

岩塊形状および振動特性の 遠隔非接触計測・評価手法の開発

上半 文昭^{1*}・箕浦 慎太郎¹

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
*E-mail: uehan.fumiaki.41@rtri.or.jp

筆者らが開発する遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価手法への適用を目的として、新たに空撮測量システムと数値解析モデル化プログラムを開発した。空撮測量システムは、対象岩塊をステレオカメラで空撮し、得られた画像の相関解析により岩塊形状を3次元データ化する。数値解析モデル化プログラムは、岩塊の形状データを立方体要素で近似して岩塊の3次元FEM解析モデルを自動作成する。得られたFEM解析モデルの支持条件と作用荷重によるパラメータ解析を実施して岩塊の卓越周波数と背面接着部に生じる最大引張応力の関係を求め、そこに非接触振動計測で取得した岩塊の卓越周波数などを照合することにより、対象岩塊の平時ならびに地震時の崩落危険度を評価することができる。

Key Words : rock slope, remote measurement, rockfall risk, image measurement, aerial photography

1. はじめに

筆者らは、鉄道の落石被害の予防を目的として、沿線の岩盤斜面中の不安定な岩盤ブロックを遠隔非接触計測で検出する手法の開発に取り組んでいる¹⁾。同手法は、振動計測による落石危険度評価^{2,3)}をより簡単、安全に実施できるようにするために、常時微動などの微小な振動を遠隔非接触測定できる非接触振動計⁴⁾を用いて取得した岩塊の振動特性、主として卓越周波数に基づいて岩塊の崩落危険度の推定を試みるものである。現状、非接触振動計測技術については実用レベルに達している⁵⁾。

一方、崩落危険度の評価については実験ならびに解析的検討により、岩塊のモーメントのつり合い⁶⁾や基盤岩との接合部に生じる引張応力と岩石の引張強度の関係⁷⁾に着目した簡易な評価手法を提案した段階であり、評価精度向上のためには、岩塊の規模や形状ならびに支持状態をより詳細に考慮する必要があると考える。

ここでは、個別岩塊のより詳細な崩落危険度評価法の開発を目的として、空撮による岩塊形状の取得ならびに岩塊の数値解析モデル化について検討した。図-1にそれらの技術を活用した崩落危険度評価の流れを示す。まず、岩盤斜面中の不安定岩塊の形状を空撮で取得する。次に得られた岩塊形状と岩石サンプルの材料物性を用いて岩塊の数値解析モデルを作成する。そして、同モデルを用いて基盤岩との接着状態と作用荷重によるパラメータスタディを実施し、岩塊の卓越周波数と接着部に生じる最大引張応力の関係を求め、そこに非接触振動計測で取得した実測卓越周波数を照合することによって対象岩塊の崩落危険度を評価する。これら一連の作業を簡易

に実施可能なツールを開発することが筆者らの目的である。

そこでまず、斜面下方からの視認・測量が難しい岩塊の外観情報を簡易に把握することができる空撮測量システムを開発した。同システムは、ラジコン模型ヘリコプター（以下、模型ヘリ）に防振化したステレオビデオカメラを搭載したもので、撮影画像の相関から岩塊形状を3次元点群として取得する。次に、3次元点群から対象岩塊の3次元FEM解析モデルを効果的に生成する岩塊形状の数値解析モデル化プログラムを開発した。さらに、得られたモデルによる数値解析結果を利用して岩塊の崩落危険度を評価する手法を提案した。

以降では、まず開発したシステムとプログラムについて説明し、模型実験による手法の検証結果ならびに実岩塊の評価事例を紹介する。

2. 空撮測量システム

(1) システムの概要と活用目的

図-2に空撮測量システムの概要を示す。空撮測量システムは、自動操縦化を図った全長1.6m、機体重量8kg、搭載重量約7kgの26ccガソリンエンジン模型ヘリにステレオビデオカメラを搭載したものである。約15分の連続飛行が可能で、地上局で撮影画像のリアルタイムでの確認、撮影の開始・停止を行える。岩塊に接近して様々な方向から動画を撮影し、死角（データの抜け）がない岩

