

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14837

研究課題名(和文)粘土流失特性を考慮した混合土砂モデルの改良と砂礫の漂砂計算への拡張

研究課題名(英文)Improvement of mixed sediment model considering clay loss and extension to sand-gravel mixture

研究代表者

趙 容桓(Cho, Yonghwan)

名古屋大学・工学研究科・特任講師

研究者番号：00761082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、混合土砂の乾燥かさ密度に着目し、砂と粘土からなる混合土砂における土砂割合(含有率)が混合土砂の移動特性に及ぼす影響を検討する水理模型実験と混合土砂モデルの改良および再現計算を実施した。水理実験によって、粘土含有率と混合土砂の乾燥かさ密度の関係式が得られ、混合土砂モデルの漂砂計算に活用した。混合土砂モデルは粘土と砂の乾燥かさ密度を考慮し、混合土砂の幾何学的構造を基に改良した。改良した混合土砂モデルを用いて、粘土流失の特性、粘土含有率が地形変化に及ぼす影響、混合土砂の掃流移動を考慮した斜面崩壊の数値的安定性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

改良した混合土砂モデルは、河川分野で提案された混合土砂の理論を海岸分野まで拡張し、粘土と砂の移動特性を考慮することで、混合土砂の侵食・堆積だけではなく、粘土の時間的・空間的な移動傾向および分布、粘土の流失機構等、混合土砂の移動傾向を明らかにすることができた。また、構築したモデルを人工干潟における粘土の動的管理に活用することで、地球温暖化防止のための注目されているブルーカーボン生態系の造成に一助できることが期待される。また、混合土砂の掃流移動計算の可能性が確認され、混合土砂モデルの適用範囲を砂と礫からなる混合土砂の漂砂計算まで拡張する基礎を設けたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research presents the improvement of the mixed soil model focusing on the dry bulk density of mixed soil and the investigation of the effect of mud fraction on the movement of mixed soil consisting of sand and clay. The research is composed of hydraulic experiments and numerical simulations. The hydraulic experiment obtained the relationship between mud fraction and the dry bulk density of the mixed soil, which was used for sediment transport calculations of the mixed soil model. The mixed soil model was improved based on the geometric structure with the dry bulk density of the mixed soil. Using the improved mixed soil model, the characteristics of clay loss, the effect of mud fraction on topographic changes, and the numerical stability of mixed soil slide calculations considering the bed-load of mixed soil were investigated.

研究分野：海岸工学

キーワード：粘土流失 乾燥かさ密度 幾何学的構造 混合土砂モデル 干潟 斜面崩壊 含有率 流失活性層

1. 研究開始当初の背景

混合土砂の移動特性については、多くの河床が粘土と砂からなる混合土砂の状態であることから、漂砂循環系および河床の地形変化機構を解明する際、従来河川分野の範疇で扱われてきた。砂質土のすべての空隙が粘土によって埋められていると仮定し、粘土による粘着応力と粘着力が作用する粘着面積によって、砂粒子の移動限界が増加するという理論が提案されている。複雑な粘土の電気化学的な性質を粘着応力の一つの項でまとめ、不確実性が高い粘土の物性値を制御するとともに、幾何学的な関係から粘土と砂の構造的な安定性を評価することで、混合土砂の理解を深めた。しかし、粘土の種類による粘着力の定義には未だ不明な点が残っており、また、海域環境への適用性や数値的な検討等、混合土砂の移動特性について未解明な点が多い。

波浪場における混合土砂では、時間経過に伴って混合土砂の表層から粘土の流失が徐々に発生する特徴が確認されている。粘土の流失は、砂粒子の移動抵抗を低下させることにつながる。これにより砂粒子の移動特性が変化するため、混合土砂の移動特性において、粘土の流失機構の究明は不可欠である。具体的には、混合土砂の表層を構成する粘土の含有率が粘土流失に与える影響と粘土の流失が発生する流失活性層の深さの検討が挙げられる。

