

# 甘肃黑方台静态液化型黄土滑坡滑距预测模型

亓星<sup>1,2</sup>, 修德皓<sup>2</sup>, 彭大雷<sup>2</sup>, 巨袁臻<sup>2</sup>

(1. 四川理工学院土木工程学院, 自贡 643000; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:**黑方台位于中国甘肃省永靖县, 长年的农业灌溉使其台塬边发育了大量的黄土滑坡, 其中突出一类为静态液化型黄土滑坡, 具有运动距离远, 危害性大的特点。文章结合运用摄影测量技术与统计分析方法, 研究了静态液化型黄土滑坡的基本特征参数, 建立了滑坡体积、滑坡后退距离和堆积体平均宽度的关系。利用滑坡形成的泥流屈服应力获得了坡度与滑坡堆积体淤积厚度的关系。以滑坡后退距离和前缘坡体平均坡度两个简单参数建立了黑方台静态液化型黄土滑坡的滑距预测模型, 具有较好的适用性。

**关键词:**黑方台; 静态液化型; 黄土滑坡; 滑距; 预测模型

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

## 引言

滑坡是严重的自然灾害, 其危害范围与滑坡体的运动距离密切相关。目前大量学者建立了多种经验和推导公式用于滑距预测, 主要可分为经验及力学模型、统计回归模型以及数值模拟等。对于经验及力学模型, 学者们从能量守恒或者力学平衡的角度来建立滑距预测模型<sup>[1-3]</sup>; 对于统计回归模型, Zhan et al<sup>[4]</sup>、Guo et al<sup>[5]</sup>、王念秦等<sup>[6]</sup>分别建立了滑距预测的经验公式。近年来, 基于连续介质或非连续介质的数值模拟方法也大量运用到滑坡运动分析上<sup>[7-9]</sup>。对于我国黄土滑坡滑距预测, 目前也主要采用以上几类方法来进行<sup>[10]</sup>, 但目前还存在预测准确性和模型易用性不能同时兼顾的问题。现有的预测模型中, 基于能量守恒或者力学平衡得到的滑距公式即使忽略了很多次要条件, 仍然需要较多参数

才能确定滑距, 而对滑距影响较大的摩擦系数、滑坡体积等参数则很难准确获得; 基于统计分析建立的滑距模型主要以现有滑坡地形特征进行回归分析, 但有的黄土滑坡具有明显的渐进后退式特征, 如黑方台静态液化型黄土滑坡<sup>[11]</sup>, 现有滑坡的地形特征是经历了多次渐进后退后逐渐形成的, 回归模型并未考虑单次滑坡和多次滑坡的地形参数差异, 因此不能完全反映实际情况, 回归结果也可能产生较大偏差; 数值模拟需要基于准确的地形特征, 并通过实验获得土体的基本物理力学参数, 前期工作量较大, 并不适用于群发性滑坡滑距的快速估计。

黑方台位于我国西北黄土高原, 为灌溉诱发的黄土滑坡集中发育地区, 区域内静态液化型黄土滑坡占了黑方台黄土滑坡总数的41%, 是数量最多的滑坡<sup>[12]</sup>。这类滑坡具有明显的渐进后退式特征, 随着灌溉的长期进行, 研究区还将长期受到滑坡的影响, 而对这类静态液

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630640); 国家创新研究群体科学基金(41521002); 国家重点基础研究发展计划(2014CB744703)

作者简介: 亓星(1988-), 男, 汉族, 四川眉山人, 博士, 讲师, 主要从事地质工程方面的研究, (E-mail) qixing2009@163.com

化型黄土滑坡的滑距进行快速有效的预测对于减灾防灾来说尤为重要。

近年来基于遥感影像来直接获取地形数据的摄影测量技术,可以更精准地获取滑坡灾害影响范围。本文将摄影测量技术与统计分析方法结合运用,对滑坡特征进行统计分析,并基于泥流屈服应力特征,建立了静态液化型黄土滑坡的滑距预测模型,以较少的参数简单有效的预测滑坡的滑距,为这类群发性黄土滑坡滑距的初步估测提供参考。

### 1 黑方台黄土滑坡概况

#### 1.1 滑坡分布规律

黑方台位于黄河左岸与湟水河交会口上游,台塬为黄河IV级阶地,虎狼沟将整个台地切割为黑台和方台,如图1所示。黑方台地层岩性如图2所示,由上至下依次为:结构松散的 $Q_3$ 黄土,厚度26 m~48 m;相对致密的不透水粉质黏土, $Q_2$ 厚度3 m~19 m;砂卵石层厚1 m~6 m,具有良好的透水性;底部为砂质泥岩,岩层产状 $125^\circ\sim 220^\circ$ ,倾角 $8^\circ\sim 12^\circ$ 。

