

遠隔非接触計測による岩塊の形状と支持状態の推定

鉄道力学研究部 構造力学研究室
室長 上半 文昭

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研究に取り組んでいる¹⁾。同手法は、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安定性を推定するものである。非接触振動計測技術についてはすでに実用レベルに達している。一方、崩落危険度の評価については、岩塊の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²⁾に着目した評価手法を提案しており、その評価精度向上には、岩塊の規模や形状、支持状態の考慮が必要である。

そこで、個別岩塊の規模や形状、支持状態の把握を目的として、岩塊形状の空撮測量システムならびに、数値解析モデル化プログラムを開発し、図1に示す岩塊の安定性評価手法を提案した³⁾。同手法は、空撮で取得した岩塊形状から数値解析モデルを作成し、支持状態と作用荷重によるパラメータ解析で対象岩塊の

安定性を評価するものである。以下ではまず、開発した空撮測量システムと数値解析モデル化プログラムの概要を紹介し、次に、実岩塊の評価事例を用いて、筆者らが提案する岩塊の支持状態ならびに安定性の詳細評価手法について説明する。

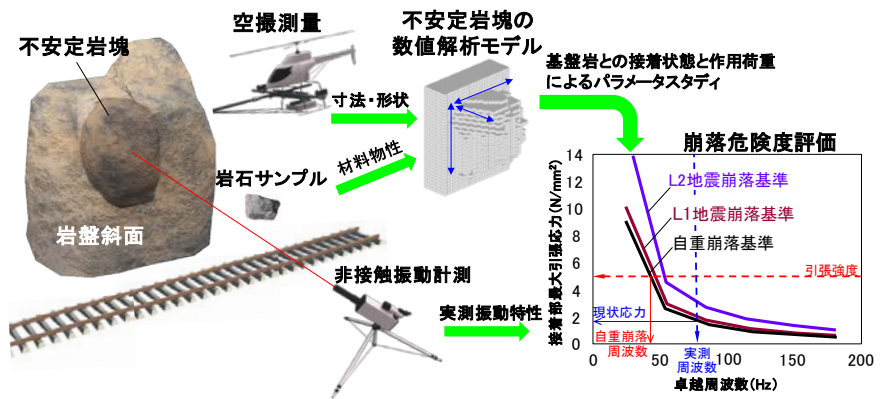


図1 空撮測量・数値解析モデル化手法を用いた岩塊安定性評価

2. 空撮測量システム

2.1 システムの概要

図2に空撮測量システムを示す。空撮測量システムは、小型のラジコンヘリコプター（以下、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。模型ヘリは、開発当初はガソリンエンジン模型ヘリ、現在は電動マルチロータヘリ（ドローン）を用いており、何れも約10～15分の連続飛行が可能である。地上局で撮影画像をリアルタイムで確認しながら、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）なく岩塊の形状を取得することができる。ステレオビデオカメラは、当初130万画素（撮影速度15fps）、現在280万画素（撮影速度26fps）のものを採用しており、基線長は500mmから700mmまで変更できる。

2.2 ステレオ画像相関法

平行ステレオカメラによるステレオ画像相関法を説明する。計測パラメータが等しいカメラを図3に示す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、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。

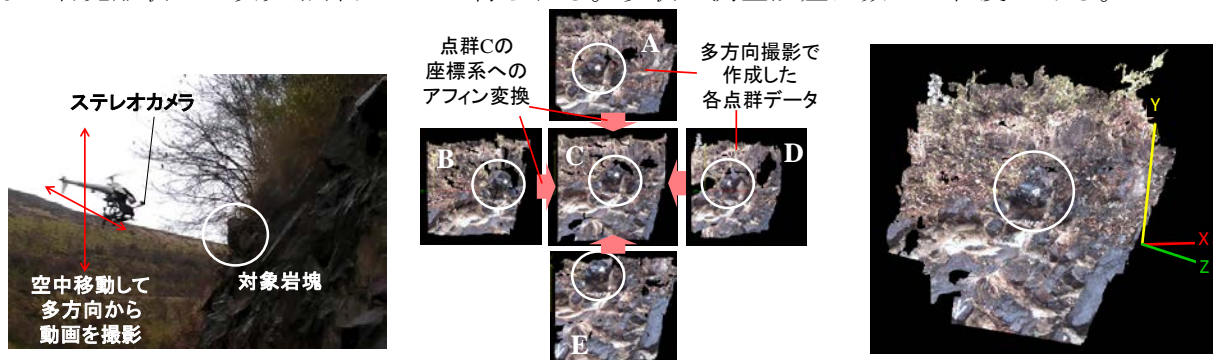
2.3 死角の無い岩塊の形状データの作成

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事によって、死角のない岩塊形状データを作成する。

まず、図4(a)の要領で対象岩塊を多方向から撮影する。次に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、アフィン変換(式(2))により複数の画像を重ね合わせる(図4(b))。ここで、 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。

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

その結果、図4(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。現状の測量誤差は数mm程度である。



(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4 死角のない岩塊形状データの撮影・作成方法

3. 岩塊の形状の数値解析モデル化

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。図5(a)は図4(c)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



図2 空撮測量システム

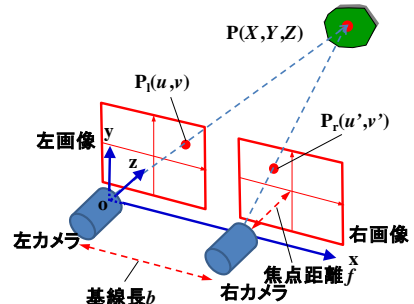


図3 平行ステレオカメラの測定原理

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 5(b)に示すように、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とによって、図 5(c)に示す立方体要素モデルを作成

