

遠隔非接触計測で不安定岩塊の崩落危険度を調査する

鉄道沿線の岩盤斜面に存在する崩落危険度の高い岩塊を、安全かつ効率的に検出する手法の開発に取り組みました。鉄道総研が開発した非接触振動測定システム「Uドップラー」や模型ラジコンヘリコプターなどを活用した岩盤斜面の遠隔非接触振動計測システムを開発するとともに、岩塊の振動特性と力学的安定性の関係を模型実験および理論解析で考察して新たな岩塊の崩落危険度評価手法を提案しました。



上半 文昭
Fumiaki Uehan
鉄道力学研究部
構造力学研究室
主任研究員
[専門分野] 構造力学,
地震工学, 計測工学

はじめに

列車脱線などの被害を引き起こす危険がある岩盤斜面からの落石を未然に防ぐためには、沿線斜面中の不安定岩塊の早期検出が不可欠です。そこで、遠隔非接触振動計測技術¹⁾を、振動計測による落石危険度評価²⁾(☞参照)に適用することによって、岩塊の崩落危険度を離れた場所から安全かつ効率的に評価できる手法およびシステムを開発しました。ここでは、開発した計測システムおよび崩落危険度評価手法について紹介します。

岩盤斜面の非接触振動計測システム

岩塊振動の計測装置として図1に示す岩盤斜面遠隔非接触振動計測システム³⁾を開発しました。図2に示す非接触振動計測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)に現場計測向けの改良を施して開発した非接触振動測定システム「Uドップラー」¹⁾のセンサーおよび従来型の3成分微動計を複数台無線制御して同期計測できるシステムです。

3台のUドップラーセンサーを用いれば、任意の3方向から岩塊の揺れを同時計測して、岩塊の3次元挙動を推定できます。得られた岩塊の3次元挙動から振動の卓越方向を推定し、その方向を対象として岩塊安定性の評価指標(卓越周波数、減衰定数、累積振幅等)を算出できます。岩盤表面のレーザー反射性を向上すれば、100m以上離れた場所から常時微動レベルの振動を、岩塊測定用の速度型地震計と同等の精度で測定できます。

☞ LDV (Laser Doppler Velocimeter)

光のドップラー効果を利用して速度を計測する装置です。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します。LDVは、この周波数変化から物体の速度を検出します。

☞ 振動計測による落石危険度評価

不安定岩塊と安定した基盤岩にそれぞれ地震計を取り付けて振動を測定し、両者の振幅値の比、卓越する周波数、減衰定数などから落石発生の危険度を評価する手法です。

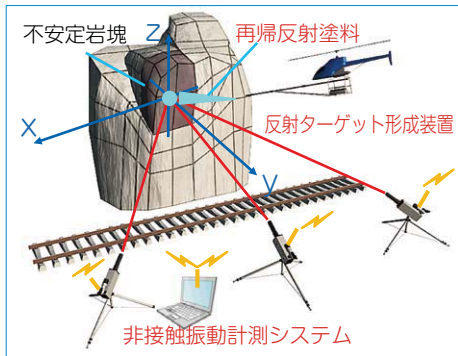


図1 岩盤斜面遠隔非接触振動計測システム

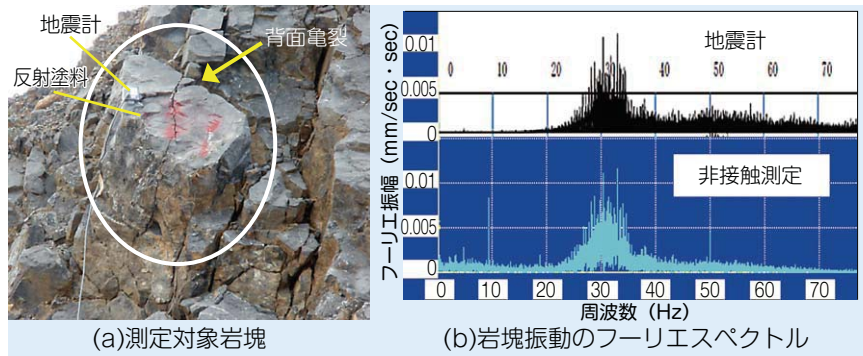


図3 測定岩塊とフーリエスペクトルの地震計との比較



図2 非接触振動計測システム



図5 遠隔制御式反射ターゲット形成装置

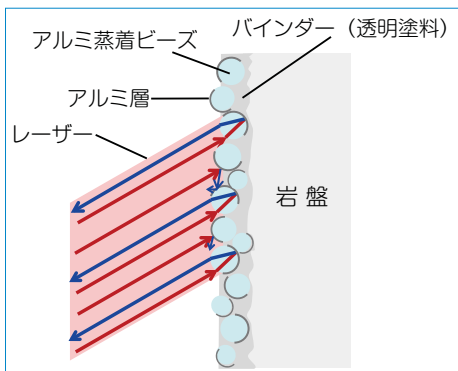


図4 塗料による再帰反射

然岩盤の常時微動レベルの振動を計測するには、岩塊表面のレーザー反射性を向上する必要があります。急崖斜面への反射プリズム等の設置は困難であるため、図4のメカニズムで光を入射方向に強く反射できる再帰反射塗料を用いた反射ターゲットの遠隔形成手法を検討しました。

