

I-17 2種類の点群データによる落石箇所の予測と予備設計への適用

Forecasts of falling rock spots, and application to preliminary design using two kinds of point clouds

宮下征士¹・小林一郎²・野間卓志³・山村洋平⁴

Masashi MIYASHITA, Ichiro KOBAYASHI, Takuji NOMA and Yohei YAMAMURA

抄録:急峻な山岳地帯における道路や鉄道は常に斜面災害の危険にさらされている。斜面災害のなかでも、落石問題に限っては、現状では定量的で統一された検討手法はなく、主に現場技術者による過去の経験や図面などの2次元情報に基づき、予測・対策がなされている。本研究では、2次元情報のみを用いた従来の手法とは異なり、LP、MMSの2種類の3次元点群データを併用した予測・解析手法を提案する。落石現象を3次元空間で取り扱うことにより、現実にもっとも近いシミュレーションが可能となった。また、同一の空間上で、地形解析、落石予測から対策工の予備設計までの過程を総合的に検討した。

Abstract:The road and the railway are always exposed to the danger of the slope disaster in precipitous mountains. There is no common method about the falling rock problem in the slope disaster under the present situation. The forecast and measures are mainly performed based on 2-D data in a past experience and the drawings, that depend on the site engineer. In this paper, it proposes the forecast and the method for analyzing that uses two kinds of 3-D point cloud data together. This proposal is different from a conventional method used only 3-D data. The management to the falling rock phenomenon by 3-D space enable us to simulate more realistic. Moreover, the process from the geographical features analysis and the falling rock forecast to the preliminary design of security fence was examined overall on the same space.

キーワード: 落石, 予測, 予備設計, 点群, 3次元

Key Words: falling rock, forecast, preliminary design, point cloud, 3-D

1. はじめに

道路における土砂災害には、崩壊、落石、地すべり、土砂流のようにさまざまな形態のものがある。なかでも落石についてはさまざまな発生原因が考えられ、いくつかの原因が重なって生じる場合が多く、発生の位置や規模を予測し難い。また、斜面を落下する落石の運動形態や衝突現象についても不明な点が多い。このため、落石対策工設計時の判断は、現場技術者の過去の経験によるところが大きくなっていると考えられる。

落石についての実験¹⁾や研究²⁾は多方面で行われているが、そのほとんどが2次元情報に基づくものであり、榎谷らの研究³⁾のように3次元で現象を取り扱っているものは稀である。そこで、本研究では点群データによって構成された3次元地形を利用して落石現象を再現し、解析を行うことで問題の解決を図る。なお、本研究を進める上で重要となる3次元データはLPデータ(Laser Profiler data)、

MMSデータ(Mobile Mapping System data)の2種類の点群データを使用する。

これまででも、LPデータを山地に適用した研究⁴⁾や、MMSデータを道路上の事象に利用した研究⁵⁾はなされてきた。しかし、この2種類の点群データを併用し、それぞれのデータの長所を生かした解析の利用例は筆者の知る限りにおいては見あたらない。本研究では、落石問題の調査から対策工設計までの過程を対象とし、地図や図面などの2次元情報を用いた従来法ではなく、2種類の3次元点群データを利用した予測・解析手法を提案する。

2. 落石問題が抱える課題と提案

(1) 課題

現在の落石対策では、対策工を設計する際に図面や航空写真などの2次元の資料が使われている。これらは、落石の位置や落下経路、岩の挙動を判断するために必

1 : 正会員 修士(工) (株)ウエスコ 地理情報事業部 情報システム課 課長代理
(Tel:086-254-2892, E-mail :m-miyashita@wesco.co.jp)

2 : 正会員 工博 熊本大学大学院 教授 自然科学研究科

(〒860-0855 熊本県熊本市黒髪2丁目39-1, Tel : 096-342-3531, E-mail : ponts@gpo.kumamoto-u.ac.jp)

3 : 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 博士後期 (Tel: 096-342-3531, E-mail : 099d9404@st.kumamoto-u.ac.jp)

4 : 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 博士前期 (Tel: 096-342-3531, E-mail : 107d8857@st.kumamoto-u.ac.jp)

要な3次元的情報を十分に持ち合わせていない。

また、落下経路の選定は手作業で行われており、等高線を利用した落下経路の予測は現場技術者の経験や判断によるところが大きい。落下経路の始点となる落石予備物質の位置も、現地踏査による調査結果を手作業で図面上に描画している場合が多く、その正確さは十分とは言えない。さらに、岩の挙動については力学的に解明されたものではなく、過去の経験やいくつかの実験結果などから得られた成果に基づいて想定されるものであるため、現状では現場ごとの条件に合った予測は非常に困難である。

(2) 提案

a) 3次元空間の利用

2次元図面を用いた人為的解析では、3次元の現象を十分に考慮することができず、そこから取得する情報も不確かなものとなる。

3次元空間上の地形では任意断面の取得や、曲線の長さ、物体の体積を算出することも容易であり、従来の人為的判断ではなく数値的判断を行うことが可能になる。そのため、3次元地形を用いて解析を行うことで、現在2次元で処理されている落石箇所予測の精度の向上と、それに直結する設計過程の効率化を図り、精度向上を促す。

