

機関番号：15101

研究種目：基盤研究 (c)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560462

研究課題名 (和文) 破碎を考慮した落石運動の物理モデル化と落石遭遇リスク評価手法の開発研究

研究課題名 (英文) Development in numerical modeling and evaluation of hazard for slope deformation and failure

研究代表者

西村 強 (NISHIMURA TSUYOSHI)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90189308

研究成果の概要 (和文)：

斜面防災に関連する問題に対して、まず、落石問題に対して、新たな数値解析手法の開発と、それによる軌跡解析結果を利用した被害想定シナリオの構築を実施した。すべり崩壊に対して、積層体を用いて進行性破壊のモデル化と重力増加手順を用いた実斜面を意識した応力レベルにおける解析を可能とする手法を提案した。本研究の成果を列記してまとめとする。

(1) 被害想定シナリオに基づく道路通行車両の落石遭遇確率の算定手順

接触モデルにバネ・ダッシュポット・スライダ系を用いて3次元落石軌跡解析法を開発した。接触モデルの係数決定について、運動方程式の解に基づきダッシュポットの減衰係数を法線方向速度比および接線方向速度比の関係式を誘導した。接触中の接線方向の運動を(1)stick, (2)full slipそして(3)partial slipを定義して、模型実験における入射角度と接線方向速度比の関係を解析により再現した。この解析プログラムに対する入力値の軌跡の広がりに対する影響を定量的に評価した上で、道路通行車両の落石遭遇確率を算定する手法を開発した。

(2) 斜面の進行性破壊のモデル化と崩壊域の推定

要素間結合モデルを用いた個別要素解析における入力パラメーターと積層体特性の評価を実施した。ついで、重力加速度増加手順により解析に用いた積層体内に実斜面を意識した応力レベルにおける解析を可能とする手法を提案した。解析が与える換算限界高さは非円弧すべりを取り扱う一般化された極限平衡解析と比較したところ斜面傾斜角 80° でよい一致を示し、また、 60° では個別要素解析結果が低いものとなった。進行性破壊をよく表現している結果であるとした。

研究成果の概要 (英文)： Rockfall and slope failure pose serious hazards to roads and facilities in regional areas. The aim of this study is to build a procedure to evaluate the zone at risk using numerical simulation. This paper reports numerical procedures for (1) rockfall and (2) progressive failure in slope.

(1) This study has adopted a spring-dashpot-slider system to model the bouncing phenomenon, occurring when boulders impact on the slope. The normal and tangential components (R_{en} , R_{et}) of restitution coefficient are expressed using the micro-properties (k_n , k_t , η_n , η_t) of the system and the kinetic conditions. A small-scale free-fall-rebound test using a sphere boulder in laboratory was conducted. The results show that R_{et} increase with the increase of the incoming angle and the newly developed program can capture the increase of R_{et} . Parametric simulations have been performed at different spatial resolutions using sets of synthetic biplanar slopes characterized by mean inclination and local asperities. The influence of controlling factors on the dispersion of rockfall trajectory has been evaluated by conducting 3D simulation. Finally, a rockfall encounter analysis is proposed using the numerical method developed in this study.

(2) A numerical modeling of progressive failure in slope using the distinct element analysis has been developed. The numerical modeling consists of two stages. The first is to get the mechanical properties of synthetic specimens composed of circular rigid elements with the bonded effect between elements. The second is to analyze deformation of a reduced-scale rock slope under the gravity increased condition. With the calibrated properties of the synthetic specimen being unchanged, evolution of displacements and the resulting initiation of failure surface in the slope model are displayed. The modeling can give a possible failure volume of rock slope based on the geometrical data and strength properties, such as cohesion and internal friction angle.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：落石，3次元軌跡解析，反発係数，減衰定数，個別要素法，進行性破壊，重力加速増加手順

1. 研究開始当初の背景

国土の70%が山地や丘陵地であるわが国では，住宅地に急傾斜地が迫り，主要道路が山間部を縫うように走っている．脆い地盤が広く分布しているため，降雨や地震等により斜面崩壊，土石流や落石などが発生し，災害に至る例が毎年のように発生している．

