空中写真測量による地下すべり面形状解析システム

Analytic System for Underground Sliding Geometry
of Landslide by Aerial Photogrammetry

吉澤孝和*, 酒井輝雄**

宮野尾文夫**, 根岸六郎**, 関 貴幸***

Norikazu YOSHIZAWA, Teruo SAKAI

Fumio MIYANOWO, Rokuro NEGISHI, Takayuki SEKI

Abstract: Aerial photogrammetry is powerful technique to monitor landslide behavior effectively and safely. Using three dimensional displacement (3DD) vectors of ground points, which are detected by photographs taken at different time flights on a landsliding area, velocity and direction of ground movement can be visualized on a map or projection plane. Moreover, we can presume geometry of underground slide surface by analysis of the 3DD vectors. This paper treats a landslide that had abruptly occurred at Hirose in Nagano city. Its characteristic was small-area, rapid-growing, short-time movement. Survey-analytic system applied to this landslide demonstrates validity of the aerial photogrammetry.

Keywords: aerial photogrammetry, landslide, monitoring, 3DD-vector, underground sliding geometry

1. はじめに

斜面災害と呼ばれるものには、山崩れ、崖崩れ、地すべり、土石流、火山泥流、山津波、鉄砲水、雪崩などの現象がある。これらは、斜面を構成する物質、斜面上に存在する物質、または両者を混合した物質が、重力の作用を受けて集団的に種々の速度で移動することによって引き起こされる現象である。

これらの災害調査にはこれまでに空中写真測量が多く利用されてきた。それは安全性、迅速性、記録性という空中写真測量のみが有する長所によるものである^{1),2),3)}。

地すべりに対する従来の空中写真測量の利用法をみると、災害状況を撮影した空中写真の提供と対策立案

用の地形図の作成が主体であった^{4),5)}。本研究は、これにさらに一步踏み込んで、空中写真測量を地すべり機構の解析に利用するシステムを構築することを目的とする⁶⁾。

上記の各種斜面災害の中で、地すべりは他の現象に比べてつぎのような2つの特徴を持っている：

- 1) 原形を保ちながら移動する部分が多いため、時間差のある複数の写真上で同一の地物を確認できる。
- 2) 移動速度が比較的緩慢であるため、地表の諸点の変位を時間差のある空中写真によって追跡できる。

この点に着目して筆者らは、撮影した日時が異なり地形形態が変化している2枚の空中写真を用いて、部分ごとの実体を繰り返して順次同一の地物を識別し、当該地物の拡大実体視によって両方の写真上で明瞭に確認できる点(変位追跡点)をブリックし、ステコメータで座標を計測して、両写真から求めた座標差から変位追跡点の三次元変位ベクトルを検出する手法を検討してきた^{7),8)}。

* 信州大学工学部

** 株式会社 協同測量社

*** 長野県土木部上田建設事務所

これまでも洪水流の動態調査⁹⁾や大規模なマスマーブメント（岩なだれ¹⁰⁾・土石流¹¹⁾・地すべり⁵⁾）の変位調査に空中写真測量が利用されているが、現象の捉え方はかなり巨視的であり、数10m以上の移動量を扱っている場合が多い。本研究の場合は変位追跡点の分布密度はこれらの研究の10倍以上であり、数10cm以上の移動量を扱うものである。

地すべり地に選定した変位追跡点の三次元変位ベクトルを解析して、筆者らはこれまでに地下すべり面の形状と位置を推定する手法を検討してきた^{12~16)}。ただしこれまでの研究では、地すべり地全体を一括して解析して、地下すべり面形状を単調な連続曲線または連続曲面として近似するものであった。これは解析に用いる変位追跡点の数が少なかったためである。変位追跡は地上測量を主体としていたため、地形や地物の影響および作業能率等の関係上、測点の数が限定された。しかし上記のような時間差空中写真測量を利用すると、きわめて多くの変位追跡点のデータが安全かつ迅速に得られることが分かった。さらにそのデータを解析していくと地すべり地内でいくつかの移動ブロックを判別でき、ブロックの運動特性から個々のブロックの地下すべり面形状を推定できることが分かった。そしてそれらの曲面を連結してかなり複雑なすべり面形状の推定が可能となった。

本文はこれらの研究成果を、長野市広瀬地区に発生した突発性短期活動型の地すべりに適用したものである。

2. 地すべり防災情報提供システムと空中写真測量

地すべり災害の防止・回避・軽減等の防災対策を講ずるためには、まず種々の情報を収集し、これの解析と検討を通じて適切な計画を立てることが必要である。この場合、空中写真測量を防災情報提供システムの中で、どのように位置付けて利用できるかを検討してみる。

地すべりに対する防災態勢は積極的防災と消極的防災に大別できる。前者は地すべりの発生を未然に防ぐために抑制的・抑止的な対策を施すもの、後者は地すべりが発生したのちに拡大防止・再発防止・復旧工事等の対策を施すものである。

