

デジタル精密写真測量による岩盤斜面の動態観測
Rock slope displace measurement by photogrammetry system

中井 卓巳*・若林 良二**・渡辺 紀彦**・大西 有三***

Takumi NAKAI, Ryoji WAKABAYASHI, Norihiko WATANABE and Yuzo OHNISHI

For the purpose of evaluation on safety of slope and cliff in civil engineering, rock monitoring is carried out to observe behavior of rock mass. Displacement measurement is usually implemented. Various instruments and apparatus have been made for this purpose. There are many demerits with these methods, which make it preferable for a new methods to appear. Photogrammetric system is fast, accurate, reliable, flexible, and economical in comparison to other 3D coordinate measuring techniques. And it is becoming an attractive technique in survey of rock displacement. In this paper, an application of photogrammetry system for rock displacement survey in a man-made slope is reported. At the Misaki-cho slope under construction, rock displacement was surveyed with the photogrammetry technique to evaluate the safety of man-made slope under construction. Features of the measurement operations are discussed and results is analyzed.

1. はじめに

ダム・トンネル・地下空洞などの構造物や斜面・崖などの安全を評価するために、岩盤の挙動を把握する各種の動態調査が行われている。人工構造物を構築する現場では岩盤の掘削に伴う変位計測は日常的に行われており、例えば、今回の現場のような切土斜面では、地すべり伸縮計による地表面の変位計測、ボーリング孔を利用した孔内傾斜計による地中の変位の計測が一般に計画されよう。しかし、これらの手法はブロックとして移動するような岩盤に対して、点や線の観測であり、3次元的に広い範囲で面的に計測しようとした場合にコストが問題になり事実上不可能である。

一方で、空間内の3次元座標を求める写真測量の手法を岩盤の変位計測に適用する試みが始まっている。近年のコンピュータの発達により、画像の取得から処理に至るまでの過程をデジタル情報の形で取り扱うことができるため、デジタルカメラで撮影した写真情報を使用した精密写真測量という手法も、そのひとつである。この方法は非接触で行えるので、掘削面や崖といった崩落の危険のある場所へ近づかなくてもよいという利点があり、将来は写真撮影からデータの解析までリアルタイムで実施できる可能性がある。

* 正会員 工修 (株)アーステック東洋

** 株式会社大林組岬町工事事務所

*** 正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻

またこの方法には、他の写真測量に比べても、以下のような利点がある。

- (1) 多数のターゲットの写真座標を利用して対象点座標を求めするため、誤差要因の影響を受けにくい。大きな誤差が発生してもそれを知って排除することができる。
 - (2) レンズひずみ補正を測定の中で同時に行うことができる。
 - (3) カメラ以外の光学系が不要である。
 - (4) 測定値の精度を統計的にきちんと出すことができ、結果の定量的評価が可能である。
 - (5) 距離 10m で 1mm 以内（条件がよければ 0.5mm 以内）の 3次元座標精度を得ることができる。
- 今回は実験的な要素が大きく、現場での適用を調査したものであるが、最終的には実用的な解析システムを確立することを目的としている。

2. 写真解析手法と原理²⁾

一般に写真測量というと空中写真測量を意味することが多い。空中写真測量は大画面のキャリブレーションされた計測用 METRIC CAMERA を使い、地形図作成に持ちいられてきた。その際には基準点という既知の点が存在することが前提であるが、土木現場での計測としては、基準点の正確にわかっている点が無いこともあり得る。目的によっては基準点を求めることは必要なく、費用と労力を省くことも可能である。このような考え方は、点や線を計測していた場合はなかなか納得がいかない場合があるが、本方法のように 100 点以上の点の空間分布が精度良く求まった場合は、基準点がなくとも安全性を十分判定できる可能性があるのである。今回は実験的要素が強いため、不動点とする点を設けて、動態観測の時間的空間分布の変化を表し計算するための既知点としている。

切土斜面の変位計測を行うための精密写真測量ではまず斜面に反射ターゲット(図-1)を設置する。反射ターゲットの位置座標を写真測量で確定し、岩盤の表面の位置を知る。解析は次の手順³⁾で行われる(図-3)。また、この段階で不動点としてきわめて変位の少ないと考えられる点を選択した。

