

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14239

研究課題名（和文）斜面崩壊土砂の応力波伝播に着目した堆積ダイナミクスの解明とその評価手法の高度化

研究課題名（英文）Elucidation of deposition dynamics focusing on stress wave propagation of collapsed soil mass and sophistication of its evaluation methodology

研究代表者

内藤 直人（Naito, Naoto）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：10816200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：地盤の粘着力を簡易的に導入した不飽和DEMモデルを開発し、実規模土砂流下実験で得られた最終堆積形状、土砂表面流速、壁面衝撃圧力分布と比較することで解析モデルの妥当性を確認した。また、斜面勾配、流下長さ、崩落量、土砂粒径、先着堆積土量等をパラメータとした系統的な模型実験とDEMを用いた数値実験により、各種パラメータが崩壊土砂の到達距離に及ぼす影響を明らかにした。その際、流動土砂の内部挙動や流れの安定性について分析し、斜面崩壊土砂の斜面流下～衝撃～停止という一連の堆積ダイナミクスをエネルギー減衰と密接に関係する衝撃力伝達の視点から解明し、崩土の到達距離と衝撃力の新しい評価手法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、斜面防災工の新技术開発や既存ストックの戦略的維持管理に貢献するだけでなく、連続体解析に用いられる土の挙動を記述する構成則の低拘束圧環境下の衝撃挙動への拡張、地盤工学分野における様々な衝撃現象の理解に貢献する。今後は、土・構造物の衝撃相互作用を考慮した地盤・構造・衝撃分野を横断する学際的研究課題への発展が期待されることなどから学術的創造性も高い。地盤工学と構造工学が分野を超えて連携することで種々の衝撃制御への土や地盤力学の利用を拡大し、新たな地盤工学のパラダイムに繋がること期待される。さらに、地盤工学の知見を発展させることで、他の工学への貢献も十分期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed a simplified unsaturated DEM model incorporating ground adhesion and validated it by comparing with results from large-scale debris flow experiments, including deposition shape, sediment flow velocity, and wall impact pressure distribution. Using systematic and numerical experiments, we investigated the effects of parameters such as slope gradient, flow length, collapse volume, sediment size, and initial deposition volume on debris runout distance. Our analysis of sediment behavior and flow stability revealed the deposition dynamics of slope collapse, encompassing flow, impact, and cessation, with a focus on impact force transmission and its relationship to energy dissipation. We also proposed a novel evaluation method for runout distance and impact force based on energy dissipation.

研究分野：地盤工学

キーワード：急傾斜地 斜面崩壊 崩壊土砂 到達距離 衝撃力 応力伝播 粒状体 個別要素法

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国土の約7割を山地・丘陵地が占める我が国で交通ネットワークを維持・発展させ、人命や重要構造物の安全を確保するためには、斜面崩壊への対策工が設置されていない無対策道路・線路延長を削減することが喫緊の課題である。そのため、外力予測を含めた斜面防災工の合理的な性能評価・設計・維持管理技術の開発が急務となっている。

斜面崩壊のうち切土や岩盤斜面等の急傾斜地では、地盤が不飽和状態で崩壊するものが多いものの、崩壊土砂の運動挙動は低拘束圧下の大変形・分離・再接触・衝撃を伴う不連続性の高い複雑な現象であるため、力学的根拠に基づいた到達範囲・衝撃力評価手法は確立されていない。これら課題の解決に向けて、斜面勾配、斜面流下長さ、崩壊土砂量、崩壊土砂の粒度分布など、各種斜面・崩壊条件が異なる場合にも適用可能な統一的な評価手法の開発が求められており、そのためには崩壊土砂の斜面流下から停止に至るまでの一連の堆積ダイナミクスの解明が必要不可欠である。しかし、従来の地盤工学の知見のみで本課題のような高速変形問題を説明することは難しく、その現象解明には新たな視点が必要である。

そこで、本研究では、崩壊土砂の運動エネルギーと密接に関係する堆積過程で土内部に生じる衝撃力に着目し、応力波伝播挙動を突破口に崩壊土砂の斜面流下～衝撃～停止の一連の堆積ダイナミクスの解明を目指す。粒状体という離散的な運動挙動と波動伝播という連続体的な視点を結び付けて検討する試みは学術的独自性が高く、崩壊土砂の堆積ダイナミクスの解明が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、斜面崩壊土砂の斜面流下～衝撃～停止という一連の堆積ダイナミクスをエネルギー減衰と密接に関係する衝撃力伝達の視点から解明し、斜面防災工の新技術開発や既存ストックの戦略的維持管理に貢献することである。本目的を達成するために、まず、斜面・崩壊土砂条件を網羅的に変化させた土砂流下模型実験と実規模土砂流下実験により堆積ダイナミクスの基本的な傾向を明らかにする。続いて、それら流動現象を表現する効率的な個別要素法 (Discrete Element Method, 以下 DEM と記載) モデリング手法を構築し、実験では観測が困難な土砂内部の挙動分析により堆積ダイナミクスを解明する。上記知見を基に、崩壊土砂の到達範囲・衝撃力の新しい評価手法を検討・提案する。

