

氏 名	しま うち てつ や 島 内 哲 哉
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2903 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 都 市 環 境 工 学 専 攻
学位論文題目	岩盤斜面崩壊および落石問題への数値解析手法の適用性に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 大西有三 教授 石田 毅 准教授 西山 哲

論 文 内 容 の 要 旨

国土の2/3が山岳地である我が国では、岩盤斜面で発生する崩壊や落石災害が後を絶たない。岩盤崩壊というと、豊浜トンネル(1996)や第二白糸トンネル(1998)のような大規模崩壊をイメージしがちだが、山腹斜面の中腹から山頂にかけて散在する小規模な岩盤露頭を発生源とする落石災害も忘れてはならない。実際、小規模な崩壊ほど発生頻度は高い傾向にあり、これによる道路や鉄道への被害は全国各地で発生している。本研究は、このような斜面上部で発生する崩落・落石の衝突時の運動特性に着目し、これを踏まえた数値シミュレーションを実用化し、今後の防災計画や災害復旧計画実務へ役立てることを目的としたものである。

本論文は、序論および結論を含め8章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景となった岩盤斜面を発生源とする災害の特徴と課題、および本研究の目的について述べる。

第2章では、崩壊発生源としての岩盤斜面の規模と特徴、およびその発生要因を概観し、発生源となる危険箇所の調査法と被災想定のための評価法の現状についてまとめた。岩盤の崩落や落石災害の調査では、発生源の危険性評価とともに、崩落後の岩塊がたどる主要な経路、対策位置での速度、跳躍高さなど保全対象への影響予測が大きな課題となる。この点から、近年では落石シミュレーションの必要性、重要性が高まっている。これには、近年の落石災害で、比高差が大きく落下経路も複雑なケースが増加し、従来の経験的評価法では対応が難しいという背景もある。

こうした落石シミュレーションには、質点系解析法と数値解析法の2種類がある。開発年代の古い質点系解析法には、実績が豊富であるという利点はあるものの、岩塊の形状を考慮できず、規模も数トン程度以下という制約がある。このため、複雑な形状が扱え、規模や岩塊の数に制約の少ない方法として、数値解析法による落石シミュレーションへの実用化が期待されている。

第3章では、岩盤崩落および落石現象に用いられる数値解析手法を概観し、本研究で用いる不連続変形法(DDA)の特徴と、その適用に際して用いられる入力値(速度エネルギー比(E_v)や粘性係数(μ_d)など)について検討した。過去の研究をレビューした結果、不連続変形法(DDA)の落石シミュレーションへの適用に際して、1)速度エネルギー比(速度自乗比)の性質が不明、2)DDAを落石解析に適用する際の内部パラメータ(Δt , バネ剛性etc)の決定法が未確立、3)多角形落石モデルが結果に与える影響が不明、という問題があることが明らかとなった。そこで、1)は、DDAの落石のエネルギー損失評価に用いられる速度比(R_v)の性質に関する問題であり、特に入射角度が大きく異なる地形条件下では解析が困難であること、近年、法線方向速度比には、法線方向入射速度が大きくなると値が低下する性質(速度依存性)が指摘されており、速度比(R_v)にも類似の性質があると予想されること、2)は、数値解析適用上の問題であり、DDAによる精度と安定性を担保した解析を行うためには適切な時間刻み(Δt)やバネの設定が必要であるが、その設定が不適切だと過大な減衰や過剰反発を生じること、また、3)は、落石モデルに多角形を用いると、形状によっては接触時に不規則かつ

過大な減衰を生じることがあることを問題提起している。

落石シミュレーションは、落石のエネルギー減衰過程を評価することが目的であるため、このような解析手法内部に潜む要因による不規則な減衰は避けなければならない。そこで、形状の問題については、剛体球要素三次元 DDA を用いて形状の影響を排除し、速度比 (Rv) の性質とそのシミュレーションへの適用法と DDA のパラメータの設定方法について次章以下で検討を行った。

第 4 章では、速度比 (Rv) の性質を明らかにする目的で行った現場実験と室内実験結果をまとめ、シミュレーションへの適用法について議論している。現場実験は、採石場および危険岩塊除去中の施工現場など 3箇所で行った。計測に当たっては、ビデオ画像と写真測量結果をコンピュータグラフィクス (CG) で合成し、落下中の岩塊の位置を読みとる方法を考案した。計測結果から、落下中の岩塊の運動が、線速度エネルギーが中心で、回転エネルギーの変化は小さいことなどを明らかにした。また、本実験から、法線方向速度比 (Rn) だけでなく、速度比 (Rv) にも法線方向入射速度が増加するに伴い減少する性質のあることについて考察を加えている。

一方、現場実験から得られる値は、岩塊の形状や衝突地盤の凹み (地形) などによるばらつきが大きいため、入射時の速度や角度による影響を詳細に評価することが難しい。このため、小球を衝突速度と角度を変えて岩製および木製の 2 種類の反射板上に落下させる方法で室内実験による追試を行った。その結果をそれぞれの値と法線方向入射速度との関係でまとめ、法線方向速度比 (Rn) が反射板の違いによって異なり、その値の変動幅は入射速度に依存することを、一方速度比 (Rv) は反射板が違ってても分布傾向が同じで、その変動幅は主に入射角度に依存することを明らかにした。これは、速度比 (Rv) をそのままの値でシミュレーションの入力値とすることは適当ではないことを示しており、本研究では、Peiffer (1989) による法線方向速度比 (Rn) の補正法の援用を考え、速度比 (Rv) を法線方向入射速度の関数とすることで入射角度に対する依存性を評価する方法 (SF 曲線法) を提案した。本方法を室内実験結果の再現に適用し、反射板が異なっても法線方向入射速度の変化に応じた反射速度の予測が可能であることを確認した。