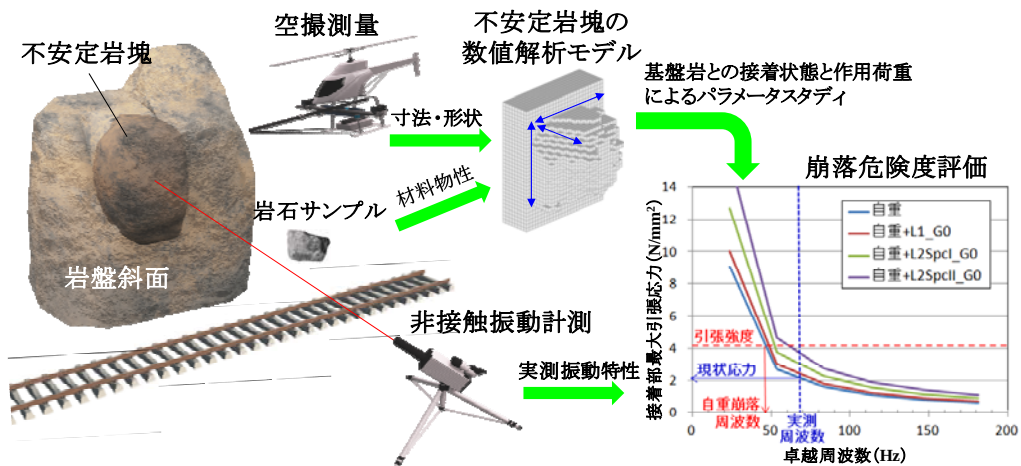


図-1 非接触振動計測，空撮測量，数値解析モデル化手法を用いた岩塊の崩落危険度評価の流れ



図-2 空撮測量システムとステレオカメラユニット

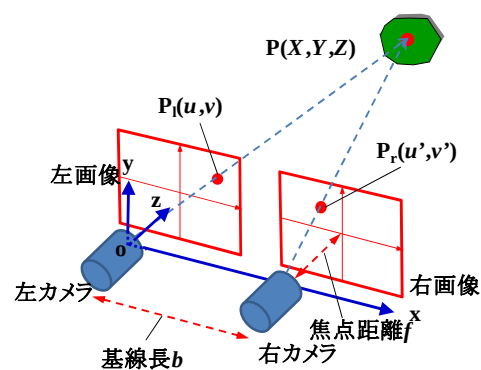


図-3 平行ステレオカメラの測定原理

塊の概略形状を取得することを目的としており，接近撮影時に誤差数mm程度，撮影距離10m程度で誤差数cm程度を目標として開発に取り組んだ。

搭載したステレオビデオカメラは，基線長を 500mm～700mm に変更でき，130 万画素のステレオカラー画像を撮影速度 15fps で撮影する仕様とした。事前に市販のカメラを同模型へりの前頭部に設置して予備実験を行ったところ，模型へりの振動による不具合が発生したため，耐振動性能の高いカメラと防振材でステレオカメラユニットを製作し，模型へり機体の脚部に設置した。

(2) ステレオ画像関連法

本システムで採用した平行ステレオカメラによるステレオ画像関連法の概要を説明する。計測パラメータが等しく既知のカメラを図-3 のように光軸を平行にして基線長 b の間隔で配置する。ある点 P を撮影した際に，焦点距離 f の位置にある各カメラの画像に写る点 P の位置を各カメラ座標上の点 $P_l(u,v)$ ， $P_r(u',v')$ とするとき，三角測量の要領で点 P の座標 (X,Y,Z) が式(1)で求められる。ここで，点 P の座標は左側カメラの座標系を基準にしている。

$$X = \frac{bu}{u-u'}, Y = \frac{bv}{u-u'}, Z = \frac{bf}{u-u'} \quad (1)$$

本システムでは，2 台のカメラの相対的な位置関係やカメラの投影モデルに必要なパラメータなどの幾何学情報を，特定のパターンを持ったキャリブレーション板を撮影して画像データを解析することにより事前に求め，左右画面上の対応点をエピポーラ線上の自動探索によって検出し，撮影対象の 3 次元点群データを自動で算出する。さらに，システム上で，岩塊形状の 3 次元表示，手動指示による任意点間距離の計算を行う。

