地表変位データを用いた三次元すべり面形状の推定

Estimation of three-dimensional sliding plane geometry using ground surface displacement data

宮澤 圭^{a)}, 谷口 淳^{b)}, 大上俊之^{c)*}, 豊田政史^{c)}, 竹内 均^{d)}, 吉澤孝和^{c)}

Kei MIYAZAWA, Atsushi TANIGUCHI, Toshiyuki OHKAMI, Masashi TOYOTA, Hitoshi TAKEUCHI and Norikazu YOSHIKAWA

Abstract

A new approach named polyhedron method is proposed for estimating underground sliding plane geometry by analyzing only ground displacement vectors. The displacement vectors are calculated from three-dimensional positional data of ground points surveyed in the landslide area at different times, and a three-dimensional underground sliding plane geometry is estimated by the polyhedron which consists of triangular surfaces. The proposed method is applied to actual landslide areas of Shin-yasu landslide and Aidoji landslide in Nagano prefecture.

Key words : underground sliding plane geometry, ground displacement data, polyhedron model, least square method

和文要旨

地すべり地の地表諸点の三次元位置の変動を、時間差のある測量で求め、得られた変位データを解析してすべり面形状を推定する手法において、新たに多面体法を考案した。これは推定すべり面の三次元形状を複数の任意形状の三角形面で構成される多面体モデルで近似するものである。本稿では多面体法の解析手順を述べ、地すべりの活動が終息しつつある新安地すべりと、発生後もない相道寺地すべりにおいて取得した地表変位データを使用してすべり面を推定した結果を示す。

キーワード：すべり面形状，地表変位データ，多面体モデル，最小二乗法

1. はじめに

地すべり地の地表面の変状は時間差のある測量でとらえることができる。筆者らはこれまでに、地すべりの地表変位を用いて、すべり面の位置と形状を二次元的、三次元的に推定する解析手法を研究してきた。

これまでに報告した論文の中で、二次元解析^{1)~5)}は地すべりの主移動方向にとった投影断面図上ですべり面の形状を円弧、複合円弧、多角形、多項式曲線等で近似して推定するものである。解析にあたっては、解析用の断面方向のとり方と断面図上における地すべりの頭部や脚部の境界条件の設定等に関してある程度の試行錯誤が必要である。

二次元解析に関する海外の研究には筆者らの知る限りにおいてCarterらの論文⁶⁾がある。これはすべり面の形状を多角形で近似するもので、筆者らの多角形法²⁾もこれと類似の手法である。国内では羽田野ら⁷⁾が岩殿山地すべり地で、変位ベクトルから円弧すべりを図解的に推定している。また、藤沢ら⁸⁾は筆者らの研究をもとに、切土によって発生した地すべり地においてすべり面を推定している。

三次元解析^{5), 9)~13)}は、変位追跡点の三次元測量データを直接用い得ること、地すべり地内の頭部や側部の滑落崖、脚部隆起等の地表変状の発生位置をそのまま境界条件に採用できること等の利点がある。これまではすべり

面の三次元形状を多項式による曲面方程式で推定してきた。この「多項式曲面法」では複雑なすべり面に対しては地すべり地をいくつかのグループに分割し、グループごとに求めたすべり曲面を連結する、という手順が必要であった。いわゆる「複合多項式曲面法」^{5), 11)~13)}である。

本論文に示す手法は、筆者らが新たに開発した「多面体法」と呼ぶもので、すべり面の三次元形状を任意形状の三角形の集合体で構成される多面体を用いて推定する。この手法は複雑なすべり面に対してもグループ分割の必要はなく、すべてのデータを一括して処理することができるため、解析にあたっては複合多項式曲面法のような煩わしさはなく、手順も簡便である。

多面体法の適用例を、図-1に示す長野市新安地すべりと長野県池田町相道寺地すべりについて示す。

前者は地すべり発生から2年後に現地測量と解析を行った「遅延対応型」の適用例、後者は地すべり兆候の発生から約1カ月後に現地測量を行った「早期対応型」の適用例である。ここで、本論文では「早期対応型」と「遅延対応型」を次のように区分する。

早期対応型：段差・亀裂等の地表変状が顕著に発達しない早期に観測を開始して移動ベクトルをとらえるもの。

遅延対応型：地すべりが進行し、副次すべり等の発生で局所的な変状もかなり進んだ後に観測を開始するもの。

両者を比較した場合、「早期対応型」は現地測量の能率性とすべり面の推定精度の確保の上で極めて優れており、早期に地すべりのメカニズムをとらえて対処することは、防災対策の費用対効果の面でも合理的な手法であると考えられる。

* 連絡著者／corresponding author

a) (株)長野技研

Naganogiken Co., Ltd

b) 国土交通省

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

c) 信州大学

Shinshu University

〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1

4-17-1, Wakasato, Nagano 380-8553

d) (株)日さく

Nissaku Co., Ltd.

