# 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析

#### 许 领,戴福初

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要:1976年泾阳南塬大面积提水灌溉以来,沿泾河右岸诱发了27处、50余起黄土层内滑坡,使得台塬面积 不断缩小、水土流失加剧。本文在对南塬黄土滑坡特征参数测量的基础上,对其进行了统计分析,主要包括滑 坡后壁陡坎高度、整体坡度、地裂缝发育情况以及滑距坡度等。分析表明: 滑坡后壁陡坎高度与马兰黄土厚 度一致,受黄土垂直节理控制;后壁总体坡度较大,是黄土滑坡演化的重要因素; 裂缝发育规模总体偏小,但 活动特征明显; 滑距坡度可作为研究区远程、短程滑坡划分的一种依据。同时,对滑距坡度在黄土滑坡滑距 预测及危险性区划中的应用前景进行了探讨。

关键词:黄土滑坡;滑坡后壁;地裂缝;滑距坡度;泾阳南塬 中图分类号: P642.22 文献标识码: A 文章编号:1000-3665 (2008) 05-0028-05

## 1 引言

-7

泾阳南塬位于陕西省泾阳县城南泾河右岸,是关 中盆地渭北黄土台塬的组成部分<sup>[1]</sup>。南塬横跨太平、 蒋刘、高庄3个行政乡,东西长达27.1km,塬区面积约 70km<sup>2</sup>,塬面开阔,高程420~490m<sup>[2]</sup>,微向西南倾伏。 受泾河的强烈侧蚀,台塬高差40~90m,坡度40~80°, 直接与泾河2级阶地相接。从塬边黄土出露来看,黄 土滑坡发生层位处发育有古土壤4~8层,其中第3层 古土壤厚度最大,约为0.7m,距塬面为25~30m,其余 各层古土壤出露厚度较小,为0.2~0.3m。图1为东 风滑坡附近一实测工程地质剖面。



图 1 实测黄土地层剖面

 Fig. 1
 Profile of the loess at South Jingyang Plateau

 1 —马兰黄土;2 —离石黄土;3 —古土壤

图 2 为研究区黄土滑坡分布图,由于局部地段滑 坡周界不明显,统计时,把连续的几个(亚滑坡群)归为 一处,但保留滑坡次数,因此,根据最新调查资料统计, 研究区共发生黄土滑坡 27 处,共 50 余起。

南塬黄土滑坡属于典型的黄土层内滑坡。雷祥义 较早开展了南塬黄土滑坡的研究,指出农业灌溉与黄 土滑坡的关系,认为南塬黄土滑坡为地下水位上升导 致黄土抗剪强度降低所致<sup>[2]</sup>。由于受测量条件的限 制,目前没有对南塬黄土滑坡的发育特征进行过系统 的测量、统计和分析,这使得一些观点缺乏数据支撑, 如很多文献认为滑坡后壁陡崖受黄土垂直节理控 制<sup>[3]</sup>,但是并未给出数据依据。本文在对南塬黄土滑 坡调查和特征测量的基础上,对黄土滑坡特征参数进 行了统计,包括滑坡后壁陡坎高度、整体坡度,裂缝发 育规律以及滑距坡度等。

#### 2 黄土滑坡参数统计分析

#### 2.1 后壁陡坎高度与马兰黄土厚度的关系

黄土滑坡后壁顶部多为一垂直陡坎,高度从几米 至 20m 不等,这一特征具有普遍性。南塬黄土滑坡后 壁顶部陡坎高度为 5~14m,平均 10m 左右。

黄土中节理发育<sup>[4]</sup>,尤以马兰黄土最为普遍。因此,黄土滑坡陡坎多认为为黄土垂直节理拉张破裂面。 在南塬黄土滑坡后壁不同层位取样发现,南塬黄土节 理主要发育于顶部马兰黄土层内,离石黄土层内节理 较少,且未见贯通性张性节理。因此,根据以上认识, 统计意义上陡坎高度应与马兰黄土厚度一致。现场对 马兰黄土厚度以及陡坎高度进行了测量,下面对其进

收稿日期:2007-10-26;修订日期:2008-01-24 基金项目:香港研究资助局(RCC+HKU7176/05E) 作者简介:许领(1982-),男,博士研究生,从事黄土滑坡机理与 防治研究。 E-mail:suyu820@163.com



