

学位請求論文要旨

渓床・溪岸の侵食を伴う石礫流の流動・発達機構の解明と現地観測への適用

Clarification of the flow and development mechanisms of gravel flows with valley bed and bank erosion and their application to the field observations.

都市人間環境学専攻 加藤 宏季

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Hiroki Kato

研究背景と目的

土石流は渓床や溪岸を侵食し、侵食した土砂礫群を取り込むことにより成長・発達し、時には巨大な土砂災害を引き起こす。特に、砂防堰堤や家屋等の構造物の破壊や溪岸侵食は土石流先端に集積した大粒径粒子による大きな衝突力が重要であると考えられる。そのため、渓床・溪岸の侵食を伴い、大粒径粒子を含んだ土石流の流動機構の解明が重要課題である。

土石流の流動は、一般的に、土石流中の土砂礫群を土砂濃度として連続体近似し、一相流もしくは二相流として取り扱われている。このとき、基礎方程式群においては、方程式が5つに対して未知数が7つ存在し、方程式の数が2つ不足している。そこで、応力の構成則および侵食・堆積速度式を付加することで方程式系が閉じる形で土石流の運動を解析している。そのため、構成則と侵食・堆積速度式に関する研究が数多く行われ、模型実験に基づいて構成則や侵食・堆積速度式が提案されている。江頭ら(1993)は、土石流によって生じるせん断力と堆積土砂が有するせん断抵抗力が釣り合う深さになるように侵食もしくは堆積が生じると考え定式化している。また、実験から得られた経験式(例えば Cao et al., 2004)を用いている研究も多い。しかし、これらは渓床の侵食を対象としており、溪岸の侵食を含めた土石流の研究は少ない。構成則に関して、一相流の枠組みでは、非ニュートン流体の構成則を与えるか、考えられていても粒子間隙スケールでの乱れによるエネルギー散逸による応力を構成則の中に組み込むことが行われることが多い。流水が粒子群に与える作用については、考えられていないか、その影響をパラメーターに丸め込むことで考慮されている。二相流モデルでは多くの場合、液相から固相に与える力を抗力係数を用いた抗力として与え、その反力を固相から液相に与える力として考えられている(例えば Amanini et al., 2014.)。これらの既往研究に基づく連続体モデルは土石流の平均的な流動特性を概算することができ、土石流の堆積・氾濫範囲の予測や、砂防堰堤等の構造物の効果検証に用いられ、工学的に有用な技術となっている。しかしながら、連続体モデルに基づく解析結果は経験的なパラメーターに強く依存しており、パラメーターの持つ一般性について考察が必要である。このためには、土石流中の流れの三次元的な内部構造や個々の土砂礫粒子の運動に加え、土石流 head 部の流動機構及び流動性の維持機構の更なる理解が必要である。

これらに加え、個々の粒子や間隙流水が激しくかつ複雑に運動する土石流現象を分かりやすく捉え、理解することも重要である。土石流は、急な斜面において土砂と水の混合物が重力の作用を強く受け、エネルギー勾配の作用下で流動する現象であり、渓床・溪岸の侵食によって流入した大粒径粒子群が先端部に集積することで、土石流先端部の有するエネルギーは増大する。その結果、強大なエネルギーを有する土石流先端部が構造物に衝突することで、構造物の破壊が引き起こされる。このようなことから、土石流の流動機構及び土石流がもたらす破壊力についてエネルギー的に理解することも重要である。土石流の有するエネルギーの時空間分布を正しく評価するにあたっては、土石流内部の流速や圧力、粒子運動の三次元分布を把握する必要がある。