一方、砂と礫からなる混合土砂では、波浪場において汀線付近で礫が堆積し、沖側に砂が溜まる分級現象が発生する特性がある。分級についての研究は、様々な現地観測や実験によって実施されているものの、移動特性が異なる2種類の土砂を考慮した数値モデルや数値解析による分級現象のメカニズムを検討した研究はほとんど見受けられない。そのため、砂と礫からなる混合土砂モデルの汎用性を向上するとともに分級現象の理解を広げるためには、各土砂の割合による相互作用の影響を考慮した新たな計算手法の導入が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、性質が異なる2種類の土砂からなる混合土砂における土砂割合(含有率)が混合土砂の移動特性に及ぼす影響に着目し、水理模型実験に基づく混合土砂モデルの改良・拡張を目的とする。具体的には、粘土含有率による粘土の流失特性を水理模型実験から検討すると同時に、その効果を現在構築している砂と粘土からなる混合土砂モデルへ適用する。また、同様に混合土砂モデルを砂と礫からなる混合土砂の計算まで拡張する。

3. 研究の方法

(1) 混合土砂の乾燥かさ密度が粘土流失に及ぼす影響(水理実験)

混合土砂の乾燥かさ密度による初期濃度を調整するために投入する水量、初期粘土含有率及び攪拌の有無の異なる条件で、圧密開始1日までの乾燥かさ密度の変化特性について把握する実験を行った。ガラス製メスシリンダーに、総重量27gの珪砂5号(中央粒径:0.439mm)とカオリン(中央粒径0.008mm)から成る混合土砂と水道水を投入し、攪拌ありのケースについては均一な濃度になるまで攪拌した。その後、混合土砂表面を一定時間ごとに目視で確認し、各試料の乾燥かさ密度を測定した。また、一様流作用下での粘土の流失実験を実施した。実験には

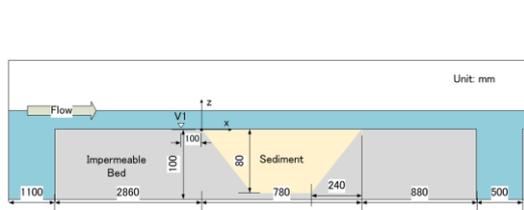


図-1 実験装置の断面図

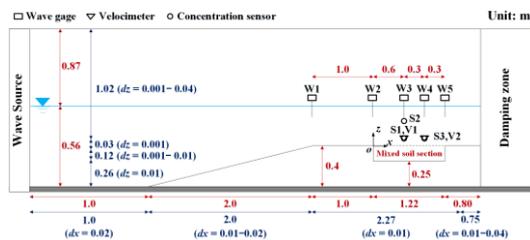


図-2 計算領域

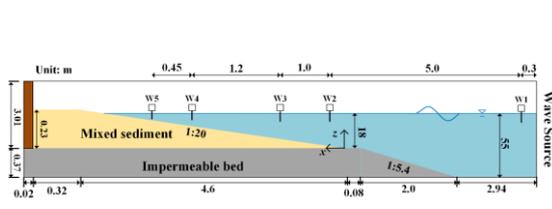


図-3 計算領域の概略図

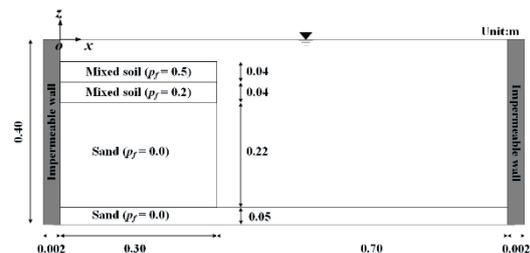


図-4 混合土砂からなる斜面崩壊計算

循環式水平開水路（全長 6.0 m, 幅 0.313 m, 高さ 0.289 m）を用いた。珪砂 5 号とカオリンを混合して粘土含有率が 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70 になるように混合土砂からなる移動床を造成した。一様流の流速を計測するためにプロペラ式流速計 V1 を移動床底面から 15 mm 離れた場所に設置して底面流速を計測した。流量は 0.00367 m³/s, 0.00762 m³/s の 2 種類とし、通水時間は 75, 300, 1200 s とした。通水時間変化時における初期粘土含有率からの変化量を計測するため、実験終了後、 $x = 350, 500$ mm の地点において移動床表面から 1.5 cm 間隔で移動床の底面まで計 10 か所の土砂を採取してから乾燥させてカオリンの量を測定した。

