

岩盤斜面における落石運動の数値解析

学位論文内容の要旨

近年、我が国では急峻な斜面をもつ山岳地帯、海岸地帯まで道路網が拡充され地域格差の是正に寄与してきた。一方、これらの道路網沿線では、岩盤斜面の崩落、落石、地すべりや雪崩等の自然災害に対する警戒が必要になってきている。落石に関しては、早急な対策を必要とする危険箇所が山岳・海岸道路沿いを中心に 56,700 箇所もあるといわれ、単なる自然現象とは言えない問題になっている。1968 年に発生した飛騨川バス転落事故において、裁判所は道路管理者である国の過失を認め、「道路管理者は施設対策と交通規制等の回避対策によって道路利用者の安全を確保すべきである」との判例を示した。以後、道路や鉄道に関しては、防護施設の整備とともに研究自体の必要性も高まった。一方、資源開発分野では国内における 280 箇所の石灰石鉱山、約 1,800 箇所の碎石場で落石が発生する可能性があり、防護柵・防護壁の設置、トレンチの掘り込み等の対策をとっているが、防護対策に関する研究事例は多いと言えない現状にある。

落石に関しては、「落石がいつ、どこで、どのような規模で発生するか」の予知に関する研究と、「場合によっては数 10t～数 100t の質量を持つ岩塊の衝突から人命、交通機関、建造物、構造物を守る」防護に関する研究が必要である。後者の問題である有効な防護対策には、落石源を始発点とした岩塊の落下軌跡、斜面末端での落下速度、運動エネルギー、到達距離、跳躍量等の落石特性値をできるだけ正確に知る必要がある。

本研究では、後者の落石特性値に関する実データ蓄積を図るため採石場斜面における落石のビデオ計測を実施し、既往の落石特性値との比較を行った。次いで、個別要素法 (DEM) を用いた落石運動の 3 次元数値シミュレーションプログラムの構築をはかり、実測結果を再現できるかの研究を行った。第 1 章は序論であり、主たる研究内容を第 2 章～第 8 章に述べている。第 9 章は結論である。

第 1 章では、本研究の目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章では、落石の運動に関する既往の研究について、年代経過とともに整理をした。また、現場落石実験結果および数値シミュレーション法について、詳しい説明を加え、本研究の位置づけを明らかにした。

第 3 章では、落石の運動形態を特徴づけるパラメータの一つに岩石形状があり、落下する岩石形状を塊状、板状、棒状の 3 種類に分類することを提案した。3 つの形状に分類するとき、縦軸に短軸径と長軸径の比 (S/M)、横軸に中軸径と長軸径の比 (M/L) をとったダイアグラムを用い、境界を $S/L=0.4$ の横軸に平行な直線と $M/L=0.5$ の縦軸に平行な直線で区分する方法を提案した。また、岩石試料の真重量と長軸径、中軸径、短軸径の積から単純に求めた計算重量との関係である回帰直線を示した。

第4章では、落石運動の現場実験を実施し、碎石場のオープンシュートにおける投石の落下速度、回転速度、衝突前後の速度比、跳躍量等をビデオカメラで撮影・分析し測定結果を示した。また、岩石が斜面脚部で保持している運動エネルギーと到達距離の関係を明らかにし、運動エネルギーが大きくなると、到達距離の分布の平均値は大きくなり、逆にその標準偏差は小さくなる。運動エネルギーの値が与えられればこの関係を用いて最大到達距離を推定できることを明らかにした。

第5章では、落石運動の3次元数値シミュレーションの理論と数値解析法を示した。落石を直六面体のブロックでモデル化し、その並進運動方程式と回転運動方程式を組み合わせで解く手法を示した。また、数値シミュレーションに必要な9つの座標系を設定し座標変換法について述べた。また、任意形状の斜面に適用可能な岩石接触判定法と岩石位置判定法を確立した。

第6章では、前章の数値シミュレーション法を直線型斜面へ適用し数値結果を示した。接触時の剛性値として106N/m オーダの値を与えることで、直線型斜面における落下速度、回転速度、衝突時の貫入量、跳躍量、到達距離等については、ほぼ実測値のばらつきの範囲に入る計算値が得られることを明らかにした。また、落下速度、回転速度、衝突時の貫入量、跳躍量、到達距離等の落石特性値とともに、2次元シミュレーションでは得られない落石の走向方向への拡がりに関する計算結果が得られることを明らかにした。

第7章では、実際に測距儀を用いて3次元座標を測定した斜面モデルをシミュレーションに採用し、斜面を構成する各三角形の頂点座標に乱数を加えて凹凸を表現する方法を示した。落下軌跡、落下速度、回転速度、跳躍量、到達距離、走向方向への拡がり等の落石特性値が斜面の局所的な凹凸を発生させることによりどのように変化するかについて計算結果を示し、斜面の凹凸を大きくすると、「落下軌跡の曲折が大きくなる」、「斜面の途中で停止する割合が増える」、また、「走向方向への拡がりが大きくなる」等のことを明らかにした。

第8章では、落石直後の調査により落石源、落石停止位置の座標がわかっている実斜面における落石事例を再現するために3次元数値シミュレーションを行った。植生が無い碎石場斜面の落石に対し同定した解析条件を、植生がある、崖錐が長い、湧水がある等、相対的に軟弱な日方泊覆道斜面に適用した結果、極端ではないが、到達距離、跳躍量が大き目に算出された。そこで解析条件のうち、粘性減衰定数式の係数 α のみを修正することで、日方泊覆道斜面で発生した落石の到達距離、走向方向への拡がり分布等をほぼ再現できた。すなわち、本数値シミュレーションにおいて、当該斜面の解析条件を同定することができた。

