

ステレオ写真を用いた地すべりの挙動把握手法に関する検討

小原嬢子* 坂本孝之** 石田孝司*** 藤澤和範****

1. はじめに

近年、崩落のおそれのある地すべり地において、危険回避のためにCCTVカメラなどの監視カメラを現場に設置するケースが見受けられ、テレビなどではその映像を利用した報道がされるなど、地すべり現象を広く人々が知る機会が増えてきた。これら映像は、地すべり監視や滑動履歴の記録だけではなく、解析手法を用いて、地すべり滑落時の移動速度の計測¹⁾や斜面の変形状況から地すべり内部の応力状態の推測に利用された例もある²⁾。

しかし、地すべり滑動が3次クリープに到達するような崩落に向かう地すべり体（以下、「崩落に向かう地すべり体」と呼ぶ）は、移動速度が大きく、監視カメラ程度の性能では精度の高い画像解析は困難である。精度の高い地形計測には光波測距儀や3Dレーザスキャナの利用も考えられるが、時々刻々と変化する地表面の移動形態を面的に測定することは困難である。

近年、低コスト化と高画素化の進んだデジタルカメラによる写真計測技術は、情報化施工や構造物の維持管理³⁾など様々な分野で利用されており、地すべり災害現場においても遠隔から安全に、広範囲を短時間で撮影できるため、有効な手法であると考えられる。そこで、写真測量技術を利用した、崩落に向かう地すべり体の3次元的な挙動を把握

するシステムの検討を行った。なお、本検討は倉敷紡績(株)、(株)パスコ、中日本航空(株)、川崎地質(株)、(株)大興計測技術、(株)ビジュアル・システムズとの共同研究により行ったものである。

2. システムの概要

崩落に向かう地すべり体の3次元的な滑動状況を把握するためのシステム概要を図-1に示す。複数のデジタルカメラを用いてステレオ画像の連続撮影を行い、得られたステレオ画像を解析して地表面の3次元地形モデルを作成する。また、地すべり体の挙動を再現するために、時系列の3次元地形モデルを利用した3次元CGアニメーションの作成を行う。

3. 連続ステレオ写真撮影手法の検討

経時的な地すべり体の3次元地形モデルを作成するために、複数のカメラを用いて連続的に同期撮影するシステムを検討した。過去に崩落した地すべりの事例²⁾から、移動体の移動速度が静止状態～4m/秒(最大10m/秒)程度を想定し、これを連写速度2コマ/秒で30秒以上、1コマ/秒で5分以上撮影できるシステムを目標とした。また、現場では数10m～数100m離れた位置から地すべりを撮影するため、精度良い解析を行うために有効画素数などが大きいデジタル一眼レフカメラを用い、画



図-1 3次元計測システムの概要

像の質とカメラ価格のバランスを考慮して、1,200万画素、受光素子サイズが大きく比較的安価な市販のデジタルカメラを本研究で用いた。複数台のカメラを同期させる方法としては、倉敷紡績株式会社が保有する同期撮影システムを改良し、安定的に連写撮影するために画像を取り込むためのノートパソコンをカメラに接続してシステムを組むこととした(図-2)。

複数台設置したカメラの同期性を確認するために、連写速度1コマ/秒で20分程度の撮影実験を行った結果、標準偏差で±0.003秒の同期ズレが確認された。また、本システム構成において、目標とする連写速度で欠撮を生じず安定的に撮影できる撮影時間を調べた結果、2コマ/秒で35秒間、1コマ/秒で10分間であったため、本システムの目標を達成し、実用上問題ないことがわかった。

