

地上計測データによる地すべり面の推定

信州大学工学部 正会員 吉澤孝和 ○学生員 細川容宏

【はじめに】地すべり地における地下のすべり面の形状を地表に設けた測点の変位データを用いて推定する手法として、すでにすべり面形状を円弧（サイクロイドの近似）と仮定して解析する方法については一応の結論を得た。¹⁾

しかしながら、実際の地すべり地におけるすべり面の形状は、地すべり地の地質や地すべりの特性により円弧以外のもの（例えば任意折れ線形状や高次方程式）となる場合が多くある。本研究では、すべり面が円弧形状とはならないような地すべりの場合について、高次方程式で表現されるすべり面を仮定した場合の解析法を考究する。

【解析式および手法】本研究では、地すべり地内に設けられた複数測点の時系列三次元データを使用する。このデータがある鉛直平面に投影し、その軌跡を利用して投影面内における高次方程式すべり線を決定するものである。解析にあたり次の仮定を設ける。(1) 土塊ブロックは一体化したものであり地表の動きは地下すべり面上での動きに等しい。(2) 土塊は移動により破壊や変形を生じない。図1は先に述べた鉛直投影面の決定方法である。観測時点(t)における測点の空間位置を r_t ($t=1, 2, \dots$)として連続的な観測により測点 r の移動ベクトルが得られる。これを X - Y 平面に投影して最小二乗法により、この測点の移動を代表する直線 $Y=AX+B$ を求める。この直線の通る方向を測点 r の平均移動方向とし(X 軸との交角は $\theta = \tan^{-1} A$ であらわされる), 以下にこの移動ベクトルを用いた解析手順を示す。

(1) 図1で得られた移動ベクトルを有する測点のなかで方向特性の相関の高い測点群を一つのグループとする。これらの測点群を共通の一体化した移動ブロックであるとみなし、各測点の平均移動方向よりブロックの移動方向を決定する。以後この方向と平行な鉛直投影面上で解析を進めていく。

(2) 図2は、(1)で決定した各測点(r_{ij} $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$)の時系列移動ベクトルを共通ブロックの移動方向と平行な鉛直平面(PH面)に投影したものである。この面上でのすべり線の方程式を次式のようにあらわす。

$$\begin{aligned} H &= a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3 + \dots \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^K a_k P^k \end{aligned} \quad (1)$$

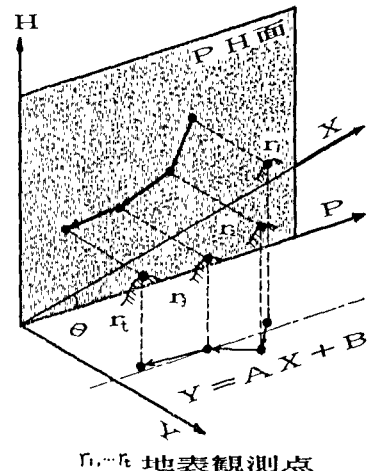


図1 平均移動方向へのベクトル投影

このすべり線と測点 r_{ij} との鉛直距離、つまりすべり面深度を h とすると図2よりこのすべり面の r_{ij} 直下の標高は($H_{ij}-h$)である。これを式(1)に代入すると

$$H_{ij} - h = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k P_{ij}^k \quad (2)$$

が得られる。しかし図2のように移動ベクトルの変動を考えると次式の残差が生じる。

$$v_{ij} = (H_{ij} - T_i) - (a_0 + \sum_{k=1}^K a_k p_{ij}^k) \quad (3)$$

各測点(i)各時点(j)における式(3)であらわされる残差の平方和を最小とするK次の曲線を求め、それを地表の移動特性で表現されるすべり曲線とみなす。このすべり曲線の係数および深度 T_i を決定するためには次式を解けばよい。

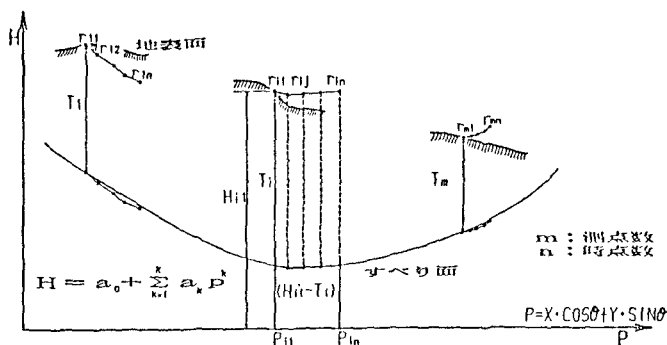


図2 PH面上での測点の変位と地下すべり面上への投影

$$\frac{\partial(\sum v_{ij}^2)}{\partial a_k} = 0 \quad (k=0,1,2,\dots,K), \quad \frac{\partial(\sum v_{ij}^2)}{\partial T_i} = 0 \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