最後に第9章では全体を通しての結論を述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	名和豊春
副査	教授	三上隆
副査	教授	三浦清一
副査	教授	金子勝比古

学位論文題名

岩盤斜面における落石運動の数値解析

わが国の一般道路沿線において早急な対策を必要とする危険箇所は5万7千箇所といわれ、落石に対する予知と防護対策を構築することが重要な社会的課題となっている。落石による災害事例は古く1968年に飛騨川バス転落事故が発生しており、国内の大学・研究機関では落石の落下挙動を予測し、防護施設の設計法を整備することが進められてきた。しかし、落石の岩盤斜面での落下挙動は岩石の特性のみならず斜面の特性の影響も受け、さらにすべり運動、回転運動、跳躍運動など多様な運動形態をとる。このため、岩盤斜面における落石運動を予測する研究は未だ十分でない状態にあり、今後の発展が待たれていた。

本論文は、このような現況の中で、岩盤斜面での落石による災害の発生防止対策への実用化が期待できる「落石運動の数値シミュレーション法」の開発を目的として、実碎石場斜面における落石のビデオ計測による実際の落石運動の定量的評価および個別要素法を用いた落石運動の3次元数値シミュレーションモデルについて研究した結果を述べたものである。

本論文は8章からなり、以下に本研究で明らかとなった知見を各章ごとに要約する。

第1章では、本研究の必要性和目的について論じると同時に、本論文の全体構成について述べている。

第2章では、落石の運動に関する既往の現場落石実験結果および数値シミュレーション法についてレビューし、著者が提案する個別要素法による3次元落石運動シミュレーションモデルの新規性と位置づけを述べている。

第3章では、最初に落石の運動形態を特徴づけるパラメータの一つである落下する岩石形状の分類方法について検討を行い、短軸径/長軸径比および中軸径/長軸径比をパラメータとして形状を塊状、板状、棒状の3種類に分類する方法を提案した。ついで、オープンシュート法を採用している碎石場において、投下される石の落下挙動をビデオカメラで撮影し、投石の落下速度、回転速度、衝突前後の速度比、跳躍量等を定量化した。その結果、板状岩石ではすべり運動と回転運動で落下速度が異なり落下速度分布が2ピークを有するなど岩石の形状が落下運動に大きな影響を与えることを明らかにした。また、現場実験結果から落下速度に関する最大速度残存係数は、岩石形状の影響はあるものの、既往の研究結果に基づく経験式でほぼ近似されるなどの実用上で重要な知見も得ている。さらに、落石の運動は岩盤斜面の凹凸の影響も受けることを示し、斜面に凹凸が存在する場合や、小

段差があった場合は従来の落石対策で設定されている最大跳躍量 2m の値を超える場合もあることを示し、落石防護壁の設計に対して有意義な結果を明らかにしている。

第 4 章では、落石運動の 3 次元数値シミュレーションモデルの理論と数値計算法について述べている。落石は直六面体のブロックでモデル化し、その並進運動と回転運動の運動方程式の連成によって落石の運動を解析する手法を提案している。また、任意形状の斜面に適用可能な岩石接触判定法と岩石位置判定法を確立すると同時に、斜面衝突による並進運動や回転運動の変化に関する構成式を明らかにしている。

第 5 章では、前章で提案した数値シミュレーションモデルを、形状の異なる岩石の理想的な直線型斜面での落下へ適用し、逆解析から接触岩盤斜面の剛性定数、粘性低減係数および摩擦係数を推定している。また、岩石形状の違いにより落石運動に差異があることを示し、さらに 2 次元数値シミュレーションモデルでは得られない走向方向での落石軌跡の拡がりには及ぼす岩石形状の影響についても述べている。

第 6 章では、斜面性状が落石の運動に及ぼす影響を数値シミュレーションモデルを用いて検討している。斜面は、実際の斜面を測距儀で測定した 3 次元座標を有する三角形要素の集合体としてモデル化し、さらにモデル斜面を構成する各三角形要素の頂点座標に乱数を加えて岩盤斜面の微細な凹凸を表現している。数値シミュレーションを行った結果、斜面の凹凸を大きくすると、落下軌跡の曲折が大きくなり、斜面の途中で停止する割合が増加することを明らかにしている。さらに、斜面の凹凸を大きくすると、走向方向に対する落石軌跡が拡がり、防護すべき範囲が大きくなると述べている。

第 7 章では、落石源、落石停止位置の座標がわかっている実際の落石事例を用いて、本研究で提案した落石運動の 3 次元数値シミュレーションモデルの妥当性について検証を行っている。初期の解析条件として、既知の採石場斜面の値を用いて解析を行い、実際の落石状況との差異を調べ、次に落石事例の斜面の地質条件や植生条件を考慮して岩盤斜面の剛性定数、粘性低減係数および摩擦係数の修正を行い、実落石事例で発生した落石の到達距離、走向方向への拡がり分布等をほぼ再現できることを明らかにしている。このことは、岩盤斜面での 2~3 例の落石挙動があれば本研究で提案した 3 次元数値シミュレーションモデルの当該斜面の解析パラメータの値を同定できることを示すとともに、様々な地質条件や植生条件での解析パラメータを蓄積することにより、落石事例や現場実験がなくとも岩盤斜面の特性を推定できる可能性を示唆しており、実用上重要な知見である。

第 8 章は、本論文の結論であり、得られた知見を要約した上で、今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は、個別要素法を用いて岩石の形状を考慮した落石運動に関する 3 次元数値シミュレーションモデルを新しく開発し、その妥当性を実現場での落石挙動や落石事例から検証したものであり、岩盤工学および防災工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。