図-1 検討した地すべり地の位置図

Fig. 1 Location of Shin-yasu and Aidoji landslide areas

2. すべり面推定の解析手法

2.1 解析上の仮定

多面体法によるすべり面推定の解析手法は、すべり面の全体形状が三次元空間上の多数の任意形状三角形で構成された多面体で表されるものと考え、次の仮定のもとに構築されている。

仮定1) 地すべり地内で相互の位置関係をほぼ一定に保ってすべり面上を変位する土塊内部の変形量は、変位量に比べて十分に小さい。

仮定2) 上記の仮定1)のもとで、すべり面上を変位する土塊に設置した測点の変位ベクトルは、その鉛直下方のすべり面形状と平行なものとなる。

2.2 3点を通る平面方程式

図-2において直交座標系 (x, y, z) 内の平面は、次の方程式で表される。

$$z = l \cdot x + m \cdot y + n \quad \cdots (1)$$

この平面が3点 $a(x_a, y_a, z_a)$, $b(x_b, y_b, z_b)$, $c(x_c, y_c, z_c)$ を通る場合、上式のパラメータ l, m, n は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} l &= \left[\frac{-(y_c - y_b)}{E} \quad \frac{-(y_a - y_c)}{E} \quad \frac{-(y_b - y_a)}{E} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \\ m &= \left[\frac{(x_c - x_b)}{E} \quad \frac{(x_a - x_c)}{E} \quad \frac{(x_b - x_a)}{E} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \\ n &= \left[\frac{(y_c - y_b)x_a - (x_c - x_b)y_a + E}{E} \quad \frac{(y_a - y_c)x_a - (x_a - x_c)y_a}{E} \right. \\ &\quad \left. \frac{(y_b - y_a)x_a - (x_b - x_a)y_a}{E} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2)$$

ここに

$$E = (x_c - x_b)y_a + (x_a - x_c)y_b + (x_b - x_a)y_c \quad \cdots (3)$$

鉛直軸を共有する2つの座標系 (x, y, z) , (p, q, h) の間には、次式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} x &= p \cos \theta - q \sin \theta \\ y &= p \sin \theta + q \cos \theta \\ z &= h \end{aligned} \right\} \quad \cdots (4)$$

ここに、 θ は x 軸と p 軸のなす水平角である。

(1)式に(4)式を代入して、平面方程式を次のように (p, q, h) 座標系に変換する。

$$h = (l \cos \theta + m \sin \theta)p + (-l \sin \theta + m \cos \theta)q + n \quad \cdots (5)$$

この平面方程式の p - h 平面内での勾配 s は、(5)式を p で偏微分することにより求められる。

$$s = \frac{\partial h}{\partial p} = l \cos \theta + m \sin \theta \quad \cdots (6)$$

(6)式に(2)式を代入すると、

$$s = \left[\begin{aligned} &\frac{(x_c - x_b) \sin \theta - (y_c - y_b) \cos \theta}{E} \\ &\frac{(x_a - x_c) \sin \theta - (y_a - y_c) \cos \theta}{E} \\ &\frac{(x_b - x_a) \sin \theta - (y_b - y_a) \cos \theta}{E} \end{aligned} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \quad \cdots (7)$$

2.3 最小二乗法を用いた多面体頂点の高さの算出

図-2において、変位追跡点 $a'b'c'$ を頂点とする三角形形状の地表面 $[i]$ ($i = 1, 2, \dots, m$; m は地表面数) の変位方向 D_i の水平面上の投影を p_i 軸にとり、 x 軸と p_i 軸のなす水平角を θ_i とする。変位方向 D_i は地表面 $[i]$ を構成する変位追跡点 $a'b'c'$ の変位ベクトルについて、それらの移動方向の平均をとるものとする。

