地すべりの挙動解析における写真測量の応用

Application of Photogrammetry to Analysis of
Landslide Behaviour

吉澤 孝和*, 西澤 茂高**

三澤 敏雄**, 根岸 六郎**

Norikazu YOSHIZAWA, Shigetaka NISHIZAWA

Toshio MISA WA, Rokuro NEGISHI

Abstract: Velocity, moving direction and spreading boundary of mass-movement are important factors for prevention and reduction planning of landslide disaster. Without surveying, there are no means to measure these factors. However, no field surveying is available when ground destruction by the landslide is violent and dangerous. To such a landslide suddenly occurred at Hirose district in the north-western part of Nagano city, photogrammetry was examined by flights on October 5-th and 10-th in 1989. Landslide behaviour was analyzed by finding three-dimensional displacements of tracing points on photographs taken by the two flights. Accuracy of the photogrammetry, error propagation to displacement vector of the tracing points, and landslide behaviour analysis by the vectors on projection planes were investigated. Applicability of the photogrammetry to the analysis of sudden and violent landslide behaviour was demonstrated by these investigations.

1. 地すべりと測量

地すべりとは、斜面を構成する地山の内部において力学的なバランスが何らかの原因によって破壊され、地中に発生した破壊面を境としてそれよりも上側に存在する斜面構成物質が重力の作用により連続的または間欠的に比較的緩慢な速度で移動する現象である。

地すべり地においては、地表に亀裂や段差・隆起や陥没・崩落や崩積などの変状が発生する。これがその場所を利用している人間の生活や各種の構造物に対し

て重大な脅威と損害をもたらす。地すべりによる災害を未然に防ぎ、あるいは災害を最小限にいとめるためには、地すべりの挙動を正確かつ迅速に把握して適切な対策を講ずることが必要である¹⁾。

表1は地すべり地において行なわれている各種の防災対策と代表的な実施項目、およびそれらの対策に利用されている測量と測量成果を要約したものである。

これらの中で地形測量は最も重要な地位を占めてきた。すなわち地すべりで発生した諸現象を地形の変遷に注目して検討していくことが、地すべりの実態を把握し、合理的な対策を講ずるうえでの必要不可欠の要

表1 地すべり地における各種の対策と測量

対策の名称	主 要 実 施 項 目	利用される測量と成果
避難・監視	警戒, 崩壊予知, 危険地域判別, 避難条件判定, 復旧後の監視	変位追跡, 地形図, 写真等
制御・抑止	要因の分析と誘因の制御, 災害の波及領域の予測と拡大の抑止	地形・断面図, 変位, 写真
復旧・保全	被災地の復旧, 再発防止工事, 諸施設の保全, 土地の利用規制	各種地形変遷図, 空中写真

* 信州大学工学部 ** 株式会社 協同測量社
「写真測量とリモートセンシング」Vol. 30, No. 5, 1991

件であり、地形図は情報提供の最良の手段であった。そのため、測量技術者が担当してきた従来の業務は、地形に関する平面図や断面図の作成および空中写真の提供にとどまり、地すべり対策に関連する解析や計画に直接参加する機会は少なかった。

近年、地すべり地において有望視されている測量は、地表の諸点に対する三次元絶対変位の追跡である^{C1)}。トータルステーションの普及によってこの観測手法は飛躍的に進歩した^{C2)}。諸点の三次元変位データを解析して、地すべりブロックの絶対移動量、移動方向、移動速度、面積変化、主ひずみ等が求められる²⁾。さらにこのデータは、崩壊時刻の予測³⁾、地下すべり面形状の推定⁴⁾、地すべりの影響範囲の推定⁵⁾などにも利用できる。したがってこれは測量技術者が地すべり対策に直接関与することのできる応用測量の一部門といえる。

2. 変位追跡と写真測量

本研究は空中写真測量により、地すべり挙動を迅速かつ適切に解析し、各種の対策に利用できる情報を提供する手法を検討することを目的とする。地すべり地に対する従来の写真測量は地形図の作成が主目的であった。変位追跡への利用も試みられてきたが、それらは危険な活動期を過ぎた時点で対空標識を設置して長期間にわたる緩慢な変位を検出し、平面図や断面図上における変位ベクトル図を作成するものであった⁶⁾。

本研究はこれに加えてつぎの3点を検討する。

1) 緊急時における早期情報提供技術の検討：危険で立ち入りのできないような地すべり地に対する効果的な緊急観測と解析手法を実験的に検討する。

2) 変位追跡手法の能率化と精度の検討：地すべり発生地に対空標識を設置せず、地物を利用して変位を追跡する手法とその精度を検討する。

3) 地すべり影響範囲の早期把握：地すべりの影響範囲を地物の変位検出によって迅速に把握する。

要するに本研究は、活動が激しくて危険な状態の地すべりに対して、安全かつ迅速に観測を行ない得る手段は空中写真測量のみであるという点に着目して、地すべりの早期診断と、的確な対策を施すための防災情報の提供手法を検討するものである^{C3)}。

3. 解析対象地域の概要

本研究の対象として、長野市広瀬地区の地すべりを選んだ(図5参照)。1989年10月3日、長野市の広瀬地区に地すべりが発生した。この日の午後、農道直下の水田に亀裂が発見され、夕刻までには幅約50mにわたる断続的な馬蹄形状に成長した。この一帯は上部が水田、下部が森林や雑草で覆われた斜面で、農道から約70m下方に谷川がある。谷の水流が地すべりの土砂で堰き止められた場合、その決壊による土石流災害を懸念して、その日から直ちに監視体制がとられた。地表の動きは当初かなり活発であったため、現地でなし得た計測は初日に設置した3基の伸縮計のみであり、他の計測は立ち入りが危険のため行なわれなかった。しかし10月6日までは活発な動きを見せていた地すべりも、それ以後は急速に休止状態に入って現在に至っている。

