

趋势面分析在滑坡防治工程设计中的应用

陈江,高雪梅,韩文喜

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室,成都 610059)

**摘要:** 滑坡治理工程的设计主要依据滑坡面及滑体方量,滑坡的上表面一般很容易得到,而下表面则根据地形图中等高线来确定,但是要得到准确的滑坡面则相对较难,常用的方法是选择适当的个别点进行钻探,测得该点处滑坡厚度,再由此模拟滑坡面。以四川省古蔺县蔺双公路 K1+100 m 处滑坡的滑动面(带)为例,采用多元统计的趋势面分析方法将滑坡面模拟成空间的一个曲面,求出曲面后则可计算滑坡推力、设计相应的加固方法,还可以通过滑动曲面计算滑坡的总方量。

**关键词:** 滑坡;趋势面分析;预应力锚索桩

**中图分类号:** P642.2;TV73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2007)06-0118-04

Application of Trend Surface Analysis in Landslide

CHEN Jiang,GA O Xue-mei,HAN Wen-xi

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection,  
Chengdu University of Technology,Chengdu 610059,China)

**Abstract:** The design in landslide treatment is mainly based on the sliding surface and volume. Usually the upper landslide surface can gain easily, and the lower can gain by the contour in the topographic map. However, it is more difficult to get the accurate surface. The usual method is surveying the thickness of landslide by drilling several places, then simulating the landslide surface. This paper takes the slide surface analysis of landslide at K1+100 along Gulin-Lishuang highway in Sicuan Gulin county as an example, simulates the landslide surface to the spatial curving surface by the application of trend surface analysis of statistics, calculates the propulsion of landslide, designs the improvement method and calculates the total landslide volume according to the slide spatial curving surface.

**Key words:** landslide; trend surface analysis; prestressed anchor rope pile

1 工程概况

2002 年 5 月 16 日上午,四川省古蔺县古蔺镇蔺双路 K1+100 m 处受连续降雨影响头道河左岸产生滑坡,其前缘约几百方的块石土坠落在公路上,造成该段公路约 60 m 路基毁坏,直接危及公路改扩建工程施工和行车安全。滑坡纵轴斜长约 120 m,前缘宽约 70 m,后缘宽约 50 m。现滑体平均厚 12 m,估算体积 70 000 m<sup>3</sup>;滑体内产生了多条裂缝,其中北侧边缘裂缝宽平均 1.3 m,后缘裂缝宽 5 m,垂直落距 1.8~3.0 m。

由于滑坡治理工程的设计主要依据滑坡面及滑体方量,滑坡的上表面很容易得到,一般用等高线绘制的地形图,而要得到准确的滑坡面则相当难,常用的方法是选择适当的个别点进行钻探,测得该点处滑坡厚度,再由此模拟滑坡面。本文采用多元统计的趋势面分析方法将滑坡面模拟成空间的一个曲面,求出曲面后则可计算滑坡推力、设计相应的加固方法。还可以通过滑动曲面计算滑坡的总方量。

2 理论依据

2.1 简述

趋势分析是定量研究事物在大范围内(上)的变化规律,即研究事物的变化趋势以及事物在局部范围的特性。

趋势面分析是用一定的数学函数,对客观事物的某一特性或某种组合特征在空间的分布上进行研究,也就是用函数所代表的曲面去拟合或逼近所研究对象的空间分布。

滑坡面由于受力及位移特点,在空间上应当是一个相当规则的曲面,其拟合度相当高。

2.2 数学模型的建立

采用多项式函数所代表的曲面具有计算方便的特点,当次数增高时,可任意接近实测数据,且代表的曲面易于观察。在三维空间中, $X,Y$  代表地理坐标, $Z_i$  代表点 $(X_i,Y_i)$ 的实测值,现已在平面坐标 $(X_i,Y_i)(i=1,2,3,\dots,n)$ 的  $N$  个点处,测得  $N$  个观测值  $Z_i$ ,于是得到一组空间数据如下:

$X_1$	$Y_1$	$Z_1$
$X_2$	$Y_2$	$Z_2$
$X_3$	$Y_3$	$Z_3$
...	...	...
$X_n$	$Y_n$	$Z_n$

则空间平面的二元  $p$  次趋势模型为

$$Z=\beta_0+\beta_1X+\beta_2Y+\beta_3X^2+\dots+\beta_mY^p$$

式中:  $P$ ——多项式次数;  $m$ ——多项式的项数;  $\beta_0,\beta_1,\dots,\beta_m$ ——多项式待定系数。

\*收稿日期: 2006-12-15  
作者简介: 陈江(1980-),男,硕士研究生,主要从事岩土及工程地质研究。  
通信作者: 韩文喜(1964-),男,博士,南京水利研究院博士后,香港科技大学访问学者,主要从事岩土工程研究。