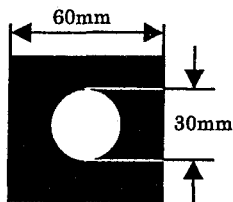


図-1 反射ターゲット

(1) 画像座標の自動計測

現段階では、数点についてラフな初期値を与え、それらの点を元にしてそれ以外の評点については手動で番号付けを行い、コンピュータに認識させている。

(2) 写真測量の近似解析

写真解析計算は、基礎方程式が非線形であるために、写真の評定要素や被写体座標はそれらの近似値を利用し、繰り返し計算によって決定される。そこで解の安定性を上げるために、高精度の初期近似を与える必要がある。しかし、撮影時に被写体の座標計測を行っていない場合、そのような近似値を与えることは困難である。計測した写真画像から座標値の粗い近似値を与える必要がある。

本方法では、近似解析の方法を用いて近似値を計算し、次いで写真精密解析を実施するという2段階の方法を採用した。

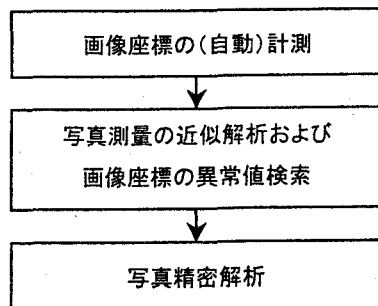


図-2 精密写真測量解析手順

(3) 写真の精密解析

バンドル調整法(光線の共線条件式を利用)を用いて、各写真の評定要素および被写体座標を厳密に計算する。従来用いられてきた DLT 法に替わり、現場での取り扱いが用意である Self Calibration 手法を用いることにした。DLT 法の場合は、撮影時に数点の高精度な座標既知情報が必要となるため現場では制約がある。Self Calibration 手法を用いた場合は、長さが既知のものを用意しておけばよい。これにより、長さの拘束条件を入力しておけば精度が確定するので、利点は多い。

3. 現場への適用

3・1 計画と準備

計測の対象斜面は、図-3に示すような道路拡幅のための切土斜面である。切土計画は図-4に示すように最急勾配が1:0.3の急傾斜のり面が切土工事とロックボルト付きフリーフレーム工法で構築される計画であった。