4. 地表目標物の三次元変位の計測と精度

筆者らが地すべり発生の情報を得たのは翌10月4日であった。これに本研究を試行することを考え、直ちに写真撮影の手配をして最初の撮影を10月5日15時24分に、2度目の撮影を10月10日14時22分に行なった。この地すべりの活動期間からみると撮影の出足がやや遅れた結果となった。しかし2回の撮影で得られた写

C1) 慣用的な従来の地すべり変位計測機器に伸縮計と傾斜計がある。精度は測量の場合よりも1～2桁高い。しかしこれらは地すべり地内の2点間の相対的な変位を計測するのみであって、地すべり土塊の移動方向や移動の絶対量を検出することはできない。現在の計測技術においてこれをなし得るのは測量のみである。

C2) 地すべり地における地表の諸点の変位追跡は、トータルステーションの普及以前には、見通し杭測量、トラ

バース測量、三角測量、水準測量、写真測量等で行なわれてきた。これらの測量は主として変位の有無を検出することを主眼としたものであり、解析的なものは移動ベクトル図の作成程度であった⁶⁾。

C3) 一般に地すべり地において地表の諸点の三次元変位を追跡する場合、精度や経費面で比較した場合には地上測量によるトータルステーション方式のほうが有利である。しかし現地立入が不可能な地すべり地で、迅速

図1 写真測量による地すべり挙動の追跡および解析の手法

真を対比した結果、第2章で述べた研究目的に利用できるものと判断した。よってこの章では、撮影された写真上で判別できる地物を利用した変位追跡の手法とその精度について検討する。

4-1 地すべり挙動追跡用の写真撮影

図1に空中写真測量による地表変位の検出法と解析の手順を示す。地すべりの発生という緊急事態の下では、地すべりの動態を如何に迅速かつ正確に把握できるかが問われる。最も重要なことは最初の撮影を一刻も早く行なうことである。その理由は、地表の変位は2つの異なる時点で撮影した写真上の目標物の座標値の差から検出され、その差が大きいほど、写真測量で生ずる誤差の影響が減少するためである。

4-2 撮影写真の対地標定

撮影写真の対地標定には図1の(III)の方式を用いた。この方式は既存の写真の空中三角測量成果を利用するもので精度は低いけれども、時間的な余裕のない緊急時の地すべり挙動の追跡には効果的な手法である。

本研究で準備した空中写真はつぎの3種類である。
写真O：過去に別の目的で空中三角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：NAG II7110，C=213.80mm，縮尺1/8000）
写真A：今回の撮影写真（1989年10月5日撮影，カメラ：UAG I 6037，C=153.43mm，縮尺1/5600）
写真B：今回の撮影写真（1989年10月10日撮影，カメラ，縮尺は写真Aと同一）

対地標定はまず、解析図化機（DSR11）で既存の写

真Oを空中三角測量成果により標定したのち、今回の写真Aの上でも明確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。

本研究では対地標定で生ずる写真A，B両モデルの相対的な誤差をできる限り小さくする必要がある^{C4)}。よって写真A，Bに共通のパスポイント（二次のパスポイント）を新たに8点選点した（図1の②）。これらは、地すべり変動の影響が及ばない安定した場所の明瞭度の高い地物を選定した。

二次のパスポイントの座標は、上記の写真Oに準拠して写真Aの対地標定を完成させた後に測定した（図1の①④）。

4-3 変位追跡点の選定とブリック

変位追跡点は、写真上に写し込まれた自然または人工の地物で、写真AとBの上でそれが同一物であることを明確に判定できることが必要である。本研究では変位追跡点として：1) 識別しやすい石や岩の角，2) 擁壁や道路上の目印，3) 耕地の中の諸点（農作物の境界点や点在する小物体），4) 水田の畦道の屈曲点，5) 雑草地の中の裸地の特殊形状，6) 森林の中の樹木の頂点などを選んだ。これらのうち，5)と6)は精度的にみた場合不適当なものであるが，森林または雑草におおわれた場所に対して，やむを得ず採用したものである。

地すべりの発生している場所の地表形態は時間とともに変化する。そのため撮影時点の異なるAとBの写

C4) 地すべりによる地表の変位は、写真Aと写真Bの上の同一の地物の三次元座標値の差から検出される。

真上で対空標識なしで同一地点を探すことは困難をきわめる。そこで本研究はA B両写真上に共通する変位追跡点を定めるために、実体移写器(PUG 4)を用いてタイポイント選点ブリックの手法を応用した^{C5)}。

まずPUG 4に写真Aの左側と写真Bの右側のポジフィルムをセットして実体視する。このとき地すべりの生じている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像は重なり合っ

て局部的に実体視ができる。この原理を用い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フィルム上に同一の変位追跡点を定めてブリックした(図1の③)。

変位追跡点は、地すべり地内とその周辺になるべく均等になるように、また地表変状の激しい亀裂や段差の付近を避けて、57個の点を選点してブリックした。

4-4 変位追跡点の測定精度

本研究では対空標識のかわりに地物を利用し、さらに二次的な標定作業を繰り返して変位追跡点の座標を求めている(図1の①④)。そのため通常の機械的誤差に加え、作業工程に伴う移写の誤差、標定の誤差、および測定の誤差が累積する。本文では以下に示すように、これらの誤差に関する検討を実験的に行った。