変位方向 D_i の p_i - h_i 平面内の勾配を S_i 、地表面 $[i]$ の直下にあるすべり面をあらわす三角形を $(abc)_i$ (各頂点の座標値: $a(x_a, y_a, z_a)$, $b(x_b, y_b, z_b)$, $c(x_c, y_c, z_c)$; x, y 座標値は既知) とすると、解析上の仮定より、 p_i - h_i 平面内において S_i と三角形 $(abc)_i$ の勾配が等しいとして、(7)式を用いることにより変位追跡点とすべり面の条件式が次のように得られる。

$$\begin{aligned} S_i &= s_i \\ &= \left[\begin{aligned} &\frac{(x_c - x_b) \sin \theta_i - (y_c - y_b) \cos \theta_i}{E_i} \\ &\frac{(x_a - x_c) \sin \theta_i - (y_a - y_c) \cos \theta_i}{E_i} \\ &\frac{(x_b - x_a) \sin \theta_i - (y_b - y_a) \cos \theta_i}{E_i} \end{aligned} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \cdots (8)$$

一方、すべり面を構成する三角形 $(abc)_k$ の頂点 $a_k(x_{ak}, y_{ak}, z_{ak})$ が、地すべり境界点 $[j]$ (x_{ak}, y_{ak}, z_j) ($j = 1, 2, \dots, n$; n は境界点数) であるとする、すべり面と境界点の高さが等しいことから、次の条件式が成り立つ。

$$z_j = z_{ak} \quad \cdots (9)$$

条件式(8), (9)をそれぞれ m 個, n 個作成し, これを解くことにより, 未知量である多面体の頂点の Z 座標 $\{z_1, z_2, \dots, z_l: l \text{は変位追跡点数} + \text{境界点数}\}$ を求めることが可能となる。しかし一般には, 条件式の数($m+n$)と未知量の数(l)は必ずしも一致しないこと, また変位追跡点と境界点の座標値, 及び解析上の仮定に起因する誤差を処理する必要があるため, 最小二乗法を用いて未知量を求める。

式(8), (9)に生じる残差 v は, 次のとおりである。

$$v_i = \left[\begin{array}{c} \frac{(x_{ci} - x_{bi})\sin\theta_i - (y_{ci} - y_{bi})\cos\theta_i}{E_i} \\ \frac{(x_{ai} - x_{ci})\sin\theta_i - (y_{ai} - y_{ci})\cos\theta_i}{E_i} \\ \frac{(x_{bi} - x_{ai})\sin\theta_i - (y_{bi} - y_{ai})\cos\theta_i}{E_i} \end{array} \right] \begin{bmatrix} z_{ai} \\ z_{bi} \\ z_{ci} \end{bmatrix} - S_i \quad \dots\dots (10)$$

$$v_j = z_{ak} - z_j \quad \dots\dots (11)$$

すべての残差式は次の形にまとめることができる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{Z} - \mathbf{S} \quad \dots\dots (12)$$

ここに, $\mathbf{V}$ は残差ベクトル, $\mathbf{P}$ と $\mathbf{S}$ は定数項を示す行列及びベクトル, $\mathbf{Z}$ は未知量ベクトルである。最小二乗法の正規方程式は, $\mathbf{P}$, $\mathbf{Z}$, $\mathbf{S}$ 及び重み $\mathbf{W}$ (対角行列)を用いて次のようになる。

$$\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} (\mathbf{P} \cdot \mathbf{Z} - \mathbf{S}) = 0 \quad \dots\dots (13)$$

ここに $\mathbf{P}^T$ は $\mathbf{P}$ の転置行列である。なお, 重みを考慮しない場合, $\mathbf{W}$ は単位行列となる。これを解いて未知量ベクトル $\mathbf{Z}$ を求める。

2.4 滑落崖ベクトルの導入

地すべりの境界を示す滑落崖の露頭面の傾斜を, そこを滑落した土塊の変位ベクトルとみなすことができる。これを「滑落崖ベクトル」と呼び, その方向を変位方向 D_i の計算に加える。滑落崖ベクトルを解析に加えることは新しい試みであるが, これはこれまでに提案してきた各種すべり面推定解析手法^{1)~4), 9)~13)}にも適用できる。

3. 新安地すべり地への適用

3.1 新安地すべりの概要

新安地区は, 長野盆地西縁の南浅川沿いの山中に位置する。地すべりは南浅川の右岸側斜面において2005年3月末頃の市道の変状の発生から始まり, 2006年3月~4月の融雪水による変動が顕著になり, 同年7月下旬の梅雨前線豪雨によってさらに地すべり活動が進行し, 亀裂・崩壊等の変状が拡大した。地すべりの規模は, 幅・延長とも約70m, すべり面深度は最大で15m程度である。この地すべりの移動土塊は風化泥岩を主体とし, すべり面は椅子型の形態をなしていることが既往調査で確認されている¹⁴⁾。

