

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560546

研究課題名（和文） 粘着性土からなる河道の流路変動過程とその動的平衡形状に関する研究

研究課題名（英文） Deformation process of river channel with cohesive sediment and the stable cross-section in the equilibrium state.

研究代表者

関根 正人（SEKINE MASATO）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60187854

研究成果の概要（和文）：本研究では、流路が粒度幅の大きな材料により構成され、その一部に粘土が含まれるような場合を検討の対象として一連の実験的検討を行った。その結果として、土砂の粘着性ゆえに側岸浸食が抑制される一方で、底面付近には砂のみが堆積し、特徴的な断面形状ならびに顕著な土砂分級が生じることが明らかになった。また、洪水時でも移動することのない石礫が河床骨格を構成するような場合についても検討し、その静的安定状態についても明らかにした。

研究成果の概要（英文）： Experimental investigation was conducted in order to clarify the effect of cohesive sediment on stable channel geometry in dynamic equilibrium state. Comparing the result with the one in case of sand only, the bank erosion is less remarkable in case that the bed is composed of sand and clay mixture. It should be noted that sediment sorting occurs in the river bed because of the deposition of sand only. And another series of experiments were also conducted in this study on the equilibrium state of bed with an extremely wide range of sediment size distribution. Hiding effect of the larger stone on gravel and sand was made clear quantitatively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：河川工学，移動床水理学，流砂，流路変動，粘着性土の浸食

## 1. 研究開始当初の背景

近年、河川環境を配慮して河川をより自然な姿へと戻そうとする試みがなされている。

また、河川上流域にダムを建設したことに伴い河道内の土砂環境が大きく変化してしまうことになったが、これを改善することなど

を目指してダムからの人工排砂や置き砂が行われつつある。これらは流砂ならびに河道の変動に関わる研究がある程度まで進み、その力学的な理解が深まってきた証と捉えることができる。ただし、その裏付けとなる研究が十分な段階にまで達しているとは言えず、多くの未着手あるいは未解明の問題が残されていると考えるべきであろう。現象を捉える上での基礎となる流砂に関して言えば、これまでは河道を構成する材料がある程度限られた粒度分布の範囲にあるような場合に注目してきたということが出来る。たとえば、河床構成材料に粘土が含有されている場合についてはほとんど検討されてこなかった。また、ダム直下流の河川では、洪水時ですら移動することのない大きな石によって河床骨格が構成されているような場をよく目にする。このような河床の場合には、河床骨格の間隙を中小の砂礫が充填しており、これが流砂となって移動している。このような「粒度幅が極端に広い材料」によって構成された河床上で生じる流砂現象についてはほとんど研究されることがなかった。このように今後に向けて検討すべき大きな課題がいくつも残されている。本研究では、特に上記の二つのテーマに焦点を絞り、それぞれの現象を解明することを目指した。

## 2. 研究の目的

本研究では、二つのテーマについての実験的な検討を行い、その流砂機構に迫ることを目的とした。

第一は、粘土の含有する砂（これを「粘着性土」と呼ぶ）によって構成された流路の変動のプロセスとその安定河床形状に関する研究である。粘着性土の浸食に関しては、本研究に先立って筆者らにより研究が進められてきており、すでに浸食速度予測式を導き、その適用性を検証するところまで検討が行われている。ただし、この段階では、砂の間隙を充填して余りある量の粘土が存在するような条件での検討に留まっていた。そこで、誘導された予測式が、さらに少量の粘土しか含有されない場合にまで適用可能であるかについては課題として残されていた。本研究では、まずこの点を明らかにすることから検討を始めた。次に、粘土の含有率を変化させた一連の移動床水路実験を通じて粘着性土からなる流路の変動過程を検討し、その動的安定河床形状がどのようなものになるかを明らかにする。この目的を達成するため、ここでは粘土を含有せず砂のみで流路が構成されている場合の実験もあわせて行うことにし、土砂の粘着性が与える影響を明らかにすることを目指した。