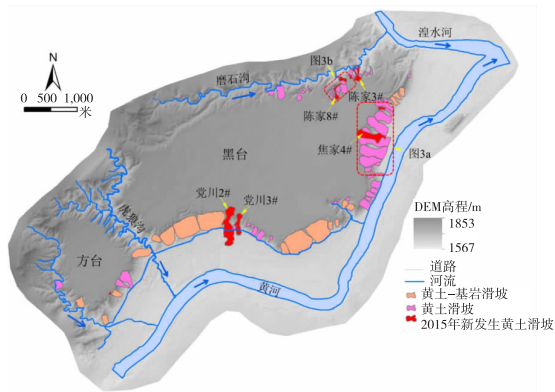


图1 黑方台滑坡分布规律

自19世纪60年代开始,黑方台台塬开始了长期的农业灌溉,大量地表水渗入黄土底部,富集在渗透性较低的粉质黏土层上方,逐渐在黄土底部形成地下水位,由台塬西侧向东侧排泄,从而导致黄土层内滑坡集中发育于台塬东侧,由于丰富的地下水参与,大量滑坡发生后呈泥流特征。

#### 1.2 滑坡堆积特征

黄土滑坡形成的泥流堆积特征如图3所示。从图3(a)可知黑方台静态液化型黄土滑坡滑动面位于黄土

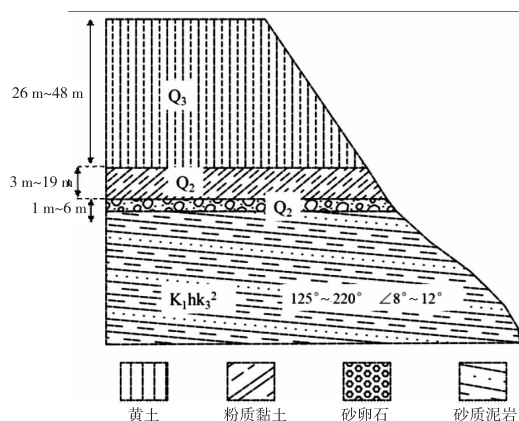


图2 黑方台地层剖面

内部,剪切出口位于黄土底部粉质黏土层上方,从平面上呈半圆形凹进台塬内。由从图3(b)可知滑坡形成的堆积体水平运动距离最大超过300 m,具有典型泥流的运动和堆积特征。

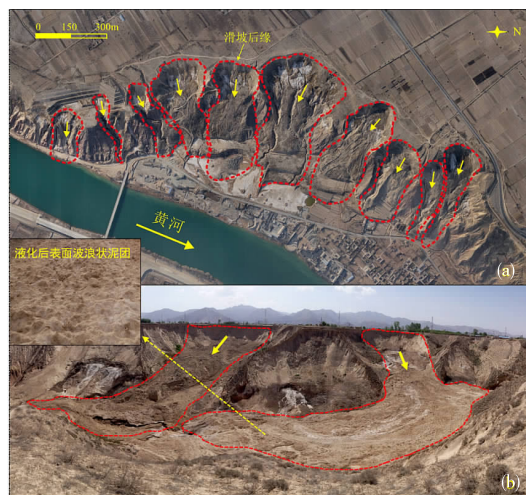


图3 黄土滑坡形成的泥流堆积特征

### 2 滑距预测模型建立

黑方台各处的台塬地层条件相似,这类静态液化型黄土滑坡的成因机制也相同<sup>[13]</sup>,因此滑坡变形后堆积体的运动也具有相似的运动和堆积特征。一般来说,滑坡堆积体体积一定的情况下,若能获得堆积体平均宽度和淤积厚度即可得到淤积长度,即滑距。基于黑方台静态液化型黄土滑坡相似的运动特征,通过研究这类滑坡的堆积体宽度、淤积厚度、滑坡体积等基本参数之间的关系,可以建立适用于这类滑坡的滑距预测模型。