図1は、積極的防災システムを空中写真測量の立場

図1 積極的地すべり防災システムにおける空中写真測量の利用法

から提案したものである。時間差のある空中写真の判読と計測によって、自然的・人工的要因による地形・地物の変化が検出される。この情報に図示のような地表変位情報、地中変動情報、気象観測情報等を加えて総合的に解析し、地すべり発生の危険度を検討した上で後続の空中写真の撮影時点を定めていく。このシステムは地すべり防災の理想像であり、これを実現させるためには、対象地域の重要度が極めて高く、行政体制と予算的な裏付けが整っていることが必要である。つまり当該地域の防災意識と政治・経済的な背景が支配的なものとなる。ただし、種々の開発事業に伴う人工的な地形改変工事を施すような場合は、図1の方式を基本とした監視システムを長期間にわたって義務付けていくことが必要と考える。

しかしながら現行の防災行政の大部分は「災害が発生した後に予算が付けられる」というタイプの消極的防災である。一般に防災対策は、防災事業に着手する時期によって次のように分類できる。

事前対策型：兆候発生の段階で各種抑制対策を講ずるもの。

事後対策型：地すべり発生後に拡大防止と抑制を図るもの。

復旧監視型：復旧工事完了後に積極的防災を実施するもの。

空中写真測量を最も有効に利用できるのは事後対策型の防災システムである。これは次の2つの理由による。

- 1) 地すべりによる地物の移動は、通常数 m 以上に達するため、移動前後の空中写真を比較・計測して地物の移動量を検出できる。
- 2) 変動が激しくて現地立入調査が不可能な場合でも、地すべりの発生と同時に全域的監視測量が可能である。

図2に地すべりに対する消極的防災システムを、空中写真測量の活用法を中心に示した。事前対策型の検討に利用できるものは、当該地域を含む各種縮尺の新旧の空中写真である。地すべりの兆候発生段階での地表変動量は数 cm 以下であり、空中写真測量では検出できない。

事後対策型の防災システムでは空中写真測量を最大限に利用できる。地すべり運動のタイプは、短期間に急激に移動しただけで休止するものから、長年月にわ

たり周期的な移動を繰り返すものまで多種多様ではあるが、全体的な移動量はいずれのタイプでも数 m から十数 m に達するので、地形変化と地物の移動を三次元的に追跡することは容易である。この場合、初回の空中写真撮影を即刻緊急的に実施するほど、解析に用いる三次元変位ベクトルの精度が高くなる^{7),8)}。そして信頼度の高い情報を迅速に提供することは、避難・警戒態勢をはじめ、各種の地すべり対策を早期に実現させる上でも意義がある⁶⁾。

復旧監視型の防災システムは、各種の復旧・防災工事の完了または進捗状況に合わせて、図1に類似した監視体制を適用するものである。図2ではこれを省略する。

3. 三次元変位ベクトルによる地すべり機構解析システム

地すべりが発生した場合の、空中写真測量の実施計画および複数の時点の撮影で得られた空中写真から変位追跡点の三次元変位ベクトルを検出する手順に関しては、すでに本誌30-5(1991)⁷⁾で報告しているので省略する。

図2 消極的地すべり防災システムにおける空中写真測量の活用法

図3 三次元変位ベクトルによる地すべり機構解析システム

図3に、時間差のある空中写真から三次元変位ベクトルを検出し、地すべり防災に利用できる各種の情報を提供するための解析システムを示す。地すべり地を撮影した写真上に選定した変位追跡点に対して、撮影時点が異なる複数の写真上で計測した座標値に、写真測量の誤差以上の座標差が生じている場合、変位追跡点は移動しているものと判定して、座標差から三次元変位ベクトルを求める。

地すべり挙動を解析する最も直接的な手法は、三次元変位ベクトルを地形図上に投影して地表各所の移動状況を把握することである。移動方向と移動速度（移動量）を観察して、必要に応じて警戒区域や避難区域を指定する。

また三次元変位ベクトルを、地形図上の移動方向にほぼ平行な鉛直投影面上に投影すると、地すべり地域

全体の運動が、単一の回転または平行移動的なものか、さらに複雑な複合すべり的なものかを判断することができる。

地すべりの発生によって地中には多くのせん断破壊面が生ずる。この破壊面で分断された土塊はすべり面の上を重力の作用によって移動する。移動中の運動形態に類似性が見られる土塊の集団を移動ブロックという。移動ブロックは、地すべり地内で移動している2点間の三次元距離が時間的に変化しないこと（距離変動量が測量誤差以内）および2点が比較的近距离にあることを条件として、時間差のある空中写真上で計測した諸点の座標値を解析すれば検出できる。検出されたひとつの移動ブロック上の各点の間で、水平距離（二次元距離）と比高（一次元距離）の変動を解析すると、ブロックの運動形態の特徴がわかる。これよりそのブ

ロックの直下に位置するすべり面の幾何学的形状特性を推定することができる¹⁷⁾。

移動ブロック上の2点間の距離の変化率（測線ひずみ）を用いて、ブロックの平面ひずみや面積変動量が求められる。これらの情報から、地すべり地全域における個々の移動ブロックに作用する応力の状態や、圧縮性の領域と引張性の領域を識別する資料が得られる^{17),18)}。このような資料は、地すべりの抑制・抑止工事および復旧工事に関する諸計画の中で有効に利用することができる⁶⁾。