(3) 飛行実験による性能確認

まず，製作したステレオカメラユニットの防振性能と空撮測量精度の確認を目的として，図-4 に示すように地上 4m の位置に設置した寸法が既知の模型の空撮実験を実施した。その際に模型へりの脚部とカメラ近傍の 2 箇所の飛行中の振動を同時計測した。

図-5 に加速度波形を示す。模型へり脚部に対してカメラ近傍の振動が十分に低減されていることが確認できた。表-1 に模型上の 2 点間距離の測量結果の一例を示す。測距誤差は概ね 3%以内であり，開発目標であった近接撮影時に数 mm 程度，撮影距離 10m 程度で誤差数



図-4 空撮実験状況ならびに撮影用模型

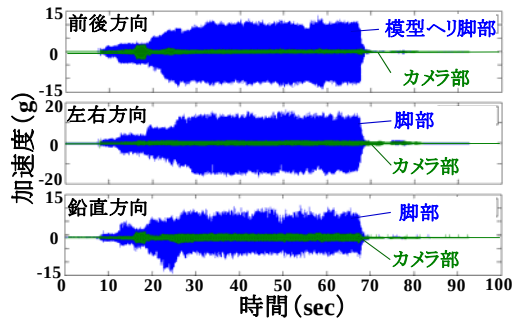


図-5 模型ヘリ脚部とカメラ部の加速度応答の比較

cm 程度の精度を確保できており、岩塊の概略形状の取得に十分な性能があることが確認できた。

平行ステレオカメラによる測量では、一般に被写体の奥行き方向の精度に課題があるが、本システムは対象物の側方に回り込んで撮影することにより奥行き方向の測量精度を確保できた。またステレオ動画を撮影しているため、撮影画像からブレなどの影響が少なく適切な角度から撮影された画像を選択することによって測量精度を確保することができた。

3. 死角のない岩塊の形状データの作成

空撮測量装置によって岩塊の形状データが取得可能となったが、岩盤斜面から突出した岩塊を撮影する場合、1方向からの撮影画像には必ず死角が生じ、岩塊の形状を正確に捉える事ができない。そこで、対象岩塊を多方向から撮影し、得られた形状データを適切に張り合わせることによって、死角のない岩塊形状データを作成する。

まず、空撮測量装置を用いて、図-6(a)の要領で評価対象岩塊を多方向から撮影する。次に図-6(b)に示すように画像相関法により複数の点群データを作成するとともに、各点群データの輝度情報から対応点を推定し、次式(2)に示すアフィン変換により座標変換して複数の画像を重ね合わせる。 r_{ij} は回転行列要素、 t_k は平行移動行列要素を表わしている。

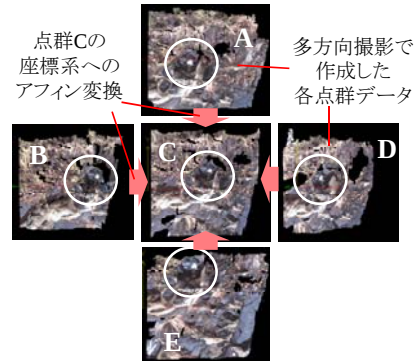
$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_0 \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

表-1 空撮による模型上の2点間距離の測量結果例

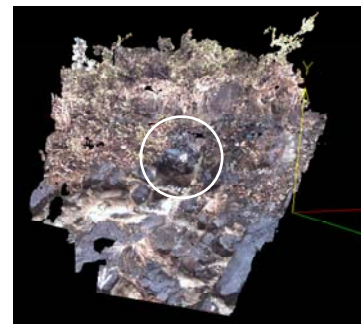
撮影方法	撮影距離	実寸	計測値	誤差(%)
地上静止撮影	2.5m	900mm	899.3mm	0.1%
地上静止撮影	2.5m	900mm	902.1mm	0.2%
空撮	3.0m	600mm	595.1mm	0.8%
空撮	3.0m	900mm	901.1mm	0.1%
空撮	3.0m	210mm	209.1mm	0.4%
空撮	3.0m	928mm	922.1mm	0.6%
空撮	3.3m	928mm	914.8mm	1.4%
空撮	3.3m	210mm	206.0mm	1.9%
空撮	7.5m	600mm	598.9mm	0.2%
空撮	8.1m	928mm	905.0mm	2.5%
空撮	8.1m	210mm	203.0mm	3.3%
空撮	11.0m	600mm	616.9mm	2.8%



