

# 離れたところから 不安定な岩塊を把握する

村田 修  
構造物技術研究部  
(主幹研究員)

上半 文昭  
同  
(構造力学 主任研究員)

斎藤 秀樹  
応用地質(株)  
(技術研究所 副所長)



むらた おさむ



うえはん ふみあき



さいとう ひでき

現状では、不安定な岩塊を効率よく検出する手法がありません。そこで、私達は、レーザードップラーを利用して、離れたところから不安定な岩塊を検出する手法の開発を進めています。ここでは、その概要を紹介します。

## 離れたところから不安定な岩塊を把握する

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り、十分な監視と対策が必要です。

しかしながら、多数の岩盤斜面を監視するには膨大なコストを必要とするうえ、現状では岩盤斜面上の不安定岩塊を効率よく検出する手法がありません。

従来、不安定岩塊の抽出は地表踏査による目視観察で行われてきましたが、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ています。

なかでも、岩塊に地震計を設置して不安定岩塊の振動特性を調べる手法は、振動特性や振幅などを判定指標として定量的に岩塊の崩落危険度を判定できる有望な手法です。しかし、地震計の設置などを危険な急斜面で作業しなければならない点や、判定手法が必ずしも十分定量的なものとはなっていない点が課題です。

そこで、Uドップラーを用いて離れたところから不安定な岩塊を把握する手法の開発を進めることとしました。これにより、急な斜面上での作業がなくなり、振動計測による岩盤斜面評価手法の効率化や安全性の向上が図られます。また、判定手法のさらなる定量化を目的としています。

## Uドップラーを適用する

図1に示すUドップラーはレーザー光を照射することにより構造物の振動を離れたところから振動計測できる(遠隔非接触計測)システムで、レーザードップラー速度計(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す。

この工夫により、Uドップラーは交通振動や風の影響を受けてセンサ自身に振動が発生しやすい屋外環境においても、測定対象に直接地震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できます。

Uドップラーを用いて数十～数百m離れた場所から岩盤斜面の常時微動計測を実施できるようになれば、従来の振動計測による方法に代わって、①不安定岩塊を抽出する作業や②要注意岩盤の定期的な監視などを容易に実施できるようになると期待されます。

なお現状ではLDVを用いて岩盤斜面を遠隔非接触計測する場合、反射材を用いて岩盤表面のレーザ反射性を向上させる必要があります。そこで、図2に示すように、測定対象に反射材を遠隔設置できる装置の開発にも取り組んでいます。

## 模型実験により精度を確認する

岩盤斜面の常時微動計測に用いられる地震計(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ました。



図1 Uドップラーの構成

図3に示すように、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成分の常時微動を同時計測しました。

図4に示すように、得られた時系列波形のフーリエスペクトルがよく一致しており、本実験条件下において、Uドップラーはジオフォンと同レベルの測定性能を有していることが確認できました。

### 現地計測により精度を確認する

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ました。

図5に示すように、Uドップラーを岩盤斜面下の道路脇に設置しました。Uドップラーと岩塊間の直線距離は約200m、仰角は35.3度でした。岩盤表面には、Uドップラーのターゲットとして、反射性能と遠方からの視認性が高い光波測量用反射プリズムを設置しました。

Uドップラー上部に取り付けたスコープを活用すれば、



図2 反射ターゲット形成装置

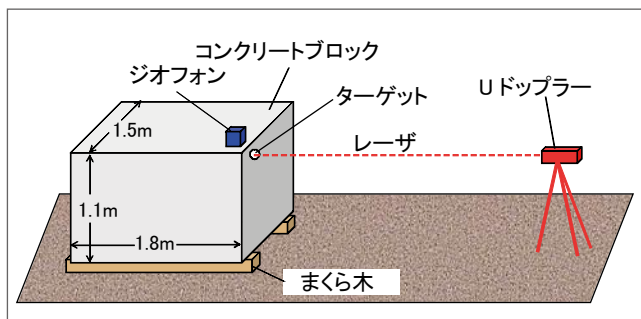


図3 コンクリートブロックの微動測定状況

200m遠方の直径5cm程度のターゲットにもレーザを正確に照射できることを確認しました。

また、Uドップラーの記録から、強風や大型車両の走行などによるとみられるノイズの影響の少ない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ました。また、Uドップラーを用いて岩塊の卓越振動数(8.1Hz)を推定できることを確認しました。

