

掃流砂として移動する砂礫の粒度分布の違いが混合砂礫河床の鉛直構造に与える影響

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

○ 本合 弘樹

早稲田大学理工学術院総合研究所

正会員

平松 裕基

早稲田大学大学院(当時)

学生員

中川 裕貴

1. 序論

本研究では、粒度分布の幅(以下、粒度幅)が極端に広い河床を対象として実験を行った。河床材料は移動しない大礫、掃流砂として移動する砂礫、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。著者らはこれらをL, M, S粒子と呼び、連続的な粒度分布をもつ河床の鉛直構造を調べるためにM粒子群をさらに三種類の粒径に分割し検討を重ねてきた¹⁾。本研究では、M粒子群の粒度分布をより連続的にした河床の鉛直構造を調べるために、M粒子として五種類の粒径を持つ粒子を使用し実験を行った。本論文では、M粒子群の粒度幅をより広げた河床が静的平衡状態に到ったときの鉛直構造に関する検討結果を報告する。

2. 実験概要

模擬河床材料として、L粒子には直径50 mmのアルミナ製の球(比重3.98)を、S粒子には粒径0.21 mmの砂礫(比重2.65)を用いた。S粒子の最終沈降速度は $w_{os}=0.025$ (m/s)である。また、M粒子にはそれぞれ黒、黄、緑、赤、青に塗装された粒径5, 4, 3, 2, 1 mmのガラスビーズ(比重2.5)を使用し、粒径の大きい順に M_a , M_b , M_c , M_d , M_e 粒子とする。これらのM粒子の限界掃流力は粒径が大きいほど大きくなり、それぞれの値を粒径で除して算出した無次元限界掃流力は0.050, 0.050, 0.047, 0.042, 0.066となる。また、実験に用いた水路は全長16 m、幅0.2 m、勾配1/250の矩形断面を有する開水路であり、移動床区間に設けた50 mmの凹みにL粒子を格子状に敷き詰めた。

実験条件は表-1に示す通りである。使用した各M粒子の体積が等しく、さらにM粒子の平均粒径が3 mmとなるように条件を設定した。これらのM粒子を表-1に示す比率で配合し、さらに全M粒子と同体積のS粒子を混合したものをL粒子頂部まで充填することで初期河床とした。その後所定の流量で通水し、河床が静的平衡状態に到達したと判断した時点で通水を終了した。流量は5 mmのM粒子が掃流砂として移動するように $Q=15$ (l/s)に設定しており、このとき河床に作用する摩擦速度は $u^*=0.057$ (m/s)であった。

3. 粒度幅が広い河床の静的平衡状態における鉛直構造

実験結果について説明する前に、河床が静的平衡状態に到達する過程について記しておく。上記のように作成した河床に通水すると、M粒子とS粒子が河床表面から移動を始める。これにより、L粒子の間に充填されたM-S粒子上面が次第に低下していく。すると、河床表面にL粒子が露出することでM-S粒子上面に作用する掃流力が小さくなり(L粒子の遮蔽効果)、その値が粒子の限界掃流力を下回ると粒子は移動を停止する。粒径の大きな粒子ほど限界掃流力が大きいため、大きな粒子から順に停止することとなる。本研究の条件では、移動が止まるのは M_a , M_b , M_c , M_d , M_e , S粒子の順である。すると、L粒子の間の表面にM粒子のみで構成される層(以下、M粒子層)が形成される。

写真-1(a)～(c)は、Case A～Cの静的平衡河床の横断面を撮影したものである。また、図-1(a)～(c)はこれらの河床の様子を模式的に示したものである。ここで、L粒子頂部から最も上方に位置するM粒子上面までの鉛直距離を Δ_M 、M粒子上面からS粒子上面までの鉛直距離、すなわちM粒子層の厚さを L_M と定義する。これらの値を図-1に反映した。ただし、 Δ_M はL粒子の直径 D_L で、 L_M はM粒子層内の最大粒径 D_{Mmax} で除して無次元化して表記することとする。

はじめに、M粒子層の厚さ L_M について説明する。M粒子を一つの粒径で代表させた場合であるCase Aでは、M粒子層の厚さ $L_M/D_{Mmax}=1.0$ となった。著者らのこれまでの研究で、静的平衡状態の河床でのM粒子層の厚