3. 研究の方法

①実験的検討

斜面勾配、流下長さ、崩落量、土砂粒径、先着堆積土量等のパラメータを網羅的に変化させた土砂流下模型実験を実施し、堆積ダイナミクスの定性的傾向を明らかにする。また、実規模土砂流下実験を実施し、高速度カメラと DIC 解析による土砂速度分布の計測、堆積形状の計測、感圧シートによる待受け構造物に作用する衝撃圧分布の計測を行うことで、本現象のベンチマークを得る。

②数値解析的検討

実験で検討できる条件や計測項目は限定的であるため、本研究では数値実験による検討に注力する。崩壊土砂の堆積ダイナミクスは低拘束圧下で大変形・破壊・衝撃等を伴う現象であり、構成則の開発は容易ではないため、地盤材料の構成則を必要としない個別要素法を用いる。粒子単位からモデル化する数値解析手法であるため、粒子レベル、粒子骨格レベル、崩壊土砂全体レベルまでマルチなスケールで現象を観察できる。

不飽和状態の土の粘着力を簡易にモデル化する DEM 接触モデルの基本的枠組みを構築しつつあり、本課題では、効率的に検討を進めるために計算コストと不飽和特性の再現性を両立するモデル開発を行う。既に開発した土の緩衝挙動を表現できる DEM モデリング手法をベースに不飽和モデルを導入し、実験で観測した流動挙動を表現する効率的な DEM モデリング手法を構築する。そのうえで、DEM 解析による数値実験を行う。具体的には、斜面流動時の土砂層厚・間隙比・速度・応力・ひずみ速度と応力伝播特性との関係のマルチスケール分析、複雑な流動現象を単純化した数値実験を実施する。土砂のエネルギー減衰と密接に関係する土中の衝撃力伝達挙動の視点からアプローチすることで崩壊土砂の堆積ダイナミクスを解明する。

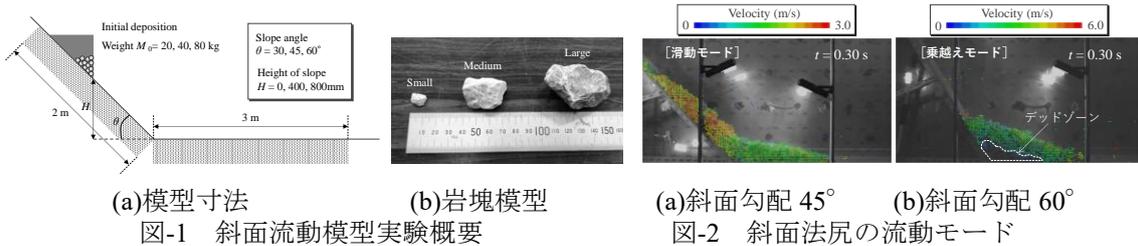
③新しい評価手法の検討

実験的検討と数値解析的検討により明らかとなった崩壊土の堆積ダイナミクスに基づき、その到達範囲や待受け構造物に作用する衝撃力に関する新しい評価方法を検討・提案する。

4. 研究成果

①実験的検討

斜面勾配, 流下長さ, 崩落量, 土砂粒径, 先着堆積土量等をパラメータとした系統的な土砂流下模型実験により各種パラメータが崩壊土砂の堆積ダイナミクスに及ぼす影響を網羅的に調べた(図-1). その結果, 斜面法尻において, 先行の崩土を後続の崩土が押し出すような滑動モードと先行の崩土を後続の崩土が乗り越えるモードの2つの流動モードが存在することを明らかにした(図-2). 滑動モードは斜面勾配 45° 付近までの条件, 乗り越えモードは斜面勾配 60° 程度の急勾配で発生しやすいことがわかった. 滑動モードでは, 岩塊径の変化に伴う崩土の流動層厚の変化が水平面上の速度減衰に寄与し, 到達距離予測において重要なパラメータとなる可能性を示した. また, 滑動モードでは, 従来の知見である岩塊径が大きいほど堆積距離が長くなる傾向と整合する結果が得られた. さらに, 斜面法尻において, 先行の崩土を後続の崩土が乗り越えるモードでは, デッドゾーンの発達が顕著であり, 岩塊径が大きいほど堆積距離が長くない条件があることを明らかにした. 法尻の流動モードの他に, 法尻を通過した後の平坦部における流動層厚のパラメータが到達距離に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった.