### 模型実験により不安定性を確認する

不安定岩塊を模擬した模型を用いて、模型の不安定性と振動特性の関係を求めることにより、落石の危険度を評価する判断指標を得るための基礎的実験を行うこととしました。

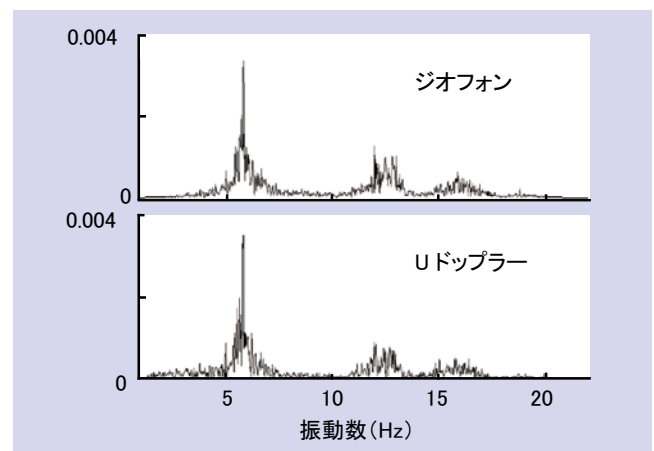


図4 卓越振動数の比較



図5 現地測定状況

図6に示すように、接着材の接着面積を変化させてコンクリートブロックの不安定性を変化させた模型を作成しました。これらの振動特性を、図7に示すように、コンクリートブロックに設置した地震計および30m離れた位置からUドップラーで常時微動を計測することにより求めました。接着材として、DKボンドを用いましたが、接着材の強

