

論文

デジタルカメラを用いた簡易斜面安定性評価システムの構築

森口 周二*・八嶋 厚**・沢田 和秀**・伊藤 修宏***・荻本 健二****
鷺見 武富*****・小嶋 正樹*****・中村 洋一*****

Development of a Simple Slope Stability Investigation System Using a Digital Camera

Shuji MORIGUCHI*, Atsushi YASHIMA**, Kazuhide SAWADA**,
Nobuhiro ITO***, Kenji OGIMOTO****, Taketomi SUMI*****,
Masaki KOJIMA***** and Yoichi NAKAMURA*****

Abstract

In this study, the system for a rock slope assessment is built using a digital camera photogrammetry. Additionally, for photo shoot of dangerous slopes, a remote controlled airplane equipped with digital camera is used. Although each technology, such as the digital photogrammetry, the slope assessment method and the photo shoot using remote control airplane are the existing technology, by combining those technologies, it is possible to estimate the stability of slopes quickly and at a low cost. Moreover it is possible to evaluate slope stability by administrators themselves. In this research, some applications are conducted to validate the effectivity of the systems. The details of the technique and its applications are reported in this paper.

キーワード：斜面安定，リモコン飛行機，写真測量

Key words : slope stability, remote control airplane, photogrammetry

* 岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程生産開発システム工学専攻
Graduate student, Gifu University
** 岐阜大学工学部社会基盤工学科
Dept. of Civil Engineering, Gifu University
*** 岐阜県環境局廃棄物対策室
Waste Management and Policy Division, Environmental Affairs Bureau, Gifu Prefecture

**** 川重岐阜エンジニアリング株式会社
KAWAJYU GIFU ENGINEERING CO., LTD
***** 株式会社帝國建設コンサルタント
TEIKOKU ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
***** 川崎重工株式会社技術開発本部
KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

本論文に対する討論は平成 17 年 8 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

我が国は、国土の約7割が山岳地帯であり、地質・気象条件および土地利用条件から見て、斜面災害の危険性が非常に高い。1996年に全国で実施された道路防災点検の結果から、我が国には、早期に対策を図る必要のある箇所が56,700ヶ所、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が145,500ヶ所という、膨大な数の危険斜面を抱えていることが明らかとなった¹⁾。さらに、近年連続して発生している大規模地震や異常気象、土地開発に伴う危険斜面の増加により、斜面災害に対する危険性は年々増加している。

しかし、近年の公共工事に対する予算縮減傾向、既存の対策工の老朽化、環境への配慮など、防災対策工事を取り巻く環境は厳しい。そのため、防災対策工事がいまだ未着手である危険斜面が数多く存在しており、今後も短期間で全ての危険斜面に対して対策工を講じることは困難である。したがって、効率的に斜面防災を推進するためには、これまでの対策工事を中心としたハード対策に加えて、斜面情報の管理、斜面災害の発生予測、危険度評価、被害想定等のソフト対策の強化が重要である。

ソフト対策を推進するためには、危険斜面に関する情報の整備や効率的な管理が必要となる。しかし、既存の情報は、その多くが紙面上のデータで、保管場所も分散しているため、情報を体系的・効率的に管理しているとは言えない。そこで、筆者らは、岐阜県内の一部地域を対象として、GISを用いて防災情報を一元管理するシステムのプロトタイプを構築した^{2,3)}。GISを用いる利点は、様々な情報を地図情報とリンクさせて視覚的に表現できること、膨大な情報を一元的に管理できること、さらに、管理している情報の組み合わせにより、様々な情報を重ね合わせた出力結果が得られることなどが挙げられる。

このGISによる斜面情報の管理システムは、既存の情報を一元的に管理することが可能であるが、個々の斜面の危険性を評価する機能は持ち合わせていない。しかし、先に述べたように、対策工事がいまだ未着手である危険斜面が数多く存在して

おり、効率的にこれらの斜面に対して対策を進めるためには、各斜面の対策の優先度の評価を安価かつ迅速に行う必要がある。そこで、本研究では、特に危険岩盤斜面を対象として、簡易に斜面の測量・安定性解析を行えるシステム（簡易斜面安定性評価システム）を考案した。本研究で構築した簡易斜面安定性評価システムは、『膨大な数の危険斜面に対して、詳細な調査・解析が必要であるか否かを判断するための前段階的な評価を行う』ことを目的とする。また、斜面の管理者自身が、専門的な知識を用いることなく調査を行える環境の整備を目的とする。本論文では、この簡易斜面安定性評価システムの詳細について述べる。

斜面の危険度を評価するためには、斜面の3次元形状を把握することが重要となる。しかし、先に述べたように、対象となる危険斜面の数が膨大であるため、安価に、迅速に3次元形状を取得できる手法が必要となる。また、対象が危険斜面であるために、出来るだけ斜面より離れた場所からの計測が有効である。対象から離れた場所からの測量方法の代表的なものとしては、レーザー計測⁴⁾と写真測量⁵⁾がある。レーザー計測は、計測精度が天候に左右されにくいことや、高精度の計測が可能などの利点があるが、計測機器が高価という問題がある。それに対して、写真測量は、写真の解像度や撮影条件が計測精度に影響するという問題があるが、写真の撮影には現在広く普及しているデジタルカメラを用いればよく、また、現地での作業は写真を撮影するのみであるために、レーザー測量と比較して、経費・作業時間等の面で有利である。精度に関しても、近年のデジタルカメラの性能の向上により、写真測量でも十分な精度で計測することができることが確認されている⁶⁾。そのため、本研究では斜面の3次元形状の取得方法には写真測量技術を採用した。

写真測量技術を用いるためには、対象物の写真が必要となる。しかし、本研究で対象としている危険岩盤斜面は、写真を撮影するのに様々な制約を受けることが多い。岩盤斜面が川沿いに切り立って位置する場合は斜面全体を撮影することが困難であり、また、常に落石の危険性があるような斜

面では近づくことさえできないため、遠方からの撮影となってしまいます。これらの問題点を解消するためには、遠隔操作による空中からの撮影が有効である。ところが、空中からの撮影に対して、有人の航空機を使用すると、多大な費用が必要となり、数多くの斜面に適用することが経済的に困難となる。そのため、本研究では、斜面の撮影に制約を受ける場合には、デジタルカメラを搭載したリモコン飛行機を用いる。リモコン飛行機の一般的な形態としては、回転翼と固定翼がある。表1に固定翼と回転翼の比較を示す。飛行性能に関して比較した場合、固定翼は地形の制約を大きく受けるのに対し、回転翼は、前後左右および上下の動きが可能であるため、離発着時・飛行中に地形の制約を受けにくい。しかし、操縦者から遠く離れた場所での飛行は、回転翼は飛行の自由度が高い分、操縦者が機体の向きを見失いやすく、墜落の可能性が高くなる。また、積載可能重量に関しては、回転翼の方が有利となるが、操縦性と経済性に関しては固定翼の方が有利となる。このように、斜面の写真取得に関して回転翼と固定翼のどちらか一方の優位性を結論づけることは難しい。なお、本論文では固定翼を用いたケースについて紹介する。

斜面の安定性評価手法には、鷺見・八嶋の手法⁷⁻⁹⁾を用いた。鷺見らの手法は、多数の不連続面の中から、不安定な岩盤ブロックを検出する手法であり、予備的・概略的な評価手法である。入力データに不連続面の3次元位置が必要になるが、写真測量から得られた斜面の3次元形状と、斜面

表面の亀裂の位置から、斜面内部の不連続面を想定することができる。また、鷺見らは、極限平衡理論に基づいて、岩盤すべり条件を簡単な数式で表現しているため、プログラム化が容易で、多数の斜面の解析を短時間で行うことが可能である。表2は、大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会¹⁰⁾が収集整理を行った国内の岩盤崩落事例の中から、不連続面に規制された崩壊の事例を抽出し一覧にしたものである。図1に同表に示されている崩壊形態を示す。ここで、表2内の崩壊形態として示されている「転倒」と「崩落」は、図1ではそれぞれ「トップリング崩壊」と「ブロック崩落」として表現している。図1に示すように、崩壊形態は大きく分けて「岩盤すべり」、「トップリング崩壊」、「ブロック崩落」の3種類に分類される。また、「岩盤すべり」の中には「くさび型すべり」と「平面すべり」の2種類がある。図2は表2の崩壊発生割合を形態別に比較したものであり、図3は岩盤崩壊の規模を形態別に示したものである。図2より、崩壊形態では、平面すべりとくさび型すべりをあわせた岩盤すべりの合計発生件数が全体の58%を占めることがわかる。また、図3より、岩盤すべりがトップリング崩壊やブロック崩壊に比べて規模が大きい傾向があることがわかる。これらの図から判断すると、岩盤すべりは、不連続面に規制された岩盤崩壊の中で発生割合が大きく、崩壊規模も大きいことがわかる。このような背景を基に、鷺見らは岩盤すべりを主な評価対象としている。