図3に示した地すべり機構解析システムにおいて、現時点までに筆者らが最も検討を重ね、実用の可能性を確認してきたものが、地下すべり面形状推定解析手法である。これは、鉛直投影面上に変位追跡点の三次元変位ベクトルを投影して、地下すべり面の形状を種々の曲線または多角形によって推定するものと、三次元変位ベクトルを直接解析して、地下すべり面形状を三次元の連続曲面として推定するものに大別できる。この解析は三次元変位ベクトルが与えられれば数時間の解析で解が得られる。よってこれを地下すべり面の第1近似解とみなして、ボーリング等の精密な調査を行なうための諸計画に利用することができる。また場合によってはボーリング調査を省略して、各種の防災対策工事の設計と施工に早急に着手することもできる。

地形図を用いて、上記の二次元または三次元の推定すべり面と地表面とが交差する地点を求めていけば、地すべりの影響が及ぶ領域を地形図上に示すことができる。特に、川の中とか森林や荒地の中に地すべりの境界部が位置するというような地形的・地物的な原因で地すべりの境界部を容易に特定できない場合に、この手法は非常に有効な手段である。

4. 移動ブロックの判別と移動特性の検討

4.1 変位の有無の判別¹⁾

撮影時点 T_1, T_2 の空中写真上で計測された地表の変位追跡点 $[i]$ の（座標値） $\pm$ （誤差）を次の形で表わす：

$$\begin{cases} \text{時点 } T_1 : X_{i1} \pm m_{x11}, Y_{i1} \pm m_{y11}, H_{i1} \pm m_{h11} \\ \text{時点 } T_2 : X_{i2} \pm m_{x12}, Y_{i2} \pm m_{y12}, H_{i2} \pm m_{h12} \end{cases}$$

2つの時点で計測された座標値の差から三次元変位ベクトルが得られる。ただしこのベクトルには座標計測

の誤差が伝播している。得られたベクトルがこの誤差を十分に上回っている場合、この点は変位を生じているものと判定する。判定手法に関しては本誌30-5(1991)⁷⁾に詳述してあるので省略する。

4.2 2点間の距離変動による移動ブロックの判別^{13),14)}

変位を生じていると判定された複数の変位追跡点について、相互の結合の程度を2点 $[i], [j]$ 間の三次元距離の時間的な変化量または線ひずみによって判別する。

時点 T ($T=1, 2$) における2つの変位追跡点 $[i], [j]$ 間の三次元距離 S_{ijT} は次式で与えられる：

$$S_{ijT} = \{DX_{ijT}^2 + DY_{ijT}^2 + DH_{ijT}^2\}^{1/2}, (T=1, 2) \quad (1)$$

ここに $DX_{ijT}, DY_{ijT}, DH_{ijT}$ は時点 T における $[i], [j]$ 点の3軸 (X, Y, H) 方向の座標差である。上記の座標計測の誤差により式(1)の三次元距離に生ずる誤差 M_{SijT} は：

$$M_{SijT} = \{[DX_{ijT}^2(m_{x1T}^2 + m_{xjT}^2) + DY_{ijT}^2(m_{y1T}^2 + m_{yjT}^2) + DH_{ijT}^2(m_{h1T}^2 + m_{hjT}^2)]/S_{ijT}^2\}^{1/2}, (T=1, 2) \quad (2)$$

時点 T_1 から T_2 に至る間の2点間の距離変化量 DS_{ij} は：

$$DS_{ij} = S_{ij2} - S_{ij1} \quad (3)$$

距離変化量 DS_{ij} に伝播する誤差 M_{Vij} は：

$$M_{Vij} = \{M_{Sij1}^2 + M_{Sij2}^2\}^{1/2} \quad (4)$$

地すべり地内には、段差や亀裂で分断されたいくつかの移動ブロックが生ずる。ここで「個々のブロックはすべり面上をほぼ剛体運動的に移動し、ブロックを構成する地山の變形は移動量に比べて無視できるほど微小である」と仮定すれば、次の手順で移動ブロックを判別できる：

- 1) 地すべり地内で地表に変位を生じている点を検出する。
- 2) 地表に散発している段差や亀裂等の相互の距離の最大値の1/2～1/3の距離を目安として、それ以内の距離にとどまる変位追跡点 $[i], [j]$ を選ぶ。
- 3) 2点 $[i], [j]$ 間の三次元距離の時間的な変化量 DS_{ij} が次の条件を満足する場合、2点は同一のブロック上に存在するものと判定する。

$$|DS_{ij}| < K \cdot M_{vij} \quad (5)$$

ここに $K(>1)$ は、現地の地表変状と各ブロックの移動量を考慮して試行的に与える係数である。

また三次元距離の変化量のかわりに三次元線ひずみを用いた場合、式(5)のかわりに次式を用いて判定する。

$$|DS_{ij}/S_{ij1}| < K \cdot \{S_{ij2}^2 \cdot M_{Sij1}^2 + S_{ij1}^2 \cdot M_{Sij2}^2\}^{1/2} / S_{ij1}^2 \quad (6)$$