第二のテーマとして、粒度の幅が極端に広い材料からなる河床の平衡状態について明

らかにすることを目指した。これは当初の計画には含まれていなかったテーマであったが、本研究の二年目から新たに追加して検討することにした。河床上で生じる土砂の鉛直分級ならびに河床の平衡状態を明らかにすることを目指している点で、第一のテーマと共通点が少なくないことからこれらを同時並行の形で研究することにした。

## 3. 研究の方法

本研究では、粘着性土からなる流路の変動に関わる実験と、非粘着性材料が極端に大きな粒度分布を持つ河床上で生じる流砂現象に関わる実験とに分けて検討を行った。

粘着性土からなる流路に関する実験は、全長 20 m、幅 0.6 m のアクリル製長方形断面水路を用いて行われ、このうちの上流側 11 m を整流区間とし、下流側 9 m を移動床区間とした。実験に当たっては、まずこの移動床区間に粘着性土を敷き詰め、十分な期間にわたって静水の下で圧密を加えた後に、これを掘り刻んで台形断面の直線流路を作成した。実験時には、下流端から流出した砂礫の量（流砂量）を計測した後、これを移動床区間の上流端から給砂することにしており、流路が動的安定に到達するまで一定流量の通水を継続した。なお、粘着性土は珪砂 3 号とカオリンとからなるものとし、混合比率を変化させた実験を複数行うことにした。

粒度分布が極端に大きな材料からなる河床上の流砂機構ならびに安定河床形状については、全長 5 m、幅 0.1 m、高さ 0.1 m の循環式アクリル製正方形断面閉水路を用いて実験を行った。ここでは、河床構成材料を三つの粒径集団に分けて考えることにし、模擬河床がこのような材料によって構成されるものとした。すなわち、いずれの流量においても移動することのない大粒子（これを「L 粒子」と呼ぶ。粒径 50mm のアルミナ球）により河床骨格が構成され、その間隙を充填するように存在する材料として、掃流砂として移動する中粒子（「M 粒子」、粒径 5mm のガラス球）、浮遊砂として移動する小粒子（「S 粒子」、粒径 0.21mm の珪砂）とを考える。そして、M-S 粒子全体に占める S 粒子の体積比率を  $R_{PS}$  と定義する。本研究では、掃流力ならびにこの  $R_{PS}$  の値を系統的に変化させた一連の水路実験を行い、このような理想化された模擬河床において現れる静的安定状態について検討を加えることにした。なお、この実験においてはあえて給砂を行っていない。

## 4. 研究成果

### (1) 粘着性土からなる流路の変動過程と安定形状

粘着性土を特徴づけるパラメータとして、河床材料の全体に占める粘土の体積比率を

「粘土含有率」 $R_{cc}$ と定義する。筆者らのこれまでの研究では、この $R_{cc}$ が0.3程度～1.0の範囲の材料を対象としてきた。しかし、河川などの実地形を調べると、粘土は含有されるもののその比率はこれよりも小さいという場合も多い。そこで、本研究では、 $R_{cc}$ が0.3以下の材料を対象とすることにした。このような実験を行う上では、このような条件下での供試体をいかに均質に作成する下という点が課題とされてきた。本研究では、まずはこれについての検討を行い、これまで難しいとされてきたこのような供試体を作成する手法を確立することを可能とした。次に、このような材料を用いた一連の浸食実験を行ったところ、図1に示すような実験結果が得られた。粘着性土の浸食速度は水温の影響を陽に受ける。そこで、表示の都合上、上段の図には水温が $15^{\circ}\text{C}$ 以上の結果を、下段には $15^{\circ}\text{C}$ 以下のものをそれぞれひとまとめにして示した。図中の実線がこれまでに提案した

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} \cdot u^{*3}$$

の関係を表したものである。式中の $\alpha$ は水温の影響を表す係数であり、実験毎に水温が異なるため、上記の水温の範囲内であってもこの係数は一定というわけではない。実線を描

