

掃流砂礫の粒度分布の違いが粒径幅の大きな河床の鉛直構造に及ぼす影響

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	○ 中川 裕貴
早稲田大学理工学術院	正会員	平松 裕基
早稲田大学大学院(当時)	学生員	鎌田 遼
早稲田大学創造理工学部(当時)		輿水 康二

1. 序論

本研究では、粒度幅の極端に広い材料からなる河床における砂礫の輸送に注目した。著者らは、河床材料を流水によって輸送されない大礫(L粒子)、掃流砂として輸送される砂礫(M粒子)および浮遊砂として移動する細砂やシルト(S粒子)の三つの粒径集団に分け、それぞれ一つの粒径をもつ材料で代表させるとした実験¹⁾を行ってきたが、河川上流域の河床材料は連続的な粒度分布をもち、一つの粒径集団であっても複数の粒径から構成されている。このため、著者らのこれまでの研究をさらに発展させ、実河川での現象をさらに明らかにしていくことが必要である。本論文では、その第一段階として行った研究の成果を報告するものであり、M粒子が複数の粒径からなるものとして、その粒度構成の違いが静的平衡状態における河床の鉛直構造に与える影響について検討した。

2. 実験の概要

実験は、全長 16 m、幅 0.2 m、勾配 1/250 の長方形断面を有する開水路において行った。L粒子としては粒径 $D_L = 50$ (mm) のアルミナ製の球(比重 3.98)を、S粒子としては粒径 $D_S = 0.21$ (mm) の珪砂(比重 2.65)を用いた。M粒子としては粒径の異なる3種類のガラスビーズ(比重 2.5)を用い、それぞれを M_a 粒子・ M_b 粒子・ M_c 粒子(粒径 $D_M = 3, 2, 1$ (mm))と呼ぶ。これらを表-1に示すような比率で混合した模擬河床に対して実験を行った。実験条件は表-1に示すとおりである。ここで、初期河床におけるM粒子の平均粒径を D_{Mm} と定義する。S粒子の最終沈降速度は $w_{os} = 0.027$ (m/s) であり、 M_a 粒子・ M_b 粒子・ M_c 粒子の無次元限界掃流力はそれぞれ $0.047 \cdot 0.042 \cdot 0.066$ である。これらの値を次元をもった値に変換した移動限界時の掃流力は、粒径が大きいほど大きくなる。また、掃流力自体の違いが河床の鉛直構造に与える影響を明らかにするため、流量を 9 l/s と 15 l/s の二段階に設定した実験を行っている。なお、河床に作用する掃流力の平均値を M_b 粒子にとっての無次元量に換算すると、それぞれ $\tau^*_{Mb} = 0.093$ と 0.12 となることを付記する。

3. 静的平衡状態に到った河床の鉛直構造

まず、静的平衡状態の河床における鉛直構造の概要について説明する。図-1は静的平衡状態に到った河床の鉛直構造の模式図である。著者らのこれまでの研究では、掃流砂礫を M_b 粒子のみで代表させており、この場合の模式図が図-1(a)である。図のように顕著な鉛直分級が生じ、L粒子群の間隙にM粒子のみからなる層(M粒子層)が現れた。ここに、L粒子頂部からM粒子上面までの鉛直距離を Δ_M 、M粒子層の厚さを L_M と定義する。これに対して、図-1(b)は、M粒子を M_a ・ M_b ・ M_c の三つの粒径からなるとした「L- M_a - M_b - M_c -S河床」の鉛直構造の模式図である。まず、河床が静的平衡状態に到る過程について説明する。L粒子頂部までM-S粒子が充填された河床に対して通水を開始すると、M粒子とS粒子はともに移動を開始し、M-S粒子上面の位置が低下していくが、やがてL粒子の露出の度合いが大きくなると、その間隙の最上面に位置するM-S粒子に実際に作用する摩擦速度は断面内の平均値 u^* よりも小さくなる。これがL粒子による「遮蔽効果」である。これによりM-S粒子に作用する掃流力が小さくなり、移動限界の値が大きな粒子から順に移動を停止していくことになる。その結果、粒子上面の位置は、上から M_a ・ M_b ・ M_c ・S粒子の順に現われることになる。

次に、L粒子群の間隙におけるM粒子層を特徴付ける値について説明する。図-2にM粒子の平均粒径と
キーワード：掃流砂、静的平衡状態、混合粒径河床、砂礫の粒度構成

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: Case A, Case Bは,それぞれ流量 $Q_w = 9, 15$ (l/s)に設定した. このとき, 粒径2mmのM粒子に対する無次元掃流力はそれぞれ $\tau_M^* = 0.093, 0.12$ 程度であった. また, D_{Mm} はM粒子の平均粒径である.