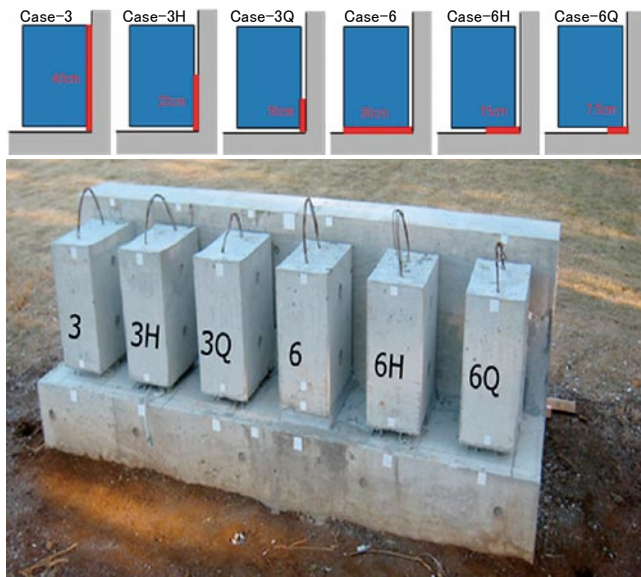


図6 模型実験のケース

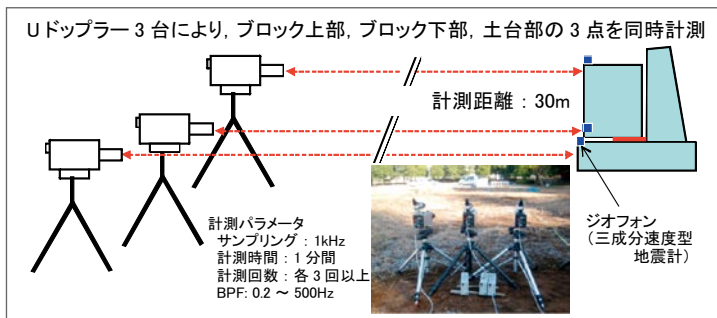


図7 模型実験の計測状況

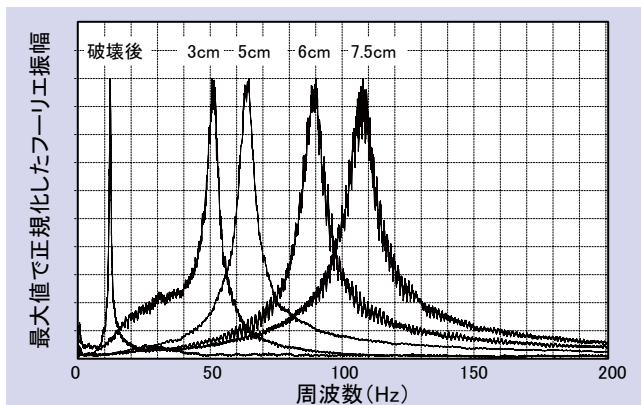


図8 接着部の長さ卓越振動数の関係

度が大きすぎ、不安定と考えられるケースにおいても卓越振動数に大きな変化が見られませんでした。

そこで、Case-6Qにおいて、接着材を前面側からコンクリートドリルによって、順次削除しました。接着部の長さが7.5cm, 6.0cm, 5.0cm, 3.0cmのときに振動計測を行いました。3.0cmよりさらに切除しようとしたところ、接着面が破壊してブロックが転倒しました。

このとき計測された卓越振動数を、接着部の長さごとに図8に示しますが、接着部の長さが短く、不安定性が増すほど、卓越振動数が低下する傾向が見られました。そこで、不安定性の程度を転倒安全率で整理することとしました。

ブロックの重量を $M$ 、接着部の引っ張り抵抗力を $T$ とします。また、重心とブロック端部との距離を $L$ 、接着部の長さを $l$ 、接着部前端を支点 $O$ とすると

図9より、支点 $O$ 周りの転倒モーメントおよび抵抗モーメントはそれぞれ、以下のように表わされます。

$$\text{転倒モーメント} = M \cdot (L - l)$$

$$\text{抵抗モーメント} = T \cdot l / 2$$

接着部の長さが3cmのとき、転倒したことから、転倒モーメント = 抵抗モーメントとして、 $L = 15\text{cm}$ 、 $l = 3\text{cm}$ を上式に代入しますと、 $T = 8M$ となります。

接着部の引っ張り抵抗力は接着部の長さに比例すると考えます。

この関係をいれて、それぞれ、接着部の長さが5cm, 6cm, 7.5cmのときの転倒安全率 = 抵抗モーメント / 転倒モーメントを求めます。これから、それぞれ5cm, 6cm, 7.5cmのときの転倒安全率は3.3, 5.3, 9.3となります。