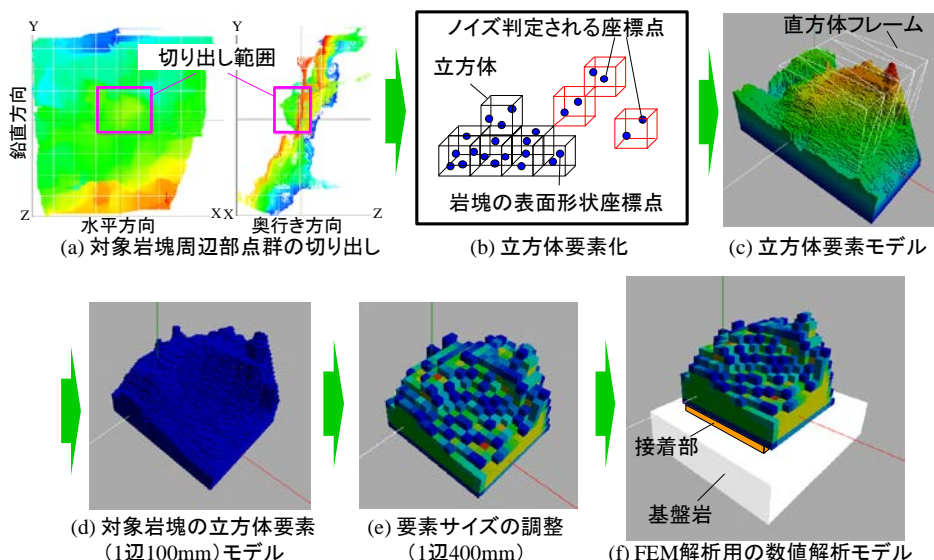


図 5 岩塊形状（3次元点群）データの数値解析モデル化の流れ

さらに、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 5(d)）、要素サイズを調整する（図 5(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 5(f)）。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を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。

4. 実岩塊の平時・地震時の崩落危険度評価

図 5 で作成した実岩塊の 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安定性評価を試みた。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少し、安定性が低下する状況を仮定し、モデルの接着部を図 6(b)のように設定した。岩塊の材料物性値を比重 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 として FEM 解析を行った。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 6(c)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 7 に示す 3 種の設計地震動⁴⁾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 8 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接着部に生じる最大引張応力や、各地震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 1 はそれらの解析結果をまとめたもので、転倒安全率は次式(3)で定義²⁾した。

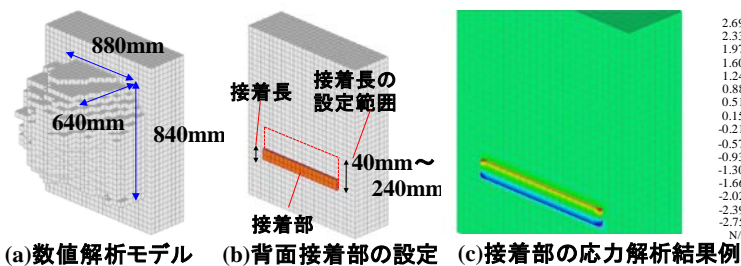


図 6 実岩塊の数値解析モデルと応力解析結果例

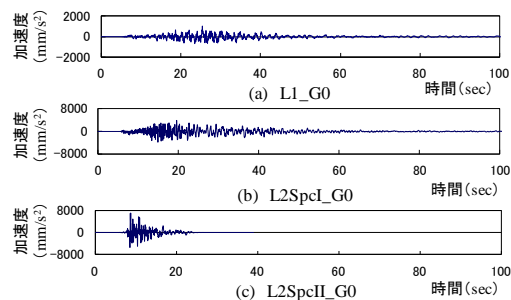


図 7 解析に用いた設計地震動

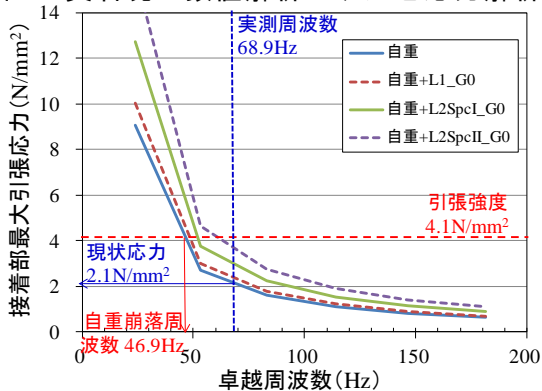


図 8 卓越周波数と接着部最大引張応力の関係

表 1 実岩塊の崩落周波数と転倒安全率

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+L2Spcl_G0	52.3	1.37
自重+L2SpclI_G0	62.0	1.11

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

これらの結果から、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される。

5. おわりに

地上からの測量が難しい高所等の岩塊の形状を空撮測量するシステム、得られた形状データから 3次元 FEM 解析モデルを作成するプログラム、および FEM 解析により岩塊の平時・地震時の安定性を評価する手法を説明した。この他にも、岩塊振動の非接触計測システムの改良、簡易評価用の転倒安全率プログラムの提案などを行っており、今後は、一連の開発技術を用いた岩塊安定性評価手法の現場適用を推進するとともに、開発した計測技術を橋りょう等の構造物検査にも応用する。なお、本研究は、国土交通省・鉄道技術開発費補助金の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 上半文昭, 太田岳洋, 石原朋和, 布川修, 斎藤秀樹, 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手法の検討, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.47-52, 2012
- 2) 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
- 3) 上半文昭, 箕浦慎太郎: 空撮画像による岩塊形状の取得および数値解析モデル化の検討, 鉄道総研報告, Vol.28, No.12, pp.47-52, 2014
- 4) 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