上式中, 只要  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$  确定, 则趋势面数学模型就能建立。为求  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ , 这里以二元一次趋势分析进行讨论, 其它的  $p$  次依次类推。

二元一次趋势方程

$Z_i = b_0 + b_1 X_i + b_2 Y_i$

二元一次正规方程组

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_i & \sum Y_i \\ \sum X_i & \sum X_i^2 & \sum X_i Y_i \\ \sum Y_i & \sum X_i Y_i & \sum Y_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Z_i \\ \sum Z_i X_i \\ \sum Z_i Y_i \end{bmatrix}$$

解出  $b_0, b_1, b_2$ , 得趋势方程:  $Z' = b_0 + b_1 X + b_2 Y$

二元二次趋势方程:

$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 X^2 + \beta_4 X Y + \beta_5 Y^2$

二元二次正规方程组的建立

令  $X = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & X_1^2 & X_1 Y_1 & Y_1^2 \\ 1 & X_2 & Y_2 & X_2^2 & X_2 Y_2 & Y_2^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_n & Y_n & X_n^2 & X_n Y_n & Y_n^2 \end{bmatrix}$

$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_5 \end{bmatrix}$

则  $X^T X \beta = X^T Z$

解此方程组可得到二次趋势面方程的 6 个系数。建立趋势方程后, 将  $N$  个测点坐标  $(X_i, Y_i)$  代入方程 二元二次趋势方程在空间是一张二次曲面, 而它的等值线在平面上则为二次曲线。

2.3 趋势面方程的显著性检验

对给定的一组空间数据  $(X_i, Y_i, Z_i) (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ , 当用该数据作趋势面拟合时, 不同次数的趋势面方程对原始数据的拟合程度是不一样的, 但共同的目标都是希望剩余平方和  $S_s = \sum_{i=1}^n (Z_i - Z'_i)^2$  越小越好。

记  $S_q = \sum_{i=1}^n (Z'_i - Z)^2$ ——趋势平方和(回归平方和)

则总离差平方和

$S_Z = \sum_{i=1}^n (Z_i - Z)^2 = S_q + S_s = U + Q$

拟合程度可用下式来检验

$c = \frac{S_q}{S_Z} \times 100\%$  一般地讲,  $c \geq 80\% \sim 85\%$  认为可以满足

实际要求。

亦可用统计检验方法

二元  $p$  次趋势方程

$Z' = b_0 + b_1 X + \dots + b_m Y^p$

统计量  $F = \frac{U/m}{Q(n-m-1)} \sim F(m, n-m-1)$

式中:  $m$ ——多项式项数;  $n$ ——样本组数。

给定水平  $\alpha$ , 相  $F$  分布表得到临界值  $F_\alpha(m, n-m-1)$ , 如果  $F > F_\alpha(m, n-m-1)$  时, 则认为趋势方程效果显著; 反之, 则认为该方程不能表示事物的变化趋势。

3 滑动面分析

3.1 数据采集

简双路 K1+ 100 m 处滑坡治理工程由贵州博晟岩土工程公司进行地质勘察(2003-03), 并由中科院-水利部成都山地灾害与环境研究所设计(2003-02)。根据他们的勘察资

料, 获得以下的资料。其中,  $(X_i, Y_i, Z_i)$  为钻孔位地表的坐标,  $(X_i, Y_i, Z'_i)$  为该钻孔位滑面处的坐标。

表 1 钻孔位坐标

编号	$X_i / m$	$Y_i / m$	$Z_i / m$	$Z'_i / m$	$\Delta h$
1	8.5	20.5	590.00	589.77	0.23
2	21.5	40.5	581.00	573.05	7.95
3	25.0	70.0	570.00	569.50	0.50
4	53.5	41.5	566.00	547.09	18.91
5	67.5	23.0	559.00	535.75	23.25
6	70.0	62.5	551.00	535.10	15.90
7	73.0	44.0	555.50	531.40	24.10
8	84.0	17.5	531.00	527.82	3.18
9	86.0	60.0	543.00	527.12	15.88
10	94.0	69.5	538.00	536.30	1.70
11	113.5	47.0	524.80	524.78	0.02