調査・測量を行った2008年11月~2009年5月の期間においては, 活発な動きは見られず, 終息傾向にあったものと考えられる。

図-3, 図-4は地すべり発生当初の現地の平面図及び断面図で, 調査ボーリングの位置や, 市道新安畑山線の復旧計画が示されている。平面図の滑落崖や亀裂は, 今回の調査で行った測量の結果である。

3.2 変位追跡点の測量

変位追跡点を木杭の他, 切株や伸縮計可動端・固定端に設置した。測量を行った時期は, 1回目の測量は積雪前の2008年11月の3日間, 2回目は融雪後の2009年4月

図-2 変位追跡点とすべり面の関係式（概念図）

Fig.2 Relationship between ground displacement vectors and sliding surface

図ー3 新安地すべり平面図及び変位ベクトル図 (長野県長野地方事務所提供資料に加筆)
Fig. 3 Displacement vectors of Shin-yasu landslide

図ー4 新安地すべり断面図 (図ー3 A-A) (長野県長野地方事務所提供に加筆)
Fig. 4 Cross section diagram of Shin-yasu landslide (A-A section in Fig. 3)

の3日間で、トータルステーションを用いて観測を行い、図-3に示すように変位ベクトルを得た。

3.3 変位追跡点以外の測量

地すべり境界点となる滑落崖や亀裂の三次元位置を測量している。滑落崖では露頭面の勾配を得るため、その上下を測った。第1回測量より後にB1～B5に亀裂が発生しており、第2回測量時にこの亀裂の位置を測った。

3.4 解析に使用する変位追跡点の選定

伸縮計固定端に設置したH4で2cm程度の変位が認められるため、測量誤差は2cm程度であると考えられる。新安地すべりについては、平面図上の変位量が5～10cmに対し2cm程度の誤差が見込まれ、変位量に対する誤差の比率が大きく、平面図上においても変位量や変位方向のバラツキが後述の相道寺地すべりに比べて多い。

図-5 変位追跡点の選定

Fig. 5 Adoption way of tracking points

現場の測量環境の厳しさに伴う誤差を考慮して、解析に用いる変位追跡点を次の手順により選定した。

- (1) 変位していないと判断した変位追跡点、測量作業のミスと判断した変位追跡点を除外する。
- (2) 図-5の変位追跡点Aを選定対象とする場合、A点の半径Rの中にある測点 $T_1 \sim T_n$ を抽出する。
- (3) 測点 $T_1 \sim T_n$ にA点の変位ベクトルを重ね、その先端と測点 $T_1 \sim T_n$ の変位ベクトルの先端との距離 $L_1 \sim L_n$ を求める。

図-6 新安地すべり解析用TINモデル

Fig. 6 TIN model for Shin-yasu landslide

図-7 新安地すべり解析条件①: ボーリングデータを用いない推定結果平面図 (等高線表示)

Fig. 7 Plane figure of sliding shape of Shin-yasu landslide under the analytical condition 1 (not using boring data)

(a) 縦断方向 (斜面傾斜方向) A - A 断面

(b) 縦断方向 (斜面傾斜方向) B - B 断面

(c) 横断方向 (斜面傾斜直角方向) 断面図

図-8 新安地すべり解析条件①: ボーリングデータを用いない推定結果断面図

Fig.8 Cross section diagram of sliding shape of Shin-yasu landslide under the analytical condition 1 (not using boring data)

- (4) $L_1 \sim L_n$ の平均値 L_M が基準値 S_1 より小さい場合, かつ L_M を A 点の変位量 D_A で割った値 L_M/D_A が基準値 S_2 より小さい場合, A 点を解析に採用する。
- (5) (2)～(4) をすべての変位追跡点に関して行う。

基準値 S_1 , S_2 は解析に使用する変位追跡点の数, 配置状況等を考慮して適宜に設定する。新安地すべりでは変位追跡点が40点程度となるように $R = 20\text{m}$, $S_1 = 0.1\text{m}$, $S_2 = 1.0$ に設定した。その結果, 設置した変位追跡点65点のうち42点のデータを採用した。

3.5 すべり面の推定

3.4で選定した変位追跡点(42点)は, 図-3に示す第1回測量より後に発生した亀裂より下側に設置したものである。よってここで推定するすべり面は, この亀裂を境界点として用い, 調査期間において変動した部分について推定する。図-3に示す最上段の滑落崖を含めた2005年3月以降に活動した全体のすべり面を推定するものではない。

