

岩盤斜面評価用非接触振動計測システムの提案

鉄道力学研究部 構造力学
主任研究員 上半 文昭

1. はじめに

鉄道沿線の岩盤斜面の崩壊は、ひとたび発生すると列車脱線や長期運休などの大きな被害をもたらす可能性があるため、岩盤斜面中の不安定な岩塊を検出して監視・対策を施す必要がある。岩盤や浮石の安定性評価は地表踏査による目視観察で行われてきたが、近年、写真測量や物理探査などの非破壊検査手法の適用が試みられるようになった。中でも地震計を設置して岩塊の振動特性を調べる手法^{1),2)}は、定量的な安定性評価手法として期待されているが、ロックライミングなどで不安定な岩塊に地震計を設置する場合もあり、作業の安全性や効率面の課題がある。

そこで、振動計測による岩盤斜面評価手法の安全化、効率化を目的として、著者らが研究するレーザを用いた遠隔非接触振動計測技術³⁾の同手法への適用を検討することにした。ここでは、構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」を用いた岩盤斜面計測システム⁴⁾および同システムを用いた岩塊の安定性評価法の研究の進捗状況を紹介する。

2. Uドップラーの岩盤斜面計測への適用性の検証

2.1 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」

Uドップラー(図1)はレーザ照射によって構造物の振動を遠隔非接触計測できるシステムである。レーザドップラ速度計(LDV)に、振動センサ等を内蔵し、LDV自身の揺れと傾きの影響を低減する工夫を施したものであり、地盤振動や風の影響でセンサ自身が揺れやすい屋外環境においても、測定対象に直接振動計を取り付けた場合とほぼ同等の振動データを遠隔非接触で計測することができる。このUドップラーを用いて遠隔地から不安定岩塊の常時微動や列車通過時振動を測定できれば、安定性評価のための振動測定作業の大幅な安全化、効率化を図ることができる。

2.2 岩盤計測用地震計との性能比較実験

まず、岩盤斜面の常時微動計測に用いられている地震計(ジオフォン)に代えてUドップラーを用いることができるかどうかを確認するために、岩塊を模擬したコンクリートブロックの常時微動計測実験を実施した。図2の要領でコンクリートブロック上にジオフォンを設置し、その近傍に設けた測定点(再帰反射シールを貼付)に約10m離れた場所からレーザを照射して、レーザ照射方向1成分の常時微動を200Hzサンプリングで同時計測した。

ジオフォンの低周波数領域の感度特性がUドップラーより劣るため、感度補正を行って3~30Hzでほぼ同一のゲイン特性となるよう調整し、得られた時系列波形とそのフーリエスペクトルを図3に示す。両者はよく一致し、Uドップラーがジオフォンと同程度の測定性能を有することが確認できた。



図1 Uドップラー外観

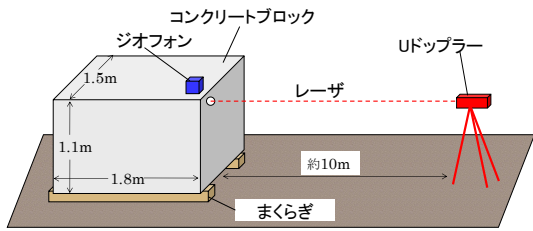


図 2 コンクリートブロックの微動計測実験

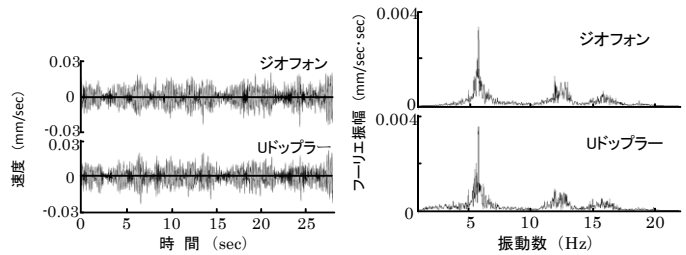


図 3 測定結果(左:時系列波形, 右:フーリエスペクトル)



