# 精密写真測量の 斜面モニタリングへの応用について

長野 洋平1\*・大西 有三1・西山 哲1・村上 治2・浜崎 智洋3・天野 淨行3

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻(〒615-8540京都府京都市西京区京都大学桂)
 <sup>2</sup>つくばソフトウェアエンジニアリング株式会社(〒300-0034茨城県土浦市港町1-7-23)
 <sup>3</sup>中日本高速道路株式会社 中央研究所(〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
 \*E-mail: nagano@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年,斜面の安定問題に社会の関心が集まっている.自然あるいは施工中の斜面の安全を評価する上で 計測は欠かすことのできないものであるが,従来の計測機器は局所的な観測に限られており,長大な斜面 全体に設置し計測しようとすると多くの手間やコストがかかる.

このような背景から、デジタルカメラを用いた精密写真測量手法を用いて対象点の三次元座標を計測し、 斜面のモニタリングに適用することを試みた.斜面を計測する際、基準点の設置が困難であるということ が考えられるため、実際の斜面において計測を行い、計測精度や変位に関して考察し、その適用性につい て検討を行った.

Key Words : photogrammetry, digital image, slope hazard, monitoring system

## 1. はじめに

わが国において斜面の安定性が不安視され,早期に対 策を図る必要のある箇所や,日常点検や定期点検により 管理する必要のある監視強化箇所は膨大な数にのぼり, 斜面崩壊の危機を抱えている.しかしながら,技術的な 問題や予算などの制約から,これらすべてに対し管理者 が十分な対策を講じる,あるいは管理を行うことは困難 である.実際は,災害から守るべき対象の重要度や崩壊 危険箇所の状況に応じて,実施する対策の内容に優先度 をつけざるを得ない.それゆえ,危険な斜面の安定性を 評価し,崩壊の予知・予測を行うことで,崩壊の影響を 最小限にくいとどめることが求められる.崩壊に至る前 兆現象が現れた場合,その変状をすばやく捉え的確な対 策を検討するために有用な基礎的資料を与える計測技術 の完備は欠かせないものである.

従来の斜面変位の検知方法として地盤傾斜計や伸縮計 などがあるが、この方法ではあらかじめ危険とわかって いる箇所を狙って計測するのみで、危険箇所の発見とい うまでには至らない. さらに、計測器の設置が困難な場 所が多く、その維持管理も困難なことが多い.

そこで、近年これらの問題を解決するべく、精密写真 測量に関する研究が進められている.その理由として、 遠隔から安全に計測が可能であること、広範囲において 面的な動態観測ができること,近年著しいデジタル機器 の高性能化及び低価格化の流れ等,数々のメリットが挙 げられる.

以上のような背景から、本研究では精密写真測量手法 を用いて、実際の斜面の動態観測を行い、精度や変位に 関して考察し、その適用性について検討を行った。今回 計測対象とする斜面は、平成15年にのり面上部がすべり 崩壊し、今後推定されるすべりも広範囲にわたるため、 対策工の施工段階及び維持管理段階において斜面の挙動 を注意深く監視する必要がある。

しかし、斜面を計測の対象とした際には、工業計測の 場合と異なる問題点がある.ひとつは、あらかじめ正確 に空間座標が測定されている点、すなわち基準点の設置 が困難であるため、対象の絶対座標が得られないという 問題である.したがって、計測の正確さを表す外的精度 による評価を行うことができず、またベクトル量も求め ることができない.もうひとつは、斜面の変位が重要と なってくるが、精密さをあらわす内的精度では各計測自 体の評価しかできず、斜面の安定性に関しては判断でき ない.そこで本研究では、これらの問題の解決策として 正規方程式に拘束条件を与え、また計算される相対座標 から面積の変化を考えた.後述するが、基準点が設置で きない場合、観測方程式の係数行列にランク落ちが生じ る.しかし拘束条件を与えることにより、ランク落ちし たまま解くことができる.この手法ではスカラー量を得 ることができ、長さや面積を用いた斜面の安定評価が考 えられる.そこで、危険箇所の検知を目的として、視覚 的にわかりやすい3個のターゲットから構成される面積 の変化量を用いた.