岩盤斜面に適用するにあたり、同塗料が不陸(凹凸のある)面およびレーザー入射角が大きい場合の適用性に優れることを確認するとともに、微動測定可能距離(従来約100m)の拡大に向けた反射性能の向上(輝度約1.5倍)、蛍光顔料の添加による遠方からの視認性向上を図り、新たに岩盤斜面計測用の反射塗料を開発しました。近距離に位置する岩塊には、棒状治具やペイント弾発射機などで同塗料を塗布することができます。

模型ラジコンヘリコプターによる反射ターゲット形成

より遠方の岩塊への反射ターゲット形成を目的として、図5に示す模型ラジコンヘリコプターを活用した装置を開発しました。反射塗料噴射装置、斜面への接近警告用のレーザー距離計、ワイヤレスカメラ、岩塊の3D形状取得用のステレオカメラなどを搭載した装置で、重量約13kg、全長約1.6mです。GPS・IMU姿勢制御(☞参照)により、無操縦でも墜落せず熟練者レベルのホ

☞ GPS・IMU 姿勢制御

GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) と IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) を用いた航空機などの制御技術です。GPS で航空機的位置を、IMU で航空機姿勢の傾きを同時に検出し、機体安定や自動操縦を目的とした制御を行います。

開発した非接触振動計測システムによる岩塊(図3(a))の測定結果例を図3(b)に示します。図3(b)は対象岩塊の微振動測定結果のフーリエスペクトルを、岩塊に取り付けて同時測定した地震計の結果と比較したものであり、両者が良く一致することが確認できました。

岩盤表面の反射性向上技術

LDVでレーザー反射性が乏しい自

バリングが可能で、短時間の訓練で初心者でも操縦できます。

図6 (a) に高さ25mの実岩盤斜面での反射ターゲット形成実験結果を示します。目視およびワイレスカメラと距離計からの無線送信情報を参考にして、測定予定位置に反射ターゲットを形成でき、地上から微動レベルの振動を計測可能であることが確認できました。図6 (b) はワイレスカメラによる近接撮影画像例です。高さ50mの斜面中腹に位置する岩塊に接近撮影し、巨大な落石が両脇の岩盤にはまり込んだ状況を撮影画像から確認できました。

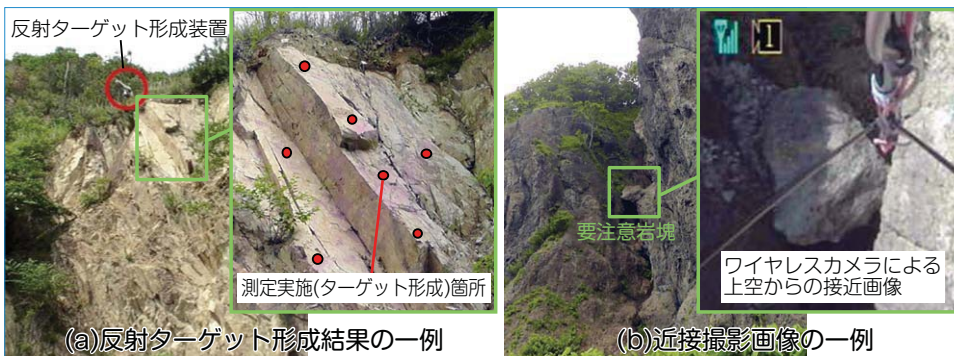


図6 反射ターゲット形成結果および近接撮影画像

転倒安全率による落石危険度評価

開発した遠隔非接触振動計測システムは、既存の振動計測による落石危険度評価にも活用できます。しかし、より正確な評価を行うためには不安定岩塊の力学的安定性と振動特性の関係をより明確にする必要があると考え、新たに「転倒安全率」を評価指標として用いた岩塊の崩落危険度評価手法を検討しました。

図7に示す背面亀裂を有する剥落型岩塊を評価の対象とする場合、点Oを回転の中心と考え、岩塊が転倒(崩落)しようとするモーメントに対する、接着部による抵抗モーメントの最大値の比を転倒安全率と定義しました。この転倒安全率が小さいほど、岩塊の崩落危険度が高くなります。背面亀裂が進展し、接着部の抵抗モーメントがブロックの転倒モーメントと一致した状態が安全率1であり、安全率が1を下回るとブロックが崩落すると考えます。