まず，落石についてみれば以下のようなのである．落石は，何の前触れもなく突如として発生し，通行車両に当たるなど重大な事故に繋がるケースもある．落石の危険箇所は，全国に約77000箇所あり，未だに，年間4,000件程度発生しているとされる．さらに，地震時には，危険指定箇所以外においても岩塊の落下が懸念される．落石対策の要・不要の判断に際しては，調査結果に基づく従来の経験的手法に代わり，力学解析法を導入して，到達域の推定と被災危険度評価を合理的に進める必要がある．斜面崩壊についても，安全率の表示のみならず，崩壊形態および崩土の到達域の推定ができる手法の開発が必要である．

2. 研究の目的

斜面防災に関する前章の背景に基づき，新たな数値解析手法の開発とそれを利用した被害想定シナリオの構築が目的である．数値解析手法の開発においては，落石の到達域と力学的指標に基づく危険度評価を可能にすること，そして，斜面の進行性破壊のモデル化と崩壊土量の推定の2点を念頭に研究を進めた．本研究の目的および内容を列記する．

I. 被害想定シナリオに基づく道路通行車両の落石遭遇確率の算定手順

(1)3次元落石軌跡解析法の接触モデルの入力パラメーター決定法の開発

(2)室内模型実験による入力パラメーター決定法の評価

(3)斜面表面の微地形と平均勾配が落石の運動に与える影響の定量的解析

(4)道路通行車両の落石遭遇確率の算定手順

II. 斜面の進行性破壊のモデル化と崩壊域の推定

(1)要素間結合モデルを用いた個別要素解析における入力パラメーターと積層体特性の評価

(2)重力増加手順を用いた斜面の進行性破壊解析手順の開発

3. 研究の方法

本研究は，質点と剛体力学に基づく接触モデルの開発と模型実験の実施を主たる方法として研究を実施した．2008年度において3次元数値解析法の開発（要素破碎モデルを含む），2009年度に室内模型実験と落石危険度指標を用いたハザードマップの作成法，そして，最終年度にあたる2010年度において，落石ハザード領域内における財産（道路通行車両）の存在確率を考慮した落石遭遇確率算定手順の開発を実施した．

2008年度

(1) 3次元落石運動解析法の開発

剛体および質点の力学に基づき3次元落石運動解析手法を開発する．地形の表現には，3角形メッシュを利用した3次元地形モデルを用いる．開発項目は以下のとおりである．

・3次元剛体系解析手法の開発

オイラーの式による剛体の空間回転運動の表現と3次元空間内の剛体要素と地表面の接触判定法の開発する．

・3次元質点系解析手法の開発

3次元運動モデルでは、地表面との接触判定などに演算に多大の時間を有する可能性がある。不確実要因を考慮してMonte Carlo法を導入する。

(2) 入力パラメータの決定法とパラメータが解析結果に与える影響の評価

・地盤物性を合理的に評価するパラメータの決定法

落石と地表面の衝突に伴う運動エネルギーの損失を、本法では粘性ダッシュポットにより表現する。この粘性ダッシュポットの粘性係数の実用的決定法として、質点の減衰振動を表す運動方程式より反発係数-粘性係数関係式を誘導する。

・斜面表面の微小地形と平均勾配が落石の運動に与える影響の定量的解析

地表面の微視的变化は落石の軌跡に大きな影響を与える。表面粗さを有する模型斜面を用いて、軌跡の横方向の拡がりの程度を表す指標 W/L と斜面の条件（平均傾斜角 β 、表面粗さ σ ）の関係を明らかにする。また、従来、質量の大きいもの落下距離が大きいとされてきたが、質点系解析結果との比較を実施して、要素形状の軌跡への影響について考察する。

(3) 破碎を表現する要素の開発

多角形剛体要素とそれと同質量となる円要素結合体(3次元の場合は球)を用いて、衝突時に多角形要素の仮想破断面上に生じる力を円要素間の接触力で表現する。接触力と結合強度の大小により要素分離を計算する。これは、落石岩塊が、(地面との)衝突により破碎することや応力集中による進行性破壊を表現する物理モデルを開発するためである。

2009年度

(4) 高速ビデオカメラを用いた室内落石模型実験

落石模型を作成して重力場における落下衝突実験を実施する。

実験試料：アルミニウム（形状は、球）

データ取得：軌跡は、高速ビデオカメラによる撮影と動画処理により求める。高速ビデオカメラは鳥取大学VBLに設置の装置を利用する。

(5) 落下衝突解析と実験結果の比較

4. で取得する軌跡より、法線方向速度比（反発係数）、接線方向速度比および入射角と反射角を測定する。取得した軌跡を1. で開発する解析プログラムにより再現する。係数の決定には2. の決定法を用いる