しかし、土石流の三次元的な内部構造や個々の粒子運動を模型実験や現地で計測することは困難であること

から、計算力学的アプローチによる現象解明が期待される。その際、粒子群の影響を受けて複雑な流速分布・圧力分布が形成される場において、抗力係数等のパラメーターの値を正しく見積もることは困難であるためそのようなパラメーターを用いないことや、土石流中を運動する大粒径粒子を考慮し、それら粒子群を連続体の流動挙動としてよりも、離散体の個々の粒子運動として考えることが望ましい。近年では計算機や計算技術の向上により、粒子に対して十分な解像度のメッシュを用いた流体運動と粒子運動の連成解析モデル(resolved CFD-DEM)により三次元の土石流解析が行われてきている。CFD-DEM モデルは、個別要素法を用いることで個々の粒子運動をLagrange的に追跡することができるという利点を持つ。そのため、CFD-DEMモデルによる計算力学的アプローチは、渓床・渓岸侵食を伴い流下する土石流中の粒子や流体の運動機構の解明や、流速や圧力の三次元分布を考慮したエネルギー評価法の構築に非常に有効である。

本研究では、Fukuoka et al.(2014)によって構築された Arbitrary Particle Multiphase(APM)法を用いて、大粒径粒子を考慮した、詳細な三次元石礫流数値実験を実施する。APM法は、resolved CFD-DEMに分類される任意形状の非球形粒子を解析可能な粒子-流体連成解析手法である。数値実験で得られた結果より、まず初めに、石礫流の有する運動量の観点から、渓床・渓岸の侵食機構や、石礫流先端付近を移動する粒子と流水の相互作用及びその運動機構、石礫流 head部の成長機構をそれぞれ明らかにする。次に、石礫流の有する全エネルギー水頭の縦横断分布形と地形の時空間的な変化の関係を検討し、エネルギーの観点から石礫流による渓床・渓岸の侵食機構及び石礫流の流動機構を明らかにする。最後に、数値実験結果を様々なフィールドでの土石流観測結果と比較・検討し、大粒径粒子と流れの集合流動体である石礫流が現地土石流の重要な流動機構を説明できていることを示す。

本論文の内容と成果

本論文は6章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章の「序論」では、研究背景、既往研究のレビュー、研究目的、本論文の構成を示している。

第2章「APM法の概要」では、APM法について説明し、激しく変化する自由水面の解析で用いるVOF法の精度検証を行った。Kleesdman et al. (2005)によるダムブレイク実験に対してメッシュサイズを変更した4ケースの再現計算を実施した。メッシュサイズ Δ は各ケースごとにそれぞれ $0.03h_{\text{box}}$ 、 $0.06h_{\text{box}}$ 、 $0.12h_{\text{box}}$ 、 $0.24h_{\text{box}}$ とした。ここで、 h_{box} は実験で水深に対して重要な物理量と考えられる箱の高さである。数値解析結果は、模型実験で得られた水面波形の傾向を捉えてはいるものの、実験値と比較して水位の立ち上がりがわずかに遅かった。メッシュサイズごとに比較すると、メッシュサイズが小さく、空間解像度が高いほど水位の立ち上がりが早く、実験値に近づいていた。ただし、メッシュサイズが $0.12h_{\text{box}}$ であっても水位分布の近似性は高く、水深を規定する物理量 h_{depth} に対して $\Delta \leq 0.12h_{\text{depth}}$ を満たすメッシュサイズを用いることで自由水面が精度よく解析できることを示した。

第3章「APM法に基づく石礫流の流下・発達機構」では、現地スケールに匹敵する大規模な三次元数値実験を実施し、渓床・渓岸を侵食しながら石礫流が流下・発達する機構を検討した。石礫流の数値実験水路の諸元は、水路長 60m、水路幅 8m である。水路勾配は、一般に土石流が発生する区間である 20° とした。また、渓岸侵食・崩壊や砂防構造物の破壊に対しては、流下中に先頭に集積する大粒径粒子による大きな衝突力が重要であることから、渓床・渓岸の材料として最大粒径が 1.0m、最小粒径が 0.1m の連続的な分布を持つ非球形粒子群を用いた。渓谷の上流端で、一定流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え続けることにより、上流端付近の粒子群が動き、形成・発達す

る石礫流の流動機構を数値実験で調べた。通水中に上流端からの土砂供給は行っていない。下流端では、圧力をゲージ圧 0 とし、土砂は自由に流出できるとしている。また、2 章及び既往研究による検討結果より、粒子に作用する流体力や自由水面を精度よく解析可能なメッシュサイズとして $\Delta = d_{\min}/4 = 0.025\text{m}$ を用いた。

