非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価手法の検討

上半　文昭* 太田　岳洋** 石原　朋和**
布川　修*** 斎藤　秀樹# 深田　隆弘##

A Study on the Quantitative Evaluation Method of Rockfall Risk by Remote Vibration Measurement

Fumiaki UEHAN Takehiro OHTA Tomokazu ISHIHARA
Osamu NUNOKAWA Hideki SAITO Takahiro FUKATA

This report introduces the results of study on the evaluation method of rockfall risk by remote vibration measurement. First, the 3D long-distance remote microtremor measurement system and the remote control system to form the reflective targets on a distant rock slope were developed. Subsequently, a new quantitative evaluation method of rockfall risk was proposed based on the result of model experiments by using concrete blocks bonded to the concrete base with different adhesion condition. Furthermore, the remote vibration measurement of real rock slope was executed, and the results corresponded with the results of the visual inspection, the hammering test, and the other vibration investigation method.

キーワード：岩盤斜面，安定性評価，非接触計測，U ドップラー，卓越周波数，転倒安全率

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，定量的な評価法として期待されている振動計測による落石危険度評価[1)2)]に，鉄道総研が開発した遠隔非接触振動計測技術[3)]を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，効率的かつ定量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，まず，新たに開発した岩盤斜面用の非接触振動計測システムおよび反射ターゲット形成装置の概要について述べる。次に，システムによる計測結果と他評価手法との比較結果を示す。最後に，模型実験により岩塊の安定性と卓越周波数の関係を考察し，その結果を参考にして，より定量的な岩塊崩落危険度評価法について検討し，その基礎概念を紹介する。

*　鉄道力学研究部　構造力学研究室
**　防災技術研究部　地質研究室
***　防災技術研究部　地盤防災研究室
#　応用地質株式会社　エンジニアリング本部
##　西日本旅客鉄道株式会社　構造技術室

2．岩盤斜面の遠隔非接触振動計測システムの開発

2.1　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 に示す岩盤斜面遠隔非接触振動計測システムを開発した[4)]。非接触振動計測システムは，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計測システム「U ドップラー」[3)]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（図 2）。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

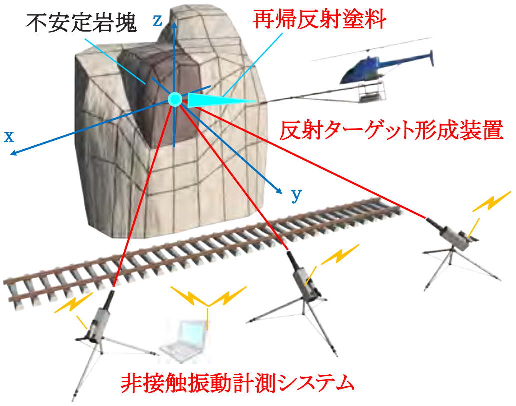

図 1　岩盤斜面遠隔非接触振動計測システム

図２　無線制御・同期計測が可能な非接触振動計測システム

図３　測定対象の不安定岩塊

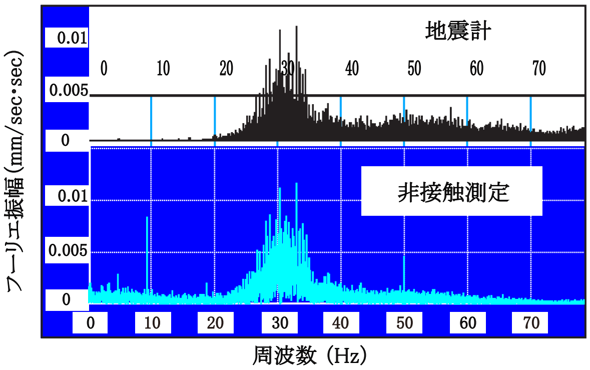

図４　フーリエスペクトルの地震計との比較

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。

開発した非接触振動計測システムによる不安定岩塊（図 3）の測定結果例を示す。図 4 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た。

