

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：33919

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860062

研究課題名(和文)河床表層状態に着目した土砂の流下特性および流砂量に関する研究

研究課題名(英文)Fundamental study on characteristics of sediment movement at the bed surface layer composed of sediment mixture

研究代表者

溝口 敦子(寺本敦子)(MIZOGUCHI, Atsuko)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40362280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、表層状態の形成に着目し流砂量予測モデルの構築を目指して進めた。具体的には、二粒径の砂で構成された河床を対象とし、各粒径砂の動態を詳しく調べ、土砂動態モデルの構築を試みた。結果として、少なくとも、底面粗度の見積もりには平均粒径が適用できる場合と片方の粒径が卓越する場合など掃流力の増加に伴い表層状態が変化するために初期に設定した河床材料の粒度だけでは表現できないこと、各粒径の土砂量を算定する際に既往の流砂量式を適用させるには各粒径の停止限界掃流力が河床表層の構成によって変化することを考慮し修正すれば再現性が上がることを、表層状態によって河床材料の流下特性が変化することなどを示した。

研究成果の概要(英文)：These days, 2-dimensional numerical simulation of depth-averaged flow and bed variation would be useful for river management. However, it is difficult to examine either sediment conditions at the surface or the substrate structure in detail because of problems in predicting sediment behavior in a real river. Furthermore, the attributes of mixed sediment transport vary depending on physical conditions, making it difficult to describe using numerical simulations. Therefore, two series of flume experiments were firstly conducted in order to examine sediment behavior through bed composed of two size of sand. These experiments and some simulation results indicated the important characteristics of fine and coarse sediment movement for prediction of math of sediment transport.

研究分野：河川工学

科研費の分科・細目：水工学

キーワード：土砂動態 混合砂 流砂量 表層粒度

1. 研究開始当初の背景

近年、ハードウェアの開発が進むとともに解析技術が発達し、様々な分野で数値解析が活用されている。河川における河床変動解析も例外でなく、解析モデルが多数提案され、最近では、河床変動解析が実河川の現象を予測する際にも利用されるようになった。ただし、これまでの河床変動解析は、河川の河床材料が様々な粒径で構成されているにも関わらず、主に一様な粒径で構成された河床を対象としてきた。近年では異なる粒径の砂で構成された河床を対象とした解析も実施されつつあるが、構成される砂の粒度により特有の現象が現れることがあるため、一様な解析が実施できないのが実情である。これまで粒径別に無次元掃流力および無次元限界掃流力を見積もった上で芦田・道上の粒径別流砂量式から流砂量を算出し、河床との交換を平野の交換層理論を用いる方法が一般的に用いられてきた。しかし、混合粒径構成河床での流砂量式の適用範囲が明確でないため検討が必要である。また、表層粒度の変化を見積もるための平野の交換層理論においても交換層厚の決定方法など課題が残っている。一方、河川環境の視点から河床材料や間隙の条件など細かい物理場の形成条件が必要とされているが、移動床水理学的予測が困難であるものが多数存在する。このような河川の物理場の形成だけでなく、豪雨が多発する状況を受け治水的課題面からも、河床変動現象、河床材料構造の解明に対する社会的需要は高まっている。

2. 研究の目的

これまで、河川における土砂の流下特性は、出水時の土砂移動を実測した福島らの研究があるが流下特性は解明されていない。特に、砂の流下特性と流砂量との関連性は着目されていなかった。しかし、河川における土砂の連続性が遮断されたときに影響を受ける範囲を知るためにも、流下特性を知ることは重要である。また、ダムの下流域における河床低下対策として、ダム直下へ還元されている土砂の効果を調べる際には、その土砂がどのように流下していくかも知っておく必要がある。混合粒径で構成された河床は、一様な粒径で構成された河床とは異なり、土砂の流下特性に粒度や河床の特徴が大きく現れる可能性がある。実際、これまでの申請者の研究で、細砂の存在が礫の動きを活発にしたり、河床形態が現れた河床における流下速度が粒径によって異なったりするなどの特徴が観察された。そこで、本課題では、河床材料の各粒径の役割を意識し、砂の移動時の表層粒度と動態に着目しながら流砂量の検討を行った。