2010年度

(6) 3次元落石運動解析法の援用を受けた道路通行車両の落石遭遇確率算定法の開発

現地地形と落石岩塊が把握できれば、力学

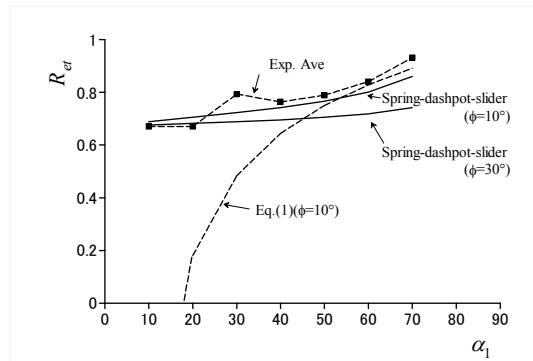


図-1 入射角 α_1 に対する R_{et} の変化

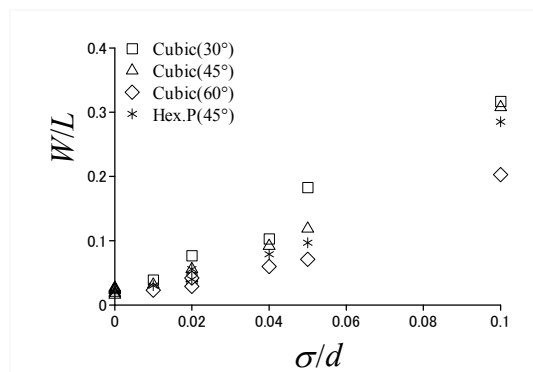


図-2 微地形と軌跡の拡がり

的根拠に基づいた落石ハザード評価指標の選定とその発生確率の算出が可能なシステムの開発を行う。

(7) 重力増加手順を用いた進行性破壊の表現

3.で開発する結合要素を用いた斜面モデルに作用する重力加速度を増加させて、応力集中に起因する局所的破壊が逐次伝播することによる崩壊解析手順を構築する。

4. 研究成果

斜面防災に関連する問題に対して、まず、落石問題に対して、新たな数値解析手法の開発と、それによる軌跡解析結果を利用した被害想定シナリオの構築を実施した。すべり崩壊に対して、積層体を用いた進行性破壊のモデル化と重力増加手順を用いた実斜面を意識した応力レベルにおける解析を可能とする手法を提案した。本研究の成果を列記してまとめとする。

I. 被害想定シナリオに基づく道路通行車両の落石遭遇確率の算定手順

(1)3次元落石軌跡解析法の接触モデルの入力パラメータ決定法

一自由度質点系の運動方程式の解に基づきダッシュポットの減衰係数を法線方向速度比

および接線方向速度比の関係式を誘導した。接触中の接線方向の運動を(1)stick, (2)full slipそして(3)partial slipを定義して、模型実験における入射角度と接線方向速度比の関係を解析により再現した。以下にstickおよびfull slipに対する誘導式を記載する。

$$R_{et} = 1 - \mu(1 + R_{en})\cot\alpha_1 \quad \text{式(1)}$$

$$R_{et} = R_{en} \exp\left(\frac{\zeta_t}{\zeta_n} \sqrt{\frac{k_t}{k_n}}\right) \left(\cos \frac{\omega_{dt}}{\omega_{dn}} \pi - \frac{\beta_t}{\omega_{dt}} \sin \frac{\omega_{dt}}{\omega_{dn}} \pi \right) \quad \text{式(2)}$$

(2)室内模型実験による入力パラメーター決定法の評価

実験結果と解析結果の比較を図-1に示す。横軸は入射角、縦軸は接線方向速度比である。開発した解析プログラムおよび前記(1)の式の導入により実験結果は十分に再現され、解析プログラムの実用性は確認できた。

