

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04615

研究課題名(和文)土石流・泥流の数値シミュレーション技術の高度化と避難行動計画への適用

研究課題名(英文)Improvement of numerical simulation model on debris/mud flow and its application to evacuation action plan

研究代表者

竹林 洋史 (Takebayashi, Hiroshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：70325249

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)：近年、高強度豪雨に起因した土石流・泥流による土砂災害が毎年のように発生している。土石流・泥流から市民の生命と財産を守るためには、土石流・泥流の流動特性を把握することが重要である。本研究では、家屋の破壊や細粒土砂の相変化などを考慮した土石流・泥流の数値シミュレーションモデルを開発し、2018年の広島での土石流現象と2021年の熱海市の泥流現象に開発した土石流・泥流の数値シミュレーションモデルを適用し、表層崩壊の発生から宅地までに土石流・泥流が到達する時間、氾濫範囲、宅地内における土石流・泥流の流速と流動深の時空間的な分布から、土石流・泥流危険地域における家屋ごとの住民の避難方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土石流・泥流の流動特性を評価するためのこれらの研究は、国内外の土石流・泥流研究で初めての試みであり、本研究の学術的独自性と創造性を示すものである。また、土石流・泥流の数値シミュレーション結果を用いて、土石流・泥流氾濫地域の土砂災害危険度の空間分布を評価し、家屋ごとの避難方法の提案を行うことについても国内外の研究で初めての試みであり、本研究の学術的独自性と創造性を示すものである。

研究成果の概要(英文)：In recent years, debris/mud flows caused by surface failures due to high-intensity heavy rainfall occur every year. In order to protect our lives and properties from debris/mud flows, it is important to understand the flow characteristics of the debris/mud flows. In this study, we developed a numerical simulation model of debris/mud flows that takes into account the destruction of houses and phase changes of fine-grained sediment, and applied the developed numerical simulation model to debris flow phenomena in Hiroshima in 2018 and a mud flow phenomena in Atami City in 2021. Based on the time taken for debris/mud flows to reach residential areas, the inundation area, and the spatiotemporal distribution of velocity and depth of debris/mud flows within residential areas, we proposed evacuation methods for residents of each house in debris/mud flow hazard areas.

研究分野：砂防工学

キーワード：土石流 泥流 数値シミュレーション 土砂災害 避難 氾濫

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、高強度豪雨によって発生する表層崩壊に起因した土石流・泥流による土砂災害が毎年のように発生している。土石流・泥流から市民の生命と財産を守るためには、形成される土石流・泥流の流速・流動深、流出土砂量、土砂の氾濫範囲などの土石流・泥流の流動特性を土砂災害対策施設の設計(ハード対策)や住民の避難(ソフト対策)のために必要な精度で評価することが重要である。