3.2 趋势面(滑面)的分析

钻孔位坐标如下图所示。

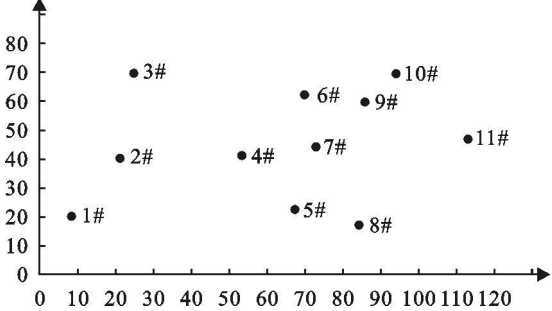


图 1 钻孔坐标图布置

表 2 11 个测点的趋势值和剩余值

编号	$X_i / m$	$Y_i / m$	$Z_i / m$	$Z'_i / m$	余 $m$
1	8.5	20.5	590.00	589.77	0.23
2	21.5	40.5	581.00	573.05	7.95
3	25.0	70.0	570.00	569.50	0.50
4	53.5	41.5	566.00	547.09	18.91
5	67.5	23.0	559.00	535.75	23.25
6	70.0	62.5	551.00	535.10	15.90
7	73.0	44.0	555.50	531.40	24.10
8	84.0	17.5	531.00	527.82	3.18
9	86.0	60.0	543.00	527.12	15.88
10	94.0	69.5	538.00	536.30	1.70
11	113.5	47.0	524.80	524.78	0.02

(1) 首先作二元一次趋势面分析

经计算有

$\sum X = 696.5 \quad \sum Y = 496 \quad \sum X^2 = 54977.25 \quad \sum Y^2 = 25999.5$   
 $\sum XY = 32652.25 \quad \sum Z = 497.68 \quad \sum XZ = 24646.69 \quad \sum YZ = 21817.21$

代入二元一次正规方程组, 有

$$\begin{bmatrix} n & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum YZ \end{bmatrix}$$

解得  $b_0 = 83.445 \quad b_1 = -0.637 \quad b_2 = 0.047$

故一次趋势方程为

$Z' = 83.445 - 0.637X + 0.047Y$

作显著性检验

$S_e = \sum (Z_i - Z')^2 = \sum Z_i^2 - (\sum Z_i)^2 / 11 = 4863.04$

$$S_s = Q = \sum (Z_i - Z'_i)^2 = 521.60$$
$$S_q = U = S_z - S_s = 4863.04 - 521.60 = 4341.44$$
$$F = \frac{U/m}{Q/(n-m-1)} = \frac{U/2}{Q/(11-2-1)} = 33.293 > F_{0.05/2}(2, 8) = 6.06$$

拟合度  $c = U/S_z = 4341.44/4863.04 = 89.3\%$

(2) 作二元二次趋势面分析

设  $Z' = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2$

将已知数据代入其正规方程组

$$X^T X \beta = X^T Z$$

可得

$$b_0 = 110.78; b_1 = -1.45; b_2 = -0.50; b_3 = 0.006; b_4 = 0.003; b_5 = 0.004$$

从而, 二次趋势面方程为

$$\hat{Z} = 110.78 - 1.45X - 0.5Y + 0.006X^2 + 0.003XY + 0.004Y^2$$

代入  $X_i$  与  $Y_i$ , 得到 11 个测点的趋势值和剩余值(见表 3)。

表 3 11 个测点的趋势值和剩余值

编号	$X_i/m$	$Y_i/m$	$Z_i/m$	$\hat{Z}_i/m$	余/m
1	8.5	20.5	89.77	91.03	-1.26
2	21.5	40.5	73.05	71.88	1.17
3	25.0	70.0	69.50	69.67	-0.17
4	53.5	41.5	47.09	43.67	3.42
5	67.5	23.0	35.75	35.47	0.28
6	70.0	62.5	35.10	37.19	-2.09
7	73.0	44.0	31.40	32.65	-1.25
8	84.0	17.5	27.82	27.84	-0.02
9	86.0	60.0	27.12	31.05	-3.93
10	94.0	69.5	36.30	32.63	3.67
11	113.5	47.0	24.78	24.60	0.18

作回归效果显著性分析, 求得:

$$F = \frac{U/S}{Q/(11-5-1)} = 97.03 > F_{0.05/2}(5, 5) = 7.15$$

可见回归效果显著。拟合度  $c = U/S_z = 99\%$  较高。

(3) 再作三次趋势面分析

通过电脑程序(Matlab)计算, 得  $F = 102.23 < F_{0.05/2}(9, 11-9-1) = 963.3$ ,  $c = 99.9\%$  拟合度虽高, 但  $F$  值较小, 回归效果不理想。