特に、混合粒径で構成された河床の流砂現象を追究するため、例えば天竜川の下流部のように二粒径が卓越した場などを念頭において、実験を行い、それを通じて河床上の砂

の基本的な動態を調べ、二粒径で構成された河床における河床変動を考える際の重要な視点を検討する。これにより、混合粒径河床上の土砂動態の知見を集積し、今後の土砂動態モデルの構築を目指すことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究を実施するにあたり、まず、実験で用いる河床材料の粗度特性および流砂特性を把握した上で、砂礫混合河床における粗度特性および流砂特性を把握した。特に、これまで提案されている流砂量式への適用性の有無を中心に議論することとした。

その後、土砂挙動の検討実験を行うことで細粒分の影響と流砂挙動に関する理解を深める。さらに、それらの実験結果を参考に、流砂動態に関わるモデルの視点を整理する。

(1) 一様な粒径河床における粗度特性と流砂量特性の把握実験

本研究で用いる材料として、粗粒分は三河硅砂3号(平均粒径 2.1mm 程度、以下粗砂と表現)、細粒分は5号(平均粒径 0.55mm 程度、以下細砂と表現)を用いた。各砂の粒度は図1に示すとおりである。実験では、それぞれの河床材料の粗度特性、流砂量特性を把握するために、河床材料を幅 20cm、勾配 1/200 の水路に 9m 程度で敷き設し、通水流量と水深、流砂量を計測する。水深はポイントゲージを用いて河床高と水面高を縦断方向に計測することで算出し、流砂量は下流に設けた土砂採取箱によって計測することとした。

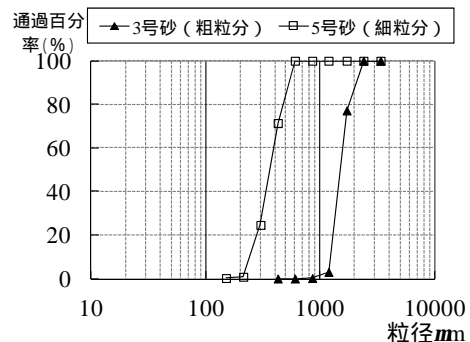


図1 実験で使用した材料の粒度分布特性

(2) 二粒径混合粒径混合河床の粗度特性と流砂量特性の把握実験

例えば、(1)で粗度・流砂特性を検討した粗砂、細砂を偏らないように混ぜ合わせ敷き設した河床において、流砂量および流砂挙動を確認する実験を行った例を示す。ここでは、粗砂と細砂をそれぞれ2対8、5対5、8対2で混ぜ合わせて使用する。例えば、それらの河床を用いて表-1に示す流量で通水し、粒径別に流砂量を計測した。

表 1 実験での通水流量と計測値例

河床材料における粗砂と細砂の割合	流量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)	平均水深 (m)	流砂量(3号砂) ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}(0.2\text{m})$)	流砂量(5号砂) ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}(0.2\text{m})$)
2.8	CaseA1	0.473	0.008	0.000
	CaseA2	0.877	0.013	0.023
	CaseA3	1.215	0.017	0.069
	CaseA4	1.992	0.024	0.279
5.5	CaseB1	0.642	0.010	0.000
	CaseB2	1.125	0.017	0.001
	CaseB3	1.667	0.022	0.040
	CaseB4	2.333	0.027	0.257
8.2	CaseC1	0.987	0.017	0.000
	CaseC2	2.315	0.028	0.004
	CaseC3	3.178	0.033	0.044
	CaseC4	4.027	0.039	0.600

(3) 河床材料の流送に関する土砂挙動の検討

先に取り扱った流砂現象のうち、河床における細粒分の影響と流砂挙動に関する理解を深めるため、粗砂で構成した河床に細砂を投入する実験を行う。

例えば、ここで示す実験では、ベルトコンベアとホッパーにより一定量土砂供給を可能とした給砂装置を付けた図2のような移動床区間を設けた勾配 1/200, 幅 20cm の水路を用いた。

この水路に流砂特性を検討した三河硅砂 3号(粗砂)を敷き均し、表2に示す給砂条件で5号砂(細砂)の土砂供給を行う。この時の土砂供給条件は、例えば、細砂のみで河床を構成した場合の平衡流砂量を1倍, 1/2倍, 2/3倍した量とした。また、流量は粗砂のみで構成した河床上に流水を通水した場合砂が動かない流量(CaseD)と動く流量(CaseE)を設定した。土砂供給条件については、特に掃流層に対する理解を深めることを目的として設定している。ここでは、平衡流砂量の土砂供給は掃流層を満たす細砂の量が十分確保され平衡状態で細砂が流れること、それ以下のときは掃流層を形成する細砂の量が確保されないことで河床材料である粗砂に影響を与えることを予測し決定した。