実規模スケールの土砂流下実験として, 高さ約30m, 勾配50度の斜面において, 50立米の湿潤土砂を流下させる実験を計画どおり実施できた(図-3). 斜面から平坦部にかけて障害物がない流下土砂の到達距離を調べるケースと, 斜面法尻に待受け対策工を設置して壁面衝撃力を計測するケースを実施した. 実験では, 高速カメラ撮影とPIV画像解析により, 斜面上および平坦部の土砂表面流速を計測した. また, SfM画像処理技術により流下土砂の最終堆積形状の三次元計測を実施した(図-4). また, 感圧シートにより待受け構造物に作用する衝撃圧分布を計測した.



②数値解析的検討

効率的に検討を進めるために計算コストと不飽和土の再現性を両立するモデルとして, 地盤の粘着力を簡易的に導入した不飽和DEMモデルを開発した. この不飽和DEMモデルは, 粒子同士が接近した際に粒子間法線方向に引っ張りばねを導入するだけのシンプルな付着モデルであるものの, Taylorの安定図表に整合する地盤の粘着力を表現することができることを確認した. また, 解析モデルの妥当性を確認するために, 実規模土砂流下実験で得られた最終堆積形状(図-5), 土砂表面流速(図-6), 壁面衝撃圧力分布と比較し, 開発した数値解析モデルが実験の各種計測項目を概ね再現できることを示した.

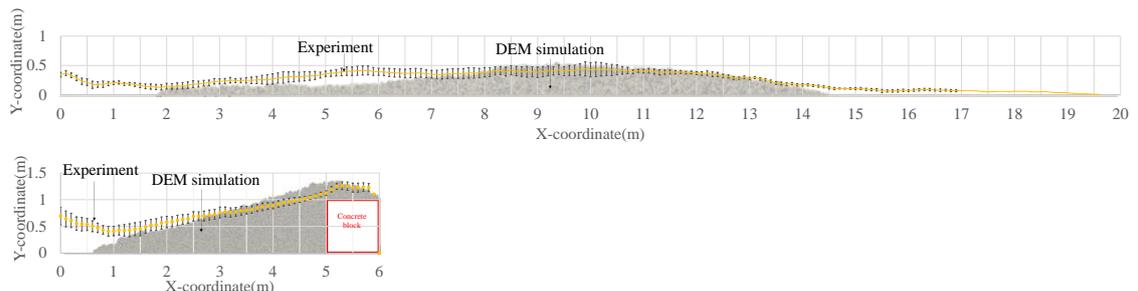
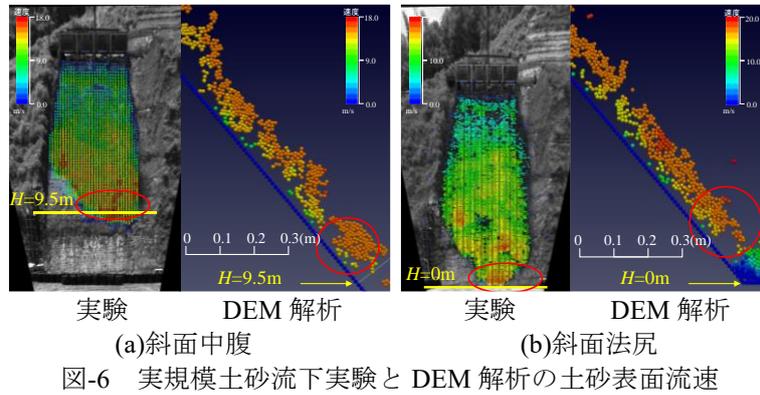


図-5 土砂流下実験の最終堆積形状とDEM解析結果(上段:対策工なし, 下段:対策工あり)