(a) 対象岩塊の空撮



(b) 点群データの作成・重ね合わせ



(c) 重ね合わせ後の点群データ

図-6 死角のない岩塊形状データの撮影・作成方法

その結果、図-6(c)に示す撮影時の死角によるデータ抜けや撮影奥行き方向の測量誤差の影響が少ない岩塊形状の3次元点群データが得られる。

4. 岩塊の形状の数値解析モデル化

次に、岩盤斜面の点群データから、評価対象岩塊の数値解析モデルを作成する手法とプログラムを開発した。以下、図-6 に示した実岩塊の点群データを用いてモデ

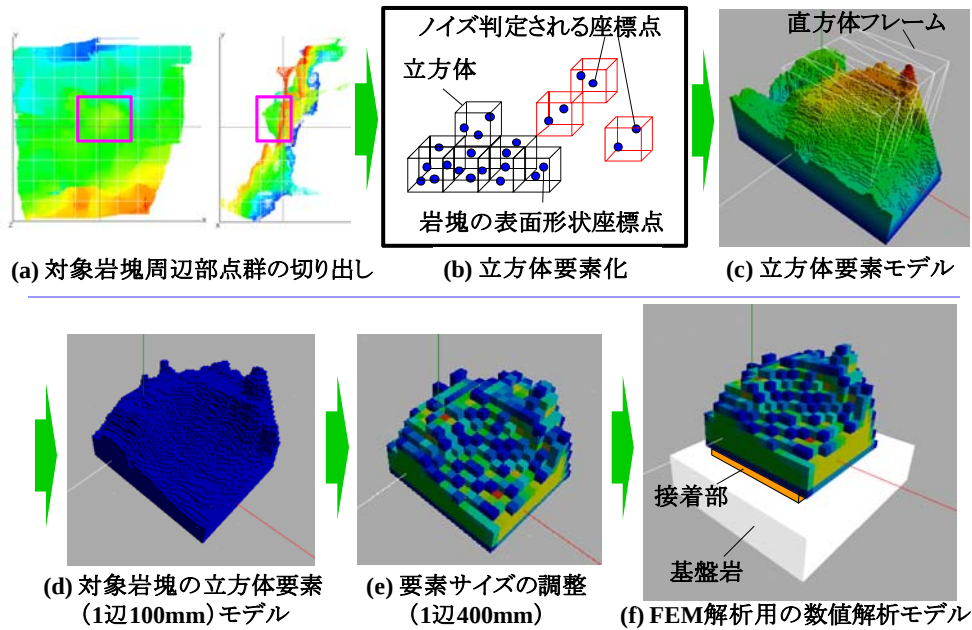


図-7 岩塊形状（3次元点群）データの数値解析モデル化の流れ

ル化手法の流れを説明する。

図-7(a)は図-6の点群データを距離によるコンターで示したものであり、まず同図から対象岩塊周辺部分の切り出しを行う。次に、切り出された点群データに対して、図-7(b)に示す立方体要素を用いた形状近似およびノイズ除去手法を適用して、岩盤斜面の概略形状モデルを作成する。点群が存在する領域とその内部に規則的に立方体要素を配置し、面で接する要素が存在しない立方体要素に含まれた座標点はノイズとして立方体要素ごと削除する。この処理によって図-7(c)に示す立方体要素モデルが作成される。次に、得られた立方体要素モデルから、岩盤斜面の形状や傾斜を参考にして解析対象とする岩塊を直方体のフレームで切り出して（図-7(d)）、要素サイズを調整する（図-7(e)）。最後に、岩塊を支持する基盤部と接着部を設定し、3次元 FEM 解析モデルを作成する（図-7(f)）。現状、岩塊と基盤岩との接着部は、直方体による各切り出し平面（最大5面）に設定することができ、接着位置や接着面積も自在に設定できるので、支持状態のパラメータ解析用の数値解析モデルを容易に作成できる。

