

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

レーザーとドローンで 落石危険度を評価する

鉄道沿線の岩盤斜面からの落石事故を防止するために、人が容易にたどりつけない高所や遠方の岩塊の落石危険度を評価する手法を開発しました。提案手法では、レーザードップラー計測とステレオ画像法という二つの光学的計測手法を用います。レーザーで遠隔位置から岩塊の微小振動を測定するとともに、ドローンによるステレオ空撮で岩塊形状を測量します。そして、測定で得た岩塊の固有振動数を、岩塊の形状データから作成した数値解析モデルによる岩塊背面のひび割れ進展シミュレーション結果に照合して、岩塊の落石危険度を詳細に評価します。



上半 文昭

Fumiaki Uehan

鉄道力学研究部
構造力学研究室
室長

【専門分野】 構造力学,
地震工学, 維持管理工
学, 計測工学



箕浦 慎太郎

Shintaro Minoura

鉄道力学研究部
構造力学研究室
研究員

【専門分野】 構造力学

はじめに

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検出して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は人が容易にたどりつくことができないことが多く、遠方からの目視による定性的な調査しかできない場合が少なくありません。

そこで、レーザーを用いた振動計測と、ステレオカメラを搭載したドローンによる空撮測量を利用して、高所や遠方に位置する岩塊の振動や形状を安全かつ効率的に測定し、落石の発生危

険度を定量的に評価するための手法とシステムを開発しました。

落石危険度評価システム

図1に開発したシステムの概要を示します。岩塊の背面にひび割れが発生し、これが進展して不安定化が進むと、その岩塊の固有振動数(※参照)が低下することを利用して落石危険度を評価します。まず、レーザーによる振動測定で不安定な岩塊の常時微動(※参照)などを測定して固有振動数を調べます。次に、空撮による測量で岩塊の形の3次元座標データを取得し、不安定岩塊

