

供給される砂礫の混合比率が粒度幅の広い河床の鉛直構造に及ぼす影響

早稲田大学理工学術院	関根 正人
早稲田大学理工学術院	平松 裕基
早稲田大学大学院	鎌田 遼
早稲田大学大学院	○ 中川 裕貴
早稲田大学創造理工学部 (当時)	孫沢 慎一

1. 序論

本研究では、粒度幅が極端に広い材料からなる河床における流砂現象に着目した。このような河床はダム直下の流砂の連続性が失われた区間で見られる。このような河川の再生を目指し砂礫を河床に堆積させるため、ダム貯水池内に堆積している砂の排出（排砂）やダム下流部に置き砂をすることなどが試みられている。しかし、それらの対策の効果についてはモニタリングにより評価されているものの、砂が河床に堆積するメカニズムについては十分に理解されているわけではない。そこで、著者らは、河床材料を水流の作用によって移動しない大礫（L粒子）、掃流砂として移動する砂礫（M粒子）、浮遊砂として移動する砂あるいはシルト（S粒子）の三つの粒径集団に分け、それぞれを一つずつの粒径で代表させた基礎的な移動床水理実験を重ねてきた¹⁾。本論文では、上流側から供給されるM-S粒子の量ならびに流れがもつ掃流力の違いが、最終的に到達する動的平衡状態における河床の鉛直構造に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験の概要

本実験では、L粒子として粒径が $D_L = 50$ (mm)のアルミナ製の球（比重3.98）、M粒子として粒径が $D_M = 2$ (mm)のガラスビーズ（比重2.5）、S粒子として粒径が $D_S = 0.21$ (mm)の珪砂（比重2.65）をそれぞれ用いた。実験は長さ16 m、幅0.2 m、勾配1/250の開水路を用いて行われ、上流端から8.5～14 mの区間の底面に設けられた0.05 mの深さの凹部に前述の材料を敷き詰めた。実験の条件は表-1にまとめられている通りである。これよりわかるとおり流量 Q_w を5 l/s, 9 l/sの二つの条件に設定し、河床に作用する掃流力が異なる2つの実験を行った。それぞれの流量条件下で供給するM粒子の供給量 Q_M は一定とし、一方のS粒子の供給量 Q_S のみ0～5.7 cm³/sの範囲で変えることにした。ここで、S粒子の最終沈降速度は $w_{os} = 0.025$ (m/s)であり、M粒子の無次元限界掃流力は $\tau_{*MC}^* = 0.042$ である。流量が $Q_w = 5$ (l/s), 9 (l/s)のときの河床に作用する平均の無次元掃流力はそれぞれ $\tau^* = 0.065$, 0.09程度であった。また、実験開始時の初期河床としては、それぞれの流量（あるいは掃流力）条件下で到達する静的平衡状態とした。

3. 実験結果と考察

動的平衡状態に到達した後の河床の鉛直構造に関して、L粒子頂部からM粒子上面までの鉛直距離を Δ_M 、S粒子上面までの鉛直距離を Δ_S と定義する。また、供給されたM-S粒子が堆積することにより動的平衡状態に到るため、初期河床上面に形成される層は二つに分けて考えるのがわかりやすい。1つは上方に形成される「交換層」であり、この層内のM-S粒子は流砂と絶えず交換を繰り返している。一方、その下方には流砂との交換が生じない「堆積層」が形成される。本研究では、移動することのないL粒子が構成する河床骨格とその間隙部分とに分けて考えており、後者に形成される交換層の厚さを δ_E 、堆積層の厚さを δ_D 、それぞれの層内における空隙率を λ 、M-S粒子の総和に占めるM粒子の体積比率を R_M と定義する。

掃流力ならびに給砂量の大小に応じて現われる河床の鉛直構造を模式的に説明すると図-1のようになる。図-1 (a)は河床の静的平衡状態を表し、(b)～(e)は動的平衡状態に相当する。流量ならびに Q_M を一定の値として Q_S の値を大きくすると、(b)～(e)のような状態の河床が順に現れてくる。 Q_S の値が相対的に小さいと河床表面にはM粒子のみからなる層が現れる。この状態が図-1 (b)のStage 1である。 Q_S を大きくしていくと、図-1 (c)のようにM-S粒子の上面高さが一致するようになる (Stage 2)。さらに Q_S を大きくすると交換層および堆積層内のM粒子相互の距離がより大きな状態 Stage 3となり、図-1 (d)のようにM-S粒子上面の高さ

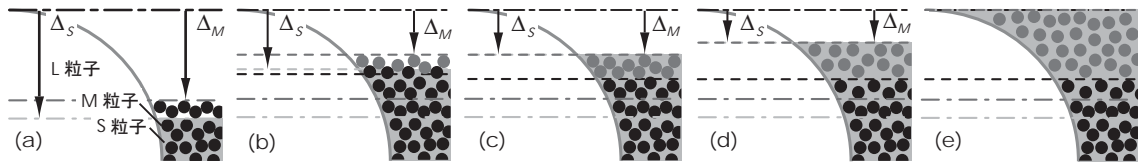


図-1 河床の鉛直構造：(a) 静的平衡状態の河床 (Stage 0), (b)～(e) 動的平衡状態の河床であり、それぞれ Stage 1～4 に対応する。

表-1 実験条件：Case A-1～7は $Q_w = 5$ (l/s) 程度であり、河床に作用する平均の無次元掃流力は $\tau^* = 0.065$ 程度であった。一方、Case B-1～8は $Q_w = 9$ (l/s) 程度、 $\tau^* = 0.090$ 程度の結果を示している。また、 u^* は河床に作用する平均の摩擦速度である。

