

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560629

研究課題名(和文) 水流による軟岩の浸食機構の解明とその実河川への応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on the erosion mechanism of the soft rock by the flow of water and its application to the actual river

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、鬼怒川などでは「粘土を含有し柔らかくに固結化した材料」が河床のある区間にわたって露出するようになり、これまでにない規模の浸食が生じている。このような粘性土の浸食のメカニズムを明らかにすることを旨として基礎的な水路実験をおこなった。結果として、上流から掃流砂として運ばれてきた砂礫によって、粘土河床の浸食が受ける影響について明らかにすることができた。また、粘土を含有する地形の変動を数値予測する新たな手法を開発した。これを裸地斜面の表面浸食現象に適用し、水路実験の結果と比較することによって、斜面上に流路群が刻まれていくプロセスを的確に数値予測できることが実証された。

研究成果の概要(英文)：The cohesive materials which contained clay and had full compaction came to be exposed on actual riverbed, e.g., the Kinugawa River. Due to this, it was reported that the erosion of an unprecedented scale occurred. In this study, a series of fundamental movable bed experiments were conducted to elucidate the mechanism of such cohesive sediment erosion. As a result, it was made clear what kind of change appeared for the erosion of the clay riverbed by sand and gravel which had been transported as bed load from upstream reach of river. In addition, the numerical prediction technique was newly developed. It enables us to predict a deformation of the bed or slope which contained clay. It was applied to a surface erosion phenomenon of the bare slope. And another flume experiments were conducted in order to verify validity of this technique. As a result, it was verified that the formation process of channel network on a slope can be predicted precisely by this technique.

研究分野：土木工学・水工学

キーワード：粘着性土 軟岩 浸食 地形変動 移動床水理学 河川工学

1. 研究開始当初の背景

我が国の沖積河川では、ダム建設に象徴されるような治水対策の影響によって、以前に比べて流送土砂量が減少するようになった。あわせて砂利採取が行われたことにより、その後の河床は全般的には低下傾向にある。その結果として、鬼怒川や多摩川などでは河床の一部区間に軟岩あるいは土丹と呼ばれる固結化した粘着性土(粘土と砂礫からなる材料)が露出し、これまでに比べてはるかに大規模な局所洗掘が生じたと報告されている。河床が砂礫のみにより構成されている場合には、従来の流砂機構に関わる知見に基づき河床の変動を捉えることができ、その予測も可能である。ところが、固結化した粘着性土が河床表面に露出するようになると問題は別である。これに対しては、力学的根拠をもって河床の変動を論じることはできず、限られた数の情報に基づいて経験的に判断を下すしかない。なお、十分に圧密を受けた粘着性土が水流のみの作用によってどのように浸食されるかについてはすでに系統的な実験が筆者らにより行われてきた。そこで、2.以降で説明する水路実験を成し遂げるためのノウハウは十分に蓄積されている状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、十分に圧密を受けて固結化の進んだ粘着性土を主な検討対象として、その浸食のプロセスとその背後にあるメカニズムを探ることを目的とした。具体的には次の二項目についての研究を行った。

第一に、上記のような粘着性土からなる河床が、その上を移動する砂礫の作用を受けて変動するプロセスとそのメカニズムを明らかにすることを目指して移動床水理実験を行った。ここでは、十分に圧密を受けた粘土河床上に上流から砂礫を供給し、これが掃流砂として移動するときに、砂礫の摩耗あるいは衝突の作用によってどのような浸食が生じるか、河床がどのような鉛直構造をもつものへと変化するのかについて具体的に明らかにしている。この検討においては、砂礫の供給量の大小が重要であることから、この量を系統的に変化させた一連の実験を行うことにした。

第二に、粘着性を有する地形の変動プロセスを数値計算により再現可能とする手法の確立を目指した。地形が砂礫のみで構成されている場合の変動については、すでに多くの研究がなされ、適用範囲内の現象についてはある程度の精度で予測計算を行うことができる。しかし、粘土を含有するような地形の変動についてはあまり注目されることがなく、この問題に本格的に取り組んだ研究もなかった。本研究では、粘着性を有する材料からなる裸地斜面の浸食現象に対して開発した予測手法を適用することにし、数値実験を通じて実験では計測することの困難なメカ

