

レーザーとドローンを用いた落石危険度評価システムを開発しました

平成 27 年 8 月 6 日

公益財団法人鉄道総合技術研究所

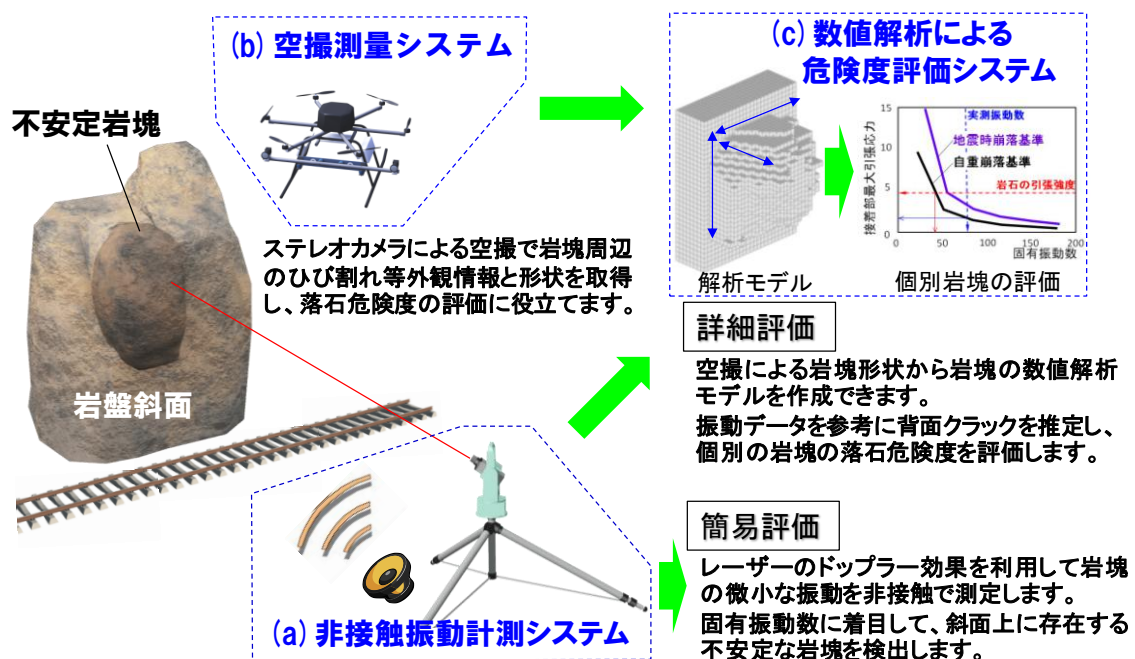
公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）は、沿線斜面からの落石被害の予防を目的として、レーザーによる振動計測技術およびドローン等の小型無人機による空撮測量技術を用いて遠隔位置から安全かつ効率的に落石の危険がある岩塊を検出し、落石危険度を評価するシステムを開発しました。

鉄道沿線の岩盤斜面からの落石事故を未然に防ぐためには、事前に不安定な岩塊を抽出し、対策を行う必要があります。しかし、これらの不安定岩塊が存在する岩盤斜面には人が容易にたどり着くことができないことが多く、現状では遠方からの目視による定性的な調査が主体です。そこで、このような高所や遠方に存在する岩塊の形状や安定性を安全かつ効率的に、定量的に評価するシステムを開発しました。このシステムは、(a)非接触振動計測システム、(b)空撮測量システム、(c)数値解析による危険度評価システムの3つから構成されます。

非接触振動計測システム(a)は、ターゲットとなる岩塊を有する岩盤斜面に向けてレーザーを照射することによって数十mから数百m離れた位置にある岩塊の微小な振動を測定するシステムです。

空撮測量システム(b)は、ドローンにステレオカメラを搭載し、岩塊に接近して空撮することで、落石危険度を評価する際に有用な情報となる岩塊の周囲のひび割れなどの外観情報を取得するとともに、岩塊の三次元形状を測量し重さを推定することができます。数値解析による危険度評価システム(c)では、(b)で得た岩塊の三次元形状データから岩塊の振動特性を推定するためのモデルを作成し数値解析をおこない、(a)で得た岩塊振動の実測結果と比較することによって、岩塊の背面のひび割れの進展状況を推定し、現状および地震等の災害発生時の落石危険度を評価します。