2. 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，図 5 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

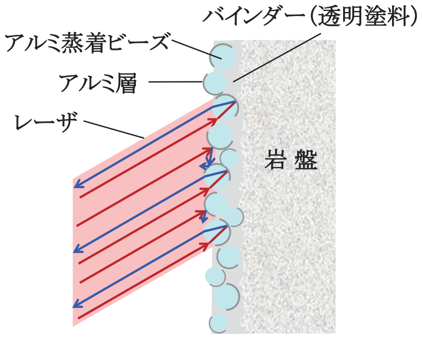

図５　塗料による再帰反射

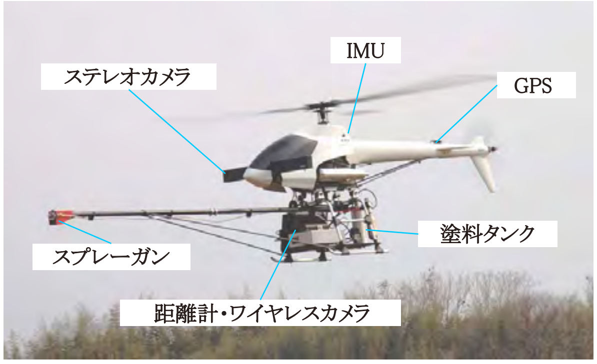

図６　遠隔制御式反射ターゲット形成装置

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，棒状の冶具やペイント弾発射機などで同塗料を塗布できる。

2. 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 6 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（Inertial Measu-rement Unit：慣性計測装置）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 程度）が可能で，短時間の訓練で初心者でも操縦できる。図 7 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，別途，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 8 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

