

骨格が大礫により構成された河床の動的平衡状態

早稲田大学大学院	学生員	○ 平松 裕基
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	劔持 尚樹
早稲田大学大学院(研究当時)	学生員	門井 勇樹

1. 序論

本研究の目的は、ダムの直下流のような「極端に粒度幅の広い河床」における流砂機構の解明である。このような河床の材料は、骨格を構成する大粒子（以下、L粒子）、掃流砂として移動する中粒子（M粒子）、浮遊砂として移動する小粒子（S粒子）の三つの粒径集団に分けられる。著者らはこれまで、各粒径集団を一つずつの粒径で代表させるとした実験的研究を進めてきた¹⁾。このような河床のことをL-M-S河床と呼ぶ。一連の研究では、河床にM粒子あるいはS粒子のみ存在しないような極端な場合についての実験や、供給する砂礫をM粒子あるいはS粒子のみとした実験も行っており、L-M-S河床の動的平衡状態について調べてきた。本論文では、もっとも一般的と考えられる場合、すなわち、このような河床にM粒子とS粒子をともに供給するとした条件下で、最終的に到達する河床の「動的平衡状態」の鉛直構造について明らかにする。

2. 実験の概要

実験は、全長16m、幅0.2m、勾配1/250の開水路を用いて行われた。この水路の上流端から8.5m～14mの区間には深さ0.05mの凹部があり、ここに以下の模擬河床材料を敷き詰めた。L粒子として粒径が $D_L = 5$ (cm)のアルミナ製の球（比重3.98）を、M粒子として粒径が $D_M = 2$ (mm)のガラスビーズ（比重2.5）を、S粒子として粒径が $D_S = 0.21$ (mm)の珪砂（比重2.65）を用いた。このM粒子の無次元限界掃流力は $\tau_{MC}^* = 0.042$ 、S粒子の沈降速度は $w_{os} = 0.025$ (m/s)である。動的平衡状態に到達した河床の鉛直構造は、通水開始時の河床の状態にはよらないことが確認されている¹⁾。そこで、本論文では、これまでに検討してきた静的平衡状態にある河床を初期条件として行われた実験の結果について説明する。上流側から供給するMならびにS粒子の量をそれぞれ Q_M 、 Q_S と呼ぶことにし、これらの値を試行錯誤の末、表-1のように設定して実験を行った。なお、通水中は流量ならびに給砂量は時間によらず一定とした。流量は5 l/sならびに9 l/s程度とし、この二つの条件の下で実験を行った。また、供給量 Q_M はいずれも $0.37 \text{ cm}^3/\text{s}$ とし、 Q_S についてはケースにより異なる値に設定した。実験は、原則として同一条件下で複数回行われ、その結果の数値は平均値を表している。

3. 実験結果と考察

L-M-S河床にM粒子とS粒子をともに供給すると、動的平衡状態における河床は、供給量に応じて異なる鉛直構造となる。その概念図を示したものが図-1である。M粒子の供給量を固定し、S粒子の供給量のみ異なる値に設定して実験を行うと、供給量の小さい条件下では図-1(a)あるいは(b)に示すような状態となる。この場合のL粒子頂部からM粒子ならびにS粒子の上面までの鉛直距離をそれぞれ Δ_M 、 Δ_S と定義する。供給量を図-1(b)の状態よりも大きくすると、図-1(c)のような状態となる。この場合には、L粒子の隙間に相当する部分にM粒子とS粒子とからなる新たな混合層が形成される。その上面までの鉛直距離を Δ と定義する。これらの値をL粒子の粒径 D_L で除したものを縦軸にとり、供給量 Q_S との関係で整理したのが図-2である。図-2(a)と(b)には、流量が5 l/sならびに9 l/s程度の場合の結果を分けて示した。図中の●は Δ_M/D_L を、●は Δ_S/D_L を、●は Δ/D_L を示している。また、赤色ならびに緑色の点線は静的平衡状態におけるM粒子とS粒子の上面の高さをそれぞれ表している。ここでは、流量が5 l/sの結果を中心に説明する。図-1(b)は、河床の最上面に位置するM粒子とS粒子の上面の高さが完全に一致する状態を表している。表-1ならびに図-2(a)を見ると、この状態に相当するのがCase 3であり、このときの供給量が $Q_S = 0.37 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ であることがわかる。供給量をこの値よりも小さくすると、S粒子により完全には充填されないM粒子群が河床の最

