

中～大規模斜面における効果的な落石対策について

On the effective rock fall countermeasure in the slope from the medium-scale to the large-scale

國眼 定 , 太田 英将 , 林 義隆 (有限会社太田ジオリサーチ)

Sadamu KOKUGAN , Hidemasa OHTA , Yoshitaka HAYASHI (Ohta-GeoResearch Co., Ltd.)

キーワード：落石シミュレーション, 三次元地形データ, 落石エネルギー, 減衰, 対策工
Keywords : Rockfall simulation, Three-dimensional topographic data, Rockfall energy, Attenuation, Countermeasure construction

1. はじめに

落石の対策工を検討する際の解析手法として、1996年の豊浜トンネルの岩盤崩落事故以来、シミュレーションによる数値解析が行われてきた。

一方では、数値解析を行う際の問題点として、解析に用いるアルゴリズムや解法の信頼性、地表形状の効果、対策工設計への影響などについて現在も多くの議論が交わされている¹⁾。

本編では、まず落石対策における解析手法の現状とその問題点などを整理した。そして斜面の三次元的な地形形状を把握しておくことの有用性を示し、事例として質点系の落石シミュレーションを実施した。

その結果、斜面の途中で落石エネルギーが減衰される区間が発生することがわかった。この減衰された地点に対策工を配置することにより、効果的な落石対策を行うことができたので報告する。

2. 落石対策における解析手法と適用について

落石対策において、外力などの諸量を求める場合に、主に使用されている解析手法に関して表-1のように整理した。

落石対策便覧の方法（残存係数と等価摩擦係数などによる評価）

質点系落石シミュレーション

非質点系落石シミュレーション

これらの手法の適用範囲としては、以下のよう整理される。

高さの低い斜面や、落石径の小さな場合には落石対策便覧による手法を、落石の形状効果を考慮しない（あるいは事前にわからない）場合には質点系の落石シミュレーションを、大規模岩盤崩落や形状効果を期待する場合などには非質点系の落石シミュレーションを使用することが望ましいと考えられる。

表-1 落石対策に関する解析手法の整理

解析手法	概要	使用頻度	問題点	適用範囲
落石対策便覧	既往の実験データなどから得られた経験則から落石速度、衝撃力、落石エネルギーなどを算出する手法である。	簡便であり、これまでほとんどこの手法が用いられてきた。	斜面の落下高さを最大40mとして計算することとなり、それ以上の高さの斜面には不適となる。	斜面規模の小さな場合や落石径の小さな場合に適用するには可能である。
質点系落石シミュレーション	落石を質点あるいは球などの剛体と仮定し、運動方程式を解く手法である。	ここ数年使用されてきているが、未だに落石対策便覧との比較や検証に用いられる程度である。市販ソフトも多く出てきた。	岩盤崩落などの落石の形状効果や相互衝突などの細部仕様を反映できない。	到達範囲や跳躍量、速度、エネルギーなどを質点として求める場合、形状効果をあまり期待しない場合に用いる。
非質点系落石シミュレーション	DDA	大規模岩盤崩落事故の再現や原因究明などに学術的な目的で用いられる。最近では市販ソフトも出てきた。	軟らかい斜面との衝突によるめりこみや塑性変形によるエネルギーロスを粘性でしか考慮できない	大規模岩盤崩落斜面。ダイナミックな落石シミュレーションに適する。
	DEM	任意形状のブロックのモデル化が可能であり、運動方程式は力の釣り合いで求め、差分法で解くため定式化が比較的簡単である。	地下空洞や岩盤崩落などではこれまでも実績があるが、落石対策ではあまりない。市販ソフトあり	形状効果を期待する場合に適する。岩盤斜面。大変形解析。

3 . 三次元地形形状を把握する必要性

落石の実際の現象は三次元的な移動を示すものである。このため、本来は落石の挙動を三次元的に把握することが望ましいが、シミュレーションをはじめとした落石の解析では自然条件が複雑であり、不確定要素が多いのが現状である。このため、落石の解析は二次元で行われていることが多い。

落石の挙動は特に地形要素（勾配、傾斜変化点など）に影響されやすいため、落石経路を事前に推定しておくことは重要である。

最近では地形情報を三次元的に把握することが容易になってきた。二次元断面で解析を行う場合、三次元地形を考慮した断面を用いると効果的である。特に凹凸のある大規模な斜面において落石の発生源が広く分布する場合などでは、地形解析により落石の経路を推定しておくことが望ましい。