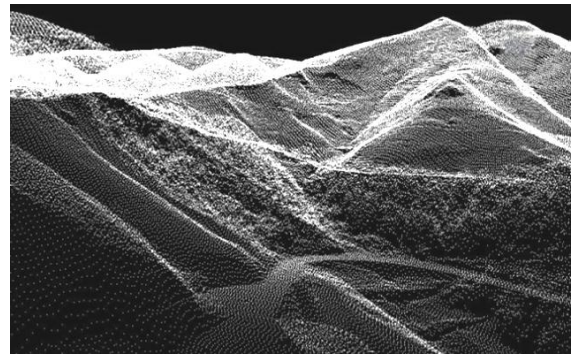
3次元地形の再現にはLP、MMSの2種類の点群データを用いる。図-1a)で示したLPデータは、上空からの測量によって対象地を面的にとらえ、広範囲の地形を再現可能である。また、図-1b)のMMSデータは、道路上から測量することによってLPデータだけでは再現できない道路周辺の立面の情報を持合わせている。さらに、図-1c)で示したように2つの点群データを同一の3次元空間上で組み合わせることで、予測に必要な対象地全体の地形と落石の設計にかかわる道路周辺施設の再現が可能である。予測と設計の双方に利用できる3次元情報を利用することで、現在別々に行われている現況把握や設計と予測を一体のものとして取り扱うことが可能になる。

b) 2種類の予測手法

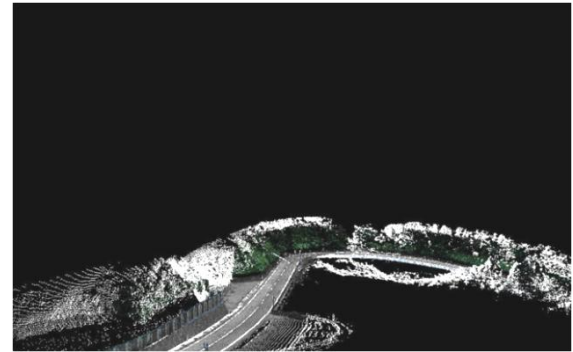
本研究では、対象地全体にわたり概略的な予測を行う全線予測と、個々の落石予備物質の挙動を把握するために用いる単体予測の2種類の予測方法を提案する(図-2)。それぞれの予測は3次元地形を用いて行われ、対策工の設計を補助する役割を担う。

全線予測を行うことによって、対象となる地域全体にかけて解析を行い、現地調査を行う前にあらかじめ危険箇所を特定する。その後、特定された箇所について詳細な調査を行う。そのため、危険と思われる区域以外の範囲における無駄な調査を省くことができる。

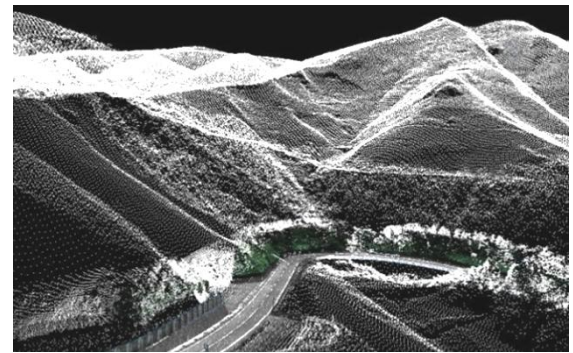
次に、絞り込んだ調査対象地において落石予備物質の位置などを調査する。その後、個々の落石予備物質に対する落石シミュレーションを行って落石の挙動を解析し、落下経路や運動の様子を把握する。この手法を単体予測とする。



a) LP データ



b) MMS データ



c) 併用データ

図-1 データの併用

c) 予備設計への適用

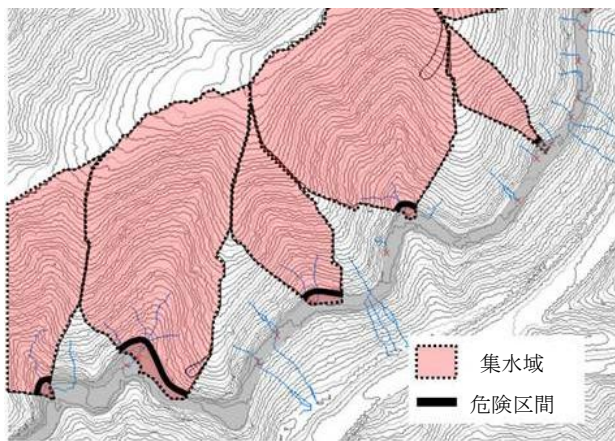
2種類の予測の結果、新規対策工の設置が必要であると判断された区間において、3次元空間上で取得可能な情報をもとに、以下に示す予備設計を行う。

対象地近傍では地形や、落石予備物質の性質が類似している。そのため、MMSデータを利用して危険区間の近傍にある既存対策工のデータを取得し、同じ仕様の対策工を想定し、オブジェクト化する。