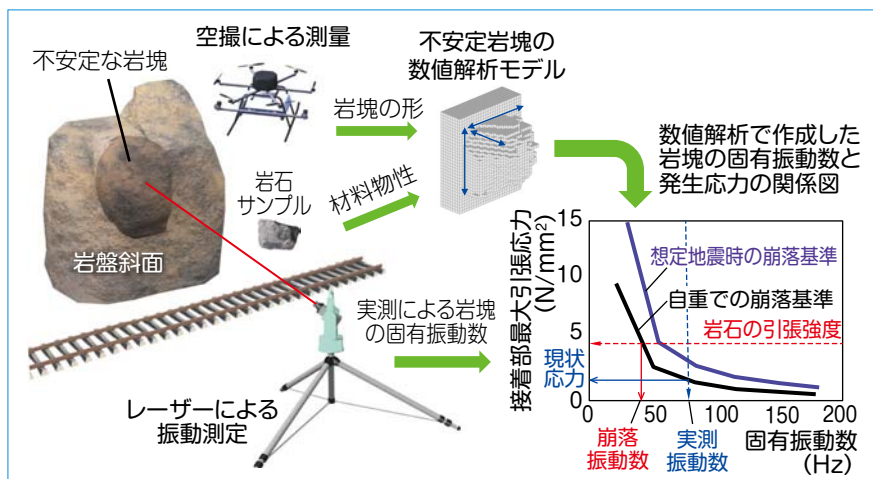


図1 レーザー振動測定とドローン空撮測量による落石危険度評価の流れ



図2 非接触振動測定システム「Uドップラー」

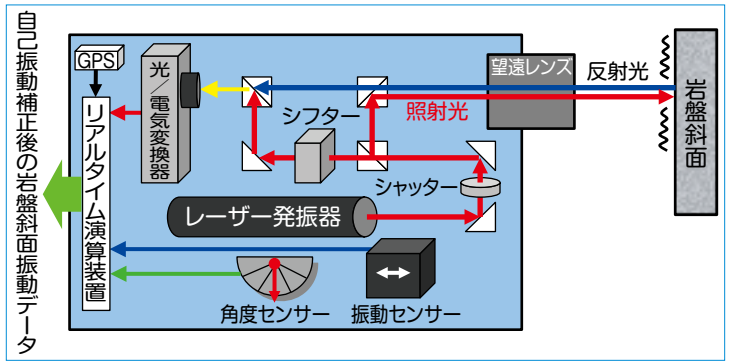


図4 Uドップラーの内部構造

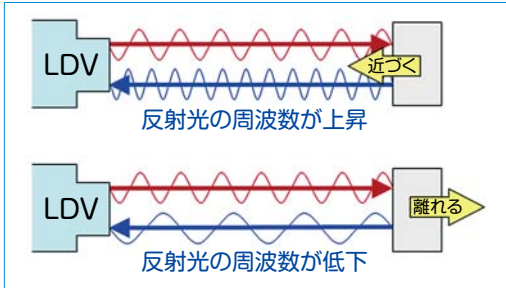


図3 反射レーザーに生じるドップラー効果

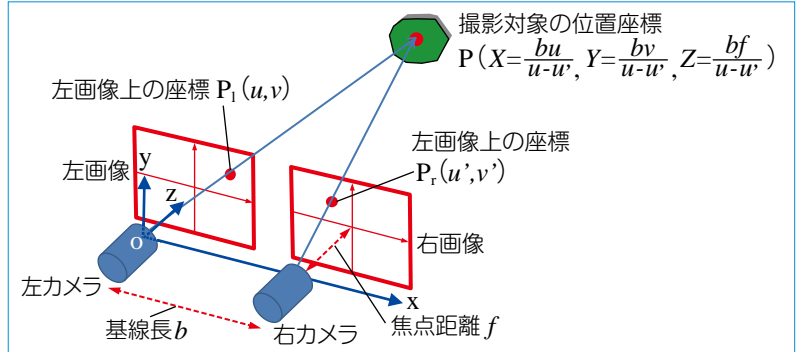


図5 ステレオカメラによる測量原理

固有振動数

振動体を自由に振動させたときにその振動体が見せる固有の（もっとも揺れやすい）振動数。

常時微動

波浪・風などの自然の外力や、交通機関・工場・工事などの人工的な外力を受けて、ごく微小ではあるものの常に揺れ動く地表面の振動。

レーザードップラー速度計 (LDV)

レーザーを運動する物体に照射すると、ドップラー効果によって反射レーザー光の周波数が物体の速度に応じて変化することを利用して、物体の振動速度を非接触測定する装置。

の数値解析モデルを作成します。この数値解析モデルを用いたシミュレーションで、岩塊の背面のひび割れの位置や進展具合によって岩塊の固有振動数がどのように変化するか、ひび割れがどの程度進むと落石につながる応力が発生するかを調べ、それらの関係を整理します。得られた関係に先に求めた実測による固有振動数を照合すれば、現状の落石危険度を評価できます。

レーザーで岩の振動を測る

不安定な岩塊の非接触振動測定に



図6 空撮測量システム

は、鉄道総研がレーザードップラー速度計 (LDV) (参照) に屋外環境で高精度な測定を行うための工夫を施して開発したUドップラー¹⁾ (図2) と呼ぶシステムを用います。振動する物体にレーザーを照射すると物体の振動速度と振動方向に応じてレーザー反射波の周波数が変化します (図3)。Uドップラーはこの周波数の変化を連続的にとらえるとともに、風や地盤振動によるLDV光学系の自己振動の影響を補正することによって非接触で対象物の μm 以下のオーダーの微小な振動を測定することができます (図4)。

Uドップラーには、赤色光のレーザーを用いて数10m程度離れた対象

物を測定するUドップラー II (図2(a)) と、高出力の不可視光レーザーを用いて数100m遠方の対象物も測定できる長距離型Uドップラー (図2(b)) があります。どちらも人体に害のないレーザー (安全基準クラス2) を用いており、安全に測定を実施できます。

ステレオカメラで岩の形を測る

図5に示すように、二つのカメラを平行配置したステレオカメラで対象物を撮影すると、左右それぞれのカメラ画像上の被写体の2次元位置座標、二つのカメラの間隔である基線長、およびカメラの焦点距離を利用して、三角測量の要領で被写体の3次元空間上の

