

論文内容の要旨

森林科学専攻
平成 29 年度博士課程進学

氏名 酒井 佑一
指導教員名 堀田 紀文

論文題目 粒径組成が土石流の応力構造に与える影響に関する研究

本研究は、非粘着性材料からなる多様な土石流の応力構造を統一的な観点から理解することを目的として、均一粒径での石礫型土石流の構成則をもとに検討を行った。

第 1 章では、土石流の現地観測や水路実験などにより明らかにされてきた土石流の現象論を述べ、流動機構に基づく土石流の分類を示した。さらに、分類されたそれぞれの流れに対するモデル化の研究をレビューし、現実の多様な流れにそれらのモデルを適用する際の課題を整理して、本研究の目的と方向性を述べた。

近年における土石流の現地観測や水路実験・数値計算などにより土石流の多様な流動機構が徐々に明らかにされてきた。その成果をもとにして流動機構に基づく土石流の分類が行われており、主に粗粒砂からなり粒子間応力が卓越し層流状に流れる石礫型土石流、主に微細土砂からなり流動深スケールの乱れが卓越する乱流型土石流、主に粘着性材料からなり粘性が卓越する粘性泥流の 3 つに分けられ、それぞれに対して連続体力学の観点から構成則を導出することでモデル化が行われてきた。一方、実際の土石流では同一のイベント内でも層流状の流れと乱流状の流れの両者を有する場合があり、上述の 3 つの流れのいずれかに分類できない場合がある。また、粒子間応力が卓越する石礫型土石流では、主に均一粒径からなる流れを対象にして構成則が提示されているが、実際の土石流では粘土やシルトから巨礫のサイズまで幅広い粒度分布からなり、巨礫が流れ表面に浮き上がり土石流先頭部に集中する分級現象や、微細土砂の液相化といった混合粒径特有の流動特性を見せる。しかし、これらの現象はそれぞれを対象として別々に研究されており、現状では分

級の影響を受ける粒子と液相化の影響を受ける粒子の遷移を扱うことができない。従来の研究から、混合粒径の石礫型土石流も乱流型土石流も均一粒径からなる石礫型土石流と同様の構造をもっていることが示唆されており、これらの多様な流れを均一粒径での石礫型土石流の構成則に基づいて統一的に説明できる可能性がある。以上の観点から、本研究では均一粒径での石礫型土石流の構成則をもとにして、非粘着性材料からなる土石流の多様な流れの応力構造を統一的な観点からの理解することを試みた。

第2章では、まず均一粒径での石礫型土石流の構成則の導出を詳細に説明した上で、その適用性を基礎的な実験により確認した。

一粒径からなる土石流の水路実験を5種類の粒径で行い、粗度と流れ中の粒子を一致させた上で、石礫型土石流の構成則の適用性を流速分布・抵抗係数をもとに検討した。まず、横断方向の流速分布をみると、側壁近傍において側壁の摩擦の影響を受けて流速が小さくなっており、側壁から測定した流動深方向の流速分布もその影響を受けていると考えられた。そこで、実測した流動深方向の流速分布の積分値が実測した流量に合うように、流動深方向の流速分布の補正を行った。そこで、構成則により導かれた理論線と比較すると、5種類の粒径において両者は良く対応していることが分かった。また、本実験で取得したデータの相対水深は、既往文献において報告されている石礫型土石流の範囲を十分カバーしており、幅広い相対水深において検証できていることが分かった。さらに、抵抗係数の実験値と理論値を比較したところ、5種類の粒径において両者は良く対応していた。以上のように、粗度と流れ中の粒子を一致させれば、石礫型土石流としてみなせる相対水深の範囲において構成則による理論値は精度よく一致することが分かった。このことは、混合粒径からなる石礫型土石流において粗粒砂は幅広い粒径からなるが、それぞれの粒径階に対して構成則は適用性をもつという点で重要である。

第3章では、均一粒径からなる土石流の応力構造を統一的に理解することを目的とした。まず、均一粒径からなる土石流の固定床実験において間隙水圧を測定し、層流では静水圧程度、乱流では全圧力程度の値をとり、その間で静水圧から全圧力へ間隙水圧が連続的に遷移していることが分かった。その結果をもとに、慣性力と流動応力の比で表される土石流のレイノルズ数 Re_D により整理することで、均一粒径からなる土石流の層流から乱流への遷移を表現できることを確認し、層流から乱流への遷移が始まる限界レイノルズ数を $Re_{Dc} = 3000$ と定めた。これは、既往研究において流速分布や平衡勾配をもとに定められた Re_{Dc} の値とも調和的であった。