4.3 移動ブロックの運動特性の検討

ひとつのブロックを構成する地山の變形が、ブロックの移動量に比べて非常に小さい場合、そのブロックは地下に発生したすべり面の上を剛体的に移動していると見なすことができる。この場合、ブロック上に設けた多くの変位追跡点に関して、任意の2点間の水平距離と比高は、地下すべり面の幾何形状に応じて次のような変動を示す：

1) 平行移動型：層すべりのようにブロックが地中の

地層境界面に沿って移動する場合は、地表諸点の移動軌跡は地層面と平行になる。よってブロック上の2点間の水平距離と比高は、ブロックが直線状に移動するとき一定値を保つ。

2) 凹面回転型：回転性地すべりの地下すべり面の形状は、一般に円弧または複心円に類似した上方に凹面をなす曲面となる。すべり面上を一方向に移動するブロック上の2点間の距離は、ブロックの移動に伴い、三次元距離は一定値を保ち、二次元距離（水平距離）は増加、一次元距離（比高）は減少していく。ただし地すべりの脚部付近のブロックでは、水平距離が減少、比高が増加するという、これとは逆の現象を示すことがある。

3) 凸面回転型：表層すべりまたは地質構造的な要因により、地下すべり面が上方に凸の曲面形状をなす場合、地山の移動にともなうブロック上の2点間の距離は、三次元距離は一定、二次元距離は減少、一次元距離は増加という特性を示す。

写真1 長野市広瀬地区地すべりの空中写真：地すべり発生2日後（10月5日15時24分撮影）

写真2 長野市広瀬地区地すべりの空中写真：地すべり発生7日後（10月10日14時22分撮影）

写真3 長野市広瀬地区地すべりの空中写真上における変位追跡点の設定
 30番台までの追跡点は地表の物体
 40番台の追跡点は雑草地と藪の中
 50番台の追跡点は森林中の樹冠部

4.4 地すべり地への適用例と考察

上記の解析手法を、長野市広瀬地区に発生した地すべりに適用し、若干の考察を示す。この地すべりは谷

川に面した斜面の、水田・荒地・山林を含む幅55m、長さ65mほどの範囲に発生した突発性短期活動型の地すべりで、顕著な活動は4日間（1989年10月3日～6

日)であったが、谷川の堰止めによる土石流の発生が懸念され、下流の住居地域に対する防災上、重大な関心事となった。空中写真の撮影は10月5日と10月10日に試行した。

筆者らは、この地すべりに対して空中写真測量の適用性を検討することを目的として、10月5日15時24分と10月10日14時22分の2時点で空中写真を撮影した。両写真とも、カメラはRC-10 2536、レンズはUAG. I .6037($c=153.43\text{mm}$)を用い、対象地域に対する撮影対地高度は平均840m、縮尺1/5600である。

写真1は10月5日の撮影である。地すべり地の頭部にあたる道路上に発生した段差と、道路から下方に続く水田に発生した亀裂が顕著である。地すべりの脚部は谷川に面した山林に覆われ、写真上では確認できない。

写真2は10月10日の撮影である。水田に発生した亀裂がさらに伸び、各所で段差に成長している。

これらの写真は緊急撮影のため、標定点を設置していない。よって、過去に別の目的で空中写真測量を実施したことのある既存の空中写真(1984年5月24日撮影、カメラはRC-10 2536、レンズはNAG. II.7100($c=213.80\text{mm}$), 縮尺1/8000)を解析図化機(DSR・11)で空中三角測量成果により標定したのち、写真1と2の上でも明瞭に同一物と判定できる地物をパスポイントとして8点選び、それらの座標を測定した。なお現代ならば、写真1と2の上で共通な地物の座標をGPSで現地測定する方法が実用的であろう。

本研究では、対地標定で生ずる写真1と写真2の相対的な誤差を極力小さくする必要がある。よって新たに両写真上で地すべり地から十分離れた安定した場所から共通のパスポイントを8点選定した⁷⁾。

地すべり地内の地物の上に選んだ変位追跡点の例を写真3に示す。擁壁や道路などの人工物、農地の境界点、識別しやすい岩の角などが適当であるが、前後の撮影写真の経過日数が少ないため、畑の中の野菜の株や放置された物体なども有効に利用できた。ただし地すべり地の中部から下部は雑草地や山林のため、雑草の間に見える地表面や樹木の頂点などを変位追跡点に用いた。

写真1と写真2に共通の変位追跡点をプリックする作業は、実体移写機(PUG・4)を用いてタイポイント選点プリックの手法を応用した。まずPUG・4に写真1の左側と写真2の右側のポジフィルムをセットして実

体視する。このとき地すべりによる地表変状の大きい場所では実体像がくずれるが、破壊や変形の生じていない部分では、同一の地物は重なり合って局部的な実体視ができる。よって写真像の拡大率を20倍前後で統一し、目標物を部分ごとに実体視しながら、視差を完全に消去して両方のフィルム上に同一の変位追跡点を定めてプリックした⁷⁾。

