

## 1. 序論

ダム直下流の河川区間では、砂礫の供給量が極端に減少した結果、河床の低下に加えてその粗粒化が進行した。この区間の河床は、洪水時にも移動することのない大礫（あるいはこれより大きな材料）でその骨格が形作られていることがあり、これより小さな砂礫はそのその間隙を充填するように存在している。このような河床状況の改善を目指して、近年、ダム排砂や置き土などの対策が試みられるようになってきた。しかし、従来の掃流砂・浮遊砂についての知見のみを基にして、上記のような粒度幅の極端に広い混合粒径河床の変動過程を理論的に説明する、あるいは数値解析により再現する、ということには限界がある。すなわち、上記のような混合粒径河床を対象とした流砂過程に関する研究は十分とはいえず、依拠するに足る知見はそれほど多くは得られていない。ただし、芦田・藤田<sup>1)</sup>、福島・櫻井ら<sup>2)</sup>の研究は重要であり、今後の研究の進展に向けて足がかりになるものである。

このような点に鑑み、本研究ではあえて三粒径からなる混合河床の流砂過程に注目し、その変動過程に関わる基礎的な実験を行った。ここでは、移動することなく骨格を構成する大礫あるいは巨礫と、その間隙を充填する二粒径の砂礫とからなる河床を対象とする。ここに、礫は掃流砂として、砂は浮遊砂としてそれぞれ移動するものとする。本論文はこれまで行われた一連の実験の結果を報告するものであり、粒度幅の広い混合粒径河床における流砂過程の本質に迫ることを最終的な目的としている。

## 2. 実験の概要

本実験は全長 5 m、幅 0.1 m、高さ 0.1 m の正方形断面を有するアクリル製閉水路を用いて行われた。水路の上流端から 2.5 ~ 3.5 m の区間の底部には深さ 0.1 m の凹部が設けられており、ここに三粒径からなる模擬河床を構成した。この河床の骨格は、大礫を模した粒径  $D_L$  が 50 mm のアルミナ球（以下、L 粒子と呼ぶ、比重 3.98）により構成されるものとし、その個々が互いに接するように横断方向に 2 個、縦断方向に 20 個の粒子を直交配置した。なお、本実験の範囲ではこの粒子が移動することはない。この河床の間隙は、掃流砂として移動する粒径  $D_M$  が 5 mm のガラスビーズ（M 粒子、比重 2.5）と、浮遊砂として移動する 60% 粒径  $D_S$  が 0.15 mm の珪砂 7 号（S 粒子、比重 2.65）により充填されており、その初期比率を 3:7、5:5 あるいは 7:3 とした。実験は同一条件下で複数回行われ、実験装置の制約から上流からの給砂は行わないものとした。これにより、模擬河床の静的安定状態についての検討を行う。なお、M 粒子として、粒径 2 ~ 5 mm の範囲でふるい分けられた珪砂を用いた対照実験も行っており、M ならび S 粒子の比重の違いが得られた結果に定性的な差異を生むことがないことを確認している。水理条件としては、流れの摩擦速度  $u^*$  を 0.07 ~ 0.11 (m/s) 程度としており、これは M 粒子の無次元掃流力に換算して  $\tau^*_M = 0.06 \sim 0.2$ 、S 粒子の沈降速度  $w_{os}$  で除した無次元量に換算して  $u^*/w_{os} = 4 \sim 7$  に相当する。

## 3. 実験結果と考察

河床骨格が大礫で構成され、これ自体が移動することのない水理条件下で生じる流砂現象については未知の点が多く残されている。L 粒子と S 粒子のみで構成される河床を対象とした検討は、対象とする粒径こそ違うものの芦田・藤田<sup>1)</sup>によって行われており、浮遊砂として河床を離脱する S 粒子の巻き上げ速度式が提案されているほか、S 粒子に作用する摩擦速度  $u^*_s$  の L 粒子の頂部における摩擦速度  $u^*$  に対する比として定義される遮蔽係数  $k_s$  について関係が明らかにされている。本研究で対象とする条件の範囲内では、この関係が成り立つことが確認された。次に、河床が L 粒子と M 粒子の二粒径で構成されている場合の実験を新たに行ったところ、図-1 に示すような関係が得られた。図の縦軸が L 粒子の頂部から間隙に位置する M 粒子層の上面間での鉛直距離  $\Delta_M$  を  $D_L$  で除した無次元距離を、横軸は掃流砂として移動する M 粒子にとっての遮蔽係数  $k_M$  をそれぞれ表している。静的安定状態においては M 粒子層の表面に位置する M 粒子は移動限界の状態にあると考えられるため、これに作用する摩擦速度  $u^*_M$  をその無次元限界掃流力から評価することにした。そして、この値を静的安定状態において計測された摩擦速度を  $u^*$  で除すことで遮蔽係数  $k_M$  を求めた。図-1 中の緑色の実線は、浮遊砂を対象として芦田・藤田により提案された  $k_s$  の関係であり、これと  $k_M$  の関係とは概ね一致することが見てとれる。ただし、L 粒子の平面配置が異なる場合にはこの  $k_M$  の関係についても変化する可能性もある。今後は、たとえば千鳥状の配置とした場合などについて、さらに検討する必要がある。