#### 2.1 黄土滑坡体积和淤积宽度的确定

从图1可知,从平面上看,研究区黄土滑坡在台塬

边形成了大量的凹槽,但无法确定这些凹槽是由几次滑动形成的,每一次滑动产生的堆积体体积也无法准确确定。随着近年来摄影测量技术的不断发展,无人机摄影测量技术的精度已可以达到厘米级,通过近两年来对黑方台进行的多次无人机摄影测量,利用影像数据获取了黑方台典型滑坡发生前后数字高程模型(DEM),通过计算获得了更为准确的滑坡基本特征参数,见表 1。滑坡基本特征示意图如图 4 所示。

表 1 典型静态液化型黄土滑坡基本特征参数

| 滑坡名称和时间              | 后退距离 $l_1/m$ | 滑坡体积 $V/(10^4 m^3)$ | 滑源区宽度 $d_1/m$ | 堆积体平均宽度 $d_2/m$ |
|----------------------|--------------|---------------------|---------------|-----------------|
| MS9#(2013)           | 32           | 9.4                 | 127           | 68              |
| 陈家 3#左侧(2015. 2. 26) | 7            | 0.55                | 28            | 19              |
| 陈家 3#右侧(2015. 2. 12) | 9.5          | 1.17                | 62            | 29              |
| 陈家 8#(2015. 3. 29)   | 15           | 1.7                 | 76            | 42              |
| 党川 3#(2015. 8. 3)    | 13           | 1.45                | 96            | 46              |
| 焦家 4#(2015. 1. 28)   | 40           | 16                  | 169           | 97              |
| 陈家 6#(2016. 5. 3)    | 21           | 2.9                 | 89            | 55              |

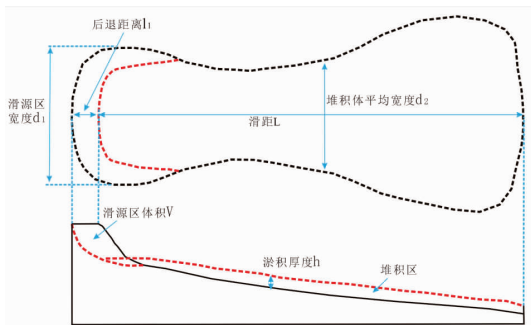


图 4 滑坡基本特征示意图

2. 1. 1 黄土滑坡体积估算

由于台塬地层基本相似,黄土的厚度差异并不大,通过统计已有滑坡的基本特征参数,发现滑坡的后退距离与滑坡宽度具有一定的线性关系、与滑坡的体积有较好的指数相关性,如图 5 所示,因此,如果知道一次滑坡的后退距离,即可初步估算出滑坡的体积。通过滑坡的体积与滑源区长度、宽度的关系可以简化为滑坡体积与滑坡后退距离的指数关系。采用滑坡后退距离估算滑坡体积,计算公式为:

$$V = 0.0137l_1^{1.8604} \quad (1)$$

式中,  $V$  为滑坡总体积,  $10^4 m^3$ ;  $l_1$  为对应的滑坡后退距离,  $m$ 。

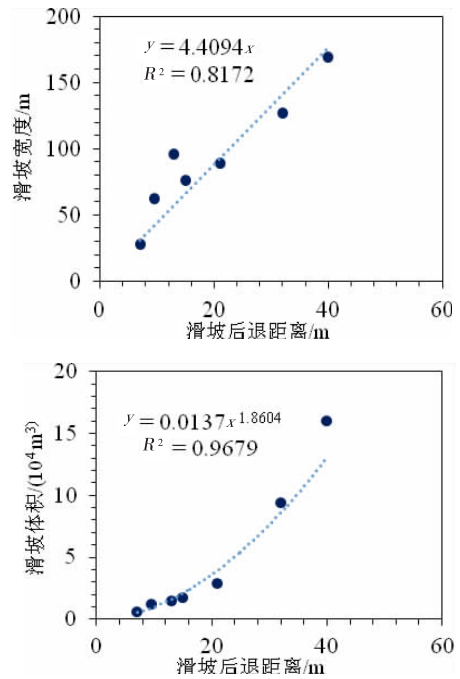


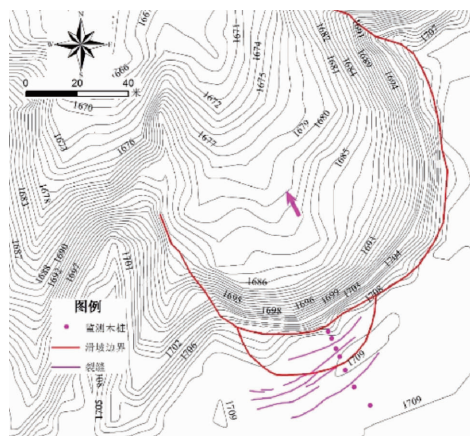
图 5 滑坡体积与滑坡后退距离的关系

黑方台黄土滑坡滑前地表会产生多级张拉裂缝,而滑坡总是沿某级裂缝产生,裂缝后方的土体不产生明显变形,因此只要判断出滑坡沿哪一级裂缝滑动,即可确定滑坡的后退距离。而通过对横跨多个裂缝的木桩进行简易位移测量,便可确定产生变形的区域,并通过测量裂缝距台塬边最大垂直距离即可获得滑坡后退距离。