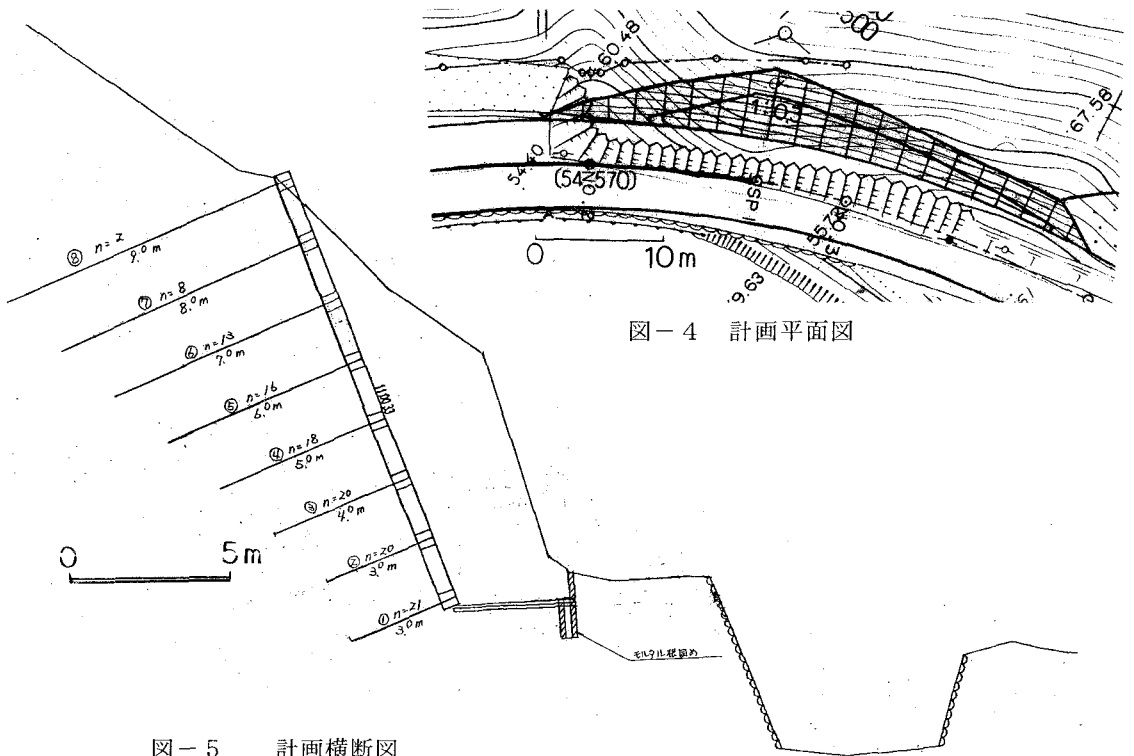


図-4 計画平面図

図-5 計画横断面図

以上のような条件において、ターゲットの貼り付けと観測を実施する計画を作成した。切土の各ステップにおけるターゲットの配置を図-6に示す。

切土工事における本方法の適用において、問題となる点は次のようなまとめられる。

- (1) 図よりわかるように、ターゲットは切土が進むにつれて増加する。
- (2) 切土があるため、不動点の設置場所が限られる。
- (3) ターゲットを設置後に、ロックボルトの工事でフリーフレームの工事が続くため、ターゲットが損傷を受ける。

以上の問題点を避けるために、不動点を切土範囲外に設けることと、図-7のようなターゲットの設置方法を工夫した。

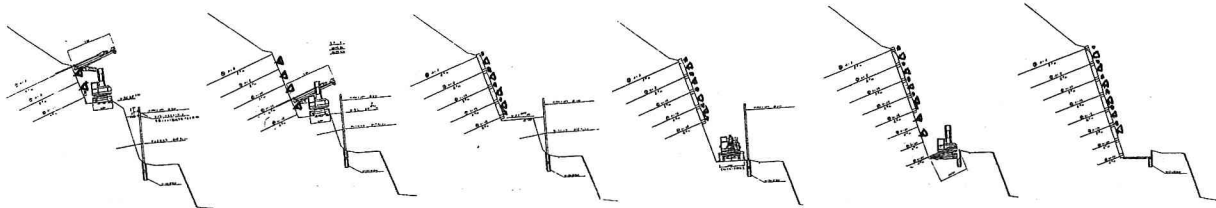


図-6 切土の進行とターゲットの設置地点の増加

表-1 計測期間

測定ステージ	測定日
第1回	1999/4/2
第2回	1999/4/5
第3回	1999/4/12
第4回	1999/4/16
第5回	1999/4/21
第6回	1999/4/28
第7回	1999/5/21
第8回	1999/5/27
第9回	1999/6/28

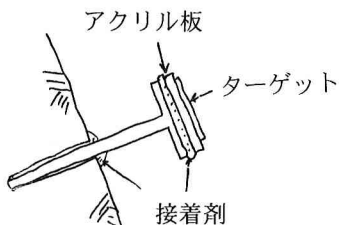


図-7 ターゲットの台座

3・2 計測と計測結果

計測は表-1に示す時期と間隔で実施した。使用したデジタルカメラは KODAK DCS420(白黒 150 万画素)である。計測状況を写真-1に示す。写真-2には完成後写真を示す。ターゲットは残っており、完成1ヶ月後の安定の確認に利用できた。

計測は、9回実施されたが、図-8に6回目と8回目の測定値から求めた変位置を示す。

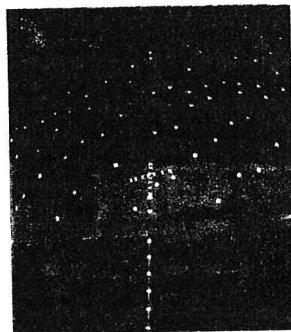
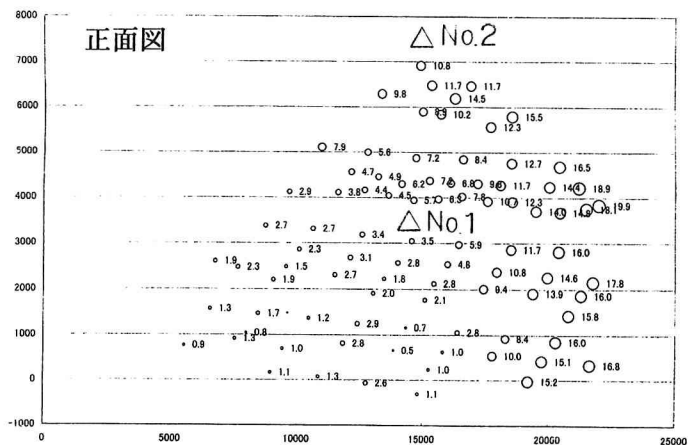