5. 模型実験による手法の検証

実験模型を対象とした数値解析モデル化および作成したモデルを用いた卓越周波数の解析を実施した。図-8に模型実験の概要を示す。実験では、不安定岩塊を模擬した石膏ブロックの背面に設けた接着部を徐々に切断し、石膏ブロックの振動の卓越周波数の低下を非接触振動計測により検出した。初期の接着部の位置は模型背面の左下方、サイズは縦11.3mm×横5.3mmとし、接着部を上部から切断して縦方向の接着長を徐々に短くした。

図-9(a)に石膏ブロック模型を図-9(b)、(c)に石膏ブロック模型の形状データ（3次元点群）を1辺10mmの立方体要素で近似して作成したモデルをそれぞれ示す。図-

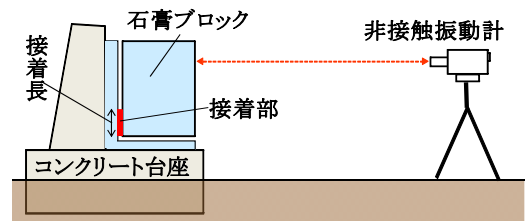


図-8 石膏ブロック模型の振動計測実験

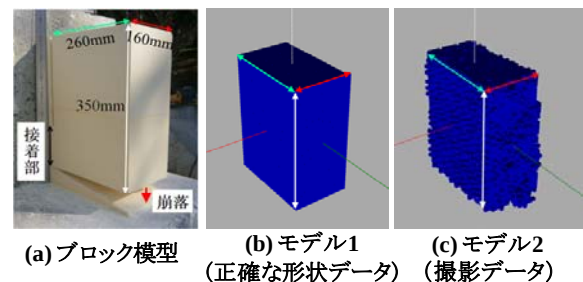


図-9 石膏ブロックとその数値解析モデル

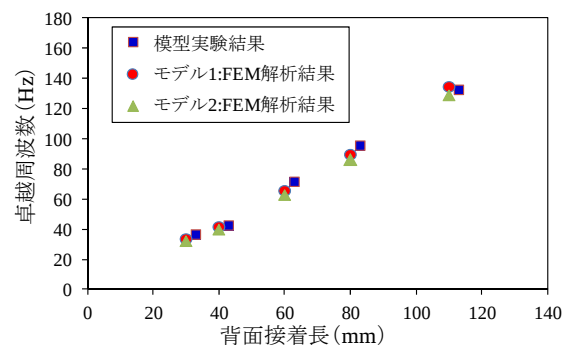


図-10 石膏ブロックの背面接着長と卓越周波数の関係

9(b)のモデル1は参考のためCADで作成した正確な3次元点群を用いて作成したモデルである。正確な形状データを用いれば開発した数値解析モデル化プログラムでブロックの形状を正しくモデル化できることが確認できた。一方、図-9(c)のモデル2はステレオ撮影したデータから

