件および主要水理量である。実験では、水位および河床位を触針式砂面計を用いて前者に対しては停水直前に、後者に対しては停水後に測定した。また、河床形状は停水後のスケッチと河床位から読み取った。表-2に本実験で形成された砂礫堆の波長および波高を示す。流砂量は平均流砂量として砂礫堆半波長（1波長は流水の1蛇行長で定義する）分を水路下流端で捕捉して求めるとと

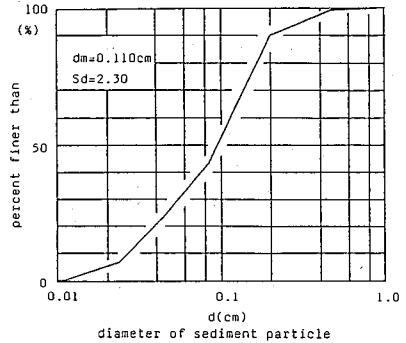


図-1 実験砂の粒度分布

もに、砂礫堆の任意の位相における横断面流砂量も測定した。さらに、水路下流端に幅3cmのトラップを、水路中央および両側壁から9cmの位置に設置し、各位置における流砂量の縦断方向の変化を測定した。

表-1 実験条件

Run No.	discharge Q_w (cm^2/sec)	mean depth h_m (cm)	Froude No. Fr.	energy slope I_g	shear velocity u_* (cm/sec)	relative depth h/d_m
M-1	65.0	1.60	1.03	0.011	4.3	14.5
M-2	81.7	1.80	1.08	0.014	5.0	16.4

3. 砂礫堆河道の流砂量変動 図-2は水路下流端で採取された砂礫堆の各位相における横断面流砂量と流砂の平均粒径を示している。ただし、流砂量については平均流砂量、平均粒径については砂礫堆半波長に対する全流出砂の平均粒径によって基準化した無次元量である。2.0

表-2 砂礫堆の波長・波高

Run No.	wave length L_B (cm)	wave height Δ_{\max} (cm)
M-1	540	3.00
M-2	550	3.05

まず流砂量についてみると、砂礫堆の先端部で最小、中央部で最大となって周期的に変動することがわかる。そのピークは位相が0.2~0.3および0.8付近に現れる。この位相は砂礫堆の最大波高が現れる位相にほぼ等しくなっている。また、平均流砂量に対する変動幅は0.5~1.5倍程度であり、流砂量の最大位相と最小位相で約3倍の差が生じる。このことは均一砂を用いて同様の実験を行

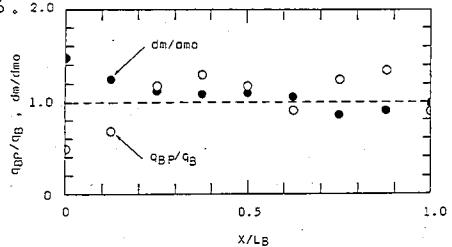


図-2 砂礫堆の位相による流砂量と平均粒径の変化

て、前縁上部の摩擦速度は漸減し、逆に下部は漸増している。同図にはEgiazaroffによる各粒子の移動限界摩擦速度を示した。前縁段上では流れは限界摩擦速度以上で全ての粒子が前縁上端を通過可能であることがわかる。一方、段下では限界摩擦速度以下となり粒子がここで堆積することになる。しかし、ここに示した摩擦速度は水路の縦断方向成分なので、粒子の移動方向に作用する摩擦速度は水路の横断方向の成分との合力となるためこれよりも増加することから、前縁部に堆積せずに流下する粒子が存在すると考えられる。このような現象は次に示す粒子の分級効果となって現れることになる。

さて、このような前縁部での流況下において流砂の挙動はどうであろうか。図-2は混合砂によって形成させた砂礫堆を速乾性の接着剤で固定した河床において、トレーサー実験によって得られた、砂礫堆前縁部での粒子の堆積率と段落ち高との関係を粒径別に表したものである。ただし、堆積率は前縁上部を通過した粒子に対する、前縁下部での残留粒子の割合で定義する。

図中、 Δ_j は任意位置の段落ち高、 $\bar{\Delta}$ は平均段落ち高である。図からわかるように、前縁部では全ての粒子が堆積するわけではなく、一部の粒子は堆積せずに流下している。さらに、粒径が小さいほど堆積率は小さい。そして、このような傾向は段落ち高が小さくなるにしたがって顕著になっていることがわかる。ただし、図-2の結果は固定床実験で得られたものなので、移動床の場合と同一の結果となるとは限らないが、前縁部での流砂の運動機構は本質的には共通していると考ええる。