く際にはそれぞれの水温の範囲内での係数の平均値を用いている。実験結果を表す図中の○印がばらついて見えるのは、このような理由による。本研究の結果より、浸食速度予測式が粘土含有率 $R_{cc}$ によって系統的なずれが生じることはなく、十分に適用可能であることが確認された。

次に、粘土含有率 $R_{cc}$ が0.3以下の場合を対象に、このような材料によって形成された台形断面直線流路が水流の作用を受けてどのように変動するかを調べた結果を説明する。図2に結果の一例を示す。ここでは、流路が動的に安定な状態に達した後の流路の状態を示す写真(上段)と、横断面形状についての計測結果(下段)が示されている。また、図2の左側には $R_{cc} = 0$ (すなわち砂のみ、Case N)の場合の結果が、図の右側には $R_{cc} = 0.165$ の場合(Case C)の結果が、それぞれ示されている。この二つの実験は同一の水力条件下で行われたものであり、 $R_{cc}$ の値以外の条件には違いはない。流量は $Q = 2.2 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ 、水路床勾配は $S_0 = 1/100$ である。

まず、砂のみの場合には側岸浸食が顕著に発生し、拡幅が進むのと並行して河床が上昇して平衡状態に達することがわかる。この場

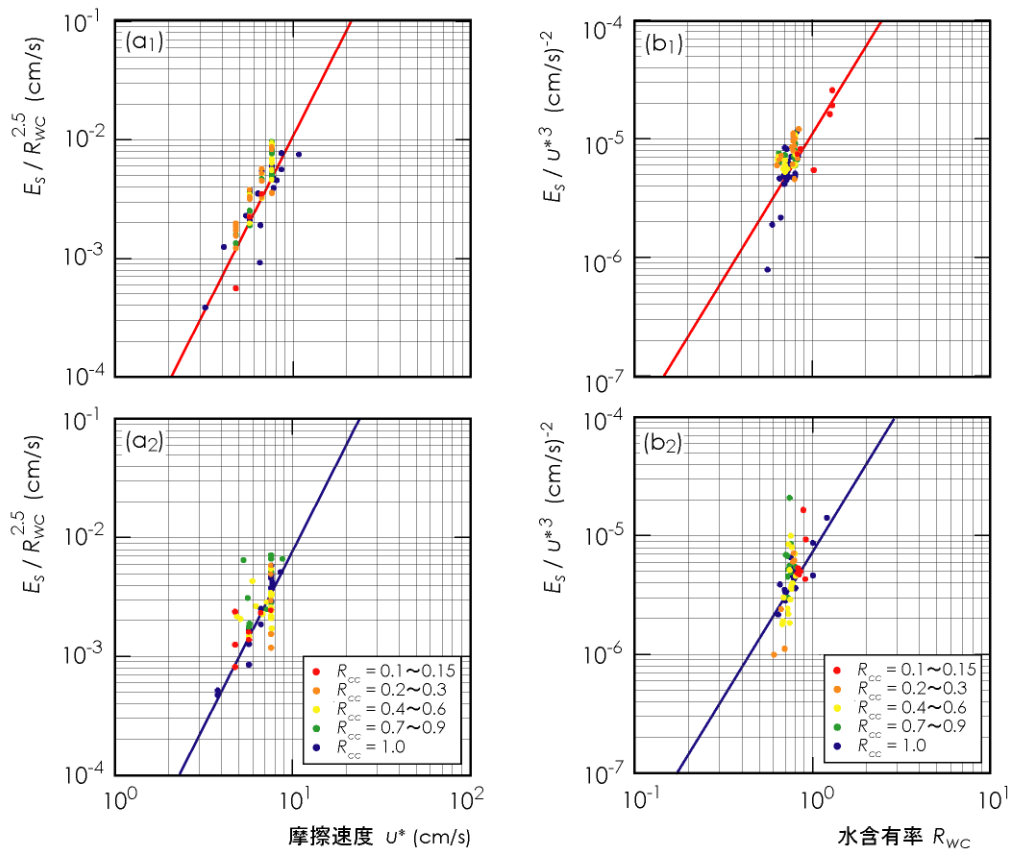


図1 粘着性土の浸食速度  $E_s$  と摩擦速度  $u^*$ 、水含有率  $R_{wc}$ 、粘土含有率  $R_{cc}$  との関係：それぞれ上段が水温  $15^{\circ}\text{C}$  以上、下段が  $15^{\circ}\text{C}$  以下の場合の結果を表す。