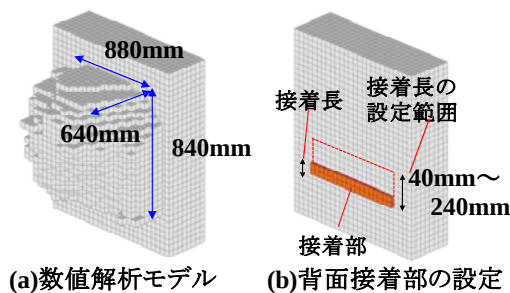


図-11 実岩塊の数値解析モデルと背面接着部の設定方法

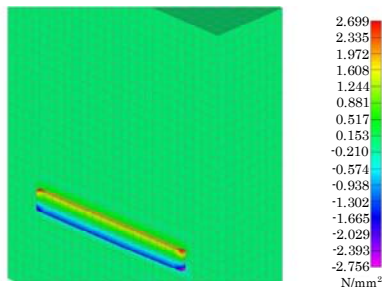


図-12 接着部の応力分布の解析結果例（接着長 80mm）

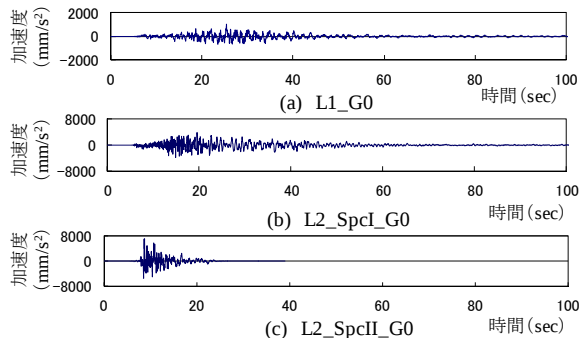


図-13 解析に用いた設計地震動

得た 3 次元点群で作成したモデルである。測量誤差とノイズの影響で得られた解析モデルの表面に凹凸が生じ、質量が約 9% 増加した。

図-10 に石膏ブロックの背面接着長と卓越周波数の関係の実験結果ならびにモデル 1 およびモデル 2 を用いた FEM 解析結果を示す。数値解析モデルには、基盤部と接着部を設定し、室内試験による石膏の材料物性値（比重 1.89, 弾性係数 $1.09 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ）を与えた。そのうえで解析ソルバとして NASTRAN を用いて 3 次元 FEM 解析を行った。各結果の差は小さく、提案手法による形状のモデル化およびブロックの卓越周波数の解析が可能であると考えられる。

6. 実岩塊の平時・地震時の崩落危険度評価

先に図-7 に示した実岩塊の 3 次元 FEM 解析モデルを用いて、対象岩塊の平時および地震時の崩落危険度評価を試みた。図-11 に 4 章で作成した数値解析モデルと同モデルの岩塊部と基盤部との接着部の設定を示す。岩塊背面の基盤岩との接着部が上部から徐々に浸食されて減

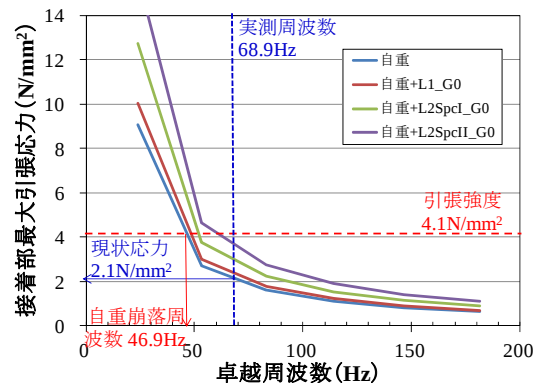


図-14 実岩塊の卓越周波数と接着部最大引張応力の関係

表-2 実岩塊の崩落周波数と転倒安全率の評価結果

作用力(入力地震動)	崩落周波数(Hz)	転倒安全率
自重	46.9	1.95
自重+L1_G0	48.7	1.78
自重+L2SpcI_G0	52.3	1.37
自重+L2SpcII_G0	62.0	1.11

少し、崩落危険度が増加する状況を仮定した。対象岩塊の材料物性値は比重 2.50, 弾性係数 $3.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, ポアソン比 0.3, 引張強度 4.1 N/mm^2 とし、解析ソルバとして NASTRAN を用いた。なお、別途、対象岩塊の非接触振動計測を実施したところ、現況の実測卓越周波数は 68.9Hz であった。

図-12 に接着部の応力分布の解析結果例（接着長 80mm, 自重作用時）を示す。接着部の上部、特にその端部で引張応力が高まることが確認できた。同様の解析を異なる接着長、作用荷重において実施した。本検討では接着長を 40~240mm の範囲で 40mm 刻みで変化させ、作用荷重として自重、ならびに図-13 に示す 3 種の設計地震動⁷⁾を与えた。平時は自重のみを作用させた静的解析、地震時は自重と地震動を作用させた動的解析を行い、簡単のため接着部の引張応力が岩石の引張強度 (4.1 N/mm^2) を上回った際に、岩塊崩落が発生するものと仮定した。