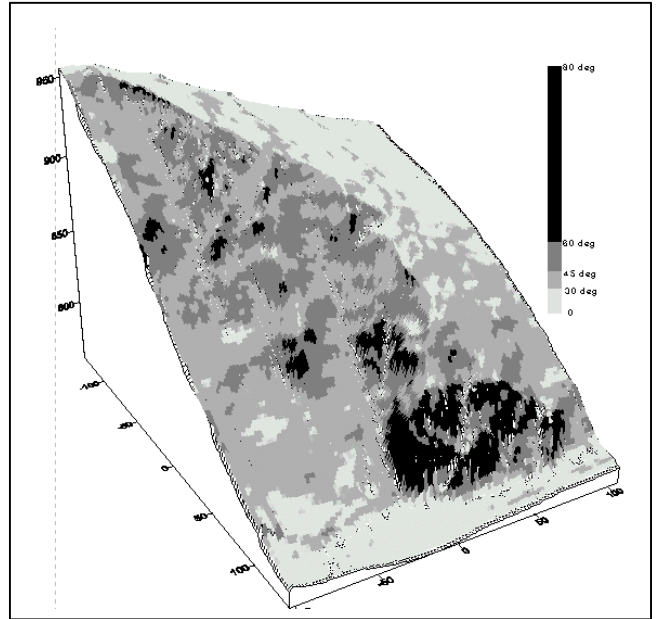


図-2 図-1の斜面の傾斜区分図

図-1に、ある落石対象地の写真鳥瞰図を示す。これは、三次元地形データの上に垂直な空

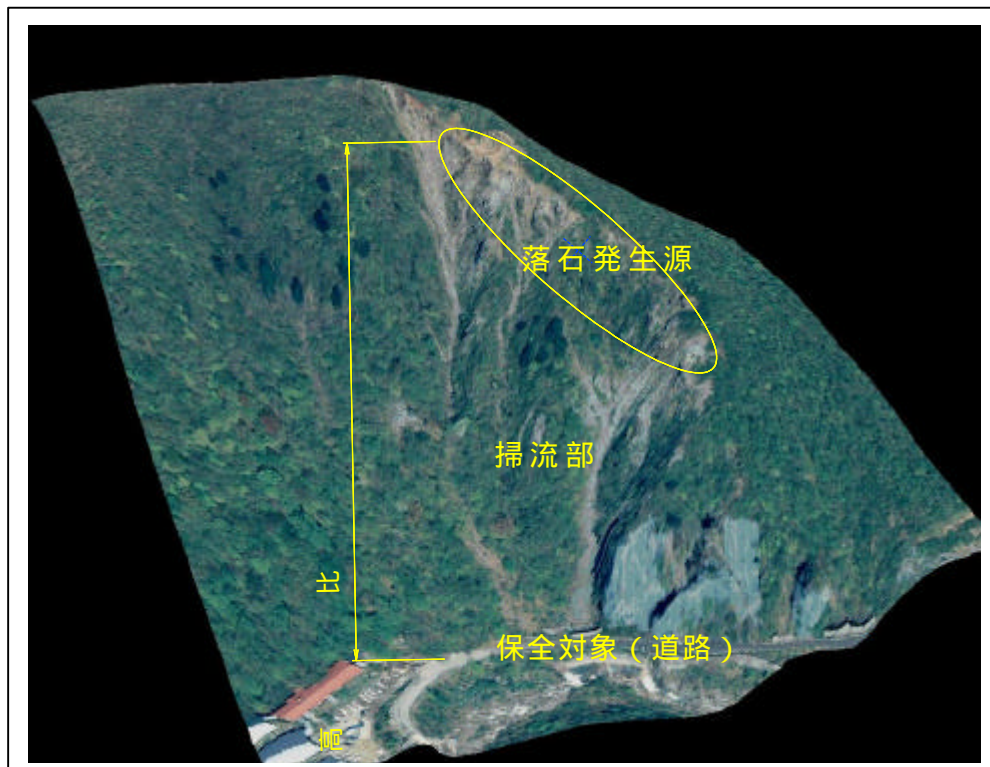


図-1 ある斜面における写真鳥瞰図

中写真を貼り付け、全体を歪ませてあたかも斜め上から眺めたようにしたものである。図-2はその斜面の傾斜区分図を示す。三次元地形データを得ることができれば、このように事前に地形の概略を把握することが容易となる。また落石の危険度に関するイメージを共有することも可能となる²⁾。