しかし式(4)からわかるように a_0 と T_i は共に p_i に関して無次数の定数項となるため、式(4)を解いて得られる a_0 と T_i との間には次式の関係が生ずる。

$$T_i + a_0 = T_i' + a_0' \quad (T_i, a_0 \text{ は真の係数, } T_i', a_0' \text{ は式(4)を解いて得られる係数}) \quad (5)$$

つまり式(4)を解いて得られる解の定数項 a_0' , T_i' から真の a_0 , T_i を求めるには最低一測点のすべり面深度 T を境界条件として与えねばならない。いま全測点数を m , 時点数を N_i ($i=1,2,\dots,m$)とし測点1の深度 T_1 のみを既知としたとき K 次のすべり曲線方程式を得るための式(4)の解をマトリクスで表示したのが式6である。

式6 解析マトリクス(K 次一測点1深度既知= T_1)

$$\begin{bmatrix} \sum [p_i^{(K)}] & \sum [p_i^{(K-1)}] & \dots & \sum [p_i^{(1)}] & \sum p_i^0 & \dots & \sum p_i^0 \\ \sum [p_i^{(K-1)}] & \sum [p_i^{(K-2)}] & \dots & \sum [p_i^{(0)}] & \sum p_i^{(1)} & \dots & \sum p_i^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum [p_i^{(1)}] & \sum [p_i^{(0)}] & \dots & \sum p_i^{(K-1)} & \sum p_i^{(K-2)} & \dots & \sum p_i^{(K-2)} \\ \sum p_i^{(K)} & \sum p_i^{(K-1)} & \dots & \sum p_i^{(K-1)} & \sum p_i^{(K-2)} & \dots & \sum p_i^{(K-2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum p_i^{(1)} & \sum p_i^{(0)} & \dots & \sum p_i^{(K-1)} & \sum p_i^{(K-2)} & \dots & \sum p_i^{(K-2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_K \\ a_{K-1} \\ \vdots \\ a_1 \\ a_0 \\ T_1 \\ \vdots \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum [p_i^{(K)} h] - \sum p_i^{(K)} T_1 \\ \sum [p_i^{(K-1)} h] - \sum p_i^{(K-1)} T_1 \\ \vdots \\ \sum [p_i^{(1)} h] - \sum p_i^{(1)} T_1 \\ \sum h_i \\ \vdots \\ \sum h_m \end{bmatrix}$$

$$\sum [p] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij}$$

$$\sum p_2 = \sum_{i=1}^m p_{2i}$$

$$\sum N_i = \sum_{i=1}^m N_i$$

表1 奈良尾地すべり地計算すべり面深度(m)

測点No.	曲線次数				
	K=3	K=4	K=5	K=6	スプラインによる推定
グ ル ー プ I	2	27.23	27.23	27.23	27.23
	14	84.66	50.01	83.51	58.56
	17	44.93	45.40	45.52	45.33
	19	49.10	49.83	49.67	49.91
グ ル ー プ II	2	27.23	27.23	27.23	27.23
	3	25.91	7.98	-142	-104
	10	31.42	13.58	-146	-107
グ ル ー プ III	4	28.99	33.05	32.90	33.39
	5	64.49	64.49	64.49	64.49
	12	96.38	95.96	94.48	93.67

【計算例および考察】本手法の実際の地すべり地への応用例を示す。適用した地すべり地はボーリングによりすべり面が推定されている長野県奈良尾地すべり地である。本解析では移動特性により3つの共通ブロックを考え、それぞれについて方程式次数を3~6次とした。また、時期については地すべり発生1年後の昭和52年より36ヶ月間を考え、この期間で得られたベクトルからすべり面を推定した。表1はその結果である。この表より比較・考察できることは、すべり曲線の次数により計算されたすべり面深度がブロック内で一定であるか否かという点である。この点を含めた総合的考察は講演会において報告したい。

文献1) 吉澤孝和/細川容宏「地すべり地におけるすべり面形状の推定」土木学会中部支部研究発表要報集 1985.3