(2) 混合土砂の表層における粘土の流失特性（数値解析）

粘土含有率による粘土の流失速度と流失活性層の深さの変化が考慮できるように、混合土砂の乾燥かさ密度を考慮した混合土砂モデルを導入した。構築したモデルを用いて、図-2 に示す粘土流失に着目した水理実験をモデル化し、波浪条件における混合土砂の表層から流失する粘土の再現計算を実施した。流失する粘土の量に影響を与えるパラメータとして、粘土含有率と乾燥かさ密度による限界せん断応力、粘土の沈降速度、粘土含有率、底質の巻き上げに関する無次元パラメータ C_b 、粘土流失が発生する活性層 LV（表層からの深さ）が考えられるものの、粘土の限界せん断応力と沈降速度は既往の研究から提案された経験式を採用し、それ以外のパラメータを調整しつつ粘土流失の特徴を検討した。

(3) 粘土含有率による地形変化特性（数値解析）

混合土砂の乾燥かさ密度を考慮した混合土砂モデルを用いて、波浪作用下における混合土砂地形の地形変化に関する水理模型実験を対象に図-3 に示す断面二次元の再現計算を実施し、泥含有率による地形変化特性を検討した。実験条件と同じように不透過床とその上に砂（中央粒径 = 0.439 mm）とカオリン（中央粒径 = 0.008 mm）からなる混合土砂の地形を設定した。計算格子は、 $-5.02 \leq x \leq -2.72$ で 0.05 m の等間隔格子、 $-2.72 \leq x \leq -2.08$ で不等間隔格子、 $-2.08 \leq x \leq 4.94$ で 0.02 m の等間隔格子とした。z 方向は、地形部 $0.0 \leq z \leq 0.3$ で 0.005 m の等間隔格子とし、それ以上の領域では滑らかに格子幅が変化する不等間隔格子とした。土砂の密度は 2,650 kg/m³ とし、巻き上げに関する無次元パラメータは砂の場合 0.00033, 泥の場合 0.00001 とした。浮遊泥の場合、拡散による移動は検討が必要であるため、拡散係数は 0 とした。計算条件は、規則波の波高 0.07 m, 周期 1.0 s のケースを中心に粘土を含んでいないケースから再現計算を行った後、初期粘土含有率を 0.05-0.9 に変化させて同波浪条件における混合土砂の地形変化計算を行った。計算時間は 300 s とした。

(4) 混合土砂の掃流移動（数値解析）

砂と礫からなる混合土砂の移動は、主に掃流砂として移動するため、掃流移動における混合土砂の計算手法が必要である。その一環として、混合土砂の斜面崩壊を対象に混合土砂の掃流計算ができるように混合土砂モデルを構築し、異なる含有率を持つ混合土砂の斜面崩壊計算を実施した。斜面崩壊計算は、横 1.004 m (x 方向)、縦 0.4 m (z 方向) の断面二次元計算とし、x, z 方向格子の大きさは $dx = 0.002$ m, $dz = 0.001$ m とした。混合土砂の土砂構造物は、横 0.3m、縦 0.3m の正方形構造であり、斜面崩壊が起こる土砂構造物の底面には 0.05 m 厚の純粋砂（中央粒径 = 0.4 mm）を設定した。粘土含有率は 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 の 5 種類とした片方から崩壊するケースと図-4 に示す異なる粘土含有率の層を有する混合土砂の斜面崩壊ケースについて計算を行った。解析時間は斜面崩壊が終了する 1.5 s とした。

4. 研究成果

(1) 混合土砂の乾燥かさ密度が粘土流失に及ぼす影響（水理実験）

混合土砂の乾燥かさ密度実験において、粘着性混合土砂の初期乾燥かさ密度が砂質性混合土砂と比較して明らかに小さくなることが分かった。また、カオリンの中央粒径が 8 μ m であるため、粘土とシルトの比が 1:1 であると仮定し、乾燥かさ密度の経験的係数として本実験で得られた 900 及び 1350 を代入することで、乾燥かさ密度と粘土含有率の関係式が得られた。一様流作用下での粘土流失実験では、粘土含有率の高い混合土砂において、圧密過程での間隙水の充填と一様流による底面せん断応力の作用によって、底質の液化化及び分級が発生し、混合土砂内部からの粘土の流失現象がある限界深さまで発生することを確認した。一方、低含有率の場合、ある閾値以上の底面せん断応力が作用すると作用時間によって内部から浸透流による粘土の流失現象が発生することを確認した。