以陈家 8#滑坡 2015 年 3 月 29 日的滑动为例,滑坡平面图及监测桩位置如图 6 所示。滑坡后缘发育了多条裂缝平行于台塬边,在该后缘布设 7 个木桩(编号由台塬边向内分别为 1-7 号)横跨所有裂缝。定期对木桩进行简易位移测量,木桩监测累计位移曲线如图 7 所示。滑坡发生前 1-4 号木桩间均产生了变形,最终从 3、4 号木桩间裂缝产生滑动,滑坡后退距离从最后一条产生变形的裂缝确定,通过测量该裂缝到台塬边的垂直距离获得。

2. 1. 2 堆积体平均宽度估算

通过分析黑方台静态液化型黄土滑坡堆积体平均宽度与滑源区宽度的关系,发现在相同的台塬地层和相似的前缘临空面条件下,滑坡堆积体的平均宽度与滑源区的最大宽度呈线性关系、与滑坡后退距离也呈线性关系,由此建立起滑坡堆积体的平均宽度与滑坡后退距离的线性正相关关系,如图 8 所示。堆积体宽度也可根据滑坡的后退距离进行估算获得,计算公式为:



(a)滑坡平面图



(b)监测桩位置

图6 2015年3月29日陈家8#滑坡平面图及监测桩位置

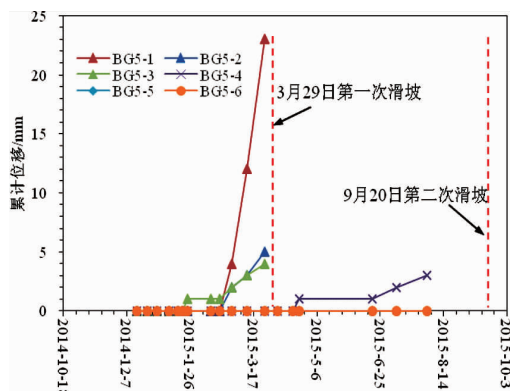


图7 陈家8#滑坡木桩监测累计位移曲线

$$d_2 = 2.4588l_1 \quad (2)$$

式中,  $d_2$  为堆积体平均宽度, m;  $l_1$  为滑坡后退距离, m。

表2 黑方台黄土泥石流基本特征

|      | 黄土比重<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 堆积体平均干密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 饱水泥流容重<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | 不同坡度下的堆积体厚度 |        | 屈服应力/Pa |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|--------|---------|
|      |                               |                                   |                                 | 坡度/°        | 淤积厚度/m |         |
| 党川2# | 2.69                          | 1.00                              | 1628                            | 2.57        | 5.5    | 3939    |
| 陈家8# |                               |                                   |                                 | 4.69        | 3.1    | 4030    |

由于静态液化型黄土滑坡相同的滑坡机制, 计算出的屈服应力也很接近, 其饱水容重和屈服应力均可取平

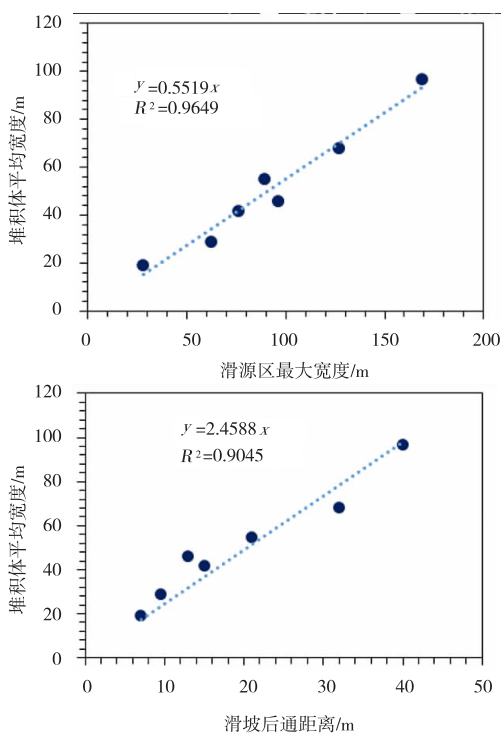


图8 堆积体平均宽度与滑源区滑坡宽度关系

## 2.2 黄土滑坡堆积体堆积厚度的确定

黑方台静态液化型黄土滑坡堆积体具有典型的泥流运动特征, 在运动过程中的淤积厚度可以参考泥石流中关于泥流淤积厚度的计算方法来确定, 计算公式为:

