

骨格が大礫により構成された河床に生じる鉛直分級とその構造

早稲田大学大学院

○ 本合 弘樹

早稲田大学理工学術院

関根 正人

早稲田大学理工学術院総合研究所

平松 裕基

早稲田大学大学院 (当時)

中川 裕貴

1. 序論

本研究は、粒度分布の幅が極端に広い河床を対象としている。一般に、河床材料は (a) 移動しない大礫、(b) 掃流砂として移動する砂礫、(c) 浮遊砂として移動する砂やシルトの三種類に分けられる。著者らは従来よりこれらを L, M, S 粒子と呼び、これらの粒子が混在する河床について検討を重ねてきた。本論文では、このうちの M 粒子を三粒径からなるものとし、より連続的な粒度分布をもつ河床で生じる鉛直分級について調べた。

2. 実験概要

模擬河床材料として用いた粒子を以下に記す。直径 50 mm のアルミナ製の球を L 粒子に、粒径 0.21 mm の珪砂を S 粒子に使用した。これらの粒子の比重は 3.98, 2.65 であり、S 粒子の最終沈降速度は 0.025 m/s である。M 粒子には比重 2.5 のガラスビーズを用い、それぞれ緑、赤、青に塗装された粒径 3, 2, 1 mm の三種類の粒子 (M_a , M_b , M_c 粒子) を使用した。これらの M 粒子は粒径が大きいほど限界掃流力が大きく、無次元限界掃流力は 0.047, 0.042, 0.066 となる。また、実験水路は矩形断面を有する開水路であり、全長 16 m, 幅 0.2 m, 勾配 1/250 である。水路の移動床区間は 50 mm の窪みとなっており、その中に L 粒子を格子状に敷き詰めた。

実験条件を表-1 に示す。M 粒子群を表-1 に示す比率で配合し、その平均粒径が 2 mm となるように設定した。移動床区間には全 M 粒子と同体積だけ S 粒子を混合したものを L 粒子頂部まで充填した。その後、所定の流量で通水し、河床が静的平衡状態に達したと判断された時点で通水を終了した。流量は 9 l/s とし、このとき河床表面に作用する摩擦速度は 0.054 m/s 程度であった。

3. 河床の鉛直構造

はじめに、河床が静的平衡状態に到達する過程について述べる。L 粒子頂部まで M-S 粒子を充填した状態で通水すると、M-S 粒子が移動を開始する。その後、粒子が移動することで M-S 粒子上面が低下し L 粒子が露出すると、M-S 粒子上面に作用する掃流力は小さくなる (L 粒子の遮蔽効果)。その掃流力が粒子の移動限界の値以下になると粒子の移動は停止する。本実験の条件下では、 M_a , M_b , M_c , S 粒子の順に移動が止まる結果、M 粒子のみの層が形成される。この層を M 粒子層と呼ぶ。

M 粒子層の厚さについては次のようになる。M 粒子層の厚さは最も上方に位置する M 粒子上面の高さと S 粒子上面の高さとの差であり、本論文では L_M と表記する。M 粒子層の厚さ L_M は、層内の最大粒径 D_{Mmax} の 0.9 ~ 1.4 倍となった。これまでの著者らの研究¹⁾で、静的平衡河床における M 粒子層の厚さは粒径の 1 ~ 2 倍になるという結果が得られており、本論文の結果はこれまでの研究と整合がとれている。

M_a , M_b , M_c 粒子群上面の高さについては以下のようなになる。ここで、 Δ_{M_a} とは L 粒子頂部から M_a 粒子上

表-1 実験条件とその結果： M_a , M_b , M_c 粒子の粒径は 3, 2, 1 mm である。また、 $\Delta_{M_a} \sim \Delta_{M_c}$, Δ_S は L 粒子頂部から各粒子の上面高さまでの鉛直距離を指す。 D_L は L 粒子の粒径、 L_M は M 粒子層の厚さ、 D_{Mmax} は M 粒子層内の最大粒径である。

Case	M粒子の構成比率			Δ_{M_a}/D_L	Δ_{M_b}/D_L	Δ_{M_c}/D_L	Δ_S/D_L	L_M/D_{Mmax}	平衡状態の河床表層の混合比率			
	M_a 粒子	M_b 粒子	M_c 粒子						f_{M_a}	f_{M_b}	f_{M_c}	平均粒径
1	0	1	0	-	0.34	-	0.40	1.4	0	1	0	2.0
2	0.50	0	0.50	0.32	-	0.36	0.39	1.2	0.85	0	0.15	2.7
3	0.40	0.20	0.40	0.32	0.34	0.36	0.38	0.9	0.67	0.17	0.15	2.5
4	0.33	0.33	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40	0.9	0.60	0.26	0.14	2.5
5	0.20	0.60	0.20	0.33	0.35	0.37	0.39	0.9	0.42	0.50	0.09	2.3