第 5 章では、DDA による解析を行う上で必要な、内部パラメータ (時間刻み (Δt), バネ剛性 (k), 質量 (M) など) の設定法に関する検討を行っている。DDA で落石シミュレーションを行う際、設定する内部パラメータによって、貫通、停止、過剰反発、過剰減衰といった解析異常がしばしば生じることが指摘されている。この原因は、DDA の時間積分に用いられるニューマーク β 法の安定と精度が、質量 (M) とバネ剛性 (K) と時間刻み (Δt) に依存するためと考えられている。本研究では、室内実験結果の再現解析を基にパラメトリックスタディを行い、バネ剛性を設定するための目安となる範囲を絞り込み、DDA を落石解析に適用する際の内部パラメータの設定手順を提案した。これにより、DDA による安定かつ精度のよい落石シミュレーションが可能となった。

第 6 章では、4 章、5 章での研究成果をもとに、三次元剛体球要素 DDA を用いて、現場実験および室内実験結果の再現解析を行った。そして、提案した内部パラメータの設定法と速度比 (Rv) の SF 曲線法を用いることで、第 3 章で指摘した入射角度が大きく異なる地形条件であっても、その落石挙動を十分再現可能であることを示した。今後、本手法の適用事例を増やすことで、三次元剛体球要素 DDA による実用的な落石シミュレーションが可能になることが期待できる。なお、本章の最後では、落石解析特有のばらつきの考慮方法について検討を行った。質点解析法での事例研究をもとに、速度比と入射角度のばらつきを三次元剛体球要素 DDA に考慮することで、速度と軌跡の再現性をさらに向上させることが可能となることを明らかにし、今後の研究の方向を示した。

第 7 章では、研究成果に基づく岩盤斜面防災分野への提案として、入射角度をランダムに変化させる、あるいは球状集合体を用いることで、落石解析で常に問題となるばらつきを考慮する方法についても検討を加え、今後の研究の方向を示すとともに今後の課題について述べた。

第 8 章では、本研究により得られた結果をとりまとめ結論としている。

論文審査の結果の要旨

山岳地が国土の三分の二を占める我が国では、岩盤斜面で発生する大小の崩壊による災害が後を絶たない。中でも、山腹斜面の中腹から山頂にかけて広範囲に点在する小規模な岩盤露頭を発生源とする落石は、発生頻度も高く、しばしば通行車

両に被害を与える。防災という観点からはもちろん、社会資本の維持管理という面からも、信頼性の高い予測に基づく対策が求められている。そのため落石災害の予測にシミュレーションが用いられ、質点解析法と数値解析法の2種類が代表的である。しかしながら前者には、実績は豊富だが、岩塊の形状が考慮できず規模も数トン程度までという制約がある。このため、不連続性を取り扱う数値解析法（例えば個別要素法、不連続変形法など）の実用化が期待されているが、こちらにもエネルギー損失の評価法や解析の安定性や精度を左右するパラメータ（時間刻み、バネ剛性など）の設定法が未確立という問題を抱えている。本論文は、斜面で発生する崩落・落石の衝突時の運動特性に着目、これを踏まえた数値シミュレーションを実用化し、今後の防災計画や災害復旧計画実務へ役立てることを目的として、不連続変形法（DDA）を適用するうえで必要な速度比の性質と適用法およびパラメータの設定法を提案している。本論文の主な内容は、以下のとおりである。

- 1) 採石場や危険岩塊除去中の実際の現場を利用して、落下岩塊が衝突・反発する際の速度比を計測し、速度比（ R_v ）には、法線方向入射速度に依存する性質があることを示している。なお、計測にあたって、ビデオ画像とコンピュータグラフィクス画像とを合成し、岩塊の動きを追跡する方法を考案し、岩塊の落下から停止までの線速度と回転速度の変化も明らかにしている。
- 2) 現場実験から得られる値には、岩塊の形状や衝突地盤の凹み（地形）などによるばらつきが含まれる。このため、小球を速度と角度を変えて反射板上に落下させる方法で追試を行い、速度比（ R_v ）の法線方向入射速度依存性が、主に入射角度に依存するものであることを明らかにし、そのうえで、速度比（ R_v ）を法線方向入射速度の関数とする新たな評価法（SF曲線法）を提案している。
- 3) 数値解析法による落石シミュレーションでは、貫通、停止、過剰反発、過剰減衰といった解析異常がしばしば生じる。この原因は、不適切な内部パラメータの設定にある。不連続変形法（DDA）においても、質量（ M ）とバネ剛性（ K ）と時間刻み（ Δt ）の関係に注意して設定する必要があることが指摘されているので、本研究では室内実験結果を基にしたパラメトリックスタディを行い、経験的にパラメータを設定するための目安とその手順を提案した。
- 4) 以上の研究成果をもとに、三次元剛体球要素DDAを用いて現場実験および室内実験結果の再現解析を行い、内部パラメータの設定とSF曲線法の適用に関する提案法が再現解析に有効であることを確認した。また本提案により、従来は解析が困難であった、入射角度が大きく異なる地形条件での落石シミュレーションも可能であることを示した。また、入射角度をランダムに変化させる、あるいは球状集合体を用いることで、常に問題となるばらつきの考慮方法について検討を加え、今後の研究の方向を示した。

以上、要約すると本論文は、落石災害の予測に不連続変形法（DDA）シミュレーションを用いる目的で現場実験および室内実験を実施、その結果に基づき理論的考察を加えると共に落石運動のエネルギー損失評価法を提案し、その落石シミュレーションの適用性を確認しており、防災工学・岩盤工学の分野において、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。