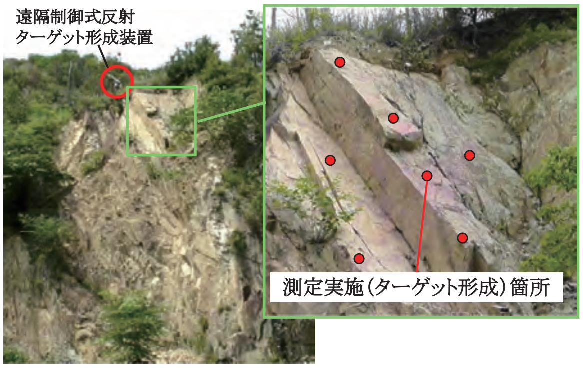

図７　反射ターゲット形成実験結果例

図８　ワイヤレスカメラによる近接撮影画像例

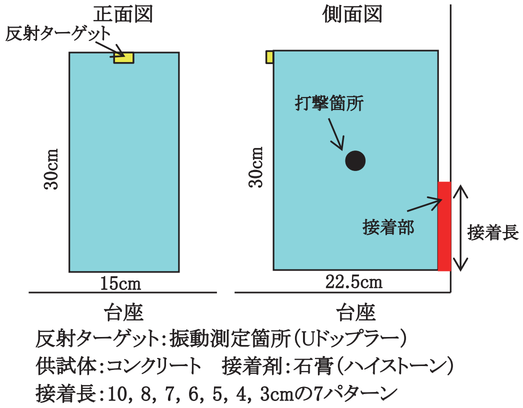

図９　供試体実験の概要

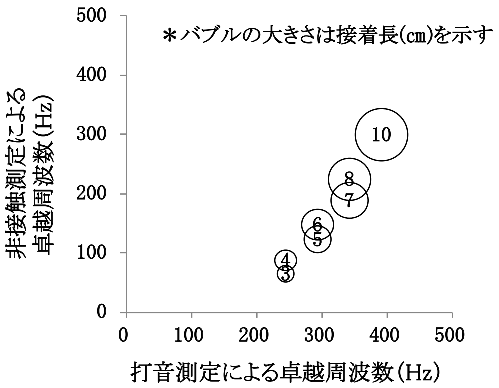

図 10　非接触測定と打音測定の比較（供試体実験）

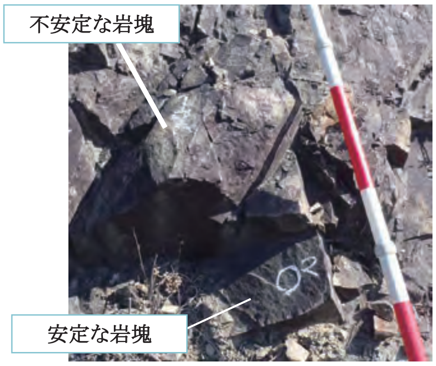

図 11　岩盤斜面中の岩塊の状況

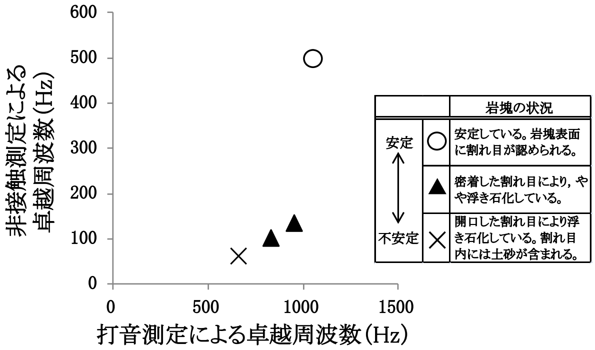

図 12　非接触測定と打音測定の比較（現地測定）

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．目視および他計測法との比較

3.1　打音測定法および目視結果との比較

小岩塊の安定性評価法として鉄道総研が開発した打音測定法[5]と非接触計測手法による卓越周波数の比較を実施した。図９，図 10 に供試体実験の説明および測定結果を示す。供試体の接着長 3 ～ 10 cmの７パターンで卓越周波数を計測した。非接触測定から得られた供試体正面上部での振動の卓越周波数と打撃による音圧波形の卓越周波数を比較すると，いずれも接着長が短いほど周波数が低いことが確認できた。

図 11，図 12 に現地測定での対象岩塊例と測定結果を示す。現地測定では，測定に先立ち目視観察およびハンマーによる打音調査（清音、濁音）により，岩盤斜面中の岩塊の安定性を定性的に判定した。図 12 ではハンマー打撃により清音を発し，岩盤表面に割れ目が見られるが安定な岩塊を○，濁音を発し，開口した割れ目により浮き石化している岩塊を×，それらの中間にあたるやや濁音を発し，密着した割れ目によりやや浮き石化している岩塊を▲で示している。測定の結果，非接触測定による周波数と打音の周波数いずれも安定な岩塊にくらべて不安定な岩塊の卓越周波数が低いことがわかった。

以上の供試体実験および現地測定から、非接触測定で

得られる岩塊の振動の卓越周波数と打音測定法の結果には相関があり，岩塊の安定性と関係を有することが確認できた。

3.2　目視結果および既存の評価基準との比較

打音測定法は直径 50cm 程度までの小岩塊を対象とした評価手法である。より大きな岩塊については，目視結果，道路分野で用いられている既存の評価基準[1]との比較を行った。結果を表 1 に示す。目視による岩塊安定性の定量的な評価は容易でないが，極めて危険であると判定され撤去準備中の岩塊や，背面に大きな亀裂がみられ不安定である可能性が高い岩塊は，周辺岩盤が 100Hz 以上の卓越周波数を示す中，既存評価基準の不安定領域の閾値と対応する 30Hz 以下の卓越周波数を有することを確認した。また，目視では不安定と評価されたが，卓越周波数が周辺岩盤よりは低いものの 70Hz の値を示す岩塊もみられ，目視と振動計測による評価の差の原因は特定できていない。目視評価側の精度不足の可能性もあるが，このようなケースに備え，より詳細な評価手法の開発が必要であると考える。