写真-1

変位置(6回測定~8回測定) (mm)



△印は測距儀による観測点

	第6回観測	第8回観測
平均内的誤差(mm)	0.80	2.53

図-8 変位置

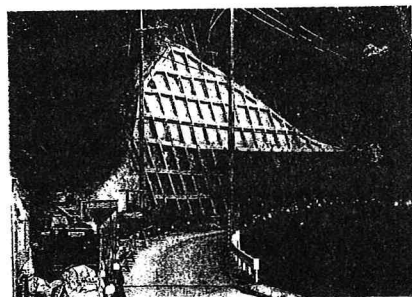


写真-2

表-2 光波測距儀による測定

日付	測距儀からの距離(m)	
	No.1	No.2
4月14日	52.392	56.514
7月1日	52.386	56.505
差	0.006	0.009

図-8によると、のり面の下半分は、数 mm の変位が見られる。また、上段部と右側に 10mm を越える変位が見られる。上下方向の変位量の差は、上段ほど風化のための土砂化して切土後の変位が大きいことを示していると考えられる。また、右半分は、小さな沢部に相当し、土砂が分布していることによる可能性がある。

ただし、不動点とした左端の 4 点より離れるに従い変位が大きくなっていく傾向も見られ、不動点から遠いほど精度が落ちていく状況が考えられる。

表-2 に光波測距儀によるのり面の 2 地点の測量結果を示した。測距儀からの距離が観測されているが、2 点の位置を図-8 に併記した。厳密には比較できないが、No.1 が 6mm、No.2 が 9mm の変位を示している。No.1 周辺では写真測量の結果では 3~6mm の変位が測定されており、No.2 付近では同様に 10~12mm の変位が測定されている。測距儀での座標系が写真測量のものとは一致していないため、厳密な比較はできないが、一応の整合性があると考えられる。また、測距儀の測定は点に限られるが、写真測量では図-8 で明らかのように、変位の大きい部分を面的に把握することに成功している。

4. まとめ

新しい手法で切土のり面の施工中の動態観測を実施した。

実証実験は、道路改良に伴う切土工事斜面に、計測用の反射ターゲットを約 200 枚設置し定期的に撮影することで、切土中ののり面の安定性を判定した。デジタル精密写真測量は、撮影位置の自由度が高く、精度が従来の測定方法に劣らず、同時に多点(数 100 点)を観測できる利点があり、3 次元イメージとして工事中の斜面全域を眺めることができ、斜面の安定性を随時判定することが可能となることが実証された。ただし、施工現場での制約も確認することができた。今後の課題も含めた斜面に対するデジタル精密写真測量の適用における問題点は以下のようにまとめられる。

- (1) 不動点の設置が、のり面全体を囲うようにすると精度が上がる。
- (2) 切土工事では撮影距離が制約され、一つの画面に入るターゲット数が少なくなり、精度が落ちる。バルーンなどを使ったりリモート撮影などによる対策が考えられる。
- (3) フリーフレームの設置工事にロープが多用され、ターゲットが損傷する。設置を地山から浮かして設置したが、今後は密着して設置することで防げる。
- (4) ターゲットの反射能が風雨や日射により低下することが考えられるが、3ヶ月の間では支障は生じなかった。
- (5) 解析のリアルタイム化が必要である。

5. 参考文献

- 1) 大西 有三・張 春・林 訓裕：岩盤変位計測における精密写真測量手法の適用，第 44 回地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.139 - 144，1999
- 2) 岡本 厚，大西 有三，張 春：精密写真測量による岩盤変位計測方法について，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.229-232，1998
- 3) 秋本 圭一・服部 進：画像計測の基礎，岡山職業能力開発短期大学校紀要，第 11 号，pp.23-38,1997