图 2 泾阳南塬黄土滑坡灾害分布图 Fig. 2 Distribution of loess landslide at South Jingyang Plateau 1-滑坡点:2-灌渠:3-居民点:4-塬边陡崖

行分析。

对两个取自具有不同方差分布的数据集(样本数 可以不同),可用双样本异方差假设分析(异方差 t 检 验)来确定它们是否具有相同总体平均值。根据实测 数据,对滑坡后壁陡坎高度与马兰黄土厚度进行了异 方差 t 检验,结果如表 1 所示。" P(T < = t)单尾"为 单尾检验的显著水平,"t 单尾临界"是单尾检验 t 的 临界值;" P(T < = t)双尾"是双尾检验的显著水平,"t 双尾临界"是双尾检验 t 的临界值。因此,t 统计量均 小于两个临界值,所以,在 5%显著水平下,不能拒绝 两个总体均值相等的假设,因此,可以认为,研究区陡 坎高度与马兰黄土厚度一致,即滑坡后壁陡立部分受 马兰黄土垂直节理控制。

表1 异方差 r检验结果

Table 1         Results of heteroscedastic analysis		
	陡坎高度	马兰黄土厚度
平均	10.10478261	9.366667
方差	25.29513518	3.802424
假设平均差	0	—
df	31	—
t Stat	0. 62014351	—
P(T < = t) 単尾	0.269847819	—
t 单尾临界	1.695518742	—
P(T < = t) 双尾	0. 539695638	—
t 双尾临界	2.039513438	_

#### 2.2 滑坡后壁坡度及其对滑坡演化的意义

黄土滑坡一个典型特征就是具有高陡的后壁。图 3为南塬黄土滑坡后壁坡度统计直方图。由图中可 见,研究区滑坡后壁总体坡度平均为48.7°,最大值达 72.7°。因此,高陡的滑坡后壁往往再次发生滑坡,从 而形成了黄土滑坡的演化特征,滑坡演化是西北地区 黄土滑坡普遍特征之一。随着滑坡演化,黄土滑坡的 规模和危害性减小,塬边趋于稳定。由于统计数据多 为近期滑坡后壁坡度,考虑到黄土滑坡的演化性以及 后期崩塌堆积等因素,研究区滑坡后壁实际平均坡度 要大于上述值,约为50°,而早期滑坡多在60 以上。图 4 为蒋刘3期滑坡后壁照片,后壁依然较陡(509,该滑 坡的1期滑坡即为著名的蒋刘滑坡,发生于1984年12 月,压埋159间民房,造成20人死亡<sup>[5]</sup>。由图4亦可 见,蒋刘3期滑坡后壁已出现明显的裂缝,再次发生滑 坡的可能性极大。因此,该处滑坡活动趋势明显,仍在 继续演化发展中。







图 4 蒋刘三期滑坡后壁 Fig. 4 Backscarp of 3<sup>rd</sup> phase of Jiangliu landslide

滑坡高陡后壁成因机制是黄土滑坡研究的重要内容之一。南塬滑坡底部饱水,顶部干燥,剖面上黄土强度参数的变化以及黄土力学各向异性<sup>[6~7]</sup>对滑坡后壁形态的形成具有重要意义。因此,可作为今后滑坡后壁高陡成因机制研究的首选方向。

2.3 裂缝发育特征分析

研究区塬边裂缝发育。南塬 27.1km 的塬边发育 有 28 条裂缝,总延展长度为1 424m(裂缝延展长度为 裂缝两端点连线的直线距离)。裂缝近弧形展布,总体 平行塬边走向,贯通性较好。裂缝分布很不均匀,主要 集中于滑坡发育较强烈的地段,如太平镇寨头村以及 东风村等。图 5 为南塬裂缝特征统计直方图。由图 5 可见,裂缝距塬边距除一条为 18.7m 外,其余主要在 2 ~14m 不等,平均值为 8.1m;裂缝延展长度主要集中 在 10 ~ 70m 之间,仅有 3 条大于 70m,最长一条为 208m,平均为 50.9m。塬边裂缝多已张口(平均为 47.6cm),并发生垂直错动(平均为 48.0cm)。由图中 可见,研究区裂缝活动特征明显,滑坡形势依然严峻。



#### 图 5 泾阳塬边裂缝特征统计

 Fig. 5
 Statistics for the features of cracks developed at the edge of South Jingyang Plateau