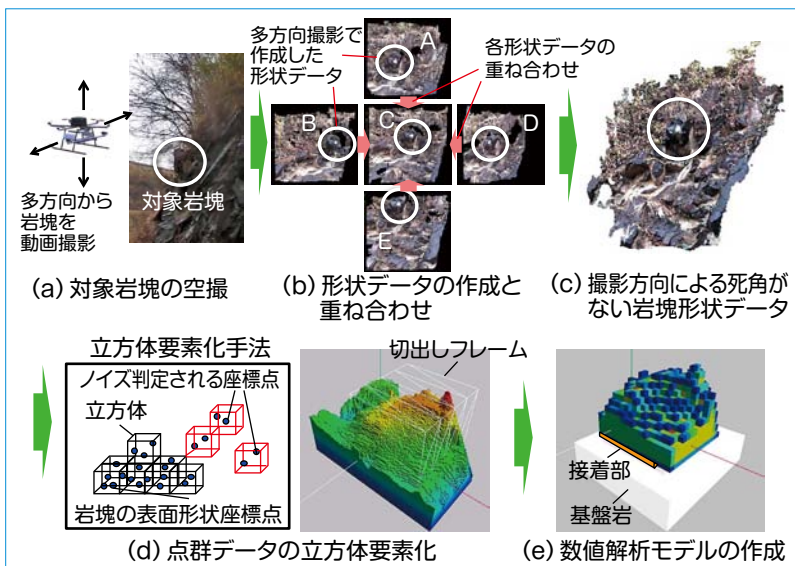


図7 岩塊の空撮測量と数値解析モデル化

タを重ね合わせることで、撮影方向の死角によるデータの抜けがない岩塊の全周囲形状を測量できます(図7(c))。

岩塊の形状データから数値解析モデルを作る

さらに、岩塊の3次元形状データからFEM解析用の数値解析モデルを半自動的に生成することができる数値解析モデル化プログラム²⁾を作成しました。空撮で得た岩塊の3次元形状データの表面および内部に立方体要素を自動配列し(図7(d))、不安定岩塊に相当する部分を切出して、対象岩塊の数値解析モデルを作成することができます(図7(e))。

このようにして作成した岩塊の数値解析モデルを用いて、岩塊の背面ひび割れの進展に伴う固有振動数変化などを数値シミュレーションで調べて、個別の岩塊の落石危険度の評価基準を作成します。

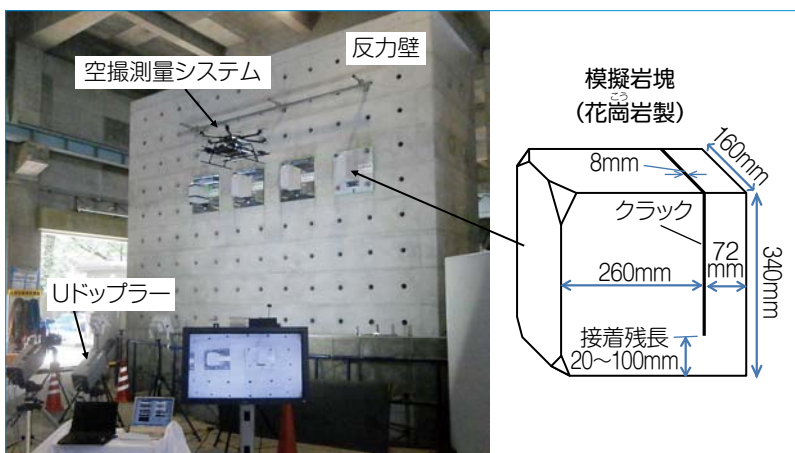


図8 模型実験状況と模擬岩塊の形状

模型実験で落石危険度評価の流れを再現する

開発した落石危険度評価システムの計測・解析機能の確認と、評価の妥当性を確かめるために実施した模型実験結果を紹介します。

図8に模型実験状況を示します。剛な反力壁上に模擬岩塊4体を設置して、非接触振動計測と空撮を実施しました。模擬岩塊は花崗岩のブロックに岩塊の背面亀裂を模した切り込みを加えたもので、4体はそれぞれ20mm、30mm、40mm、100mmの異なる接着残長を持っており、接着残長が短いほど落石危険度が高い状態を表しています。接着残長が最も短い接着残長20mmの模擬岩塊はきわめて不安定な状態で、反力壁への設置作業中の破壊を防ぐ目的で用いた結束帯を緩めようとする岩塊が自重で前方に傾き、崩落する危