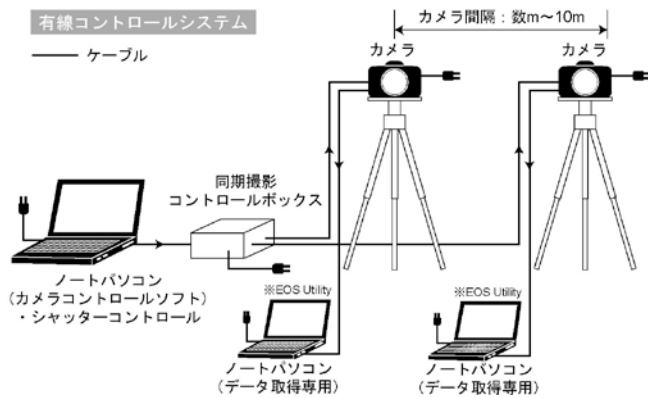


図-2 同期撮影システムイメージ

4. 3次元モデル化手法の検討

4.1 撮影条件による画像解析への影響

同期撮影システムにより得られたステレオ画像から3次元モデルを作成するために、市販ソフトウェアを比較した結果、本検討では地すべりの解析において価格・操作性・解析精度の面で適した倉敷紡績株式会社のKuravesを用いることとした。地すべり現場では、カメラを設置できる場所に制約が多いことが予想される。そこで、撮影条件の違いが解析に与える影響を把握するため、模擬斜面に標識を設置して、表-1に示す現場で想定される様々な撮影条件で撮影実験を行った(図-3)。撮影したステレオ画像をKuravesにより解析し3次元座標を求め、ノンプリズム型トータルステーションにより求めた座標と比較することで、画像解析の誤差を検討した。

その結果、解析精度に影響を及ぼす主な条件は収斂角であり、収斂角 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ で全体的な誤差が小さくなることがわかった(図-4)。一方、他の条件においてもカメラの位置・状態に応じて、解析精度に一定の影響を及ぼすことがわかったが、収斂角と比較して明確な傾向は見られなかった(表-1)。解析誤差を小さくするための撮影位置としては、ターゲット(特徴点)が明瞭に見え、撮影対象物のできるだけ正面で撮影可能な位置を選定する。また、2台のカメラの収斂角は $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の範囲が望ましいが、対象物の凹凸が大きい場合には収斂角 30° 程度で撮影が可能な位置にカメラを設置することが望ましいと考える。

表-1 カメラ設置位置の検証結果一覧

| 検討項目 | 結果 |
|-----------------|--|
| <p>収斂角</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・収斂角$30^{\circ} \sim 70^{\circ}$が最も誤差が小さい。 ・X軸誤差が大きい |
| <p>撮影距離差</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・誤差は一定で、大きな傾向は見られない。 ・X軸誤差が大きい ・Y軸,Z軸は±0.02mの誤差 |
| <p>カメラ傾斜角度差</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・カメラ傾斜角度差が45°より大きくなると、誤差が大きくなる傾向が見られる。 ・Y軸,Z軸は±0.02mの誤差 |
| <p>撮影高度差</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・誤差は一定で、大きな傾向は見られない。 |

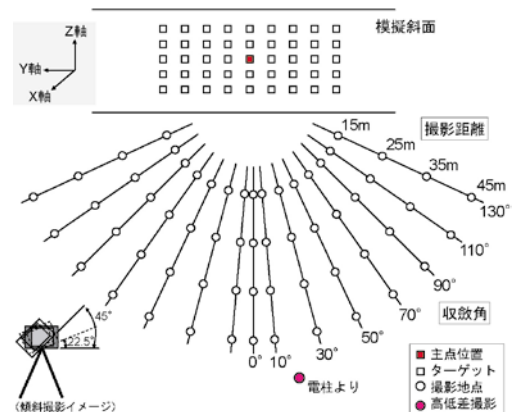


図-3 カメラ配置

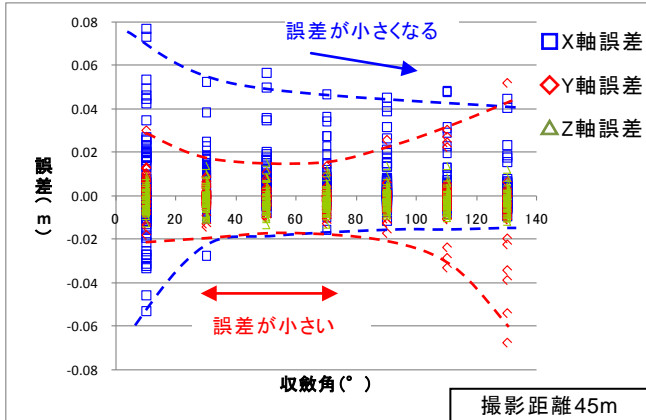


図-4 収斂角と解析誤差の関係

4.2 効率的な画像処理方法に関する検討

崩落する地すべり体の連続ステレオ撮影を行う場合、複数ペアのステレオ画像を解析する必要があり、全て手動で解析を行うことは膨大な労力がかかるため、解析ソフトの自動処理（ステレオマッチング）機能を用いることで解析時間の短縮が期待される。そこで、自然斜面において撮影実験を行い、自動処理による解析結果と地上レーザスキャナによる計測結果を比較して、マッチング率や3次元計測精度の検証を行った。

