# 遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価法の研究

鉄道総合技術研究所	正会員	〇上半 文昭,	太田 岳洋,	石原 朋和
応用地質(株)	正会員	斎藤 秀樹,	大塚 康範	
岐阜大学	正会員	馬 貴臣,	沢田 和秀	
西日本旅客鉄道	正会員	深田 隆弘		

## 1. 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 出が不可欠である。そこで、遠隔非接触振動計測技術<sup>1)</sup>の振動計測による落石危険度評価<sup>2)</sup>への適用により、岩塊安定性を離れ 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の開発に取り組んだ。本報告では、鉄道総研を代表とする4機関に より平成 21~23 年度に実施した研究・開発の成果から、計測システムおよび安定性評価手法について述べる。

#### 2. 岩盤斜面の遠隔非接触振動計測システムの開発

(1)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 に示す非接触振動計測システム<sup>3)</sup>を開発した。同システムは鉄道総研がレーザドップラー速度計(LDV)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」<sup>1)</sup>のセンサを複数台無線制御して同期計測できるシステムである。岩塊の3次元挙動から卓越方向を推定し,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)を算出できる。岩盤表面のレ

ーザ反射性を向上できれば、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ることを確認した<sup>4</sup>。

(2) 塗料による岩盤表面の反射性向上技術:LDV で常時微動レベルの岩塊振動を 計測するには、岩塊表面のレーザ反射性向上が必要であった。急崖斜面への反射 プリズム等の設置は困難であるため、再帰反射塗料を用いた反射ターゲットの遠隔形 成手法を検討した。岩盤斜面に適用するにあたり、同塗料が不陸面およびレーザ入 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 100~150m 程度)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 した。近距離に位置する岩塊には、棒状冶具やペイント弾発射機などで同塗料を塗 布できる。

(3) 遠隔制御式反射ターゲット形成装置: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2に示す模型ラジコンヘリコプタを活用した装置を開発した。反射塗料 噴射装置,斜面への接近警告用のレーザ距離計,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である。 GPS・IMU 姿勢制御により,無操縦でも墜落せず熟練者レベルのホバリング(弱風時 ±0.5m)が可能で,短時間の訓練で初心者でも操縦できる。図3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す。目視およびワイヤレスカメラと距離 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を確認した。図4はワイヤレスカメラに よる近接撮影画像例である。高さ50mの斜面中腹に位置する岩塊に接近撮像し,巨 大な落石が両脇の岩盤にはまり込んだ状況を確認できた。

### 3. 振動特性に基づく岩塊安定性評価法

(1)転倒安全率による評価:開発した遠隔非接触振動計測システムは、既存評価技術の計測装置として実用可能である。しかし、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ために、新たに転倒安全率を評価指標として採用した。背面亀裂を有する剥落型岩塊を図5のようにモデル化し、点0周りの転倒モーメントに対する接着部による抵抗モーメントの比を転倒安全率 F<sub>S</sub>(式(1))と定義した。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抵抗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を下回った瞬間にブロックが崩落する。

$$F_s = \frac{(T \cdot l/2)}{Mg \cdot L} = \frac{t_u \cdot l^2 S}{2MgL}$$
(1)

(2) 模型実験による検討:図5のモデルを対象としたコンクリート模型実験を実施した<sup>4)</sup>。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、台座部をカケヤ加振した振動を1kHzサンプリングで非接触測定した。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た。サイズの異なる3つの相似形のブロック、および



図4 ワイヤレスカメラによる近接撮影画像例

キーワード: 岩盤斜面, 安定性評価, 非接触振動測定, LDV, Uドップラー, 転倒安全率

連 絡 先 : 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(構造力学) E-mail: uehan@rtri.or.jp

振動計測

大ブロック

40 × 30 × 20 中ブロック / 30×22.5×15

30×22.5×1. 小ブロック 20×15×10c

<u>ブロック</u> 0 : 回転中心

出现党王

重量加速度

重心面離

全接着

引張強度

\*\*\*

ハイスト

L

 $\cap$ 

Mg

E=7,870MN/r t<sub>i</sub>=2.91MN/m

t<sub>u</sub>=2.0 mm,m A級石膏 *E*=2,290MN/n t<sub>u</sub>=0.85MN/m

 $T(=t_{..}lS)$ 

接着部に物性の異なる2種類の石膏(ハイホーン, A級石膏)を用いた6パタ ーンの実験を実施した。その結果、ブロックの安定性と卓越周波数には高 い相関があり、本実験条件下では、図6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付近にほぼ収束することが分かった(詳細は文献4)参照)。 (3)実験結果の理論解釈:図5のブロックモデルをより単純化したモデル を図7に示す。同モデルの運動方程式および固有周波数fは,

$$t_{u} = E \cdot \frac{l_{C} \cdot \theta_{C}}{d}$$
(5) 
$$f_{c} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ES}{3dML^{2}} \left(\frac{3MgL}{St_{u}}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{3^{\frac{3}{2}}g^{\frac{3}{2}} \cdot E \cdot M^{\frac{1}{2}}}{t_{u}^{\frac{1}{2}} \cdot d \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{1}{2}}}}$$
(6)

(4) 転倒安全率ー卓越周波数ノモグラフによる評価概念:岩盤と岩塊の接着部岩石物性毎に1本の転倒安全率-卓越周波数 曲線が得られるならば、岩石物性値毎の評価曲線を複数まとめた図 9 のようなノモグラフを作成でき、岩石のサンプル試験または 岩種から推定した岩石物性値と、振動計測で得た卓越周波数を照合することにより、対象岩塊の転倒安全率を推定できる。

#### 4. 評価マニュアルおよびソフトウェアの整備

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た。 図 10 に評価の流れおよびソフトウェアによる解析事例を示す。非接触振動計測結果から自動的に転倒安全率を推定可能にした。

#### 5. 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実用可能である。今後は、計測システムの小 型・軽量・簡単化を図るとともに、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を開発する。 謝 辞: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」により実施した。元鉄道総研の村田修博士および現 地試験にご協力いただいた.IR 西日本、IR 東日本各位に深甚の謝意を表する。

参考文献 :1)上半: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)緒方他: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

3)上半他:岩盤斜面評価用遠隔非接触振動計測システムの開発,第66回土木学会年次学術講演会講演概要集,CS9-011,2011 4)斎藤他:遠隔非接触振動計測実験による岩塊の安定性評価法の検討,第67回土木学会年次学術講演会(投稿中),2012

Z. -

ケー