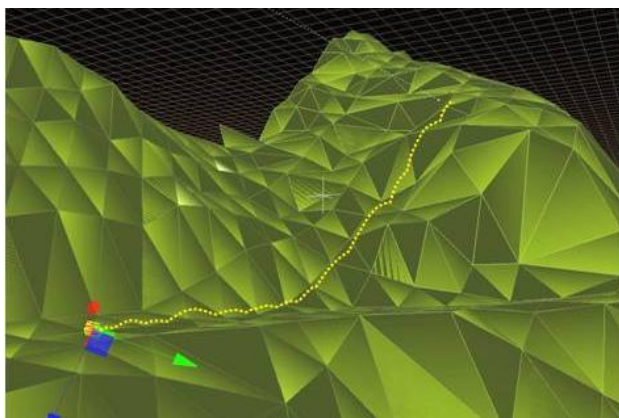
さらに、設計案を用いて3次元空間上の適した位置にオブジェクトを設置することによって単体予測を行う。これにより、設計案の検証もそれまでと同一の空間を利用して行うことが可能である。

その後、実設計を行う際にも必要な落下高さや斜面勾配などの情報を3次元空間上から取り出して利用する。

検証や設計の過程を繰り返し行うことで施工される対策工の安全性を高めていく。上記の流れを図-3で示した。



a)全線予測



b)単体予測

図-2 2種類の子測手法

3. 全線予測

本章では対象地全域を解析し、危険度の優劣をもとに詳細な調査を行うために対象区域を選定する。

ここでは跳躍や回転といった落石が示す特徴的な挙動を無視し、地質や植物による影響も受けないものとする。以上のような過程のもと、落石は水と同様の挙動を示すものとし、地形条件は凹凸のみを考慮する概略的予測を実施する。

(1) 詳細法

この手法には地形再現に適しているLPデータを用いる。LPデータからTINサーフェスを作成し、これを利用して解析を行う。

図-4は集水域を示しており、この領域に存在する水は、領域内の最低点へと落下していく。集水域は、TINサーフェス上に細かに形成される分水嶺により分割される。分水嶺は図-5に示すようなTINサーフェスを構成する三角形ごとの勾配ベクトルを算出することで求める。図-4のように集水域が道路の一部を含む場合、下方にある道路沿線部には、それより上方に存在する水が集中して落下することとなる。

本章では落石が水と同様の挙動を示すと考えるため、

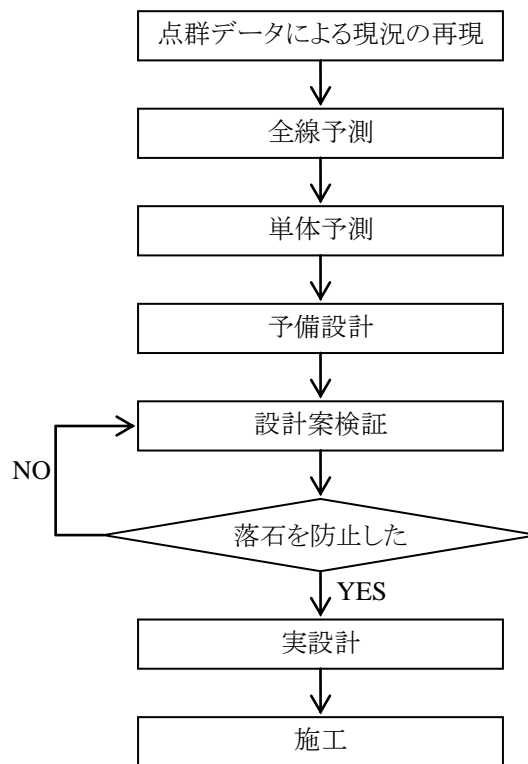


図-3 フロー図

道路沿線部の長さに対して集水域の面積が広がる箇所が危険箇所となる。この時、道路沿線部の危険箇所の長さを道路危険箇所延長とする。

図-6に示すように集水域面積を $A_i[m^2]$ 、道路危険箇所延長を $L_i[m]$ とすると、この比である集水面積延長比 $\rho_i[m^2/m]$ は下式となる。

$$\rho_i = A_i / L_i \quad \dots (1)$$

また、対象地ごとに危険度の基準値 α を設定する。基準値 α は、解析の結果による危険度の優劣やコストなどのさまざまな条件を考慮して設定することとする。

$$\rho_i > \alpha \quad \dots (2)$$

詳細法では、上式を満たす区間を危険箇所とする。しかし、この手法は対象地全域にわたって集水域を算出する必要があり、全線予測に必要な集水域全てを算出するには労力がかかると考えられる。

(2) 簡易法

図-7で示すように、3次元地形上の任意の点を始点として、最急勾配を辿って斜面を下る軌跡のことを流下経路とよぶ。

流下経路を一定の標高から等間隔で算出し、危険箇所を推定する。簡易法では、流下経路が収束する区間に落石が集中すると考えるため、この区間が危険区間となる。この区間を収束区間とし、ここに達する流下経路の密度を用いて危険箇所を推定する。