Case	M粒子の構成比率			平均粒径 D_{Mm} (mm)	流量 Q_w (l/s)	摩擦速度 u^* (m/s)
	M _a 粒子	M _b 粒子	M _c 粒子			
A-1	1	0	0	3	9.0	0.048
A-2	0.50	0.50	0	2.5	9.2	0.052
A-3	0.50	0	0.50	2	9.1	0.053
A-4	0.33	0.33	0.33		9.2	0.053
A-5	0	1	0		9.2	0.051
A-6	0	0.50	0.50	1.5	8.9	0.051
A-7	0	0	1	1	9.2	0.053
B-1	1	0	0	3	15.1	0.057
B-2	0.50	0.50	0	2.5	15.3	0.058
B-3	0.50	0	0.50	2	15.1	0.058
B-4	0.33	0.33	0.33		15.4	0.060
B-5	0	1	0		15.1	0.058
B-6	0	0.50	0.50	1.5	15.2	0.059
B-7	0	0	1	1	15.4	0.060

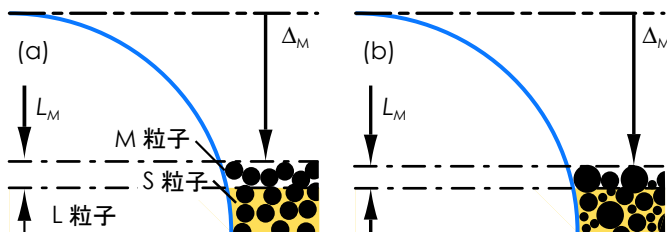


図-1 河床の鉛直構造: Δ_M は, L粒子頂部から最上位に存在するM粒子上面までの鉛直距離である.

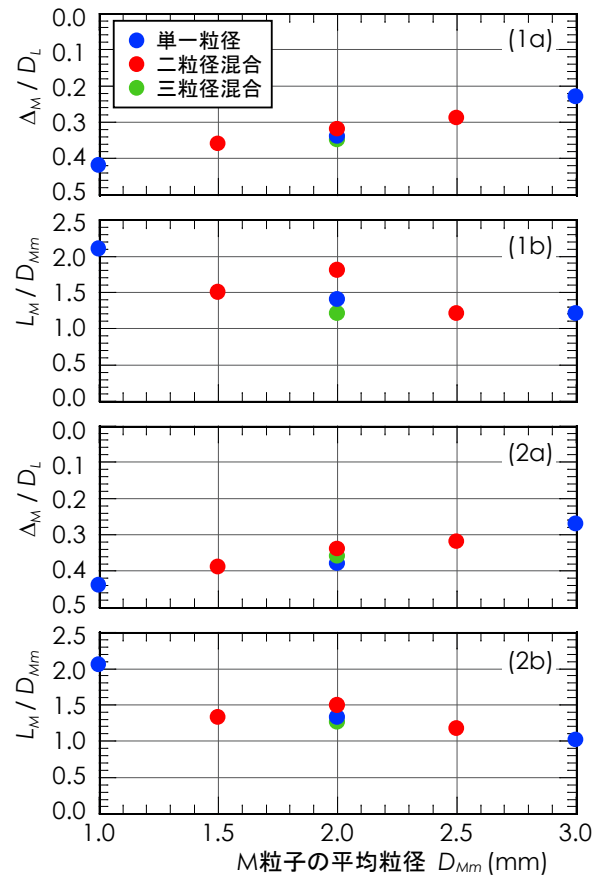


図-2 静的平衡状態における河床の鉛直構造: (1a), (1b) Case A, (2a), (2b) Case Bの結果を示している. 図中の●, ●, ●はそれぞれM粒子として1種類, 2種類, 3種類の粒径を用いたことを表している.

M粒子層の構造を特徴付ける諸量との関係を示した. 図の横軸は D_{Mm} である. また, 縦軸は, (a) Δ_M をL粒子の粒径 D_L で除した値, (b) L_M を初期河床に用いたM粒子の平均粒径 D_{Mm} で除した値になっている. そして, 図-2 (1a), (1b)が流量 $Q_w = 9$ (l/s)の結果を, 図-2 (2a), (2b)が $Q_w = 15$ (l/s)の結果を表している. ここでは, 流量が小さな条件である前者の結果を中心に説明する. 図-2 (1a)にはM粒子の平均粒径と Δ_M / D_L との関係が示されている. これより, D_{Mm} の値が大きくなるほど Δ_M の値は小さくなることがわかる. 本研究で対象とした条件下では, M粒子の粒径が大きくなるほど限界掃流力の値は大きくなる ($\tau_{Mc} < \tau_{Mb} < \tau_{Ma}$). 大きな粒径のM粒子が多く含まれるほどM粒子の移動限界の値が大きくなるため, L粒子の遮蔽の効果により静的平衡状態におけるM粒子上面の位置はより上方に現れることになる. 次に, M粒子の平均粒径 D_{Mm} が同一となるように混合した三つの実験の結果について説明する. M粒子の組み合わせを $[M_b]$ のみ, $[M_a \cdot M_c]$, $[M_a \cdot M_b \cdot M_c]$ の三通りとした. 実験の結果から, Δ_M はいずれもほぼ等しい値となり, $D_{Mm} = 1.5$ (mm)と2.5 (mm)に対する値に比べてその中間に位置する値をとることがわかった. また, 図-2 (1b)はM粒子の平均粒径 D_{Mm} とM粒子層の厚さの関係を示したものである. いずれも L_M / D_{Mm} は1~2程度の値をとることがわかる. この値は, M粒子を一つの粒径で代表させた場合と同程度である¹⁾. 流量 $Q_w = 15$ (l/s)とした図-2 (2a), (2b)の結果からも同様のことが言え, Δ_M と L_M に定性的な違いはないことがわかる.

4. 結論

本研究では, 掃流砂として移動する砂礫の粒度構成の違いが河床の鉛直構造に与える影響について検討した. 今後は, 現象の数値計算による再現を試みていく予定である.

参考文献: 1) 平松裕基・関根正人・剣持尚樹: 骨格となる大礫を伴う河床の動的平衡状態の鉛直構造, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71 No.4 pp.I_865-I_870, 2015.