本研究で用いたデジタル写真測量技術、リモコン飛行機による写真取得技術、簡易安定度評価技術は、既存の技術である。本研究は、それら既存の技術を組み合わせることにより、斜面の管理者自身が安定度評価を行える環境を整備し、また、膨大な危険斜面に対して、安価かつ迅速に対策の優先度を評価できる枠組み（簡易斜面安定性評価システム）を提案するものである。そのため、写真測量技術や簡易安定度評価手法の説明は、本文中で必要とされる最低限のものとし、詳細は各参考文献に譲る。

表1 回転翼と固定翼の比較

| | 回転翼 | 固定翼 |
|--------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 飛行性能 | 飛行の自由度が高いため、地形の制約を受けにくい。遠方での飛行は不利。 | 直線的に飛行するため地形の制約を大きく受ける。遠方での飛行に有利。 |
| 積載可能重量 | 機体重量の3割程度。 | 機体重量の1割程度。 |
| 操作性 | 高度な技術が必要。 | 比較的操縦しやすい。 |
| 経済性 | 機体が比較的高価。 | 機体が比較的安価。 |

表2 不連続面に規制された岩盤崩壊（大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会⁹⁾を一部抜粋)

| 名称 | 位置 | 発生年月日 | 崩壊土量 (1000m ³) | 地質 | 原因 | 崩壊 形態 |
|--------------------|---------|------------|-------------------------------|--------------|------------------|----------|
| 八潮崩れ | 山梨県早川町 | 1707~1854 | 14000 | 四万十帯:砂岩,粘板岩 | 地震? | 平面 |
| 国道150号大崩 | 静岡県静岡市 | 1971.7.5 | 6 | 玄武岩 | 不明 | くさび |
| 高德線 白鳥-引田間 | 香川県引田町 | 1974.7.7 | 25 | 和泉層群:砂岩,頁岩 | 豪雨 | 平面 |
| 上越線岩本 | 群馬県沼田市 | 1977.3.8 | 1.2 | 安山岩 | 凍結融解 | 転倒 |
| 国道135号大川北 | 静岡県東伊豆町 | 1978.1.14 | 19 | 安山岩溶岩 | 伊豆半島近海 地震M6.8 | 平面 |
| 国道33号柳谷 | 愛媛県柳谷村 | 1979.7.20 | 4 | 秩父背:砂岩,粘板岩 | 豪雨,クリープ | くさび |
| 国道32号板木野 | 高知県大豊町 | 1985.12.6 | 0.2 | チャート | 不明 | 転倒 |
| 国道10号上尾 | 大分県大分市 | 1986.7.14 | 11 | 大野川層群:砂岩,粘板岩 | 豪雨 | くさび |
| 国道39号層雲峡 | 北海道上川町 | 1987.6.9 | 11 | 溶結凝灰岩 | 洗堀, 凍結融解 | 崩落 |
| 大石 | 新潟県関川村 | 1988.3.24 | 10 | | 融雪 | くさび |
| 国道305号越前岬 | 福井県越前町 | 1989.7.16 | 1 | 火山砕屑岩 | 不明 | 転倒 |
| 国道9号枕瀬 | 島根県日原町 | 1989.8.8 | 1.5 | チャート,砂岩 | 不明 | 平面 |
| 国道327号小八重 | 宮崎県西郷村 | 1990.5.31 | 60 | 四万十帯:頁岩 | 切土 | くさび |
| 国道55号野根 | 高知県東洋町 | 1991.6.4 | 0.1~0.2 | 四万十帯:砂岩・頁岩 | 不明 | 平面 |
| 国道158号猿なぎ | 長野県安曇村 | 1991.10.18 | 3 | 粘板岩,チャート | 不明 | 平面 |
| 国道54号乙加宮 | 島根県三刀屋町 | 1992.2.25 | 0.8 | 花崗岩 | 凍結融解? | 平面 |
| 飯田線 湯谷温泉-横原間 | 愛知県鳳来町 | 1992.11.10 | 0.1 | 流紋岩 | 降雨 | 崩落 |
| 国道229号 第2白糸トンネル | 北海道島牧村 | 1993.7.12 | 2.5 | 安山岩質火砕岩 | 北海道南西沖 地震 | 平面 |
| 国道205号蔵本郷 | 長崎県東彼杵町 | 1993.9.3 | 0.2 | 溶岩,凝灰角礫岩 | 風雨 | 崩落 |
| 国道32号大歩危 | 徳島県山城町 | 1993.10.9 | 0.7 | 三波川帯:砂質片岩 | 降雨 | 転倒 |
| 国道49号谷花 | 新潟県三川村 | 1994.3.5 | 0.2 | 流紋岩 | 不明 | 転倒 |
| 国道49号谷花 | 新潟県三川村 | 1995.4.2 | 5 | 流紋岩 | 地震 | 転倒 |
| 田代七釜 | 新潟県中里村 | 1995.4 | 13 | 安山岩 | 洗堀 | 平面 |
| 国道229号 豊浜トンネル | 北海道古平町 | 1996.2.10 | 11 | 安山岩質水冷破砕岩 | 凍結 | 崩落 |

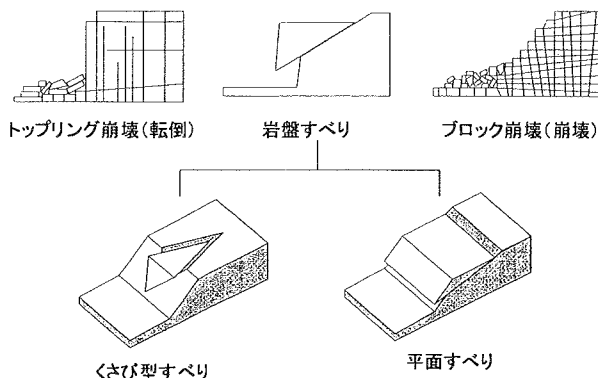


図1 不連続面に規制された岩盤斜面の崩壊形態

2. 簡易斜面安定性評価システムの概要

図4に、本システムの概要を示す。本システムは、以下の3つのシステムで構成される。

- 写真取得システム
- 写真測量システム
- 安定性評価システム

まず、写真取得システムを用いて、斜面のステ

レオ写真を取得する。写真取得システムは、デジタルカメラを搭載したりモコン飛行機を遠隔操作することにより、危険斜面の写真を空中から撮影するシステムである。

次に、リモコン飛行機から撮影された斜面のステレオ写真を用いて、写真測量システムにより斜面の3次元モデルを作成する。このシステムは、

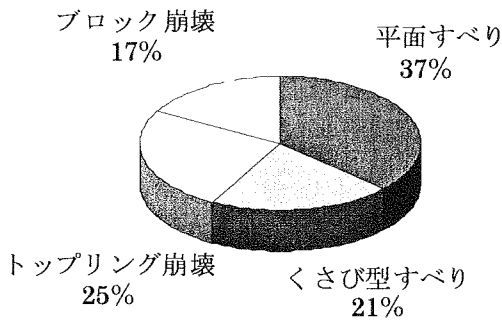


図2 不連続面に規制された岩盤崩壊の形態別発生割合 (鷺見⁸⁾)

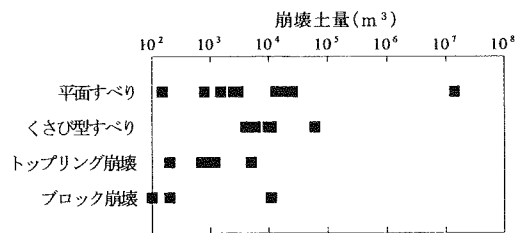


図3 岩盤崩壊の規模の比較 (鷺見⁸⁾)