土石流・泥流の流動特性は様々な方法で評価されているが、効率的・効果的な土砂災害対策施設の設計や住民の避難のためには、土石流・泥流の発達・流動・氾濫過程などを含む土石流・泥流の流動特性の時空間的な変化を評価できる数値シミュレーションモデルによる評価が効果的である。しかし、土石流・泥流の数値シミュレーションの実施のために必須となる土石流・泥流の構成則(エネルギー散逸機構)については、粒径の大きい砂礫による土石流に対しては多くの研究成果があり、かなり精度良く土石流の流動特性を評価できるが、粒径の小さい土砂のみによって構成される泥流や粒径の小さい土砂を高濃度に含んだ土石流に対しては、力学的に流動特性を評価することが困難となる。また、家屋やビルなどの構造物や道路の形状によって、土石流・泥流の氾濫域や流速・流動深の平面分布は大きく影響を受ける。しかし、土砂災害警戒区域は家屋や道路の影響は無視して決定されており、土砂災害警戒区域と土石流の氾濫域は大きく異なる。そのため、土石流・泥流の氾濫範囲の評価や家屋が被災するかどうかの判定などのためには、家屋や道路の形状などを考慮した数値シミュレーションによる評価が有効である。また、土石流・泥流によって家屋などが破壊されるかどうかによって土石流・泥流の氾濫域が変化するため、家屋などの構造物の破壊状態の評価も重要となる。構造物に作用する土石流・泥流の応力は、同一の流速・流動深・土砂濃度であっても巨礫の有無などの土砂の粒度の違いによっても変化する。しかし、現在の土石流・泥流による家屋などの構造物の破壊条件は、土砂の粒度の影響は考慮されていない。一方、地盤内の間隙の水の飽和度も土石流・泥流の流動特性に強く影響を与える。土石流・泥流は、渓流を流下しながら溪床を浸食し、溪床の土砂と間隙の水を土石流・泥流自身に取り込みながら発達していく。そのため、間隙の水が少ないと取り込まれる水分が少なくなるため、土石流・泥流の体積の増加率を直接的に小さくするとともに、土砂濃度が高くなることによって溪床の浸食速度が減少するため、土石流の発達はさらに抑制される。しかし、既存の土石流の数値シミュレーションの多くは、地盤内の間隙は水で飽和していると仮定されており、降雨の時空間的な分布や地盤内の地下水の流動解析によって得られた地盤内の間隙の水の飽和度の時空間的な分布を考慮した土石流・泥流の数値シミュレーションは実施されていない。

2. 研究の目的

本研究では、土石流・泥流の流速・流動深、流出土砂量、土砂の氾濫範囲などを土砂災害対策施設の設計や住民の避難のために必要な精度で評価するために、粒径の小さい土砂のみによって構成される泥流や粒径の小さい土砂を高濃度に含んだ土石流に適用可能な構成則を理論的に構築する。また、家屋などの破壊過程を考慮し、土石流・泥流によって全壊・半壊する家屋を予測するとともに、宅地内の土石流・泥流の氾濫範囲の予測精度を向上させる。さらに、地盤内の水の不飽和浸透流解析を実施し、溪床浸食時における土石流・泥流への水の供給条件の時空間的な分布が土石流・泥流の発達過程に与える影響を明らかにする。土石流・泥流の流動特性を評価するためのこれらの研究は、国内外の土石流・泥流研究で初めての試みであり、本研究の学術的独自性と創造性を示すものである。また、土石流・泥流の数値シミュレーション結果を用いて、土石流・泥流氾濫地域の土砂災害危険度の空間分布を評価し、家屋ごとの避難方法の提案を行うことについても国内外の研究で初めての試みであり、本研究の学術的独自性と創造性を示すものである。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つの課題について研究を実施する。

課題1: 細粒土砂を高濃度に含んだ土石流・泥流の構成則の理論的構築

課題2: 土石流・泥流による構造物の破壊機構の解明

課題3: 不飽和給水条件における土石流・泥流の発達過程の解明

課題4: 土石流・泥流危険地域における家屋ごとの土石流・泥流からの避難方法の提案

課題1は粒度分布を考慮した土石流・泥流の構成則を構築する。具体的には、細粒土砂の一部は水と混合することにより液体として振る舞うことを考慮し、粗粒土砂の間隙流体に細粒土砂が含まれると考え、水よりも高粘性・高密度の流体として間隙流体を扱い、構成則を水路実験および理論解析によって再構築する。課題2は、土石流・泥流被災地で構造まで破壊されている構造物はほぼ全て木造家屋であることに着目し、木造家屋の破壊条件を水路実験によって検討する。ここで、半壊・全壊の状態を評価するため、家屋全体を一つの構造物として捉えるのではなく、家屋の局所的な破壊条件を検討し、半壊・全壊の状態を評価できるようにする。課題3は様々な降雨継続時間、降雨強度、地盤の透水特性の条件で、不飽和透水解析で得られた地盤内の