A) 移写と座標測定の精度に関する検討

a) まず、写真Aと写真Bのポジフィルムを3組ずつ複製した。これを写真対A1, A2, A3, B1, B2, B3と呼ぶ。

b) 写真対A1の左側写真に対して順次、写真対B1, B2, B3の右側写真を組み合わせ、二次のパスポイントおよび、上記4-3の手法でフィルム上に変位追跡点を定めてブリックした。以下これをブリック点と呼ぶ。

c) 写真対A1の左側写真上のブリック点を、写真対A2およびA3の左側フィルム上に移写した。

d) 各フィルム上の個々のブリック点の座標をステコメータで測定した。これにより写真Aと写真B上の個々のブリック点の座標測定値は3個ずつ得られる。

e) 写真A B上の各ブリック点の3個の座標測定値の平均値を求め、座標測定値の残差を次式で計算した：

$$(\text{残差 } v) = (\text{座標測定値}) - (\text{座標平均値}) \quad (1)$$

f) ここでブリック点を次の4種類に大別する：

・標定点 (4-2で述べた8個の二次のパスポイント)

・地表点 (4-3の1), 2), 3), 4)に該当する地表の明瞭な変位追跡点で40点を選点)

・荒地点 (前記4-3の5)に該当する点で6点を選点)

・樹上点 (前記4-3の6)に該当する点で11点を選点)

これらの種類別に、ブリックと座標測定の過程でどの程度の残差が生ずるかを検討してみる。ひとつの指標として、式(1)で得られる残差を点の種類別にみたときの平均と変動を次のように定義した：

$$(\text{残差平均}) = \Sigma |v| / n \quad (n = \text{データ数}) \quad (2)$$

$$(\text{残差変動}) = \{\Sigma v^2 / n (n - 1)\}^{1/2} \quad (3)$$

写真Aと写真Bについて行なった解析結果を表2と表3に示す。

表2 ブリック点の残差の検討 (写真A)

(残差平均) ± (残差変動) [単位: μ]

測点(データ数)	X 座 標	Y 座 標
標定点 (24)	2.83 ± 0.34	5.17 ± 0.74
地表点 (120)	2.88 ± 0.19	5.30 ± 0.32
荒地点 (18)	2.94 ± 0.54	5.50 ± 0.76
樹上点 (33)	3.03 ± 0.53	6.67 ± 0.64

表3 ブリック点の残差の検討 (写真B)

(残差平均) ± (残差変動) [単位: μ]

測点(データ数)	X 座 標	Y 座 標
標定点 (24)	4.46 ± 0.47	3.42 ± 0.59
地表点 (120)	9.52 ± 0.70	14.93 ± 0.97
荒地点 (18)	7.17 ± 1.69	14.11 ± 2.50
樹上点 (33)	12.72 ± 1.76	17.97 ± 3.33

表2と表3の数値は、フィルムの歪、ブリック作業および座標測定作業の誤差が総合されたものである。これらの表からつぎの考察がなされる。

④ 標定点の誤差は写真A, Bともほぼ同程度である。

C5) これが本研究における地すべりの地表変位計測手法の特長である。地すべり変位の検出に関する従来の写真測量の手法は、対空標識を蜜に設置して地表変位を検出する手法^{a)}と地すべり災害前後の空中写真から同一地物を判別して移動量を求める手法^{b)}に大別される。前者は緩慢な地すべりを対象とした長期間にわたる計測手法で精度は高い。後者は災害調査的なもので10～数10mの移動量を検出するが精度は低い。本研究では移動速度に関係なく進行中の地すべりを対象とし、対空標識を用いずに地物を利用する。そして変位検出の精度をできるだけ高く保つことを目的としてこのような手法を試みた。

これらは変位追跡点（地表点・荒地点・樹上点）の誤差よりも小さい。これは標定点を地すべり地から離れた明瞭な舗装路面上に選んだためである。

- ⑥ 変位追跡点の誤差は写真Aよりも写真Bのほうがかなり大きく生じている。これは前記b), c)に示したブリックの手順の相違に起因するものであり、本研究の手法から見た場合、やむを得ないことである。
- ⑦ 写真Aでは、地表点、荒地点、樹上点の順に誤差が増加している。これは目標とした地物の性質から見て当然の結果と言える。
- ⑧ 写真Bでは荒地点よりも地表点の誤差のほうが大きくなった。これは前記b) の手順において、個々の変位追跡点を実体視によってブリックする回数が、荒地点（データ数18）に対して地表点（データ数120）のほうがはるかに多く、個々の変位追跡点の移写の際に生ずる誤差の累積に起因するのと考えられる。
- ⑨ 樹上点の誤差は写真A、Bとも他の測点の誤差よりも大きい。これは目標点の位置的な不安定性によるものである。

B) 標定および座標測定誤差に関する検討

解析図化機(DSR11)を用いて、写真A、B上で個々の変位追跡点の三次元座標値(X, Y, H)を求めた。この座標値にはブリック、標定、計測という一連の作業の過程で介入する誤差が累積している。これを検討するため、次の手順で実験を行なった。

- a) A1, A2, A3およびB1, B2, B3の各モデルについて対地標定を2回くり返す。
 - b) 1回の対地標定ごとに個々の変位追跡点の測定を2回くり返す。
- この手順で写真Aおよび写真Bの個々の変位追跡点に対して(3モデル)×(2回標定)×(2回測定)=(12個)の三次元座標データが得られた。