図 4 現地測定風景

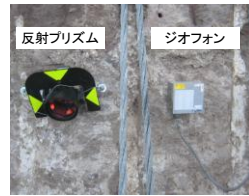


図 5 機器設置状況

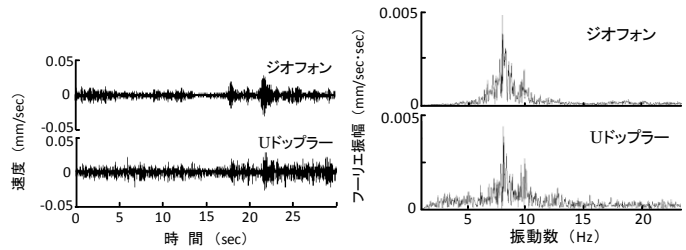


図 6 測定結果(左:時系列波形, 右:フーリエスペクトル)

2.3 不安定岩塊の現地計測実験

次に、実際の岩盤斜面において U ドップラーセンサ 1 台による不安定岩塊の常時微動計測を実施し、より長い測定距離で実岩盤斜面の測定性能を検証した。目視観察により不安定であることが確認され、除去が予定されている岩塊を対象として常時微動の現地計測実験を実施した。図 4 に示すように、U ドップラーは岩盤斜面下の道路脇に設置した。U ドップラーと岩塊間の直線距離は約 200m、鉛直角（仰角）は 35.3° であった。岩塊表面には、U ドップラーのターゲットとして光波測量用反射プリズムを設置するとともに、ジオフォンを設置し(図 5)、常時微動を 200Hz サンプルングで同時計測した。

U ドップラーの計測記録から、ノイズの影響が少ない 30 秒間の波形を選びジオフォンによる同時計測結果と比較したところ、両者はよく一致し、U ドップラーを用いて不安定岩塊の卓越振動数 (8.1Hz) を推定できることが確認できた(図 6)。以上より、U ドップラーを不安定岩塊の微小振動の計測装置として活用可能であると判断した。

3. 岩盤斜面計測システムの提案

3.1 岩盤斜面計測システム

岩塊の崩落危険度を正しく評価するためには、岩塊の挙動を 3 次元で捉えて振動の卓越方向を推定する必要がある。そこで、U ドップラーセンサ 3 台を用いた岩盤斜面計測システム(図 7、図 8)を試作した。同システムは、新たに開発した無線化ユニットを用いて無線接続した 3 台の U ドップラーセンサを基地局で制御して同時計測できるシステムで、3 方向から岩盤斜面の振動を同時計測して得られた各方向成分の波形記録に、ソフトウェア上で座標変換を施して測定点の 3 次元挙動を推定できる。通信には無線 LAN を用いており、センサと基地局間の通信距離は見通し 100m 程度である。A/D 分解能は 24bit であり、200Hz サンプルングで U ドップラーセンサ 3 台の同期計測を実施できることを確認した。また、測定作業の補助装置として、U ドップラーセンサに装着可能な距離・方位測定装置を試作し、電子コンパスによるレーザーの照射方向の正確な把握や、岩盤斜面上の測定点やセンサの位置の簡易測量を実施可能にした。



図 7 岩盤斜面計測システム

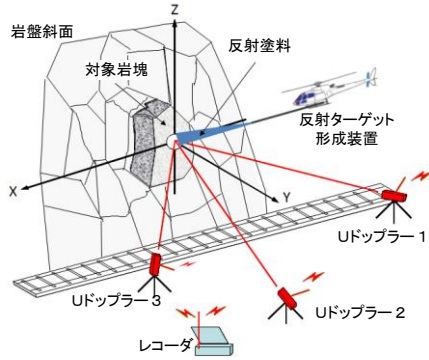


図 8 システムの使用イメージ



図 9 反射ターゲット形成装置

岩盤斜面計測システムは、室内および現地実験によって岩塊振動の3次元計測を実施できることを確認済みであり⁴⁾、現在、安定性評価手法検討のためのデータ収集に活用している。