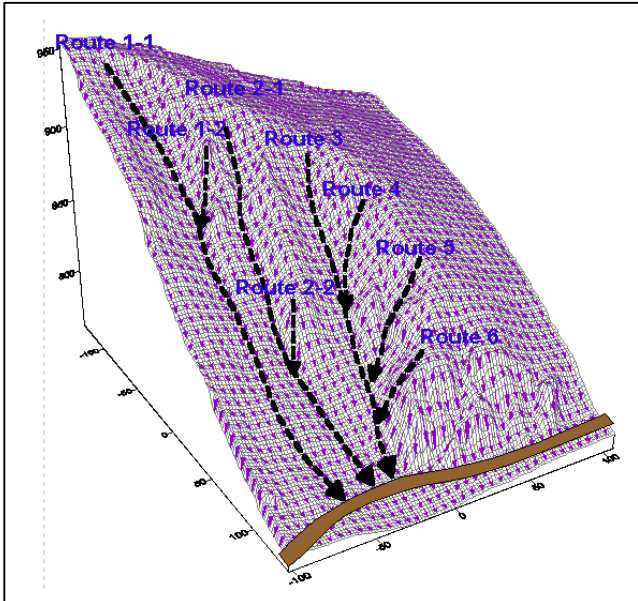


図-3 落石経路推定図

図-3には三次元地形データを元に細かなメッシュを作成して得られた落石経路推定図を示す。落石は原則として地形の最大傾斜方向に進むものと推定されるため、この段階で落石経路（解析断面形状）を設定することが可能となる。

4. 落石シミュレーションの実施

地形解析を行った図-1の斜面で落石シミュレーションを行った。解析手法は、斜面長が250mもあることと、散在する露岩や崖錐から発生する落石を対象とすることから、表-1に示される質点系の落石シミュレーションを行うものとした。落石経路を先に求めたため、この経路を検討断面とした二次元解析を行うものとした。

4.1 逆解析

質点系落石シミュレーションにおいて重要な数値は垂直反発係数（ R_n ）と接線反発係数（ R_t ）である。Stevensら³⁾は、実験結果より R_n を0.3~0.5の範囲、 R_t を0.8~0.95の範囲を一般値としている。これらは地目（植生、土質の硬軟、岩盤、人工構造物など）により変化するパラメータである。

上記の係数を設定するために逆解析を行った。逆解析を行うにあたり、当地でこれまでに発生した落石の大きさや落下地点、発生位置、既設

構造物の破損状況などをフィールドデータとした。当地で発生した落石（3個）の状況と対策工の破損状況などから算定した結果、以下の値が妥当であると判断した。

表-2 逆解析で設定した係数

垂直方向反発係数 (R_n)		接線方向反発係数 (R_t)		地目名
平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0.32	0.04	0.80	0.04	植生のある崖錐層 Talus with vegetation
0.32	0.04	0.82	0.04	崖錐層 Talus Cover
0.35	0.04	0.85	0.04	露出した基岩 Bedrock outcrops
0.40	0.04	0.90	0.04	アスファルト Asphalt

4.2 シミュレーション結果

逆解析により得られた諸数値を用い、図-3に示す各経路における落石シミュレーションを実施し、最大エネルギーや到達範囲、跳躍量を求めた。シミュレーションでは1経路につき200回の試行を行った。

落石エネルギーの解析平面図を図-4に示す。

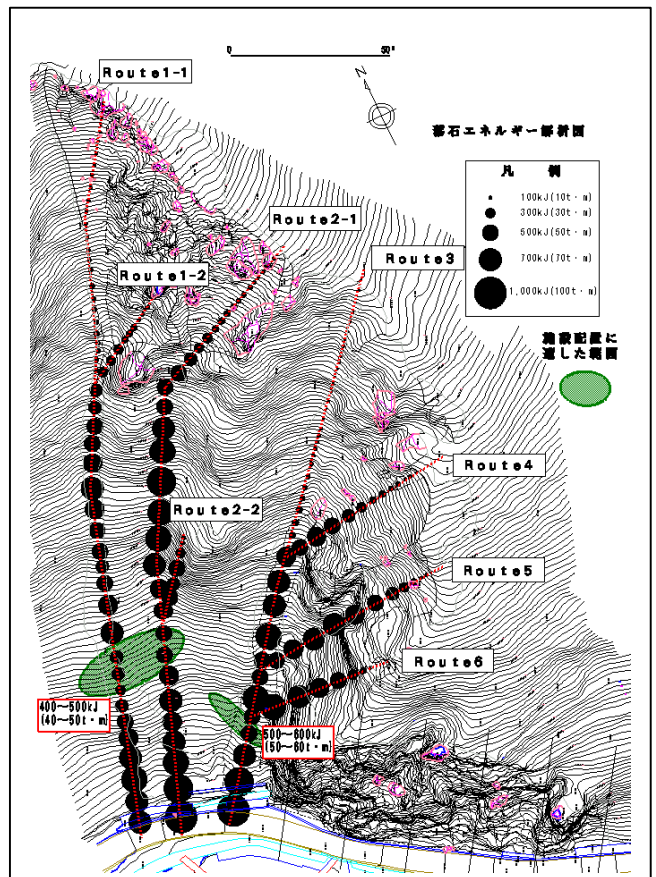


図-4 エネルギー解析平面図

図-4を見ると、道路(図面下部)付近が最もエネルギーが大きいことがわかる。また、ここで図中の楕円部では経路の上流部に比べ落石エネルギーが減衰されていることが判明した。これは楕円部の上流では地目の違いが見られる(上流部は岩盤、下流部は植生のある崖錐)ことと、地形の遷緩線(急 緩)であるためであると考えられる。