図-2は粒子の堆積率を前縁部の段落ち高の変化によって整理したものであるが、堆積率は水理量によって変化すると考えるべきである。そこで、段落ち高と水理量との関係について若干述べておく。図-3に、図-1に示した段落ち上・下部での摩擦速度の比と図-2に示した段落ち高との関係を示した。両者の相関は高く、このように整理すると両者の関係は次式で表すことができる。

$$\hat{\Delta}_j = \frac{\Delta_j}{\bar{\Delta}} = \exp\left\{\frac{2}{3}(\tilde{u}_x - 1)\right\} - 1 \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{u}_x = u_{xu}/u_{xl}$ 、 u_{xu} は前縁部段上での摩擦速度、 u_{xl} は段下での摩擦速度である。

図-3は2つのパラメータとも無次元量で表されていることから、式(1)の関係は実験条件が異なってもほぼ成り立つと考えられる。

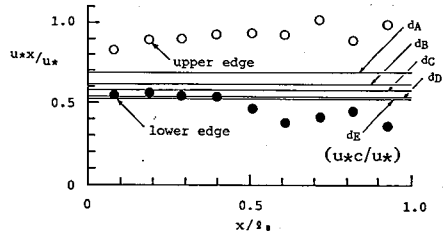


図-1 砂礫堆前縁に沿う段上および段下の摩擦速度の変化と粒子の移動限界摩擦速度

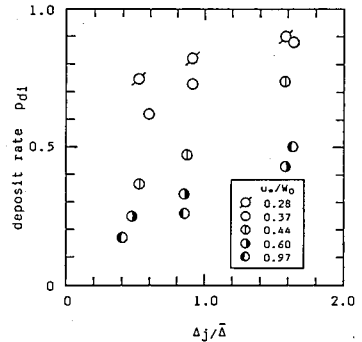


図-2 前縁部での粒子の堆積率と波高との関係

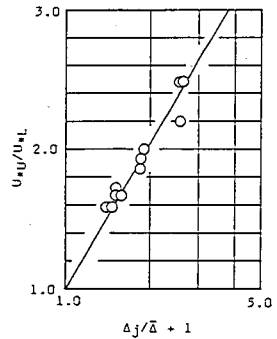


図-3 前縁部段上と段下の摩擦速度の比と段落ち高さとの関係

以上の結果から、砂礫堆前縁部での粒子の分級効果を粒径別の粒子の堆積率で表現すると、図-2および図-3から水理量と粒径の関数で表すことができる。そこで、水理量として段落ち高を用い、粒径は清水中の沈降速度で表すとして、無次元量 $\Delta/\Delta_j \cdot u_x/w_{oi}$ を導入する。この無次元量が0のところでは堆積率=1、これが大きくなるにつれて堆積率=0に近づくような指数関数として、

$$p_{oij} = \exp \left\{ A \left(\frac{\hat{u}_{xi}}{\Delta_j} \right) \right\} \quad (2)$$

とおく。ここに、 $\hat{u}_{xi} = u_x/w_{oi}$ である。また、Aは図-4より-0.9とする。

図-5は式(2)による堆積率の計算結果と実験値との比較である。現象の特性や実験の性質から考えて、ここで提案した堆積率の推定式の適合性は良好であるといえる。また、図-6は移動床実験によって得られた前縁部前面の粒度分布と式(2)による計算結果を示している。前縁斜面の粗粒化の状況を十分に表現しているとは言い難いが、その傾向を知ることは可能である。この原因として、式(2)で用いる前縁への接近流砂の粒度分布を平均流砂量の粒度分布として与えていることが考えられる。現時点では砂礫堆上の任意の位置での流砂の粒度分布を客観的に知ることができないのでやむを得ないが、この点に関しては今後より詳細な検討が必要であると考えている。

4. 砂礫堆の移動速度の算定 前節で得られた前縁部での粒子の堆積率を砂礫堆の移動速度の算定に適用する。砂礫堆の移動ともなつて流砂量は大きく変動するため、移動速度を知ることは、例えば洪水時に流砂量を測定しようとする場合、そのサンプリング時間間隔の検討などに役立つであろう。

さて、砂礫堆の移動は流砂の連続式に、前節で提案した前縁部での粒子の堆積率の考え方をを用いると次式によって示される。

$$V_o = \frac{\sum_{i=1}^n p_{oij} \cdot q_{ocij}}{(1-\lambda) \cdot \Delta_j} \quad (3)$$

ここに、 p_{oij} は前縁斜面での粒子の堆積率、 q_{ocij} は前縁部段上への接近流砂量、 Δ は波高であり、添字のiは各粒径粒子、jは砂礫堆前縁の位置を表す。ただし、砂礫堆がその形状を変えずに移動するためには、式(3)が任意の砂礫堆前縁部で成り立たなければならない。

さて、(3)式をもとに砂礫堆の移動速度を算定するためには、前縁部の任意の位置における粒径別の粒子の堆積率 p_{oij} 、前縁への接近流砂量 q_{ocij} 、波高 Δ_j を与える必要がある。粒子の堆積率は前節