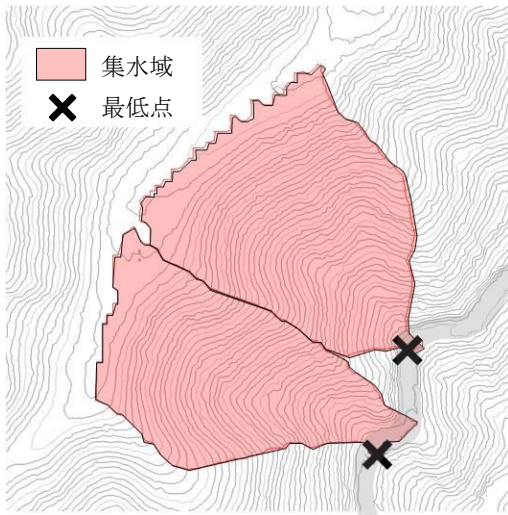


図-4 集水域

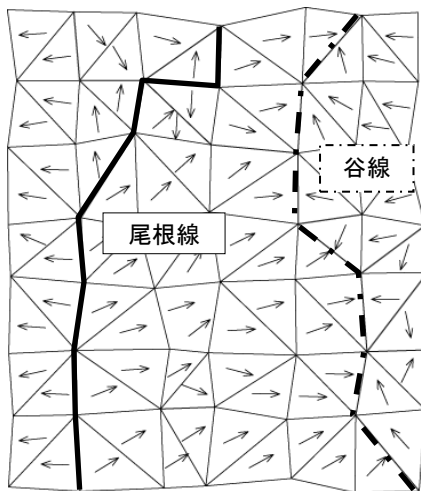


図-5⁴⁾ 勾配ベクトルの算出

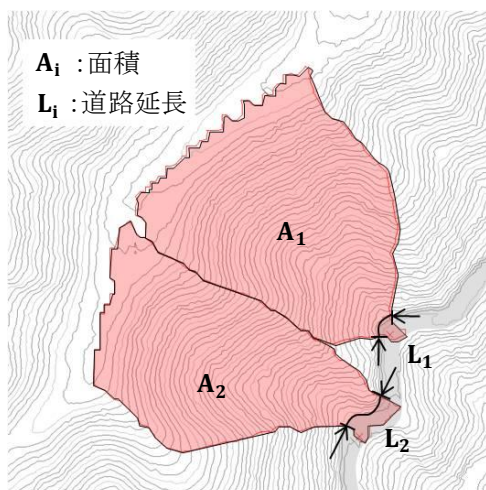


図-6 危険箇所の算出法(詳細法)

図-8 で示すように収束区間の長さを d_i [m], そこへ到達する流下経路の数は始点の数を用いて n_i [本]とし, 対象となる区域に到達する流下経路密度 γ_i [本/m]を,

$$\gamma_i = \frac{n_i}{d_i} \quad (\text{ただし, } d_i \neq 0) \dots (3)$$

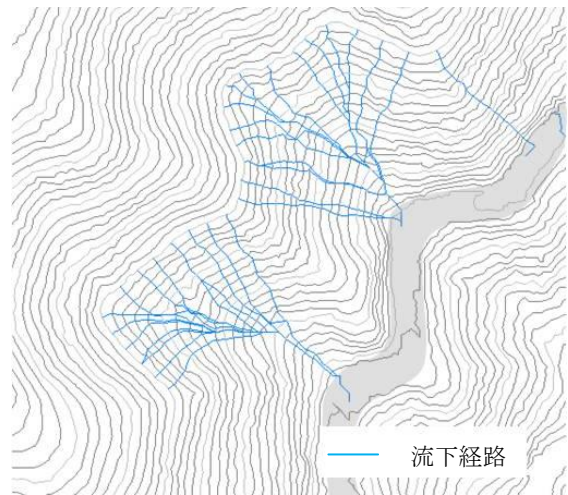


図-7 流下経路

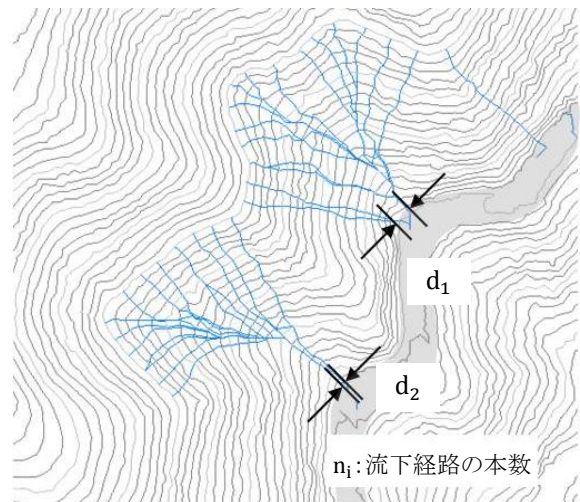


図-8 危険箇所の算出法(簡易法)

とする. また, 対象地ごとに危険度の基準値 β を設定する.

$$\gamma_i > \beta \quad \dots (4)$$

上式を満たす区間を危険箇所とする. β についても α と同様にして設定する.

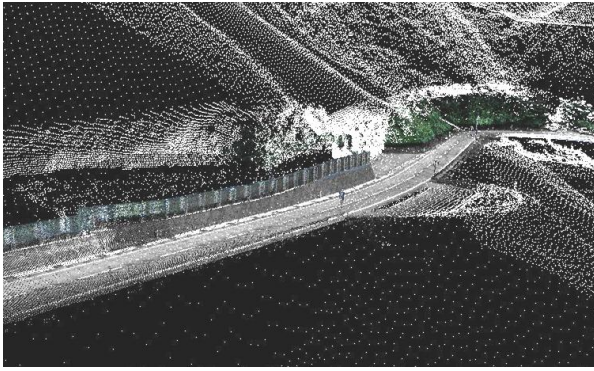
(3) 調査区域の決定

MMS データを用いることで図-9 のように対策工の有無を判断することができる. a)は既存の対策工が設置されている区間, b)は設置されていない区間である. また, a)の区間では, MMS データからその工種を確認することが可能である. 図-10 のようにして既存対策工の位置と, 算出した危険箇所の照査を行う. 表-1 は調査地の選定表であり, 本研究では既存の対策工が落石を抑制できることを前提としている. 安全性と既存対策工の有無を照査した結果が①で示すような箇所に対して現地調査を実施する.