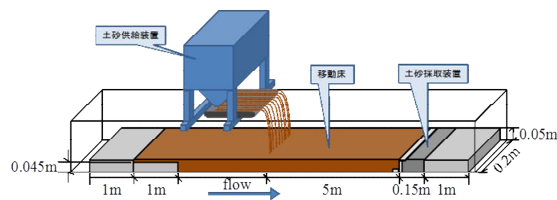


図2 実験装置概要

表2 実験ケース

	流量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)	細砂の 平衡流砂量(g/s)	細砂投入量(g/s)	
			25%	75%
D1	2.69	3	25%	0.75
D2			50%	1.50
D3			100%	3.00
E1	3.82	4.5	25%	1.13
E2			50%	2.25
E3			100%	4.50

(4) 混合粒径河床特性および土砂輸送に関する検討

粒度構成が及ぼす河床の特徴を把握するための実験や、土砂輸送についてさらに理解を深めるため、解析的検討を行った

4. 研究成果

(1) 一様粒径河床における粗度特性と流砂量特性の把握

上述した実験条件における抵抗則への適合性を調べた結果は図3のようになり、粗砂は等価砂粗度 k_s を平均粒径の3倍程度、細砂は10倍程度とした対数則から導かれる平均流速公式(Keulegan式)によく合うことが示された。また、同様に本実験では流砂量も計測し、芦田道上の流砂量式への適合性を確認したところ、図4のようになった。ここでは、通常用いられる係数17を粗砂は12.5、細砂は9.0に修正するとよく合うことが確認された。つまり、経験的に設定された係数を河床材料に合わせて設定し直す必要があることがわかる。なお、限界掃流力は芦田らにより提案されているように0.05がよく適合し、粒径別無次元限界掃流力に修正する必要がないことが確認された。

芦田道上式

$$q_{b*} \equiv \frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}} = \alpha \tau_*^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right)$$

ここに、 q_{b*} : 無次元流砂量, q_b : 流砂量, d : 河床材料粒径, g : 重力加速度, σ : 砂の密度, ρ : 水の密度, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, α : 動摩擦係数などの材料の特性により決まる係数(通常17が用いられる)である。

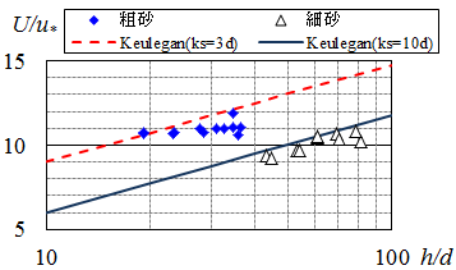


図3 粗度特性

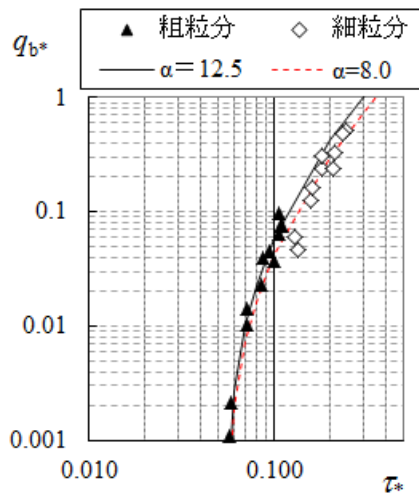


図4 流砂量式への適合検証

(2) 二粒径混合粒径混合河床の粗度特性と流砂量特性の把握

ここでは、例として上述した実験について検討した結果を述べる。

表 3 平均粒径および各粒径で算定される限界無次元掃流力

	τ_{*cm}	τ_{*cb} (粗砂)	τ_{*cs} (細砂)
CaseA	0.0340	0.0489	0.0302
CaseB	0.0357	0.0423	0.0301
CaseC	0.0404	0.0426	0.0343