斜面勾配, 流下高さ, 崩落量などのパラメータが崩壊土砂の到達距離に及ぼす影響を調べるために数値実験を実施した. 流れの安定性に関する Savage Number, 粒子のランダム性に関する Granular temperature, 応力分布, 間隙比に関連する指標など, マルチスケールな視点から分析し, 各種パラメータと到達距離との関係を土砂内部の応力伝播・流況特性の観点から解釈を試みた. 斜面勾配を変化させた解析の結果, 模型実験結果と同様に斜面を流下する崩土の挙動は斜面勾配 45° を境に, 斜面法尻における流動モードが変化することがわかった. 斜面勾配 45° より大きい急勾配の斜面では, 先行する崩土が後続の崩土に圧迫されることで摩擦が支配的な流動挙動となってデッドゾーンが形成されることがわかった. また, その際, 平坦部に崩土が衝突して衝撃応力が発生し, その応力鎖は斜面上方まで伝達していることが明らかとなった (図-7). デッドゾーンの発生は斜面法尻周辺におけるエネルギー減衰のみならず上流側の崩土にも影響を及ぼす可能性を示した. また, 流下高さを変化させた解析の結果, 流下高さが低いほど衝突よりも摩擦が支配的な流動挙動となり, デッドゾーンが発達しやすいことがわかった. さらに, 崩落量を変化させた解析の結果, 崩落量を増加させても流れの安定性や土砂内部の流動挙動が変化することはなく, 単に相似的に大きい流動挙動となる可能性を示した.

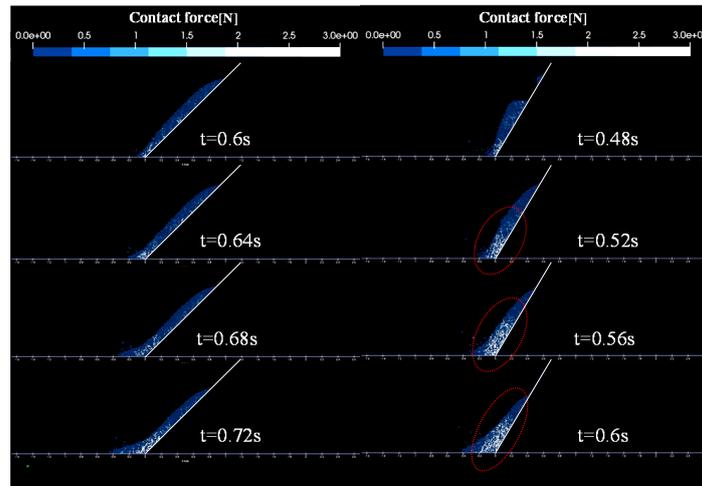


図-7 平坦部に崩土が衝突した際の応力鎖の伝達範囲

③新しい評価手法の検討

斜面崩壊土石の到達距離の評価方法を合理化するためには, 斜面法尻におけるデッドゾーンの発達程度や斜面法尻の流動モードに着目することが有効である可能性を示した. また, 斜面法尻を通過した後の平坦部における流動層厚のパラメータが到達距離に及ぼす影響が大きい可能性を示した. さらに, 衝撃力評価の高度化に向けて待受け対策工に作用する崩土衝撃力の発生領域が斜面上流方向の広範囲に分布していることを明らかにした.

