

三つの粒径集団の砂礫により構成された河床の静的安定状態

早稲田大学理工学術院	正会員	関根 正人
早稲田大学大学院	○ 学生員	平松 裕基
早稲田大学大学院	学生員	三國 寛正

1. 序論

ダム直下流の河川区間では上流からの砂礫の供給量が極端に減少している。その結果、この区間では河床低下に加えてその粗粒化が進行している。このような状態が長い間続くと、出水時でも移動しない大礫によって河床骨格が構成されるようになる。この状況下で流砂として移動するのは、河床骨格の周辺や間隙に存在する砂礫やシルトである。このような河床状態の改善のために、排砂や置土などの対策が行われている。しかし、出水時でも移動しない大礫から砂礫・シルトにまで及ぶ「粒度幅が極端に広い河床」に対して十分といえる河床変動計算モデルは存在しない。このような土砂移動現象を既往の研究成果のみに基づいて論じることは難しい。ただし、芦田・藤田¹⁾、福島・櫻井ら²⁾の研究は重要であり、これらを足がかりとして新たな実験を行い、基礎的な情報を積み上げていく必要がある³⁾。本研究では模擬河床材料を三つの粒径集団に分割し、それぞれの粒径集団が一種類ずつの粒径によって代表できるものとした。この三つの粒径集団とは、流水時でも移動しない大礫、その間隙を充填する掃流砂あるいは浮遊砂として輸送される礫あるいは砂である。本論文では静的安定状態について注目し、この流砂現象の本質を理解することを目指している。

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循環型閉水路を用いて行われた。水路の上流端から 2.5 ～ 3.5 m の区間の底部には長さ 1.0 m、幅 0.1 m、高さ 0.05 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。この河床骨格は、流水時でも移動しない大礫を模したものの（以下、L 粒子）によって構成されるとし、その配置を格子状配置と千鳥状配置とした。この L 粒子としては、格子状配置の場合には粒径 D_L を 50 mm、千鳥状配置の場合には 40 mm のアルミナ球を用いた。この河床の間隙には、掃流砂として輸送される粒径 D_M が 5 mm のガラスビーズ（M 粒子）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）が充填されている。ここで、M 粒子と S 粒子の総体積に占める S 粒子の体積比率を R_{ps} と定義する。この値を 0.0 及び 0.5 ～ 1.0 とした。この範囲とした理由は、この範囲外では鉛直方向に均一な河床を形成できないためである。実験は同一条件下で複数回行われ、実験装置の制約のため上流からの給砂は行わないものとした。そのため、模擬河床の静的安定状態についての検討を行う。水理条件としては、流れの摩擦速度 u^* を 0.06 ～ 0.11 m/s としており、これは M 粒子の無次元掃流力に換算して $\tau_{*M} = 0.05 \sim 0.16$ 、S 粒子の沈降速度 w_{oS} で除した無次元量に換算して $u^*/w_{oS} = 3.7 \sim 7$ に相当する。

3. 実験結果と考察

まず、L 粒子の間隙が S 粒子のみで充填される場合については、対象とする粒径こそ違うものの芦田・藤田¹⁾による研究があり、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、平均底面せん断力から換算される摩擦速度 u^* に対する浮遊限界に相当する摩擦速度 u_{*s}^* の比として定義される遮蔽係数 k_s についての関係が明らかにされている。本実験では、この関係と矛盾しない結果が得られた。次に、L 粒子の間隙を M 粒子のみで充填される場合の実験を行ったところ、図-1 に示すような関係が得られた。図の縦軸には L 粒子の頂部からその間隙に存在する M 粒子の集団の上面までの鉛直距離 Δ_{M0} を D_L で除した無次元距離を、横軸は掃流砂として輸送される M 粒子の遮蔽係数 k_M （平均底面せん断力から換算される摩擦速度 u^* に対する移動限界に相当する摩擦速度 u_{*c}^* の比）をそれぞれ表している。なお、図中において●は格子状配置の結果を、▲は千鳥状配置の結果をそれぞれ表している。図-1 中の黒色の実線は、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

キーワード：流砂のメカニズム、混合粒径河床、静的安定状態、掃流砂、浮遊砂

連絡先：〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1, TEL 03-5286-3401, FAX 03-5272-2915

