

審査の結果の要旨

氏名 酒井 佑一

土石流は地形条件や材料特性等に応じて多様な流況や流動特性を示す。従来の研究は土石流を類型化したうえで、特定の流れを対象としてモデル化を行ってきた。しかし、近年の研究から、それら個別の流れは必ずしも明確に分類できず、相互の遷移や中間的な流れの存在が明らかになりつつある。そのような土石流の遷移は流下に伴って生じ得るため、土石流の流速や流下距離は既存のモデルでは十分に評価できない場合がある。ハザードマップの作成や施設配置計画等が、現在では数値シミュレーション結果に基づき実施されることから、土石流の多様な流れを総合的に記述するモデルや枠組みが、防災上の観点からも必要である。本論文は、実際の土石流中の土砂が幅広い粒度分布を有することに着目し、微細土砂が粗礫の間隙流体に取り込まれて液相として振る舞うことで生じる流動特性の変化を検討した。

本論文は全 6 章から構成される。第 1 章では上述の研究の背景に加えて、土石流の応力構造とそのモデル化に関する先行研究がレビューされた。均一粒径の土石流においても、粒子間応力が卓越し層流状に流れる石礫型土石流や、流動深スケールでの乱れが卓越する乱流型土石流、粘性が卓越する泥流等が存在する。流動形態の違いが応力構造の差異に帰結すること、石礫型土石流の構成則が複数の内部応力を独立に扱うことから、石礫型土石流の構成則を発展させる形で混合粒径の土石流の応力構造を定式化することを目的とした。

第 2 章では、粒径や水路勾配などに関して幅広い条件下で均一粒径・層流状態の流れを対象とした土石流実験を実施し、そのデータを用いて石礫型土石流の構成則の適用性を検証した。流速分布や抵抗係数に関して、構成則は実験を良好に再現した。構成則の適用性を、路床の粗度まで厳密に制御したうえで、本論文のように幅広い条件下で検討した例は他に無い。第 3 章では、同じく均一粒径を対象とし、微砂土砂から砂礫までの土石流水路実験を実施した。土石流における層流から乱流への遷移機構の解明を目的としており、結果として、乱流状態での間隙水圧は全応力と等しく、粒子間応力が存在しないことを示した。また、構成則に基づき提案されたレイノルズ数を用いて、層流から乱流への遷移を説明した。微細土砂が実際に乱流状態になること、その遷移条件が応力構造から決まることは、第 1 章で提示された研究の枠組みの正当性を支持する。博士論文全体の中での位置づけとして、第 2 章および第 3 章により本研究の方法論の妥当性が示されたと解釈できる。

第 4 章では、大小二粒径に単純化した混合粒径土石流の水路実験の結果から、微細土砂の液相化の有無が粒径という幾何的な条件では無く、力学的な条件によって決まることを

示した。そのうえで、液相化の程度を表す指標を流れの乱れ速度と粒子の沈降速度の関数として定式化した。このモデルを用いることで、流下中に生じる微細土砂の挙動の変化に対応する形で、土石流の流動特性の変化を表現することが可能になる。

第 5 章では、粒径組成が連続的に変化する複数の異なる材料を用いて第 4 章で得られた知見を一般化することを目的とした。移動床上での水路実験を行うことで、第 4 章までに用いた抵抗係数に加え、平衡濃度を用いた検討も実施した。抵抗係数が構成則中の動的な応力に基づき定式化されるのに対して、平衡濃度は静的な応力を反映する形で定式化されることから、土石流の応力構造について網羅的な検討が可能になる。結果として、微細土砂の挙動に着目することで実験結果は概ね良好に説明された。ただし、実験から得られた抵抗係数と平衡濃度がそれぞれ理論値と一致するように、逆解析によって固相・液相の境界粒径を求めた結果、両者の代表粒径には、抵抗係数から得られた粒径が平衡濃度のそれを上回るという系統的な差異が見られた。このことは、混合粒径の土石流において、静的な応力と動的な応力の配分が粒径によって異なることを意味する。

総合考察と結論からなる第 6 章では、第 3 章および第 4 章で議論された土石流内部のインターフェース、すなわち、粘性底層と分級現象にも言及しつつ、論文全体の結果が考察された。第 5 章で指摘された、粒径によって異なる静的／動的な応力比は、流れをマクロに捉えた場合には、大粒子による小粒子の連行と解釈することが可能であるが、一方で、分級に伴い底面近傍に集中した小粒子への静的な応力の分配として理解することも可能である。これらの知見は、本論文で目的とした土石流における液相化の機構解明に加え、土石流内部の固相粒子間に働く応力構造の実態に繋がる成果であり、土石流のメカニズム解明への研究の展開が期待される。

これらの研究成果は、学術上応用上寄与するところが少なくない。よって、審査委員一同は本論文が博士（農学）の学位論文として価値あるものと認めた。