上記の変位追跡点(42点)及び地すべり境界点(26点, このうち滑落崖ベクトルを有する8点, ボーリング調査地1点)の計68点について, 図-6のようにTINモデルを設定し, 次の2つの条件ですべり面の推定解析を行った。

解析条件①: ボーリング調査結果を用いない

解析条件②: BV19-4のボーリング調査結果をすべり面の既知深度として用いる

解析条件①の推定結果を図-7(平面図), 図-8(断面図)に示す。A-A, B-B, C-C断面に対して, 「地質

調査による推定すべり面」が報告されているので, 図-8にこれらと本手法による推定結果との比較を示す。これと本手法による推定結果を比較すると, 本手法は調査期間内での変動に対して適用したものであるため, 頭部(C-C断面位置より上方)では, 推定すべり面の形状は全く一致しないが, C-C断面位置より下方では, 本手法による推定すべり面は「地質調査による推定すべり面」に近づく。しかし, 本手法の方が深くなり, A-A断面では最大1.7m, B-B断面では最大2.5mの差が生じている。また「地質調査による推定すべり面」は, 直線的な形状(多角形)となっているが, 本手法による推定すべり面はB-B断面では円弧状となっている。

平面図の推定すべり面の等高線に着目すると, 平面図南側(上側)ではH60, H61を境に, 頭部側は等高線の間隔が狭く, 脚部側では間隔がほぼ一定で広がっており, 典型的な椅子型の断面形状になっていることが推測できる。

A-A断面において, 本手法による推定すべり面も椅子型に分類される形状となっているが, 頭部側の勾配が緩い。等高線では頭部中央部の勾配が, その両側に比べて緩くなっている。またC-C断面では推定すべり面が中央部で上に凸になっている。これは頭部中央部における変位追跡点が少ないことによる解析データ不足のためであると考えられる。図-6の解析モデルではこの部分の三角形の面積が大きい。

解析条件②の推定結果を図-9, 図-10に示す。解析

図-9 新安地すべり解析条件②: ボーリングデータBV19-4を用いた推定結果平面図(等高線表示)

Fig.9 Plane figure of sliding shape of Shin-yasu landslide under the analytical condition 2 (using the bore hole BV 19-4 data)

(a) 縦断方向 (斜面傾斜方向) A - A 断面

(b) 縦断方向 (斜面傾斜方向) B - B 断面

(c) 横断方向 (斜面傾斜直角方向) 断面図

図-10 新安地すべり解析条件②: ボーリングデータBV19-4を用いた推定結果断面図

Fig. 10 Cross section diagram of sliding shape of Shin-yasu landslide under the analytical condition 2 (using the bore hole BV 19-4 data)

図-11 相道寺地すべり平面図及び変位ベクトル図 (長野県犀川砂防事務所提供資料に加筆)

Fig. 11 Displacement vectors of Aidoji landslide

図-12 相道寺地すべり断面図 (図-11A-A) (長野県犀川砂防事務所提供)

Fig. 12 Cross section diagram of Aidoji landslide (A-A section in Fig. 11)

図-13 相道寺地すべり解析用TINモデル

Fig. 13 TIN model for Aidoji landslide

結果①に類似した結果となった。B-B断面で推定すべり面が解析結果①に比べて数センチ深くなった程度で、A-A断面ではほとんど変化がなかった。平面図で比較すると、解析条件②の方がH13, H16, H17周辺で等高線が1m程度深くなっている。

本手法による推定すべり面が、「地質調査による推定すべり面」と比較して脚部で深くなった要因としては、地質調査を行った時期に比べ、今回の調査した時期は、地すべりが進行し、末端部押出しの位置が南浅川（北西側）の方へ移動したため、脚部の境界点の位置を地質調査当初より低い位置に設定したことによるものと考えられる。

推定結果平面図 (図-9) によると、本解析法による推定すべり面では、H37とH61を結んだ線付近にすべり

図-14 相道寺地すべり解析条件①：ボーリングデータを用いない推定結果平面図（等高線表示）

Fig. 14 Plane figure of sliding shape of Aidoji landslide under the analytical condition 1 (not using boring data)