写真測量の技術を用いており、2枚以上のステレオ写真の2次元情報をもとに、撮影対象の3次元形状を算出することができる。

安定性評価システムは、写真測量により得られた斜面表面の3次元形状および岩盤斜面内の不連続面の情報を用いて、斜面の安定性を評価するシステムである。不連続面の情報は、写真測量時に写真上で斜面表面の亀裂を指定して、内部の不連続面の3次元位置を算出している。そのため、写真測量技術と組み合わせてシステム化を行うことにより、安定性評価までの一連の流れの中で、専門的な知識・技術が必要とならない。

3. 写真取得システム

先に述べたように、本研究では、デジタルカメラを搭載したリモコン飛行機を用いて、空中から斜面の写真を取得する方法を採用した。以下では、本研究で用いた固定翼の仕様について説明する。

固定翼の場合、離発着時に滑走路が必要となるが、実際の危険斜面周辺には十分な滑走路を確保できるスペースがないことが多い。そのため、固定翼のリモコン飛行機の離陸については、カタパルトからの離陸とし(写真1, 2)、また、飛行後の回収に関しても、地面に垂直に立てたネットを使って回収するという方法を採用した(写真3, 4)。また、本研究で用いたリモコン飛行機は、通常のものに比べて主翼面積が大きく、低速飛行(10 m/s程度)が可能であるため、精度の良い写真撮影をすることができる。

4. 写真測量システム

本研究では、斜面の測量に写真測量技術を用いて、複数枚のデジタル写真の2次元情報から、撮影対象の3次元情報を取得するシステムを構築した。先に述べたように、本研究では、危険斜面に対する安価かつ迅速な対策の優先度を評価できる枠組みの構築を目指すものである。そのため、写真測量に関しても、公共測量のような精密な測量を求めるものではなく、使用する写真の枚数を少数枚(2枚または3枚程度)とし、より迅速な写真測量を目指してシステムを構築した。

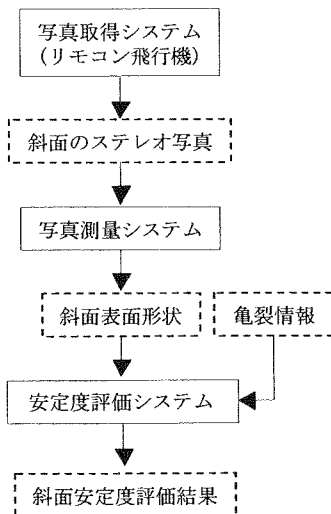


図4 システム全体の流れ



写真1 リモコン機離陸前の様子



写真2 リモコン機離陸後の様子

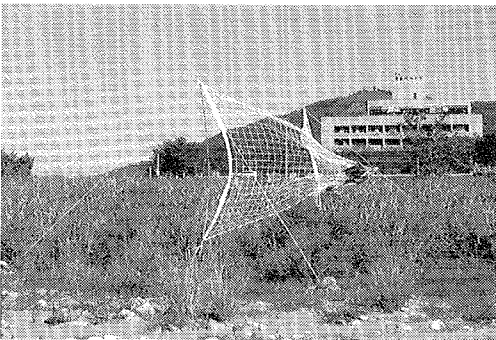


写真3 ネットによる回収



写真4 回収後のリモコン機

4.1 写真測量手法

図5に写真測量の基本原則¹¹⁾を表現した概念図を示す。本研究では共線条件と呼ばれる条件から構築される方程式を用いた。共線条件とは、一枚の写真と一つの計測点に対して、撮影位置と計測点に移りこんでいる写真の点、および標点の3次元座標が一本の直線上に並ぶという条件であり、図5中では点線として示される。共線条件により、写真座標 (x, y) と対象物座標 (X, Y, Z) の関係式が以下のように表現される。

$$x + \Delta x + \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

$$y + \Delta y + \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

ここで、 c は焦点距離、 $a_{11} \sim a_{33}$ は回転行列の要素を示す。 (X_0, Y_0, Z_0) は撮影点座標を示す。また、 $\Delta x, \Delta y$ はカメラのレンズ歪に対する補正量であり、補正式は以下の式を用いた^{12) 13)}。

$$\Delta x = -x_p + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x - x_p) + p_1(r^2 + 2(x - x_p)^2) + 2p_2(x - x_p)(y - y_p) \quad (3)$$

$$\Delta y = -y_p + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x - x_p) + p_2(r^2 + 2(y - y_p)^2) + 2p_2(x - x_p)(y - y_p) \quad (4)$$

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$$

ここで、 (x_p, y_p) はカメラレンズの中心と写真の主点の差異を示す。また、 k_1, k_2, k_3 は放射方向のレンズひずみを補正するための係数であり、 p_1, p_2 は接線方向のひずみを補正するための係数である。

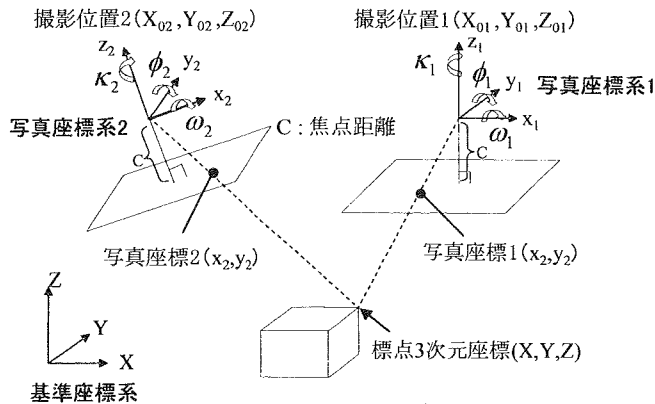


図5 写真測量の基本原理

写真測量では写真座標を計測量として以下に示した未知数を前述の方程式を用いて求める。

- 標点3次元座標：(X, Y, Z)
- 外部標定要素：カメラの撮影位置(X_0, Y_0, Z_0)
カメラの回転角 (ω, ϕ, κ)
- 内部標定要素：焦点距離 c 、レンズひずみ係数 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2

前述の方程式を用いて上記の未知数を求めるが、式(3)、(4)は非線形の方程式であるため、未知数に対して近似値を与え、近似値の周りにテーラー展開して線形化し、最小二乗法により補正量を求めて近似値を補正し、再び同様の作業を繰り返すことにより収束解を求める。式(3)、(4)は強い非線形であるため、最小二乗法による解の収束性が初期値に大きく依存することが知られている¹³⁾。本システムでは、計算を段階的に行うことにより上記の未知数を求めている。写真が2枚の場合は、一枚の写真について外部標定要素とカメラ間距離(2枚の写真の撮影位置の間の距離)を固定して計算を行う。この作業により、実際の3次元形状に相似なモデルが作成される。その後、3次元座標が既知である点(基準点)の情報を用いて対象物座標系と一致するように、モデルを拡大・縮小し、外部標定要素の近似値を算出する。そこから得られた計測量の近似値を用いてとしてバンドル調整法¹¹⁾により標点3次元座標と外部標定要素を求める。写真が複数枚の場合は、一枚の写真を

基準として、その他の写真に対して2枚の場合と同様の作業を行うことにより近似値を求め、最終的にバンドル調整法により解を求める。また、内部標定要素については、事前に別途作業により算出し、バンドル計算の中では固定値として扱っている。内部標定要素の算出については次節で示す。

上記の説明の中で、基準点の3次元座標を与えることにより、スケールの決定を行うことを示したが、2点間の長さ情報のみでも、実寸大の3次元モデルは構築される。しかし、その場合、鉛直・水平方向が不明となる。後で説明する安定性評価手法には、不連続面の傾斜角等が必要となるため、本システムでは、少なくとも鉛直方向の情報は必要となる。そのため、鉛直軸の方向を決定するために、鉛直軸上にある2点を選んで、その方向を鉛直方向として計算を行う。この場合、鉛直軸上の二点の距離が既知であれば、鉛直軸を指定すると同時に長さの情報も与えることができる。実際の危険斜面では、3点以上の正確な3次元座標の取得は困難であることが多いため、鉛直方向の2点を基準点とする方法が有効である。

4.2 内部標定要素の補正

内部標定要素を他の未知数と同じく変数として扱い、同時に求めることも可能であるが、本節の冒頭に述べたように、対象物の写真が少数枚という条件での解析が必要となり、その場合、計測点