図4は、解析図化機(DSR・11)を用いて写真1と写真2の変位追跡点の三次元座標を求め、各点の座標差から水平変位ベクトルを求めたものである。

a) 変位の有無の判別¹⁷⁾

図4に示した変位追跡点の中で、40番台の測点は灌木混じりの荒地と雑草地に、50番台の測点は山林中の樹木の樹冠部に設けたものである。これらの測点の配置は不均等で密度も低く、座標計測の精度も低いが、変位の有無の判別には十分寄与している。測点41と47は平面図上では上方の斜面に発生した段差に包み込まれるような位置にあるが、水平変位は微小である。しかし鉛直方向では20cmと30cm程度の変動を生じている。測点54と55もこれと類似の位置にあり、水平変位は微小であるが鉛直方向の変動は70cmと60cmである。樹上測点52の変位ベクトルは地すべりによる樹木の傾動の影響をかなり受けている。測点50にも傾動の影響が若干見られる。測点51では樹木の傾動はなく、ベクトルは上部の斜面上の測点32, 33, 34等の変位ベクトルと傾向がよく一致しており信頼度は高い。

この地すべり地では初回の撮影後における顕著な地表変動の期間は1日弱であったが、この手法で地すべりによる変動領域をかなり明確に判別できることが分かる。初回の撮影を敏速に実施していれば変動領域の判別と地表諸点の変位ベクトルの信頼度はさらに高まるはずである。

b) 移動ブロックの判別¹⁷⁾前記の2回の空中写真測量で得られた変位追跡点の座標計測値を用いて、式(3)によって地すべり地内の任意の2つの変位追跡点間の三次元距離の時間的変動量(DS)を計算する。そして式(5)または式(6)を用いて移動ブロックを判別する。

図5は、前記4.2の1), 2), 3)の判別手順により、結合度の高い2点間を直線で結んだものである。実線は時間の経過とともに2点間の三次元距離が減少したものの、破線は距離が増加したものである。以下に要点を示す。

1) この地すべりの規模(55m×65m)から見て、2

図4 長野市広瀬地区の地表変状と地表諸点の水平変位ベクトル

点間の三次元距離が30m以内の位置にあるすべての変位追跡点の組み合わせについて検討した。

2) 式(5)または(6)による判別基準として、三次元距離変動量については $|DS| < 10, 15, 20\text{cm}$ 、線ひずみについては $|DS/S| < 1.0, 1.5, 2.0\%$ の各条件を与えて結合線図を作成したところ、 $|DS| < 10\text{cm}$ または $|DS/S| < 1\%$ の条件を満たす場合が、地表に発生した段差や亀裂等の形態と最もよく対応する結果となった。よって図5にはこの判別基準に

基づいた結合線図を示した。

判別の結果、地すべりによる顕著な移動を生じている領域には移動ブロック①と②が、その周辺には微動ブロック③と④と⑤が現れている。各ブロック中の結合線の距離変動量と線ひずみの絶対値に関する最大値、最小値、平均値を表1に示す。

この表の参考値は、10月5日と10月10日の写真上における個々の変位追跡点について、標定・プリック・座標計測の条件を種々組み合わせて得られた合計12組

図5 三次元距離変動の微小な地表点の結合線 (点間距離 $\leq 30\text{m}$, 距離変動量 $\leq 10\text{cm}$, または 線ひずみ $\leq 1\%$)

の座標値から求めた平均二乗誤差 (本誌30-5(1991) 参照)⁷⁾を当該写真の当該点に対する測量によって生ずる座標誤差とみなして、ブロック上で選定した任意の2点間の距離変動量に伝播する誤差を式(4)で、2点間の距離のひずみに伝播する誤差を式(6)の右辺 ($K=1$ とする) で計算して、当該ブロック上に存在するすべての2点の組み合わせで得られた値を平均したものである。したがって表1の参考値は、ブロック上の2点間の距離 (ひずみ) 変動量に及ぼす測量誤差の平均値

とみなすことができる。

表1では最大値は参考値を上回るが、平均値の中にも参考値を上回るものが見られる。これは地すべりブロックの変形によるものと考えている。最小値では変動量が0に近いものもある。要するに個々の地すべりブロックの上には、2点間の距離がほとんど変動しないものから、この表の最大値の程度まで変動するものが混在している。地すべりで地山に破壊が生ずる場合のひずみは、地質と含水状態によってかなりの幅がある

表1 各ブロックにおける三次元距離変動量と線ひずみ（絶対値）

加功 番号	三次元距離変動量（m）				三次元ひずみ変動量（%）				言 事
	最大値	最小値	平均値	参考値	最大値	最小値	平均値	参考値	
①	0.146	0.001	0.049	0.046	0.017	0.000	0.005	0.004	移動領域
②	0.250	0.003	0.080	0.068	0.023	0.000	0.009	0.007	移動領域
③	0.094	0.008	0.038	0.038	0.004	0.001	0.002	0.003	微動領域
④	0.092	0.015	0.048	0.087	0.004	0.001	0.002	0.003	微動領域
⑤	0.089	0.005	0.051	0.059	0.009	0.000	0.003	0.003	不動領域

参考値：空中写真測量の誤差が距離変動量またはひずみ変動量に伝播する値の平均値

が、本文で対象とした地すべりでは数%の線ひずみまでは亀裂や段差が生じていない。

この地すべり地の内部の移動ブロックは、①と②の2つに大別される。図5を見ると、これら2つの移動ブロックの間には段差が多発している。段差をはさむ2つの変位追跡点間の三次元線ひずみ (DS/S) は31と35の間で+6%、30と36の間で+5%、25と37の間で+6%に達している。