3.2 遠隔制御式反射ターゲット形成システム

遠方の岩塊の微小振動をUドップラーで測定する場合、現状では岩塊表面のレーザ反射性の向上が不可欠である。そこで、遠隔制御式反射ターゲット形成システム（図 9）を試作した。このシステムは、模型ラジコンヘリコプターに再帰反射塗料の噴射装置と、岩塊の状態確認用の CCD カメラ、斜面への接近警告用の距離計を装備したもので、遠隔操作で岩盤斜面上の任意位置に反射塗料を付着させ、レーザ反射性を向上することができる。CCD カメラが撮影した動画および距離計からの距離警告信号は、模型ヘリコプターから操縦者側に無線送信され、模型ヘリコプターの操縦および塗料噴射装置の操作の支援情報として活用できる。このシステムを用いれば、人のアクセスが困難な岩盤斜面上の不安定岩塊に容易に非接触計測用の反射ターゲットを設置できる。

このシステムは、熟練者の操縦で遠隔地に反射ターゲット形成できることを屋外実験で確認した段階であり、今後、模型ヘリコプターの姿勢制御性能を高めて使用性の向上を図る。

4. 安定性評価手法の提案

4.1 安定性評価の流れ

岩盤斜面計測システムによって得られた岩塊の3次元挙動から、岩塊の振動の卓越方向を推定し、同方向を対象として、不安定岩塊と安定岩塊の振幅、卓越振動数、減衰定数などの振動特性を比較することによって岩塊の安定性を評価する。また、同方向を対象として岩塊の振動モードを推定し、岩塊振動に占める並進成分と回転成分それぞれの寄与を分析することによって、岩塊の崩落モードを推定し、評価に活用する計画である（図 10）。

4.2 岩塊安定性と振動特性に関する実験

より正確な評価を実現するため、力学的安定性の把握が容易な模型（図 11）を用いて、岩塊安定性と振動特性の関係を調査する実験を実施している。コンクリートブロックを岩塊にみたくて安定した台座に接着剤で固定し、接着箇所を徐々