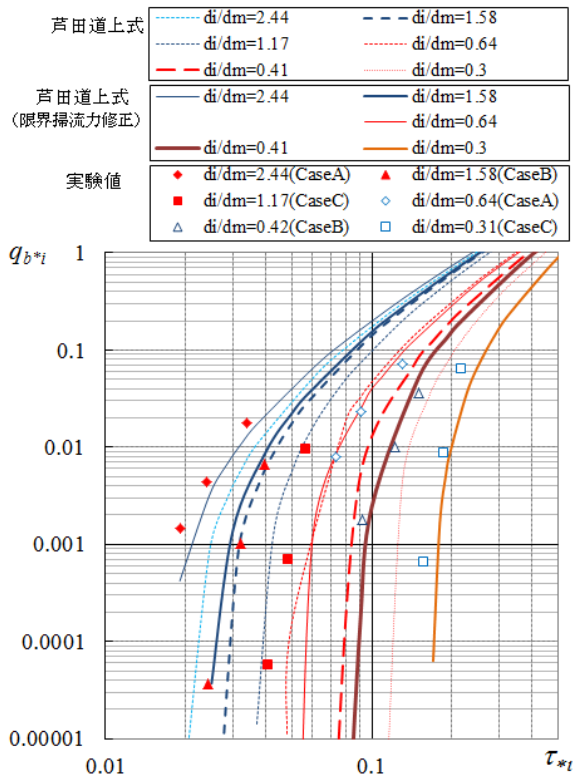


図 5 粒径別掃流砂量式と実験値の関係

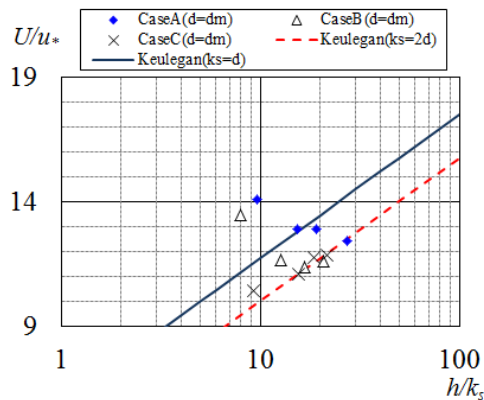


図 6 抵抗則の検討

実験結果を粒径別無次元掃流力，無次元流砂量で整理したものが図 5 となる．ここでは，芦田道上による粒径別流砂量式の係数 17 を(1)で得られた係数にそれぞれ修正し，粒径別無次元掃流力には岩垣公式よ

り算出したものに Egiazaroff の修正を加え算出した表 3 に示す値を用いた．図 5 によると，ある一定の範囲で流砂量式に沿った関係が見出されるものの，対象とする材料粒径 d_i と平均粒径 d_m の比 d_i/d_m が 2 より大きい場合に粒径別無次元掃流力が小さくても流砂量が多くなる．このとき，通常の場合の算定理論では流砂量が 0 とされる流量でも値が確認された．一方で， d_i/d_m が 1 程度以下の場合には実際の流砂量が流砂量式より算定される値より少ない傾向であった．芦田らは論文中で d_i/d_m が 1 以上で理論曲線に実験値が合わないことを示唆していたが，ここで示した実験では， d_i/d_m が 2 以下の場合と 1 以下の場合にそれぞれ生じていた．

次に，混合砂河床における粗度特性を図 6 に示す．この図から，CaseC 以外は単純に等価粗度を表すのが難しいことがわかる．CaseC は比較的表層にある粗砂により抵抗が決定されるため，平均粒径または粗粒分の粒径で等価粗度を評価できたがそれ以外は，流砂状態によりそれぞれの表層存在状態が変わりえた．

こうした検討を通じ，単純に河床材料の平均などでの評価が難しい可能性が示唆された．

(3) 河床材料の流送に関する土砂挙動

先に示した実験例の結果を図 7~12 に河床変化量，流出土砂量の時間変化等として示す．これにより細砂の役割がさらに認識され，一連の実験結果を通じて，河床材料と流送に関する知見を集約した．

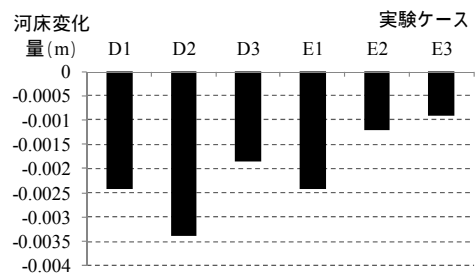


図 7 各ケースの縦断平均河床変化量

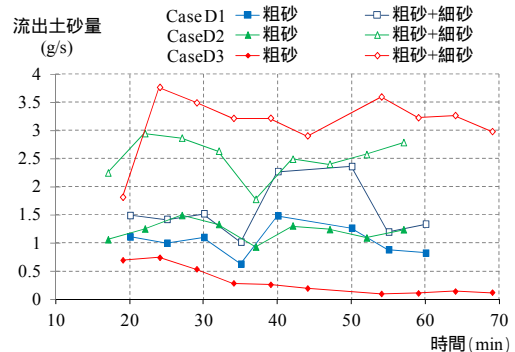


図 8 土砂流出量時間変化 (CaseD)