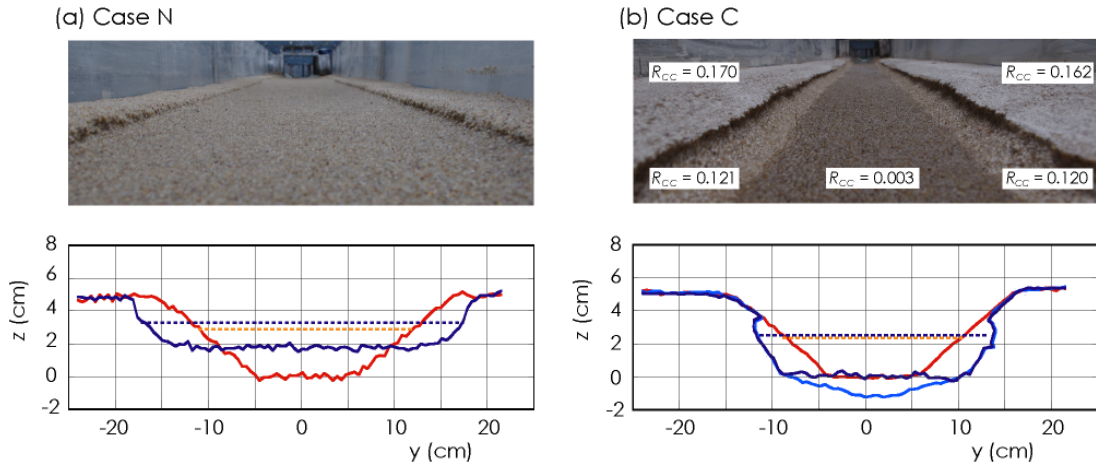


図 2 模擬河床の動的安定状態の比較：(a) 砂のみの流路，(b) 粘土を 16.5% 含有した材料からなる流路．図中の赤色の実線が初期河床の形状を，紺色の実線が動的安定状態における河床形状をそれぞれ表す．二本の破線は同系色の河床に対応する水面形を表している．(b) の下段の横断面図における紺色の実線の下に青色の実線が描かれているが，この二本の実線により挟まれた区域には砂のみの層が形成されていた．また，(b) の上段の写真の中の数値は，各区域の河床表層における粘土含有率  $R_{cc}$  の値であり，河床中央部の広い範囲にわたって  $R_{cc}$  がほぼ 0 となり，河床において顕著な水平ならびに鉛直分級が生じていたことがわかる．

合には，両側岸部での浸食量と底面での堆積量とは一致する．これはこれまでの知見と一致する結果である．これに対して，粘土を 16.5% 含有しただけで流路の変動に顕著な差異が現れる．すなわち，材料の粘着性ゆえに側岸浸食が抑制され，水際付近にはオーバハンク状の地形が現れる．また，流路中央部の横断勾配がほぼ 0 になっている河床上では顕著な鉛直分級が生じる．図 2 (b) 上段に見られる写真に記入された数値は，それぞれの位置における表層の粘土含有率  $R_{cc}$  の値を表している．高水敷に相当する水面よりも上に位置する区域では，左右岸ともに初期値とほぼ一致する 0.165 程度の値となっているほか，水際付近の側岸部では 0.12 程度となることがわかる．一方，上述した流路中央部の河床は砂のみによって構成されており，粘土はほとんど見られない．この砂の層を剥いでいったところ，図 2 (b) 下段の図における青色の実線の位置までが砂の堆積層であることがわかった．なお，この位置より下方には初期の粘土含有率に等しい材料からなる地形が残されていた．このように，粘土を含有した材料からなる流路の場合には，浸食により水流中に流出した粘土が堆積することなく下流端まで到達する．このため，側岸部での浸食が抑制される一方で，河床底部に砂が堆積するという顕著な土砂の分級が生じる．