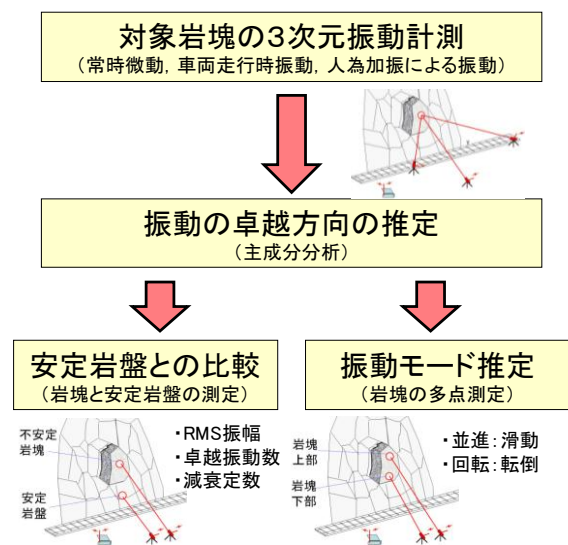


図 10 安定性評価の流れ

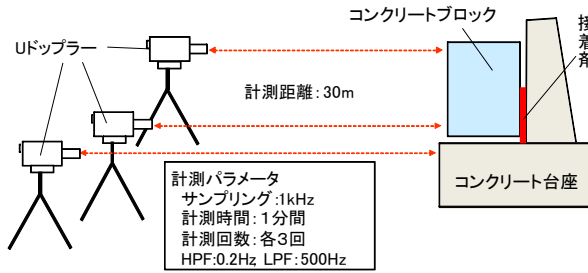
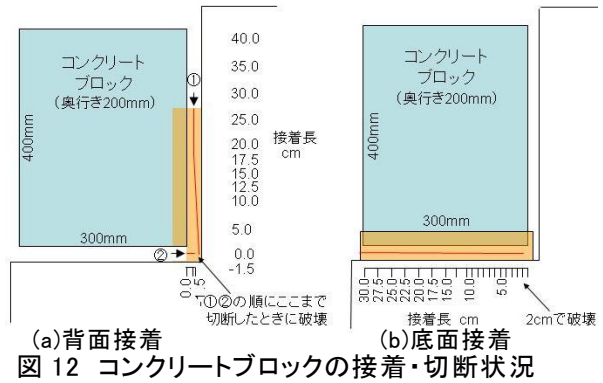


図 11 岩盤斜面計測システム



(a)背面接着 (b)底面接着
図 12 コンクリートブロックの接着・切断状況

に切断してコンクリートブロックを不安定化させ、振動特性の変化を U Doppler で検出する。接着剤として石膏を用い、コンクリートブロックの背面、および底面をそれぞれ接着した場合（図 12）の卓越振動数変化の測定結果を紹介する。図 13 に接着長と卓越振動数の関係を示す。安定性の低下に伴いコンクリートブロックの固有振動数が低下すること、およびその固有振動数変化を U Doppler による遠隔非接触計測で検出できることが確認できた。

現在、同種の実験を多数実施してデータを蓄積しており、今後、解析的な検討も交えて岩塊の安定領域と不安定領域の閾値の設定検討を進める計画である。

5. おわりに

鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により、平成 21 年度から岐阜大学、応用地質（株）、JR 西日本と共同実施している遠隔非接触振動計測による岩塊安定性評価法の研究の進捗状況を鉄道総研担当の計測システム開発の話題を中心に紹介した。計測システムについてはプロトタイプが完成し、安定性評価法については模型実験、現地計測、によるデータ収集および数値解析的検討により評価の定量化に向けた検討を実施している段階である。今後は、岩盤斜面用計測システムおよび遠隔制御式反射ターゲット形成システムの機能向上に取り組むとともに、岩塊の安定性と振動特性の関係を整理して安定性評価法の定量化を図り、遠隔非接触振動計測による実用的な岩塊安定性評価法の提案に向け研究を深度化していく。

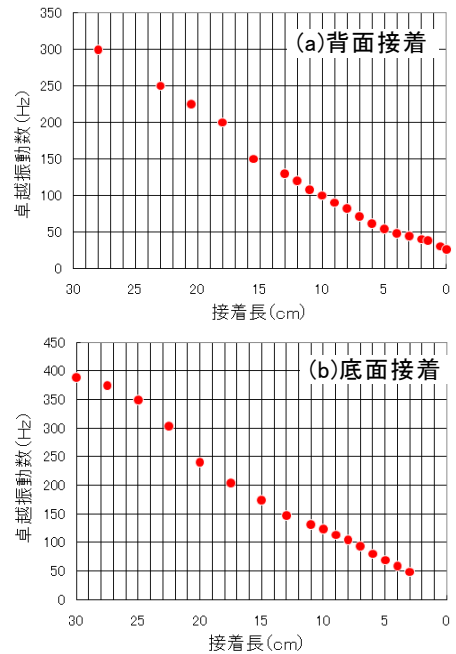


図 13 不安定化に伴う振動数変化

参考文献

- 1) 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.
- 2) 藤澤和範, 浅井健一, 永田雅一, 石田孝司: 不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル (案), 土木研究所資料, 第 4051 号, 2007.
- 3) 上半文昭: 構造物診断用非接触振動測定システム「U Doppler」の開発, 鉄道総研報告, Vol. 21, No. 12, pp. 17-22, 2007. 12.
- 4) 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的検討, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 4, pp. 5-10, 2010. 4.