表 1　目視結果と非接触計測による卓越周波数

測定地域	目視結果	岩塊長径	対象岩塊の卓越周波数	周辺岩盤の卓越周波数
青森県	極めて危険で撤去準備中	5.0m	8.1Hz	100Hz 以上
兵庫県	背面亀裂があり明らかに不安定	1.5m	29Hz	100Hz 以上
岐阜県	背面亀裂があり明らかに不安定	1.2m	30Hz	100Hz 以上
東京都	不安定	1.5m	70Hz	100Hz 以上

4．振動特性に基づく岩塊崩落危険度評価手法

4.1　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必要があると考え，岩塊の転倒安全率について考察することにした。背面亀裂を有する剥落型岩塊を図 13 のようにモデル化し，点 O 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_S（式 (1)）と定義する。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 を下回るとブロックが崩落する。

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

4.2　模型実験による検討

図 13 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[6]。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，および接着部に物性の異なる 2 種類の石膏（ハイストーン，A 級石膏）を用いた 6 パターンの実験を実施した。図 14 に，実験で得られた接着長と卓越周波数の関係を示す。ブロックの安定性と卓越周波数には高い

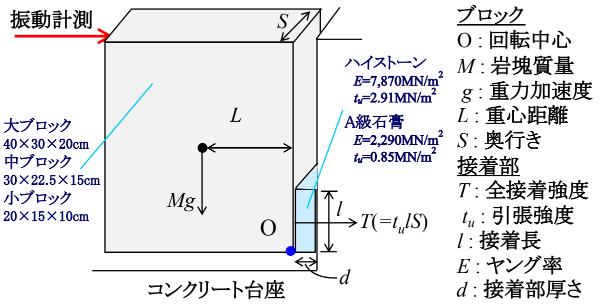

図 13　不安定岩塊を模擬したコンクリートブロック模型実験

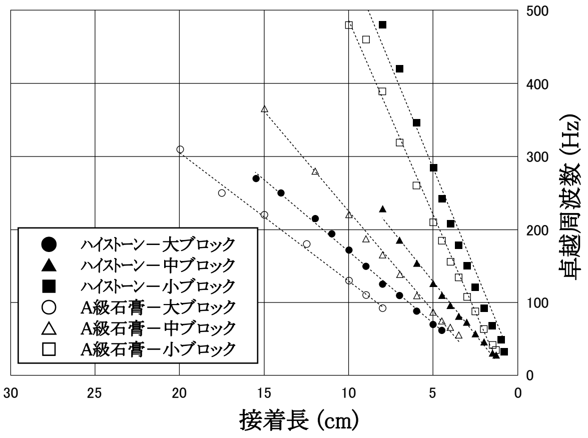

図 14　接着長と卓越周波数の関係

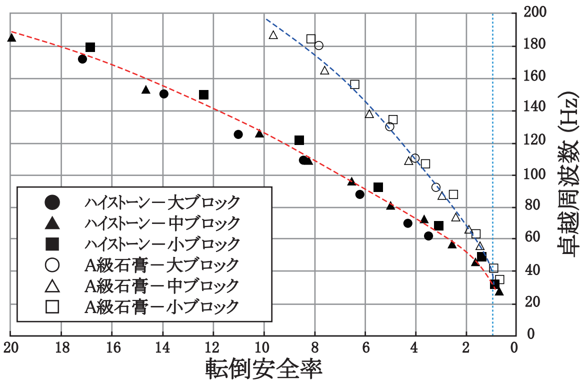

図 15　転倒安全率と卓越周波数の関係

相関があることが確認できた。さらに，卓越周波数を転倒安全率で整理したところ，本実験条件下では，図 15 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。

4. 3　実験結果の理論解釈

図 13 のブロックモデルをより単純化したモデルを図 16 に示す。同モデルの運動方程式および固有周波数 f は，次式の通りとなる

$$ML^2\ddot{\theta} + \frac{ESl^3}{3d}\theta = 0 \tag{2}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{ESl^3}{3dML^2}} \tag{3}$$