 注:"裂缝垂直错距"为裂缝垂直错开高度;"距塬边最大距离"为裂缝上点到塬边最大距离;

 "裂缝张开宽度"为裂缝开口水平宽度;"裂缝延展长度"为裂缝两端点连线直线距离

裂缝一旦形成,滑坡可能的发育规模已初步确定。 假设滑坡方量等于裂缝延展长度 ×最大距塬边距 ×塬 边高差,因此,若取塬边高差为 70m、则滑坡平均方量 为 50.9m ×8.1m ×70m = 28 860.3m<sup>3</sup>,最大值为 208m × 18.7m ×70m = 272 272m<sup>3</sup>。而实际上,裂缝可能发展形 成的黄土滑坡方量要小于上述值。因此,按目前裂缝 发育水平来看,今后可能发生的滑坡规模还是比较小 的,也就是说,研究区黄土滑坡规模具有缩小的趋势。 同时,由于近年来研究区大规模黄土滑坡(100 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)时有发生,如 2003 年发生的东风滑坡(163 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>),因此,单从裂缝可能发展的黄土滑坡规模看, 并不能完全排除研究区发生大型黄土滑坡的可能性。

#### 2.4 滑距坡度统计及其应用

.7

1932 年 Heim 定义" 雪橇 "模型(sled model)<sup>[8]</sup>。假 设滑坡发生运动过程可以看作为质点运动,其中质心

水平滑动最大距离为 L<sub>max</sub>,最大垂直落距为 H<sub>max</sub>。滑体内摩擦角 φ,则滑动过程摩擦阻力做功为:

$$E_{\rm f} = \int_{0}^{L_{\rm max}} mg\cos \tan \phi \, \frac{\mathrm{d}x}{\cos}$$
$$= mgL_{\rm max} \tan \phi$$

重力势能做功为:

$$W_{\rm G} = mgH_{\rm max}$$

因此,据能量守恒原理有:

$$\tan \phi = H_{\max}/L_{\max}$$

根据上式,在已知道内摩擦角和 H<sub>max</sub>的情况下,L<sub>max</sub>可以预测。

实际上,严格按照"雪橇"模型存在如下不便:一是 对质心位置的判定具有很强的主观性;二是滑动过程 中摩擦机制并不清晰,并且不是唯一的。因此,1978 年美籍华人许靖华先生(Hsu K.J.)<sup>[9]</sup>对上式进行了改 进,主要将上式的比例关系定义为从点 P1 至 P2 的斜 率,相应的  $H_{max}$ 和  $L_{max}$ 也发生相应的改变,本文称之为 滑动参数,如图 6(a)所示。Hsu 的改进大大提高了"雪橇"模型在实际滑坡调查中的应用。在此, $\phi$ 并不是 真正的摩擦角,只是一种经验统计参数(相当于等效摩擦角<sup>[10]</sup>),称之为滑距坡度(angle of reach, travel distances angle 等)并广泛应用于滑坡滑距预测<sup>[10~11]</sup>。

滑距坡度有时也被用于滑坡是否发生滑动液化的判断<sup>[8]</sup>。当滑坡实测滑距坡度小于内摩擦角时,即说明 滑动过程中可能存在降低摩擦阻力的机制,如超孔隙 水压力的产生(液化)等。南塬流滑滑距坡度平均值为 11.8°,而饱和黄土内摩擦角约为 30 空右,因此,可以 辅助说明,该类型滑坡滑动过程中存在液化的可 能性。



# 图 6 南塬黄土滑坡滑距坡度统计



对泾阳南塬黄土滑坡(流滑和滑动两种类型)滑动 参数  $H_{max}$ 和  $L_{max}$ 进行实地测量,其统计关系如图 6(b) 所示。其中,y = 4.83x为 $L_{max}$ 与  $H_{max}$ 散点拟合直线,其 对应的滑距坡度为 12.03°,统计平均值为 11.87 °(标准 差为 1.9);y = 6.59x为流滑最大滑距边界;y = 1.42x为滑动滑坡的最小滑距边界;y = 3.61x(滑距坡度为 15 )基本可以作为流滑和滑动型滑坡分界线。根据 滑距边界,可确定流滑和滑动发生区(图 6(b))。根据 塬边裂缝发育情况以及地形地貌条件,可初步判断滑 坡类型,由于塬边高差已知,因此,根据流滑、滑动区域 边界 y = 6.59x,y = 3.61x和y = 1.42x 可初步确定黄 土滑坡滑距范围,从而进行滑坡危险性区划。并且可 利用 y = 4.83x对流滑滑距进行最佳预测。