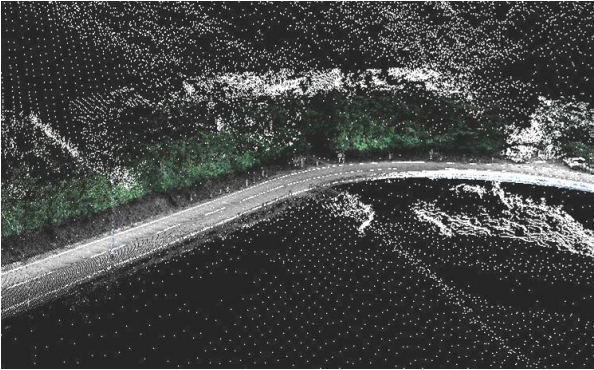
4. 単体予測

(1) 情報の取得

調査区間の対策工と, 対応する集水域内に点在している落石予備物質を調査する. 調査の方法としては以下の3つの方法が考えられる.



a)対策工あり



b)対策工なし

図-9 既存対策工の位置情報把握

i) LP データのみを用いた情報の取得

LP データが持つ位置情報は岩盤が露出している場合などの比較的大きい落石予備物質であれば確認することが可能である。

ii) 写真を用いた情報の取得

MMS データ計測の際に道路上から撮影される写真を用いることで、上空からの測量である LP データでは取得できない物陰にある落石予備物質を確認する。写真による落石予備物質の位置が把握可能であれば、LP データとの併用により落石予備物質を3次元空間上の適切な位置に配置することができる。

iii) 現地踏査

i), ii) の方法で現況の把握がかなわなかった場合、現地踏査を行う。これにより落石予備物質の位置や形、個数などの情報を取得する。

さらに、道路周辺施設に関しては MMS データを用い、並行してデータ取得を行う。このようにして得るべき情報は表-2 のとおりである。

(2) 落石シミュレーション

全線予測のみでは落石の挙動を把握することはできない。個々の落石ごとの挙動を知るために、3次元空間上で対象物が示す挙動の推定・解析を行うソフトウェアが必要である。本研究では、①TIN サーフェスを使用できること、②解析結果をCGソフトで可視化が可能であること、という要件を備えた Next Limit Technologies 社製の Real Flow4⁹を用いることとした。

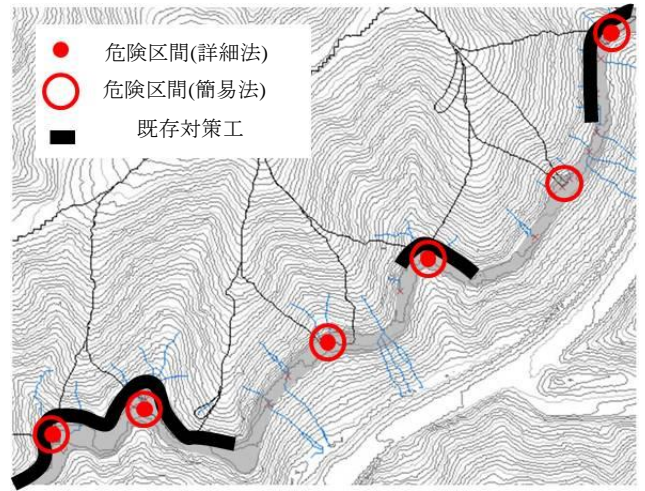


図-10 危険区間と既存対策工の照査

表-1 調査地の選定

対象区間	①	②	③	④
安全性	危険	危険	安全	安全
既存対策工	なし	あり	なし	あり
調査実施	あり	なし	なし	なし

表-2 情報の取得

対象物	取得すべき情報			
	大きさ	位置(数)	形状	質量
落石予備物質	大きさ	位置(数)	形状	質量
道路周辺施設	大きさ	位置	形状	

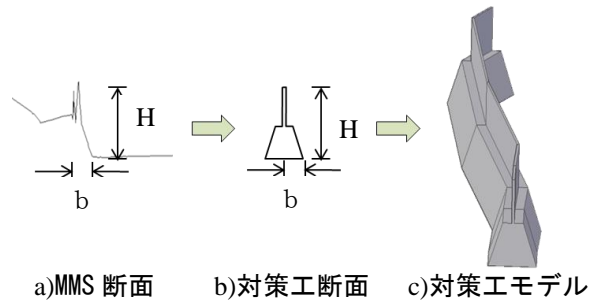


図-11 オブジェクト作成

図-11 は道路周辺施設のオブジェクト化の手順を示している。MMS データから施設の断面を取得し、断面から幅 b や高さ H を取得しオブジェクトを作成する。また、落石予備物質も取得した情報からオブジェクトを作成する。これらの作成したオブジェクトを3次元空間上の適切な位置に配置することで、現況を再現する。この空間を用いて、落石予備物質ごとにシミュレーションを行う。図-12 において落石のオブジェクトから出ている矢印はシミュレーション開始時の X,Y,Z 方向の各ベクトルを示しており、経時変化に伴う落石の回転を把握することができる。また、点線は落石の落下経路を示している。シミュレーションの結果、落石が道路部に達した区間を最終的な危険箇所(図-13)とし、予備設計へと移る。