ニズムにまで迫ることを目指した。

3. 研究の方法

本研究で最終的に解き明かすことを目指したのは、河床に露出した「自然堆積した軟岩(緩く固結化した粘着性土)の浸食現象である。そこで、研究の第一歩として鬼怒川ならびに多摩川の現地調査を行うとともに、固結化した粘着性土をサンプルとして採取した。さらに、これを供試体とした土質試験ならびに実験水路内での浸食実験を行うことにより、その特性を探ることにした。その結果、実河川の河床材料の場合には不均質性が高く、力学的な強度の低い箇所が散在するため、これが供試体全体の土質力学的な強度や発生する浸食の状況を大きく左右することがわかった。このため、本研究では現地材料を供試体とする実験的検討を行う代わりに、「均質に練り混ぜた後に十分に圧密をかけた粘土による供試体」を対象とした基礎的な浸食実験を行うことにした。また、筆者らがこれまで行ってきた水流による作用に加えて、「上流から流送されてくる砂礫」が粘土河床に接触する際に生じる摩耗あるいは衝突によって、粘土河床がどのように変動するかに注目した。ここでは特に上流側から供給される砂礫の量に着目し、これを系統的に変化させた一連の実験を行った。本報告書では、掃流力あるいは水温の条件を変えた3つのシリーズの実験の結果を中心に論じる。なお、この実験の遂行に先だって、現有の亚克力製水路の一部を作り替え、砂礫を上流側から連続的に供給できるようにした。

このような実験的な検討に加えて、本研究では、粘着性材料からなる地形の変動現象を数値的に予測可能とする手法を構築した。また、この手法の妥当性の検証をひとつの目的として、降雨による裸地斜面の浸食に関わる水路実験も行った。これには現有の実験水路を用いた。このような実験はこれまで主として砂質土からなる斜面を対象に行われてきたが、本研究により、「斜面の表面浸食と流路群形成のプロセス」に及ぼす材料の粘着性の影響を明らかにすることができた。なお、ここで開発された予測手法を適用することにより、実斜面の表面浸食の数値予測も可能となった。

4. 研究成果

(1) 掃流砂として流送される砂礫が粘土河床の浸食過程に及ぼす影響

粘土河床が水流の作用を受けて浸食されていくプロセスについては、筆者らのこれまでの研究(引用文献)を通じてその理解が深まっている。単位時間・単位面積当たりに浸食される粘着性土の体積のことを「浸食速度 E_s 」と定義すると、これは水流の摩擦速度 u_* と粘着性土の水含有率 R_{wc} の関係として次のように評価できることが示されている。

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

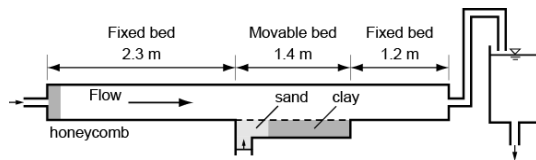


図1 実験水路の模式図(粘土浸食実験)

ここに、 α は水温により異なる値をとる定数であり、一般に、粘土鉱物の違いによっても異なる値となる可能性がある。

現地河床に露出した固結化した粘着性土の浸食について考える際には、水流の作用に加えて上流から供給されてくる砂礫の影響が顕著であると判断される。このため、前述した既往の実験的研究をさらに発展させ、粘土からなる模擬河床の上流側から砂礫を供給し、これにより河床にどのような変化が現れるかに注目した系統的な実験を行った(主として、引用文献)。

実験水路の概要は図1に示すとおりである。一辺が0.1mの正方形断面閉管路を用いた。この水路中央付近の河床には凹部が設けられており、そこに模擬河床として粘土の供試体を設置した。また、その上流側に砂礫のみによる区間を設け、この区間から移動を開始した砂礫が供試体上を移動するようにした。粘土としてはカオリン(粒径0.005mm)を、砂礫としては60%粒径 D_{sg} が1.65mmの珪砂3号を用いた。この実験の結果を表しているのが写真1ならびに図2である。本報告書では、紙面の関係で以下の条件下で行われた結果のみを記すことにした。Case Aシリーズの実験は、流量 $Q = 0.0045$ (m^3/s)、珪砂3号の粒径 D_{sg} に対して算定された無次元掃流力 $\tau^* = 0.079$ 、単位幅当たりの砂礫の給砂量 $q_{sg} = 0.0 \sim 0.10$ ($cm^3/s/cm$)、水温 $T = 23.2 \sim 25.6$ ($^{\circ}C$)の条件下で行われた。また、Case Bシリーズの実験条件は、 $Q = 0.0050$ (m^3/s)、 $\tau^* = 0.097$ 、 $q_{sg} = 0.0 \sim 0.16$ ($cm^3/s/cm$)、 $T = 23.8 \sim 25.0$ ($^{\circ}C$)であり、Case Cシリーズの実験条件は、 $Q = 0.0050$ (m^3/s)、 $\tau^* = 0.097$ 、 $q_{sg} = 0.0 \sim 0.22$ ($cm^3/s/cm$)、 $T = 10.5 \sim 15.5$ ($^{\circ}C$)である。Case AとCase Bは、水温がほぼ等しく掃流力のみ異なる実験である。これに対して、Case BとCase Cは、掃流力が等しく水温のみ大きく異なる実験となっている。