さらに、下層では粒子間応力の卓越し、上層では乱れが卓越するとした二層モデルをもとに均一粒径からなる土石流の統一的な説明を試みた。ここでは、二層モデルにおいて粒子間応力層の高さを限界レイノルズから定めることで、全層が層流の流れから乱流になるまでの連続的な遷移を表現することができた。また、上記の議論を均一粒径からなる移動床上土石流に対しても適用し、上述の実験で定めた限界レイノルズ数により求めた粒子間応力層の高さを平衡濃度と平衡勾配の関係から求めた粒子間応力層の高さと比較すると、

後者が過小評価する傾向にあるものの、両者は比較的良好に対応しており、移動床でも普遍的に適用できることが分かった。以上のことから、均一粒径からなる土石流は、河床条件を問わず二層モデルを考慮することで層流から乱流への流れの遷移を統一的に記述しうることが分かった。

第4章では、小粒子の挙動が二粒径からなる石礫型土石流の応力構造に与える影響について検討することを目的として、均一粒径での構成則をもとに検討した。二粒径からなる流れにおいて、小粒子がすべて固相もしくは液相として振る舞う両極端の状況を考え、それぞれの場合に応じて小粒子の影響を代表粒径と間隙流体密度に反映させることで均一粒径での構成則を拡張し、固定床実験での流速分布と抵抗係数に適用した。解析の結果、小粒子の粒径が比較的大きい場合は固相の土砂として応力構造に寄与するが、分級によって代表粒径が変化することで均一粒径の流れにおける流速分布とは異なる形をとることが分かった。一方、小粒子の粒径が比較的小さい場合は必ずしも完全に液相として振る舞うわけではなく、一部が固相で、残りが液相のように中間的な振る舞いを見せることが分かった。浮遊砂での浮遊条件とのアナロジーをもとに小粒子の挙動を考えると、間隙流体の乱れ速度と小粒子の沈降速度の比で表される浮遊条件に対応して固相から液相に変化していることが示された。

第5章では、第4章での二粒径モデルと、連続的な粒度分布を固相と液相の土砂に分ける境界粒径を組み合わせた幅広い粒度分布への拡張モデルをもとに、均一粒径の石礫型土石流に対する構成則を用いて幅広い粒度分布からなる石礫型土石流の応力構造を検討した。本研究では連続的な粒度分布からなる6種類の実験砂を用意し移動床実験を行うことで、平衡輸送濃度と平衡勾配の関係を得た。ここで得られた関係を構成則に適用することで、みかけの間隙流体密度を逆算し、液相化割合を求めた。さらに、液相化割合に対応する境界粒径を用いて粒度分布を固相の土砂と液相の土砂に分け、代表粒径として固相の土砂の体積平均粒径を算出し、構成則に適用することで抵抗係数の理論値を導出して実験値と比較した。その結果、抵抗係数の理論値は実験値と比較的良好に対応するものの、理論値が実験値を若干小さく評価するケースが見られた。

抵抗係数の実験値に合うように代表粒径を逆算すると、平衡濃度によって評価した固相の土砂の体積平均粒径よりも系統的に大きい値をとった。平衡濃度は固体摩擦応力に寄与する土砂を固相として評価しており、抵抗係数は衝突応力に寄与する土砂を固相として評価していることから、2つの代表粒径の差異は固体摩擦応力に寄与するが衝突応力に寄与しない土砂が存在する可能性を示唆している。

第6章では、これまでの各章の結果をまとめ、粒径組成が土石流の応力構造に与える影響について考察した。混合粒径からなる土石流を二粒径で単純化して考えると、分級によって河床付近に集中した小粒子は均一粒径に近い流れを形成するとする仮定し、小粒子層に対する粒子間応力層の厚さを考えると、小粒子層が粒子間応力層内に収まる場合はすべての小粒子が固相として振る舞うと考えられる。一方で、粒子間応力層の外側にも小粒子

層が存在する場合は、粒子間応力層内では固相として振る舞うことができるものの、その外側では乱れの影響を受けて液相化する可能性があると考えられる。流れを抵抗係数や平衡濃度によってマクロにとらえた際にみられた結果は、流動深方向に液相化の分布が生じることによって説明できる可能性があることを示唆している。以上のことから、均一粒径の乱流型土石流や混合粒径の石礫型土石流においても、均一粒径からなる石礫型土石流の構成則をもとにして応力構造を議論することの有効性が示され、多様な土石流の流れの応力構造を統一的に理解する際の今後の有効な道筋となると考えられる。