ここで，転倒安全率と卓越周波数 f の，スケール依存性を調べる。S, L, l がスケールに比例し，相似形のブロックの質量 M がスケールの 3 乗に比例するので，転倒安全率はスケールの -1 乗に比例する。一方，接着部厚さ d がスケールに比例する場合，卓越周波数 f もスケールの -1 乗に比例する。共にスケールと逆比例の関係にあり，スケールが転倒安全率と卓越周波数の関係に影響を及ぼさないと推察できる。次に，崩落発生時の卓越周波数について考察する。接着長が短くなり，ブロックが崩落する直前に抵抗モーメント M_r と転倒モーメント（MgL）が等しくなるので，接着部の変形状態を図 17 のように仮定し，崩落発生時の接着長および角度をそれぞれ l_C，θ_C とすれば，次式の通りとなる。

$$M_r = \int_0^l y \cdot pSdy = \frac{E\theta_C S l_C{}^3}{3d} = MgL \tag{4}$$

接着部の破壊が上端部で発生するものとし，その際の接着剤の破断強度（引張強度）を t_u とすれば，式 (5) が得られ，式 (3)，(4)，(5) から崩落発生時固有周波数 f_C が式（6）で得られる。d がスケールに比例する場合，f_C はスケールの -1/4 乗に比例し，スケールへの依存が比較的小さく，接着剤物性 $(E/t_u{}^{3/2})^{1/2}$ に比例することがわかった。本検討により，実験結果の妥当性が確認され，背面接着ブロックの振動特性の理論追究が可能となった。

$$t_u = E \cdot \frac{l_C \cdot \theta_C}{d} \tag{5}$$

$$f_C = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{ES}{3dML^2}\left(\frac{3MgL}{St_u}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3^{\frac{1}{2}} g^{\frac{3}{2}} \cdot E \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot}{t_u{}^{\frac{3}{2}} \cdot d \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{1}{2}}}} \tag{6}$$

4. 4　転倒安全率－卓越周波数ノモグラムによる評価

岩塊崩落危険度の新しい評価手法として，転倒安全率－卓越周波数ノモグラムによる評価手法について検討する。先の実験・解析結果によれば，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。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