面の最深部があり, A-A・B-B測線より反時計回りに 51° 程度の角度差がある。A-A測線周辺から南側の測点は概ねこの方向に変位していることがわかる。これより北側の測点は概ねH30とH12を結んだ線の方角に変位している。この方向もA-A・B-B測線より反時計回りに 22° 程度の角度差がある。A-A・B-B測線は地すべり発生当初の全体すべりについて、数点の変位観測結果をもとに設定されたものであるが、本研究で解析対象とした斜面中腹より下方のすべりは変位方向がこれとは異なっている。これより今回の調査期間における地表の変位方向及びすべり面の推定結果は、全体すべりとは異なる副次的なすべりをとらえているものと考えられる。

4. 相道寺地すべり地への適用

4.1 相道寺地すべりの概要

相道寺地すべりは、長野県北西部の北安曇郡池田町相道寺地区の住宅地背後の斜面で2010年4月に発生した。4月21日に町道舗装の隆起や擁壁のクラックや傾倒等を確認、その後の調査で上方の斜面で亀裂等が確認された。応急対策工事（脚部の横孔ボーリング）が行われたが、5月23日・24日の降雨により大きく変位した。これに伴う追加の応急対策として脚部の押え盛土、上部の土砂の排除、頭部滑落崖上方での縦排水工が行われた。これによって、本稿執筆の段階（2010年12月）では活動がほぼ停止した状態となっており、対策本工事が行われている。現地の平面図及び断面図を図-11、図-12に示す。

4.2 変位追跡点の測量

変位追跡点の測量は、2010年5月17日・28日、6月1日・17日の合計4回トータルステーションを使用して行った。変位追跡点は木杭・測量ピンの他、既存測点・伸縮計可動端や伐採木の切株に設定した。また、G18, G36はボーリング点（それぞれBV-1, BV-2）の近隣に

設置した。

4.3 変位追跡点以外の測量

新安地すべりと同様に、滑落崖や亀裂の三次元位置を計測している。頭部滑落崖と南側の側方亀裂は5月17日の段階で確認できたが、北側の側方亀裂は大きな変位が起こった5月28日以降に明瞭に現れた。その他、道路舗装面に発生した亀裂を計測している。末端部は地表面の状況や樹木の傾きから判断してその位置を測ったが、押え盛土の設置後の作業となったため狭い範囲しか確認できなかった。

4.4 すべり面の推定

各変位追跡点の変位ベクトルを図-11に示す。この中で、5月17日に設置した点は5月28日の測量で50cm前後の大きな変位量を得ることができた。変位量が少ない点（G70～G76）は5月28日以降に設置したものであるが、変位追跡点全体を観測期間毎にみると各変位追跡点の変位量および変位方向はほぼ一致している。カゴ枠積下の土地の変位を確認するために設置したG9, G20等の変位量は1cm弱であることから、変位していないと判断した。これにより測量誤差は1cm程度と考えられる。

相道寺地すべりでは、新安地すべりに比べて変位量に対する測量誤差の比率が小さく、また変位量・変位方向のバラツキが少ないことから、単純化のため、変位追跡点データの選定（3.4の手順(2)～(4)）は行わないものとした。

変位していることを確認した変位追跡点（51点）及び地すべり境界点（41点、このうち滑落崖ベクトルを有する点10点、ボーリング調査地2点）の測量成果から、図-13に示すTINモデルを作成し、次の4つの条件で解析を行った。

解析条件①：ボーリング調査結果を用いない

解析条件②：BV-2のボーリング調査結果をすべり面の

図-15 相道寺地すべり解析条件①: ボーリングデータを用いない推定結果断面図

Fig. 15 Cross section diagram of sliding shape of Aidoji landslide under the analytical condition 1 (not using boring data)

図-16 相道寺地すべり解析条件③: ボーリングデータBV-1を用いた推定結果平面図 (等高線表示)

Fig. 16 Plane figure of sliding shape of Aidoji landslide under the analytical condition 3 (using the bore hole BV-1 data)

既知深度として用いる

解析条件③: BV-1のボーリング調査結果をすべり面の

既知深度として用いる

解析条件④: BV-1, BV-2の調査結果をすべり面の既知深度として用いる

解析条件①の推定結果を図-14 (平面図), 図-15 (断面図) に示す。各解析条件の共通した結果として, 道路から下側 (G70, G71, G72より西側) は, すべり面の勾配が上方より若干急になることから, 道路付近を脚部末端とする地すべり本体によって押し出された別のブロックであると判断する。