写真1にはCase Aシリーズの実験の結果を一例として示した。これらの実験では、供給砂礫の量のみ異なっており、Case A-1～A-4の順に多くの砂礫が供給された。写真は通水開始から10分後のものであり、模擬河床の表層の状態を上方から撮影したものである。なお、この時刻には河床が動的平衡に近い状態に達していたと見なすことができ、

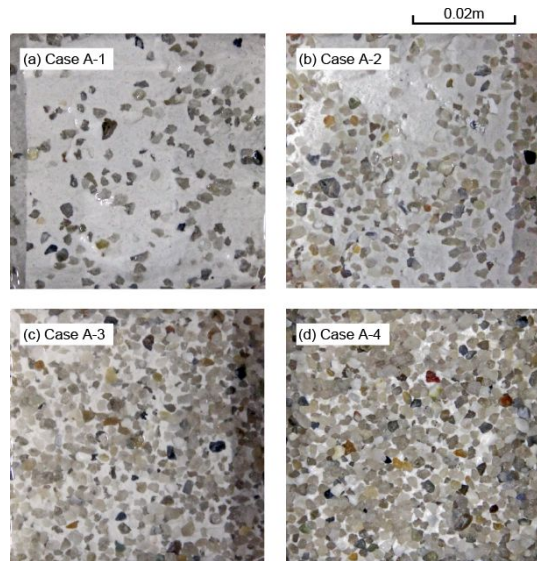


写真1 供給砂礫の量に伴う河床表面の変化(実験後に上方から撮影された写真):白い部分が粘土、茶色の部分が河床に入り込んだ珪砂を表す。単位幅当たりの砂礫の給砂量 q_{sg} はCase A-1～A-4の順に大きくなり、それぞれ0.02, 0.04, 0.06, 0.10 $cm^3/s/cm$ である。

これ以降はさらに時間が経過しても河床の状態が大きく変わることはなかった。写真1よりわかるように砂礫の供給量が大きいほど多量の砂礫が河床表層(交換層)に入り込んでいることがわかる。

この河床表層の鉛直構造について、実験結果をまとめたものが図2(a), (b)である。図2の横軸は供給砂礫の量 q_{sg} に関わる無次元量になっており、各掃流力に対して算定される平衡状態における掃流砂量の値 q_{be} で q_{sg} を除すことで基準化されている。

図2(a)は、模擬河床面直下に形成される表層の厚さの変化を表している。また、図2(b)はこの層内に存在する粘土と砂礫の総和に占める粘土の比率(粘土含有率) R_{cc} の変化を示している。この結果から次のことがわかる。(i) 砂礫を供給すると、粘土河床の表面高さは浸食によって低下するが、これと並行して表面下に砂礫が取り込まれて表層を形成するようになる。(ii) 表層の厚さは砂礫の供給量によらず粒径 D_{sg} 程度となり、顕著な変化は見られない。(iii) 砂礫の供給量が大きくなると、表層内に存在する砂礫の比率が高くなる。(iv) 表層に十分な量の砂礫が入り込むと、砂礫がかみ合ったアーマークートのような状態になり、それ以上の量を供給しても河床の鉛直構造に変化は見られなくなる。このときの河床構造は、粘土が35%、砂礫が65%程度の砂礫が密に充填された状態に向かって変化していく。

通水を行った 10 分間の浸食のプロセスについて整理すると、次のようにまとめることができる。(i) 通水初期の段階では、水流による浸食と、掃流砂として移動する砂礫の摩耗・衝突の効果によって浸食が進行し、河床面の低下が生じる。(ii) 浸食の初期の段階では粘土河床面に波状の凹凸が形成され、その凹部を中心に砂礫が堆積するほか、衝突時に砂礫が粘土河床面下に入り込む。(iii) この結果、河床表面下には表層が形成され、その中の砂礫の含有比率は時間の経過とともに増大していく。(iv) 最終的には河床の低下ならびに粘土の浸食が緩やかなものとなり、やがては動的平衡と見なせるような状態に達する。