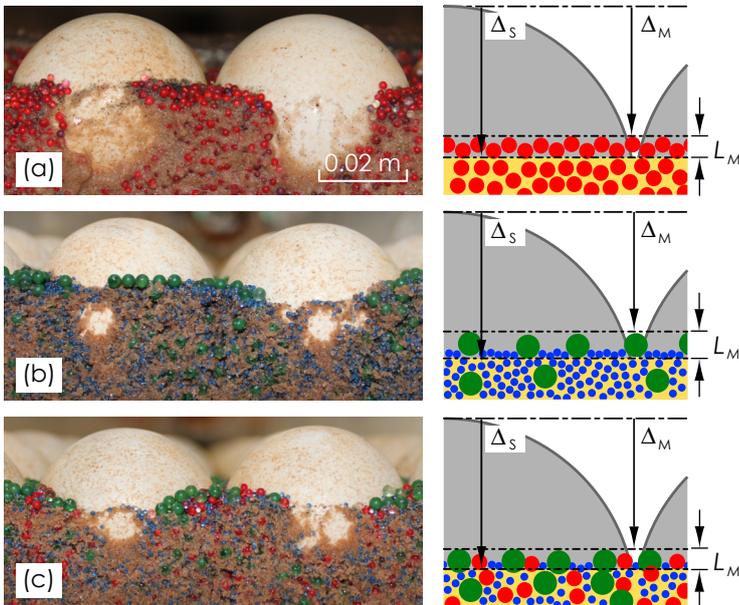


図-1 河床の鉛直構造：(a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 4 の静的平衡状態における河床の鉛直構造を示す。左段は河床の断面写真，右段は断面を模式的に示した図である。

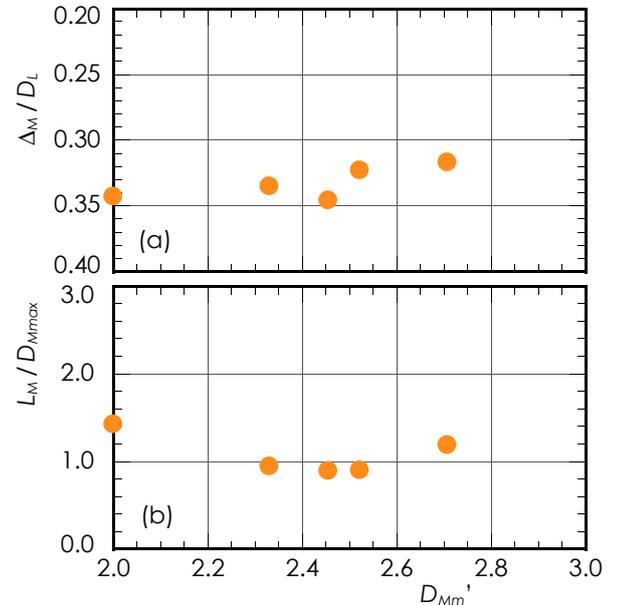


図-2 河床の鉛直構造の概要：各 Case の (a) M 粒子の上面高さ Δ_M , (b) M 粒子層の厚さ L_M を通水後の平均粒径 D_{Mm}' との関係で示した図である。

面までの鉛直距離のことであり、 Δ_{Mb} , Δ_{Mc} も同様である。ただし、これらの値は L 粒子の粒径 D_L で除して無次元化した値で表記する。表-1 に各 Case の $\Delta_{Ma} \sim \Delta_{Mc}$ の値を示す。粒径 3 ~ 1 mm の M 粒子が全て含まれる Case 3 ~ 5 の結果を見ると、粒径毎の M 粒子上面の高さは同程度の値であった。これより、初期河床の M 粒子の平均粒径が変わらないならば、各粒径の M 粒子上面は概ね一定になると考えられる。また、粒径毎の M 粒子上面の高さと S 粒子上面の高さとの差はその M 粒子の粒径とほとんど同じ値となった。すなわち、平均的に見ると M 粒子下面の位置が S 粒子上面と同じ高さであり、河床表面に粒径の大きな M 粒子が露出する構造となる。さらに、粒径 2 mm の M_b 粒子が含まれない Case 2 の結果を見ても、粒径毎の M 粒子上面の高さの差や S 粒子上面の高さとの差に関して同様のことがいえる。このことから、M 粒子の粒径の差が大きい場合でも上記の傾向は変わらないと考えられる。

さらに、M 粒子層上面の高さは次の通りである。ここで、 Δ_M は L 粒子頂部から最も上方に存在する M 粒子上面の高さまでの鉛直距離であり、Case 1 は Δ_{Mb} , Case 2 ~ 5 は Δ_{Ma} がこれに該当する。図-2 (a) を見ると、Case 1 ~ 5 の Δ_M / D_L は概ね同じ値となった。すなわち、初期河床の M 粒子の平均粒径が同じならば、M 粒子上面の高さは初期河床の粒度構成にほとんどよらないと考えられる。しかし、複数回実験を行ったことで得られた誤差を考えると、Case 2 と Case 4 の Δ_M の差がこの誤差の範囲に収まらないことがわかった。図-2 (a) を見ると、通水後の平均粒径 D_{Mm}' が大きくなると Δ_M が小さく、すなわち M 粒子上面が高くなるという傾向が若干ではあるが見られる。その傾向が生じる要因としては、初期河床の M 粒子群の平均粒径を一定にしても通水後は実験条件によって M 粒子層の平均粒径が異なることが考えられる。

最後に、表-1 に M 粒子層内の粒径毎の M 粒子の体積比率を示す。これより、粒径 3 mm の M 粒子は初期河床での混合比率よりも大きいものに対して、粒径 1 mm の M 粒子は逆に小さくなっている。すなわち、相対的に粒径の大きな粒子は多く河床表面に残留し、小さな粒子は多く輸送され河床が粗粒化しているといえる。

4. 結論

本論文では、掃流砂礫の粒度分布の違いが静的平衡河床の鉛直構造に及ぼす影響について検討した。その結果、初期河床の M 粒子群の平均粒径を一定にすると、M 粒子上面の高さは初期河床の粒度構成によってほとんど変化しないことがわかった。今後は、さらに実験を重ねた上でより詳しく検討する予定である。

参考文献：

- 1) 関根正人・平松裕基・中川裕貴：骨格が大礫により構成される河床上で生じる鉛直分級メカニズム，土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1069-I_1074, 2018.