## 2.精密写真測量の基礎理論

#### (1) 精密写真測量の基本原理

計測対象の斜面上に位置する計測点と、カメラ及び画 像上に写った計測点の像が作る幾何学的関係を図-1に示 す.これら3点が一直線上に存在するという原理に基づ いて方程式を立てる.これを共線条件という.対象空間 座標系X-Y-Zから見た点Pの座標をX=(X,Y,Z)<sup>T</sup>、カメラ座 標の原点をX<sub>0</sub>=(X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub>)<sup>T</sup>とする.また、カメラ座標系 xy-zから見たPの写像 pの座標をx = (x,y,c)<sup>T</sup>とし、空間座 標から見た p をX<sub>P</sub>=(X<sub>P</sub>,Y<sub>P</sub>Z<sub>P</sub>)とする.この条件から式(1) が導かれる.ここで $m_{ij}$ は回転行列の成分を表す.

$$x = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
  

$$y = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
(1)

実際には、式(1)の左辺の像の座標の計測値は、レンズひずみなどの使用したカメラが持つ系統誤差の影響を受けるので、その補正値を $\Delta x$ および $\Delta y$ であらわして右辺に移項すると、式(2)のように書ける.

$$F_{x} = x + \Delta x + c \frac{m_{11}(X - X_{0}) + m_{12}(Y - Y_{0}) + m_{13}(Z - Z_{0})}{m_{31}(X - X_{0}) + m_{32}(Y - Y_{0}) + m_{33}(Z - Z_{0})} = 0$$
  

$$F_{y} = y + \Delta y + c \frac{m_{21}(X - X_{0}) + m_{22}(Y - Y_{0}) + m_{23}(Z - Z_{0})}{m_{31}(X - X_{0}) + m_{32}(Y - Y_{0}) + m_{33}(Z - Z_{0})} = 0$$
(2)

式(2)における未知数は、点 j の地上座標系での座標値 (XY,Z),外部評定要素と称される画像 i を撮影したとき のカメラの位置と撮影時の角度を表す6個のパラメータ ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ ),それらと系統誤差である $\Delta x_i$  お よび $\Delta y_i$  である.この式を解くことにより未知数を求 めるのであるが、式(2)は非線形であるため各未知数を 初期近似値の周りでテーラー展開することにより得られ る方程式を行列表現すると次のようになる.

$$\mathbf{v} + A_1 \mathbf{x}_1 + A_2 \mathbf{x}_2 + A_3 \mathbf{x}_3 = \mathbf{e}$$
(3)

ここでAは係数行列で添え字1は外部評定要素,添え 字2はカメラ内部パラメータ,添え字3は対象点座標に



関する量をあらわしている.また X<sub>1</sub>は各画像の外部評 定要素の,X<sub>2</sub>はカメラパラメータの,X<sub>3</sub>は対象点座標 の補正量ベクトルである.また v は計測点の像の2次元 座標の測定残差よりなるベクトルであり,e は観測値と 共線条件式による理論的な座標値との差よりなるベクト ルである.この方程式より補正量を求め,それを用いて 解を更新し,収束するまで繰り返して計算を行う<sup>2</sup>.

#### (2) 基準点を用いない場合の拘束条件<sup>3,4</sup>

式(3)の誤差ベクトルv に関する最小二乗条件より, 正規方程式と呼ばれる次式が得られる.

$$(A^{T}A)\boldsymbol{x} = A^{T}\boldsymbol{e} \tag{4}$$

ここで係数行列(A<sup>T</sup>A) に階数の欠陥が発生する.これ が前述のランク落ちである.そのため、逆行列を用いて 解くことができない.このとき一意的に最小二乗解を得 る、すなわち点の位置と形態を決めるためには、パラメ ータに拘束を与えなければならない.以下ではその拘束 の与え方について説明する.

