

論文の内容の要旨

我が国の土石流災害は、短時間かつ局地的な集中豪雨の傾向が年々増加しており、平成 26 年では土石流が約 300 件発生している。土石流対策は、30 年余り続けられ発展してきたが、未だに発生原因の抑制や土石流に対する防災は、十分に達成されているとは言い難い。そのため、土石流対策を総合的かつ効果的に行うためには、土石流の実態や特性の理解が必要である。一方、災害を事前に予測し、対策を適切に評価できる技法の開発が求められている。

本研究は、砂防事業において土石流の発生・流下・停止に至る現象の中核となる巨礫の偏析現象に注目し、現地発生礫材の有効活用の観点から礫中詰材の堰堤としての利用について数値解析技法の開発を目指したものである。その際、目的ごとに異なった技法ではなく、共通した技法として個別要素法を用いるものとした。具体的には、礫材の凹凸を考慮した六等球径対称配列集合体要素と、礫と水の混相流を表現する擬水滴要素を提案した。そのうえで、堰堤の強度評価では、礫中詰材の安息角から決定した要素を用いて鋼製枠堰堤のせん断抵抗力を推定した。次に、柔性枠の大型布団籠は鋼材と礫材の相互作用である抵抗力の適用性について検討した。一方、土石流の流動における再現性では、流下中に生起する偏析について検討した。さらに、擬水滴要素を用いて礫と水の混合、流下から停止に至る過程を再現した。これらの適用性を踏まえて、鋼製枠堰堤と土石流における一体解析を行い、堰堤が受ける土石流の衝撃荷重について評価した。

本論文は、9 章で構成され本研究における各章の内容と成果の概要は以下のようなになる。

第 1 章「序論」では、我が国における被災事例と対策法および防災における対応やその問題点を整理し、本研究で対象とする砂防堰堤の強度評価と土石流の設計荷重の現状を通して、シミュレーション技法の必要性を明らかにした。また、砂防構造物や土石流に対する既往研究や個別要素法の既往研究を整理し、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第 2 章「六等球径対称配列集合体要素を用いた小礫の安息角解析」では、個別要素法において多用される球形要素を重ねることで形成する集合体要素の基本式を定式化したのち、6 個の球形要素を 1 つの要素として振舞う六等球径対称配列集合体要素を開発した。そのうえで、礫中詰材のせん断抵抗力解析や土石流解析の前段階に行う安息角形成過程の解析を実験と比較し、安息角の実測値を基に、非重複率 β を決定する安息角推定式を提案した。

第 3 章「六等球径対称配列集合体要素を用いた小型単純せん断抵抗力解析」では、事前実験で得られた安息角に対応する非重複率 β を有する集合体要素を礫中詰材要素として用いて、礫中詰材の単純せん断変形実験によるせん断抵抗力～変位関係を解析した。また、礫中詰材を球形要素でモデル化した場合の解析も同時に行い、内部の力学的メカニズムを考察した。よって、矩形枠内の中詰材全体の抵抗力を中詰材の安息角を活用して再現できることを示した。

第 4 章「大型布団籠の準実物大実験の解析」では、10 cm 程度の礫材における安息角実験により決定した礫中詰材要素を用いて、形状が複雑な階段枠のせん断変形実験および大型布団籠実験で得られたせん断抵抗力～変位関係をシミュレーションした。まず、高さ 1 m 程度の階段枠実験を解析し、せん断抵抗力の適用性を示した。その後、拘束効果が中詰材の局部的抵抗力によって変形する柔性鋼材における大型布団籠の準実物大実験から得られたせん断抵抗力～変位関係を再現することで柔

性棒と礫材の一体挙動の抵抗力を推定できることを示した。

第 5 章「回転円筒による混合球形粒子の偏析実験と個別要素法解析」では、従来の実験要領では捉えることが困難であった偏析現象を安定的に生起させて分析するために、回転円筒実験装置を用いて球形で異粒径の混合粒状体を入れて、定速で回転させると円筒内で粒子塊が定位置にとどまりながら、内部では粒状体が複雑に配置変換する定常状態を作り出す定点観測可能な実験法を創案した。これにより、回転円筒内で生起する平衡状態における偏析現象の生起条件について検討した。そのうえで、個別要素法解析の混合粒状体を用いて、偏析における要素間接触力や運動のメカニズムについて考察した。

第 6 章「回転円筒による 2 粒径混合粗粒材の偏析実験と個別要素法解析」では、第 5 章の回転円筒実験装置を用いて、表面凹凸を有する礫材の 2 粒径混合状態における偏析現象の生起条件を検討した。そのために、直線水路実験でも使用される底面粗度を貼り付け、その間隔をパラメータとして粗粒材の運動形態を整理した。なお、比較のためにガラス球の 2 粒径混合状態に対しても底面粗度が偏析現象に与える影響を検討した。そのうえで、個別要素法を用いて表面凹凸の有する偏析現象における運動のメカニズムについて考察した。

第 7 章「底面水抜きスクリーン実験に対する水と礫の分離挙動シミュレーション」では、擬水滴要素を用いた個別要素法を開発し、礫と水の連成解析を行えるように工夫した。そのうえで、底面水抜きスクリーン実験をシミュレーションし、水と礫の分離挙動における土石流の停止機構について検討した。

第 8 章「擬水滴要素個別要素法による堰堤に対する荷重衝撃評価への試み」では、不透過型砂防堰堤と礫中詰材を使用した堰堤に作用する土石流の衝撃荷重を計測し、それぞれの衝撃荷重～時間関係を整理した。その実験結果を基に鋼製棒堰堤と土石流の一体解析し、土石流の衝撃荷重による堰堤に生じるインタラクションについて検討した。

第 9 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べた。