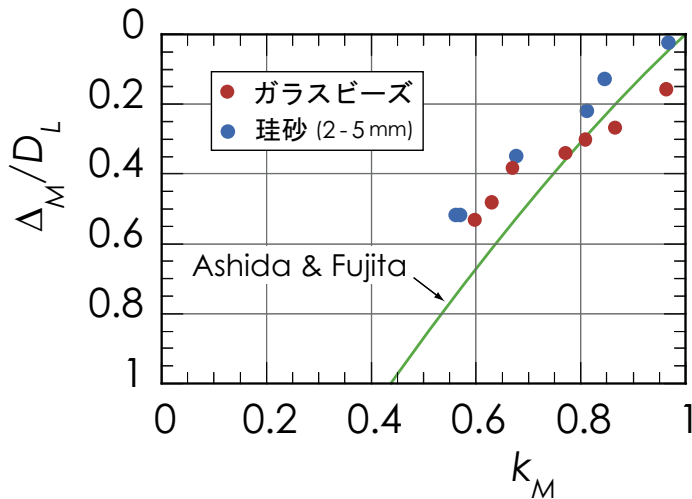


図-1 遮蔽係数  $k_M$  と  $\Delta_M/D_L$  の関係

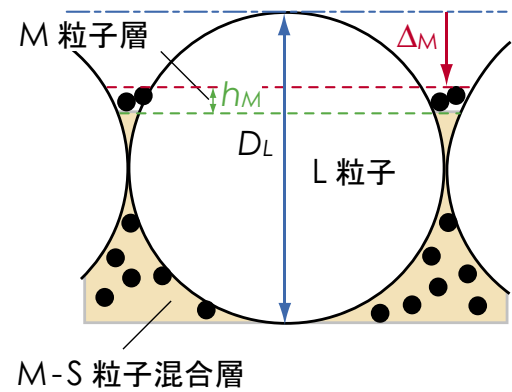


図-2 三粒径河床の概略図

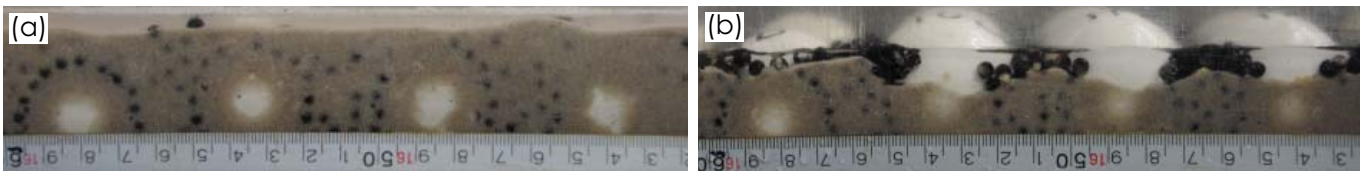


写真-1 側方から撮影された模擬河床 ( $u^* = 0.073$  (m/s)): (a) 通水開始前の初期河床, (b) 通水後の静的安定河床状態

次に、L 粒子からなる河床骨格の間隙が M-S の二粒径で充填されている場合の実験結果について説明する。写真-1 には、その初期比率を 5:5 とした実験の一つを例に、その前後において側方から撮影された河床状の写真が示されている。初期状態として写真-1(a) のような状態にあった河床が、M 粒子が掃流砂として、S 粒子が浮遊砂として移動した結果として、写真-1(b) のに示されるような静的安定状態となった。この状態を模式的にまとめると、図-2 のようになることが理解された。静的安定状態における L 粒子の間隙を鉛直方向に見ると、次のような特徴的な粒子配列となることが確認された。(1) 間隙の上方には M 粒子のみによる層 (M 粒子層) が形成される。この層厚  $h_M$  は M 粒子の粒径  $D_M$  の概ね 1~2 倍程度となり、掃流力によらずほぼ一定となる。(2) この層の上面の高さを表す図中の変数  $\Delta_M$  は掃流力の増大に伴い増加する。(3) この層の下方には、M と S の二粒径からなる混合層ができ、その厚さは掃流力によるものの、M と S 粒子の混合比率については初期比率から大きく変化しないとの結果が得られた。芦田・藤田による浮遊砂の巻き上げ速度に関する知見によれば、M 粒子上面から  $D_M$  の概ね 1~2 倍程度の範囲にある S 粒子は巻き上げを受けることになるが、それ以下に位置する場合には遮蔽の影響で巻き上げが生じないとされる。三粒径河床における M 層の厚さ  $h_M$  は、このような遮蔽の関係から説明できるのではないかと考える。

#### 4. 結論

本研究では、粒度幅が極端に広い混合粒径河床における流砂過程に注目して、三粒径 (L-M-S 粒子) からなる模擬河床を対象とした基礎的な移動床実験を行った。まず、L 粒子と M 粒子からなる二粒径河床を対象とした実験から、掃流砂として移動する M 粒子が L 粒子の遮蔽をどのように受けるかについて検討した。この結果は、芦田・藤田による明らかにされている浮遊砂に対する結果と概ね一致するものとなった。次に、三粒径からなる河床を対象とした実験から、静的安定状態における河床には特徴的な鉛直構造が現れることを明らかにしたほか、可能な限りその定量化に努めた。今後は、河床骨格の配列を変えた場合の影響を調べるほか、給砂しつつ実験を行うことで河床の動的平衡状態についても明らかにしていく予定である。本研究の遂行に当たり、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 C (研究代表者：関根正人, No.21560546) の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献：

- 1) 芦田・藤田：平衡・非平衡浮遊砂量算定の確率モデル，土木学会論文集，第 375 号 / II -6, 107-116, 1986.
- 2) 福島・櫻井・箱石：大きな石による河床再生技術に関する実験的検討，水工学論文集，第 54 巻，763-768, 2010.