まず,座標値とその補正量である未知数 x がそれぞれ 式(5)からなる測地網とする.

$$\begin{pmatrix} X_1, Y_1, Z_1, \cdots X_m, Y_m, Z_m \end{pmatrix} x = (x_1, y_1, z_1, \cdots x_m, y_m, z_m)$$
 (5)

この測地網の並進を拘束する条件は式(6)となる.

$$x_{1} + x_{2} + \dots + x_{m} = 0$$
  

$$y_{1} + y_{2} + \dots + y_{m} = 0$$
  

$$Z_{1} + Z_{2} + \dots + Z_{m} = 0$$
(6)

また、回転を拘束する条件は式(7)となる.

$$-Z_{1}y_{1} + Y_{1}z_{1} + \dots - Z_{m}y_{m} + Y_{m}z_{m} = 0$$
  

$$Z_{1}x_{1} - X_{1}z_{1} + \dots + Z_{m}x_{m} + X_{m}z_{m} = 0$$
 (7)  

$$-Y_{1}x_{1} + X_{1}y_{1} + \dots - Y_{m}x_{m} + X_{m}y_{m} = 0$$

計測点 *j* の補正量について、この拘束条件を行列表示 すると式(8) となる.

$$G_{j} = \begin{bmatrix} \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \cdots & 0 & -Z_{j} & Y_{j} & \cdots \\ \cdots & Z_{j} & 0 & -X_{j} & \cdots \\ \cdots & -Y_{j} & X_{j} & 0 & \cdots \end{bmatrix}$$
(8)

また同様にして i 番目の画像に関する外部評定要素に ついての拘束条件は次のようになる.

$$G_{j} = \begin{bmatrix} \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & -Z_{j} & Y_{j} & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & Z_{j} & 0 & -X_{j} & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ \cdots & -Y_{j} & X_{j} & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots \end{bmatrix}$$
(9)

第1~3行は撮影点と対象空間座標の重心の平行移動を, 第4~6行は重心周りの回転を拘束する.

長さに関しては、基準尺と称するあらかじめ正確に長 さを計測したものを用意し、それを計測点と同時に撮影 することで拘束を与える.基準尺の両端の座標を  $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ , その長さを*l*とすると条件 式は

 $f = (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 - l^2 = 0$  (10) と書ける. これを線形化し行列表示すると

$$A_s \mathbf{x}_3 = \mathbf{e}_s \tag{11}$$

と書ける.ここで4。は距離測の係数行列, e。はスケールの残存量ベクトルである.これを組み込んだ後の,全体の連立方程式の形は次のようになる.

$$v + \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & 0 & A_s \\ G_1 & 0 & G_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e}_s \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$$
(12)

残差ベクトルを最小にする条件と式(8)の拘束条件の両 方を満たす解を考えると、それは方程式(13)の解となる.

$$\Phi(\mathbf{x}, \lambda) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} - \lambda^T G \mathbf{x}$$

$$= \frac{1}{2} (\mathbf{e} - A \mathbf{x})^T (\mathbf{e} - A \mathbf{x}) + \mathbf{x}^T G^T \lambda$$
(13)

ただし、 $\lambda$ はラグランジュ乗数である. x および $\lambda$ で変 微分して0とする.

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \Phi = (A^T A)\mathbf{x} - A^T \mathbf{e} + \lambda G^T = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \Phi = G\mathbf{x} = 0$$
(14)

これより最適解は式(15)の解となる.

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^T A & G^T \\ G & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A^T \mathbf{e} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(15)

以上に示したような拘束を与えることにより,基準点の設置ができない場合でも対象点の座標を精度よく求めることができる.

#### 3. 実斜面でのモニタリング実験

## (1) 計測箇所概要

本研究では、精密写真測量によるモニタリング手法を 実斜面に適用する試みを行った.今回の計測対象のり面 において、平成15年8月にのり面上部がすべり崩壊した. これは、梅雨時期の降水量が例年以上にあったことに加 え、台風10号と大雨によるものである.強風化泥岩が大 部分を占める切土の裏面にすべりが発生し、グラウンド アンカーの一部が破断した.そのため、挿入式傾斜計、 地下水水位計による監視をしながらのり面切土施工が行 われた.計測対象である斜面の概観を図-2に示す.



## (2) 計測方法および計測条件

#### a)対象斜面

計測対象の斜面は幅200m,高さ50m,奥行き120mと非常に規模が大きいため、全体を同時に解析しようとすると、写真枚数が膨大な数にのぼり解析作業の負担が増えてしまう.そこで、対象斜面を4つ(上段1-3ブロック、上段46ブロック、下段7-9ブロック、下段10-13ブロック)に分割し、それぞれをひとつのまとまりとして解析を行った.軸の取り方は、図-2に示すように斜面の幅方向をX軸、高さ方向をY軸、奥行き方向をZ軸とした.