$$h = \frac{\tau}{g(\gamma_c - \gamma_0) \sin\theta} \quad (3)$$

式中:  $h$  为泥流的淤积厚度, m;  $\tau$  为泥石流体屈服应力, Pa;  $\gamma_c$  为泥石流容重, kg/m<sup>3</sup>;  $\gamma_0$  为环境容重, 在空气中,  $\gamma_0 = 0$ , 在水中  $\gamma_0 = 1000$  kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $\theta$  为堆积区域的地形坡度, °。

由(3)式推算出屈服应力的计算公式为:

$$\tau = (\gamma_c - \gamma_0)gh \sin\theta \quad (4)$$

通过调查获得了党川2#(2015.4.29)和陈家8#(2015.3.29)灌溉型黄土滑坡的特征参数, 计算出这类堆积体的屈服应力, 见表2。

均值(分别为: 1625 kg/m<sup>3</sup>, 3985 Pa)作为淤积厚度计算参数, 代入公式(3)可得到泥流的淤积厚度计算公式为:

$$h = \frac{0.25}{\sin\theta} \quad (5)$$

### 2.3 滑距预测公式

根据体积转换,黑方台静态液化型黄土滑坡滑距预测公式为:

$$L' = \frac{V}{d_2 \cdot h} \quad (6)$$

式中: $L'$  为滑坡的运动距离, m;  $V$  为滑坡总体积,  $\text{m}^3$ ;  $d_2$  为滑坡堆积体的平均宽度, m;  $h$  为泥流运动过程中的平均淤积厚度, m。

由于滑坡体积为滑源区的体积,而根据已有研究<sup>[14]</sup>,黑方台静态液化型黄土滑坡转变为堆积体时,体积会放大 1.411 倍,而为获得较准确的堆积体运动距离,滑坡体积应转换为堆积体体积进行计算,需加入放大系数 1.411,因此公式转化为:

$$L = 1.411 \frac{V}{d_2 \cdot h} \quad (7)$$

式中: $L$  为经过体积修正后的最终运动距离, m。

通过在滑坡后缘布设木桩进行简易位移监测可获得滑坡可能的后退距离  $l_1$ ,采用公式(1)计算出滑坡总体积;依据滑坡前缘渗水宽度  $d_3$ ,采用公式(2)计算出滑坡堆积体的平均宽度  $d_2$ ;将公式(1)、公式(2)、公式(5)代入公式(7)并整理简化,得到滑坡的滑距公式为:

$$L = 320l_1^{0.8604} \cdot \sin\theta \quad (8)$$

该滑距预测公式仅有 2 个未知参数,参数仅需要野外简易测量即可获得,适用性较好,能快速的估测出这类灌溉型黄土滑坡的滑距。

### 3 实例验证

以黑方台陈家 8#滑坡 2015 年 9 月 20 日发生的滑动进行验证,陈家 8#滑坡滑前 google 影像如图 9 所示。该滑坡位于黑方台东北侧磨石沟右岸,前缘沟谷斜坡平均坡度为  $7.3^\circ$ ,黄土厚度 25 m,滑坡体本身斜坡坡度  $68^\circ$ 。2015 年 3 月 29 日该处已发生了一次黄土滑坡,9 月 20 日晚在已有滑坡的后方再次发生滑坡,滑坡体长度 15 m,高差约 30 m,平均厚度 10 m,产生了近  $0.7 \text{万 m}^3$  的黄土泥流冲向下游,运动了 256 m 后停止。从图 9 可知,通过滑前一周的 google 影像发现滑坡前缘已产生宽 18 m 的饱和黄土渗水区域。而从图 7 可知,通过木桩监