(2) 混合土砂の表層における粘土の流失特性（数値解析）

図-5, 6 に入射波周期 1.1 s の底面流速 (V1) と水位変動 (W1, W3, W4) の計算と実験の結果を示す。同図より、波浪場の再現性が確認されたため、同波浪条件における粘土流失の再現計算を実施した。粘土流失の活性層の影響を図-7 に示す。最大浮遊泥濃度に至る時間が実験より計算の方が早い。また、S1 の場合、 $t/T \geq 100$ の範囲において計算と実験の結果が概ね一致するものの、S2 と S3 では計算の方が過小評価された。このような実験と計算結果の差は、実験において注水する際の泥の分離や浮遊した泥が移動床表面に付着することによって形成される薄い泥の層（より移動しやすい泥）の存在、また、場所によって異なる泥含有率の影響が起因したと

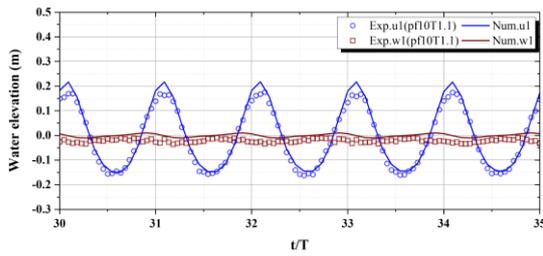


図-5 水平・鉛直流速の再現性 (V1)

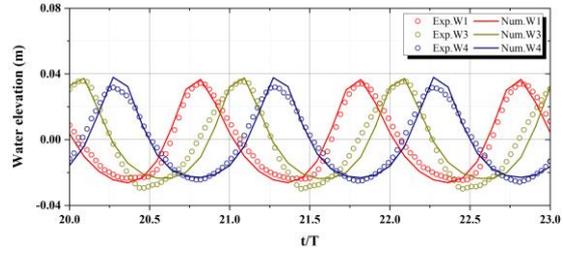


図-6 水位変動の再現性

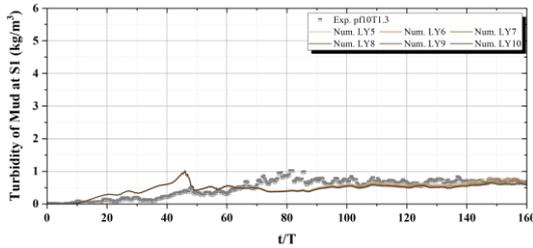


図-7 活性層の深さによる浮遊泥濃度の変化

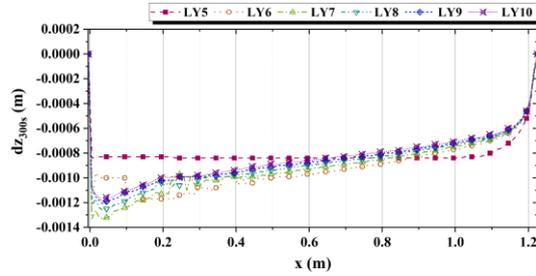


図-8 LYによる地形の時間変化

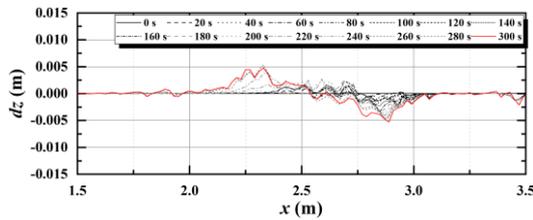


図-9 地形変化量 (粘土含有率 0)

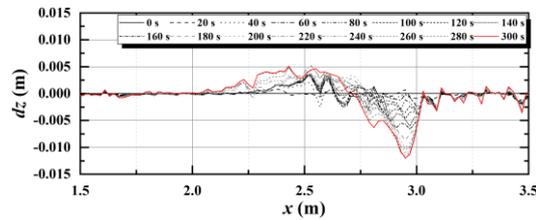


図-10 地形変化量 (粘土含有率 0.05)

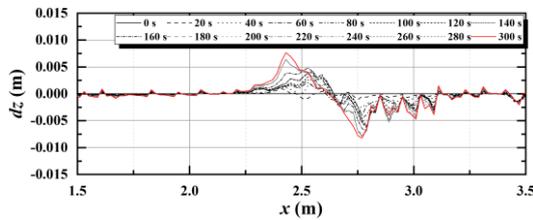


図-11 地形変化量 (粘土含有率 0.10)