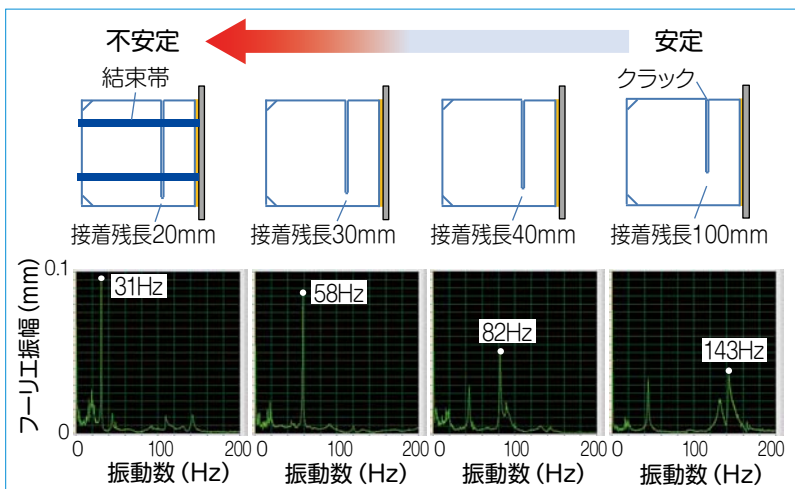


図9 レーザー振動計測による模擬岩塊の固有振動数推定結果

位置座標を測量できます²⁾。

岩塊の形状測量には、ステレオカメラによる3次元測量装置をドローンに搭載した空撮測量システム(図6)を用います。まず、図7(a)の要領で測量対象

の岩塊に接近して空撮し、岩塊の周囲のひび割れなどの外観情報を収集するとともに、岩塊の3次元形状データを取得します(図7(b))。岩塊を多方向から撮影して作成した複数の3次元形状デー