まず、溪床や溪岸を構成する個々の粒子に着目することで溪床・溪岸の侵食機構を検討した。本検討における溪床・溪岸の着目粒子のうち多くは負の接触力の減少によって侵食されており、石礫流の通過による溪床・溪岸侵食の主要因は負の接触力の低下によること、石礫流中の粒子群との衝突・接触によって粒子群の姿勢や配置が変化することで周囲の粒子から受ける負の接触力が減少することを示した。次に、石礫流先端付近を運動する粒子に作用する外力や粒子周りの流れ場について検討した。石礫流先端付近で粒子が跳躍運動している場合には、その影響を受けて底面付近の流速が増大し、粒子には大きな流体力が生じる。また、粒子は周囲の粒子との接触・衝突をした際に瞬間的に接触力が大きくなり、減速し、堆積しようとするがそのタイミングで瞬間的に流体力が大きくなることで粒子は加速され、運動を継続する。この流水の瞬間的な作用力が石礫流のモビリティの継続に重要な役割を果たしていることが明らかになった。最後に、流下する石礫流 head 部の成長・発達機構を調べた。石礫流 head 部中の石礫粒子群の質量を周期的に増減させることにより石礫流の流動性が維持されていること、石礫流 head 部の流動性は密度では説明できず、どれだけの数の大粒径粒子が石礫流 head 部に存在し、それらがどのように分布しているのかが石礫流 head 部の大きさの発達や流動性の維持において重要であることを明らかにした。

第4章「流下する石礫流の有するエネルギー分布及びその貯留と放出」では、まず、第3章で実施した数値実験より得られた流速や圧力、密度、地形の詳細な三次元分布を用いて石礫流の有する全エネルギー水頭の時空間変化を評価した。石礫流内部の圧力・流速分布は複雑な三次元分布をしており、エネルギー補正係数を用いて表現した一次元エネルギー式では石礫流の有するエネルギーを適切に評価できない。そのため、石礫流内部の流速や圧力、粒子運動の三次元性を考慮した三次元局所エネルギー $H(x, y, z, t)$ を底面から水面まで積分し全エネルギー水頭 $H_{all}(x, y, t)$ を用いて検討した。次に、得られた全エネルギー水頭の縦横断分布形と地形の時空間変化の関係を調べた。ここで、石礫流の流動をエネルギー的に捉える場合には、空間的に広がりを持って考えることが重要であり、石礫粒子を駆動するために生じるエネルギー水頭の分布は、粒径程度のスケールで見ると考え、平均粒径に相当する 0.5m スケールで空間平均してエネルギー的に石礫流の流動機構の検討を行った。上流から輸送されてきた粒子群が堆積し、その影響を受けて全エネルギー水頭の分布形が変化し、全エネルギー水頭の尾根が溪岸に向くような全エネルギー水頭分布が形成された。このとき、全エネルギー水頭の尾根が溪岸と交差する箇所では溪岸侵食が発生していることが明らかになった。また、溪岸粒子群の崩落によって溪床にその粒子群が堆積することで、局所的に石礫流の全エネルギー水頭が高まり、高まった全エネルギー水頭によって堆積した石礫粒子群が再流動し、堆積が生じる以前の全エネルギー水頭程度に戻る。このようなエネルギーの貯留と放出過程が石礫流流下の機構であることを明らかにした。

第5章「三次元石礫流数値実験結果の現地観測への適用」では、数値実験で発生した石礫流が実際に現地で発生した土石流をどの程度説明できるかについて検討した。そして、様々なフィールドでの現地観測や大型実験に本解析結果を適用し比較した。

まず、土石流の流速分布について検討した。本数値実験では、非常に粗い粒径集団を用いた結果、直線的な流速分布形が得られた。石礫流先端部の流速分布は石礫粒子の影響を強く受けており、多くの大粒径粒子が運動している場合には流体-粒子間の相互作用が重要であり、これを考慮する必要性が示された。次に、溪床に作用する石礫流の衝突力について検討した。本数値実験で生じていた無次元衝突力の確率密度分布は、現地観測結

