

氏名	たにぐち ようじ 谷口 洋二
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第162号
学位授与年月日	平成16年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	個別要素法による3次元落石運動解析と適用に関する研究
学位論文審査委員	(主査) 木山 英郎 (副査) 上田 茂 井上 正一 西村 強

学位論文の内容の要旨

本研究は、もっとも身近で難しい防災技術の一つである落石対策技術を取り上げ、より効率的、効果的な対策工が計画できるよう対策工の位置やその規模を予測する方法を確立することを目標とする。その内容は、通常用いられる設計手法では限界のある地形や斜面性状の複雑な変化や落石形状などの要因を考慮できる数値解析手法を開発し、落石対策工の設計に必要な情報を客観的に得ようとするものである。

落石対策を講じる上で、もっとも基本的なことは、対策計画箇所にとどのぐらいの落石エネルギーが生じるかを見積もることである。また、平面的にとどの位置に対策を講ずるかを決めなければならない。しかしながら、落石源は比較的容易に特定できるが、そこからの落石軌跡とエネルギーを推定するのは非常に難しい。従来は、これを現場実験からの経験則を用いて推定してきたが、本研究では数値解析手法(個別要素法DEM)を用いて個々の現場において最も合理的な対策工が計画できるような方策を提示することを目的とする。

第1章では、本研究の背景と意義について述べる。

第2章では、落石の定義と落石発生の素因についてまとめ、落石の危険度評価のための調査手法を述べている。加えて、鳥取県内の地形地質と落石の関連について考察し、落石発生源の調査解析例を紹介している。鳥取県の地質的特性からみると、県下には落石危険地域と考えられる地質が広く分布しており、実際にそれぞれの地質分布地域において特徴的な落石が発生している。地形的特性からみると、落石の多くは地形の遷急点(浸食前線)において発生している。また、落石発生危険箇所の新しい調査手法としてボアホールカメラや熱赤外線影像法の適用例を示している。

第3章では、落石の運動形態と現行の防護工設計に関連する因子の導出について述べ、さらに、既往の落石実験結果を示し、現状の防護工の設計手法との問題点について記述している。現行の落石対策設は実斜面を単純化した上で、既往の落石実験結果をもとに導かれた経験則を用いて行われている。しかしながら、既往の落石実験においても落石エネルギーや落石高さ等の評価において、必ずしも同一な結果が得られていないこと、斜面性状や地形の変化に対しては適用できないなどの問題点がある

ことを示している。

第4章では、第3章で述べた問題点に対する一方策として、本研究で開発した個別要素法による3次元落石シミュレーションの開発とその適用について述べている。

個別要素法（DEM）は、落石を形状のある物体として、飛行、衝突、すべり、ころがりなどのすべての運動形態を表現できることから、より現実に近いシミュレーションが可能である。したがって、DEMのシミュレーションによれば、従来の方法では取り扱うことのできなかった、落石の挙動や運動エネルギーの変化などを明らかにすることができ、落石対策検討上必要な情報が得られると考える。個別要素法ではダッシュポットの粘性減衰係数が重要なパラメータとなるが、これを反発係数というわかり易い概念を用いて決定できることを室内実験によって検証している。この落石シミュレーションを用いて単純斜面モデルでの2次元解析を行い、落石運動の特性や現行の設計手法との相違などについて考察している。さらに、種々の解析定数（粘性減衰係数、摩擦係数など）にモンテカルロ法を用いてばらつきを与えることにより自然斜面の不均質さを表現できることを示し、その解析例を示している。

第5章では、第4章に述べた解析手法を実際の落石現場に適用した事例とその検討結果を述べている。ここでは、谷地形および尾根地形を選び、落石の軌跡や到達域、運動エネルギー、跳躍高さ等を照査している。谷地形と尾根地形の落石軌跡を比較すると、谷地形では軌跡は谷の中央に向かって推移していくが、尾根地形の場合は、軌跡の初期段階での変化が大きく、それに伴って落石の最終到達位置の範囲も広がっている。したがって、尾根地形の場合は、シミュレーション解析を用いなければ、これらの位置を予測することは難しいといえる。また、落石軌跡の変化する位置や地形形状の変化によって、落石エネルギーが低下する箇所が確認された。このような箇所において落石対策工設置すれば、経済的な対策が可能となると考える。