因四次及四次以上的趋势分析面分析系数项多于测点数, 则  $F$  为负值, 已失去分析的意义。

通过上述的分析, 二次回归的效果较好, 拟合度较高, 其趋势方程在空间为一张二次曲面, 这与实际的滑坡面形状相符合。趋势面分析的 Matlab 电脑程序运行结果的界面如图 2 所示。

4 滑坡治理

4.1 滑坡推力的计算

滑坡推力的计算方法在国内外并无统一规定, 因为滑坡类型多, 性质复杂, 多数根据对象作出能反映其主要特点的人为假定, 以基本上能取得正确的结果为主。

国内外普遍采用传递系数法, 即按平行滑动方向分段取代表性滑动断面, 求算每米宽的滑动推力。其两侧滑体因假定其滑速与之一致, 故对之无摩阻力作用。滑动面可以分为直线形、圆弧形和折线形, 为便于计算, 均简化为折线形。

本例中, 取  $Y = 40$ , 可得到平行于滑动方向上的一个滑面曲线(每间距 10 m 取一点, 再连线形成折线图)



图 2 Matlab 运行结果程序

$$z = 0.006X^2 - 1.33X + 97.18$$

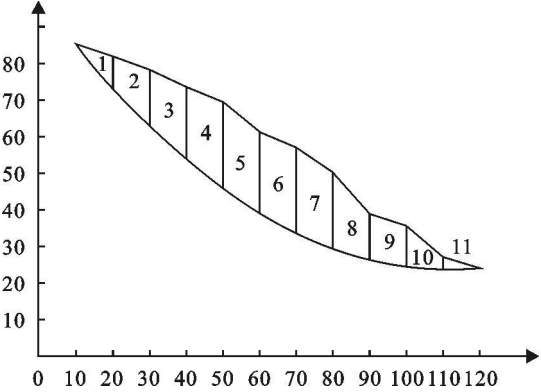


图 3 滑面折线

折线推力传递系数法计算公式如下所示, 简图如图 4:

$$E_i = \phi_i E_{i-1} + K T_i - R_i$$

式中:  $E_i$  ——第  $I$  条块的剩余下滑力(kN);  $T_i$  ——第  $I$  条块的下滑力,  $T_i = W_i \cdot \sin \alpha_i$ ;  $R_i$  ——第  $I$  条块的抗滑力,  $R_i = [W_i \cdot \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \varphi + c_i L_i$ ;  $\phi_i$  ——传递系数,  $\phi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi$ ;  $K$  ——设计安全系数。

详细的滑坡推力计算如下:

勘察报告中提供的重塑土、碎石砂质黏性土推荐值缺少试验数据, 按照类比法参考泸州地区相关工程勘察资料综合确定滑带土强度取内摩擦角  $\Phi = 18^\circ$ , 内聚力  $c = 20$  kPa 作为稳定系数和滑坡推力的计算参数。根据工程等级、滑坡规模并考虑地形地貌、地质结构等诸多因素, 滑坡设计安全系数取  $K = 1.25$ 。

表 4 滑坡推力计算( $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>)

$i$	$L_i$	$\alpha_i$	$A_i$	$W_i$	$\phi_i$	$T_i/kN$	$R_i/kN$	$E_i/kN$
1	15.24	49	48.2	964	0.90	727.54	510.29	399.13
2	14.36	46	121.7	2434	0.98	1750.87	843.36	1737.03
3	13.52	42	176.7	3534	0.97	2364.71	1163.10	3486.21
4	12.74	38	218.7	4374	0.97	2692.90	1453.74	5311.09
5	12.04	34	229.7	4594	0.97	2568.93	1598.67	6790.27
6	11.41	29	228.2	4564	0.97	2212.67	1717.50	7620.48
7	10.89	23	223.2	4464	0.96	1744.22	1811.76	7688.44
8	10.47	17	170.2	3404	0.96	995.23	1528.23	7101.01
9	10.18	11	123.7	2474	0.96	472.06	1233.86	6177.16
10	10.02	4	76.7	1534	0.95	107.01	942.22	5078.05
11	10.01	-3	17.6	352	0.95	-18.42	515.50	4300.60

4.2 滑坡整治措施

(1) 排水与防护工程。工程实践表明, 绝大多数滑坡均 是因受到雨水浸蚀和排水不良所引起的。为此, 必须作好排水工程, 当河水冲刷路基或山坡坡脚时, 还必须做好岸坡的防护工程。