図5において、地すべり地の周辺の変位追跡点の結合線は、地すべり地内の変位追跡点の結合線と完全に分離している。変位追跡点の中で比較的近距离にありながら他と結合されない単独の点がある。点52は樹木の傾動成分が大きいため、また点41と点55は水平変位は小さいが比高変動が大きいため近くに点と結合されない。地すべり地の頭部付近では、近距离に位置する点5と点6が相互に結合されない。また地すべり地の側部付近でも近距离にありながら〔ブロック③の点3と点19〕は〔ブロック④の点2と点20〕に対して不連続である。これらの一帯には、破壊には至らないけれども地山のひずみによる微動が各所に生じている。よってこの一帯を微動ブロックとみなす。ブロック⑤においては変位追跡点の結合線が途中で断絶しない。また点54と点56は対岸の点53と連結する。いずれも測量精度の低い50番台の樹上測点であるにもかかわらずこのような結果が得られているのは、地盤の変形が少なく樹木にも傾動が生じていないことを意味する。よってブロック⑤の一帯は不動ブロックとみなす。

c) 地下すべり面の幾何形状特性の推定¹⁷⁾

前記(4.3)で述べたように、移動ブロック上の2点間の水平距離と比高の変動を観察して、ブロック直下の地下すべり面の幾何形状の特性を推定する。解析の

結果を図6に示す。移動ブロック①と②について、4.3で述べた移動ブロックの運動特性を、2つの変位追跡点間の水平距離と比高の変動を解析することにより、さらに詳細にa)からh)までのブロックが推定される。ブロック⑨は平行移動型である。この特性を示す変位追跡点(35, 36, 37, 38, 40)を点線で結んだ。ブロック⑩は凸面回転型で、この特性を示す変位追跡点(37, 39, 40, 42, 43)を太い実線で結ぶ。a)b)c)d)e)の各ブロックはいずれも凹面回転型と推定されるもので、変位追跡点の間を細い実線で結んだ。破線で示したブロック⑥については次節で述べる。なお次節の解析との関連上、この図には、b)で用いた移動ブロックの判別条件よりも大きい距離変動を生じた2点間を結合した線分も図示してある。

5. 地下すべり面形状の推定

5.1 解析手法の改良

地すべり地における地表の変位ベクトルを用いて地下すべり面の形状を推定する解析理論は「移動土塊の変形はすべり面上を移動する土塊の移動量に比べて無視できる」という仮定に立脚している。これまでに検討してきた解析手法は、二次元解析法と三次元解析法に大別できる。

二次元解析法は、地表諸点の三次元変位ベクトルを、地すべりの平均的な移動方向と平行な鉛直投影面上に投影して解析するもので、円弧すべり面法¹²⁾多角形法^{13,19)}高次曲線法¹⁴⁾複合円弧法¹⁶⁾などがある。三次元解析法は、三次元変位ベクトルを直接解析して地下すべり面を高次の連続曲面方程式で近似するものである^{15),20)}。ただしこれらの解析手法にはつぎの2点につ

図6 運動特性の共通するブロックと地下すべり面推定解析用の境界点

いて問題が残っていた。

- 1) 多角形法と複合円弧法を除く他の手法は、すべり面形状を単一の連続曲線（面）のみで推定してしまう。
- 2) 複合円弧法を除く他の手法は、地すべり地内の移動土塊はすべて一体化して移動するものと仮定している。

地質構造的な影響を受けるすべり面の形状には、単純な連続曲線（面）のみで表わせないものがある。また前節の解析例で明らかのように、地すべり地内には複数の移動ブロックが発生する場合が多い。

本稿はこれらの問題点を解決するために、これまでの解析手法につぎのような改良を加えた。

- [ステップ1] 変位追跡点の座標値の時間的変動を解析して移動ブロックを区分する。
- [ステップ2] 個々の移動ブロックごとに三次元解析法を適用してすべり曲面の方程式を求める。
- [ステップ3] 複数の移動ブロックで得られた曲面の重量平均法によってすべり曲面の等高線を求める。

この手法によって上記2点の問題は解決できる。

5.2 三次元すべり曲面推定理論¹⁵⁾²⁰⁾

地下のすべり面を連続した曲面で表し得るものと考ええる。本稿ではこれをつぎの二次曲面方程式で表わす：

$$H = aX^2 + bXY + cY^2 + dX + eY + f \quad (7)$$

ここに H は標高、 X, Y は平面座標値である。

移動ブロックを包囲するような形態で地表に生じた亀裂や段差は、地下に発生したすべり面と地表面との交わりである。亀裂や段差の発生場所で解析用の三次元座標を与える点を境界点と呼ぶ。式(7)の曲面はこの境界点を通る。この場合、ひとつの境界点(B)の座標を $(X, Y, H)_B$ とすれば次式が成り立たなければならない：

$$H_B = aX_B^2 + bX_B Y_B + cY_B^2 + dX_B + eY_B + f \quad (8)$$

前記のように移動ブロックは地下に形成されたすべり面の上を固体のような状態を保って移動すると仮定すれば、ブロックの地表面に設けた変位追跡点から地下のすべり面までの深さは、変位追跡点の移動量に関係なく一定値を保つことになる。いま、変位追跡点(i)の直下のすべり面の深さを D_i 、観測時点(T)におけるこの点の座標を $(X, Y, H)_{iT}$ とすれば、式(7)から次の関係が得られる。ただしすべり面の深さ D_i は未知量である。

$$H_{iT} - D_i = aX_{iT}^2 + bX_{iT} Y_{iT} + cY_{iT}^2 + dX_{iT} + eY_{iT} + f \quad (9)$$