キーワード：混合粒径河床、動的平衡状態、掃流砂、浮遊砂、遮蔽効果

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

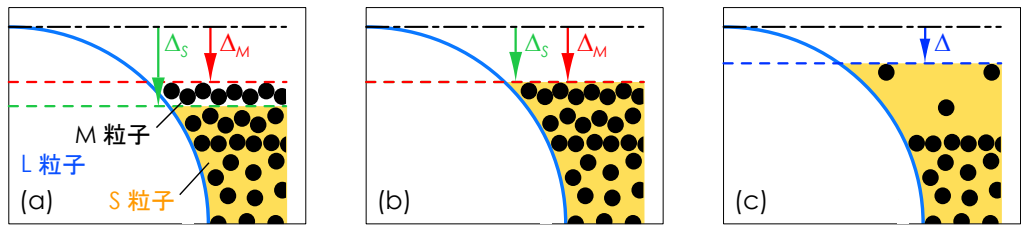


図-1 動的平衡状態における河床の鉛直構造の概念図

表-1 実験条件

Case	流量 (l/s)	水深 (m)	摩擦速度 u^* (m/s)	Q_M (cm^3/s)	Q_S (cm^3/s)
1	5.7	0.062	0.045	0.37	0
2	5.2	0.061	0.045		0.19
3	5.4	0.062	0.046		0.37
4	5.3	0.059	0.045		2.5
5	8.9	0.084	0.050		0
6	9.3	0.084	0.052		0.37
7	9.1	0.085	0.052		2.5
8	9.1	0.085	0.052		3.4
9	9.0	0.080	0.051		5.7

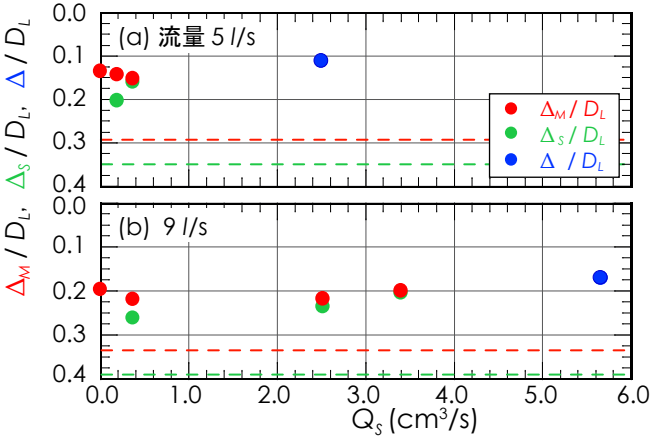


図-2 $\Delta_M(\Delta_s, \Delta_h)/D_L$ と Q_S の関係：赤色，緑色の点線は静的平衡状態における M 粒子，S 粒子の上面の高さを表している。

上面に露出する図-1(a)のような状態となる。これが Case 2 に相当する。図-2(a)中の●に注目してみると、Case 2 ならびに 3 の場合には $\Delta_M/D_L = 0.14, 0.15$ となり、M 粒子のみを供給した Case 1 の場合 ($\Delta_M/D_L = 0.14$) とほぼ同一の値となった。これは、M 粒子の間隙を S 粒子が充填していくような堆積の仕方をし、やがて動的平衡状態に到達するためと考えられる。すなわち、 Q_S が前出の限界の値 ($0.37 \text{ cm}^3/\text{s}$) 以下であれば、 Δ_M/D_L は流量と Q_M のみにより定まり、 Q_S にはよらないことを意味している。さらに、この限界の値よりも Q_S を大きく設定したのが Case 4 に相当する。この条件下では、M 粒子に比べて S 粒子の比率の大きな混合層が形成され、図-1(c)のような状態になった。図中の Δ を D_L で除した値は 0.11 となり、これは Case 1 における $\Delta_M/D_L = 0.14$ と比較すると小さい。

流量を 9 l/s とした場合の結果からも同じような知見が得られている。図-2(b)を見ると、 $Q_S = 3.4 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ の場合 (Case 8) には図-1(b)に相当する限界の状態となることがわかる。そして、これよりも S 粒子の供給量の小さい Case 6 と 7 の場合には、図-1(a)のような河床の鉛直構造となった。一方、供給量を大きくした Case 9 の場合には、同じく図-1(c)に示す状態になった。

本研究では、参照実験として、M 粒子を供給せずに S 粒子のみを Case 4 あるいは 9 と同量だけ供給するという実験も行った。その結果、河床の最上面には S 粒子のみの層が形成され、その上面の高さ Δ_s/D_L はそれぞれ $0.16, 0.25$ となった。図-2に示す Δ/D_L はそれぞれ $0.11, 0.17$ であるため、 Δ の値は Δ_s よりも小さいことがわかる。M 粒子と S 粒子をともに供給した場合の動的平衡状態の河床上面には両者が露出しており、S 粒子は L 粒子だけでなく M 粒子の遮蔽の効果を受ける。そのため、上流から供給されたものと同量の S 粒子を輸送できるような摩擦速度となる位置が、S 粒子のみ供給した場合に比べて上方に現れると考えられる。

4. 結論

本研究では、掃流砂として移動する中粒子 (M 粒子) の供給量を一定とし、浮遊砂として移動する小粒子 (S 粒子) の供給量を変えた一連の実験を行ったところ、L-M-S 河床の動的平衡状態には三つの状態が存在することがわかった。今後は、M 粒子の供給量が異なる条件下での実験を行い、このような動的平衡状態に到るまでの流砂過程を明らかにしていく予定である。

参考文献：

1) 平松裕基・関根正人・門井勇樹・剣持尚樹：大礫により骨格が構成された河床の動的平衡状態に関する実験的研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.70, No.4, 1_955-960, 2014.