図-5には経路1-1(図-4の最も左側のルート)における解析断面図を示す。図中の丸部がエネルギー減衰の発生した地点である。

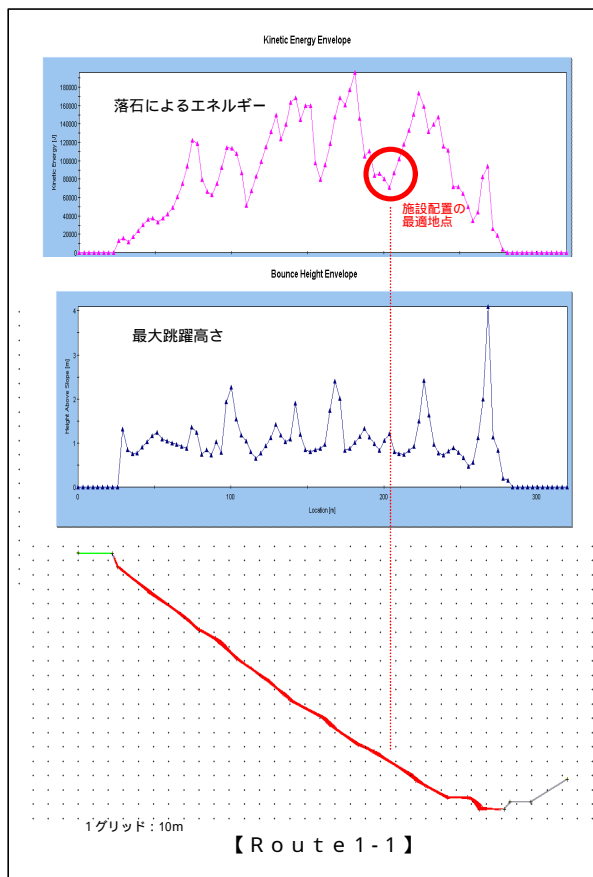


図-5 エネルギー解析断面図

5 . 施設配置における着目点

図-4 および図-5の解析図より、エネルギーが減衰した地点に対策工を配置することが効果的であると言える。

図-5の丸部における落石エネルギーは約500kJであるのに対し、道路際のそれは約1,000kJであり、エネルギー差は非常に大きなものであることがわかった。

このような傾向は落石経路が長く、その斜面の地形や地目などが経路中で変化する場合に見られる。

当地の保全対象は図-1に示す道路であるため、当初は道路際に落石防護施設を配置することを前提としていた。ところがシミュレーション結果により道路際には大きなエネルギーが発生することと、斜面下部の途中にエネルギー減衰地点が存在することが判明したため、図-6に示すように落石エネルギーの減衰地点にメインの対策工を配置し、道路際には比較的軽微な施設を配置して効果を上げることとした。

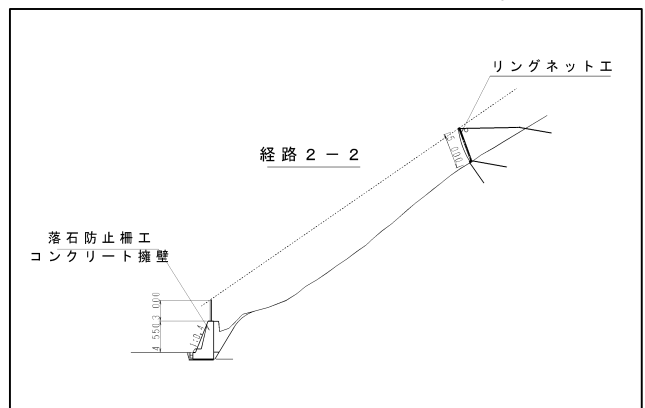


図-6 対策工計画断面図(斜面下部)

6 . 今後の展望

現在、多方面の学会や協会において、落石解析における解析手法や係数などの妥当性が活発に議論されている。今回の条件における検討結果を踏まえ、今後は多様な条件における解析手法の適用方法や、対策工の効果的な設計手法などについて確立していきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 例えば、右城猛(2001): 落石数値シミュレーションソフト DRSP、第36回地盤工学研究発表会技術展示資料
- 2) 國眼定、飯室明夫(2000): 地形地質解析などにおける写真鳥瞰図の活用、第39回地すべり学会研究発表会講演集
- 3) Stevens, Warren D., 1998. *RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls.*, University of Toronto