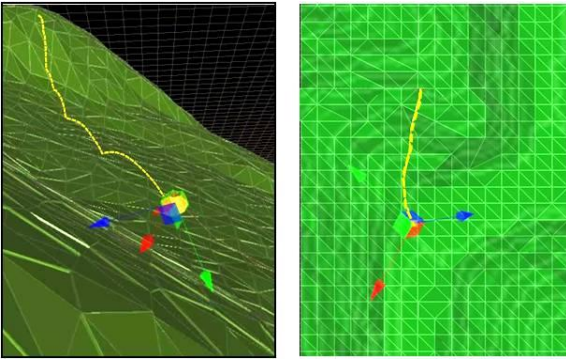


図-12 落石シミュレーション



図-13 最終危険箇所

5. 予備設計

落石が道路沿線に達した最終危険箇所を新規対策工設置の対象区間とする。この区間には予備設計として、MMS データを利用して近傍にある既存の対策工から断面を取得しオブジェクトを作成する。図-14 のように危険区間に予備設計で作成したオブジェクトを設置して再度単体予測を行う。これは予備設計案の設計検証となる。

予備設計で作成した対策工によって落石が防止された場合には、既存対策工の設計資料や MMS データから取得した情報をもとに対策工の実設計に移る。

予備設計で落石が防げなかった場合は落石の全運動エネルギーや落下速度等を求め、通常通り設計を行う⁸⁾。その時必要になる落石の落下高さや落下経路の勾配などの地形的特徴は、3次元空間から容易に取得可能であるためこれを利用する。

6. 適用事例—阿蘇（県道 23 号）

(1) 対象地の特徴

熊本県の県道 23 号は阿蘇外輪山を含む山地を縫うようにして通っており、道路沿いには落石対象物を含む急峻な斜面が続いている(図-15)。なかでも対象地付近では、落石予備物質が露出しており、樹木が存在しない範囲も存在している。落石対策工は予防工と防止工に分けられ、

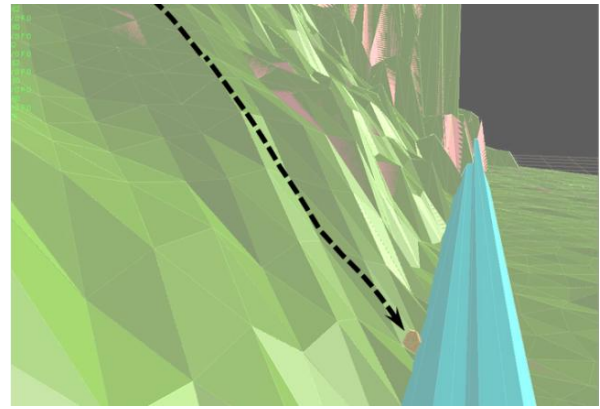


図-14 設計案の検証



図-15 対象地の様子

対象地の道路沿に設置する防止工について検討を行う。また、現地の斜面には 0.5m×0.5m のワイヤーロープ掛工が施されている。今回の事例は樹木の存在しない範囲において検討を行ったものである。

(2) 全線予測

a) 詳細法

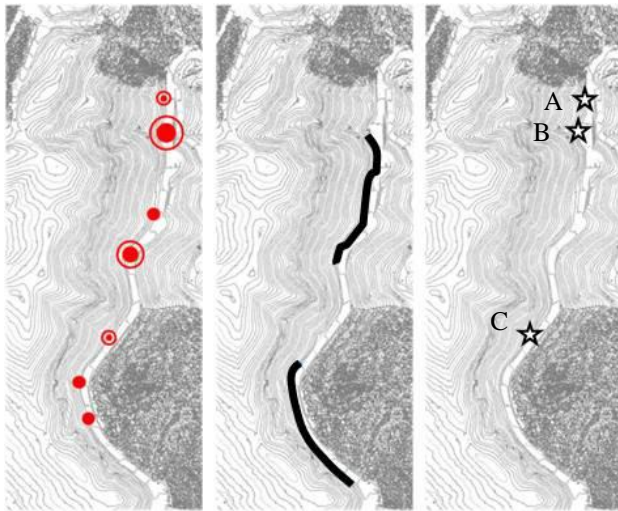
ここでは Autodesk 社の AutoCADCivil3D2010⁷⁾(以下、Civil3D2010)を用いて解析を行った。Civil3D2010には集水域を算出する機能があるためこれを利用した。

Civil3D2010 の機能を用いることで、集水域を算出すると同時に面積も計算される。また、算出した集水域の位置から考察し、それぞれの領域に対応する道路危険箇所延長を算出する。今回の事例では、 ρ が 200 以上となる箇所が谷部であると想定された。これを地形上に示すと、調査対象地となる位置は図-16a)で示す 4 箇所となった。

b) 簡易法

今回は標高 665m の位置を始点として流下経路を算出した。算出には Civil3D2010 の waterdrop 機能を用いた。今回は 5m ごとに始点を配置し、解析を行った。