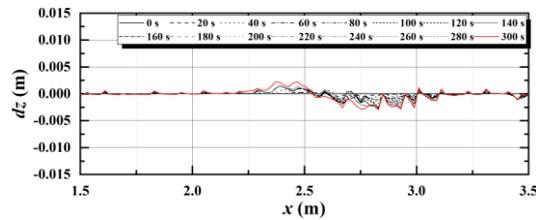


図-12 地形変化量 (粘土含有率 0.30)

考えられる。一方、泥が流失する活性層の深さの影響は、時間経過によって活性層が小さいほど浮遊泥濃度が若干大きくなること分かる。本モデルでは、混合土砂表層の泥含有率を活性層における泥と砂の割合で算定しており、表層からの泥が流失しても活性層が厚いほど、泥含有率の変化は相対的に小さくなる。そのため、活性層が薄いLY5の方が泥流失に伴う泥含有率の変化が比較的に大きくなり、その結果移動しやすくなったため、浮遊泥濃度が大きくなったと考えられる。 C_p の影響については、 C_p が増加すると最大浮遊泥濃度が大きくなりつつ、最大浮遊泥濃度に至る時間が短くなる特性があった。その後、浮遊泥濃度は徐々に減少し、 0.1 kg/m^3 以下になる。再現性については、粘土含有率が0.10、0.20の場合 1.0×10^{-5} 、0.05の場合 1.32×10^{-6} で実験と概ね一致することが判明し、粘土含有率によって C_p が異なる可能性が示唆された。初期粘土含有率の影響については、粘土含有率が大きいほど、限界せん断応力も大きくなるため、流失される粘土の量が少なくなるに伴って最大浮遊泥濃度は小さくなる傾向があった。以上より、実験において不均一の移動床の特性までは再現できていないものの、粘土流失に伴う限界せん断応力の変化や活性層の設定による粘土流失量の制御が可能であることが明らかとなった。

(3) 粘土含有率による地形変化特性 (数値解析)

粘土を含んでいない図-9を見ると初期碎波が発生する $2.0 \leq x \leq 2.25$ の範囲から離れた $2.75 \leq x \leq 3.0$ の位置で侵食が生じ始めるとともに $2.5 \leq x \leq 2.75$ で堆積が生じる。その後、時間経過に伴って侵食は沖側に広がると同時に最大侵食深は岸側に進むことが確認できる。また、堆積が発達する位置は、初期堆積された位置より沖側に移動していく。粘土を含むケースにおいて、粘土含有率が0.05の場合、図-10に示すように、初期侵食される場所が粘土を含んでいない図-9と比較してより岸側から発達し、ある時間に達すると侵食範囲は広がらず、侵食深が深くなる傾向がある。また、堆積する位置も粘土含有率0のケースより岸側から始まり、堆積範囲は広く