(3)斜面表面の微地形と平均勾配が落石の運動に与える影響の定量的解析

定量的解析結果を、横軸に斜面の微地形の条件を表す指標 σ/d 、縦軸に軌跡の拡がりの程度

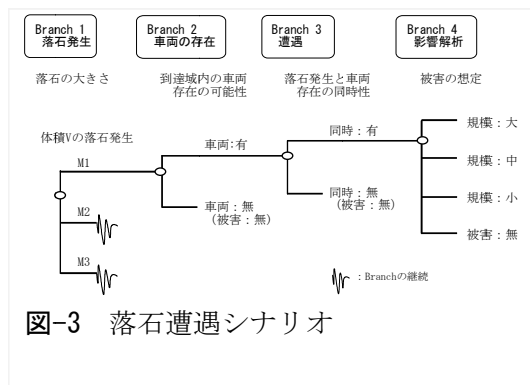


図-3 落石遭遇シナリオ

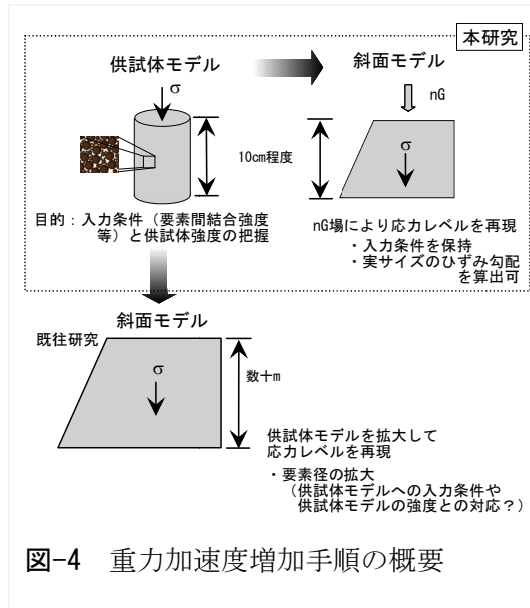


図-4 重力加速度増加手順の概要

を表す指標 W/L をとり図-2に示す。この結果より、微地形把握の重要性を指摘した。

(4)道路通行車両の落石遭遇確率の算定手順

図-3に落石遭遇確率算定手順を示す。複数地点の遭遇危険度の把握には有効な手法である。

2. 斜面の進行性破壊のモデル化と崩壊域の推定

(1) 要素間結合モデルを用いた個別要素解析における入力パラメーターと積層体特性の評価

積層体の力学特性の把握とその特性の斜面モデルへの反映を可能にする解析手順として図-4の手順を考案した。

(2) 斜面の進行性破壊のモデル化と崩壊域の推定

重力増加手順により解析に用いた積層体内に実斜面を意識した応力レベルにおける解析を可能とする手法を提案した。解析が与える換算限界高さは非円弧すべりを取り扱う一般化された極限平衡解析と比較したところ斜面傾斜角 80° でよい一致を示し、また、 60° では個別要素解析結果が低いものとなつ

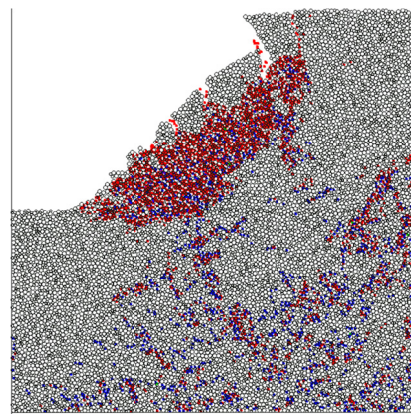


図-5 重力加速度増加手順による斜面の崩壊解析

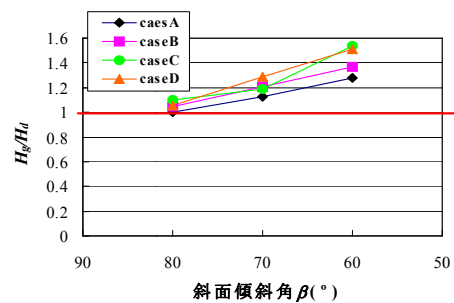


図-6 個別要素法と極限平衡解析の比較

た。進行性破壊をよく表現している結果であるとした。一方、すべり面形状自体には、不整合な箇所も見られるので、今後の研究課題とした。図-5に解析結果の一例を、図-6に極限平衡解析との比較を示す。

以上2項目に対する主要な成果により、落石に対しては、落下時の危険区域の設定と簡易遭遇確率の算出、斜面崩壊に対しては、崩壊危険部位の抽出と崩壊土量の算出に適用可能な解析技術が構築できたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文]

[学術誌] (査読有, 計4件)

