

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651181

研究課題名(和文)土石流の大型化に対する防御方法の提案

研究課題名(英文)Proposal for prevention strategies against the enlarged turbidity currents

研究代表者

馬場 信弘 (BABA, Nobuhiro)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10198947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化に伴う異常な集中豪雨によって頻発し始めた大規模な土石流に対する防御のための具体的な方法を提案した。傾斜する小型水槽を用いた画像計測とナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいた計算を行った結果、障害物によって、質量、エネルギーの集中する流れの先端部を上下の部分に分断することによって、後方からのエネルギーの供給率が大きく減少することが示された。平常時には生態系等環境への負荷をかけない、底面から離れた水平な平面的構造物でも衝撃的な荷重による破壊力が激減する大きな効果があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study proposes the practical methods of controlling the turbidity currents and the strategies to protect human properties in the serious disasters which have been more frequently brought about by heavy precipitation extraordinarily concentrated in some local mountainous areas due to global warming. We carried out the experiments using a small inclined tank and the computations based on the finite volume solution of the Navier-Stokes equations for such enlarged turbidity currents. The results indicate that the interaction of the currents with the obstacles certainly reduces the rate of energy supply to the head from the latter part of the current by dividing the powerful head with a large amount of the mass and energy into the upper and lower parts. It is found that as a result even the system of horizontal flat structures away from the bottom has considerable effects to depress the destructive impact force without any burden on the environment.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：土砂災害 防災 乱泥流 重力流 計算流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 土石流は、一般に流体の密度差が原因で重力によって引き起こされる重力流の一つの形態であり、浮遊する粒子を含む乱泥流として知られている。重力流の一般的な挙動や基本的な性質について、実験、観測、理論によって多数の研究がおこなわれてきたが、密度の不連続界面近傍における乱流混合については未解決な問題が多く、土石流や雪崩など、粒子系の状態変化を伴う重力流は、その発生や拡大を予測することが難しい。

(2) 最近、陸上では世界各地で大規模な土石流が発生し、大きな被害をもたらしたと報じられている。森林破壊に加え、地球の温暖化による異常な集中豪雨が山の深層崩壊を招いたことが原因であると言われている。これまで携わってきた重力流の研究から、土石流は、その発生を予測することはできなくても、重力流として制御することによって大きな被害は防げるのではないかと考えられた。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、集中豪雨や地震によって発生した大規模土石流から村落を防御する新システムを開発することである。地球の温暖化に伴って頻発し始めた大規模な土石流に対して、自然の地形を活かし土石流の本質を利用した具体的な防御方法を提案し、実験と計算によるシミュレーションを行ってその防御システムの実現可能性と有効性を検証する。

(2) 土石流が接触する境界の形状や境界の状態が土石流の挙動や内部構造にどのような影響があるか、特に、先端部の組織的な構造を横方向に分断することによって、先端部への質量、エネルギーの集中をどの程度抑制することができるかについて調べ、土石流の発達を抑え、被害の出ない方向へ誘導するために、どのような方法が最適であるかを検討し、技術的にも経済的にも実現可能な防御システムについて、その有効性を実験と計算によって検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 重力流としての性質を利用した土石流の制御方法を確立するため、計算、実験、理論を並行して進める。計算によって重力流の制御の方法や条件を検討し、実験によってその効果を検証する。さらに計算と実験を比較することによって土石流のモデル化を行い、その結果を計算に反映する。この一連の過程を繰り返すことによって、モデルの高度化、制御方法の改良を進める。土石流に含まれる粒子系が、流動化、浮遊、

輸送、凝集、沈降、堆積、固体化する過程と、粒子同士が接触、衝突によって相互干渉する過程を、粒子系の状態変化を表わす構成方程式としてとしてモデル化し、ナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいた混相流の計算に取り込む。計算と実験の結果に基づいて、応力と歪の簡単な関係式からより高度なサブグリッドスケールモデルへレベルアップしていくことによって、境界形状や境界状態による土石流全体の流れの制御から内部構造まで踏み込んだ制御に展開し、土石流に対する最適な防御システムを提案する。