なお、本開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。



レーザーとドローンを用いた遠隔非接触計測による落石危険度評価の流れ

資料

【本システムの構成技術のご紹介】

1. レーザーを用いた非接触振動計測システム

(1) レーザーを用いた振動計測の原理

レーザーに生じるドップラー効果を利用して測定対象の振動を遠隔位置から非接触計測します。ドップラー効果は、緊急車両のサイレン音が観測者に近づいてくる際には高い音、通り過ぎて離れていく際には低い音に聞こえる現象でよく説明されます（図 1）。同様の現象が、振動する物体の表面で反射したレーザーにも生じ、物体がレーザー振動計に近づいてくる場合は反射レーザー光の周波数が高く、逆の場合は低くなります（図 2）。この周波数の変化を連続的に観測することによって物体の振動を検出できます。

(2) 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」

レーザー振動計を屋外環境で使用すると、風や様々な地盤振動などの影響でレーザー振動計自体が揺れてしまい測定精度が低下します。鉄道総研はレーザー振動計に自己の振動をキャンセルする機能を与えた「Uドップラー（図 3）」を開発しました。既に多くの鉄道事業者で U ドップラーが橋りょう等の検査に活用されています。この U ドップラーを岩塊振動計測にも適用することができます。

(3) 不可視光を用いたスキャニング計測システム

長距離の非接触測定を実施できる不可視光（赤外）レーザーを用いたスキャニング型の振動計測システム（図 4）も開発しました。このシステムを用いれば、岩に計測用の反射ターゲットを設置することなく、効率的により多くの岩塊の振動を計測することができます。