Case	流量 Q_w (m^3/s)	給砂量 (cm^3/s)		摩擦速度 u^* (m/s)
		Q_M	Q_S	
A-1	0.0091	0.4	0.0	0.051
A-2	0.0093		0.4	0.051
A-3	0.0090		1.4	0.052
A-4	0.0090		2.5	0.052
A-5	0.0091		3.4	0.052
A-6	0.0091		4.5	0.052
A-7	0.0088		5.0	0.048
A-8	0.0091		5.7	0.051
B-1	0.0050	0.4	0.0	0.046
B-2	0.0050		0.2	0.046
B-3	0.0052		0.4	0.046
B-4	0.0051		1.4	0.045
B-5	0.0052		2.5	0.045
B-6	0.0049		3.8	0.039
B-7	0.0050		4.5	0.038

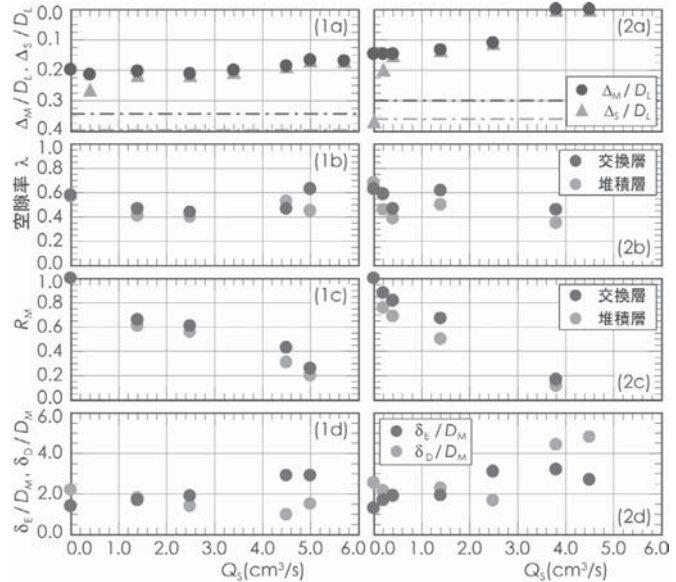


図-2 動的平衡状態における河床の鉛直構造：(1a)～(1d) Case A, (2a)～(2d) Case B の結果を示している。(1a), (2a) 中の上方ならびに下方の一点鎖線はそれぞれ静的平衡状態における M 粒子ならびに S 粒子上面の高さを表している。

がより上方に現われる。なお、Stage 2 における各層内の M 粒子相互の距離は Stage 1 の場合と変わらないことを確認している。さらに Q_S を大きくすると、図-1 (e) に示すように L 粒子頂部まで M-S 粒子が堆積する状態に達する。これを Stage 4 と呼び、これ以降は河床表面に L 粒子が露出することはなくなる。

図-2 に実験の結果を表す。図の横軸は Q_S 、縦軸は上段から Δ_M 、 Δ_S を L 粒子の粒径 D_L で除した値、交換層および堆積層の空隙率 λ 、M 粒子の混合比率 R_M 、交換層の厚さ δ_E と堆積層の厚さ δ_D を M 粒子の粒径 D_M で除した値を表している。図の (1a)～(1d) は Case A, (2a)～(2d) は Case B の結果を表す。図-2 (1a) を見ると、Case A では Stage 4 の状態に到ることはなかった。これは、実験装置の制約上、S 粒子の供給量 Q_S を $5.7 \text{ cm}^3/s$ 以上の設定することができなかつたためである。一方、掃流力が小さな Case B の場合の結果を見ると、水流により輸送可能な S 粒子の量がそもそも小さいため、同じ Q_S の値であっても Case A とは意味が異なり、L 粒子の間隙中へより多くの S 粒子が堆積することになる。実験結果から推察すると、Case A での S 粒子の輸送可能量は Case B の 3 倍程度であるものと推察される。図-2 (2a) より、 Q_S を 3.8, $4.5 \text{ cm}^3/s$ の値とすると河床は Stage 4 の状態になることがわかる。これらの点を考慮に入れて図-2 (1a)～(1d) と (2a)～(2d) を比較すると、動的平衡状態における河床の鉛直構造の現れ方は掃流力の違いにはよらないものと判断される。

4. 結論

本研究では、洪水時でも移動することのない大粒径の材料が河床骨格を構成するような場を対象として、掃流砂ならびに浮遊砂として移動する粒径の砂礫により形成される河床の動的平衡状態の鉛直構造について検討した。図-2 の横軸を Case A および B の掃流力条件下での S 粒子の輸送可能量 Q_{SC} で基準化するとわかりやすくなるが、これについては今後の課題とする。

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.1_865-1_870, 2015.