(2) 土石流が進行する底面および側面の境界形状が土石流の挙動、特に、先端部の内部構造に及ぼす影響について調べる。土石流の進行を止めようとする防壁ではなく、質量、エネルギーの集中する先端部を分断し、先端部の質量、厚さを減らして、段階的に減速させることを考える。重力流の内部構造はその発達段階によって変化することが分かっているが、逆に、その内部構造を変化させることによって発達段階を制御しようという発想である。先端部のエネルギーを分散、損失させることによって、重力流のエネルギーがすべて境界面との摩擦によって散逸される粘性段階への遷移を促進する。境界の形状変化のスケール、方向によって、その効果がどのように変わるかを調べ、河川にも設置できる、従来の砂防ダムより経済的にも有利な環境にやさしいエコシステムを考案する。

(3) 計算は密度成層流の計算のために開発してきたナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいた方法を基礎として、粒子系を含む場合に拡張し、実験と理論に基づいて粒子系の状態変化を表現できる計算法を開発する。密度の不連続面における乱流混合の計算の精度を上げ、重力流の発達段階の遷移を再現するため、ナビエ・ストークス方程式の対流項に流束制限による TVD スキームを導入する。

(4) 土石流に含まれる粒子系の状態変化を基礎方程式に取り込む基本的な枠組みとして、連続相および分散相(土砂粒子系)それぞれにおける応力と歪の関係式を構築する。この構成方程式は分散相内の相互作用が支配する固体状態から相互作用が無視できる浮遊状態までの状態に依存する。計算では支配方程式を離散化して有限個のセル上で積分するが、このセルは個々の粒子よりもはるかに大きい。セルより小さいスケールの粒子と流体の運動がセルより大きなスケールの

運動に与える影響をサブグリッドスケール (SGS) モデルとして、この構成方程式に取り込む。この構成方程式を用いた計算結果を実験と比較することによって、粒子系モデルの改良を行っていく。

(5) 土石流の実験は一般に再現性が低い。粒子を含まない重力流の場合と比べると、進行速度についてのデータには大きなばらつきが生じる。これは、地震や豪雨の程度によって土石流が発生するかどうか、あるいは、どのような規模の土石流が発生するか、という実際の問題と本質的に同じである。土石流は、土砂の不安定な平衡状態から何らかのきっかけによって発生するため、この不安定な初期条件を再現することが難しい。本研究では、エアジェットを用いて粒子群を一定の条件で流動化させる装置を開発し、傾斜する水槽において土石流を高い精度で再現するための実験方法を確立する。

#### 4. 研究成果

(1) 地球温暖化に伴う異常な集中豪雨によって頻発し始めた大規模な土石流に対して、その対策の方向性と防御のための具体的な方法を提案するため、実験と計算によるシミュレーションを行ってその防御システムの実現可能性について検討を行った。自然の力に逆らわず、地形を活かし、土石流の本質を利用するため、まず、土石流が接触する境界の形状が土石流の挙動や内部構造にどのような影響があるかについて調べた。土石流の進行を止めようとする防壁ではなく、質量、エネルギーの集中する先端部を分断し、先端部の質量、厚さを減らして、段階的に減速させることを狙い、障害物を設置した。境界形状や障害物の影響を定量的に評価するため、可視化実験における先端部の画像から先端部の運動エネルギーの分布とその時間変化を推定する方法を開発した。

(2) 実験の再現性を高めるため、エアジェットを用いて粒子群を一定の条件で流動化するための装置を開発し、30度まで傾斜する水槽を用いて土石流を高い精度で再現することができるようになった。また、実験と同じ条件で計算を行うため、分散相内の相互作用が重要となる固体状態から相互作用が無視できる浮遊状態まで、粒子群の体積割合に応じて、サブグリッドスケールの応力としてモデル化を行った。このモデルを導入した計算によるシミュレーションによって、土石流の威力をそぐために効率の良い障害物の形状と設置方法について検討した。その結果、土石流が障害物と干渉すると、土石流の内部に含まれる砂粒子の割合や土石流の先端速度