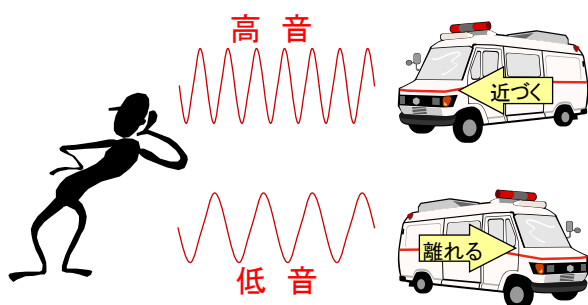


図 1 緊急車両のサイレンのドップラー効果

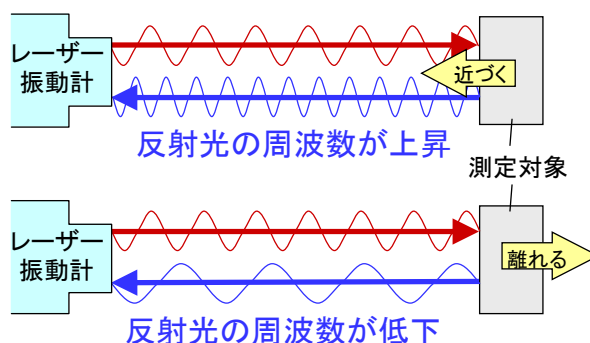


図 2 レーザー計測におけるドップラー効果



図 3 Uドップラー

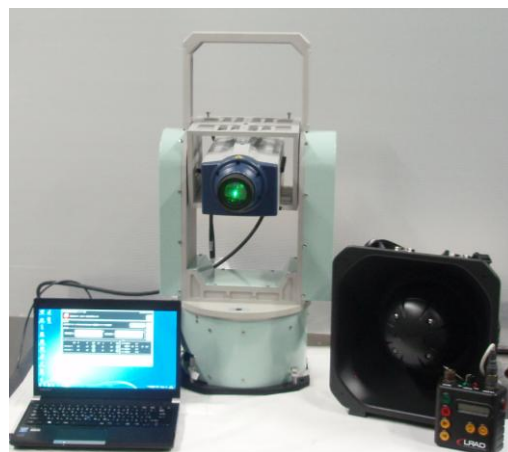


図 4 スキャニング計測システム

2. ドローンを用いた空撮測量システム

(1) システムの概要

ドローンなどの小型無人航空機に、防振化したステレオカメラを搭載したシステムです（図 5）。検査対象の岩塊に接近して（図 6）、容易に人がたどりつくことができない高所等に位置する岩塊の外観情報や形状を効果的に取得できます。ステレオカメラを用いているため、最低 1 組の画像から岩塊の形状や寸法を測量することができ、悪条件下でもより確実に情報を収集できます。

(2) ステレオカメラによる測量

人が左右の目の視差を利用して物の奥行きを把握するように、左右のカメラの視差を利用して測量を行います。左右のカメラ間の距離（基線長）、焦点距離、左右の画像上に写った位置を利用して三角測量の要領で撮影対象の位置を測量することができます（図 7）。

(3) 形状データの作成方法

左右のカメラの画素の輝度の相関から、全ての点（画素）の対応を調べ、先の方法により測量を行えば岩盤斜面の形状を 3 次元データ化することができます（図 8）。ただし、撮影の死角になっている場所の形状は測量不可能なので、その場合は複数の方向から撮影して作成した 3 次元の形状データを貼りあわせて、死角のない 3 次元形状データを作成します。



図 5 空撮測量システム



図 6 空撮状況例

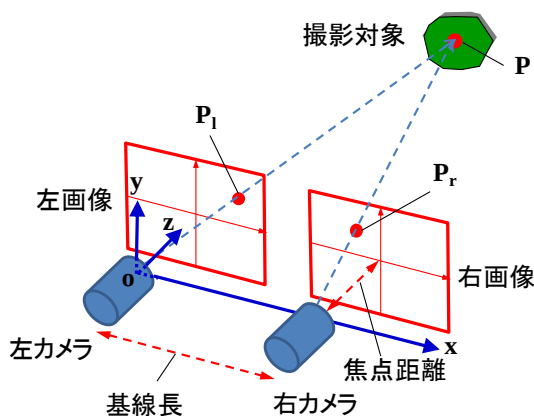


図 7 ステレオカメラによる測量

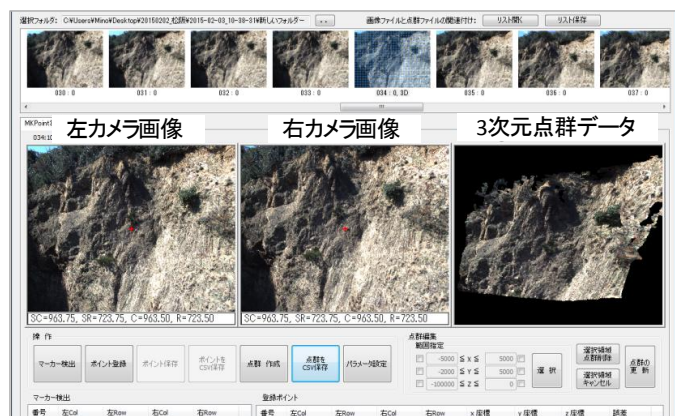


図 8 形状データ作成ソフトウェア画面

3. 提案手法のコンセプトと落石危険度の評価法

(1) 提案手法のコンセプト

岩塊背面のクラックが進展して落石の危険度が高まると、岩塊が揺れやすくなり、固有の振動数が低下します。そのため、振動測定で岩塊の落石危険度を評価できます。しかし、岩塊の振動は、岩塊の形状、大きさ、ひび割れの発生位置などの影響を受けるため、それらの情報または手がかりを空撮測量で得ることで、落石危険度の評価精度を高めます。

レーザー振動計測: 揺れ易さ・固有の振動数の低下などから岩塊の不安定さを推定
+ ただし、岩塊の振動は形、大きさ、ひび割れ位置の影響を受ける。
ドローンによる空撮測量: 岩塊の形、大きさ、周囲のひび割れ状況などを取得可能
= より詳細な落石危険度評価を遠隔位置から非接触で実現