図-15(a)のA-A断面は, 図-12と同位置の断面図である。図-12の「地質調査による推定すべり面」を図-15(a)に示す。これと本手法によるA-A断面の本体ブロックの推定結果を比較すると, 頭部及び脚部の形状は類似した結果となった。G36下 (BV-2) では0.1mしか差がない。しかし中間部では差が増し, 最大1.0m, G18下 (BV-1) で0.9m程度の較差がある。

解析条件②は, 解析結果①に類似した結果となったため図示を省略する。これは解析条件①の推定結果が, BV-2のすべり面とほぼ一致するためである。

解析条件③の推定結果を図-16, 図-17に示す。推定すべり面は「地質調査による推定すべり面」とほぼ一致した結果となり, 較差は最大でも0.2mと大変小さくなった。解析条件④は解析条件③と類似した結果となったため図示を省略する。

相道寺地すべりでは, ボーリングデータを使用しなくても (解析条件①) かなり精度の高いすべり面の推定ができた。またBV-1のボーリング調査結果を用いた場合 (解析条件③) では, 1本のボーリングデータを解析に用いることで, 推定精度が向上することを実証できた。しかし解析条件②のように, ボーリングデータを使用して

も推定結果が使用しない場合とほとんど変わらないこともある。

推定結果平面図 (図-16) によると, 本解析法による推定すべり面では, G36とG25を結んだ線付近にすべり面の最深部があり, ボーリングを行ったA-A測線より反時計回りに9°程度の角度差がある。各変位追跡点は概ねこの方向に変位していることがわかる。

相道寺地すべりでは, 地すべり発生から10日後に情報を入手し, 現場に入ったのは応急対策工事が終わった発生から1ヶ月弱であった。地すべり発生後比較的早期のデータを得ることができ, その結果精度の良い推定結果が得られたものと考えられる。

情報入手前の3日間で, 伸縮計で5~7cm程度の変位量を記録していた。発生直後に情報を得ていれば, 応急対策工事に前に推定すべり面を提示することができた可能性が高い。

5. まとめ

地すべり地における地表変位測量データを解析して, すべり面の三次元形状を推定する手法として, 現地の状況に応じた種々の任意形状のすべり面を推定できる「多面体法」を新たに開発し, これを実際に発生した地すべりに適用してすべり面推定の精度を検証した。本研究を通じて得られた結論を以下に要約する。

- (1) すべり面の形状を地中TINモデルで近似する「多面体法」は, これまでに提案した三次元解析の「複合多項式曲面法」^{5), 11)~13)}に比べると解析上の理論も手順も簡明であり, 現場への早急な対応の上で実用的な手法である。
- (2) すべり面推定の三次元解析^{5), 9)~13)}は, 投影断面図上ですべり面形状を推定する二次元解析^{1)~8)}に比べて効率が良い。すなわちすべり面形状に関する地中等高線図の作成と共に, 任意方向の断面上でのすべり面の表示は容易

図-17 相道寺地すべり解析条件③: ボーリングデータBV-1を用いた推定結果断面図

Fig. 17 Cross section diagram of sliding shape of Aidoji landslide under the analytical condition 3 (using the bore hole BV-1 data)

であり、特に多面体法が簡便である。

(3) 現地の地形調査による「滑落崖ベクトル」の概念を新たに導入した。これを破壊現象の激しい滑落崖付近の変位ベクトルとして解析に加えると、推定精度の向上に寄与する。なお、滑落崖ベクトルはこれまでに公表してきたすべての解析手法にも導入できるものである。

(4) 地表変位ベクトルを用いたすべり面推定解析において、筆者らはこれまでに、解析上の仮定や境界条件の信頼度を考慮して、それぞれの変位追跡点や境界点のデータに重みを付けた最小二乗法によって推定精度の向上を試みている^{4), 9), 11)}。多面体法においても重みの導入が可能である。

(5) 現地ボーリングで確認されたすべり面の三次元位置を1点でも境界条件に加えると、本法によるすべり面形状は、これまでの慣用的な地形・地質調査による推定すべり面はかなり近くなる。特に変位追跡点密度の疎らな領域でのボーリングデータは効果的である。

(6) 多面体法は、これまでのすべり面推定手法に比べ、より多くの変位追跡点を一様な密度で設置することが、解析精度を向上させる上で肝要である。測量手法は現地条件に応じて選択する。

(7) これまでに提案してきた、地表変位追跡測量によるすべり面推定解析理論は「すべり面上を移動する地山の変形量は地山の移動量に比べて無視できるほど小さい」という大前提のもとに構築されている。本稿ではこの前提が成り立つ「早期対応型」と前提が危ぶまれる「遅延対応型」の事例を比較して、「早期対応型」の有効性を立証することができた。