図 2 (c) には、この 10 分間にわたっての「平均浸食速度 E_{so} 」と q_{Be}/q_{sg} との関係がまとめられている。ここに、「平均浸食速度 E_{so} 」とは、10 分間にわたって浸食された正味の粘土の体積を経過時間で除した値のことを指す。この E_{so} が水流と供給砂礫の両方の影響を受けた変動の結果を表していることや、この値がその瞬間の浸食速度を表しているわけではないことに注意されたい。この図より、砂礫の供給量が平衡掃流砂量の 1/2 程度(図の横軸の値が 0.5 程度)の場合に、浸食が最も顕著に進むという傾向があることが見てとれる。このことは、河床表層に入り込んだ砂礫の体積比率(すなわち、 $1 - R_{cc}$)とも密接に関係する。砂礫がある限界を超えて十分に供給されると、河床表層に砂礫がかみ合うように密に入り込み、その下にある粘土を遮蔽する。このため、その状態に達した後の時間帯ではほとんど粘土が浸食されない状態となる。ただし、砂礫の再浸食に伴うわずかな量の浸食まではなくなる。また、砂礫の供給量がこの限界値以下である場合には、供給量が大きいほど浸食量も大きくなる。これは砂礫による摩耗・衝突に伴うものである。図 2 (c) はこのような傾向を表すものとして重要である。なお、前述した q_{Be}/q_{sg} の限界値についてふれると、これと E_{so} との関係が水温や掃流力の違いによって変化し、図のような差異が生じることがわかっている。これについては今後さらに検討する必要がある。

本報告では、供給する砂礫の量を $q_{Be}/q_{sg} < 1.2$ の範囲内で変化させた実験の結果について説明したが、さらに多量の砂礫を供給した実験も行った。その結果によれば、粘土と砂礫からなる「表層」の上に砂礫のみによる層が形成され、真の動的平衡状態に達することが確認されている。実河川の河床上に露出している「固結度の度合いのさらに高い軟岩」の場合には、河床面下に砂礫が入り込みアーマーマーコート化することはないと推察されるが、河床表面が砂礫により被覆されるように

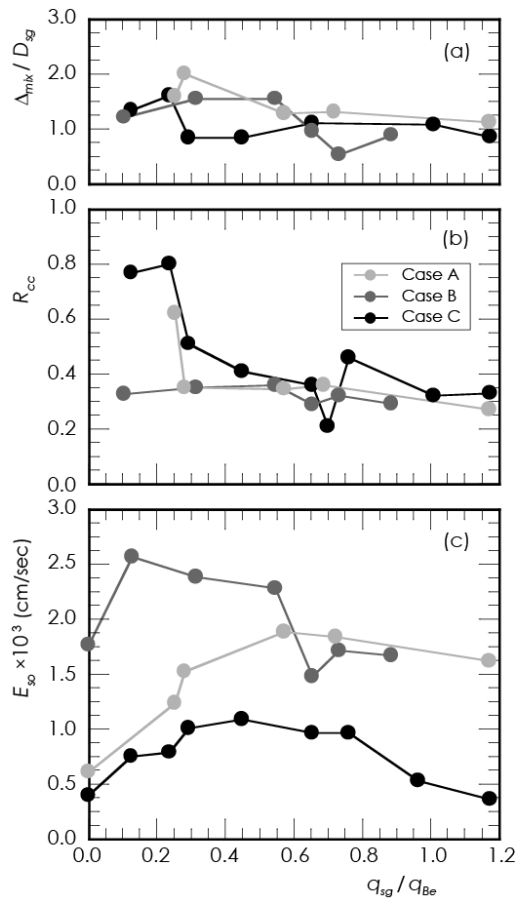


図 2 供給砂礫の量の違いが河床表層の状態ならびに粘土河床の浸食速度に与える影響：図の横軸は、供給砂礫の量 q_{sg} を各掃流力に対して算定される掃流砂量の平衡値 q_{Be} で除した無次元量を表す。縦軸は、(a)は河床表層(交換層)の厚さを砂礫の粒径 D_{sg} で除した値、(b)は表層内の粘土含有率 R_{cc} 、(c)通水 10 分間にわたっての粘土の平均浸食速度 E_{so} 。