自然斜面における凹凸の大きい露頭を対象とし、66m離れた位置から28mmのレンズを用いて収斂角10°、30°の2ケースで撮影を行った。画像解析では計測対象範囲を設定し、その内部を25cmメッシュ（75列×50行）に分割し、メッシュ交点の自動マッチング処理を行った（図-5）。

画像解析の結果、収斂角10°は30°に比べてマッチング率が良く、誤差も小さかった（表-2）収斂角30°では、誤差が1m以上あり誤対応している箇所が半分程度と多く、特に画像上で陰影が濃い凹部や平坦な岩盤斜面では誤差が大きかった（図-6）。これは、色調の変化が少ない部分で自動マッチングが困難であったことや、撮影対象物の凹凸が大きく、収斂角を大きくすると画像の見え方が大きく異なるために、明らかなマッチングの誤対応の割合が大きくなったと考えられる。

そのため、画像解析にかかる時間を短縮し、解析誤差を小さくするためには、撮影対象斜面の凹凸の状況に応じて、複数のカメラからの見え方と一定の解析精度を保つ収斂角を調整して、より解析しやすい画像を撮影するための工夫が必要であると考える。また、明らかなマッチングの誤対応

は発生するものの、自動マッチング処理と手動解析を組み合わせることで、画像解析精度を落とすことなく、解析作業時間を短縮できると考える。

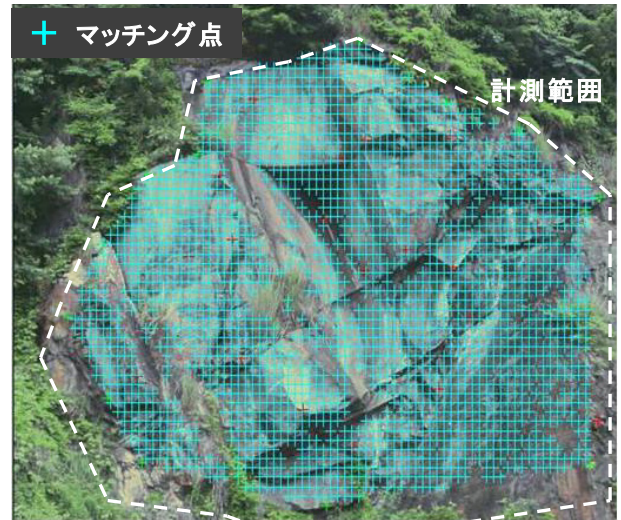


図-5 露頭のマッチング成功状況（収斂角10°）

表-2 マッチング率と解析誤差

| | 収斂角10° | 収斂角30° |
|------------|-----------------|-----------------|
| 母数*1 | 2,797点 | 2,797点 |
| マッチング成功数*2 | 2,181点 [78%] | 1,568点 [57%] |
| マッチング正解数*3 | 1,911点 [68%] | 1,320点 [48%] |
| 平均誤差 | -5cm (-3cm) | 10cm (9cm) |
| 標準偏差 | ±34cm (21cm) | ±35cm (25cm) |

*1 計測範囲内のメッシュ交点数
 *2 明らかにマッチングが誤対応している点を除いた点数
 *3 マッチング成功数から誤差1m以上の点を除いた点数
 ()内は誤差1m以上の点を除いた場合