今後の課題として、変位追跡点や境界点の信頼度を厳密に評価した、重み付き最小二乗法による多面体法を検討していきたい。これによって推定精度はかなり向上するものと考えられる。

また、筆者らはこれまでに各種の現場の条件に応じてトータルステーション測量と空中写真測量^{3), 7), 15)}で対応してきたが、今後はGPS測量^{8), 16), 17)}や3Dスキャナ測量¹⁸⁾による変位追跡法も検討していくことを考えている。

6. 謝辞

本研究の実施に際し、長野県長野地方事務所林務課(新安地すべり)及び長野県犀川砂防事務所(相道寺地すべり)には貴重な資料やデータを提供していただきました。また(株)北陽建設には相道寺地すべりにおいて対策工事施工中にもかかわらず、測量調査に協力していただきました。ここに記して厚く感謝いたします。

本研究の一部は、(財)日本建設情報総合センターより研究助成を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉澤孝和・細川容宏 (1987): 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, pp. 13-23.
- 2) 吉澤孝和 (1988): 多角形法による地下すべり面の推定 (地すべり地における四次元測量の利用法), 地すべり, Vol. 25, No. 2, pp. 9-17.
- 3) 吉澤孝和・西澤茂高・三澤敏雄・根岸六郎 (1991): 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, Vol. 30, No. 5, pp. 8-20.
- 4) 宮澤圭・吉澤孝和 (1998): 地下すべり面推定に用いる地表変位測量データの重みに関する考察, 応用測量論文集, Vol. 9, pp. 47-54.
- 5) 吉澤孝和 (2005): 図解測量学要論, (社)日本測量協会, pp. 392-409.
- 6) M. Carter and S. P. Bentley (1985): The Geometry of Slip Surface beneath Landslides: Predictions from Surface Measurements, CAN. GEOTECH. J. Vol. 22, pp. 234-238.
- 7) 羽田野誠一・関根清・鈴木隆介・高橋健一・石野浩一・柳林実・見里文之 (1974): 中央道岩殿山地すべりについて, 日本地理学会予稿集, Vol. 6, pp. 134-135.
- 8) 藤沢和範・小嶋伸一 (2009): 高精度地表面変位計測による迅速な切土地すべりの規模推定手法に関する調査, 国土技術政策総合研究所資料, Vol. 516, pp. 157-164.
- 9) 吉澤孝和・宮澤圭 (1992): 地下すべり面推定における三次元変位軌跡法の改良, 地すべり, Vol. 28, No. 4, pp. 6-14.
- 10) 吉澤孝和 (1995): 地すべり解析のための三次元地表変位測量と考察, 自然災害科学, Vol. 14, No. 1, pp. 13-29.
- 11) 宮澤圭・吉澤孝和 (1998): 地すべり地の空中写真測量データの重みを考慮した三次元地下すべり面形状の推定, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 37, No. 6, pp. 14-27.
- 12) 宮澤圭・吉澤孝和 (2000): 地すべり地の地表変位測量データを利用した三次元すべり面形状の推定, 土木学会論文集, No. 645/III-50, pp. 51-62.
- 13) 宮澤圭・吉澤孝和・小野塚良三・久松文男 (2000): 時間差空中写真測量による地すべり解析システム—八幡平澄川地すべり地の変位計測データを利用した地下すべり面の推定—, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 39, No. 1, pp. 39-47.
- 14) 長野県長野地方事務所 (2009): 平成20年度地すべり防止事業第8工事(調査等業務委託)報告書(長野市宇新安地内), pp. 1-83.
- 15) 吉澤孝和・酒井輝雄・宮野尾文男・根岸六郎・関貴幸 (1994): 空中写真による地下すべり面形状解析システム, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 33, No. 3, pp. 17-32.
- 16) 近藤仁志・M. E. Cannon・清水則一・中川浩二 (1996): GPSによる地表変位モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No. 546/VI-32, pp. 157-168.
- 17) 岡本修・安田明生・浪江宏宗 (1998): RTK-GPSの地すべり計測への適用に関する実験的研究, 応用測量論文集, Vol. 9, pp. 55-62.
- 18) 光岡操・高木方隆 (2003): レーザースキャナを用いた地すべり変位観測のための三次元モデリング, 日本写真測量学会平成15年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 51-54.

(原稿受付2011年1月18日, 原稿受理2011年11月18日)