测发现滑前 4、5 号木桩间已有变形,根据监测数据判断滑坡边界在第 4、5 根木桩间的裂缝处,该处滑坡长度约 7 m。



图 9 陈家 8#滑坡滑前 google 影像

根据前人建立的黑方台滑距预测回归模型<sup>[6,10]</sup>计算得到陈家 8#滑坡的滑距分别为 117 m 和 -101 m,与实际不符合,说明回归模型虽然采用了多达 4~5 个未知参数,仍然较难准确判断滑坡滑距。而采用滑距预测公式(8)计算出陈家 8#滑坡的滑距为 217 m,与实际滑距 256 m 基本吻合,说明本文根据滑坡成因机理所建立起的具有针对性的滑距预测公式更为简洁和准确。

### 4 结束语

黑方台地区长期灌溉将不断诱发新的滑坡,深入分析这类黄土滑坡的危害特征,建立有效的预测模型对防灾减灾有重要意义。本文基于黑方台这一特殊的静态液化型黄土滑坡,通过摄影测量技术,结合统计分析,提出了黑方台地区静态液化型黄土滑坡滑距的预测模型。该模型参数少,仅需要滑坡后退距离和前缘坡度两个简单参数,具有非常便捷的可用性,无需复杂的前期调查和软件处理,可直接用于估算黑方台潜在滑坡的滑距。经过实例验证以及与已有模型比较,该方法具有较好的预测精度。今后可通过更多的滑坡数据不断对其进行修正以提高精确度。

## 参考文献:

- [1] 龙建辉.高速远程黄土滑坡预测预报方法研究[D].西安:长安大学,2008.
- [2] 董书宁,李保雄.黄土滑坡的空间预报[J].煤田地质与勘探,2000,28(6):46-47.
- [3] LO C M,LIN M L,TANG C L,et al.A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit[J].Engineering Geology,2011,123(1):22-391.
- [4] WEIWEI ZHAN,XUANMEI FAN,RUNQIU HUANG,et al.Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area[J].Natural Hazards & Earth System Sciences,2017,17:833-844.
- [5] GUO D, HAMADA M,HE C,et al.An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earth quake area[J].Landslides,2014,11(2):281-291.
- [6] 王念秦,张倬元,王家鼎.一种典型黄土滑坡的滑距预测方法[J].西北大学学报:自然科学版,2003,33(1):111-114.
- [7] HUNGR O.Numerical modelling of the motion of rapid,flow-like landslides for hazard assessment[J].Journal of Civil Engineering,2009,13(4):281-287.
- [8] STRAUB S. Predictability of long runout landslide motion:implications from granular flow mechanics[J]. Geologische Rundschau,1997,86(2):415-425.
- [9] 章健.黄土滑坡运动模式及滑距预测方法研究[D].西安:长安大学,2008.
- [10] 魏丽娟.黑方台黄土滑坡成因与滑距分析[D].兰州:兰州大学,2012.
- [11] QI X,XU Q,LIU F. Analysis of retrogressive loess flowslides in Heifangtai,China[J].Engineering Geology,2017.Doi:10.1016/j.enggeo.2017,08,028.
- [12] XU L,DAI F, TU X,et al.Landslides in a loess platform,North-West China [J]. Landslides, 2014, 11 (6): 993-1005.
- [13] 武彩霞,许领,戴福初,等.黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究[J].岩土力学,2011,32(6):1767-1773.
- [14] 彭大雷,许强,董秀军,等.无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J].地球科学进展,2017,32(3):319-330.

## Forecasting Method of Sliding Distance of Static Liquefaction-type Loess Landslide in Heifangtai Gansu Province

QI Xing<sup>1,2</sup>, XIU Dehao<sup>2</sup>, PENG Dalei<sup>2</sup>, JU Yuanzhen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 6430001, China;

2. State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Heifangtai is located in Yongjing County, Gansu Province, China. A large number of loess landslides have been developed on the edge of the tableland due to the agricultural irrigation for many years, among which a kind of static liquefaction loess landslide is prominent with the characteristic of long movement distance and big harmfulness. In this paper, the basic characteristic parameters of static liquefaction loess landslide are studied by means of photogrammetry and statistical analysis, and the relationship among landslide volume, landslide backward distance and the average width of accumulation body is established. Yield stress of mudflow formed by landslide was used to obtain the relationship between slope and deposition thickness of landslide. The sliding distance prediction model of static liquefaction loess landslide with black square platform is established by using two simple parameters, namely the back distance of landslide and the average slope of front slope, which have good applicability.

**Key words:** Heifangtai; static liquefaction-type; loess landslide; sliding distance; prediction model