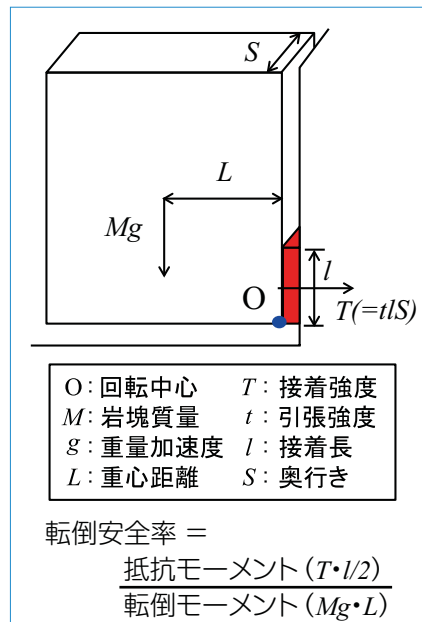


図7 背面接着された岩塊の転倒安全率

模型実験による検討

図7のモデルを対象としたコンクリート模型の振動計測実験を実施しました⁴⁾。図8に示すように、安定したコンクリート台座にコンクリートブロックの背面を石膏で接着した模型を作製し、台座部をカケヤ(木槌)で軽く叩いて起こした振動を、非接触計測システムを用いて1kHzサンプリングで計測しました。接着部を徐々に切断して岩塊の背面亀裂の進展を模擬し、転倒安全率とブロック上部の水平方向振動成分の卓越周波数の関係を整理しました。サイズの異なる3つの相似形のブロック、および接着部に物性の異なる2種類の石膏(A級石膏および引

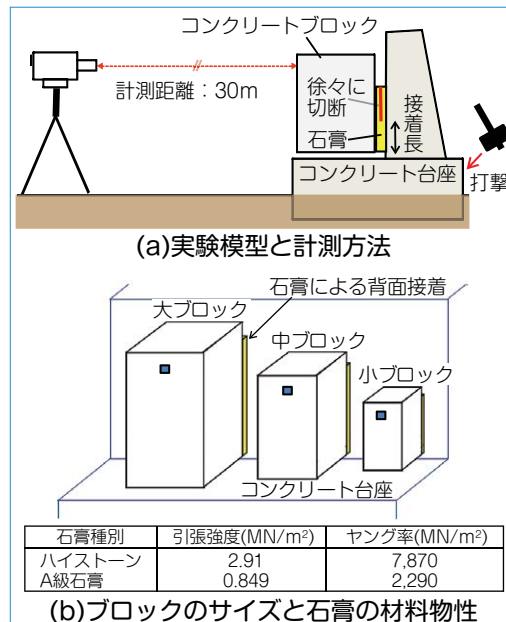


図8 不安定岩塊を模擬したコンクリートブロック模型実験

張強度や剛性がA級石膏より高いハイストーン)を用いた6パターンの実験を実施しました。

その結果、図9(a)に示す通り、ブロックの接着長(安定性)と卓越周波数には高い相関があることが確認できました。さらに、先に示した転倒安全率を用いて卓越周波数を整理すると、図9(b)に示すように接着部の材料物性毎にほぼ1本の転倒安全率-卓越周波数曲線が得られ、崩落発生周波数が30Hz付近にはほぼ収束することが確認できました。別途、理論解析を実施し、少なくとも本実験条件下では、ブロックのスケールによらず接着部の材料物性毎に1本の転倒安全率-卓越周波数曲線が