が写真上の一部分に偏っている場合、レンズのひずみを精度よく補正できない恐れがある。そのため、本システムでは、内部標定要素に関しては、事前に別途作業により求める。具体的には、3次元形状を精密に計測した物体を写真画面いっぱいに写るように撮影し、標点3次元座標については予め計測した値を固定値として与え、バンドル調整法を用いて外部標定要素と内部標定要素を算出する。このとき、レンズのひずみを精度よく補正するために、角度を変えて複数枚撮影し、その全ての写真を解析に用いる。ただし、焦点距離に関しては、全ての写真で同一の値を用いて計算するため、焦点距離は常に固定して撮影をする必要がある。内部標定要素は、同一のカメラであれば同値となるので、一度解析すれば、次回からはその値を使うことができるため、毎回この作業を行う必要はない。

4.3 写真測量システムの流れ

対象物の写真をデジタルカメラで複数枚撮影した後、そのデジタル写真を使ってパソコン画面上で写真座標系の2次元データを取得し、解析により対象物の3次元情報を取得する。ここでは、3次元情報が得られるまでの作業およびその手順について説明する。図6に作業の流れを示す。以下、作業の流れを箇条書きで示す。なお、箇条書き先頭の番号は、図6中の作業の番号に一致するものとする。

1. 写真上の対象物の中で、標点を選定し、全ての写真上で選定した点の写真座標を取得する。
2. 1で取得した標点の写真座標について、異なる写真間でどの写真座標が同一点を示しているかという情報を与える。
3. スケールおよび基準座標系の情報を与えるために、基準点の実寸大の3次元座標を入力する。写真解析の原理の中で示したように、3点以上の基準点の実寸大の座標値を入力することにより、出力される全標点の3次元座標は、基準点の座標系に一致する。3点の3次元座標の取得が困難なときは、2点間距離

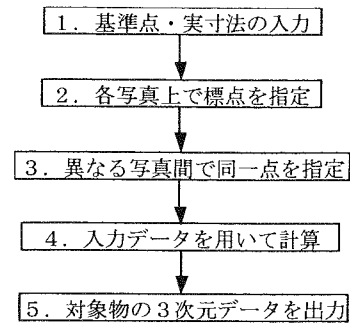


図6 写真測量システムの流れ

と鉛直方向を指定する。この場合、斜面上に棒状の物（測量用のポールなど）を鉛直に立てて撮影すれば、そのポールが長さ情報と鉛直方向を与えてくれるため、現場での作業が省力化される。ただし、3点以上の基準点を設けて、その3次元座標を入力値とした方が、より正確な3次元モデルを構築することができる。

4. 各写真から取得した標点のデータおよび基準点のデータを入力データとして、3次元化のための演算を行う。
5. 写真上で指定した標点に関して、3次元座標が出力され、3次元モデルとして表示される。

4.4 自動マッチング機能

解析システムの流れの中で示したように、写真解析を行うためには、写真上で標点を選定し、全ての写真上の標点の写真座標を取得し、さらにそれらの写真座標に対して同一点であるという情報を与える必要がある。撮影対象物が立方体のように少数の面で構成されているような物であれば、少数の標点を指定すれば対象物の表面形状を表現することは可能である。ところが、岩盤斜面のように多数の面で構成された複雑な形状を再現するためには、写真上の斜面上に標点を多数設ける必要がある。標点が多数になると、各写真で標点の写真座標を取得して同一点を検索する作業には多大な労力と時間を要する。そのため、画像処理技術

14) を用いて、この作業を自動で行う機能を設けた。以下この機能のことを自動マッチング機能と呼ぶ。この自動マッチング機能を用いることにより、多数の標点を設けることが可能となる。まず、一枚の写真上で、計測したい部分にメッシュを貼り付け、メッシュの節点を標点として指定する(写真5)。指定した全ての標点に関して、異なる写真上で同一点が自動で検索される(写真6)。

この自動マッチング機能を用いることにより、作業時間の大幅な短縮を図ることができる。しかし、この機能を用いた場合、明るさの変化や、撮影角度の違いにより、間違っただ点を同一点として認識する場合がある。そのため、自動マッチング機能で出力された結果の中で間違っただ点については手動で修正する必要がある。また、外部標定要素を求める際には、自動マッチングにより得られた写真座標を用いるのではなく、手動で取得した写真座標のみを用いて計算する。

5. 安定性評価システム

前述の写真測量システムにより出力された斜面の表面形状と、斜面表面に存在する亀裂の位置情報を用いて、安定性評価システムにより、斜面の安定性を評価する。先に述べたように、岩盤斜面の安定性評価手法には、鷺見・八嶋の手法(以下採用手法と記す)を採用した。

5.1 安定解析手法(採用手法)

採用手法では、斜面の破壊形態の中で、不連続面に規制された岩盤すべり崩壊を主な評価対象としている。図1に示したように、岩盤すべりは、平面すべりとくさび型すべりに分けられるが、平面すべりはくさび型すべりの特殊な場合と位置づけることができるため、くさび型すべりのみを考えればよい。岩盤の静的すべりを考える場合、くさび型すべりが発生するかどうかは、「2つの不連続面の交差線(図7中の直線AC)と岩盤斜面の幾何的關係」と「くさび型ブロックに作用する外力とすべり抵抗の關係」によって決まる。これらを要約すれば、以下の4つの条件(図8)を同時に満たすときのみ、くさび型すべりが発生する

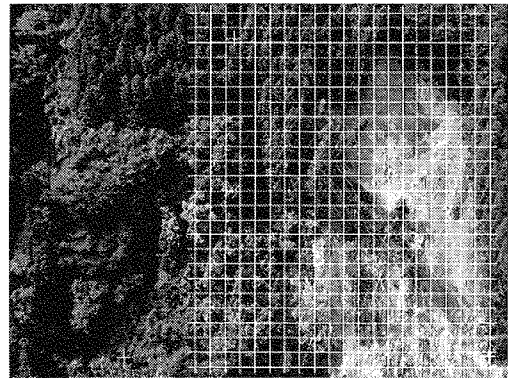


写真5 標点の指定(メッシュの節点)

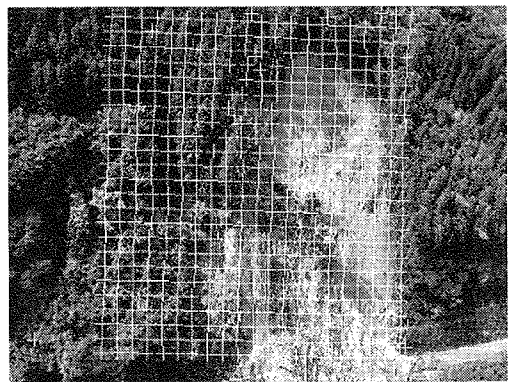


写真6 自動マッチング機能による検索結果

可能性がある。

条件1: 交差線が斜面と直交方向あるいは反対方向へ傾斜しない

条件2: 交差線の傾斜角が、交差線を含む断面における斜面の見かけの傾斜角より小さい

条件3: 交差線が斜面と交わる

条件4: 外力の交差線方向成分がすべり抵抗力より大きい

条件1と条件2は、交差線が岩盤斜面に対していわゆる流れ盤構造を形成するための幾何条件である。また条件3は、岩盤斜面と不連続面の位置に関わるもので、岩盤斜面がくさび型ブロックのすべる方向に存在することを表している。採用手法では、解析対象とするくさび型不連続面について、上記4条件の全てを検討することになる。た

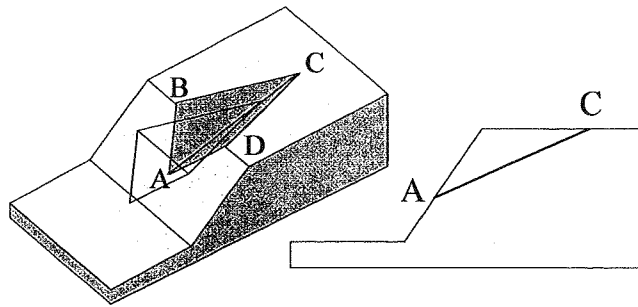


図7 2つの不連続面の交差線

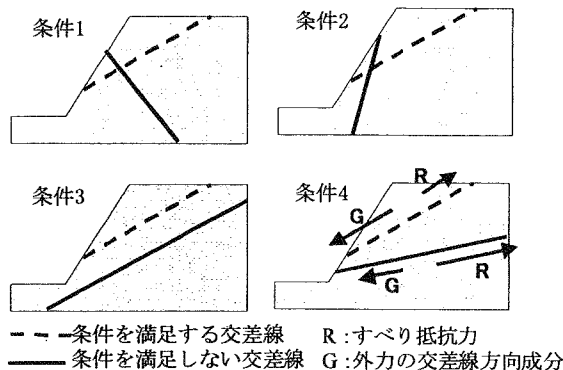


図8 岩盤ブロックのすべり条件

だし、条件4の検討に関しては、次に示す仮定を設けることにより、くさび型ブロックに作用する力のつりあい条件を不連続面の幾何条件とすべり摩擦角との関係に帰着させている。