変位追跡点と境界点の座標値はいずれも測定値であ

るために誤差をとまう。これに加えて上記の仮定に起因する誤差も介入するため、式(8)、(9)にはつぎのような残差が生ずる：

$$V_B = aX_B^2 + bX_B Y_B + cY_B^2 + dX_B + eY_B + f - H_B \quad (10)$$

$$V_{iT} = aX_{iT}^2 + bX_{iT} Y_{iT} + cY_{iT}^2 + dX_{iT} + eY_{iT} + f + D_i - H_{iT} \quad (11)$$

ここで最小二乗法の原理を用いて、曲面方程式のパラメータ (a, b, c, d, e, f) および各変位追跡点の直下のすべり面の深さ (D_i) を定める。いま境界点の総数を P 個、変位追跡点の総数を Q 個とすれば、目的関数 Ω はつぎのように表わされる：

$$\Omega = [w_B \cdot V_B^2]_{B=1}^P + [w_{iT} [V_{iT}^2]_{i=1}^Q]_{i=1}^Q \quad (12)$$

ここに w_B, w_{iT} は重み、 U は変位追跡点(i)の観測時点の総数である。 w_B, w_{iT} の与え方は文献10)による。

式(12)を6個のパラメータ： a, b, c, d, e, f および Q 個の変位追跡点におけるすべり面の深さ： $D_1, \dots, D_1, \dots, D_Q$ でそれぞれ偏微分したものを0に等置すると、 $6 + Q$ 本の方程式が得られる。これを連立に解いて未知量を定める。

5.3 地すべり地への適用例と考察

この解析手法を図6に示す各ブロックに適用した解析結果を表2に示す。この表には解析に使用した変位追跡点と境界点および地下すべり面方程式の6個のパラメータが示してある。境界点としては次の3種類を用いた。

表2 運動特性の共通したブロック別に解析した地下すべり面形状方程式のパラメータ

加力番号	解析に使用したデータ点		すべり面形状方程式のパラメータ					
	変位追跡点	境界点	a	b	c	d	e	f
㊸	21・22・23・24・25・26	H1・H2・H3	0.082	-0.048	0.044	-8.63	-2.01	1010
㊹	27・28・29・30・31・32・33・34	H3・H4	0.072	0.008	0.030	-11.43	-4.75	1247
㊺	21・22・23・24・25・26・29・33・34	23・33	0.039	-0.037	0.027	-4.78	-1.31	925
㊻	31・32・51	T3・T4・31・32	0.089	0.032	0.028	-14.98	-6.06	1397
㊼	35・36・38・44・45	T1・T2・H5	0.038	0.052	0.029	-6.28	-5.94	973
㊽	37・39・40・42・43	25・26	-0.087	-0.064	-0.013	11.35	3.93	312
㊾	35・36・37・38・40	25・26				0.81	0.02	617
㊿	31・32・35・36・45・51	T2・T3	-0.176	-0.170	-0.018	31.95	12.66	709

23, 25, 26, 31, 32, 33 : ブロック①とブロック②の解析
で得られたすべり面の、当該変
位追跡点の直下の位置

図7は境界点H2とT1を結ぶ断面PP(図4・図8参照)上に投影した地形断面図とブロックa④e④fの解析で得られた地下すべり曲面の断面図である。各ブロックで推定された曲面を用いてつぎの手順で地下すべり面の位置を推定した。

2) 隣接ブロックとの境界部付近のすべり面形状は、2つ以上のブロックの解析で得られた曲面について、同一地点におけるすべり面の標高(深度)を比較して3m以内の較差のものを重み付き平均する。

この手順によって図示のようなすべり面形状が得られた。但し、図中の水平距離60m～75mの区間は、ブロック⑥とブロック⑨の解析で得られた曲面を重み付き平均したものである。

また、河川に面した脚部では表層の滑落による二次的なすべりのために現地と整合しない部分が生じている。よってすべり面は現地変状に整合するように描いた。このような二次的なすべりは図7の頭部の道路直下の2本の亀裂部にも発生しているものと考えられる。

図8は、図6に示した各ブロックの境界部における地下すべり面の標高を、現地長5m×5mの方眼の交点の位置で比較し、較差が3m以内の曲面を平均して推定したものである。方眼の交点の標高を用いて図示のような地下すべり面の等高線図が得られる。

これより地下すべり面と地表面とが交差する線を求めた。この線は地すべり地の頭部から側部にわたって発生した段差の形態と良く整合している。図において境界点 H1, H2, H3, H4, H5は、この地すべりの発生当初に現われた地表変状である。さらに外周の段差は数日後に現われた二次的なすべりによるものである。