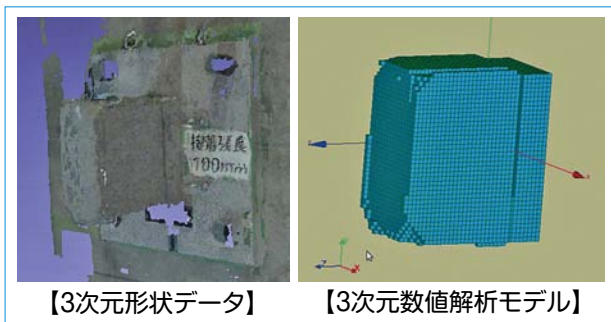


図10 模擬岩塊の3次元形状データと数値解析モデル

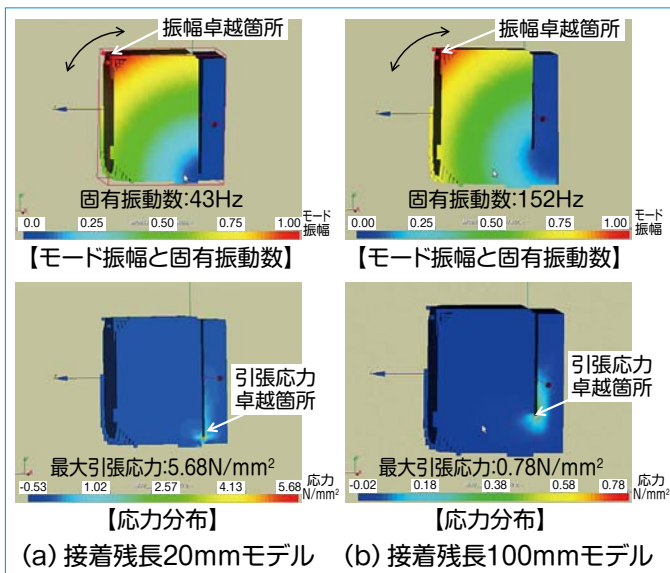


図11 数値解析モデルの振動モードと応力分布例

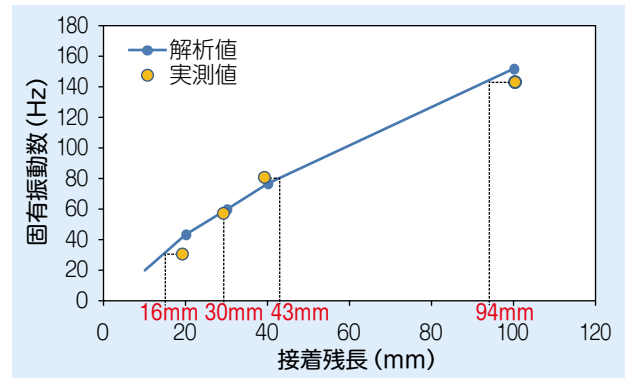


図12 接着残長と卓越周波数の関係

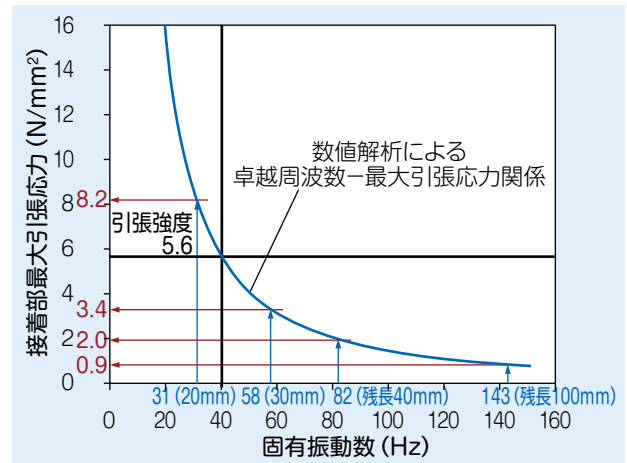


図13 落石危険度の評価結果

險があったため、結束帯で支持したまま測定を行いました。

図9に模擬岩塊から約10m離れた斜め下方からUドップラーで振動を測定して求めた、各模擬岩塊の振動のフーリエスペクトルと固有振動数の推定結果を示します。接着残長の減少にともなって、固有振動数が低下する傾向が確認できます。

図10に空撮ステレオ画像から作成した模擬岩塊の3次元形状データと数値解析モデルを示します。若干バリ状の誤差がみられますが、数値解析モデルを作成する上で十分な形状情報を得ることができました。モデルの材料物性には、同じ花崗岩の室内材料試験値を与えました。

図11に作成した数値解析モデルによるシミュレーション結果例を示します。岩塊が接着部を中心に転倒方向に振動し、接着部上面付近で引張応力が

卓越することが確認できます。

図12に模擬岩塊の接着残長と固有振動数の関係の解析値と実測値を示します。接着残長の減少に伴う固有振動数の低下傾向を数値解析で再現できており、仮に模擬岩塊の接着残長が不明として解析結果と実測固有振動数から接着残長を推定すると、それぞれ16mm、30mm、43mm、94mmとなり、非接触測定結果から岩塊背面クラックの進展状況をおおむね推定できる可能性が示されました。

図13は、数値解析で求めた岩塊の固有振動数と接着部に生じる最大引張応力の関係図に、各模擬岩塊の実測固有振動数を照らし合わせたもので、接着残長20mmの模擬岩塊の場合のみ岩石の引張強度を上回る応力が生じていることを示しており、実態に即した結果が得られました。

おわりに

遠隔非接触での振動・形状計測によって、岩盤斜面上の不安定な岩塊の落石危険度を評価する手法を紹介しました。今後は、現場実測・評価データの蓄積に取り組み、実用性と評価精度の向上に取り組みます。

なお、本研究の一部は、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。RRR

文献

- 1) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，pp.17-22，2007
- 2) 上半文昭，箕浦慎太郎：空撮画像による岩塊形状の取得および数値解析モデル化の検討，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.47-52，2014