仮定1：モーメントの影響は無視できる。つまり、回転を伴うすべりは考慮しない。

仮定2：不連続面に沿う破壊規準として、モール・クーロン式 ($\tau = c + \sigma \tan \phi$) を採用する。ただし、 τ は不連続面のせん断抵抗力、 c は粘着力、 σ は垂直応力、 ϕ はすべり摩擦角を表す。

水圧と地震力の影響については、静水圧が不連続面に垂直に作用するものと仮定し、地震力は設計震度法により静的な外力として作用させる方法を採用することにより、上記のすべり条件4の検討の中で考慮している⁸⁾。採用手法では、これら

岩盤すべり条件を簡単な数式で表現しているため、プログラム化が可能で、多数の不連続面データの解析に適している。

5.2 岩盤斜面内部の不連続面(すべり面)の検出

斜面の安定性評価を行うためには、写真測量システムで得られた斜面表面の3次元形状に加えて、岩盤ブロックを構成する斜面内部の不連続面の情報が必要となる。そのため、内部の不連続面位置を想定する必要がある。安定性評価システムでは、岩盤斜面表面の亀裂の位置から、内部に存在する不連続面の位置を算出する。写真自体は平面の情報であるので、その上で亀裂の位置を指定しても岩盤内部のすべり面を想定することはできない。しかし、岩盤表面の3次元形状と組み合わせるこ

とにより、岩盤内部のすべり面を想定することができる。ここで図9(a)のような6面体を考える。この6面体の表面に点線で示された亀裂が存在したとする。この亀裂の情報により、図9(b)のような内部の不連続面を想定することができる。このように岩盤斜面のすべり面をすべて抽出し、前述した採用手法で判定することによって、どのブロックが不安定であるか評価する。ただし、この例でわかるように、本研究では曲線を持つ不連続面は想定していない。また、不連続面の表面は完全に平面として評価を行うため、不連続面の凹凸が摩擦抵抗力に及ぼす影響についても無視している。これらの条件を考慮しようとする、全ての不連続面に関して現地で詳細に調べる必要があり、膨大な労力と時間を要する。また、不連続面の凹凸に至っては、外部からは想定することが困難であり、専門的な知識を要する。前述のとおり、本研究で提案するシステムは、膨大な数の危険斜面に対して、危険度を安価かつ迅速に評価することを目的としているため、不連続面は全て凹凸のない平面として仮定している。

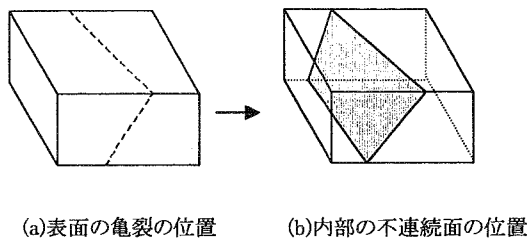


図9 内部の不連続面の想定

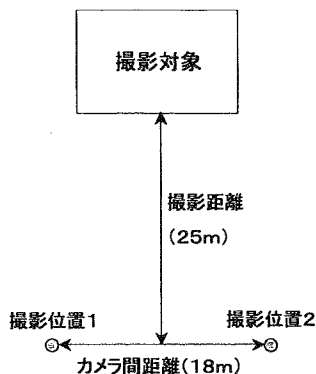


図10 撮影条件の概略図

6. システムの検証

6.1 写真測量システムの精度検証

写真測量システムの精度を検証するために、構造物を撮影し、写真測量システムを用いて測量を行った。写真の撮影には、解像度の異なる2種類のカメラ(320万画素, 500万画素)を用いた。撮影条件の概略図を図10に示す。撮影距離は25m, カメラ間距離を18mとして、地上から撮影位置を変えて2枚撮影した。撮影対象とした人工物を写真7に示す。構造物の特徴点にはターゲットを貼り付け(写真8), そのターゲットの3次元座標を測量した。ここで、写真8は写真7の左下に示した点線で囲まれた部分を拡大したものである。ターゲットは構造物全体に31個設置した。ターゲット中心の正確な3次元座標を取得するために、予め測距儀によりターゲット中心の位置座標を計測した。このとき、X軸を水平方向、Y軸を奥行き方向、Z軸を鉛直方向に設定した。この測距儀による計測結果を正解値として、システム

により出力される3次元座標との比較を行った。表3はシステムの出力結果の誤差平均とその標準偏差および誤差率の平均値を示している。ここでいう誤差とは、測距儀による計測結果とシステムの出力結果の差異であり、誤差率とは、撮影距離に対する3次元座標の誤差を百分率表示したものである。本研究では、この写真測量システムを危険斜面に対して適用し、斜面の形状と内部の不連続面の位置を算出して安定性評価システムの入力値とする。先に示したように、安定性評価システムで用いている手法は、簡易的・概略的なものであり、公共測量のように精密な測量結果を必要としない。そのため、表3に示した結果は、安定性評価システムの入力値としては十分な精度を有すると言える。

6.2 模型岩盤斜面を用いた安定性評価システムの検証

模型の岩盤斜面を作成し、安定性評価システムの有効性について検証した。用いた模型岩盤斜面の写真を写真9に示す。写真測量に用いた写真の枚数は2枚であり、カメラ間距離を1.0 m、撮影距離を0.6 mとした。デジタルカメラは630万画素のものを用いた。写真測量システムにより模型岩盤斜面表面の3次元形状を取得し、その3次元情報および斜面表面に確認できる亀裂情報を入力データとして、岩盤斜面安定性評価システムにより斜面の危険度を評価した。この模型岩盤斜面には、あらかじめ3つの不連続面を用意した(写真10)。不連続面J1とJ2は岩盤斜面模型を斜めに

分断する不連続面であり、J3は岩盤斜面模型中段に位置する水平な不連続面である。表4に安定性評価システムによる判定結果を示す。前述したように、安定性評価システムでは、4つのすべり条件により、岩盤ブロックの安定性の評価を行う。表4中の●は条件を満たしていることを示しており、判定の欄の▼は不安定な可能性があるという結果を示している。3つすべての不連続面の組合せについて判定を行った結果、J1とJ2からなる不連続面の組合せが4つの条件をすべて満たしているため、このブロックが不安定な可能性があるという判定された。現実の岩盤斜面模型においても、

表3 システムによる結果

| 画素数(画素) | 誤差平均(cm) | | | 誤差標準偏差(cm) | | | 誤差率平均(%) | | |
|---------|----------|------|------|------------|------|------|----------|------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 320万 | 2.24 | 4.44 | 2.27 | 1.94 | 1.75 | 1.87 | 0.09 | 0.18 | 0.11 |
| 500万 | 1.19 | 2.00 | 1.71 | 1.33 | 1.65 | 1.42 | 0.05 | 0.08 | 0.07 |

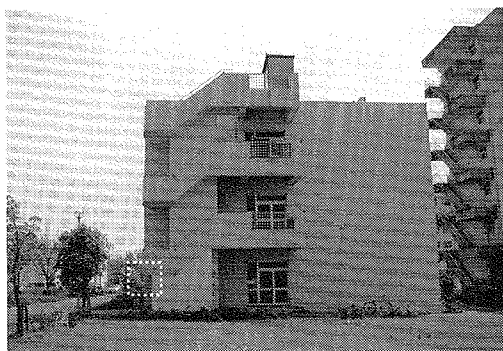


写真7 検証に使用した構造物

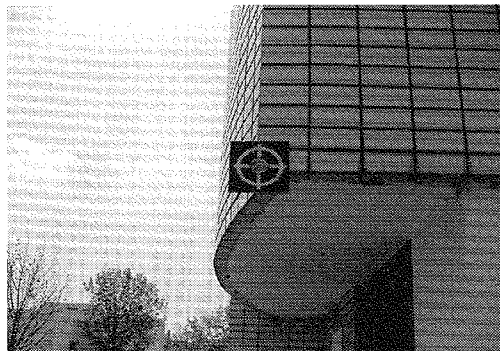


写真8 ターゲットの設置状況

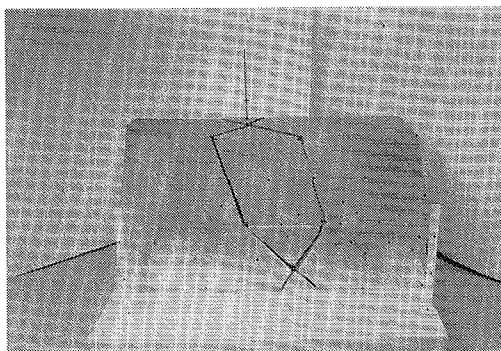


写真9 模型岩盤斜面

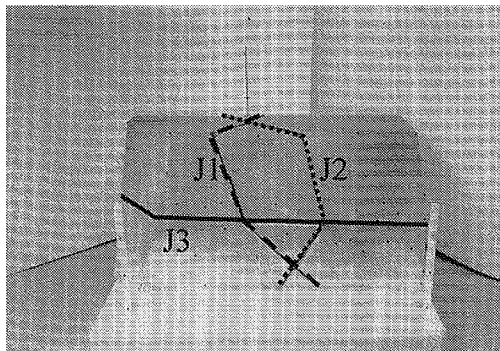


写真10 表面の亀裂(不連続面)