つぎにA、B両写真上の各変位追跡点に対する三次元座標の平均値を求め、個々の座標値との差を残差として平均二乗誤差(m)を次式で計算した。

$$m = \{ \Sigma(\text{残差})^2 / (n(n-1)) \}^{1/2} \quad (n=12) \tag{4}$$

ここで、座標値の精度を変位追跡点の種類別に比較するひとつの指標として、各変位追跡点について得られた三次元座標の平均二乗誤差(m_{XA} , m_{YA} , ..., m_{HB})を用いてつぎの量を求めた：

$$(m \text{ の平均}) = W = \Sigma m / N \quad (N \text{ は測点数}) \tag{5}$$

$$(m \text{ の変動}) = \{ \Sigma (m - W)^2 / (N(N-1)) \}^{1/2} \tag{6}$$

ここにNは種類別にみた変位追跡点の数で、地表点は40、荒地点は6、樹上点は11である。

表4は変位追跡点の種類別に(mの平均)と(mの変動)を求めたものである。この表からつぎの考察ができる。

- ① 平面位置の誤差(m_x , m_y)は写真Aよりも写真Bのほうが大きい。
- ② 標高の誤差(m_H)は写真AとBの間で大差ない。
- ③ 変位追跡点全体を通じて、標高の誤差のほうが平面位置の誤差よりもかなり大きくなる。この傾向は地表点、荒地点、樹上点の順に顕著となっていく。
- ④ 平面位置の誤差を見ると、地表点と荒地点との間で大差は認められない。
- ⑤ 樹上点の誤差は、写真A、Bともに最も大きい。

5. 変位追跡点を用いた地すべり挙動の解析

撮影時刻の異なる空中写真を用いて変位追跡点の座標値を測定した場合、同一測点の座標値に座標差が認められ、それが測量誤差を十分上回るものであれば、その点は移動していると判定できる。よってこの座標差から各点の変位ベクトルを求め(図1の⑤)これを各種の地すべり解析に利用することができる。

以下の検討では写真上の変位追跡点の座標値は、多

表 4 種類別に見た変位追跡点の座標値の平均二乗誤差 m の比較
[(mの平均) ± (mの変動)] (cm)

測 点 (点数)	写 真 A			写 真 B		
	m_x	m_y	m_H	m_x	m_y	m_H
地 表 点 (40)	1.15±0.06	0.67±0.03	2.97±0.15	3.09±0.19	1.81±0.12	2.94±0.18
荒 地 点 (6)	1.09±0.11	1.13±0.13	6.13±1.11	3.24±0.48	2.13±0.11	6.55±0.75
樹 上 点 (11)	1.51±0.12	1.81±0.24	12.39±1.83	3.93±0.76	4.04±0.53	10.59±1.64
全 測 点 (57)	1.21±0.05	0.94±0.08	5.12±0.65	3.27±0.23	2.27±0.18	4.79±0.56

数回の観測 (4-4-B) によってその平均値と平均二乗誤差が与えられているものとする。すなわち、撮影時点 T_1 と T_2 の写真上で測定したひとつの変位追跡点の座標の平均値と平均二乗誤差を次の記号であらわす：

観測時点	座標平均値			平均二乗誤差		
T_1	X_1	Y_1	H_1	m_{X1}	m_{Y1}	m_{H1}
T_2	X_2	Y_2	H_2	m_{X2}	m_{Y2}	m_{H2}

T_1 から T_2 の間に生じた座標差を次式であらわす：

$$\Delta X = X_2 - X_1 \quad \Delta Y = Y_2 - Y_1 \quad \Delta H = H_2 - H_1 \quad (7)$$

この座標差を用いて以下の諸量を定義する：

$$\text{三次元移動量： } S = (\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta H^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{二次元移動量： } \left\{ \begin{array}{l} S_{XY} = (\Delta X^2 + \Delta Y^2)^{1/2} \\ S_{XH} = (\Delta X^2 + \Delta H^2)^{1/2} \\ S_{YH} = (\Delta Y^2 + \Delta H^2)^{1/2} \end{array} \right\} \quad (9)$$

a) 三次元移動量 (S) に生ずる誤差 (M_s)：

$$M_s^2 = \{\Delta X^2, \Delta Y^2, \Delta H^2\}^T \cdot \{(m_{X1}^2 + m_{X2}^2), (m_{Y1}^2 + m_{Y2}^2), (m_{H1}^2 + m_{H2}^2)\} / S^2 \quad (12)$$

$\{ \}$ は列ベクトル, $\{ \}^T$ は行ベクトルである。

b) 二次元移動量 (S_{XY}, S_{XH}, S_{YH}) に生ずる誤差 ($M_{SXY}, M_{SXH}, M_{SYH}$)：

$$\begin{bmatrix} M_{SXY}^2 \\ M_{SXH}^2 \\ M_{SYH}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/S_{XY}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_{XH}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/S_{YH}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X^2 & \Delta Y^2 & 0 \\ \Delta X^2 & 0 & \Delta H^2 \\ 0 & \Delta Y^2 & \Delta H^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{X1}^2 + m_{X2}^2 \\ m_{Y1}^2 + m_{Y2}^2 \\ m_{H1}^2 + m_{H2}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

c) 三次元移動方向余弦 (C_X, C_Y, C_H) に生ずる誤差 (M_{CX}, M_{CY}, M_{CH})：

$$\begin{bmatrix} S^6 \cdot M_{CX}^2 \\ S^6 \cdot M_{CY}^2 \\ S^6 \cdot M_{CH}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Delta Y^2 + \Delta H^2)^2 & (\Delta X \cdot \Delta Y)^2 & (\Delta X \cdot \Delta H)^2 \\ (\Delta X \cdot \Delta Y)^2 & (\Delta X^2 + \Delta H^2)^2 & (\Delta Y \cdot \Delta H)^2 \\ (\Delta X \cdot \Delta H)^2 & (\Delta Y \cdot \Delta H)^2 & (\Delta X^2 + \Delta Y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{X1}^2 + m_{X2}^2 \\ m_{Y1}^2 + m_{Y2}^2 \\ m_{H1}^2 + m_{H2}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

d) 二次元移動方向余弦 ($C_{XY}, C_{YX}, C_{XH}, C_{HX}, C_{YH}, C_{HY}$) に生ずる誤差 ($M_{CXY}, M_{CYX}, M_{CXH}, M_{CHX}, M_{CYH}, M_{CHY}$)

$$\begin{bmatrix} S_{XY}^6 \cdot M_{CXY}^2 \\ S_{XY}^6 \cdot M_{CYX}^2 \\ S_{XH}^6 \cdot M_{CXH}^2 \\ S_{XH}^6 \cdot M_{CHX}^2 \\ S_{YH}^6 \cdot M_{CYH}^2 \\ S_{YH}^6 \cdot M_{CHY}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y^4 & (\Delta X \cdot \Delta Y)^2 & 0 \\ (\Delta X \cdot \Delta Y)^2 & \Delta X^4 & 0 \\ \Delta H^4 & 0 & (\Delta X \cdot \Delta H)^2 \\ (\Delta X \cdot \Delta H)^2 & 0 & \Delta X^4 \\ 0 & \Delta H^4 & (\Delta Y \cdot \Delta H)^2 \\ 0 & (\Delta Y \cdot \Delta H)^2 & \Delta Y^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{X1}^2 + m_{X2}^2 \\ m_{Y1}^2 + m_{Y2}^2 \\ m_{H1}^2 + m_{H2}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

5-2 誤差を考慮した移動ベクトルの表示法

本文では変位追跡点の移動ベクトルを、各種の投影面 (水平面または任意方向の鉛直面) の上に投影して解析を行なう。この場合、前節で述べたような測点の座標誤差の影響を考慮したベクトルの表示法が必要となる。以下にその手法を示す。

図2において $[i_1], [i_2]$ は時点 T_1, T_2 における変位追跡点の座標平均値をプロットした点である。2点

$$\text{三次元移動方向余弦： } \left\{ \begin{array}{l} C_X = \Delta X / S \\ C_Y = \Delta Y / S \\ C_H = \Delta H / S \end{array} \right\} \quad (10)$$

二次元移動方向余弦：

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{XY} = \Delta X / S_{XY}, C_{YX} = \Delta Y / S_{XY} \\ C_{XH} = \Delta X / S_{XH}, C_{HX} = \Delta H / S_{XH} \\ C_{YH} = \Delta Y / S_{YH}, C_{HY} = \Delta H / S_{YH} \end{array} \right\} \quad (11)$$

5-1 移動ベクトルに対する測量誤差の影響

変位追跡点の移動量と移動方向を上の各式で計算した場合、座標値の誤差 ($m_{X1}, m_{Y1}, m_{H1}, m_{X2}, m_{Y2}, m_{H2}$) がどのように影響するかを誤差伝播の法則によって数式化した。その結果を以下に示す。

を結ぶと平均移動ベクトルが得られる。図に示すようにこのベクトルと平行な方向に V 軸を、直交する方向に U 軸をとる。ここで測定した座標の平均値と平均二乗誤差をつぎの記号であらわす。

点	時点	座標平均値			平均二乗誤差		
[i ₁]	T ₁	X _{i1}	Y _{i1}	H _{i1}	m _{X11}	m _{Y11}	m _{H11}
[i ₂]	T ₂	X _{i2}	Y _{i2}	H _{i2}	m _{X12}	m _{Y12}	m _{H12}

図の Y 軸と V 軸とのなす角 θ は次式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1}(X_{i2} - X_{i1}) / (Y_{i2} - Y_{i1}) \quad (16)$$

XY 座標系から UV 座標系への座標変換は次式で行なわれる。

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}_{it} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{it} \quad (t=1,2) \quad (17)$$

図2 測点[i]の移動方向をV軸とした座標変換

時間 $T_1 \sim T_2$ における移動量の成分を UV 座標であらわすとつぎのようになる。

$$\Delta U_i = U_{i2} - U_{i1} = 0 \quad \Delta V_i = V_{i2} - V_{i1} \quad (18)$$

式(17)の座標変換によって座標値 (U, V) に伝播する誤差 (m_{Uit} , $m_{Vit(t=1,2)}$) はつぎのようになる。

$$\begin{bmatrix} m_{Uit}^2 \\ m_{Vit}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{Xit}^2 \\ m_{Yit}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

変位追跡点[i]の水平移動量に生ずる誤差を UV 座標系であらわすためには、式(13)の第1行式を用いて、XをUに、YをVに読みかえればよい。これによって次式が得られる。

$$M_{SUVi}^2 = m_{V11}^2 + m_{V12}^2 \quad (20)$$

同様の手順で、移動方向に生ずる誤差は式(15)の第1行式から次のように導かれる。

$$M_{CUVi}^2 = (m_{U11}^2 + m_{U12}^2) / \Delta V_i^2 \quad (21)$$

つぎにこのような誤差を含む変位追跡点[i]のベクトルを図示する手法を述べる。図3は点[i₁]を基準としてベクトルの誤差領域を示した概念図である。

(a)図において、座標平均値 $(X, Y)_{i1}$ と $(X, Y)_{i2}$ を用いてプロットした2点[i₁]と[i₂]を結べば、変位追跡点[i]の平均移動ベクトルが図示される。このベクトルの長さには $\pm M_{SUVi}$ の、ベクトルの方向には $\pm M_{CUVi}$ の誤差が含まれる。そのためベクトルの始点を[i₁]としたとき、ベクトルの終点は図のabcdで囲

図3 移動ベクトルの誤差領域と表示法

まれる扇形の中の1点となる。

本文ではこのような誤差を考えた場合のベクトルの両極端の位置としてa点とc点を考える。これらの点の座標値は、UV 座標系では次のように与えられる。

a 点の座標値 (U_{ia} V_{ia}):

$$\begin{aligned} U_{ia} &= U_{i1} - (\Delta V_i + \delta) \sin\alpha \\ V_{ia} &= V_{i1} + (\Delta V_i + \delta) \cos\alpha \end{aligned} \quad (22)$$

c 点の座標値 (U_{ic} V_{ic}):

$$\begin{aligned} U_{ic} &= U_{i1} + (\Delta V_i - \delta) \sin\alpha \\ V_{ic} &= V_{i1} + (\Delta V_i - \delta) \cos\alpha \end{aligned} \quad (23)$$

ここに $M_{SUVi} = \delta$, $M_{CUVi} = \alpha$ と略記した。

UV 座標系は個々の変位追跡点ごとに、ある時間帯における平均移動方向を基準として定めたものであるから、移動ベクトルの図化にあたっては座標値 (U, V) を XY 座標系の座標値に変換する必要がある。この変換は式(17)の逆変換で、次式を用いればよい。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} \quad (24)$$

上式により点 $[i_1]$, $[i_2]$, a, cの座標値をXY座標系の値に変換し, 各点をプロットして(b)図に示すように表示する。ベクトルの起点を時点 T_1 の位置 $[i_1]$ に置いて○印であらわす。終点は時点 T_2 の位置である。図示の実線は点 $[i_1]$, $[i_2]$ を結んだもので平均移動ベクトルを示す。破線はa点と結んだもので, 誤差を考慮した場合の移動量の最大値および平均移動方向から右側への最大偏位を示す。点線はc点と結んだもので, 誤差を考慮した場合の移動量の最小値と平均移動方向から左側への最大偏位を示す。なお, これら各線の先端がベクトルの終点を示す。

移動ベクトルを, XH面, YH面およびPH面(任意方向の鉛直投影面)の上に投影した場合についても, これと同様の手順によって表示することができる。

5-3 平面図上における地すべり挙動の解析

前章で述べた57個の変位追跡点のXY平面上の座標平均値および平均二乗誤差のデータを, 前節の手法で解析して図化した結果を図4に示す。

この図において, 中央部一帯の変位追跡点の移動量は比較的大きく, 各点の移動方向にはほぼ共通した傾向がみられる。しかしこれを取り囲む周辺部の変位追跡点の移動ベクトルは, 大きさ, 方向ともかなり不規則である。この研究では前者は地すべりによる地表変状の顕著な地帯に, 後者はそこからかなり離れた地帯に設置した変位追跡点であるため, 後者のバラツキには写真測量の誤差が大きく影響している。

いまこの地すべりに関して図4から判定したい主要な情報は次の3項目である。

- 1) 個々の変位追跡点の移動の有無
- 2) 平面移動特性から見た地すべりブロックの区分
- 3) 地すべりブロックの移動方向と移動速度

A) 地表の移動の有無の判定

個々の変位追跡点の移動の有無の判定には以下の手順を用いた。

a) 変位追跡点 $[i]$ の移動量 S_{XYi} を式(9)で, これに生ずる誤差 M_{SXYi} を式(13)で計算する。

b) 移動量に対する誤差の割合(単位移動量に対する誤差率) ϵ_{XYi} を次式で定義する。

$$\epsilon_{XYi} = M_{SXYi}/S_{XYi} \quad (25)$$

c) これより変位追跡点 $[i]$ の移動量の重み P_{SXYi} を

次式で求める。

$$P_{SXYi} = 1/\epsilon_{XYi}^2 \quad (26)$$

d) 各変位追跡点の重みを求めたのち, 全点からみた場合の $[i]$ 点の相対重量 P_{SXYi} を次式で算出する。

$$P_{SXYi} = p_{SXYi}/\Sigma p_{SXYi} \quad (27)$$

e) 変位追跡点 $[i]$ の相対重量付き移動量 $[S_{XYi}]$ を次式で求める。これを用いて再び図化を行なう。

$$[S_{XYi}] = P_{XYi} \cdot S_{XYi}F \quad (F \text{ は拡大率}) \quad (28)$$

このa)～e)の演算処理を57個の全部の変位追跡点に施した結果を図5に示す。各点のベクトルは平均移動ベクトルである。ベクトルの長さは式(28)で計算した相対的なものである。またこの図には, 現地の地形の概要を記入した。

図4と図5に関する考察を以下に要約する。

- ㉑ 図4ではほとんど全部の点が移動を示している。これに上記の処理を施すと, 明確な移動を示す点は図5のように整理される。この図を用いて地すべりの生じている領域を平面図上で判定することができる。
- ㉒ 点52は広葉樹の頂部に追跡点を設定したものである。この点は他に比べて異常な動きを示す。これは地すべりで樹木が傾きながら移動するためである。したがってこのベクトルは地表の移動状況を正しく示すものではないが, 地表の移動の有無の判定には十分役立つ。
- ㉓ 点47から点57までは樹上に設けた変位追跡点である。図4においてこれらのベクトルの方向誤差(実線に対する破線と点線の開きの角度)は地表点(1～40)や荒地(41～46)に比べて大きい。これは樹上点の計測誤差が他に比べて大きいことを意味する。
- ㉔ 図5における樹上点の相対重量付き移動ベクトルは, 点51と52以外は図示できないほど小さいため, 事実上消去されている。点52に関しては㉒で述べたとおりである。点50のベクトルは図4では96cmの平均移動量を示すが, 移動方向は周辺の点51, 31, 45等に比べてかなりずれている。しかしこの点50のベクトルは図5では消去されている。それはこの点の座標計測誤差が大きいことによる。
- ㉕ 点51の座標精度は樹上点の中では比較的高いために, 図5ではそのベクトルが表示されている。移動方向は地上点33のそれとほぼ一致している。これは樹上点51のベクトルの信頼度の指標といえる。しか

図4 地すべり地とその周辺に設けた変位追跡点の水平移動ベクトル
 (長野市広瀬地区 891005~891010)
 [実線は座標平均値から求めたベクトル 点線と破線は座標誤差を考慮したベクトル]

しベクトルの長さについてみると、図4では点33と点51がほぼ同一であったものが、図5では点51が非常に短い。これは両者の座標計測誤差の程度に起因するものである。

① 図5において、地すべり領域の周辺にあってベク

トルの表示されていない点の大部分は、不動またはほぼ不動と考えられる地物を変位追跡点としたものである。したがって図4に示されるこれらの点のベクトルは誤差ベクトルとみなすことができる^{c6)}。

図5 変位追跡点の重量付き水平移動ベクトルと地すべりブロックの推定
(長野市広瀬地区 891005~891010)
[点線は移動ベクトルから推定した地すべりブロックの境界線]

B) 地すべりブロックの区分

地すべりブロックとは、地下に発生したすべり面上をほぼ一体化して滑動する土石の集団のことである。地すべりブロックの大きさは、地すべりの規模や破壊の進行の程度によってさまざまである。いま、ひとつの地すべりブロックの上いくつかの変位追跡点

C6) 図4において、樹上点(点番号47以上)の誤差ベクトルは他の諸点に比べてかなり大きい。誤差ベクトルに注目して地表点の精度の高いものから順位をつけると：コンクリート構造物の角(点3, 5, 16), 地表に放置された物体の角(点2, 4, 9, 17, 18, 19), 裸地と草地の境界部分(点6, 7, 11, 13, 18)となる。そして道路側溝の屈曲点(10)や水田の畦道の屈曲点(12)の精度は低い。

がある場合、平面図上で各点が示す移動ベクトルの間にはつぎの2つの特徴が見られるはずである。

- 1) 近接した変位追跡点の移動量はほぼ等しい。
- 2) 移動方向はいずれの変位追跡点もほぼ等しい。

この2点に注目して図4と図5について各点のベクトルを判読すると、次のような考察ができる。(図5の点線は同図の移動ベクトルから推定した地すべりブロックの境界線である。)

- ㉑ 地すべり地の頭部には、時計回りに回転するような形で、この地すべりの主動ブロックに追従する小さなブロックがある。点21, 22, 24, 25はこのブロックの上に存在する。点23と点26のベクトルは、この小ブロックの移動に若干の回転が伴うことを示している。
- ㉒ この地すべりの下方には、主動ブロックによって誘発されたとも考えられ中程度のブロックが存在する。点43, 44, 45, 46はこの中ブロックの頭部付近に位置する。また逆の見方として、この地すべりは最初に下方の中ブロックが動きだし、その影響で主動ブロックが活動を始めたとも考えることもできる。
- ㉓ 図5においてベクトルの表示されている変位追跡点の中で、上記の㉑と㉒で述べたもの以外の大部分の点は、この地すべりの主動ブロックの上に存在する。

C) 地すべりブロックの移動方向と移動速度

ひとつの変位追跡点の移動方向は、その点が図上で示すベクトルの方向であり、移動速度はベクトルの長さ(移動量)と観測期間(時間)との比である。

地すべりブロック上の多数の変位追跡点のベクトルに対しては、以下に示すような重み付き平均法でそのブロックの移動方向と移動量(速度)を求める。

変位追跡点[*i*]の移動方向角 ϕ_i を、式(7)の記号を用いて次式で求める：

$$\phi_i = \tan^{-1} (\Delta Y_i / \Delta X_i) \quad (29)$$

この点のベクトルの移動方向の平均二乗誤差 M_{CUVI} を式(2)で求め、移動方向角の重み p_{CUVI} を次式で求める：

$$p_{CUVI} = 1/M_{CUVI}^2 \quad (30)$$

これより当該ブロックの重み付き移動方向角 $[\phi]$ を次式で計算する：

$$[\phi] = \Sigma p_{CUVI} \cdot \phi_i / \Sigma p_{CUVI} \quad (31)$$

移動量(速度)は、点[*i*]の二次元移動量 S_{XYi} を式(9)で、その重み p_{SXYi} を式(26)で求めたのち、次式で当該ブロックの移動量 $[S_{XY}]$ を計算する：

$$[S_{XY}] = \Sigma p_{SXYi} \cdot S_{XYi} / \Sigma p_{SXYi} \quad (32)$$

5-4 鉛直投影面上における地すべり挙動の解析

地すべりの挙動を鉛直な投影面の上で解析する場合は、解析用の投影面を注目するひとつの地すべりブロックの移動方向と平行に置き、その面上に変位追跡点の移動軌跡を投影する。

いま、地すべりブロックの移動方向角 ϕ が式(31)で与えられているとき、XY座標系の原点を通り、X軸から右回りに測った角が ϕ となるように、投影面の水平軸(P軸)の正の方向を定める。

ここで変位追跡点[*i*]のXY座標値を X_i , Y_i とすると、この点のP軸上の座標値 P_i は次式で与えられる：

$$P_i = \cos \phi \cdot X_i + \sin \phi \cdot Y_i \quad (33)$$

この変換で座標値 X_i , Y_i の平均二乗誤差 m_{Xi} , m_{Yi} は P_i に伝播する。 P_i の誤差 m_{Pi} は次式で与えられる：

$$m_{Pi}^2 = \cos^2 \phi \cdot m_{Xi}^2 + \sin^2 \phi \cdot m_{Yi}^2 \quad (34)$$

水平にP軸、鉛直にH軸をとったPH投影面の上における変位追跡点の移動ベクトルに生ずる誤差の問題に関しては、座標値： $P_i \pm m_{Pi}$, $H_i \pm m_{Hi}$ を用いて5-2に示したものと同様な手法を適用できる。よってここではその解析に関する記述を省略する。

図6に鉛直投影面上における解析の一例を示す。投影面の方向角は： $\phi = 80^\circ$ とした。この図に示した変位追跡点は、前節で座標値の重みを考慮して解析した際に明確な移動の認められた点(図5でベクトルの表示されている点)のみである。図示のベクトルは各測点のP, H座標の平均値を用いて定めたものである。

図6において左端はほぼ地すべり地の頭部、右端はほぼ脚部である。すなわち、点21, 22, 24等は地すべり地の頭部、点32, 33, 34等は中部、点51, 52等は脚部の付近に位置する変位追跡点である。特に点51と52は樹上点であるから、そのベクトルで地表の動きを推定するためには、点の位置(標高H)を樹高(約15m)に相当する分だけ下方に移して観察する必要がある。

各変位追跡点のベクトルの傾きを図の左から右へ順次にたどってみる(40番台の点は除く)。全体的な傾向として、左端では急な右下がりを示したベクトルの傾きが徐々に緩くなり、右端に至ると右上りに転じていることが分かる。このことは、これらの変位追跡点を載せた地すべり土塊がほぼ一体化して回転運動をしていることを意味する⁴⁾⁵⁾。このようなベクトルの軌跡を

図6 地すべり地内の変位追跡点の投影断面図上の移動ベクトル [投影面方向角=80°]
(長野市広瀬地区 891005~891010) [図5で移動が明確な点のみを表示]

図7 投影断面図 [投影面方向角=80°] 上における座標誤差を考慮した変位追跡点の移動ベクトル
[実線は座標平均値から求めたベクトル 点線と破線は座標誤差を考慮したベクトル]

解析して地下のすべり面の位置と形状を推定することができる。

つぎに図6の40番台の変位追跡点のベクトルの傾きを左側の点から順次右側へと観察すると、この一帯にも上記のような回転運動の存在を推定できる。ただし点46は地すべり地の末端部にあり、谷川に向かって滑

落しているため、ベクトルの勾配が急になっている。

このほかにも、ベクトルの勾配が点の位置とともに漸変していく傾向が、周辺と調和しない点がいくつかある。その原因としては：1) 投影面方向角が不適当であること、2) 変位追跡点が急斜面上にあり、そこに局部的な表層滑落が生じていること、等が考えられる。

また点52のベクトルの勾配が点51よりも緩やかなのは、樹木の傾動が原因となっている。

図7には図6に示した変位追跡点の中から若干の点を選んで(図の混雑を避けるため)P、H座標値の誤差を考慮した場合のベクトルを示した。実線、点線、破線の区別は図4の場合と同様である。図示の断面形状は点: $X=5000\text{m}$, $Y=-950\text{m}$ を通りX軸と 80° の方向線で切った地形断面図である。樹木は傾動の状況を概念的に示したものである。この図からつぎの考察ができる。

- ㉑ 水田のあぜ(21, 24, 25)や、斜面上であっても明瞭な物体(26, 32, 38, 39)の上に変位追跡点を設定した場合は精度がよい。
- ㉒ 雑草の隙間から目標物を確認するような草地(36)や荒地(43)に設けた変位追跡点の精度はよくない。
- ㉓ 雑草の植生の境界(44, 45)に変位追跡点を設定した場合は、水平位置、標高ともに精度が下がる。
- ㉔ 樹上点(51, 52)が示す移動ベクトルの誤差は、傾動する樹木(52)に対しては極めて大きくなる。

6. 総 括

地すべりが発生した場合、防災対策上直ちに必要とされる情報は、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。これらの情報を得る手段は測量のみであり、地形が複雑な場合⁹⁾とか現地立入が危険な場合⁸⁾にはその手法は空中写真測量に限られる。

本研究は、突発性の地すべりに対して、対空標識を用いずに写真測量を実施した場合、地すべりに関する情報がどのような精度で得られるかに注目して実験的な検討を試みたものである。研究を通じて知り得た事項を以下に要約する。

- ㉕ 撮影時点の異なる写真上で計測された地表目標点の三次元座標値の間に、測量誤差以上の差が認めら

れる場合、その点は移動していると判定できる。

- ㉖ 移動量の検出精度は、2つの撮影時点の時間間隔が長いほど向上する。しかし停止に近い地すべりに対しては意味がない。よって最初の写真撮影は一刻も早く実施することが大切なポイントである。
- ㉗ 撮影時点の異なる両写真上で共通する地物を確認し、変位追跡点を定めるためには、タイポイントの選点ブリックの手法を有効に利用できる。
- ㉘ 写真上に選定した変位追跡点の座標値には、点の移写、写真の標定、座標計測等による誤差が介入する。
- ㉙ 各変位追跡点の測定誤差から座標値の重みを求め、この重みを付けて移動ベクトルを算出すると、各点の移動の有無をかなり正確に判定することができる。
- ㉚ 移動ベクトルを平面図および投影断面図上に投影して、地すべり挙動の特性を判読することができる。

参 考 文 献

- 1) 吉澤孝和：防災プロジェクトへの測量技術の応用，応用測量論文集，1—1，pp. 21-28, 1990.
- 2) 吉澤孝和：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.
- 3) 土屋智・大村寛：斜面崩壊時刻の予測式とその力学的特長に関する考察，地すべり，25—2，pp. 2-8, 1988.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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. 27-33, 1968.
- 7) 吉澤・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.
- 8) 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.