キーワード：掃流砂、静的平衡状態、混合粒径河床、粒度幅

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

表 -1 実験条件とその結果：全ての Case で、流量 $Q = 15 \text{ (l/s)}$ に設定した。 $\Delta_{Ma} \sim \Delta_{Me}$ は L 粒子頂部から各 M 粒子の上面高さまでの鉛直距離を指す。また、 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	初期河床の混合比率					Δ_{Ma}/D_L	Δ_{Mb}/D_L	Δ_{Mc}/D_L	Δ_{Md}/D_L	Δ_{Me}/D_L	L_M/D_{Mmax}
	M _a 粒子	M _b 粒子	M _c 粒子	M _d 粒子	M _e 粒子						
A	0	0	1	0	0	-	-	0.27	-	-	1.0
B	0	0.33	0.33	0.33	0	-	0.27	0.29	0.31	-	1.0
C	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.26	0.28	0.29	0.31	0.32	0.9



写真 -1 静的平衡状態における河床の断面図：静的平衡状態に到った後の河床の横断面を水路下流側から上流側に向かって撮影した写真である。(a) Case A, (b) Case B, (c) Case C である。

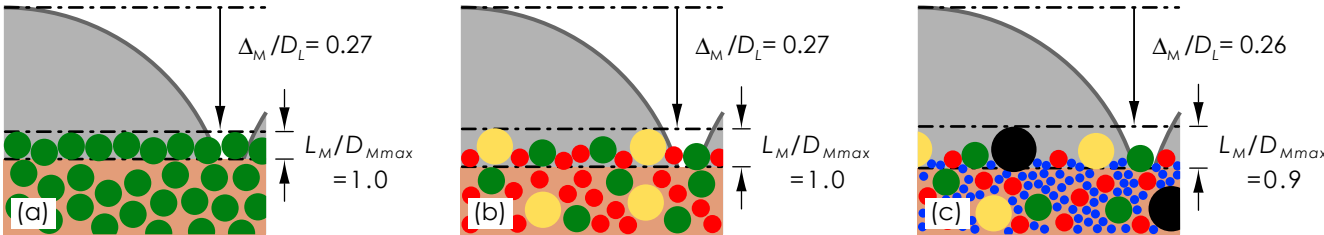


図 -1 静的平衡状態における河床の鉛直構造：静的平衡状態に到った後の河床の横断面を模式的に示した図である。(a) Case A, (b) Case B, (c) Case C である。また、 Δ_M/D_L , L_M/D_{Mmax} の実測値を図に反映した。

さは粒径の 1 ～ 2 倍程度になるという結果が得られており¹⁾、このことと矛盾しない結果であると言える。これに対して M 粒子の粒度幅を広げた実験である Case B と C では、M 粒子層の厚さ $L_M/D_{Mmax} = 1.0, 0.9$ となった。これにより本実験の条件下では、三つの Case 全てで M 粒子層の厚さ L_M は最大粒径と同程度となることがわかった。実際の河川は河床材料の粒度分布がより連続的であるため本研究で設定した粒度幅でも十分に河床を表現できているとは言えないが、これまでの結果は実河川で生じる現象を考える上で有意なものであると考えられる。

次に、M 粒子層内の構造について述べる。ここで、 Δ_{Ma} とは L 粒子頂部から M_a 粒子の上面高さまでの鉛直距離を指し、以下 Δ_{Me} まで同様である。図 -1 (b), (c) に示したように、相対的に小さな粒子が M 粒子層内で積み重なることはほとんどなかった。また、粒径毎に粒子の上面の位置を見ると、粒径の大きな粒子から順に上方に現れており、その上面高さの差は粒径の差と同程度であった。すなわち、各粒径の M 粒子下面の位置は平均的には同じ高さであり、粒径の大きな M 粒子が表面に露出するような構造になるということである。本実験の範囲内では、M 粒子の粒度幅を広げるとこのような特徴をもった層が構成されることがわかった。

最後に、M 粒子の上面高さについてふれる。それぞれの Case での Δ_M/D_L の値を図 -1 に示した。この図より、これら三つの Case の Δ_M/D_L は 0.26 ～ 0.27 の範囲内にあり、概ね同じ値となることがわかった。すなわち、初期河床の平均粒径を固定した本実験条件の範囲内では、各 M 粒子を同体積ずつ混合した上で粒度幅を広げても、M 粒子の上面高さにはほとんど影響しないと考えられる。

4. 結論

本研究では、掃流砂として移動する砂礫の粒度幅の違いが静的平衡状態の河床の鉛直構造に与える影響について検討した。その結果、各粒径の M 粒子の下面が平均的にはほとんど同じ高さに存在するような特徴をもった河床が構成されることがわかった。今後は、M 粒子層内の構造をより詳しく調べていく予定である。

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のメカニズム，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.4，pp.I_1069-I_1074，2018。