表 4 模型岩盤斜面の安定性評価結果

| 不連続面の組み合わせ | 条件 1 | 条件 2 | 条件 3 | 条件 4 | 判定 |
|------------|------|------|------|------|----|
| J1-J2 | ● | ● | ● | ● | ▼ |
| J1-J3 | ● | ● | | | |
| J2-J3 | ● | ● | | | |

くさび型不連続面 J1-J3 と J2-J3 に規制されたブロックは安定している、これに対して、くさび型不連続面 J1-J2 に規制されたブロックは不安定な状態にあり、評価結果と一致する。

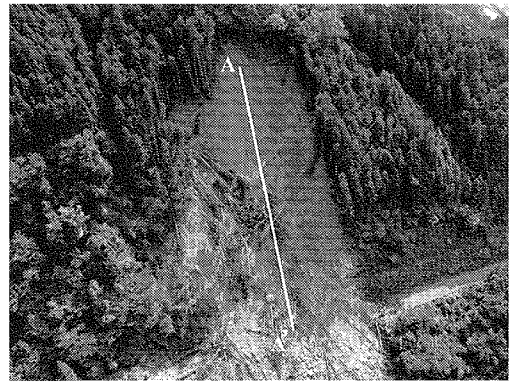


写真 11 斜面崩壊跡地 (岐阜県恵那郡串原村)

6.3 斜面崩壊跡地の 3 次元化

平成 15 年 8 月 17 日に、岐阜県恵那郡串原村内 (現恵那市) で、高さ約 100 m、幅約 70 m の非常に大規模な斜面崩壊が発生した。本研究グループは、発生から 2 日後の 8 月 19 日に現地において、リモコン飛行機による写真取得および写真解析システムによる斜面崩壊部分の 3 次元形状の取得を試みた。リモコン飛行機は固定翼を、デジタルカメラは 320 万画素のものを用いた。写真 11 はリモコン飛行機から撮影された斜面の写真である。基準点の 3 次元座標の取得に関しては、光波測量で得られた斜面上の特徴点の 3 次元座標を用いた。写真測量に用いた斜面の写真は 2 枚である。リモコン飛行機を用いて写真を取得したため、現地でカメラ間距離や撮影距離を確認することはできなかったが、写真測量結果より逆算すると、カメラ間距離は約 12 m であり、撮影距離は約 120 m であった。図 11、12 に本システムから出力された斜面の 3 次元モデルを示す。また、本システムの出力結果を光波測量結果と比較した結果を図 13 に示す。図 13 は写真 11 上に示した斜面上の A-A' 断面における断面形状を示したものである。図 13 より、光波測量と本システムから得られた結果は概ね一致しており、斜面の表面形状をよく表現していた。

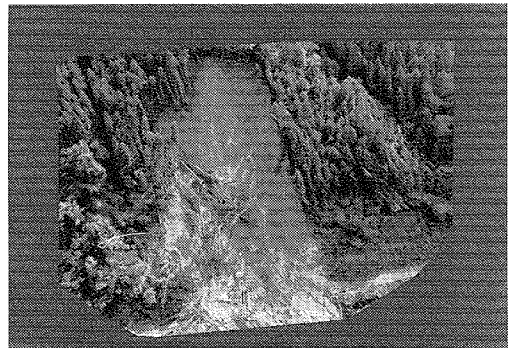


図 11 斜面表面形状 3 次元モデル (正面)

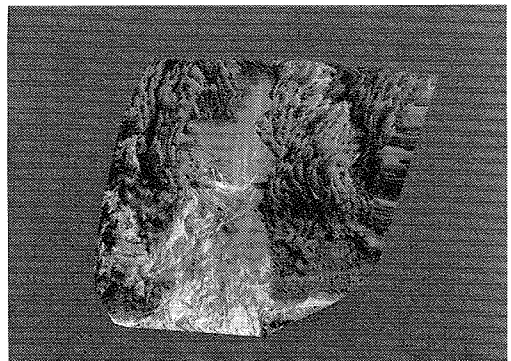


図 12 斜面表面形状 3 次元モデル (側面)

6.4 写真測量システムの作業時間

写真測量システムを用いて、斜面の 3 次元モデ

ルを構築する際の作業時間について調べた。対象は岐阜県本巣郡根尾村松田地区 (現本巣市) の斜面崩壊跡地とした。対象斜面の写真を写真 12 に示す。この検証では、標点数を変化させて、3 種

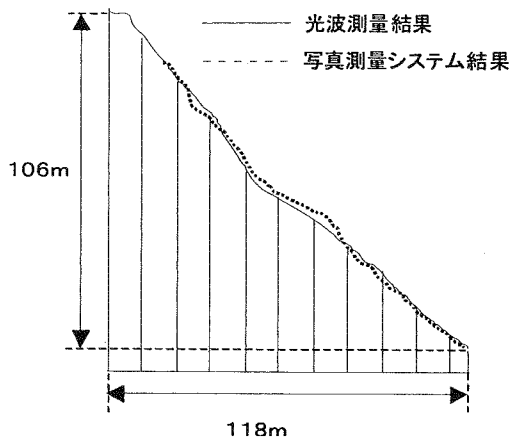


図 13 光波測量結果との比較 (A-A' 断面)



写真 12 斜面崩壊跡地 (岐阜県本巣郡根尾村)

類の 3 次元モデルを構築し、それぞれのモデルが構築されるまでの作業時間について調べた。3 種類の 3 次元モデルを図 14, 15, 16 に示す。図 14, 15, 16 を見てわかるように、これらは同一箇所 (崩壊部分) のモデルを示しているが、標点数が異なっている。これは、先に述べた自動マッチング機能を使用する際に、メッシュの細かさを変化させて標点数を変化させたものである。当然メッシュを細かくするにつれて、斜面表面の形状を詳細に表現することができる。ところが、メッシュを細かくするにつれて作業時間が増加する。以下では、ここに示した 3 種類のモデル (図 14, 15, 16) について、それぞれのモデルが作成されるまでの作

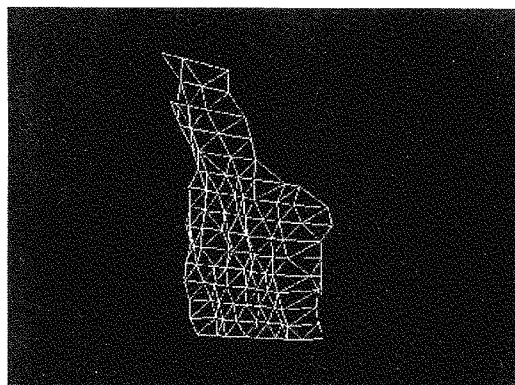


図 14 崩壊部分 3 次元モデル (1)

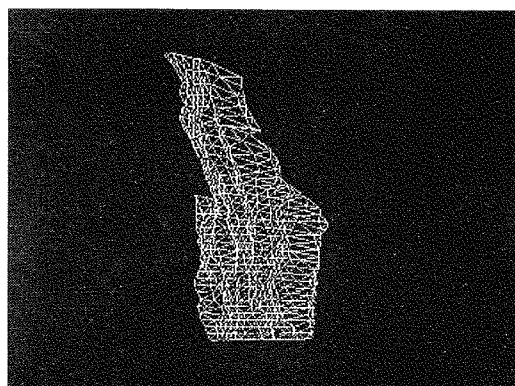


図 15 崩壊部分 3 次元モデル (2)