本研究では，上記の研究に加えて次のような実験的検討も試みている．粘土のみで構成

された河床上で，無給砂で実験を行った場合の水流による浸食については，上記の研究を含むこれまでの研究でかなりのところまで理解が進んできている．ところが，このような河床の上流から砂礫が輸送されてくる場合に，その影響が河床にどのように現れるかについてはほとんど明らかにされていない．本研究では，この点を明らかにするための実験的検討にも着手した．砂礫の輸送に伴って，浸食が促進されることがあること，河床表面に砂礫の堆積層が形成され，河床の鉛直分級が生じること，などがわかってきている．ただし，これについては当初の計画にはなかった研究であることから，今後さらに実験を継続し，より確かな結論を得てから報告することにしたい．

さらに，粘着性土からなる地形の変動予測を行うための解析手法の開発にもあわせて取り組んできており，その結果については今後速やかに公表する予定である．

## (2) 粒度幅の極端に大きな河床上の流砂機構と安定河床

本研究により明らかになった結果の一部をまとめて図-3 に示す．洪水に相当する流量であっても移動することのない L 粒子によって河床骨格が形作られ，M-S 粒子がその周りの間隙を充填する陽に存在する場合には，図 3 中の右上に示された模式図のような静的安定河床状態に到達することがわかった．すなわち，河床のうちの L 粒子の間隙に相当する