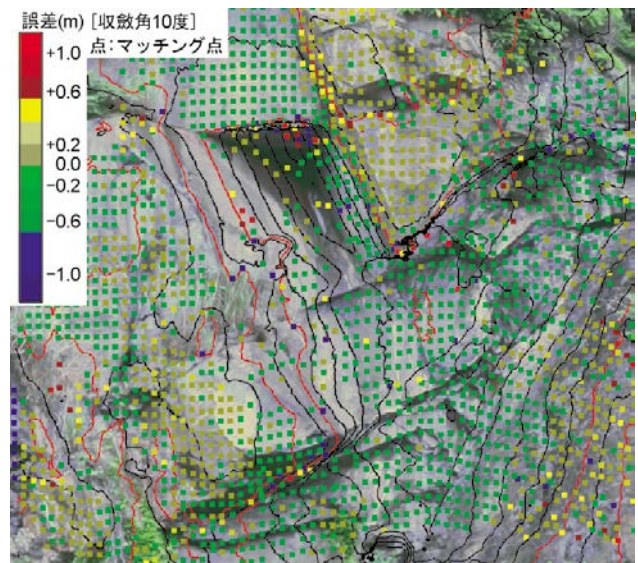


図-6 解析結果とレーザスキャナ計測値の比較

5. 地すべり体の挙動把握手法の検討

画像解析により得られた3次元地形モデルを用いて、地すべり体の挙動を把握するための3次元

CGアニメーション作成の検討を行った。本検討では、Kuravesから出力されるデータの読み込み等が容易で、断面の作成や距離・面積の計算機能を持つ3次元GISソフトウェアの「GeoGlobe」(株式会社ビジュアル・システムズ製)を用いることとした。3次元CGアニメーションを作成するために、ソフトウェアのエンジンを基に3次元CGモデルを自動作成する機能や、時系列のモデルを連続切り替える機能などの追加を行った。

このソフトウェアにおける3次元CGアニメーションの作成機能を確認するために、模擬斜面上を地すべりのように変形しながら移動する物体(図-7に示すスライム)の様子を、同期撮影システムにより撮影を行った。次に、撮影により得られた時刻毎のステレオ画像からKuravesを用いて3次元モデルを作成し、その時系列データをGeoGlobeに読み込んでアニメーションを作成した。その結果、移動物体の動きが再現されて視覚的に表現することができ、あらゆる方向から移動物体を観察できる見通しが得られた(図-8)。また、3次元モデルにオルソ画像を張り付けることで、よりリアルな表現が可能となった(図-7)。

今後は、実際の地すべり斜面を対象として本システムの適用性を検討する必要がある。

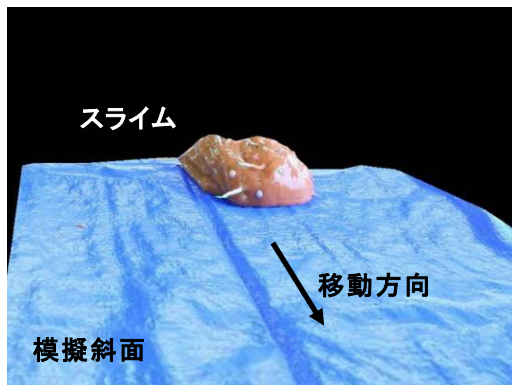


図-7 3次元CGモデルで作成したスライムの画像

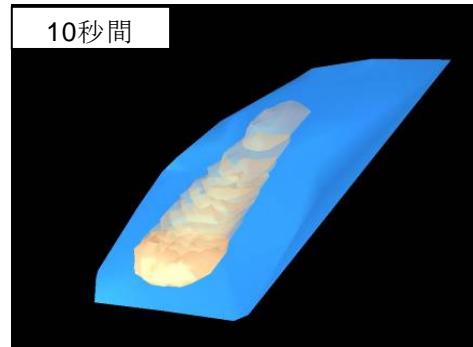


図-8 3次元CGアニメーション(累積表示)

6. おわりに

崩落に向かう地すべり体の挙動を把握するための方法として、複数台のデジタル一眼レフカメラを用いた同期撮影システムの構築と、得られたステレオ画像の効率的な画像処理方法、3次元アニメーション化手法の基礎的なシステムを構築することができた。本システムにより地すべり体の3次元的な挙動を追跡することが出来れば、地すべりの移動速度や3次元移動ベクトルを求めてすべり面推定技術⁴⁾に応用することや、より詳細な地すべり現象の把握に基づく適切な対策工の計画などにつながることを期待される。

参考文献

- 1) H.Shimomura, L.Zhu, H.Shimamura, K.Tachibana, K.Fujisawa, J.Ohara: Two-dimensional Motion Analysis of Landslide Using Particle Image Velocimetry Method, Proceedings of The First World Landslide Forum, pp.101-104, 2008
- 2) 藤澤和範、小原嬢子: 画像解析からみた東横山地すべりの活動履歴、地すべり研究(第51集)、pp.8-17、2007
- 3) 三浦悟、黒沼出、今井道男: デジタル写真測量による構造物の変位・変形計測、電力土木、No.322、pp.99-103、2006
- 4) 小嶋伸一、藤澤和範、田中尚、武石明: すべり面推定プログラムの適用性の検討、第46回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.323-326、2007

小原嬢子*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべり
チーム 研究員
Joko Ohara

坂本孝之**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべり
チーム 交流研究員
Takayuki SAKAMOTO

石田孝司***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべり
チーム 主任研究員
Koji ISHIDA

藤澤和範***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべり
チーム 上席研究員
Kazunori FUJISAWA