本研究で得られた知見により到達範囲・衝撃力評価を高度化できる可能性があり, 今後は斜面法尻におけるデッドゾーンの発達条件や斜面法尻の流動モードの分岐条件について崩土の内部挙動を含めて詳細に検討を進めていく必要がある.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Naito Naoto, Maeda Kenichi, Konno Hisashi, Ushiwatari Yuji, Suzuki Kentaro, Kawase Ryoji	4. 巻 18
2. 論文標題 Loading rate dependence of granular cushion under rockfall impact and proposal of an analytical model for impact force estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 1463 ~ 1477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11440-022-01641-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Naoto Naito, Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Takumu Omura, Arif Daniel Bin Azmi	4. 巻 25
2. 論文標題 EFFECT OF ROCK MASS DIAMETER ON RUNOUT DISTANCE AND VELOCITY ATTENUATION OF DRY GRANULAR AVALANCHE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2023.107.g12220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Naoto Naito, Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Takumu Omura	4. 巻 24
2. 論文標題 THREE-DIMENSIONAL DISCRETE ELEMENT MODELLING OF GRANULAR AVALANCHE UNDER MULTIPLE FLOW CONDITIONS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 77-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2023.106.g12219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 内藤直人, 前田健一	4. 巻 69(6)
2. 論文標題 落石挙動予測の高度化に向けた堆積層のエネルギー減衰性能評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 16-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 磯合凌弥, 前田健一, 杉山直優, 菅原正則, 今野久志, 内藤直人	4. 巻 68A
2. 論文標題 敷砂緩衝層の落石エネルギー吸収効果の評価を目的とした実規模落体衝突実験および二次元DEM解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 999-1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.999	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 杉山直優, 前田健一, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 今野久志, 内藤直人	4. 巻 68A
2. 論文標題 土堤材料や重錘質量を変化させた小型落石防護土堤への重錘衝突実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 985-998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計18件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Naoto Naito, Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Takumu Omura, Arif Daniel Bin Azmi
2. 発表標題 Model rock-slope failure tests on final runout distance of dry granular avalanche with secondary slope failure
3. 学会等名 Proc. of 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoto Naito, Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Yasuhiro Yamada, Takumu Omura
2. 発表標題 Discrete element modeling of slope flow behaviors of dry granular materials with different collapse conditions
3. 学会等名 Proc. of 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥河優斗, 内藤直人, 三浦均也, 松田達也
2. 発表標題 三次元個別要素法による球状粒状体流れの数値実験モデルの構築
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高津智哉, 小笠原明信, 小林睦, 内藤直人, 松田達也, 高坂晏志
2. 発表標題 崩壊土砂の衝撃力に関する遠心力载荷模型実験
3. 学会等名 2022年度先進的技術シンポジウム (ATS2022)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Naito , Kenichi Maeda , Kentaro Suzuki , Hisashi Konno
2. 発表標題 STRESS WAVE PROPAGATION BEHAVIOR OF SAND CUSHION WITH DIFFERENT LOADING DURATION USING TWO-DIMENSIONAL DISCRETE ELEMENT METHOD
3. 学会等名 7th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection (RocExs) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Maeda , Naoto Naito , Kentaro Suzuki , Ryoji Kawase
2. 発表標題 ROCKFALL KINETIC ENERGY DAMPING PERFORMANCE OF GRANULAR LAYER AND ITS DEM SIMULATION
3. 学会等名 7th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection (RocExs) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高坂晏志 , 内藤直人 , 松田達也 , 前田健一 , 木村絢 , 難波正和
2. 発表標題 斜面崩壊土砂の壁面衝撃圧力に関する実規模土砂流下実験とDEM解析
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村絢 , 前田健一 , 杉山直優 , 磯合凌弥 , 内藤直人 , 難波正和
2. 発表標題 実規模土砂流下実験におけるワイヤロープ支持式防護柵による崩壊土砂の速度減衰効果
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ARIF DANIEL BIN AZMI , 内藤直人 , 松田達也 , 石原寛也 , 前田健一 , 牛渡裕二
2. 発表標題 落石防護土堤の破壊挙動に及ぼす落石の載荷速度の影響に関するDEM解析
3. 学会等名 第34回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤直人 , 大村拓夢 , 宮脇惇 , Arif Daniel Azmi , 中瀬仁 , 梶山慎太郎 , 中田幸男
2. 発表標題 粒子形状と安息角の関係に関する基礎的検討
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村絢， 前田健一， 磯合凌弥， 杉山直優， 内藤直人， 難波正和
2. 発表標題 実規土砂流下実験における土砂流の先端及び後続の流動挙動
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高坂晏志， 内藤直人， 松田達也， 木村絢， 前田健一， 難波正和
2. 発表標題 不飽和状態の斜面崩壊土砂の流下・堆積挙動に関する個別要素解析
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田泰弘， 大村拓夢， 内藤直人， 松田達也， 三浦均也
2. 発表標題 異なる斜面勾配が法尻における岩塊群の速度減衰挙動に及ぼす影響とその流況分析
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村絢， 前田健一， 杉山直優， 磯合凌弥， 内藤直人， 難波正和
2. 発表標題 実規模土砂流下実験による待ち受け対策工に作用する応力分布
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高坂晏志 , 内藤直人 , 松田達也 , 三浦均也 , 木村絢 , 磯合凌弥 , 難波正和
2. 発表標題 粘着力を考慮した個別要素法による実規模土砂流下実験の再現解析
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮脇惇 , 内藤直人 , 三浦均也 , 松田達也 , 大村拓夢
2. 発表標題 岩盤斜面崩壊で生じる岩塊群飛散域の到達距離に及ぼす崩落条件の影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤直人 , 大村拓夢 , 山田泰弘 , 三浦均也 , 松田達也
2. 発表標題 岩塊群流動挙動の斜面法尻における速度減衰に及ぼす岩塊径の影響
3. 学会等名 第13回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村拓夢 , 内藤直人 , 山田泰弘 , Arif Daniel Azmi , 三浦均也 , 松田達也
2. 発表標題 異なる斜面条件における岩塊群の堆積距離に及ぼす岩塊サイズの影響
3. 学会等名 第33回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊橋技術科学大学 地盤力学研究室
<http://www.geomech-lab-tut.org>

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
---------	---------