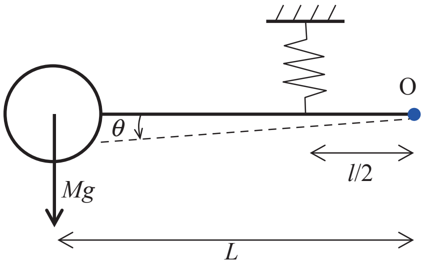

図 16　ブロックモデルの振動子モデル化

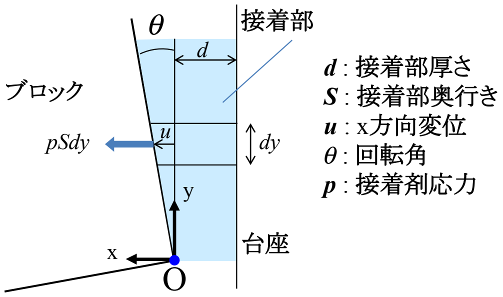

図 17　接着部の微小変形

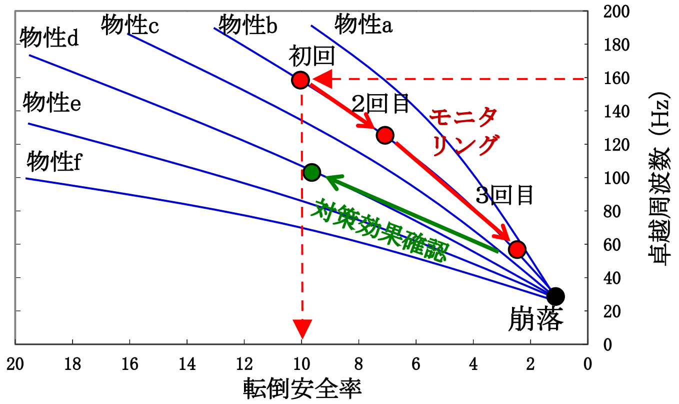

図 18　評価ノモグラムのイメージ

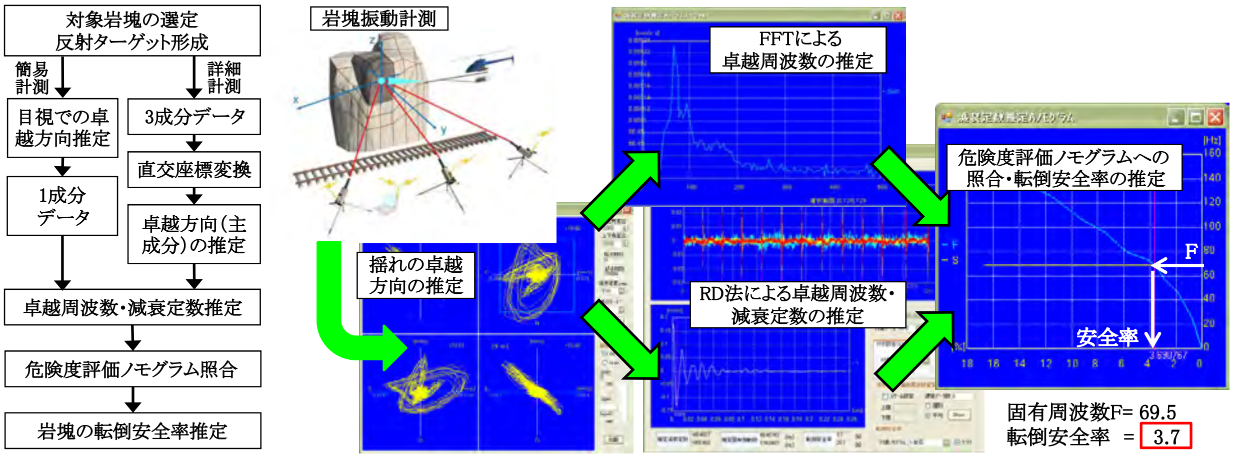

図 19　本手法における岩塊安定性評価の流れと解析・評価ソフトウェアによる解析事例

周波数曲線を求め，それらを複数まとめれば図 18 のようなノモグラムを作成できる。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る。安定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よる推定値を用いることとする。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，また，接着工法などで対策を施した際にはその効果を定量的に把握することができるものと考えられる。

5．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 19 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。ここで提案した転倒安全率－卓越周波数ノモグラムによる評価手法だけではなく，当面は，既存評価基準なども考慮して多面的な評価を実施できるよう，RD 法（Random Decrement technique）による減衰定数の推定機能や，累積振幅比の計算機能なども付加した。これらの成果により，非接触振動計測結果から岩塊の転倒安全率を推定する一連の手順が整理された。

6．おわりに

岩盤斜面の微小な振動を離れた場所から測定できるシステムを開発してその性能を確認するとともに，岩塊の振動特性からより定量的に崩落危険度を評価する手法について検討した。

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，より一層の小型・軽量・簡単化を図る。評価手法は，まだ基礎概念を提案した段階であり，今後，実岩塊のデータを取得して手法の適用性を検証するとともに，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鉄道事業者の各位に深甚の謝意を表する。

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.123-135，2003.12
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 ドップラー」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検討, 鉄道総研報告, Vol.24，No.4，pp.5-10，2010.4
5）川越健，石原朋和，浦越拓野，太田岳洋：岩盤斜面における岩塊の安定性に関する評価手法，鉄道総研報告 , Vol.25, No.7，pp.31-36, 2011
6）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