なれば、これによる遮蔽を受けて浸食が抑制されるようになる。

(2) 粘着性地形の浸食過程に関する数値予測

本研究では、粘土を含有する材料からなる地形の変動に及ぼす材料の粘着性の影響についてもあわせて検討を行った。ここでは、粘土を 12%の比率で含有する材料によって構成された裸地斜面の浸食現象について、移動床水理実験を行うとともに、これを数値計算により予測可能とする手法を確立することを目指した。人工降雨により引き起こされる裸地斜面の浸食については、これまで砂斜面を対象に研究してきたが、粘着性土からなる斜面を対象とした実験はほとんどなく、数値予測に関しては皆無と言える。

数値計算に先立って行われた実験の概要について説明する。ここでは、図 3 の模式図のような Open-book 型の斜面を対象に行われた検討の結果について報告する。全長 160cm、幅 100cm の実験水路の中に、粘土含

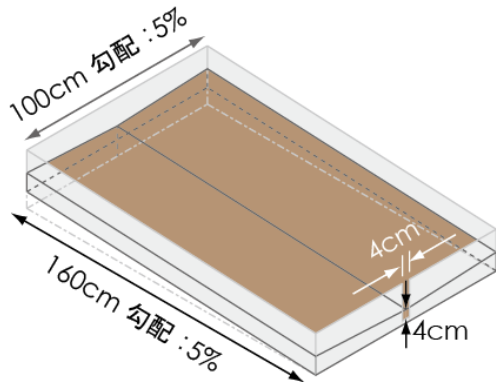


図3 検討対象とした裸地斜面の概要

有率 12%, 砂含有率が 88% の材料からなる斜面を作成し, この上方から時空間的に一定の強度 (60 mm/h) の人工降雨を与えることにより実験を行った。斜面は左右対称軸を谷線として左右に 5% の傾斜をもつ「Open-book型」であり, 斜面全体の縦断方向勾配も同じく 5% に設定した。斜面材料としては, 60% 粒径 D_{50} が 0.15mm の珪砂 7 号と前掲のカオリン粘土である。斜面の下流端にあたる壁には幅 4cm のスリットが空けられており, 雨水や浸食された粘土ならびに砂礫はこのスリットを介して流出されるようになっている。

本研究で開発した「粘土と砂礫からなる地形の変動を数値予測する手法」についてふれる。ここでは非平衡流砂モデル考え方を導入し, 浸食後の粘土はウォッシュロード, 砂礫は掃流砂としてそれぞれ輸送されるとした。粘着性土の浸食量の評価には, 前掲の浸食速度予測式を適用し, 砂礫が堆積した場合の再浸食に関しては中川・辻本の Pick-up rate 予測式を用いた。また, 雨水のその後の流れは表面流あるいは浸透流となるため, これについては同時に解いていくことにし, 流路フロント部(ガリ)において発生する復帰流についても的確に再現できるようにした。これ以上の予測手法の詳細については引用文献を参照されたい。

実験ならびに数値予測計算による結果の一例を示したのが図4である。図の上段が水路実験の結果を, 下段が数値計算の結果をそれぞれ表している。いずれも降雨開始から 30 分後の状態であり, 濃い赤で描かれている箇所が最も顕著な浸食が生じたことを表す。また, 黒色または濃紺色以外で塗られている区域が流路群に相当する。実験時に計測を行った空間刻みが数値計算用のメッシュ間隔に比べて粗いことから, 実測では細かな流路の存在までは捉えられていない。このことを考慮に入れて両者を比較すると, 数値計算によって実験の結果が概ねよく再現されていることがわかる。