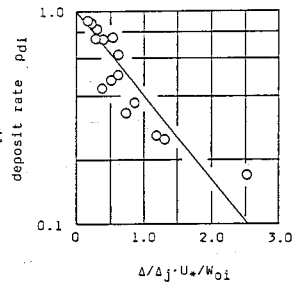


図-4 前縁部での粒子の堆積率の評価

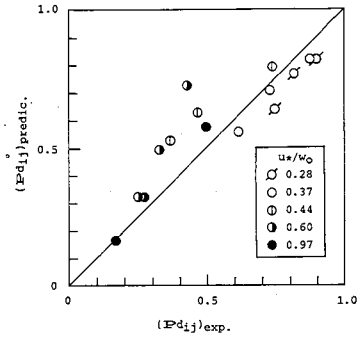


図-5 堆積率の計算値と実験値との比較

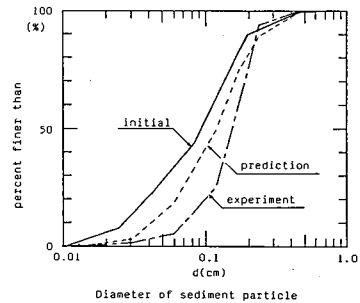


図-6 前縁部表面の粒度分布の評価

での考察結果をもとに式(2)で与える。そして、 q_{bc} については、現時点では適切な推定式がないので、平均流砂量の α 倍として $\Sigma q_{bc i} = \alpha \Sigma q_{B i}$ とおく。平均流砂量は前報¹⁾の結果から芦田・道上の粒径別流砂量式²⁾を用い、 α の値は著者が別途行った実験³⁾から1.8とした。

以上より、砂礫堆の移動速度は次式で与えられる。

$$\frac{V_B}{u_x} = \frac{30.6}{1-\lambda} \left\{ \Sigma f_o(d_i) p_{s i} \tau_{x i} \left(1 - \frac{\tau_{x c i}}{\tau_{x i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{x c i}}{\tau_{x i}}} \right) \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \right\} \left(\frac{\Delta_j}{\Delta} \right)^{-1} \Phi \left(\frac{h}{d_m} \right)^{-1} \quad (4)$$

ただし、 $\Phi = (\Delta/\Delta_{max}) \cdot (\Delta_{max}/B) \cdot (B/h)$ である。ここに、 Δ_{max} は最大前縁段落ち高であり、従来の研究^{4), 5)}を参考に Φ の内容をそれぞれ、0.5、0.06、20として $\Phi=0.6$ である。

式(4)は砂礫堆の前縁部の任意の位置に対して成り立つので $\Delta_j/\Delta=1$ の位置を選ぶと、移動速度は次式で求められる。

$$\frac{V_B}{u_x} = \frac{51}{1-\lambda} \left\{ \Sigma f_o(d_i) p_{s i} \tau_{x i} \left(1 - \frac{\tau_{x c i}}{\tau_{x i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{x c i}}{\tau_{x i}}} \right) \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \right\} \left(\frac{h}{d_m} \right)^{-1} \quad (5)$$

ここに、 $p_{s i} = \exp[-0.9 \hat{u}_{x i}]$ である。

図-7に、式(5)による移動速度の計算値と実験値の比較を示した。同図には、藤田・村本ら⁶⁾および芦田・塩見⁷⁾による実験結果も示した。ただし、後者は他の実験とは条件が異なっており、 $B/h=36$ とした。多少のばらつきは認められるがおおむね良い結果を得ている。

5. あとがき 本文では、砂礫堆の前縁部における流れと流砂の分級現象について検討し、この結果を砂礫堆の移動速度の算定に適用してその算定式を提案した。今後、砂礫堆河道の流砂量変動を記述する流砂量式についての検討を行って行きたい。

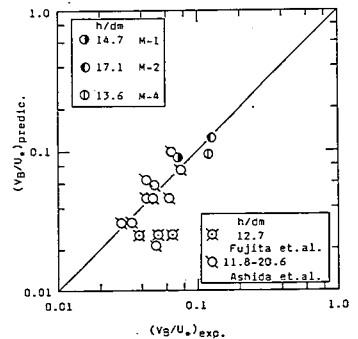


図-7 砂礫堆の移動速度の計算値と実験値の比較

参考文献 1)三輪 浩・大同淳之: 砂礫堆河道の流砂量、平成2年度砂防学会研究発表会、1990。 2)芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No.206、1972。 3)三輪 浩・川合 茂・清野雅雄・安養寺信夫・宮本邦明: 急勾配水路における交互砂州の形状特性と流砂量、昭和62年度砂防学会研究発表会、1987。 4)藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二: 交互砂州の発達過程に関する研究、京都大学防災研究所年報、第24号B-2、1981。 5)中野聖人・東山 直: 交互砂州河床における粒子の分級現象に関する基礎的研究、舞鶴工業高専卒業論文、第4章、1988。 6)村本嘉雄・藤田裕一郎: 中規模河床形態の分類と河床条件、第22回水理講演会論文集、1978。 7)芦田和男・塩見靖国: 水路における砂礫堆の水理特性について、京都大学防災研究所年報、第9号、1966。