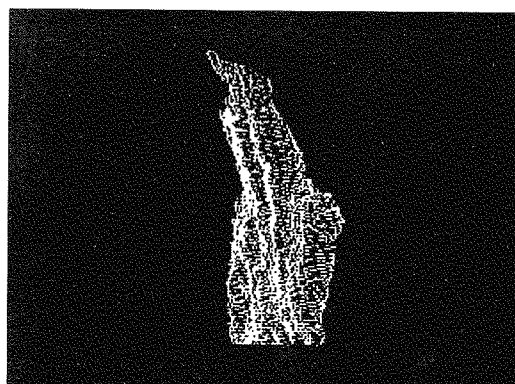


図 16 崩壊部分 3 次元モデル (3)

業時間を調べた結果について述べる。

図 14, 15, 16 のモデルをそれぞれケース 1, 2, 3 とする。各ケースのメッシュ間隔およびそのときの標点数を表 5 に示す。ここで示したメッシュ

間隔とは、1メッシュの縦または横方向に含まれる画素数を示している。メッシュは写真上で指定するため、単位は画素の単位であるピクセルとなっている。そのため、メッシュ間隔が小さいほど詳細なメッシュであることを意味し、その節点で表現される標点数も多くなる。本検証では、写真測量システムを操作する上で必要な作業を以下の3つの作業に分けて、それぞれの作業時間の変化を調べた。

- 作業① 自動マッチング検索
- 作業② 自動マッチング結果確認
- 作業③ その他

作業①の自動マッチング検索とは、メッシュで標点を指定した後に、異なる写真間で同一点を検索する作業であり、前述したように、この作業は自動化されている。しかし、標点数が膨大になると、パソコンに負荷がかかり、作業時間が増加する。作業②の自動マッチング結果確認とは、自動マッチング機能により出力された結果を、写真上で人間が確認する作業である。この作業も標点数が膨大になると、修正点が増加するため、作業時間が増加する。作業③のその他は、データの入出力や計算に必要とされる時間である。表6に各ケースのそれぞれの作業に要した時間を示す。この結果より、標点数の増加により最も影響を受けるのは作業②であることがわかる。特にケース3の結果では、全体で80分の作業時間を必要とし、そのほとんどを作業②に費やしている。このように、斜面表面の3次元モデルを作成する際に必要となる作業時間は、標点を指定するメッシュの細かさに大きく依存する。

6.5 危険岩盤斜面への適用

岐阜県加茂郡白川町内の岩盤斜面(写真13)を対象として、写真計測および安定性評価を行った。ここでは、固定翼と回転翼の両方のリモコン飛行機を用いたが、地形上飛行に制約を大きく受ける箇所であったため、回転翼の写真の方が鮮明で、撮影距離も短かったために、回転翼で撮影された写真を用いた。デジタルカメラは500万画素のものを用いた。写真測量に用いた写真の枚数は2枚

表5 各ケースのメッシュ間隔と標点数

| | メッシュ間隔(pic) | 標点数 |
|------|-------------|------|
| ケース1 | 23 | 140 |
| ケース2 | 10 | 720 |
| ケース3 | 5 | 2314 |

表6 各ケースの作業時間

| | 作業① | 作業② | 作業③ | 計 |
|------|-----|-----|-----|----|
| ケース1 | 1 | 9 | 10 | 20 |
| ケース2 | 5 | 25 | 10 | 40 |
| ケース3 | 10 | 60 | 10 | 80 |

単位:分

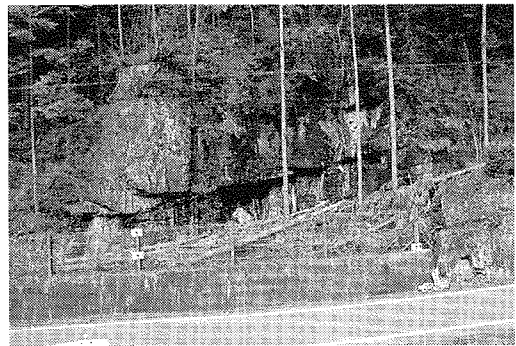


写真13 岩盤斜面(岐阜県加茂郡白川町)

である。また、写真測量結果から得られたカメラ間距離は約11mであり、撮影距離は約24mであった。写真計測システムから得られた3次元モデルを図17, 18に示す。この現場では、写真測量の精度の検証材料として、メジャーで測った2点間距離を用いた。2点間距離は7箇所計測しておいた。実測値と写真測量による結果との比較を行ったところ、平均誤差は約1.5cmであり、平均誤差率は約0.07%と非常に小さく、高い精度であることが確認された。

続いて、安定性評価を行った。本システムでは、岩盤斜面の表面形状とき裂の位置情報により、内部の不連続面を想定し、不安定岩盤ブロックの抽

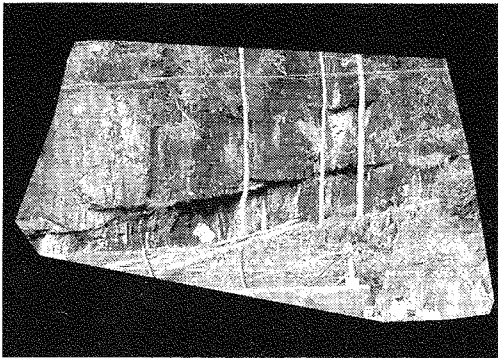


図 17 岩盤斜面 3 次元モデル (正面)

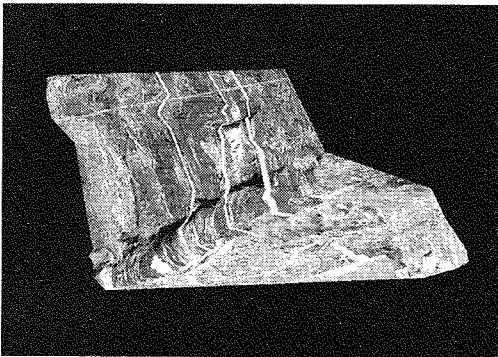


図 18 岩盤斜面 3 次元モデル (側面)

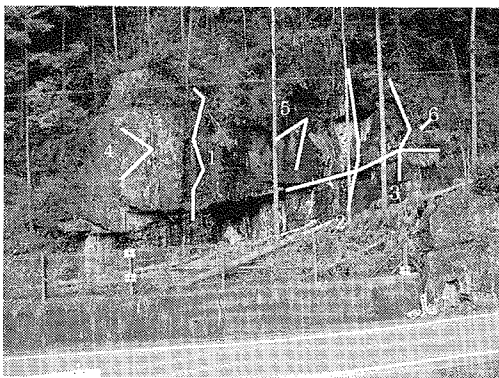


図 19 岩盤表面の亀裂の位置

出を行う。定義したき裂は全部で7箇所であり(図19)、これらのき裂(不連続面)で構成される全ての岩盤ブロックについて安定性評価を行った。表7に本システムによる評価結果を示す。▼は不

安定な可能性があるという判定結果を示している。表7の結果より、1-4, 2-4, 2-5, 3-5, 4-5, 4-7, のき裂の組み合わせで構成される岩盤ブロックが不安定な可能性があると評価された。また、本システムで危険であると判定された岩盤ブロックを構成する不連続面(き裂番号1, 2, 3, 4, 5, 7)の3次元的位置の正確さを検証するために、3次元空間における各き裂の傾斜方向について検証した。3次元空間における平面の傾斜方向を記述する方法に、傾斜ベクトルを用いる方法がある。傾斜ベクトルとは、図20に示すように平面の最急傾斜方向の単位ベクトルを表し、方位角 λ (北から東回り方向の角度)と傾斜角 β (伏角)で記述される。つまり、方位角は、平面あるいは直線の傾斜方向を北から東回りの角度で表したものであり、傾斜角とは、平面あるいは直線と水平面の成す角度で表現される。表8は、本システムから得られた傾斜角・方位角について示したものである。比較のために、現場において技術者がクリノメータを用いて計測した結果を並べて示した。クリノメータによる計測は、内部の不連続面を想定して、その平均面と予想される部分の方位角と傾斜角を計測するため、完全に正解値とは限らないが、岩盤斜面の不連続面の計測には一般的に用いられる手法であるため、今回の検証結果の比較値とした。表8より、本システムから得られた結果とクリノメータによる計測結果の間の角度差は、方位角で20度程度、傾斜角で10度程度となった。一見するとかなりの差があるように感じられるが、クリノメータによる計測でも、同じ不連続面について、観測者が違えばこの程度の誤差が発生することはよく知られている。また、本システムが詳細な調査の前段階の概略的な評価を下すことを目的としていることを考慮すれば、表8に示した本システムにより得られた結果は実用性の範囲と言える。さらに、本システムでは、図21に示すように、表面のき裂から定義した内部の不連続面の位置を、視覚的に判断することができるため、より正確に内部の不連続面を想定することが可能である。

