

大礫を骨格とする河床の動的平衡状態に関する研究

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	門井 勇樹
早稲田大学大学院	学生員	○ 劔持 尚樹

1. 序論

ダム直下流の河道区間では出水時でも移動しないほど大粒径の礫が河床表面に露出し、河床の低下ならびに粗粒化がゆっくりと進んでいる。このような河床の骨格は洪水時でも移動しない大礫かそれ以上の粒径のものでできていることが多く、この間隙には浮遊砂として移動するシルトまで含むような「極端に粒度幅の広い材料」によって充填されている。このような河床における土砂移動現象を明らかにしようとする研究¹⁾はほとんどなされていない。このような現象の本質を理解するためには一連の基礎的な実験を積み上げることが必要であることから、これまでに河床の静的平衡状態に注目した実験的研究を行ってきた²⁾。本論文は、この結果を踏まえて行った第二段階の研究の結果を説明するものである。具体的には、(a) 上流側から給砂を行いながら通水することにより到達する「河床の動的平衡状態」について検討するとともに、(b) この状態における河床の鉛直構造が静的平衡状態におけるものとどのように異なるかを調べている。

2. 実験の概要

実験に用いた水路は、全長 16m、幅 0.2m、勾配 1/250 の長方形断面を有するアクリル製循環型開水路である。この水路の一部区間には深さ 0.05m の凹部が設けられており、ここに砂礫を敷き詰めることにより模擬河床を構成した。境界層を十分に発達させるため、移動床区間の上下流側の固定床区間の底面には後述する M 粒子と同一の粗度が貼り付けられている。平衡状態において河床に作用する摩擦速度を評価するため、水面形を 0.5m おきに測定した。この水面勾配 i_w を用いて断面平均の摩擦速度を求めた。また、この値を用い、全せん断力から壁面に作用するせん断力を差し引くことによって、河床面に作用する平均摩擦速度を評価した。また、M 粒子の移動限界を調べる実験も行っており、壁面の影響を除去する方法が妥当であることを確認している。河床骨格を構成する L 粒子は移動することはなく、掃流砂として移動する粒子を M 粒子、浮遊砂として移動するものを S 粒子と呼ぶことにし、河床はこれらの三つの粒径集団により構成されるとした²⁾。L 粒子としては直径 D_L が 5 cm のアルミナ製の球（比重 3.98）を用い、これらを格子状に密に配置した。M 粒子として比重が 2.5、粒径 D_M が 2mm のガラスビーズを用いた。一連の研究において重要なパラメータとして、L 粒子の間隙を充填する M 粒子と S 粒子の混合比率 R_{PS} がある。本研究では、一つの極端な場合に相当する $R_{PS} = 0$ の場合に注目した実験を行った。この場合には L 粒子の間隙が M 粒子のみで充填されているため、これを「L-M 実験」と呼ぶ。実験は流量一定の条件下で行われ、その流れを特徴付ける摩擦速度の値は、平衡状態において 0.047m/s 程度であった。この値を M 粒子の無次元掃流力 τ^*_M に換算すると 0.075 程度となる。給砂量の与え方についてはさまざまな方法を試みた上で、河床が最終的に到達する動的平衡状態における流出土砂量に等しい量の M 粒子を供給することにした。なお、これとは別に、下流端から流出する土砂を 5 分毎に計測し、これと同量のものを次の 5 分間に給砂するとした実験も行っている。結果として、平衡状態に達するまでの過程に違いが認められるものの、動的平衡状態における河床には大きな違いがないことを確認している。本論文では、この平衡状態における鉛直構造と流出土砂量に注目して考察を加える。

3. 実験結果と考察

L-M 実験で最終的に到達する平衡状態における河床は次のようになる。河床表面高は L 粒子頂部に相当するため変化することはないが、間隙を充填する M 粒子の上面は L 粒子頂部から鉛直距離 Δ_{Mo} だけ下方に位置するように変化する。この値を L 粒子の粒径で除した値 Δ_{Mo}/D_L を縦軸に、M 粒子の無次元掃流力 τ^*_M を M 粒子の無次元限