# b)撮影機材

今回の計測では、カメラは650万画素のものを用いた. 計測で使用したレンズは、奥行きを考え、手前側の下段 ブロックには焦点距離 35mm のものを使用し、撮影距離 が長い上段ブロックには計測精度を優先し焦点距離 50mm のものを使用した<sup>5</sup>.

## c) ターゲット

使用するレンズ・カメラを決定した後、ターゲット像 が画像上に10ピクセル以上で写るように、測定距離から 画像上のターゲットサイズを計算し、それをもとにして ターゲットの寸法を決定する.上段ブロックには白色部 の辺の長さが400mmのものを、下段ブロックには300mm のものが設置されている.ターゲットの設置状況を図-3 に示す.

#### d)撮影条件

カメラ撮影は17地点からカメラの角度を変えながら76 枚撮影した.撮影位置を真上から見たものを図-4に示す. レンズひずみの影響を抑えるために,画像上のターゲッ トの位置をさまざまにするよう180°回転させながら撮影 している.また撮影位置は道路開通後においても同一位 置からの撮影が行えるよう,相対するのり面上および保 護路肩部とした.撮影画像の例を図-5に示す.

## (3) 計測結果

#### a) 計測精度

未知数の分散共分散行列 $\sum_{\hat{x}}$ の対角項に並ぶ各対称点 座標の分散を $V_{X_b}$ , $V_{T_b}$ , $V_Z$ (i=1,2,...,n)とすると、内的精度  $\sigma$ は次式のようになる.

$$\sigma_{X} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} V_{Xi}}, \sigma_{Y} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} V_{Yi}}, \sigma_{Z} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} V_{Zi}}$$

(16)

$$\sigma_{XYZ} = \sqrt{\frac{{\sigma_X}^2 + {\sigma_Y}^2 + {\sigma_Z}^2}{3}}$$
(17)

内的精度は、対象点座標推定値のばらつきの範囲をあ らわしており、計測の正確さを示す.5回の計測におい て全ターゲットの座標値の内的精度を求めた.結果を **表-1**に示す.



図-3 ターゲットの設置状況



図-4 撮影状況(上段46ブロック)



図-5 撮影画像例

表-1 内的精度(単位:mm)

日付 対象領域	9/24	10/3	10/28	11/15	11/28
上段1-3			3.037	2.816	2.943
上段4-6	2.602	2.967	2.802	2.687	2.72
下段7-9					2.77
下段10-13					3.438

例えば上段 46 ブロックにおいて、内的精度はいずれ も約 2.7mm であり、撮影条件が適切であればほぼ同じ 計測精度で再現することが可能であるといえる.また, 下段に比べて撮影距離が長くなる上段の撮影では、焦点 距離の長いレンズを使用することによって写真上の像の サイズを同じにしているため、精度の低下がなく計測で きていることがわかる.

#### b) 斜面の動態

計算から得られた対象点の三次元座標を用いて斜面の 動態を検証する. 斜面の計測のように広範囲に変位が想 定されるような箇所での計測においては、計測対象にあ らかじめ座標がわかっている基準点の設置は困難である ことが多いため、絶対座標を得ることはできない. そこ で相対座標を用い、任意の3つのターゲットから形成さ れる三角形の面積ひずみにより斜面の動態を観測した. 図-6 にその考え方を示す. 三角形を形成するターゲッ トのうち下方の2つが鉛直方向に10mm変位したと仮 定すると、面ひずみ率は 0.1%となる. また評価基準と して表-2 に示す管理値を用いた. この管理値を超える と、点検・要注意または観測強化といった対応が検討さ れる必要がある.例として、上段46ブロックの10月3 日と11月15日,10月28日と11月15日の解析結果から 計算した面積ひずみを図-7 に示す. 三角メッシュの各 頂点が計測点である. 10月3日と11月15日の期間中に 面積ひずみが 0.75%を越えている箇所が見られるが、10 月28日と11月15日の間では管理値を超えるひずみは 発生していない. 斜面が実際に動いているという判断を 下す前に、誤差の影響や微小なスケールの相違が考えら れるので、このように一回の結果からではなく、他の計 測日とも比較し, データの蓄積を行う必要があると考え られる.