結果をもとに簡易法を用い、詳細法で決定した調査対象地を含むように基準値を設定すると、 $\beta = 1$ となり、谷部であると考えられる危険箇所は図-16a)で示す 7 箇所となった。



a) 危険箇所 b) 既存対策工 c) 調査対象区間
 ○ 危険箇所(詳細法) ● 危険箇所(簡易法) — 対策工 ☆ 調査区域

図-16 全線予測の結果

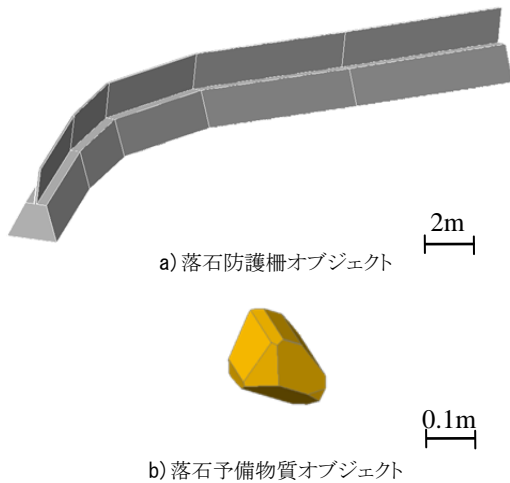


図-17 使用するオブジェクト

c) 調査区域の決定

前節までの結果からわかる危険箇所と、既存対策工の位置を照査してみると、図-16c)のような結果になった。この結果から、調査対象とする区域はA、B、Cの3地点とした。

(3) 単体予測

a) 情報の取得

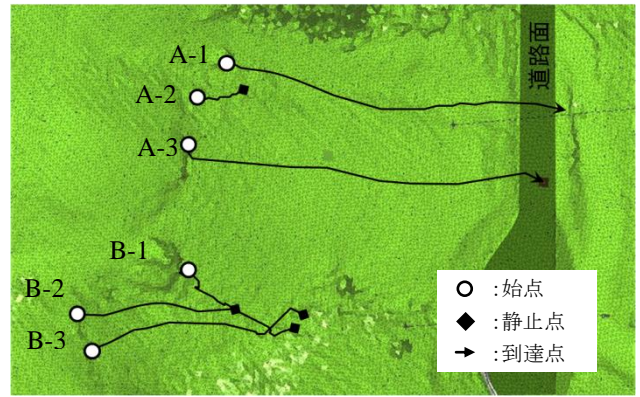
MMS データをもとに、近傍の対策工の断面を取得し、得た情報からオブジェクトを作成した(図-17)。

また、シミュレーションに使用する岩のオブジェクトは、文献 8)を参考にして落石の全運動エネルギーから質量 m を算出し、作成した。参考とした計算式は以下のとおりである。

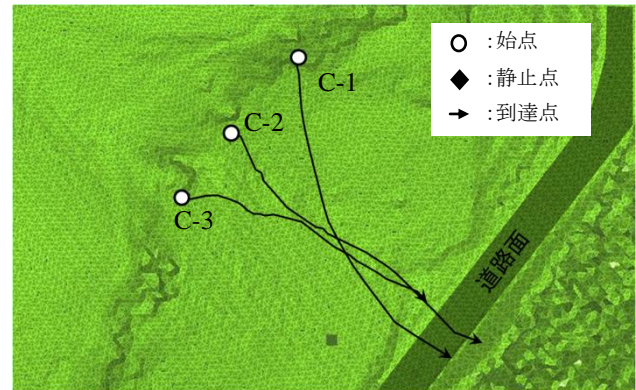
全運動エネルギー E

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H \cdots (5)$$

調査によって得た情報から既存の対策工である落石防



a) A,B 地点



b) C 地点

図-18 単体予測

護柵の吸収エネルギーを 55kJ と推定し、これを E へ代入した。

また、斜面勾配を流下経路の縦断より求めると、対象地の斜面勾配 θ は 35 度、高さ H が 40m であった。さらに、摩擦係数 μ を斜面の状態から 0.25 と設定し、式(5)に当てはめた。すると防護柵が耐えられる落石の最大質量 m_{\max} は、0.2t となった。密度を 2.6 t/m^3 とすると、最大体積 V_{\max} が 0.077 m^3 であった。

シミュレーションに用いるオブジェクトの形状は以前対象地付近に落下した岩の写真などから考察し比較的球体に近いものとした(図-17b)。条件をもとに作成したオブジェクトは対象地の斜面に設置されている予防工の網目 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ をすり抜ける大きさとなっている。

b) 落石シミュレーション

LP データと写真によって落石予備物質の位置を確認し、前章で作成したオブジェクトを 3 次元空間上の適した位置へ配置した。

図-18 はシミュレーションの結果であり、始点からの落下経路を示している。路面まで到達した落石は終点を矢印で、斜面で静止したものは黒い四角で表示している。各点からは3つの始点にオブジェクトを設置して落石シミュレーションを行った A 地点では2つの落石が対策工の設置されていない道路部まで達している。B 地点では全ての落石が斜面で停止した。さらにC地点ではシミュレートしたすべての落石が道路まで到達した。