- 1) Tsuyoshi NISHIMURA, Tsuyoshi FUKUDA and Kouji TSUJINO: Distinct Element Analysis for Progressive Failure in Rock Slope, Japanese Geotechnical Society (JGS), *Soils & Foundations*, Vol.50, No.4, pp.505-513, 2010.8.
- 2) 西村 強, 福田 毅, 木山 英郎: 斜面微地形が落石軌跡に与える影響に関する数値実験, 日本材料学会, 材料, 第59巻, 第3号, pp.199-204, 2010.3.
- 3) 辻野 考治, 西村 強, 福田 毅: 円形要素を用いた個別要素モデルの強度特性の解析と評価, 地盤工学会, 実務利用を目指すマイクロジオメカニクスに関するシンポジウム発表論文集, pp.47-52, 2008.11.
- 4) 西村 強, 福田 毅, 大野 紀之, 辻野 考治: 岩盤斜面の崩壊過程に関する個別要素法による数値解析, 岩の力学連合会, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.367-372, 2008.9.

[国際シンポジウム Proceedings] (計8件)

- 1) Tsuyoshi NISHIMURA: Modelling of Rockfall Impact Using Spring-Dashpot-Slider System. International Society for Rock Mechanics (ISRM), *Proceedings of the 12th Congress of Rock Mechanics*, Beijing, China, 2011.10. (in printing).
- 2) Tsuyoshi NISHIMURA, Kouji Tsujino and Tsuyoshi FUKUDA: Effects of Model Parameters in DEM on Slope Failure Simulation. International Society for Rock Mechanics (ISRM), *Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium 2010, Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, pp.551-554, 2010.6.
- 3) Tsuyoshi NISHIMURA: An Investigation of Numerical Damping for Modeling of Impact. Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore, SRMEG), *Proceedings of*

the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation "New Developments and Applications". pp.387-394, 2009.11.

- 4) Tsuyoshi NISHIMURA, Kouji Tsujino and Tsuyoshi FUKUDA: Distinct Element Analysis for Progressive Failure in Rock Slope. Japanese Geotechnical Society (JGS), *Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation*, pp.173-178, 2009.5.
- 5) Tsuyoshi NISHIMURA, Hideo KIYAMA and Tsuyoshi FUKUDA: Parametric Three-dimensional Simulations of Dispersion of Rockfall Trajectories. American Rock Mechanics Association (ARMA), *Proceedings of the 42nd US Rock Mechanics Symposium*, Paper No.99, CD-ROM, 2008.6.

[国内シンポジウム講演集] (計3件)

- 1) 平松 大周, 西村 強, 辻野 孝治: 個別要素法による岩盤斜面崩壊解析における入力値の影響に関する数値実験, 土木学会, 第40回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.305-310, 2011.1.
- 2) 西村 強: 質点系落石軌跡解析法における接線方向減衰定数の決定法, 土木学会, 第39回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.340-345, 2010.1.
- 3) 西村 強, 福田 毅, 辻野 考治: 岩盤斜面安定解析のための2次元個別要素モデル. 土木学会, 第38回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.7-12, 2009.1.

[その他国内学会学術講演集] (計4件)

- 1) 西村 強: バネ-ダッシュポット系を接触モデルとして用いるときの接線方向の減衰定数について, 土木学会, 第65回年次学術講演会概要集, pp.39-40, 2010.9.
- 2) 西村 強: 岩盤斜面崩壊の防災・減災・避災を目指して ~斜面ハザード評価からの研究アプローチ~, 土木学会, 第65回年次学術講演会研究討論会, 2010.9. および, 土木学会, 第40回岩盤力学シンポジウム講演集, 2011.1.
- 3) 平松大周, 辻野考治, 西村 強: 個別要素法による岩盤斜面崩壊解析における入力条件の影響に関する数値実験, 地盤工学会, 第45回地盤工学研究発表会, pp.467-468, 2010.8.
- 4) 大野紀之, 辻野 考治, 西村 強, 福田 毅: 要素結合モデルを導入した個別要素法による岩盤斜面の崩壊過程の解析, 地盤工学会, 第43回地盤工学研究発表会, pp.981-982, 2008.7.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：運動軌跡解析方法及び運動軌跡
解析装置

発明者：西村強

権利者：鳥取大学

種類：特許

番号：特願 2008-212978 号,
公開 2010-047970 号

出願年月日：平成 20 年 8 月 21 日

公開年月日：平成 22 年 3 月 4 日

国内外の別：日本（国内）

〔その他〕

ホームページ：

<http://www.cv.tottori-u.ac.jp/rock/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 強 (NISHIMURA TSUYOSHI)
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90189308

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし