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

——長野市広瀬地区に発生した地すべり地への応用——

Landslide Behaviour Information and Slide Surface Analysis by Photogrammetry

——Application to Landslide Area Occurred in Hirose District in Nagano City——

吉澤孝和* 丸山昌義** 長尾 勲**
Norikazu YOSHIZAWA Masayoshi MARUYAMA Isao NAGAO

村瀬孝三** 西澤茂高*** 三澤敏雄***
Kouzou MURASE Shigetaka NISHIZAWA Toshio MISAWA

根岸六郎***
Rokurou NEGISHI

Abstract

Photogrammetry technique is applied to landslide behaviour monitoring and underground slide surface analysis in this paper. The landslide behaviour information necessary to measure of disaster reduction and prevention can be obtained speedily, correctly and safely by this technique. Three dimensional displacement of ground objects such as rocks, trees, farms and various artificial structures can be traced by photogrammetries taken at different recording chance. Analyzing these data, moving direction and velocity of sliding block is distinguished. Depth and shape of the underground slide surface can be presumed by least square method. Accordingly, warning region of the landslide is demarcated on a map. This paper demonstrates utility of the photogrammetry applied to observation and analysis of landslide occurred in Hirose district in Nagano city.

キーワード：空中写真測量，地すべり情報，動態観測，すべり面推定

1. はじめに

測量によって地すべり地の地下すべり面の位置と形状を推定する研究として、これまでに報告してきたものは地表の変状の激しい時期を過ぎた地すべり地において、トータルステーション方式の地上測量で得られた地表変位データを解析したものである^{1)~4)}。

一般に地すべりの発生後ある程度の日数を経過すれば地表に発生した段差や亀裂の成長速度は減速する。しかし段差や亀裂で分断された土塊自体はなお緩慢な移動を続けていく。この現象は「地下に形成されたすべり面の上を、段差や亀裂で分断された地すべり土塊がほぼ剛体的な状態を保って移動している」ことを意味するものと考えられる。これまでの研究の解析理論はこの点に着目して組み立てたものである^{2),3)}。

地すべりが発生した場合、防災対策上直ちに必要となる情報は「地すべり土塊の移動方向と移動速度、および地すべり変動の発生している範囲」である。またボーリング調査や地すべりの機構解析および対策工事計画等に

において必要とされるものに「地下に発生したすべり面の深さと形状に関する推定」という問題がある。これらの情報はいずれも本研究の地表変位観測データを解析して得ることができる。しかし地上測量は地すべりの活動が激しい場合、かなりの危険を伴う。また、現地への立ち入りを待機している間に活動がほとんど停止して、観測の機会を逸してしまうような地すべりもある。

地上測量のこのような不都合を解決するために、筆者らは地すべり発生時の早期動態観測に空中写真測量の利用を試みた。1989年10月に長野市芋井広瀬地区に発生した地すべりに適用したところ、かなり有効な手法であることが分かったのでここに報告したい。

わが国で、地すべりの動態観測に空中写真測量が用いられたのは、記録に残っているものとしては亀ノ瀬地すべりが最初である。1967年2月から1968年3月までに合計11回の空中写真測量がなされ、この期間における水平移動量21~22mを検出している。対空標識は人工地物を含めて約400点設置された。この地すべりに対して空中写真測量が採用された理由は、53haという地すべり規模の広さ、地上測量では対処し難い複雑な地形、地表

* 信州大学工学部 ** 長野県土木部 *** 協同測量社

変位の激しさ等であった。打萩⁶⁾はこの測量成果を、平面図および主要断面図上における移動ベクトル図の作成、地表断面形状の変遷の連続追跡等に応用している。近年の研究としては地附山地すべり(1985年7月発生)に空中写真測量を利用したものがある。長岡⁷⁾は地すべり発生前後の空中写真を用いて、平面図上における地表の諸点の変位ベクトルを求め、頭部滑落崖付近で約50m、中部一帯で約100m、脚部より下方の領域で約150mの移動量を検出した。この研究では対空標識を用いず、変位追跡点として家屋や道路上の物体などの地物13点を選び、地すべり前後の写真上で同一物体であることを確認して追跡している。

このような在来の研究と本研究との立場の違いを要約すると次のようになる。

1) 地すべり対策の適切な指針となり得る地すべり情報の早期提供技術、すなわち地すべり発生時の危険な条件下でも実施可能な早期動態観測と解析システムを開発すること。

2) 対空標識を設置せずに各種の地物(後述)を利用した地表変位追跡手法の検討、および変位追跡点の座標測定精度を向上させ、10cm 程度の変位を検出する手法の研究。

3) 変位ベクトル図の作成のみならず、観測データを、各種投影断面図上における地下すべり面の位置と形状の推定、平面図上での地すべり影響圏の推定解析等に利用すること。

2. 地すべりの地の概況

本研究の対象とした地すべりは、長野市芋井大字広瀬地区を南流する達橋沢の右岸斜面に発生した。図-1に示すように、農道直下の水田地帯とその下方に続く山林地帯が、達橋沢に向かって幅約50m、長さ約60mの範囲にわたって地すべりを起こしている。

飯綱山の南方に位置し背後に飯綱高原を控えるこの地域は、火砕岩層と泥岩層とが指交関係で接する複雑な地質を呈している。今回の地すべりの発生した場所は、過去における巨大崩壊の末端部にあたり、基盤を構成する泥岩層を古期地すべりの崩壊土が被覆している。地すべりは泥岩層と崩壊土との境界付近をすべり面として発生したものとみられる。

この地すべりの兆候が発見されたのは1989年10月3日で、それから約5日間にわたり顕著な活動が認められた。それ以後の活動はほとんど認められず現在に至っている。現地観測された地すべり挙動の概要を以下に示す(図-

図-1 地すべり地一帯の平面図(地表の変化状況は1989年10月5日現在のもの)
m1, m3=伸縮計 h1, h2, h3, h4=頭部亀裂発生点
t1, t2, t3, t4=脚部変状境界点
(r1), (r2)=水田 (s)=杉林 (b)=ブロック積み擁壁
黒丸は空中写真上で計測した変位追跡点、実線で囲んだ範囲は(5:1)で推定した地すべりの影響範囲

1 参照)。

〔10月3日〕 この日の午後、農道芋井88号線の直下の水田(r1)に幅5~10cmの亀裂(h2)を発見した。亀裂は完全には連続しておらず、断続的な馬蹄形状を呈した。地域一帯の側部や末端部には地すべりの変状を確認できず。19:30より開始した伸縮計(m1)による亀裂の開口速度は5~8mm/時。

〔10月4日〕 8:00における移動速度は30mm/時。三次クリープ理論による崩壊時刻を正午過ぎと予測するも崩壊には至らず、頭部の亀裂(h2)は連続した。その段差は、朝の0.3mが昼には0.5mとなる。12:30、地すべり脚部の変状を確認。(t1), (t3)の付近で盛り上がりや亀裂を発見。その位置は河川との最接近部において川床からの比高約3m、距離3~5m。また地すべり地斜面の下半部の杉林(s)で樹木の傾動が始まる。道路直下の水田(r2)では湧水発生。19:00における伸縮計(m1), (m3)による移動速度はそれぞれ80, 200mm/時。

〔10月5日〕 0:00から4:00までの間において、伸縮

計 (m1), (m3) による移動速度はそれぞれ 100, 200mm/時 を記録した。これをピークとして次第に減速へと向かう。6:00頃、水田 (r2) は湧水による水溜りとなる。また水田 (r1) の一帯が盛り上がり始める。朝方より、農道に亀裂 (h0) が発生して成長を続ける。夕方にはブロック積み擁壁 (b) の沈下が顕著となる。17:00頃、地すべり中央末端部 (t3) で幅約 3 m の小崩落が川に向かって発生した。

〔10月6日〕 伸縮計による移動速度は減速を続け、夕方には 10mm/時以下となる。末端部では朝と夕方に小崩落あり。この日までに、地すべり土塊全体が達橋沢へ押し出すことはなかったが、沢ギリギリまで亀裂などの変状が発生した。

〔10月7日〕 夕刻の移動速度は 0~1mm/時となる。この日以降の変状はみられない。

3. 空中写真測量による変位計測

3.1 空中写真の撮影

この地すべり地に対して空中写真の撮影を行なったのは、1989年10月5日15時24分と10月10日14時22分の2回である。撮影した写真はいずれも縮尺1/5600のカラー写真である。上記のように、10月6日以降地すべりの移動量は激減している。最初の撮影があと1日遅れた場合には、写真測量では地表物体の変位を検出できなかった。よって最初の写真撮影は地すべりの兆候を発見したならば一刻も早く実行することが大切なポイントと言える。

なお地すべりの発生前の1~2年以内に撮影した現地の空中写真があれば、それと地すべりによる変動後の写真とから地表物体の変位を計測できる。しかし計測の可能な点の数はかなり限定されるので、上記のように地すべりの発生直後の写真のほうが望ましい。

3.2 変位追跡点の選点とプリッキング

地すべり地内に変位追跡用の対空標識を設置することは、地すべりの活動が激しい場合には不可能である。また仮に設置してもそこに亀裂などが発生すれば変位追跡点としての役割をなさない。よって本研究では前後2回の撮影による写真 (10月5日撮影を写真A, 10月10日撮影を写真Bと呼ぶ) の上で共通に識別でき、しかも地表に発生した亀裂や段差から十分に離れている地物を変位追跡点として選点した。これらは次の諸点である。

- 1) 地表に露出した岩のかど、2) 識別しやすい小石等、
- 3) 道路上の目印、4) 擁壁上の目印、5) 畑の中の諸点 (農作物の境界点・点在する小物体)、6) 水田 (稲の切り株・畦道の屈曲点)、
- 7) 雑草地の中の裸地の形態の特異点、
- 8) 森林の中の樹木の頂点

これらの変位追跡点のうち、7)と8)は計測作業上精度の確保が困難な目標点である。しかし地すべり地の中部

から脚部は雑草地や森林のため、やむを得ず選定したものである。

選点にあたっては上記の写真を6倍に引伸したカラー写真を用いた。写真上に選点した各測点の位置を、撮影日の異なる写真Aと写真Bのポジフィルム上に正確に移写するために移写器 (PUG4) を使用した。移写器は、左側に写真A、右側に写真Bのポジフィルムをセットし選点する目標点を中心として同時実体視を行ない、6~24倍の範囲で縮尺を統一し、両写真の同一地点が完全に一致するようにメスマークにより微調整して、メスマークの位置を機械的にプリック (刺針) する機械である。両写真にプリックする位置の精度は0.02mm、刺針孔の直径は0.05mm である。

変位追跡点として選点プリックした箇所は、総計116点である。この中には雑草地が14点、樹冠部が28点含まれている。

3.3 モデルの標定および変位追跡点の座標値の計測

10月5日撮影の写真Aは、他の目的で図化作業を行なうために一次の空中三角測量 [使用機械: 解析図化機 (DSR 11), 使用計算式: 多項式法] を実施してある。

本研究では、A、B両写真から測定した同一の変位追跡点の相対移動量をより正しく求めることに重点が置かれる。よって上記の写真Aの一次の空中三角測量の6個のパスポイントを標定点と仮定して、次のような二次の空中三角測量を行なった。すなわち写真Bのモデルは写真Aと撮影日が異なるために主点位置がずれており、上記のパスポイントの写らない部分や同一点として移写できないものがある。そこでA、B両写真に共通に写っている明瞭な地物で、地すべり変動の影響を受けない場所を8箇所選点してA、B両ポジフィルムに移写を行ない、写真Aに準拠した二次の空中三角測量 (解析図化機、計算式は一次と同じ) によって8個のパスポイントの成果を求めた。標定結果を次に示す。

写真Aのモデルの標定残差の中等誤差:

平面座標値 (X, Y): $\pm 5.5\text{cm}$ 標高(H): $\pm 6.3\text{cm}$

写真Bのモデルの標定残差の中等誤差:

平面座標値 (X, Y): $\pm 9.7\text{cm}$ 標高(H): $\pm 7.2\text{cm}$

変位追跡点の座標値の計測には上記の解析図化機を使用した。写真A、Bのそれぞれについて変位追跡点を整理番号順に写真座標値として測定し、同時に解析図化機に内蔵されているコンピュータにより現地の座標値に変換してハードディスクに格納した。

座標測定の精度に関しては、上記の二次空中三角測量のパスポイントの精度は $\pm 9.7\text{cm}$ 以内であるが、個々の変位追跡点についてはさらにプリック誤差が介入する。そのため測定条件のよい目標では $\pm 12\sim 15\text{cm}$ 程度、測定条件の悪い雑草地や森林地帯では $\pm 30\sim 50\text{cm}$ 程度を

見込んでおく必要がある。なお本研究では、ブリック誤差、標定誤差、読定誤差に関する実験を行なっているが、これについては別の機会にゆずりたい。

4. 各種の投影面上における地すべり挙動の観察

写真Aと写真Bで計測された各測点の三次元座標値を用いて、各種の投影面上において地すべりの挙動とその特性を観察することができる。

図-2は平面図上に表示した変位追跡点の移動ベクトルである。○印が1989年10月5日の位置、その中心から発する直線の先端は10月10日の位置である。よってこの直線が5日間における移動ベクトルをあらわし、直線の長さが移動量または5日間の移動速度を示す。なおこの図では移動が認められない測点と極端に大きな移動量を示した測点は除外した。

全体的な移動の傾向をみると、地すべり地の頭部(h1, h2, h3, h4)付近の測点の移動ベクトルは、地すべり地の中央部に向けて集中していくような傾向を示す。しかし中央部から脚部(t1, t2, t3, t4)に至るにつれて互いに逆方向に発散していく。その形態は脚部境界点(t2)の付近を境に両側に振り分けられている。(t2)から河川までのわずかな区間では写真上の計測では変位が認められない。現地では(t2)の付近に円礫や直径1~2mの転石を含む河岸段丘が残っている。これが地すべりに対する一種の抵抗体として作用しているものと考えられる。

150番台と160番台の測点は森林地帯にあるため、樹木の頂点を変位追跡点とした。樹木の中には地すべりに伴って傾動するものがある。そのため図に示した移動ベクトルには地すべりで押し倒されていく樹木の先端の移動成分を含んだものもある。すなわち樹上の変位追跡点の場合は、それが直ちに地表の移動方向を示すものとは断定できない。

測点8, 154, 138, 135, 23で囲まれた部分には空白部が多い。この一帯は杉林で、杉の木の傾動が著しいため計測がほとんど不可能な領域である。また計測してみても移動量がきわめて大きく移動方向も不規則なためこの図には示さない。

測点26, 135, 138を結ぶ線から谷までの区域の測点は雑草地の中にある。雑草の隙間から地表の位置をとらえているため、精度的にかなりばらつくものと予想された

図-2 変位追跡点の配置と各測点の平面移動ベクトル (期間: 891005~891010)
h1, h2, h3, h4=解析用頭部境界点 t1, t2, t3, t4=解析用脚部境界点
黒丸印は立体移動量が150~200cmの測点, 白丸印はそれ以外の移動量を示す測点

が、図示の平面移動ベクトルの各測点の移動の傾向には大きなばらつきは認められない。

測点23, 24, 26, 135で囲まれる部分は雑草が著しく繁茂しており、計測点を設けることができなかった領域である。

図-3は各測点の移動ベクトルを、X軸からの水平角が100°の鉛直な投影面上に投影したものである。150番台と160番台の測点群は樹木の頂点にある。その他の測点は地表面に設けてある。この断面の方向は図2の各測点の平面移動ベクトルから明らかにように、地すべりを総括的にみた場合の平均的な移動方向に近い。このことを加味して図-3を観察すると、各測点のベクトルには地下のすべり面形状の特徴があらわれていることがわかる。

すなわち図-3に示す各測点の移動ベクトルの傾きは、斜面の頭部では急勾配を示すが中部から脚部へと移行するにつれて徐々に勾配が緩くなり、脚部の付近では逆勾配となる測点もみられる。このことはこの地すべりが回転性の地すべりであることを意味するものである。150番台と160番台の樹上測点グループのみについても地上

図-3 地すべり地を側面からのぞき投影断面図(投影面方向角100°)上における各測点の移動ベクトル(150番台と160番台のベクトルは杉の木の頂点の軌跡を示す)

図-4 地すべり地を下方からのぞき投影断面図(投影面方向角10°)上における各測点の移動ベクトル

測点グループと同様な回転運動的な特徴がみられる。

測点の移動ベクトルの中には全体の移動傾向とかなりかけ離れたものがある。これらは雑草地や森林地帯に設けた測点である。雑草や樹木の枝葉が障害となって、写真AとBの上で同一点を判別することが非常に困難であったために、このような異常な結果が得られた。したがってこれらの点のデータは以下の解析では除外して考える。

図-4は投影面の方向角を10°とした場合の各測点の移動ベクトルである。これは地すべりの全体的な移動方向とはほぼ直交する方向から各測点の動きを観察したものである。そのため上下方向の運動が卓越している。図の中央部の測点群(左端 No.36 から右端 No.142 までの範囲に分布する上部の測点群)の動きは、両側面から次第に中心部に集中するような傾向を示す。このことはこの地

すべり地の上部での土塊は、主たる進行方向と直交する方向から見たとき、ほぼ一体化して微小な回転に近い運動を示していることを意味する。

右上方の No.165, 166 の移動ベクトルは、樹木が下方に移動しながらその頂点が地すべり地から外側に倒れたものとみなす。またこの図において、地すべり地の脚部付近の杉林の頂部に設けた 150 番台の測点の動きは極めて不規則である。No.152, 153, 158 は傾きが著しいため、解析用のデータからは除外すべきものである。

この図の左側の中央部から下方にかけて分布する測点群 (No. 21, 23, 27, 28, 138 等) の移動ベクトルは、いずれも左外側に偏位している。これらの測点は図-1における標高 677.0 から 677.1m にかけて発生している段差の位置よりも下方に位置する斜面上の水田や雑草地の中に選点したものである。図-1の段差の発生形態からみて、この一帯には標高 677m 付近に水平に

延びる段差を冠頭部とした局所的な二次地すべりが発生しているものと考えられる。この特性は図-2の平面移動ベクトルにもよく表現されている。

5. 地下すべり面形状の推定

前章に述べたように、この地すべりの平面図上での動きには、頭部から中央部にかけては集中性が、中央部から脚部にかけては発散性が観察される。また地すべりによる現地の変動は谷の位置までは達しておらず、谷底から上方の山腹(図-1の t1, t2, t3, t4)に地すべり脚部の現象があらわれている。さらにまた地すべりの発生以前の地形における達橋沢の屈曲状況と等高線の形態(図-1)に注目すると、(t2), (t3) の付近から河川の方へ突出している部分には、河川の浸食に対して強い抵抗力をもった何らかの要因が潜在しているために、水流を外側に

湾曲させているものと判読できる。現地におけるこの場所には直径1～2mの巨石混じりの巨礫を主体とした河岸段丘の微地形が存在する。

これらを総合すれば、この突出部分は今回の地すべりによって破壊されずに抵抗を続けており、上方から流下する土砂を左右に分流させる作用をなしているものと考えられる。

したがってこの地すべり地に対しては、すべての測点の移動ベクトルを総括的に処理してすべり面の解析を行なうという手法は好ましくない。試みに図-2～図-4に示した全測点の移動ベクトルの中から、前章で述べたような異常な挙動を示す測点のデータを除外した上で、三次元移動軌跡法⁴⁾によって地下のすべり曲面の立体的な形状を求めてみた。得られた結果は、Y軸方向(全体的に見た地すべりの移動方向にほぼ近い方向)に平行な断面図上では下に凸の曲線形状で正常であるが、X軸方向に平行な断面図上では上に凸の曲線形状となり、地すべり現象を説明し得ないものとなった。よって、この地すべり地の地下すべり面に関する解析は、各測点の移動ベクトルの特性に注目して取り扱う必要がある。

5.1 三次元移動軌跡法によるすべり面形状と地すべりの影響範囲の推定

ここでは三次元移動軌跡法(解析手法は文献4)を参照)の一例として、地下すべり面の立体的な形状をひとつの二次曲面で近似した場合の解析例を示す。

解析に用いる測点は上記の理由から、その移動特性に注目して選定する必要がある。この解析例ではまず、変位追跡点の中から、立体移動量 $(dx^2+dy^2+dh^2)^{1/2}$ が150～200cmの範囲の測点を選定した。選定理由は、移動量が小さい測点のデータでは3.3で述べた測量誤差の影響が大きいために解析には適さないこと、また大きな移動量を示す杉林や雑草地のデータは前述のように信頼度が低いことによる。ここで選定した測点の移動量は測量誤差の10倍程度に達する。よって解析用のデータとしては信頼できるものである。この段階で選定した測点はNo.3, 4, 6, 7, 8, 9, 18, 19, 20, 29, 30, 34, 35, 36, 38, 120, 129, 133, 142, 143, 155, 157, 203の合計23点である。これらの測点を黒い丸印で図-2に示した。

さらに図-2の移動ベクトルを観察してその移動特性に共通な傾向のあるものとして、測点3, 4, 6, 8, 9, 18, 34, 35, 36, 142, 143を選ぶ。これらは地すべり地の頭部から中部にわたる測点である。そして脚部には適当な測点がないので、No.154を選んだ。この測点の移動量は200cm以上と大きい、その移動方向からみてこの解析に用い得るものと判断した。

解析の結果、すべり面(二次曲面)の方程式は次の式形で得られた。ここで地すべりの境界点として頭部では(h3)を、脚部では(t1)と(t3)(図-2参照)を与えている。

$$H = 0.02696X^2 - 0.01322XY + 0.01785Y^2 - 65.91347X + 44.78173Y + 53561$$

なおこの式で H =標高(m), $X=x-75,000$ (m), $Y=y+31,000$ (m)である。 x, y は平面直角座標系(国家座標系)であらわした平面図上の座標値である。

この曲面をX軸およびY軸に平行な等間隔の断面上に投影したものを図-5に示す。解析に用いた測点および境界点も同時に示してある。No.154以外の諸点は地表面に存在する。上側の図はこの地すべりの縦断面図、下側の図は地すべりの横断面図にほぼ匹敵する。両者とも地すべり曲面の形状としての不自然さはないと考える。すべり面の最低部の標高は651mで、その位置での地表面からの深さは地形図上で調べると14mとなる。しかしその下方の達橋沢の川底よりも4mほど深い。これは現地の状況から見ると多少不合理である。

図-1において実線で囲んだ領域は、この解析で得られたすべり曲面と地表面との交線を求め、平面図上に地すべりの影響圏を示す境界線を推定して表示したものである。この境界線(実線)は頭部の(h2), (h3)に

図-5 三次元移動軌跡法による地下すべり面の推定形状 (HY 面および HX 面上への投影)

わたる段差とはよく対応する。これは (h3) を境界条件として与えたから当然のことである。境界線よりも上方の道路に至る区間の段差は、地すべり発生時の地表変状の発達過程（第2章）から判断して副次的な局部崩落とみなしている。よって本文では、解析に用いる頭部の境界点 (h1), (h2), (h3), (h4) を図示の位置にとった。この境界線は地すべりの右肩部の付近では現地との整合性がよくない。解析に用いた測点 No.142 (標高点677.2 m の上方) が影響圏の外に出てしまった。しかしこの標高点の下側に発生している段差の形状と境界線とはよく対応している。この段差から時計回りに地すべり境界線をたどると、(t2), (t4) とは一致してはいないものの、この図に示された地すべり地の下半部に対する推定影響圏はほぼ妥当なものと考えられる。地すべり地の左肩部では境界線と現地の段差とはかなりかけ離れている。ただしこの境界線は地形図の上では古い局部的な滑落崖の直下にまで迫っている。このことはこの地すべりに関して旧崩積土の再活動を類推させるところに興味がある。

三次元移動軌跡法は、パソコンを用いた地下すべり面の推定解析には効果的に利用できる⁴⁾。しかし本研究のように不確実性とかかなりの誤差を含んだデータが多く、さらに本章の冒頭で考察したような脚部付近における部分的な構造特性の影響を受けているらしい地すべりの場合には、解析データの選定に十分注意しないと解が安定しない。本文に示したもの以外にも各種のデータを組み合わせる解析してみたが、そのほとんどが現地の現象との不整合に終わった。ここに示したものは比較的整合性のよいものの一例に過ぎない。したがって本地すべりに三次元移動軌跡法を適用することはむずかしい。

5.2 投影断面図上における地下すべり面の推定

ここでは上記の理由から、本文で研究対象としている地すべりについて次のような解析手法を適用する。

1) まず平面図上で各測点の移動ベクトルを観察して、地すべり挙動としての共通な特性を示す測点のグループからなる領域を定める。

2) 次にその領域内で選定した測点の移動ベクトルをいくつかの方向の鉛直投影面上に投影し、各投影断面図上での移動ベクトルを解析して、その断面図上における地下のすべり面の位置と形状を推定する。

3) このようにして得られた各投影断面図上でのすべり面について、現地の境界条件（頭部および脚部の変状）と最もよく整合するものを採用する。

すなわちこの地すべり地に関しては、地表の各測点の移動特性に注目して地すべり地をいくつかのブロックに分割し、各ブロックを代表するような移動方向を見出し、その移動方向と平

行な投影断面図の上ですべり面の形状を推定する、という手法を用いたほうが合理的である。この手法によって各種の投影断面図上における解析を試行して、現地の状況と比較よく整合するものを探索した。以下にそのうちの代表的な解析結果を示す。なお解析に用いるデータの選定は、上記(5.1)と同様な規準にしたがう。

図-6は多角形法²⁾による解析例である。これは図-2において頭部境界点 (h2) と脚部境界点 (t2) を結ぶ線よりも北側（図では上側）に存在する測点群のデータを用いて解析したものである。図-2の各測点の移動ベクトル（正常なもの）を観察して、この領域に含まれる地すべり土塊の主たる移動方向は、X軸から90°~110°の範囲内に存在することが予想される。そこで投影面の方向角を細かく変化させながら、多角形法（解析手法は文献2）を参照）によってすべり面の形状を解析していく。解析上の地すべり境界点として頭部で (h2) を、脚部で (t2) を選ぶ。解析の結果、図-6に示すような投影面方向角が97°の場合が頭部と脚部の解析用境界点 (h2, t2) に対する結合条件が最もよいことがわかった。この図において測点 No.151, 154, 155 は杉林の樹上に設けたものである。その他の測点は地上に設けてある。実線で示したものが多角形法で推定したすべり面の形状である。地すべり地の下方では測点が上記のような樹上に設けた3点のみのため、すべり面形状が不自然である。これを修正するために、多角形法で推定したすべり面の形状に二次曲線をあてはめてみると、破線で示すようなすべり面形状が得られる。

図-7は最小二乗法を用いた多項式法（解析手法は文献3）を参照）による解析例である。解析に用いた測点は図-2においてほぼ頭部境界点 (h2) と脚部境界点 (t4) とを結ぶ線から南側（図では下側）に存在するものである。解析の結果、図示のような投影面方向角が110°の場合において解析用境界点 (h2, t4) に対する結合条件の最もよいものが得られる。この解析に用いた測点はいずれも

図-6 多角形法による地下すべり面の推定
 (投影面方向角 97° 使用測点番号: 3・4・9・10・141・142・143・151・154・155)

図-7 多項式法による地下すべり面の推定
(投影面方向角110° 使用測点番号: 17・18・19・20・21・22・27・29・30・41・129・133・203・204)

図-8 円弧すべり面法による地下すべり面の推定
(投影面方向角98° 使用測点番号: 5・6・7・8・28・30)

地表面に存在するものである。

上記の北側の測点群のデータを用いた場合に比べて、南側の測点群のデータを用いた場合には、すべり面の深さが比較的浅くなっている。

図-8は最小二乗法を用いた円弧すべり面法(解析手法は文献1)を参照)による解析例である。解析に用いた測点は、地すべり地の頭部から中部にかけては測点 No.5, 6, 7, 8 の4点である。これらの測点は図-2に見るようにこの地すべり地のほぼ中央に位置しており、移動ベクトルの方向は河川が外側へ屈曲する頂点に向かっている。これらの測点より下方の地すべり脚部にかけては測点が存在しない。この空白部分は杉林で、樹木の傾動が甚だしくて解析用の変位追跡点データを得られなかった場所である。この解析では脚部付近にも測点が必要なので、No.28, 30を選んだ。解析の結果は図示のように投影面方向角が98°のときに、解析用境界点(h2, t3)に対する結合条件が最もよくなる。この図における測点はいずれも地表面の位置をあらわす。すべり面の深さは北側測

点グループによるもの(図-6参照)と南側測点グループによるもの(図-7参照)とのほぼ中間的な深さとなっている。

なお図-6, 7, 8においてはそれぞれ異なる解法による結果を示したが、各図について図示したもの以外の解法を適用してもほぼ同じ結果が得られている。

6. 総括

本研究は、ある場所に発生した地すべりに対して、空中写真測量による安全で迅速な計測-解析システムを完成させることを目的として開始したものである。この手法を実用的なものとするためには、さらに数多くの地すべり地に対して実験的な検討を積み重ねていく必要がある。今回の研究を通じて知ることのできた事項を以下に要約して、今後の研究の課題としたい。

1) 現地での最初の空中写真撮影は、早期に行なうほど利用価値がある。それは解析精度の向上にもつながる。地すべりの兆候が現われた時点で直ちに実行することが望ましい。

2) 異なる日時に撮影した空中写真上で、地すべりで移動した地上の微小物体が同一物体であるかどうかを判定するために、移写器を利用して空中三角測量のタイポイント選点移写の原理を適用した。この手法によって、移動する地すべり土塊自体の変形の有無も判別できる。この原理は今後解析用のデータの選定の際にも有効に利用できるものとする。

3) 森林や雑草地に覆われて空中から地表が見えないような場所に対する変位追跡はきわめて困難である。計測精度を高めるためには、部分的な伐採等を行なわなければならない。

4) 空中写真測量による変位追跡点の座標値測定の誤差は±15cm程度である。よって地表の移動量がこの誤差の数倍以上に達するような地すべりでなければ本法の適用はできない。

5) 各種の投影面の上で地表物体の移動ベクトルを解析することによって、地すべりの移動方向と移動速度、地すべり地内の移動ブロックの区分、地すべりの影響している範囲、地下のすべり面の深さと形状などを求めることができる。この際、解析に用いるデータの選択によってかなりの差が生ずる。これの第一の解決策は写真測量の精度の向上である。

6) 今回の研究ではカラー写真を使用した。カラーフィルムはモノクロフィルムよりも解像力が2倍劣る。計測用にはモノクロ写真を使用し、カラーフィルムは地上物体の判別のための補助として用いることが望ましい。

また撮影縮尺は1/2000以上の大縮尺とすることが望ましい。この2点の改良で写真測量の精度はかなり向上する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、長野市役所河川課および日本物理探鉱株式会社からは現地調査に関する種々の情報を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉澤孝和・細川容宏：地すべり地における地表変位測量データをを用いた円弧すべりの解析，地すべり，23-4，pp.13～

23，1987

- 2) 吉澤孝和：多角形法による地下すべり面の推定，地すべり，25-2，pp.9～17，1988
3) 吉澤孝和：多項式を用いた地すべり地の地下すべり面形状の推定，地すべり，25-3，pp.1～10，1988
4) 吉澤孝和：地上測量による地下すべり面形状および地すべり影響範囲の推定，地すべり，26-3，pp.28～39，1989
5) 吉澤孝和・村瀬孝三：写真測量による地すべり地の地下すべり面の推定，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，4-17，1990
6) 打荻珠男：航空写真による地すべり状況の測定，地すべり，5-2，pp.27～33，1968
7) 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

(原稿受理日 平成2年5月9日)

斜面災害に関する

アジアセミナー熊本 '91

Asian Seminar on Slope Disaster Kumamoto '91

と き：1991年6月26日（水）

ところ：KKR五峯閣，TEL (096) 355-0121（熊本市千葉城町 3-3）

主 催：熊本大学自然災害研究会，土質工学会九州支部，土木学会西部支部

後 援：建設省九州地方建設局，熊本県土木部，熊本県建設技術センター，熊本県建設業協会，熊本県地質調査業協会，建設コンサルタンツ協会九州支部

参加費：5,000円（銀行振込で下記へ御送金下さい。）

プログラム	9：30～14：40	タイにおける斜面災害の状況と対策	P. NUTARAYA（アジア工科大学）
	10：50～12：00	中国における斜面災害の状況と対策	講師未定
	13：10～14：20	韓国における斜面災害の状況と対策	金 翔圭（東国大学校）
	14：20～15：30	斜面災害軽減対策の現状と今後の展望	小川 裕示（建設省）
	15：40～16：50	斜面崩壊予知技術の現状と今後の展望	川上 浩（信州大学）

懇 親 会 と き：17：30 ところ：KKR五峯閣 参加費：5,000円（銀行振込で下記へ御送金下さい。）

熊本・大分地方の

'90 年7月豪雨災害に関する調査報告会

と き：1991年6月27日（木） ところ：KKR五峯閣，TEL (096) 355-0121

主 催：熊本大学自然災害研究会，九州大学西部地区自然災害資料センター

後 援：土木学会西部支部

参加費：2,000円（銀行振込で下記へ御送金下さい。）

プログラム	9：30～10：10	斜面災害	鈴木 敦巳（熊本大学）
	10：10～10：50	土石流災害	橋本 晴行（九州大学）
	11：00～11：40	避難状況	中島 重旗（熊本大学）

申込み方法 参加者氏名，勤務先，連絡先，参加対象を明記して，はがきで下記へお申し込み下さい。

連絡先 熊本大学自然災害研究会 アジアセミナー 熊本 '91事務局 鈴木 敦巳

熊本市黒髪2丁目39-1 熊本大学工学部土木環境工学科内

TEL. 096-344-2111 (3539)，FAX. 096-344-5063

参加費振込銀行口座：肥後銀行子飼橋支店（普通）1570779