図-14 に 3 次元 FEM 解析で求めた対象岩塊の卓越周波数と接着部の最大引張応力の関係図を示す。同図に対象岩塊の実測卓越周波数 (68.9Hz) を照合すると、自重による曲線と交わる点から、対象岩塊の接着部に生じている現況の最大引張応力 (2.1 N/mm^2) を推定できる。また、同図に対象岩塊の引張強度 (4.1 N/mm^2) を照合し、自重による曲線と交わる点を求めれば、自重での崩落が発生する際の周波数 (46.9Hz) を推定できる。このように同図を用いれば、同様に各地震動作用時に岩塊接着部に生じる最大引張応力や、各時振動によって崩落が発生する周波数を推定することができる。表-2 はそれらの解析結果をまとめたものである。なお表中の転倒安全率は、

次式(3)で定義⁹⁾したものである。

$$\text{転倒安全率} = \frac{\text{岩石の引張強度}}{\text{各作用力による接着部の最大引張応力}} \quad (3)$$

これらの結果から、現状、対象岩塊は早晩に崩落する危険はないが、今後、背面亀裂の浸食が進み、卓越周波数が60Hz程度まで低下した場合にはL2地震時の崩落の危険性が、50Hz以下まで低下した場合にはL1地震動および自重による崩落の危険性が高まった状態にあると評価することができる。

7. まとめ

遠隔非接触計測による岩盤斜面中の不安定岩塊の崩落危険度評価法の精度向上を目的として、岩塊形状の取得ならびに岩塊の数値解析モデル化について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 斜面下方からの視認・測量が難しい岩塊の外観情報を簡易に取得することができる空撮測量システムを開発し、岩塊の概略形状の取得に十分な測距精度（誤差3%程度）を有していることを確認した。
- (2) 空撮測量システムで取得した複数の形状データの重ね合わせプログラムを作成し、同プログラムを用いることによって撮影方向による死角の無い実岩塊の形状データを作成できることを確認した。
- (3) 岩塊形状（3次元点群）データから対象岩塊の3次元FEM解析モデルを生成する数値解析モデル化プログラムを開発し、同プログラムで実験模型の解析モデルを作成し、背面接着長と卓越周波数の関係を十分な精度で解析できることが確認できた。
- (4) 空撮測量システムと数値解析モデル化プログラムで作成した3次元FEM解析モデルによる数値解析結果を利用して岩塊の崩落危険度を評価する手法を提案し、

実岩塊の評価事例を示した。

本検討により、岩塊の背面の接着状況、材料物性、作用荷重などの諸条件から岩塊の崩落危険度を推定できる一連のツールが開発された。引き続き、崩落危険度評価を実施した岩塊の追跡調査や実験・解析検討の追加により評価基準の検証ならびに改良を実施する。

謝辞：本研究開発は、国土交通省・鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 上半文昭，斎藤秀樹，太田岳洋，石原朋和，大塚康範，馬貴臣，沢田和秀，深田隆弘：非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価システムの開発，岩の力学国内シンポジウム講演論文集，Vol.13, pp.43-48, 2013
- 2) 緒方健治，松山裕幸，天野淨行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，No. 749, pp. 123-135, 12, 2003
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 箕浦慎太郎，上半文昭，斎藤秀樹：岩塊の力学的安定性と振動特性の関係についての基礎的検討，第17回鉄道工学シンポジウム，Vol.17, pp.167-174, 2013
- 7) 国土交通省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012

DEVELOPMENT OF REMOTE NON-CONTACT MEASUREMENT AND EVALUATION METHOD OF ROCK BLOCK SHAPE AND DYNAMIC CHARACTERISTICS

Fumiaki UEHAN, Shintaro MINOURA

The authors have been studying on the evaluation method of rock slope stability by applying a non-contact vibration measurement technique. To improve the accuracy of the evaluation method, the consideration of the rock block scale, shape and support condition is indispensable. Accordingly, we first developed an aerial survey system of the rock block shape. Next, we developed software by which the 3-D Finite Element analysis model can be automatically generated from the obtained rock block shape data. Finally, we proposed a rockfall risk evaluation technique using the parametrical analysis results of the FE analysis model on the support condition and the load that acts on the rock block.