#### 3 结论

.7

 (1)滑坡后壁陡坎高度与马兰黄土厚度一致,受黄 土垂直节理控制;后壁总体坡度较大,是黄土滑坡演化 的重要因素。

(2)裂缝发育规模总体偏小,但活动特征明显。

(3) 滑距坡度可作为研究区远程、短程滑坡划分的 一种标准,其统计意义上可能为黄土滑坡滑距预测及 危险性区划提供一种新的途径。

#### 参考文献:

- [1] 陕西地质矿产局.陕西省区域地质志[M].北京: 地质出版社,1989:546-556.
- [2] 雷祥义. 泾阳南塬黄土滑坡与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报,1994,3(1):56-64.
- [3] 赵尚学,李鸿琏.盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究[J].水土保持通报,1995,15(1):19-23.
- [4] 王景明,张骏.论黄土节理[J].长安大学学报:地球
   科学版,1985(2):33-44.
- [5] 王念秦,张倬元.黄土滑坡研究[M].兰州:兰州大学
   出版社,2005:1-7.
- [6] 刘奉银,吉嶺充俊,车爱兰,等.Q<sub>3</sub> 黄土力学各向异 性特性的初步试验研究[C]//中国岩石力学与工程 学会第七次学术大会论文集,2002:129-131.
- [7] 岳应利. 黄土高原西部黄土工程物理性质及其成因 [J]. 中国沙漠,2004,24(6):680-684.
- [8] Sassa K. Geotechnical Model for the Motion of Landslides [C]//Special Lecture of 5th International Symposium on Landslides, Landslides, 1988(1): 37 - 55.
- [9] Hsu KJ. Albert Heim 's observations on landslides and relevance to modern interpretations[M]. B Voight Editor,

Rockslide and Avalanches: 1. Natural Phenomena, Elsevier, Amsterdam, 1978: 71 - 93.

[10] Corominas J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996(33): 260 - 271.

[11] Fell R , Hunter G, Travel distances angle for rapid landslides in constructed and natural soil slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003 (40) :1123 - 1141.

# Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau

#### XU Ling, DAI Fu-chu

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract : The South Jingyang Plateau is located in Shaanxi Province, China. Groundwater level in the loess plateau has been significantly raised since 1976 when the loess cover began to be artificially irrigated; more than 50 landslide events at 27 sites have occurred, which exacerbated the water and soil erosion and reduced the plateau area badly. Field survey and measurement of landslide characteristics were conducted at the South Jingyang Plateau, and the topographic features of the loess landslides, such as backscarp, cracks and angle of reach, were then statistically analyzed. The following conclusions can be reached: the upper vertical part at landslide backscarp was controlled by the thickness of the Malan loess ( $Q_3$ ) and the steep backscarp was an important aspect for loess landslide in the study area; the angle of reach is a suitable parameter for differentiating long-runout and short-runout landslides in the study area and has some application potentials in landslide runout forecast and hazard zoning.

Key words: loess landslides; backscap; cracks; angle of reach; the South Jingyang Plateau

责任编辑:张明霞

## (上接第 27 页)

of fractures in the rockmass, the deformation mechanism is the "secondary toppling "mode. Using UDEC model, the paper make numerical analysis on the toppling mechanism of the rockmass. The simulation results show that the crack failure by secondary toppling is reduced from the face to the back. Toppling block is controlled by the soft layer, as a whole, the block doesn 't cross the soft layers, so it is impossible to topple as one-piece. When dangerous rockmass or rock piles are formed in secondary cliffs, there are two failure type toppling to the front and toppling to the back. The toppling direction is related with belowed soft layer 's failure seriously, when the toes of soft layer failure seriously the rockmass topples to the front, or the heel of soft layer failure seriously the rockmass, also it has important instruction to other dangerous rockmasses study in the Three Gorges Reservoir Region. **Key words** : Liaojiaping dangerous rockmass; UDEC model; secondary toppling mode; toppling direction

责任编辑:张明霞