粘土を含有する材料からなる地形の場合には, 材料の粘着性にゆえに砂のみの地形に比べて安息角が大きくなる。そのため, 狭くて深い溝状の流路が複雑に刻まれるように

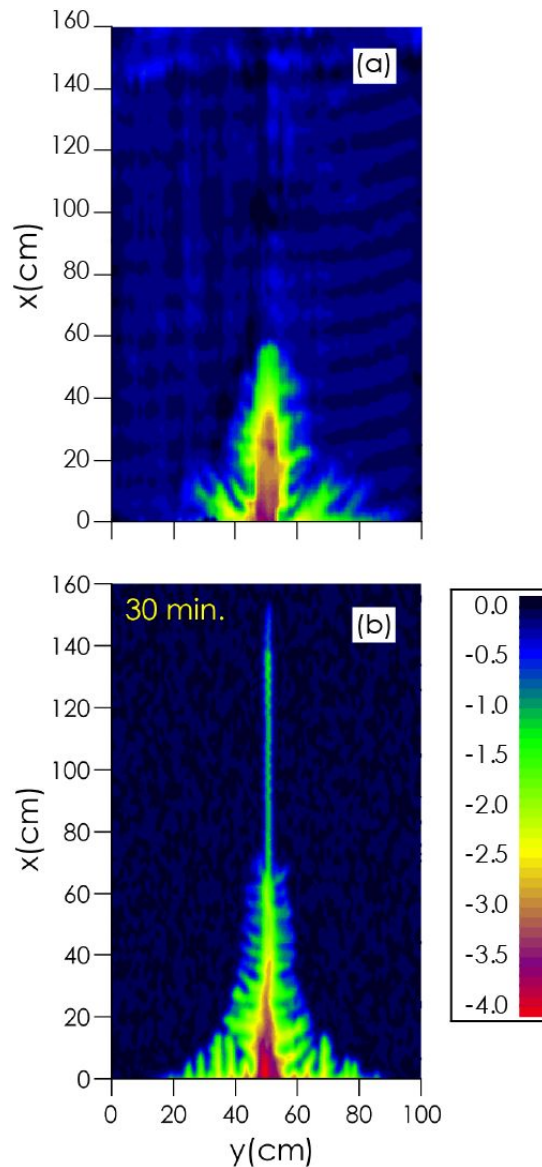


図4 粘土を 12% 含有する裸地斜面の表面浸食実験と数値予測の結果の比較: (a) 実験結果, (b) 数値計算結果

発生し, それが発達・統合されるようにして流路群が形成されていく。数値計算によってもこのプロセスが的確に捉えられていた。なお, これ以外の条件でも同様の比較検討を行ったところ, この予測手法によって斜面浸食現象全般が十分な精度で再現可能であることが確かめられた。

<引用文献>

西森研一郎, 関根正人, 粘着性土の浸食過程と浸食速度予測式に関する研究, 土木学会論文集, Vol.65, No.2, 127-140, 2009.

関根 正人, 野本 高視, 高野 大貴, 砂礫の供給を受ける粘土河床の浸食過程と河床の鉛直構造, 土木学会論文集 B1(水工学) 査読有, Vol.71, No.4, 2015, 1-859-864.

関根 正人, 降雨により生じる裸地斜面の表面浸食と流路群の形成に関わる数値解

析,土木学会論文集 B1(水工学),査読有,
Vol.70, No.4, 2014, I_919-924.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

関根 正人,野本 高視,高野 大貴,砂礫の供給を受ける粘土河床の浸食過程と河床の鉛直構造,土木学会論文集 B1(水工学) 査読有,Vol.71, No.4, 2015, I_859-864.

関根 正人,多田 篤史,石川 学,降雨による斜面浸食と形成される流路群に関する水路実験,土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.70, No.4, 2014, I_913-918.

関根 正人,降雨により生じる裸地斜面の表面浸食と流路群の形成に関わる数値解析,土木学会論文集 B1(水工学),査読有, Vol.70, No.4, 2014, I_919-924.

関根 正人,田中 翔真,多田 篤史,斜面浸食により形成される流路群とこれに及ぼす材料の透水性ならびに粘着性の影響,土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.69, No.4, 2013, I_1021-1026.

関根 正人,岡 幸宏,野村 正和,粘着性河床の浸食に与える流送砂礫の影響,土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.69, No.4, 2013, I_1027-1032.

〔学会発表〕(計5件)

関根正人,高野大貴,野本高視,松江川崇,粘土河床の浸食プロセスとこれに及ぼす砂礫の流送の影響,土木学会第70回年次学術講演会,2015年9月16日~18日,岡山大学(岡山県岡山市).

関根正人,佐野正太,石川 学,隣接した粘土層の存在が砂斜面の表面浸食に及ぼす影響,土木学会第70回年次学術講演会,2015年9月16日~18日,岡山大学(岡山県岡山市).

関根 正人,野本 高視,高野 大貴,粘土河床の浸食に及ぼす砂礫の移動量の影響,土木学会第69回年次学術講演会,2014年9月10日~12日,大阪大学(大阪府吹田市).

関根 正人,野村 正和,河村 和弥,野本高視,岡 幸宏,砂礫の輸送による粘土河床の変動に関する実験的研究,土木学会第68回年次学術講演会,2013年9月4日~6日,日本大学生産学部(千葉県習志野市).

関根 正人,石川 学,多田 篤史,田中 翔真,降雨による斜面浸食と流路群形成に及ぼす斜面勾配の影響,土木学会第68回年次学術講演会,2013年9月4日~6日,日本大学生産学部(千葉県習志野市).

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