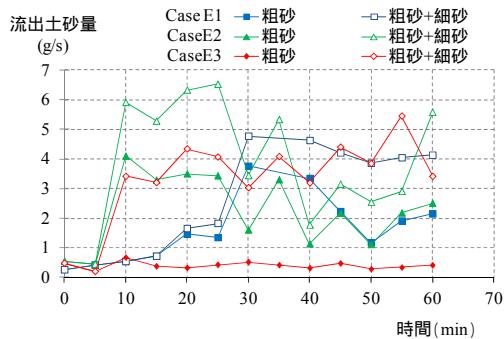


図9 土砂流出量時間変化 (CaseE)

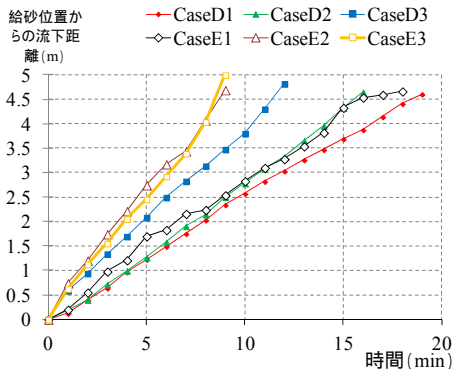


図10 細砂の流下特性

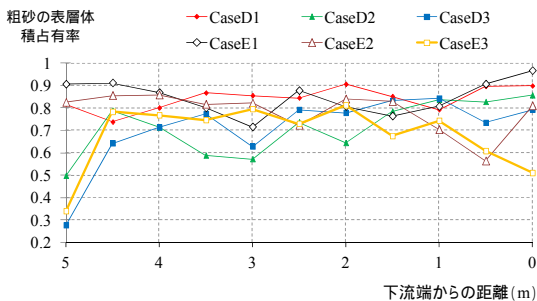


図11 表層の粗砂体積占有率 (実験後)

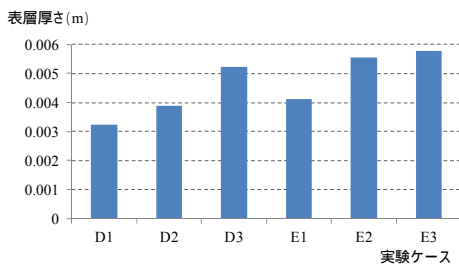


図12 細砂混入表層厚さ

(4) 混合粒径河床特性および土砂輸送

(1), (2), (3)の結果と実験でこれまで見られた流砂挙動を踏まえ、流砂量・抵抗則の取り扱い方法について検討した。動的粗粒化などが指摘されているように、流砂現象が起こる際には表層の粒度状態は河床の粒度から変化する。例えば、細砂が多く存在する場合には粗砂は細砂の流れの上を流れる。流砂量式や抵抗則にはこうした流砂挙動を何らかの形で取り込む必要がある。流砂挙動によって変化する表層粒度構造により停止限界が決まることが分かった。これは極端な構造を考え求めた値の範囲にあり、混合砂河床においては、流送時

の表層構造を考え停止限界を修正する必要があることわかる。

なお、同じ構成材料でも流量によって流砂挙動が変化し表層構造が決まることが考えられ、それゆえに河床の凹凸が変化し、図6に示したように抵抗則の様な検討ができない。少なくとも混合砂河床では各粒径の挙動と表層構造が鍵を握っていると考えられ、これらについて検討を行い、表層をベースとしたモデルを構築している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

なし

〔学会発表〕(計 2 件)

1) 溝口敦子: 剛な植生モデル内における流速分布の計測と底面粗度の影響に関する考察, 第17回土木学会応用力学シンポジウム, 2014年05月11日, 琉球大学.

2) 溝口敦子: 二粒径で構成された混合砂河床上の抵抗特性と流砂量に関する実験的研究, 土木学会第69回年次学術講演会, (2014年09月10~12日発表予定, 大阪大学豊中キャンパス).

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

溝口敦子 (MIZOGUCHI Atsuko)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 40362280

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし