

三次元地表変位測量データによる地中すべり面形状の推定例

古川 昭夫*
北爪 牧*

1. はじめに

地すべりが発生した場合、防止計画の立案に必要な情報として、(1)地すべりの運動状況、(2)地すべりの規模、の2点が不可欠である。

上記(2)の断面規模を把握するためには、通常調査ボーリングによる直接的手段が用いられる。しかし地すべり発生直後、あるいは滑動の激しい地すべり地内でボーリングをおこなうことは、作業上危険を伴うとともに技術的にも不可能となることがある。

筆者らはこのような地すべり地の一つで、吉澤孝和ら(1988他)が提案する地すべり地内における三次元地表変位測量データを用いたすべり面推定法により、すべり面の推定を試みた。吉澤らの提案のほか、Carterら(1985)も類似の推定方法を提案しているので、両者の解析原理の概要を紹介し実施例とその解釈について報告する。

本報告にあたり、新潟県糸魚川土木事務所から青抜地すべり地における測量成果を提供していただいた。ここに厚く御礼申し上げる次第です。

2. 三次元地表変位測量データによるすべり面の推定法

2-1 解析原理

吉澤らとCarterらでは解析上の仮定に若干の差があり、その差から吉澤らの方法を平行法、Carterらの方法を回転法と呼ぶ。解析上の仮定をまとめると以下の通りである。

- (1) 地すべり地には、全体を包括する主すべり面が一つ存在する。実際地中には多数のすべり面が発生するが、大局的な運動は主すべり面に支配される。
- (2) 地すべりブロックは、主すべり面上を集団的に移動する。ブロック内に生ずる変形は微小で、移動量に比べて無視できるものとする。
- (3) 地表の測点は、地すべり土塊の移動方向にとった断面図上において、
(平行法では)当該測点の鉛直下方ですべり面に接する接線と平行に移動する。
(回転法では)当該測点の移動ベクトルと直行する直線が、すべり面と交わる点ですべり面に接する接線と平行となるように移動する。

上記の仮定が成立するなら、地すべり運動方向に沿った主縦断面について考えると、図-1に示すように地すべり地内の地表の断面二次元移動ベクトルは、すべり面形状によって異なった断面分布を示す。逆にこの仮定が成立するなら、地すべり運動方向に沿った主縦断面上で、地表の二次元移動ベクトルを十分に密な間隔で知り得るなら、この移動ベクトルの分布からすべり面を推定することが可能である。

断面図上の地表の二次元移動ベクトルは、主測線に沿った観測点の三次元座標値を繰返し観測し、この三次元移動ベクトルの投影値として求めることができる。

* 明治コンサルタント(株)新潟支店

観測点の三次元座標値の観測は、測角・測距機能を備えたトータル・ステーション機器を用いて測量により求めることができる。三次元座標値の経時変化から解析をおこなうので、吉澤らは「四次元測量データ」の利用と呼んでいる。解析に必要な条件を整理すると、(1)地すべり地内に設置された複数の測点の三次元座標値が、2つの異なる時点において得られており、各測点の移動量は測量誤差を無視できる程度に十分に大きいものであること。(2)解析の対象となる投影断面図上において、すべり面の境界条件点（頭部、脚部、ボーリング等で確認されたすべり面の位置）が、2点以上与えられていること。(3)投影断面図上で与えられた2つの境界条件点のあいだには、移動量観測点が2つ以上存在すること。

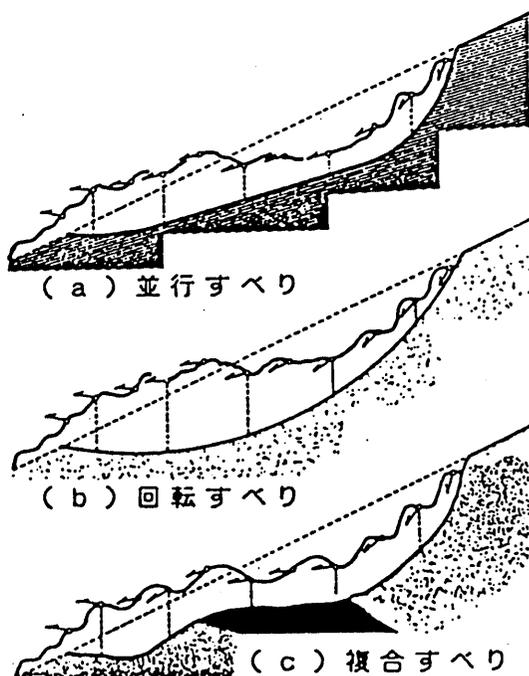


図-1 移動ベクトルとすべり面形態の関係
(吉澤原図)

2-2 解析手法

図-2に平行法と回転法の解析手法の違いを示す。解析は、(1)脚部（または頭部）の位置から、最寄りの測点の移動ベクトルに平行な接線を延長し、隣接測点との領域境界線との交点（p）を求める。(2)この交点の位置から先は、隣接測点の移動ベクトルと平行な直線を描き、さらにその次の領域境界線との交点（q）を求める。(3)この作業を繰り返して頭部（または脚部）に至るすべり面の形状を多角形で求める。

平行法と回転法の解析手法の差は、上記領域境界線の求め方の違いにある。平行法では隣接測点の中点を通る鉛直線を領域境界線とするのに対し、回転法では隣接測点のベクトルに各々垂線を描き、この垂線の交点を通る交角二等分線を領域境界線とする。

上記の手法で求めた多角形は、必ずしも結合境界点を通るとは限らず、結合誤差（E_b）を生ずる。この場合、結合誤差は出発点からの距離に比例するものと考え、この誤差を補正し結合点を通る多角形を求める。

以上で求めた多角形が、多角形近似の推定すべり面となる。なおこの多角形すべり面を、すべり面の形状により最小二乗法を用いて円弧、二次曲線、高次曲線近似で滑らかな曲線で近似する。

解析手順を整理すると以下の通りである。

- (1) データ準備……各測点の2回以上の観測時点における三次元測量データを用意する。
- (2) 平面移動ベクトル図の作成……平面図上に、全測点の位置と平面二次元移動ベクトルを表示する。
- (3) 投影面の決定……地表変状の発生位置と、平面移動ベクトル図を考慮して投影面の方向を決定する。
- (4) 座標値の変換……三次元座標値を、投影面上の二次元座標値に変換する。
- (5) 投影移動ベクトル図の作成……投影面上に、各測点の位置と移動ベクトルを表示する。
- (6) 領域境界線の決定……平行法および回転法の解析手順により領域境界線を決定する。

- (7) 境界条件の設定・表示……地表踏査により確認した頭部・脚部，ボーリング等で確認したすべり面位置を投影面上に表示する。
- (8) 出発境界条件の決定……境界条件の一つを出発点を選ぶ。
- (9) 仮定すべり面の連結……解析手法の原理に従い，移動ベクトルと平行な仮定すべり面を連結する。
- (10) 結合条件の検討……連結した仮定すべり面が，他の境界条件点を通過するかどうか確認する。

Yes…多角形近似解析終了

- (11) 結合誤差量の測定……仮定すべり面の終結点と，境界条件点の高さの誤差を求める。
- (12) 結合誤差の配分……結合誤差を，領域境界線の水平距離に比例して配分する。
- (13) すべり面の修正……領域境界線上で誤差補正したすべり面を作成する。

多角形近似解析終了

- (14) 曲線近似解析……すべり面の形状により，最小二乗法を用い円弧，二次曲線，高次曲線近似をおこなう。

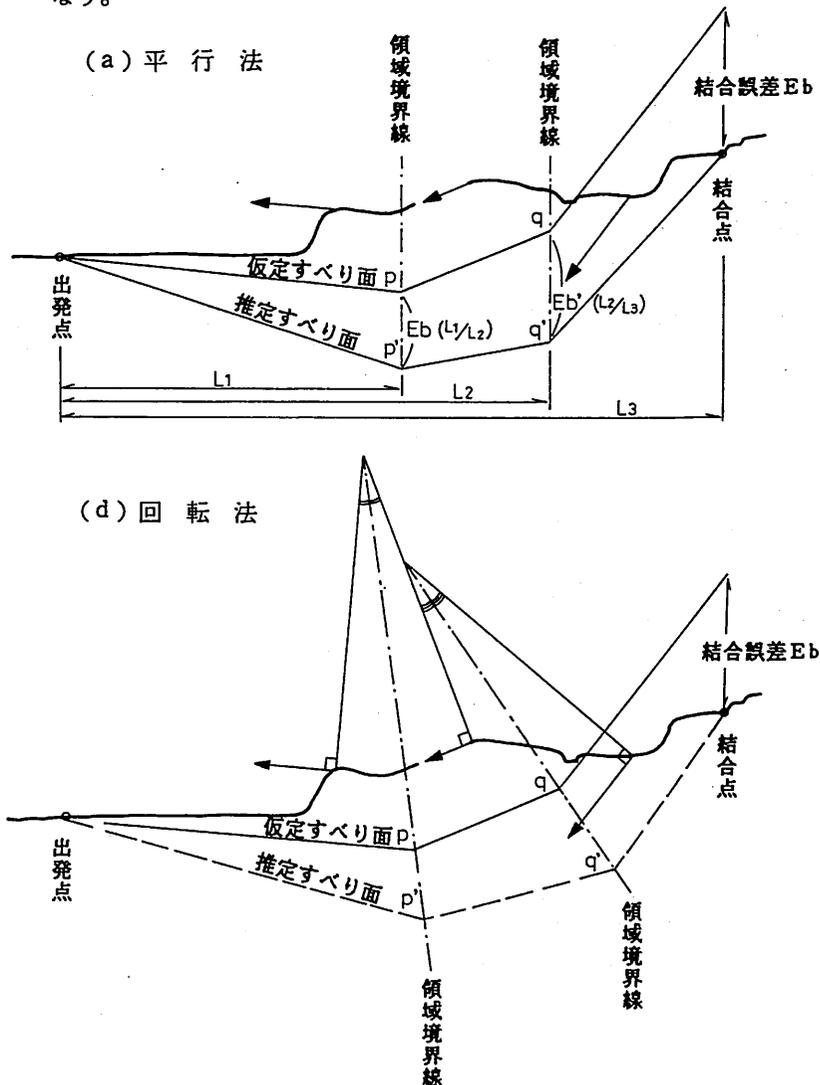


図-2 平行法と回転法の解析原理の違い

3. 試験地の概要

試験地は糸魚川市大字小流，背拔地すべり地内である。地すべりは斜面中腹部の平坦面を挟んで，上部ブロックと下部ブロックに区分される。試験対象斜面はこの下部ブロック斜面である。

当該斜面内では，機構調査のための調査ボーリングが過去2カ所で実施されたが，いずれも激しい地すべり滑動のため途中で掘削不能となっている。現在まで直接的な方法によるすべり面の確認がなされていない。

なお，地すべり滑動の動態を把握する目的で，1982年と1986年に対象斜面内に移動観測点（杭）が設置され，以後観測が続けられている。観測方法は，地すべり方向および地すべり横断方向に設けられた観測点（杭頭）の各々について，三次元座標値を年間2～4回測量する方法がとられている。地すべり横断方向に設置した4測線の過去3年間の移動状況を図-4，図-5に示す。観測結果によれば，過去3年間ほぼ同速度で滑動が継続しており，移動量は年間最大4mに達している。

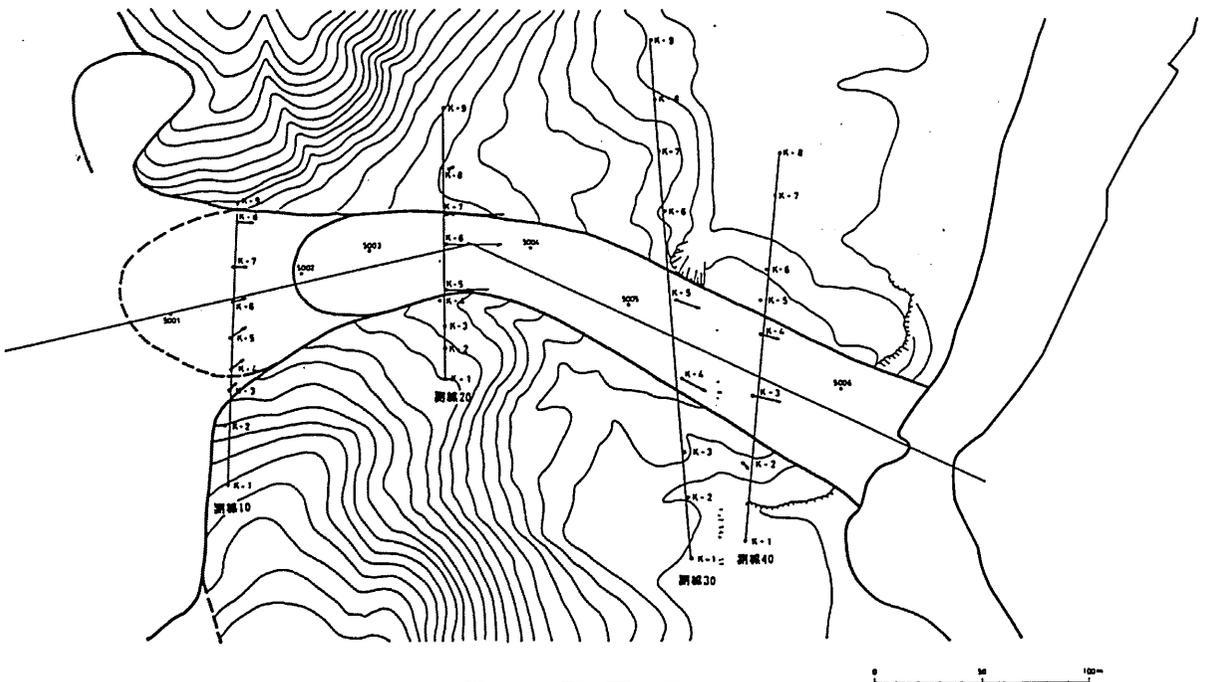


図-3 平面図

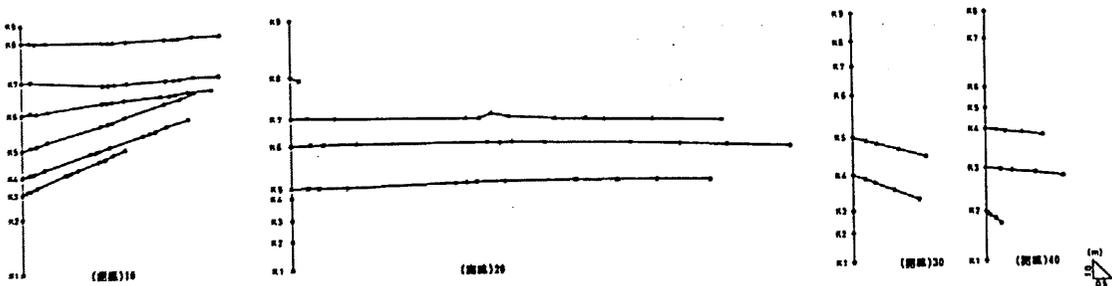


図-4 移動ベクトル軌跡図（平面二次元）

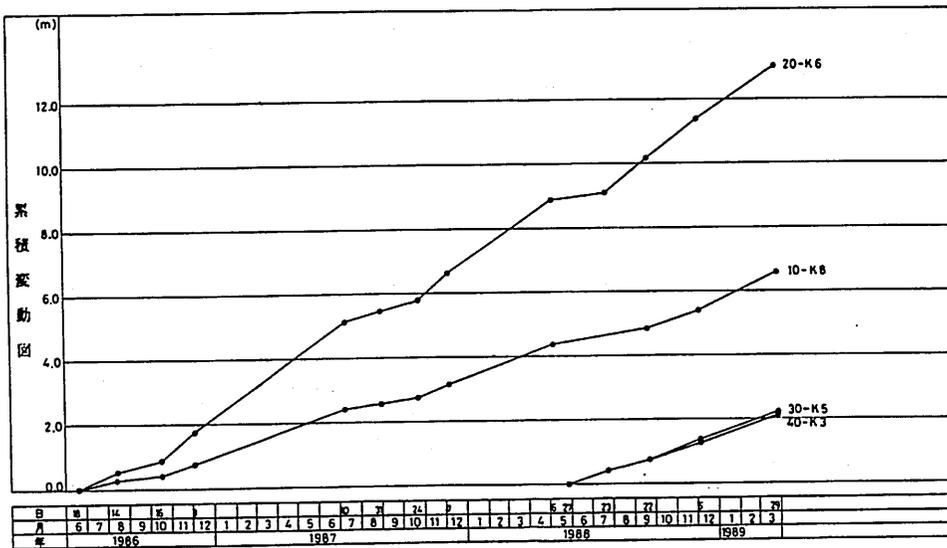


図-5 移動杭観測解析図

4. 測量データによるすべり面の推定

4-1 既設杭移動データによる推定

地すべり滑動の動態を把握する目的で1982年と1986年に設置された移動観測杭のデータを用い、平行法によりすべり面の推定をおこなった。観測値は国家座標系を基準に三次元座標値で表現されている。観測は結合トラバース・ネットワーク方式による地すべり地内での直接観測法を採用しており、観測誤差は4mm程度である。基準点は地すべり地対岸の不動地2ヶ所にコンクリートで固定されている。基準点は1年に1回建設省の基準標と照合している。既設移動杭データの中から移動量を算出する期間を変えた幾組かのデータについて、繰返し解析をおこなった。その中から地形・地質的な推定と近似する解析例を図-6に示す。観測データを表-1に示す。

これによると、地すべりブロックの頭部と推定される結合点での結合誤差は-4.55mである。最小二乗法による二次曲線近似も高い相関性を示す。

推定すべり面は深さ18~25m付近に連続し、傾斜角は末端部約120m区間でほぼ平坦な形状を呈し、これより斜面上部にかけて順次角度を増している。斜面中・上部付近の平均傾斜角は10°である。

4-2 新設杭移動データによる推定

既設杭は地すべり滑動の動態観測を目的に設置されているため、設置位置は必ずしも投影断面線(A-A')には沿っていない。そのため観測値を投影断面に変換する際の誤差が解析結果に影響していることが心配された。この懸念を解消する目的で1989年5月に投影断面線に沿って新たな観測杭を追加設置し、観測を開始した。測量の方法は既設杭と同様である。

新設杭の1989年9月観測値を用いて、同様に平行法によるすべり面の推定を試みた。観測値および解析図を表-2、図-7に示す。

これによると地すべり頭部と推定した結合点での結合誤差は-25.70mに達し、誤差補正前の仮定すべり面と誤差補正をおこなった多角形すべり面は大きく異なる結果となった。

誤差補正前の仮定すべり面は大局的にみると既設杭の観測データから推定したすべり面に近似した形状を示し、すべり面深度は18~30mと若干深くなる。

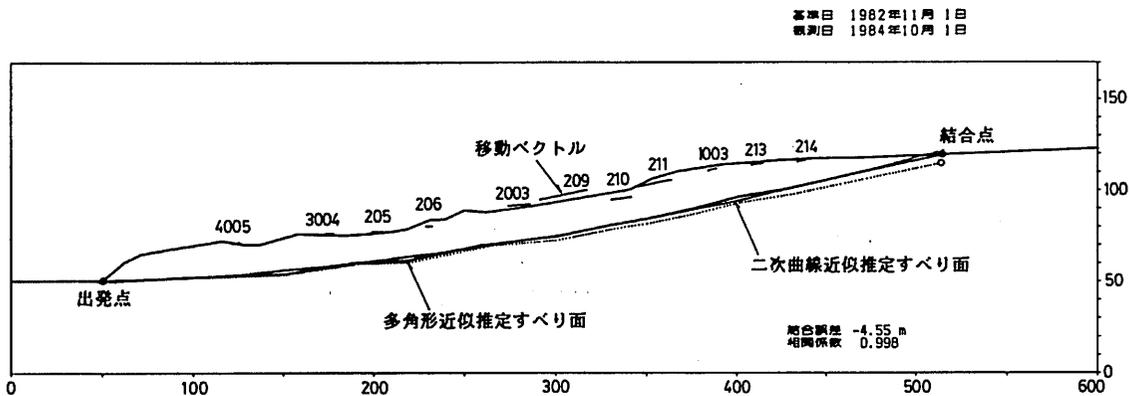


図-6 多角形解析図

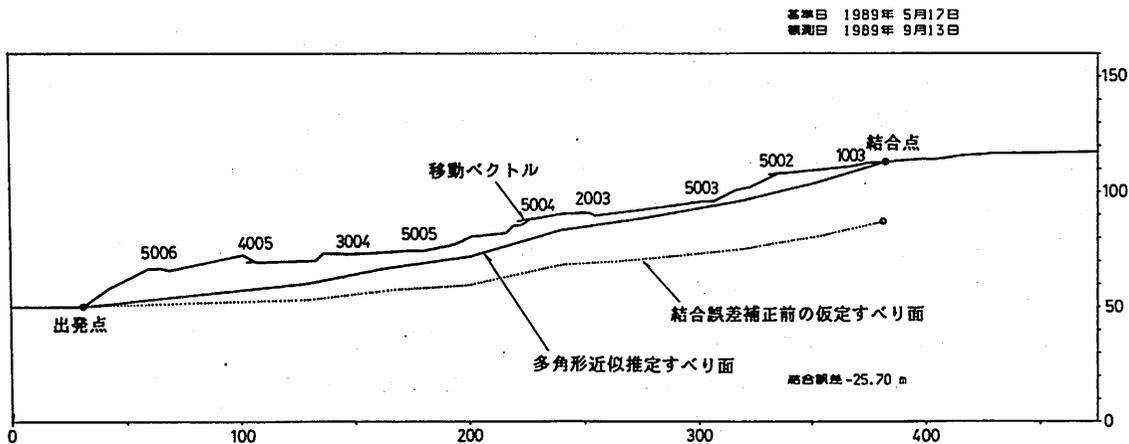


図-7 多角形解析図

表-1 既設杭の三次元測量記録

(m)

| 観測杭 | 1982年11月 1日 | | | 1984年10月 1日 | | |
|------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | X座標 | Y座標 | 標高 | X座標 | Y座標 | 標高 |
| 4005 | 67.971 | 5.945 | 73.601 | 67.541 | 7.999 | 73.546 |
| 3004 | 121.767 | 10.981 | 78.586 | 120.780 | 12.911 | 78.275 |
| 205 | 3.013 | 217.719 | 79.327 | 0.381 | 211.115 | 79.131 |
| 206 | 7.581 | 244.505 | 82.302 | 6.810 | 242.908 | 81.949 |
| 2003 | 63.662 | 10.087 | 94.130 | 63.372 | 23.123 | 92.754 |
| 209 | 10.386 | 328.519 | 101.819 | 17.031 | 299.350 | 95.574 |
| 210 | 14.084 | 334.259 | 97.961 | 18.021 | 322.313 | 95.965 |
| 211 | 10.442 | 378.525 | 107.715 | 15.010 | 357.051 | 103.109 |
| 1003 | 84.405 | 4.839 | 113.746 | 85.609 | 9.793 | 112.493 |
| 213 | 10.644 | 428.963 | 116.575 | 13.061 | 421.926 | 115.446 |
| 214 | 10.575 | 454.077 | 118.298 | 12.358 | 449.016 | 117.195 |

表-2 新設杭の三次元測量記録

(m)

| 観測杭 | 1889年 5月17日 | | | 1989年 9月13日 | | |
|------|-------------|---------|--------|-------------|---------|--------|
| | X座標 | Y座標 | 標高 | X座標 | Y座標 | 標高 |
| 5006 | 96.388 | -88.277 | 18.569 | 96.064 | -87.850 | 18.552 |
| 4005 | 93.388 | -29.238 | 23.546 | 93.258 | -28.617 | 23.530 |
| 3004 | 1.209 | -62.627 | 26.936 | 0.904 | -62.046 | 26.855 |
| 5005 | 36.156 | -87.910 | 27.478 | 35.950 | -87.513 | 27.449 |
| 5004 | 62.705 | -33.179 | 40.045 | 62.512 | -32.410 | 39.871 |
| 2003 | 64.324 | -59.947 | 42.754 | 64.239 | -58.777 | 42.669 |
| 5003 | 60.921 | -8.417 | 47.797 | 61.057 | -7.640 | 47.716 |
| 5002 | 50.176 | -40.355 | 58.828 | 50.210 | -39.852 | 58.746 |
| 1003 | 36.585 | -71.167 | 62.493 | 36.612 | -70.676 | 62.385 |
| 5001 | 30.992 | -0.969 | 66.323 | 31.027 | -0.757 | 66.319 |

5. 考 察

今年度対象斜面直上部の滑動の緩やかな地点で、不動岩を確認する調査ボーリングが実施された。孔内にはすべり面位置を特定し、滑動動態を記録する計器が設置された。

今後この計器観測の結果を待って、先の解析結果に対する総括的な検討をおこなうこととなるが、ここでは現時点の解釈と問題点について述べる。

測量データから推定したすべり面の形状は、大局的にみると地形的に推定される形状とよく対応する。対象地すべりの末端は河床堆積面に押し出していることが確認され、空中写真から推定した河床部への押し出し延長は約120~130mである。これは推定すべり面の末端がほぼ同様の延長で平坦な形状を示していることに対応する。

今年度実施されたボーリングによると、岩盤確認深度は30m付近であり、すべり面の可能性がある深度は25m付近と着岩部である。既設杭の観測結果から推定したすべり面深度は最大25mで、上記ボーリング結果の浅い位置に対応する。一方新設杭の値から推定した誤差補正前のすべり面は、ボーリング結果の深い位置に対応する。

解析に用いた観測記録が既設杭では1982年11月1日~1984年10月1日間の変動値であり、これに対して新設杭では1989年5月17日~1989年9月13日間の変動値を用いている。両者の解析結果に差がみられるのは、上記の期間ですべり面深度が拡大変化した結果と考えられる。

新設杭の測量データから推定したすべり面が、誤差補正の前後で大きく異なる点については、結合点として与えた境界条件が誤っていた可能性が大きい。解析に当たって結合点とした位置は、地表部のクラック発生位置である。このクラックが地すべり頭部を意味せず、実際の滑動がこれより上部の土塊と一体となっていた場合、解析結果のように誤差補正の前後ですべり面形状が大きく異なることとなる。

現時点では解析結果に幾つかの問題点が残るが、大局的なすべり面形状の把握という点では三次元測量データによるすべり面推定法が全体として有効性を持つと判断できる。特に紹介例のような、ボーリングによる調査が不可能な滑動中の斜面での活用価値は大きい。

なお解析に当たっては、測量誤差、観測点の配置、境界条件点の設定が解析精度に直接影響するため、これらの条件について十分な吟味が必要である。またこの方法が間接的手法であることを絶えず念頭におき、解析結果のみを過大評価することなく、地表踏査等による地形・地質情報と十分な照合をおこなって結論する必要がある。

参 考 文 献

- 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 vol.15, No 3, 1978
- M. Carter, S.P.Bentley：The Geometry of Slip Surfaces beneath Landslides：Predictions from Surface Measurements, CAN. GEOTECH. J.vol.22, 1985
- 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用いた円弧すべりの解析，地すべり vol.23, No 4, 1987
- 吉澤孝和：多角形法による地下すべり面の推定，地すべり vol.25, No 2, 1988