(2) 支挡工程和其它措施。滑坡整治中, 还常采用抗滑支挡措施或其它方法来稳定滑坡。支挡工程中常用的有抗滑桩、抗滑挡墙等。其它方法中有滑体减重、加压和改善滑带土性质等。

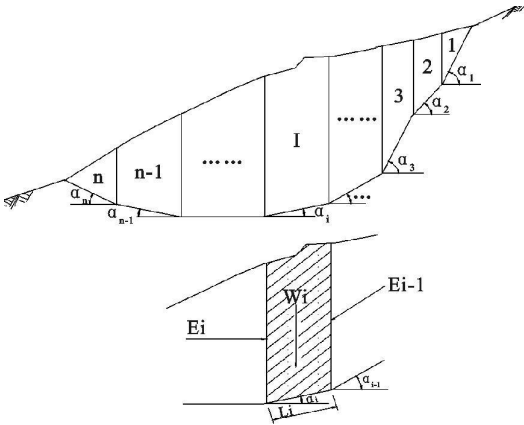


图 4 折线推力传递系数法计算简图

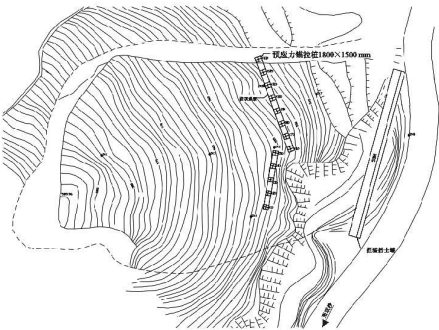


图 5 滑坡整治工程平面布置

本例中, 设计单位选择了预应力锚拉桩与重力式挡墙相结合的治理措施。抗滑桩与挡墙的平面布置见图 5。

5 相关问题的讨论

5.1 趋势面分析在滑坡工程中的适用范围

由于岩石的整体性及其破坏原理, 滑动面上岩石的破坏相当不规则。因此, 趋势面分析方法适用于土质滑坡, 如冲洪积土滑坡、人工弃土滑坡、堆积层滑坡、碎石土滑坡等。

5.2 趋势面分析方法的局限性

由于趋势面分析方法只是利用有限的点(数据), 进行近似的模拟。因此, 首先它是一种近似, 在大多数点位与实际相近而不相合, 不排除个别点相差很大的情况。再者, 控制点的分布与研究对象范围都会影响到分析结果, 如常见的趋势面形态畸变、正规方程组产生病态。最后, 趋势分析的拟合度还与研究对象的特点有很大关系, 有的研究对象趋势明显, 有的不明显, 还有的不存在趋势。

参考文献:

[1] 郭科, 等. 多元统计方法及其应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2003.

[2] 贵州博晟岩土工程公司. 四川省古蔺县蔺双公路 K1+100 滑坡工程地质勘察报告[R]. 2003.

[3] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 所古蔺镇蔺双公路 K1+100 滑坡调查报告[R]. 2002.

[4] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 蔺双公路 K1+100 滑坡治理工程施工图设计[Z]. 2003.

[5] 中国地质环境监测院. 长江三峡工程库区滑坡防治工程设计与施工技术规程[Z]. 2001.

(上接第 117 页)

用 Matlab 环境下的 RBF 网络方法对该地区的水资源承载力进行了综合评价, 评价结果客观、合理。该方法简单易行、可操作性强, 不仅能确定各区域水资源开发利用程度所属的等级, 而且具有较好的排序功能, 增加了评价结果的直观性。通过本文的实证分析, 该研究方法在水资源评价方面合理可行, 为各种水资源问题的综合评价提供了新的思路。

参考文献:

[1] Daniel P, Loucks, John S, et al. Sustainability criteria for water resources system[M]. London: Cambridge University Press, 1999: 124- 126.

[2] 陈守煜. 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J]. 中国工程学报, 2001, 3(2): 33- 38.

[3] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997(8): 73- 79.

[4] 贾嵘, 薛小杰, 等. 区域水资源开发利用程度综合评价

[J]. 中国农村水利水电, 1999(11): 22- 24.

[5] 门宝辉, 梁川, 刘庆华. 基于属性识别方法的区域水资源开发利用程度综合评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 28(6): 675- 678.

[6] 门宝辉, 梁川. 属性识别方法在水资源系统可持续发展程度综合评价中的应用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 28(6): 675- 678.

[7] Moody J, Darken C. Fast Learning in Networks of Locally-tuned Processing Units[J]. Neural Computation, 1989, 1: 281- 294.

[8] 闻新, 周露, 王丹力, 等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[9] “九五”国家重点科技攻关项目. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[R], 2000.

[10] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.