水の飽和度を用いて土石流・泥流の数値シミュレーションを実施し、降雨特性・地盤の透水特性が土石流・泥流の流動特性に与える影響を明らかにする。課題4は2018年の広島での土石流被災地と2021年の熱海市伊豆山地区の泥流被災地を対象とし、課題1～課題3によって得られた知見を考慮した土石流・泥流の数値シミュレーションを実施し、表層崩壊の発生から宅地までに土石流・泥流が到達する時間、土石流・泥流の氾濫範囲、宅地内における土石流・泥流の流速と流動深の時空間的な分布から、土石流・泥流危険地域における家屋ごとの住民の避難方法を提案する。具体的には、鉛直避難が有効な家屋、土石流・泥流が流れてこない区域の近隣家屋への水平避難が有効な家屋等を示すとともに、豪雨中に危険を冒してまで避難しなくてよい区域の家屋の場所も示す。

4. 研究成果

2011年に紀伊半島南部の那智勝浦で発生した土石流現象を対象に、現地調査と数値シミュレーションを行い、不飽和給水条件における土石流の発達過程について検討した。対象とした溪流は、那智川の左支川である平野川である。解析は3ケース実施し、Case1は初期土砂濃度が低い条件であり、初期土砂濃度0.1%、斜面の水の飽和度が100%である。Case2は斜面の水の飽和度が低い条件であり、初期土砂濃度62%、斜面の水の飽和度が92%である。Case3は初期土砂濃度と斜面の水の飽和度の両方が高い場合であり、初期土砂濃度58%、斜面の水の飽和度が100%である。数値シミュレーションモデルは、土石流の流動によって地盤が浸食されるときに、土石流に取り込まれる水の量を地盤内の水の飽和度に基づいて与えられるように改良されたものである。解析の結果、初期土砂濃度と斜面の水の飽和度の両方が高いCase3で土石流の最大流動深が11.6mと最も深く、土砂の最大堆積厚も8.6mと最も厚くなっていた。初期土砂濃度の低いCase1の解析結果はCase3との差はそれほど小さくなく、土石流の最大流動深が11.5m、土砂の最大堆積厚は8.1mであった。これは、土砂濃度の低い土石流は流動開始後に急激に地盤を浸食するため、速やかに土砂濃度の高い状態が形成され、初期土砂濃度の値は下流での土石流の流動特性にはほとんど影響を与えないためである。一方、斜面の水の飽和度が低い条件であるCase2は、土石流の最大流動深が10.2m、土砂の最大堆積厚は7.5mと両値とも3ケースで最も小さい値であった。これは、地盤内の水の量が少ないと土石流の質量の増加を抑制されるとともに、土砂濃度が高くなるため地盤の浸食が抑制されて土石流が発達しづらいためである。

2018年に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流について、現地調査と数値シミュレーションを実施し、宅地における土石流の氾濫特性と土砂災害警戒区域との関係を検討した。現地調査により、斜面の三力所から土石流が発生して合流・分派した溪流を土石流が流下し、北側の溪流から宅地に流れ込んだ土石流によって多くの被害が発生したことが明らかとなった。流出した土砂は、粒径の細かい真砂土から直径数mの花崗岩も含まれ、粒度が非常に広いことが明らかとなった。数値シミュレーションにより、山頂付近の崩壊発生から北側の溪流の出口付近の家屋に土石流が到達するまでわずか50秒程度となっており、斜面における土石流の平均的な速度は約9m/sであった。土石流は宅地内を数10cm～3m程度の深さで流下・氾濫し、多くの家屋が全壊・半壊した。土砂災害警戒区域内には土砂が流れてこない領域も多いこと、土石流の深さは多くの場所で3m以下であること、豪雨中に避難のために長い距離の移動が困難であることを考えると、土砂災害警戒区域内の土石流が流れてこない領域への避難や二階以上への垂直避難は、土砂災害からの生存確率を大きく上昇させることが期待されることが示された。