キーワード：流砂，河床変動，混合粒径，遮蔽効果，動的平衡状態

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

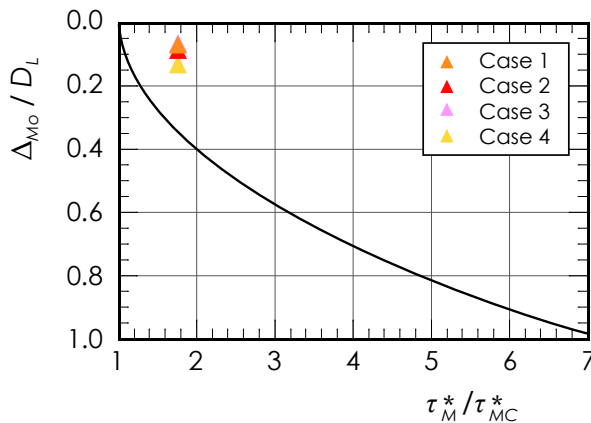
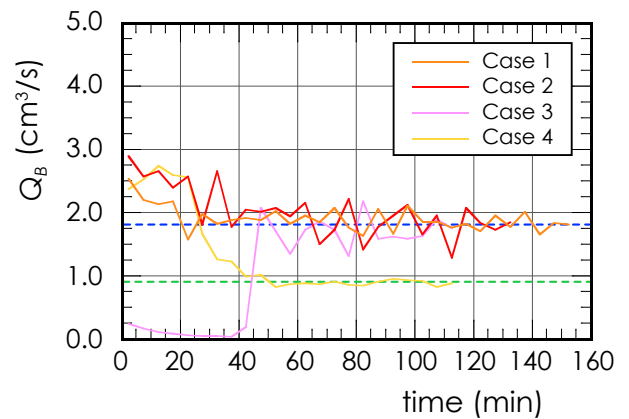
図-1 平衡状態における Δ_{M0}/D_L と掃流力 τ_M^*/τ_{MC}^* の関係

図-2 流砂量の時間変化

界掃流力 τ_{MC}^* で除した値 τ_M^*/τ_{MC}^* を横軸にとった関係を図-1に示した。図中の黒色の実線は静的平衡状態に対して導かれた実験曲線²⁾である。この図より、動的平衡状態における Δ_{M0} の値は、この曲線の上方に位置することから、M粒子層上面の高さは静的平衡状態におけるものよりもL粒子頂部に近い位置に現れることがわかる。これは、最上位に位置するM粒子が静的平衡状態においては移動限界の状態となるのに対して、動的平衡状態においてはそれ以上の掃流力が作用していることになるためである。このようにM粒子層上面の高さはL粒子による遮蔽の効果を受けて異なることになる。

次に、初期河床におけるM粒子層上面の高さと給砂量の違いが動的平衡状態に及ぼす影響について考える。ここでは、図-2に示した流出土砂量 Q_B (cm^3/s) の時間変化の測定結果を用いて考察を加える。ここに、Case 1は、水路下流端から流出したM粒子を時間遅れをもって上流側から給砂する場合の実験であり、Case 2は、動的平衡状態において実測された流砂量と同量のM粒子を時間によらずに給砂するとした実験を指す。この二つの実験では初期河床におけるM粒子層上面の位置をL粒子の頂部の位置に等しく設定した。これに対して、給砂条件をCase 2と同じにした上で、M粒子層上面の初期高さを静的平衡状態における位置にまで低くした場合の実験をCase 3とする。図中の青色の破線は動的平衡状態での流砂量を示している。この図を見ると、平衡状態に到るプロセスには違いがあるものの、Case 1～3の全てに対して最終的に到達する平衡流砂量は $1.81 \text{ cm}^3/\text{s}$ 程度となり一致することがわかる。また、平衡状態における河床の鉛直構造も同一となり、 Δ_{M0}/D_L の値は0.1程度となる。次に、初期河床をCase 1と同一とし、給砂量を時間によらずに一定とし、その値を平衡流砂量の1/2（すなわち $Q_{Bin} = 0.91 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ 、図-2中の緑色の破線に相当）とした実験をCase 4として行っている。この結果は図-1にも示されており、Case 1～3と比較すると Δ_{M0} が大きな河床として動的平衡状態に到ることがわかる。給砂量を減少させると、これと同量の流砂量となる位置までM粒子層上面が低下し、Case 1～3よりも小さな掃流力の状態となった段階で動的平衡状態に達するためである。このように、同じ流量条件下であっても給砂量に応じて異なる平衡状態に到ることがわかった。

4. 結論

本研究では、給砂を行う移動床実験を行うことで、河床の動的平衡状態についての検討を行った。結果として、動的平衡状態における河床の鉛直構造は、初期河床の状態にはよらないことが確認された。さらに、流砂量を1/2に減少させると、M粒子層の上面位置が低下して Δ_{M0}/D_L の値が大きな平衡状態に到ることがわかった。このことは、同一の流量条件下では給砂量の値に応じて異なるある平衡状態に達し、河床の鉛直構造を特徴づけるパラメータ Δ_{M0}/D_L は一つに定まることを意味する。今後は、L粒子骨格の間に充填された材料の R_{ps} が異なる場合の動的平衡状態についてさらに検討するとともに、異なる掃流力条件下での検討を行う予定である。

参考文献：

- 1) 芦田和男・藤田正治：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) 関根正人・平松裕基・三國寛正・門井勇樹：三つの粒径集団からなる河床の静的平衡状態と遮蔽効果，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68, I_931-936, 2012.