が大きく変化することが明らかになった。その時間的、空間的な変化についての実験と計算の結果は定性的に一致することが示された。障害物による土石流のエネルギーの減少量は、同じ規模の障害物であってもその設置する位置や間隔によって大きく変化することから、土石流の後方から先端部にエネルギーを供給する過程が土石流全体のエネルギーの変化にとって重要であることが明らかになった。

(3) 土石流が障害物と干渉する際に実験と計算の結果が必ずしも定量的に一致しない原因について調べた。砂粒子を含まない重力流でも障害物と衝突した直後の挙動が実験と計算で異なることから、粒子群の状態の再現性に関する実験における問題とは別に、密度の不連続性における流束の計算精度が重要であることがわかってきた。そのため、サブグリッドの不連続面を認識する機能を備えたサブグリッドモデルを対流項の離散化スキームに導入することによって計算精度の向上を図った。不連続面が物体境界と接触したときに生じる時間的に不連続な現象にはまだ対応できていないが、空間的な解像度については大幅に改善する結果が得られた。

(4) 土石流の厚さに対して半分程度の障害物であっても、それを複数、設置することによって、重力流のエネルギーの70%程度まで散逸させることが可能であることが分かった。境界形状や障害物の設置位置によって先端部の内部構造が変化し、そのため重力流が粘性による散逸が支配的となる段階に遷移したと考えられる。土石流の発達段階を境界形状や障害物によって変化し、土石流の進行を止めることはできなくても、比較的小規模な障害物を設置することによって、そのエネルギーのかなりな部分を散逸させてその威力をそぐシステムが可能であることが明らかになった。

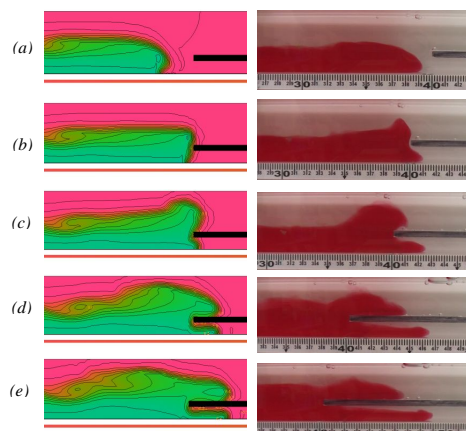


図 重力流と障害物の干渉 (左: 計算, 右: 実験)

(5) 重力流が障害物と干渉して場合の一例を図に示す。左側は重力流先端部におけるサブグリッドの不連続密度界面まで考慮した新しい手法による計算結果であり、右側は同じ条件で行った可視化実験の結果である。重力流が進行する方向に水平におかれた平面的な障害物の場合、重力流が衝突した際に立ち上がり、大きく変形したあと、上下に分断される様子が示されている。重力流のエネルギーの変化を計算した結果、障害物が重力流の流れに沿って上下方向に分断することによって、エネルギーの前方への供給率を大幅に減少できることが明らかになった。また、分断による重力流の厚さの減少に伴い、位置エネルギーから運動エネルギーへの変換過程が大きな影響を受け、後方からのエネルギーの供給率が大きく減少するとともに、障害物との相互干渉による大規模な渦の発生によって粘性散逸の割合が増加した。以上の結果、土石流が障害物と干渉することにより、発達した土石流がもつ衝撃的な荷重による破壊力を激減させることが可能であることが明らかになった。

(6) 上に示した例のように、底面から離れた水平な平面的な構造物の場合、その建設は容易であり、また、平常時には生態系等、環境への負荷をかけない。このような単純な障害物であっても、土石流の発達段階に応じて適切な位置に配置することによって、土石流による破壊力の大半を分散させることが示された。本研究で提案するこのような防御方法は技術的にも経済的にも実現可能な有効なシステムであり、大型化する土石流から人の生命や財産を守るための一つ的手段と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

森田哲，馬場信弘，重力流の先端速度に及ぼす壁面摩擦の影響，日本船舶海洋工学会秋季講演会，2012年11月26日，千葉

富宿敦志，馬場信弘，乱泥流のエネルギーの計測と制御に関する実験，日本船舶海洋工学会秋季講演会，2012年11月26日，千葉

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

馬場 信弘 (BABA, Nobuhiro)  
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10198947