果(McCoy et al., 2013)と類似した分布形を示した。そして、土石流先端が到達した時刻に対する溪床侵食のタイミングについて、現地観測結果と比較検討した。数値実験結果は、Berger et al.(2011)と同様に、先端が到達してから数秒後($\tilde{t}=0.75\sim 1.20$)に粒子は動きだしている。溪床侵食に対して大粒径粒子による衝突が支配的であり、その大粒径粒子を考慮した本数値実験結果は現地土石流と同様のタイミングで溪床侵食が発生したと考えられる。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果の総括と、今後の研究の展開を示している。

本研究では、溪床・溪岸侵食を伴う石礫流の流動・発達機構の解明を目的として、APM法を用いた数値実験を実施した。本研究においては、粒径が0.1m未満の粒子が含まれておらず、現地で実際に発生する土石流に比して最大粒径 $d_{\max}$ と最小粒径 $d_{\min}$ の比 $d_{\max}/d_{\min}$ が小さい条件で石礫流の数値実験を行っている。土石流の流動に関して最も重要な点は、土石流head部が構造物の破壊に及ぼす影響が著しく大きいことであり、この現象を石礫流head部が十分説明できているかに関わっている。そのため、本数値実験で考慮していない0.1m未満の粒子群の重要性については今後検証し、明らかにしなければならない。しかし、細かい粒子群の影響に言及せずとも、工学的には以下の点から石礫流の流動は土石流の流動を表現できていると考える。まず、世界各地で発生した土石流の流動が映像で記録されている。国土交通省のホームページや動画サイトで公開されている実際に発生した世界中の現地土石流の映像では、土石流head部は先端に集積した大粒径粒子の粒径程度の水深を有しており、現地土石流の水深及び流れ構造は大粒径粒子の大きさに規定されていることがわかる。石礫流head部の水深も先頭に集積している大粒径粒子程度の大きさであり、その流動は大粒径粒子に強く影響を受けた流れ構造が形成されていることを本研究で明らかにされた。すなわち、石礫流head部は、水量と大粒径粒子の存在及びその配置に強く影響を受けながら石礫流head部の大きさや流動性を時間的に増減させ流下しており、大粒径粒子と間隙流水の運動及びそれらの相互作用の重要性が強調されている。また、流下中の土石流に関する種々のデータが観測されている。それらの貴重なデータを使い、観測されている事項について、現地土石流と石礫流との比較検討を行った。結果、石礫流の特性と現地土石流の特性は概ね同じであることがわかった。特に、衝突力の確率密度分布や溪床侵食が発生するタイミングにおいて石礫流と現地土石流が同様の傾向を示したということは、侵食に対して駆動力の一つである衝突力や抵抗として大きな役割を果たす骨格応力において、ともに大粒径粒子が支配的であることが明確になった。これらのことから、大粒径粒子群と流れの集合流動体である石礫流の流動は、現地土石流の重要な機構を表現できていることが結論付けられる。

今後の研究の展開を以下に示す。

- APM法を改良し、より幅広い粒度分布を解析可能としたうえで、粒径0.1m未満の粒子を考慮した数値実験を実施する。これにより、土石流先端部に含まれる細粒土砂および間隙流水が、土石流の流動特性に及ぼす影響とその役割を明らかにする。
- 本研究では土石流の発生、成長、流下については検討を行ったが、停止・堆積機構は検討できていない。土石流の停止・堆積現象は緩勾配区間で生じるため、粒子群や流水の対する重力の影響度合いが流下過程とは異なるため、間隙流水の影響がより重要になると考えられる。今後は、縦断的に勾配を変化させた数値実験を行い、土石流の停止・堆積機構を明らかにする。
- 現地土石流の解析に適用可能な連続体モデルの精度改善に、本研究で得られた知見を活用することが望まれる。本研究より、侵食機構における非球形粒子のかみ合わせ効果や粒子群の流動維持機構において流水の瞬間的な作用が重要であることが明らかになった。これらを考慮した侵食モデル及び土石流流動モデルの構築を目指す。