#### c)ターゲットの位置と精度

図-8は、11月15日の上段46ブロックにおける各タ ーゲットのY軸方向の内的精度分布を表したものである.



図-6 面積ひずみの概念

表→2 管理値						
対応区分		点検・要注意または観測強化				
		(建設段階)	(管理段階)			
基準値		5mm以上/10日	10mm以上/30日			
計測頻度	1回/15日	7.5mm以上	-			
換算値	1回/30日	15mm以上	10mm以上			
面ひずみ量	1回/15日	0.075	-			
(%)	1回/30日	0.15	0.10			

円の位置がターゲットの実際の位置を表し、円の大きさ が精度の値を表す. この図から, 解析対象領域の中心部 に当たる箇所の精度が良いことがわかる.しかし、計測 対象領域の周縁部に行くほど精度の低下が見られる. こ の値は、管理値の 7.5mm という変位を検出することは できるが実際の変位の有無に対して誤差の範囲内である といった誤った判断を下してしまう危険性もある. した がって、変位の有無の判断に対する信頼度をより高くす るためには、精度の向上が望まれる.







## 4.まとめ

本研究では、精密写真測量を斜面に適用した際に発生 する問題点に対して面積ひずみを用い、斜面のモニタリ ングを行った.

この結果から,撮影距離が遠く,また撮影位置が限ら れる場合においても適切な撮影形態をとれば高い精度で 計測を行うことが可能であるため,斜面モニタリングに 十分対応できることがわかった.また,面積ひずみを用 いて斜面の動態を視覚的にあらわすことにより危険箇所 の特定が容易になり,特に変位が大きい地点には重点的 に対策工を施すことが可能となる.今回の解析では一定 の期間ごとに撮影されたデータを用いたが,その間に変 位が発生する可能性は十分にある.定期的な観測で変位 の兆候が見られた場合には,早急に再度計測を行い,同 一の箇所にひずみが発生していれば,その箇所に関して 撮影の頻度を上げ重点的に斜面の動態を観測する必要が あると考えられる.

さらに現場へ普及していくためには、作業の簡略化が 必要となってくる.本研究では高精度の計測を実現させ るため、設置されたターゲットを使用したが、近づくこ とができない対象あるいはターゲットを長期間設置する ことが困難な対象に対しては、ターゲットを用いずに画 像上の特徴点を使用して計測を行う手法が必要である. 現在,ノンターゲット計測はターゲットを用いた場合と 比較して精度は低く,特徴点の抽出や画像を重ね合わせ る過程で改善を要する.しかし,画像処理による特徴点 の抽出技術の向上や多くの画像を用いた解析技術の改良 により,ノンターゲット計測の場合でも高精度の計測が 可能となるであろう.

#### 参考文献

- 大西有三,西山哲,矢野隆夫,緒方健治,松山裕幸:精密 写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究, 土木学会論文集, No.771/68, pp.187-197, 2004.
- 2) 中根勝見:新版 測量データの 3 次元処理,東洋書店, pp.59-61, 1994.
- 3) 西山哲,大西有三,大津宏康,矢野隆夫,龍明治,李徳 河:デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステム への応用に関する研究,応用地質,第44巻,第6号, pp.331-340,2004.
- 4) 秋本圭一:情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究,京都大学博士論文,pp.39-82,2002.
- 5) 龍明治,中井卓巳,大西有三,西山哲,矢野隆夫,李徳河, 張舜孔:デジタル画像計測による斜面モニタリングシステ ムの研究,台日地下空間建設工程調査計測技術交流検討会 論文集, pp.105-110, 2005.11.

# A STUDY OF SLOPE MONITORING SYSTEM BY USING PRECISE PHOTOGRAMMETRY

# Yohei NAGANO, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Osamu MURAKAMI, Tomohiro HAMASAKI and Kiyoyuki AMANO

Recently, in many Asian countries there have been slope hazards such as landslides and slope failures, and the issue of stability of slope has attracted social interest. When we evaluated nature or security of slope under construction, we need to monitor the displacement of slope. From such a situation, we apply precise photogrammetry to a monitoring technique of a slope. This study aims to consider the applicability of this research through the measurement result in an actual slope, and verify the utility as the system to defend living from a slope disaster.