(2) 数値解析による詳細評価

最も詳細な検査を行う場合は、空撮測量で得た岩塊の形状データ（図 9）から、不安定岩塊の数値解析モデルを作成します（図 10）。岩塊と安定した基盤岩のモデルの間に設けた接着部の位置や面積を変化させて様々な背面のひび割れ状態を想定した数値シミュレーションを行い、各ひび割れ状況での岩塊の固有振動数と実測値を比較して現状を推定するとともに、自重や地震動が作用したときに落石が発生する危険度を詳しく調べます（図 11）。

(3) ノモグラム（事前に作成した評価用グラフ）による簡易評価

数値シミュレーションを行わなくても振動測定結果から岩塊の落石危険度を簡易に評価できるようにするために、長方形ブロックを用いた実験、解析結果に基づいて評価用のノモグラム（図 12）も提案しました。

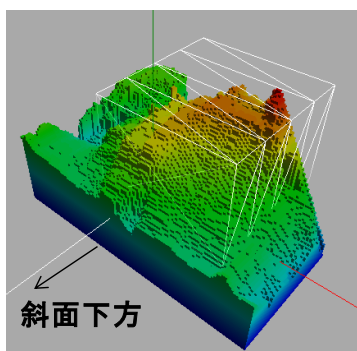


図 9 斜面形状の数値化

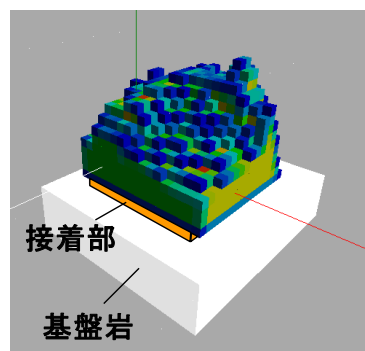


図 10 不安定岩塊の数値解析モデル化

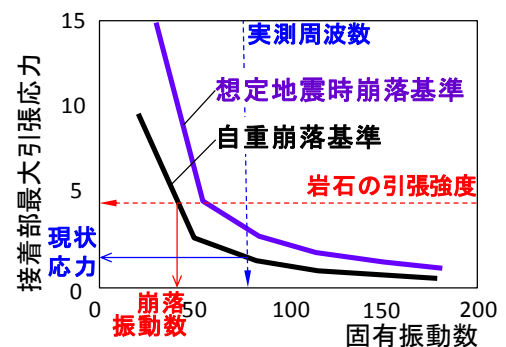


図 11 数値シミュレーションによる詳細評価

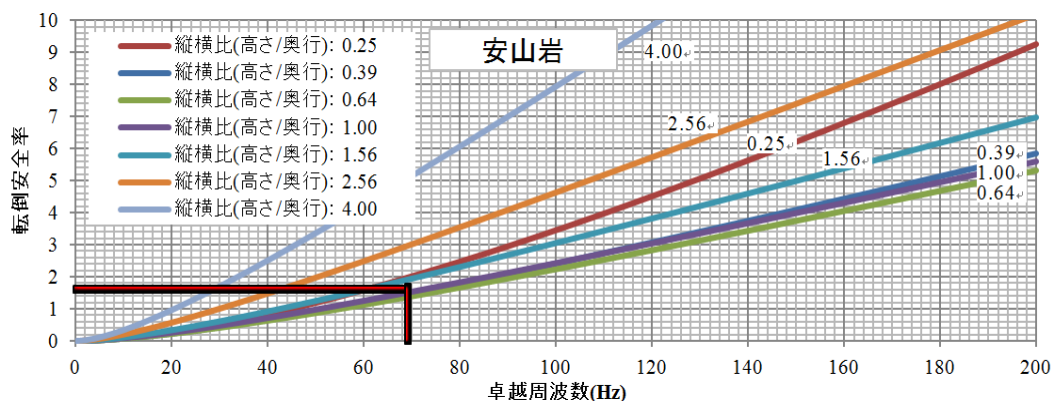


図 12 簡易評価用ノモグラムの一例