表7 岩盤斜面の安定性評価結果

| 不連続面番号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | ▼ | | | |
| 2 | | | | ▼ | ▼ | | |
| 3 | | | | | ▼ | | |
| 4 | | | | | ▼ | | ▼ |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

表8 不連続面の方位・傾斜角の比較

| 不連続面番号 | 本システム | | 実測 | |
|--------|-------|-----|-----|-----|
| | 方位角 | 傾斜角 | 方位角 | 傾斜角 |
| 1 | 192 | 78 | 226 | 84 |
| 2 | 222 | 74 | 235 | 85 |
| 3 | 225 | 83 | 250 | 86 |
| 4 | 160 | 76 | 170 | 80 |
| 5 | 168 | 73 | 182 | 88 |
| 7 | 309 | 17 | 302 | 10 |

単位：度

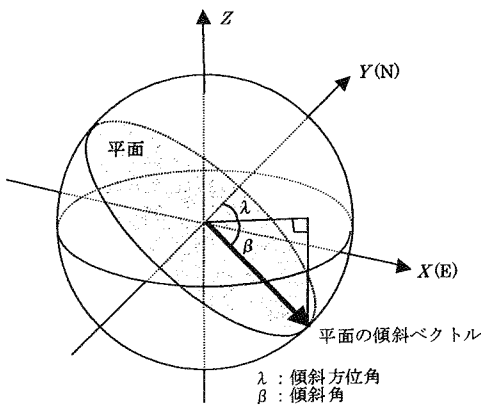


図20 方位角と傾斜角

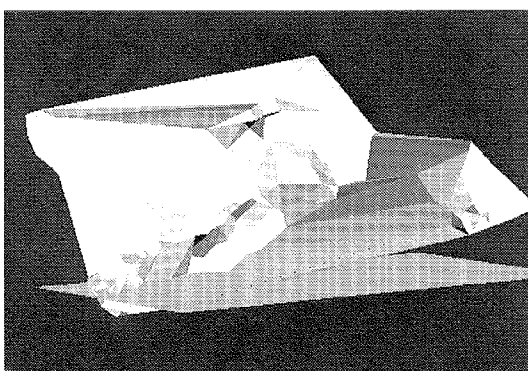


図21 内部不連続面の位置の視覚的確認

7. まとめ

本論文では、デジタル写真測量技術、リモコン飛行機による写真取得技術、簡易安定度評価技術の3つの技術を組み合わせたシステムの詳細について紹介した。また、システムを用いた各種検証例を示した。以下に各種検証結果をまとめる。

1. 写真測量システムの精度検証のために、ターゲットを配置した人工物を撮影し、その写真を用いて写真測量を行った。その結果、安定性評価システムの入力値としては十分な精度を有することが確認された。
2. 安定性評価システムの精度検証として、予め不連続面を設けた模型岩盤斜面を作成し、モデル岩盤の3次元形状と不連続面の情報から、不安定ブロックを抽出した。安定性評価システムにより抽出されたブロックは、予め設けた不安定ブロックについて、不安定な可能性があるという結果を示し、安定性評価システムの有効性を確認することができた。
3. 斜面崩壊跡地を対象とした検証では、リモコン飛行機から撮影された斜面崩壊跡地のステレオ写真を用いて、斜面表面の3次元形状モデルを作成した。作成したモデルは、光波測量から得られた結果と概ね一致しており、斜面の表面形状をよく表現していた。また、標点を増加させて、より詳細な表面形状モデルを作成し、そのときの作業時間について調べた。これより、標点を増加させることにより、自動マッチング結果を目視で確認する作業に必要な時間が大幅に増加することが確認された。
4. 実岩盤斜面を対象とした検証では、危険斜面内の不安定ブロックの抽出を行った。本システムにより算出される不連続面の検証を行うために、同じ岩盤斜面を対象として、傾斜・方位角をクリノメータで計測し、比較した。その結果、写真測量システムにより算出される不連続面の傾斜・方位角は、簡易的な安定性評価に対して十分な精度が期待できることが確認された。

本システムを活用することにより得られる利点を以下にまとめる。

- ① 短時間・低コストで危険岩盤斜面の情報を取得できる。
- ② 人間が近づけない危険な箇所であっても、写真取得にリモコン飛行機を用いることにより調査が可能である。
- ③ リモコン飛行機の操縦を除けば、一連の作業の中で専門的な技術を必要としないために、管理者自身が調査を行える。また、リモコン飛行機を用いなくても写真の撮影が可能な斜面に対しては、地上からの撮影となり、専門的な技術を全く必要としない。
- ④ 写真取得・写真解析・安定性評価の3つのシステムは、連動して動作可能であるが、用途によって、個別に活用することも可能である。
- ⑤ 写真測量時に自動マッチング機能を用いて斜面の形状をメッシュ状に取得できるため、数値解析等に用いるメッシュの作成が容易である。

上記①, ②, ③の利点は、危険斜面が多数存在する地域において、効果的な防災対策を進める上で重要である。また、④に示したように、調査の目的によって、システムを使いわけることが可能となっている。そのため、幅広い用途が考えられる。さらに、利点⑤より、被害予測・被害想定を対象とした数値解析との連動したシステム化が可能であり、斜面防災のソフト対策に対して、より効果的な情報を提供できる。

参考文献

- 1) 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊と落石問題に関する現状と課題, 地すべり, Vol.39 No.1, pp. 1-13, 2002.
- 2) Sawada, K. and Sumi, T.: Decision Making System for the Prevention of Slope Failure Utilizing GIS, Proc. of the 12th Asian Regional Conference of Int. Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, Vol.1, pp. 985-988, 2003.
- 3) 山口 誠, 八嶋 厚, 沢田和秀, 森口周二, 伊藤修宏, 荻本健二, 中村洋一, 鈴木 真: GISを用

いた岐阜県道路防災支援システムの構築, 第38回地盤工学研究発表会, pp. 2215-2216, 2003.

- 4) 仲野公章, 清水孝一, 山越隆雄, 葛西勝栄, 中村剛, 秋山幸秀, 高貫潤一: 2000年有珠山噴火におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定, 砂防学会誌, Vol.53, No.6, pp. 88-94, 2001.
- 5) 中原博隆, 近久博志, 筒井雅行, 樋口敏一, 増田 語, 高橋俊行: 精密写真測量の建設現場への適用における撮影方法について, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 431-432, 2002.
- 6) 中原博隆, 近久博志, 筒井雅行, 阿保寿郎: セルフキャリブレーション法を用いた精密写真測量による測量精度に関する基礎実験, 第22回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp. 53-56, 2001.
- 7) 鷺見武富, 八嶋 厚: 不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤斜面の安定性評価手法, 土木学会論文集, No.659/Ⅲ-52, pp. 265-276, 2000.
- 8) 鷺見武富, 八嶋 厚: 岩盤斜面における水圧と地震力を考慮した不安定なくさび型不連続面の検索手法, 土木学会論文集, No.687/Ⅲ-56, pp. 125-138, 2001.
- 9) 鷺見武富: 岩盤斜面におけるくさび型不連続面の安定性評価に関する研究, 岐阜大学学位論文, 2003.
- 10) 大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会: 大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会報告書, 土木学会, 1997.
- 11) 秋元圭一, 服部 進, 大西有三, 三浦 悟: 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用, 土木学会論文集, No.687/Ⅲ-56, pp. 289-301, 2001
- 12) Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M.: Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, No.10, 1992.
- 13) 服部 進, 秋元圭一, 岡本 厚, 長谷川博幸, 井本治考: ターゲット場の多重撮影による基準点のないCCDカメラキャリブレーション, 電子通信情報学会論文誌, Vol.1, J82-D-II, pp. 1391-1400, 1999
- 14) 舟久保登: パターン認識, 共立出版株式会社, pp. 15-29, 1991.

(投稿受理:平成16年5月24日)

訂正稿受理:平成16年12月8日)