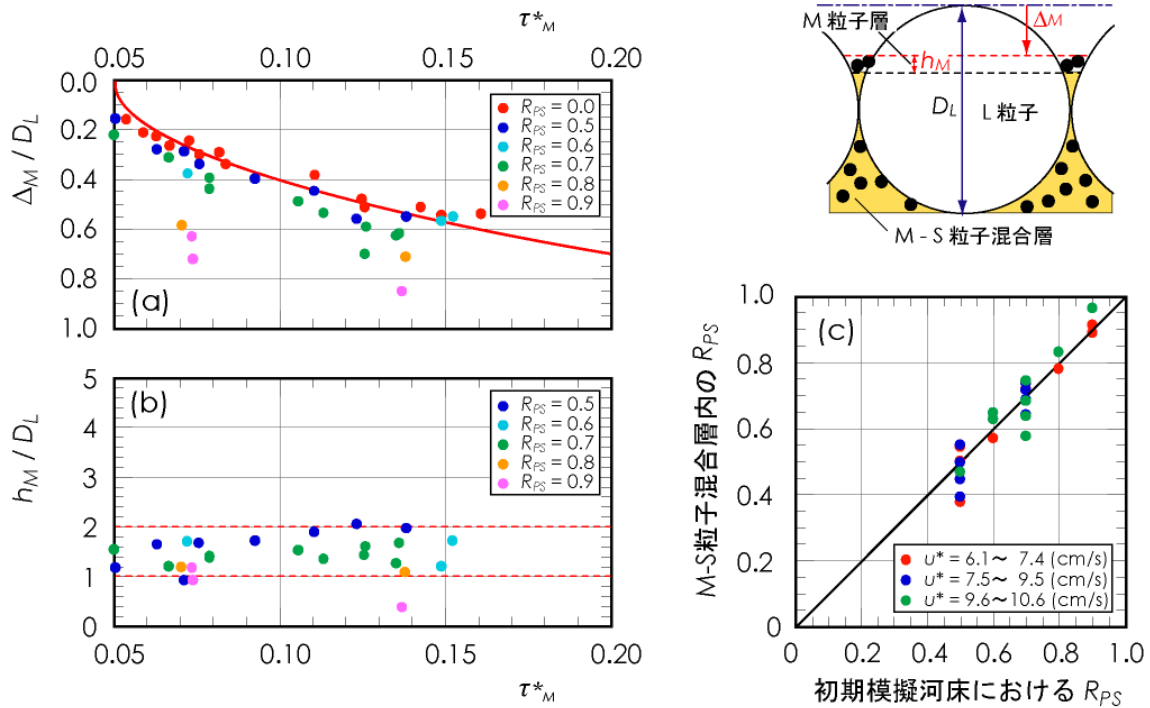


図 3 三粒径 L-M-S 河床の静的安定状態に関わる河床の鉛直構造

部分には、水流に露出するように M 粒子のみによる層が現れる。そして、その上面における掃流力は、L 粒子の遮蔽の影響を受けて、その限界掃流力に等しい値にまで低下する。L 粒子頂部から M 粒子層の上面までの高さを  $\Delta_M$  と定義すると、この値は図 3(a) に示されるような関係を満足する。すなわち、無次元掃流力  $\tau_M^*$  ならびに  $R_{PS}$  の値が大きいくほど  $\Delta_M$  が大きな状態で平衡状態に達することになる。また、この層の厚さは、図 3(b) に示されるように、M 粒子の粒径  $D_M$  の 1~2 倍程度となり、これは条件によらずに概ね一定となる。なお、この M 粒子層の下面に相当する位置では、L ならびに M 粒子の遮蔽の影響を受けてさらに掃流力が低下し、S 粒子にとっての浮遊限界に等しい掃流力となる。その結果、この M 粒子層の下方は M-S 粒子からなる混合層となる。図 3(c) よりわかるように、その粒度の比率  $R_{PS}$  はその初期値とほぼ同一と判断することができる。このように、ここで設定したように互いに 1 オーダー程度の差をもつ三粒径の材料によって河床が構成される場合には、きわめて特徴的な河床の鉛直分級が生じることになる。本研究により、その構造が明らかになった。

このような実験とは別に、L-S、L-M ならびに M-S のみによる二粒径河床の場合の移動床実験も試みられており、粒径の大きな砂礫による遮蔽の効果などについてもあわせて明らかになった。今後は、こうした検討の

結果を踏まえて、このような模擬河床の動的安定状態について解明していく予定である。さらに、その延長上に実河川における移動床問題を位置づけられるように、今後もさらに検討を行っていく予定である。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 関根正人, 平松裕基, 三國寛正, 門井勇樹, 三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態と遮蔽効果, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, 2012, I\_931-936.
- ② 関根正人, 三國寛正, 平松裕基, 三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態に関する実験的研究土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, 2011, I\_733-738.
- ③ 関根正人, 白川 剛, 岡 幸宏, 粘着性土の浸食に及ぼす粘土含有率の影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, 2011, I\_745-750.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 関根正人・岡 幸宏・白川 剛, 粘着性を有する流路の動的安定形状に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月 8 日, 愛媛大学.
- ② 関根正人・平松裕基・三國寛正, 三つの粒径集団の砂礫により構成された河床

の静的安定状態, 土木学会第 66 回年次  
学術講演会, 2011 年 9 月 9 日, 愛媛大学.

- ③ 関根正人・平松裕基・三國寛正, 三つの  
粒径集団の土砂により構成された河床  
の静的安定状態に関する研究, 砂防学会  
第 60 回研究発表会, 2011 年 5 月 19 日,  
神奈川県民ホール.
- ④ 関根正人, 白川 剛, 粘着性土の浸食速  
度に及ぼす粘土含有率の影響, 土木学会  
第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1  
日, 北海道大学.
- ⑤ 関根正人, 三國寛正, 西 俊彰, 河床骨  
格が大礫で構成された河床の流砂過程  
とその静的安定状態に関する実験的研  
究, 土木学会第 65 回年次学術講演会,  
2010 年 9 月 1 日, 北海道大学.
- ⑥ 関根正人, 三國寛正, 西 俊彰, 河床骨  
格が大礫により構成された河道におけ  
る流砂現象に関する研究, 砂防学会第 59  
回研究発表会概要集, 2010 年 5 月 27 日,  
長野市若里市民文化ホール.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関根 正人(SEKINE MASATO)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号 : 60187854