推定すべり面と地表面との交線は、脚部の境界点 T2、T3 の位置との整合性が良くない。この原因のひとつ

図7 断面PP上における各ブロックの推定曲面と地すべりによる移動土塊の推定

- 変位追跡点
- 頭部・脚部境界点
- 地表面と推定すべり面の交線

図8 推定地下すべり面の等高線図・すべり面と地表面との交線・地表に発生した段差の形状 (方眼: 5m×5m)

(地下すべり面の深さ)=(変位追跡点の標高)-(すべり面等高線図から求めた当該地点の標高) 21(5m), 23(9m), 26(14m), 27(8m), 32(11m), 34(18m), 35(14m), 38(6m), 42(6m), 44(3m), 51(20m: 樹上点)

つに、この付近では図4に見るように解析データを提供する変位追跡点の密度が非常に低いことがあげられる。なお地質構造的に見ると、河川が屈曲するこの付近には巨礫を主体とする強固な河岸段丘が発達しており、強度的には上方の斜面と異なったものとなっている。

6. おわりに

本研究を通じて、時間差のある空中写真測量は地すべり挙動の監視のみならず、移動ブロックの判別と地下すべり面形状の推定に有効に利用できることが分かった。特に地上測量に比べて非常に多くの変位追跡点の座標値を安全かつ迅速に得られる点が有利であ

る。

時間差空中写真測量で得られる多数の変位追跡データにより、これまで地上測量を中心に検討してきた、連続的で単純な地下すべり面形状の推定手法から『移動ブロックごとに求めた三次元曲面を合成して複雑なすべり面形状を推定する』という、より信頼度の高い解析手法を完成させることができた。地すべりに対する時間差空中写真測量を成功させる鉄則は、初回の撮影を一刻も早く敏速に実施することである。

おわりに、長野市広瀬地区の地すべりに対して、各種の資料の提供をいただいた長野県土木部、長野市役所、日本物理探鉱株式会社に謝意を表します。

(受付1994.1.10, 受理1994.5.20)

引用文献・参考文献

- 1) 日本写真測量学会：空中写真の判読と利用，鹿島出版会，pp.105-116，1980.
- 2) 武田裕幸・今村遼平：建設技術者のための空中写真判読，共立出版，pp.110-134.
- 3) 今井篤夫：斜面災害における空中写真の利用，写真測量とリモートセンシング，特集号II，土木分野における写真測量，pp.18-27，1983.
- 4) 打萩珠男：航空写真による地すべり状況の測定，地すべり，5-2，pp.23-27，1968.
- 5) 長岡正利：長野市地附山地すべりの災害状況と地形変化，測量，35-10，pp.23-31，1985.
- 6) 吉澤：地すべり防災対策のための測量情報解析システムの構築，応用測量論文集，4-1，pp.109-120，1993.
- 7) 吉澤・西澤・三澤・根岸：地すべりの挙動解析における写真測量の応用，写真測量とリモートセンシング，30-5，pp.8-20，1991.
- 8) 吉澤・丸山・他：空中写真測量による地すべり情報の提供とすべり面の解析，地すべり，27-4，pp.9-17，1991.
- 9) 木下良作：写真測量による洪水流調査，写真測量とリモートセンシング，特集号II，土木分野における写真測量，pp.28-33，1983.
- 10) Zhang Renlin：Application of the Image Interpretation from Airphotos Taken in the Different Periods for the Debris Flow Research, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Commission VII, pp. 381-388, 1992.
- 11) 柳川雅一：1978年5月に発生した妙高火山白田切川の土石流と地形の関係，写真測量とリモートセンシング，Vol.17, No.2, pp.11-20, 1978.
- 12) 吉澤・細川：地すべり地における地表変位測量データを用いた円弧すべりの解析，地すべり，23-4，pp.13-23，1987.
- 13) 吉澤：多角形法による地下すべり面の解析，地すべり，25-2，pp.9-17，1988.
- 14) 吉澤：地上測量による地下すべり面形状および地すべり影響圏の推定，地すべり，26-3，pp.28-39，1989.
- 15) 吉澤・宮澤：地下すべり面推定における三次元移動軌跡法の改良，地すべり，28-4，pp.6-14，1992.
- 16) 吉澤・衆野・西澤：各種の回転半径をもつ円弧の結合による地下すべり面形状の推定，地すべり，29-3，pp.10-17，1993.
- 17) 吉澤・酒井・宮野尾：時間差空中写真と地すべり機構解析，日本写真測量学会秋季学術講演会発表論文集，pp.171-176，1993.
- 18) 吉澤：奈良尾地すべり地における地すべり挙動の精密測量とその解析，地すべり，15-3，pp.11-16，1978.
- 19) M. Carter・S.P. Bentley：The Geometry of Slip Surfaces beneath Landslides: Prediction from Surface Movements, CAN. GEOTECH, Journal, Vol. 22, 1985.
- 20) Norikazu Yoshizawa：Landslide Monitoring for Presumption of Underground Slide Surface, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Commission VII, pp. 478-485, 1992.