これと、図8より、転倒安全率と卓越振動数の関係が求められ、図10のようになります。

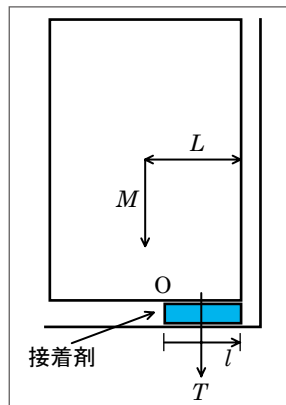


図9 支点O回りのモーメント

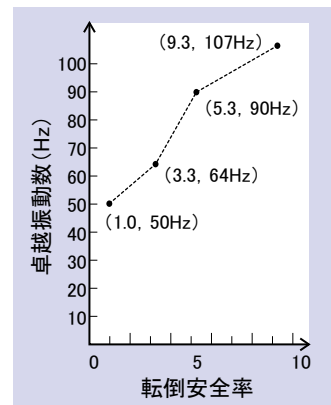


図10 転倒安全率と卓越振動数の関係

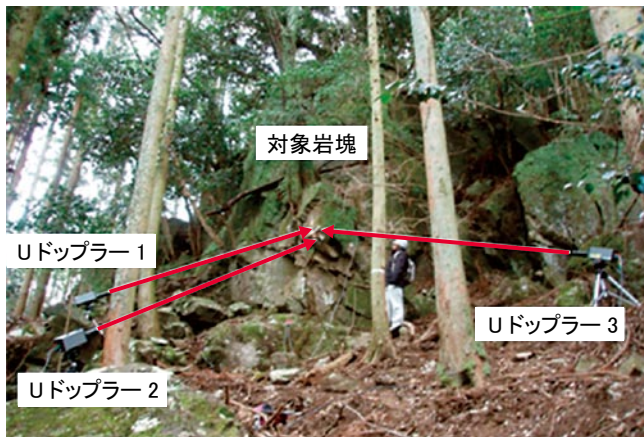


図 11 現場の計測状況

今後、さらに模型実験により、不安定性の程度と振動特性の関係を整理するとともに、数値解析により、模型実験の結果を再現できることを確認したいと考えています。また、数値解析によりパラメータスタディを実施し、実物規模での、不安定性の程度と振動特性の関係を整理し、Uドップラーによる振動計測結果から、落石の危険度を評価する手法を確立することを目指したいと思います。

### 現場での実証試験を行う

模型実験および数値解析により確立した危険度評価法の妥当性を検証するために、現場での実証試験も行っています。従来行われている現場技術者による目視による判断や、地震計での振動特性などから落石に対する危険度を評価したものと、Uドップラーの計測により得られた危険度評価とを対比して、妥当性の確認を行いたいと考えています。

図11に現場の計測状況の例を示します。

### 岩盤斜面計測システムを検討する

岩塊の振動の卓越方向は背面亀裂の方向性などに関係しています。そのため、岩塊の崩落危険度をより正確に評価するためには岩塊の挙動を3次元でとらえて振動の卓越方向を推定する必要があります。

そこで、図12に示すように、岩盤斜面の常時微動を3次元計測できる岩盤斜面計測システムのプロトタイプを開発しました。同システムは無線接続した3台のUドップラーセンサを基地局で制御して常時微動を同時計測できるシステムです。

さまざまな方向から岩盤斜面の常時微動を同時計測し、得られた各方向成分の波形記録にベクトル演算を施して測定点の3次元挙動を推定します。センサと基地局の距離を

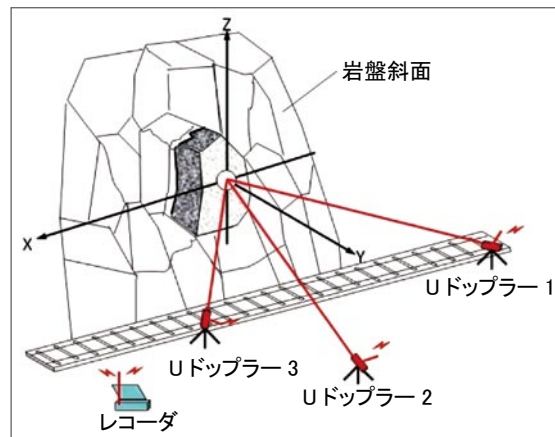


図 12 三次元計測の概要

変化させて通信状態を調査したところ、見通し距離100m以内では通信の途絶や速度低下が発生せず、距離200mでも十分に通信・計測を実施できることを確認しました。

このようにして、3台のUドップラーにより振動の卓越方向を求め、次に、卓越方向の振動特性を計測することにより、危険度を評価できることとなります。

### 公募型研究により研究開発を推進する

以上述べた基礎的な検討により、岩盤斜面評価手法を確立する可能性を得ました。この研究については、鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の公募型研究に応募し、採択されました。

平成21年度から23年度までの3年間で研究する予定です。

平成21年度から22年度にかけて、模型実験および現場試験を実施していきます。あわせて、Uドップラーの改良や反射材の開発を行います。平成23年度には全体のシステムの開発とマニュアルの整備を行い、実用化を図りたいと考えています。RRR

### 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) 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, 2007.12
- 3) 村田修, 上半文昭: 常時微動計測により見えてくるもの, RRR, Vol.65, No.5, pp.10-13, 2008.5
- 4) 上半文昭, 村田修, 小島謙一, 斎藤秀樹, 大塚康範: 遠隔非接触振動計測による岩盤斜面評価手法に関する基礎的検討, 地盤工学会誌, Vol.58, NO.2, pp.30-33, 2010