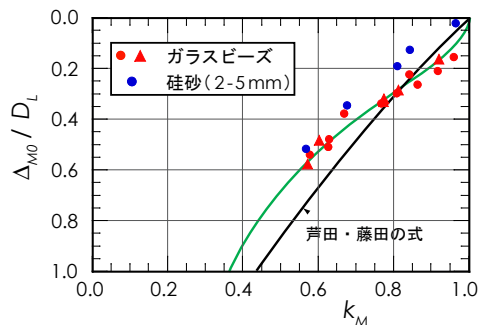
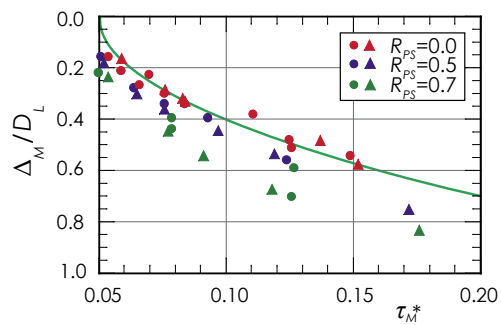
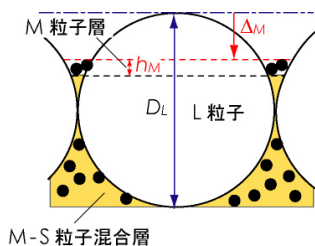
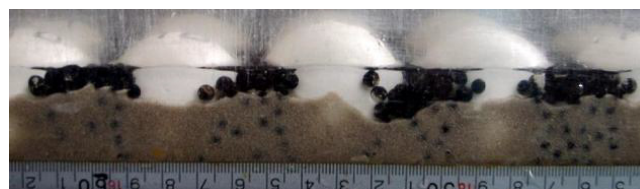
図-1 Δ_{M0}/D_L と遮蔽係数 k_M との関係図-3 Δ_M/D_L と無次元掃流力 τ_M^* との関係

図-2 三粒径河床の静的安定状態の模式図

写真-1 通水後の静的安定河床状態 ($R_{PS}=0.5$, $u^*=0.068$ m/s)

り、これと k_M の関係とは概ね一致する。ただし、系統的なずれが見られる。本実験的により導かれた関係として ($\Delta_{M0}/D_L = 1.8 \times (\tau_M^* - \tau_C^*)^{0.5}$) が緑色の実線で示されている。

次に、L 粒子の間隙が M 粒子及び S 粒子によって充填される場合の実験結果について説明する。写真-1 に通水後において側方から撮影された河床状態の写真を示す。この静的安定状態における河床を模式化すると、図-2 のようになる。ここで、実験の結果として明らかになった河床の特徴をまとめると次のようになる。(1)L 粒子による骨格の間隙では明らかな鉛直分級が生じ、上方には M 粒子のみによる層 (M 粒子層) が形成され、その下方には M 粒子と S 粒子とからなる層 (「M-S 粒子混合層」) ができる。(2)M 粒子層の厚さ h_M は M 粒子の粒径 D_M の概ね 1 ～ 2 倍程度となる。(3)L 粒子の頂部から M 粒子層の上面までの鉛直距離 Δ_M は、L-M 実験で得られた値 Δ_{M0} よりも大きな値となる。図-3 には無次元距離 Δ_M/D_L と無次元掃流力 τ_M^* の関係を示した。なお、図-1 と同様に ● は格子状配置の結果を、▲ は千鳥状配置の結果をそれぞれ表している。(4)M-S 粒子混合層内の両者の混合比率はその初期値にほぼ等しい。以上の点に関して L 粒子の配置が異なることによる結果の差異は認められない。また、図-3 より同一の R_{PS} に対して Δ_M/D_L と τ_M^* の関係を描くとこれはそれぞれ一つの曲線となると推察される。この関係と h_M/D_M が 1 ～ 2 となることから、このような河床の静的安定状態を予測できると考えている。

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現象の解明を目的としており、その第一段階として静的安定状態に注目し、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て、L 粒子が掃流砂として輸送される M 粒子に及ぼす遮蔽効果について検討した。この結果は、芦田・藤田による浮遊砂に対しての結果と概ね近いものとなった。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は鉛直方向に分級することを明らかにしたほか、その構造についても概ね理解することができた。また、無次元量で整理すると、二粒径河床の場合にも三粒径河床の場合にも L 粒子の配置は静的安定状態に影響を及ぼすことは現在のところなかった。今後は、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.
 3) 関根・三國・平松: 三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 55 巻, 733-738, 2011.