2021年に複数回の泥流が発生した熱海市伊豆山逢初川流域の泥流の流動特性について現地調査と数値シミュレーションを実施するとともに、土砂災害危険度の高い谷地形の宅地における泥流からの避難方法について検討した。数値シミュレーションモデルは、泥流による家屋の破壊を考慮したものである。また、発生した泥流の土砂は粒径が非常に細いため、水と混合することにより液体として振る舞うことを考慮した。対象流域は明確な谷地形が形成されており、泥流は横断的にはあまり広がらず、幅80m以下の範囲で流れていた。これは、溪流・河川の流れ方向に対して直角方向（横断方向）に数十メートル移動するだけで避難できることを示している。これらのことから、谷地形が発達している土砂災害危険地域については、溪流・河川横断方向に容易に移動できる道路を整備するとともに、溪流の流れに対して直角方向に数十メートル移動するだけで避難できることを住民が認識することにより、泥流による人的被害を大きく減少できる可能性があると考えられる。下流の新幹線やJR周辺で泥流による人的被害が発生したのは、上流域で最初に泥流が確認されてから約50分後と約100分後である。これは、下流域の住民が上流域で発生している現象を正確にイメージできておらず、被災リスクが高い状況であることを理解していなかった可能性がある。そのため、上流域の様子を自宅などで確認できるカメラの設置など、容易に上流域で発生している現象をイメージできるシステムが必要と思われる。泥流は単発で大規模なものが発生したのではなく、小規模の泥流が複数回発生することによって結果的に大きな被害を発生させた。個々の泥流は家屋数軒を破壊した後下流の家屋まで到達した時点で停止して土砂を堆積させ、その堆積した土砂を次の泥流が浸食して規模を大きくしながら家屋を数軒破壊してさらに下流の家屋に到達した時点で停止するプロセスの繰り返しで下流に伝播したと考えられる。建物の破壊を無視した解析では、流れてきた土砂の多くが上流に堆積した。また、破壊した建物を除去した解析では、第一波の泥流が下流の東海道新幹線まで到達するとともに、泥流の流動幅が非常に狭かった。一方、建物の破壊を考慮した解析では、泥流の流動幅や泥流の伝播特性を比較的良く再現できることが確認された。建物の破壊を無視した解析で

は、下流に流れてきた泥流は非常に小規模であった。このことから、宅地上流域には鉄筋コンクリート構造の施設や建物を配置することによって、想定以上の規模の泥流が発生した場合であっても下流域の泥流被害を軽減できることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 江頭進治・竹林洋史・萬矢敦啓・原田大輔	4. 巻 76
2. 論文標題 土石流・掃流砂・浮遊砂・泥流の統一解釈	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 _1123-1128
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 Takebayashi H. and Fujita, M.	4. 巻 10
2. 論文標題 Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/geosciences10020045	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 竹林洋史・藤田正治	4. 巻 75
2. 論文標題 2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_859, I_864
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 石川新・竹林洋史・藤田正治	4. 巻 75
2. 論文標題 北海道胆振東部地震によって発生した泥流の流動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_865, I_870
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 竹林洋史・藤田正治	4. 巻 75
2. 論文標題 2018年7月に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の流動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 362, 369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.1_362	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8件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 2020年9月の豪雨によって椎葉村で発生した土砂災害
3. 学会等名 砂防学会令和2年7月豪雨および台風10号による九州地方の土砂災害に係る緊急調査報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 2020年7月豪雨による 熊本における土石流災害
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 熱海市伊豆山で発生した泥流の流動特性
3. 学会等名 第40回日本自然災害学会学術講演会熱海市土石流災害セッション（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 熱海市伊豆山地区で生じた泥流に関する調査・解析
3. 学会等名 第66回水工学講演会令和3年7月静岡県東部豪雨調査速報会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroschi Takebayashi
2. 発表標題 Flow Characteristics of Mud Flows in Atami
3. 学会等名 2021 NCDR Workshop
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 熱海市伊豆山で発生した泥流の流動特性
3. 学会等名 2021年度河川災害に関するシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 2021年7月に熱海市伊豆山で発生した泥流
3. 学会等名 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹林洋史
2. 発表標題 2021年7月に熱海市伊豆山で発生した泥流
3. 学会等名 第7回豪雨による土砂災害研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔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			
米国	USGS			
ブラジル	UFRGS			
ネパール	Hydro Lab			