第6章では、第2章から第5章に述べる内容を総括して本論文の結論とする。すなわち、本研究で開発した3次元落石シミュレーションの実用性としては、落石による危険範囲を特定することが困難な場合、落石対策に要する費用が膨大になると予想され、できるだけ効果的・経済的な対策を検討する必要がある場合、などに対し効果的だと考えられる。将来的には通常の落石対策の設計にも用いられるべきで、そのためには、必要な定数の設定方法、特に過去の落石履歴を考慮した試行計算による定数の設定方法や現地での反発係数を測定する簡易な調査方法の開発、そして、なによりも実際の落石現場での解析事例を積み重ねていき、普遍的な解析手順や落石運動の法則性を見出していく必要があると考えている。

論文審査の結果の要旨

道路防災において最も馴染み深くて難解なのが落石防護工である。肝心の的を外されることも度々である。できることなら現行設計法の不備を根本的に質し、より効率的、効果的な対策工が施せるよう、設計手法の再構築が望まれている。そこで著者は、まず基本となる鳥取県内の地形・地質による発生源の特定について論じ、県内には落石危険地質と考えられる数種の特定地質が広く分布しており、それぞれの地質に特徴的な落石形態があることを調査事例によって示した。さらに地形分析によって発生源の多くが斜面の遷急点にあることも明らかにした。ついで現行の防護工設計法が、単純化した落石実験と簡単な質点力学をもとにした経験則に準拠している点に種々の問題のあることを論じ、中

でも基礎となる落石実験において既に、落石エネルギーや落石高さなど設計要件の評価で実施機関3者に大きな差異を生じており、設計法の一致が到底望めないこと、また現行手法の枠組みでは斜面性状や地形の変化の考慮等、落石の動力学面の拡張性に乏しいことなどを指摘した。

そこで地形や斜面性状の複雑な変化や落石形状などの要因を直接考慮できる落石解析用の3次元個別要素法(3D-DEM)を開発し、落石軌跡と軌跡上の各地点での運動エネルギーを解析し、防護工をどの位置に、どのくらいの跳躍高さと衝撃エネルギーで設計するかを解析的に決定する手法の確立を目指している。開発された3次元個別要素法プログラムは、まず、2次元の単純斜面モデルを用いて室内試験結果と比較検証するとともに、落石運動の動力学的特性や現行の設計手法との相違など基礎的な知見を明らかにした。ついで、簡単な3次元斜面モデルを用い、落石と斜面要素の接触時の減衰係数と摩擦係数を確率変数として分布を定義し、衝突ごとにその分布にしたがってモンテカルロ法で両係数にばらつきを発生させる本プログラムが、実斜面の自然な不均質さを十分に表現できることを解析例で実証した。

最後に、この3次元解析プログラムを用い、実際の落石現場の代表的な谷地形と尾根地形について、落石の軌跡や到達域、運動エネルギー、跳躍高さ等を解析した結果を現場状況と比較検討している。谷地形では軌跡は谷の中央に向かって推移していくが、尾根地形の場合は、軌跡の初期段階での変化が大きく、それに伴って落石の最終到達位置の範囲も広がって、本解析を用いなければこれらを予測することは難しいこと、また、解析結果から、地形の変化によって落石軌跡の急変する位置や落石エネルギーが低下する箇所が確認され、効果的、経済的な防護工の設置個所の選定に資するであろうことなど、本解析法とそれを基にした防護工設計法の実用的な適用性が極めて高いことを結論付けている。

以上のように、これまで経験則に頼って問題の多かった落石防護工の設計に、最新の形の3次元個別要素法を取り入れて、実際の落石挙動を考慮した形の解析的設計手法を導入する道筋を開いたものと認め、この分野の今後の発展に大いに寄与する成果として博士(工学)の学位論文に値すると判定する。