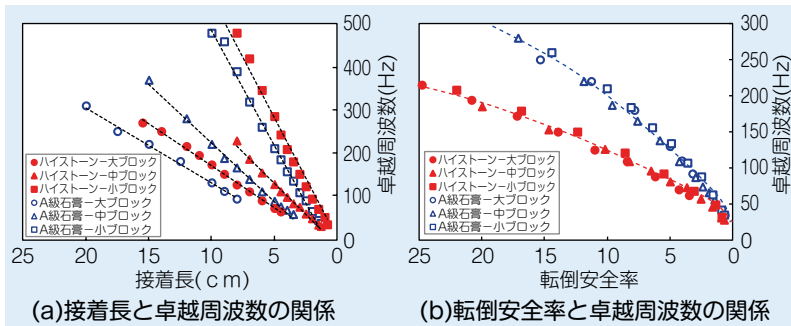


図9 模型実験結果

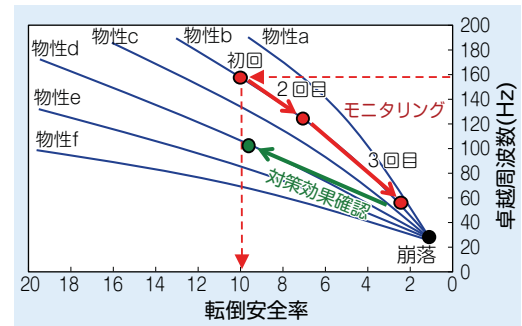


図10 評価ノモグラムのイメージ

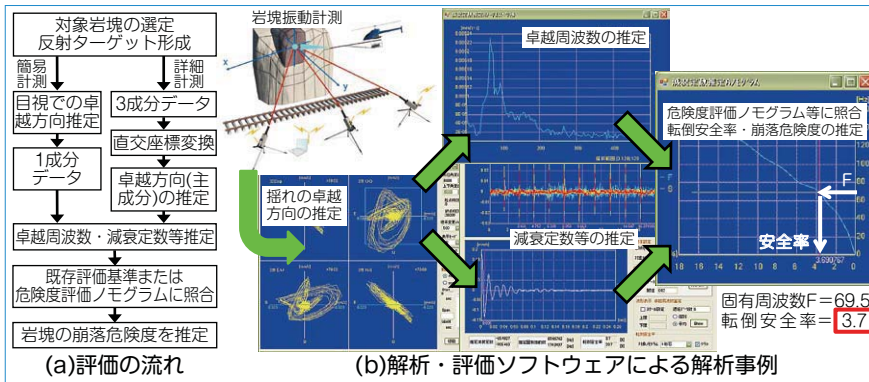


図11 本手法における岩塊崩落危険度評価の流れと解析・評価ソフトウェアによる解析事例

得られ、崩落発生周波数が30Hz付近に収束することが、理論的にも正しい結果であることを確認しました⁵⁾。

ノモグラムによる評価手法

先の実験結果を踏まえると、少なくとも相似形とみなすことができる剥落・転倒型の不安定岩塊については、安定岩盤との接着部の岩石物性毎に1本の転倒安全率-卓越周波数曲線が得られることがわかります。そこで、解析または実験により様々な岩石物性に対応する転倒安全率-卓越周波数曲線を求め、それらを複数まとめれば図10のようなノモグラムを作成することができます。このノモグラムに、振動計測で得た岩塊の卓越周波数と岩石の物性値を照合すれば、対象岩塊の転倒安全率を推定することができます。

安定した岩盤との接着部の岩石の物性値は、周辺で採取した岩石のサンプル試験または岩種に基づいた推定値を用います。岩塊の定期的なモニタリ

ングを実施し、得られた卓越周波数をノモグラムに照合すれば、岩塊の不安定化のプロセスをより明確に把握できます。また、接着工法などで対策を施した際にはその効果を評価することもできるものと考えます。

評価マニュアルとソフトウェア

研究のまとめとして、開発した計測システムの使用法と評価作業の流れをまとめたマニュアル(案)と評価ソフトウェアを整備しました。図11に評価の流れおよびソフトウェアによる解析の流れを示します。マニュアルには、Uドップラーセンサー1台のみによる簡易な計測、2台を用いた不安定岩塊と基盤岩の比較、3台を用いた3次元計測など、様々な計測方法による岩塊崩落危険度の評価方法を整理しました。このマニュアルとソフトウェアを用いれば、非接触振動計測結果から不安定岩塊の転倒安全率を推定して、岩塊の崩落危険度を評価することができます。

おわりに

開発した計測システムは、既存評価手法および提案評価手法用の計測装置として使用することができます。今後は、計測システムの小型・軽量・単簡化を図るとともに、個別岩塊の形状、支持状態、崩落メカニズムなどを考慮してより実用的な評価手法へと発展させる計画です。なお、本研究は、鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の助成により実施しました。[RRR]

文献

- 1) 上半文昭：構造物診断用非接触振動計測システム「Uドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，pp.17-22，2007.12
- 2) 緒方健治，松山裕幸，天野浄行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，749巻，6-61，pp.123-135，2003.12
- 3) 上半文昭，村田修，斎藤秀樹，大塚康範：岩盤斜面評価用非接触振動計測システムに関する基礎検討，鉄道総研報告，Vol.24，No.4，pp.5-10，2010.4
- 4) 村田修，上半文昭，斎藤秀樹：模型実験による岩盤斜面の安定性評価法の検討，JREA，Vol.54，No.4，pp.44-47，2011.4
- 5) 上半文昭，太田岳洋，石原朋和，布川修，斎藤秀樹，深田隆弘：非接触振動計測による岩盤崩落危険度の定量評価手法の検討，鉄道総研報告，Vol.26，No.8，pp.47-52，2012.8