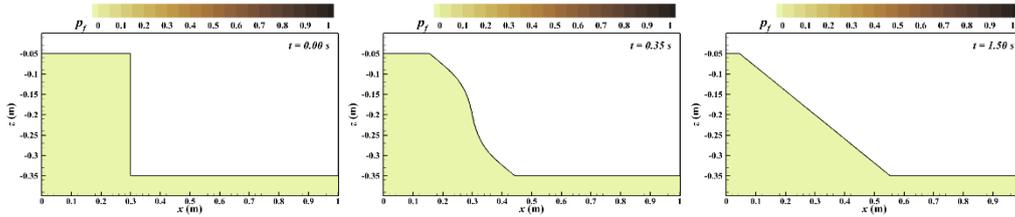


図-13 粘土含有率の空間分布（粘土含有率 0）

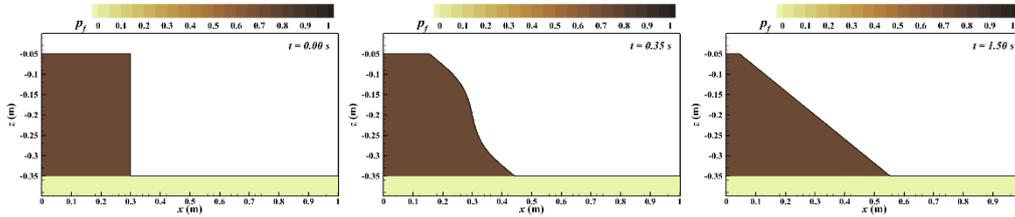


図-14 粘土含有率の空間分布（粘土含有率 75）

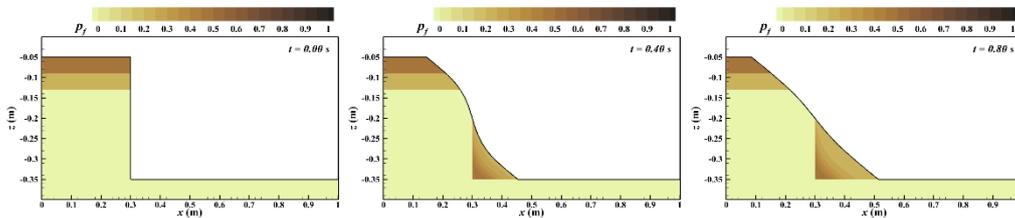


図-15 粘土含有率の空間分布（上部から粘土含有率 0.5, 0.2, 0.0）

なることが分かる。粘土含有率が 0.10 の図-11 では、 $x \approx 2.6$ を中心に岸側に侵食、沖側に堆積が発達しており、粘土含有率 0 のケースより侵食・堆積が狭い範囲で大きく発生する。粘土含有率が 0.20 より大きいケースでは、図-12 のように泥含有率が増加するほど、地形変化は小さくなる傾向があり、特に含有率が 0.70 より大きくなるとほとんど地形変化は生じなかった。粘土含有率が増加することに伴い砂と粘土の限界せん断応力も同時に増加し、泥の流失が生じるとしてもその量は微小である。そのため、時間による粘土含有率の変化は小さく、土砂移動がさらに抑制されたと考えられる。一方、粘土含有率が 0.70 より小さいケースにおいて粘土含有率が大きい方でより広い範囲で侵食、堆積が生じる結果が確認できた。これは、粘土含有率によって初期侵食が発生する場所が変化し、それに伴って堆積位置や碎波点の変化等の複雑な現象が起因したと考えられる。以上より、粘土の移動による底質表層における粘土含有率の空間的变化が考慮できる本モデルによって、粘土含有率の増加が地形変化を抑制する効果を再現しつつ、粘土含有率の空間的变化が地形変化に及ぼす影響までの検討ができた。定量的な検討までには至っていないものの、初期粘土含有率の変化によって地形変化の傾向が変化する水理実験の結果と定性的に合致する有意義な結果であると判断される。

(4) 混合土砂の掃流移動（数値解析）

図-13-15 に、崩壊する混合土砂における粘土含有率の時間毎の空間分布を示す。図-13 に示すように、斜面崩壊が終了するまで初期粘土含有率を維持しつつ、掃流移動をすることが確認できる。また、粘土含有率が異なる底面（純粋の砂）の上に混合土砂が安定的に堆積された。斜面崩壊による地形変化においても、砂のみの斜面崩壊と同様の地形変化を表し、掃流移動において安定的に計算されることが確認された。図-15 に示すように、最上段の粘土含有率が高い層から崩壊がし始めて底面に堆積した後、低含有率の粘土が堆積することによって、混合土砂の粘土含有率が上に行くほど小さくなることが分かる。最下層にある砂層が崩壊してから、砂層の上に上端から移動した混合土砂が堆積することによって、小さい粘土含有率を有する薄い層が形成される現象が再現できた。以上より、混合土砂の掃流移動を考慮した混合土砂モデルによって、混合土砂の斜面崩壊計算における混合土砂の掃流移動が適宜再現できると共に数値的安定性が確認された。そのため、砂含有率によって砂と礫の限界せん断応力の関係が分かれば、砂と礫からなる混合土砂の移動計算が可能であると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 AKAHOSHI Rei, CHO Yong-hwan, WATANABE Mikiya, NAKAMURA Tomoaki, MIZUTANI Norimi	4. 巻 77
2. 論文標題 CHARACTERISTICS OF TOPOGRAPHIC CHAGE FOCUSED ON THE VARIATION OF DRY BULK DENSITY BY SLIP-OUT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_949 ~ I_954
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.77.2.I_949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cho Yong-Hwan, Lee Kwang-Ho	4. 巻 33
2. 論文標題 Development of Numerical Model for Mixed Soil Problems Using Dry Bulk Density and Investigation of Its Numerical Stability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 110 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9765/KSCO.E.2021.33.3.110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------