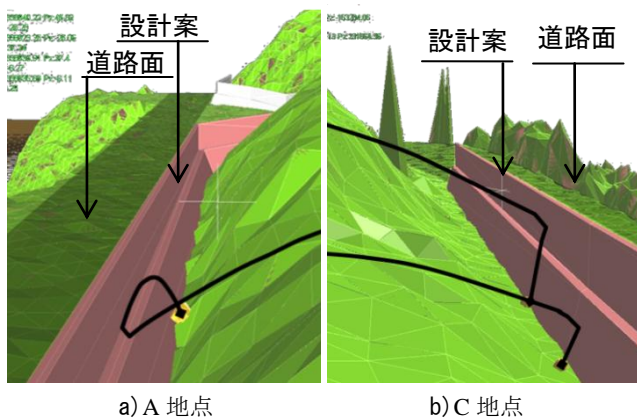


図-19 予備設計案の検証

(4) 予備設計

A 地点における危険区間は詳細法による危険区間よりも広がっており、全線予測では落石の挙動が十分に再現できていないことが分かった。また、A 地点に周辺と同じ仕様の落石防護柵を設置して再度落石シミュレーションを行った結果、落石を防ぐことができた(図-19a)。

B 地点では斜面上で落石が停止したため、防護柵の追加は行わないものとする。

C 地点でも、全線予測による危険区間との違いが見られたため、2 節で推定した危険箇所を延長して新たに対策工を設置し、A 地点と同様にシミュレーションを行った。その結果 C 地点でも落石を防止することが可能であった(図-19b)。

(5) 考察

適用事例では、現地踏査を行うことなく予備設計までの過程を終了することができた。3 次元点群データを用いて地形を形成することで、さまざまな解析を行うことが可能であった。

全線予測では LP データのみを用いて解析を行い、危険箇所を選定した。Civil3D2010 を用いれば、詳細法によって広範囲にわたる解析を行うことも容易であった。

危険区間が複数存在する場合など、施工の優先順位を判断しなければならないことがある。このような場合、簡易法で算出する流下経路を算出し、その粗密によって区間内の危険度を判断する。その結果を用いて、施工の優先順位を決定する。このように、空間から得られるさまざまな情報を利用して複合的に判断することが可能である。

実設計に使用する落下高さや斜面勾配などの情報は、3 次元地形からの取得やそれまでの過程で得られたものを利用する。設計まで同一の 3 次元情報を使用するため情報運用が容易であり、そこから取得する数値は時間や人によらず同一のものである。

このように、全過程に 3 次元情報を利用することで、予測や設計の効率は著しく向上するものと考えられる。

7. おわりに

本研究では、LP データと MMS データを併用することで現況地形を再現し、落石箇所の予測と予備設計への適用が可能になった。再現した地形を用いて解析を行うことで、さまざまな情報が容易に取得可能になり、数値的判断ができる。また、データ運用の利便性が向上し、調査から予測、設計までの間、データを共有することが可能となった。

全線予測を行うことで危険箇所を容易に選定できるようになったため、現地踏査などの詳細な調査を行う対象地を事前に決定することができた。これによって現地調査の無駄を省き、予測の効率化を図った。単体予測ではこれまで困難であった落石箇所の予測を可能にし、ここから取得した情報を設計へ利用した。また、設計案の検証を行うことで、施工する対策工の安全性を事前に評価できた。

点群データを利用し、落石対策の新たな手法を提案した。3 次元地形を用いて落石の挙動を再現し、そこから得るさまざまな情報を利用することにより、情報取得から設計までの過程を総合的に取り扱うことを可能にした。これにより落石対策工設計までの手順に新たな窓口を開くことができた。

今後の課題として、木々に隠れた岩石など点群データの処理によって読み取れる情報の模索や、さらなるデータ利用の方法などについて今後も検討を続けていく。

参考文献

- 1) 右城猛, 楠本雅博, 篠原昌二, 木下賢司: 落石の運動機構に関する実験的研究, 土木情報利用技術論文集 F, Vol.62, pp.377-386, 2006.
- 2) 馬貴臣, 松山裕幸, 西山哲, 大西有三: 落石シミュレーションのための解析手法の研究, 土木情報利用技術論文集 C, Vol.63, pp.913-922, 2007.
- 3) 榎谷浩, 天沼康平, 辻直志: 斜面の植生を考慮した落石運動シミュレーションによる危険度評価について, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1304-1312, 2009.
- 4) 牧野衛, 小林一郎, 山本一浩, 九鬼裕之: 航空 LP データを用いた山岳地帯道路の散水融雪設備計画, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.235-242, 2009
- 5) 小林一郎, 宮下征士, 坂口将人, 上田誠: MMS データを用いた視距改良設計, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.1-8, 2009
- 6) RealFlowHP: RealFlow4, < <http://www.realflow.com/>>, (入手 2010.0525)
- 7) Autodesk 株式会社 HP: AutodeskCivil3D2010, < <http://www.autodesk.co.jp/adsk/servlet/home?siteID=1169823&id=3551938>>, (入手 2010.0528)
- 8) 日本道路協会: 落石対策便覧, 日本道路協会, 2000.

(2010.5.28 受付)