

DOI: 10.11779/CJGE2015S1028

# 综合物探法在滑坡稳定性评价中的应用研究

吕擎峰<sup>1</sup>, 卜思敏<sup>1</sup>, 王生新<sup>2</sup>, 贾梦雪<sup>1</sup>

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 滑坡是最严重的自然灾害之一, 产生条件复杂, 受各种自然地质因素影响, 其稳定性评价和治理方案选择中经常利用物探方法来获取相关地质信息。近年来越来越多的工程实践发现单一的物探方法均有信息不够准确、直观等局限性, 综合物探法以其全面、快速、信息丰富等特点从而得到广泛应用, 对滑坡治理方案的选择具有重大意义。以兰渝铁路盖家阴山滑坡为例, 结合滑坡勘察资料, 借助高密度电法和瑞利面波法进行综合物探勘查, 获取其速度和电阻率等参数, 进一步确定滑坡的滑动面、深度及滑动范围, 认识滑坡的变形破坏发展过程与规律, 为滑坡的治理方案的确定提供有力证据。

**关键词:** 综合物探法; 滑坡; 稳定性评价; 盖家阴山

中图分类号: TU412; P684

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0142-06

**作者简介:** 吕擎峰(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: lvqf@lzu.edu.cn。

## Application of comprehensive geophysical prospecting method in stability evaluation of landslide

LÜ Qing-feng<sup>1</sup>, BU Si-min<sup>1</sup>, WANG Sheng-xin<sup>2</sup>, JIA Meng-xue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. China

Railway 21st Bureau Group Co., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Landslide is one of the most serious natural geological disasters. Its production condition is complicated, and it is influenced by various natural geological factors. For its evaluation of stability and selection of treatment scheme, the geophysical exploration method is often used to get the related geological information. In recent years, more and more engineering practices indicate that the single geophysical exploration method has the limitations such as inaccurate and intuitive information. The comprehensive geophysical prospecting method is widely used for its characteristics of comprehensive, rapid and rich information, and it is of great significance to selection of treatment scheme for the landslide. Based on Gaijiayin Mountain landslide on Lanzhou-Chongqing and combined with the landslide survey data, using the high-density resistivity method and the integrated geophysical exploration of the Rayleigh surface wave method the parameters such as velocity and resistivity are obtained, and the scope of the landslide slip surface, depth and sliding are further determined. The deformation, failure, development process and the relevant laws are understood so as to provide powerful evidence for the scheme determination of landslide governance.

**Key words:** comprehensive geophysical prospecting method; landslide; stability evaluation; Gaijiayin Mountain

## 0 引言

滑坡是最严重的自然灾害之一, 产生条件复杂, 受各种自然地质因素影响, 具有发生频率高、破坏力强、造成损失巨大、发生过程迅速剧烈等特点, 故倍受工程地质工作者的关注<sup>[1-4]</sup>。在滑坡稳定性评价、计算和治理方案的设计中, 滑坡的构造情况、几何形态、滑面情况等为其提有力的依据。因此, 精准确定滑坡体的各项地质参数显得尤为重要。物探方法作为经济快捷有效的工程地质勘察手段得到了积极推

广, 并得到了广大工程界工作者的认可和信赖<sup>[5-7]</sup>。综合物探法以其全面、快速、信息丰富等特点从而得到广泛应用<sup>[8-14]</sup>, 对滑坡治理方案的选择具有重大意义。

本文以兰渝铁路盖家阴山滑坡为例, 结合滑坡勘察资料, 借助高密度电法和瑞利面波法进行综合物探勘察, 获取其速度和电阻率等参数, 确定滑坡的滑动面、深度及滑动范围, 认识滑坡的变形破坏发展过程与规律, 为滑坡的治理方案的确定提供有力证据。

1 物探方法介绍

兰渝铁路盖家阴山滑坡所处地质环境特殊、复杂,既有地下水作用,又有地表水在其前缘通过,同时该滑坡处于泥岩、砂岩交互的红层软岩地层,曾至少两次失稳,滑坡成因及作用机理较为复杂,故采用综合物探法进行勘探,选择了高密度电法和瑞利面波法来获取地下地质信息。

2 工程概况

盖家阴山滑坡(图 1, 2)位于渭源县锹峪乡盖家阴山村与孙家滩之间,锹峪河右侧的山前缓坡带,地理坐标东经 104° 13′ 50″、北纬 35° 06′ 32″。研究区域地处陇西黄土高原的西南部,该区域为黄土高原边缘与秦岭西端两大地质构造的交汇带及青藏高原和黄土高原连接处,构造格架多属中、新生代低山丘陵。区内黄土覆盖广泛,局部基岩裸露,地形破碎,沟壑纵横,大型沟谷与其支沟呈树枝状展布,水系较发育,沟谷之间为峁梁,峁梁之上冲沟、切沟较为发育,海拔 1930~2220 m,相对高差一般小于 200 m,植被覆盖率较低,水土流失较严重,地貌总体呈黄土梁峁地貌景观。在渭河两岸以及黄土峁梁区的沟谷地带,滑坡、崩塌等不良地质灾害较为发育,沟谷两岸通常发育有不对称、不连续的洪积、堆积阶地。

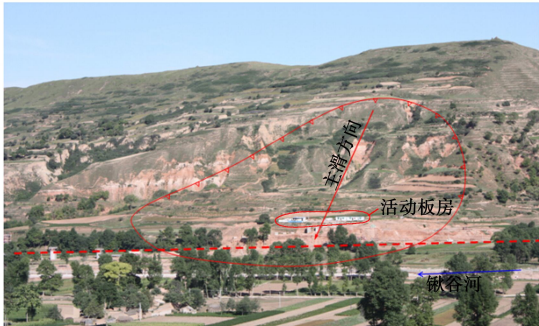


图 1 盖家阴山滑坡全貌图  
Fig. 1 Photo of Gaijiayin Mountain landslide

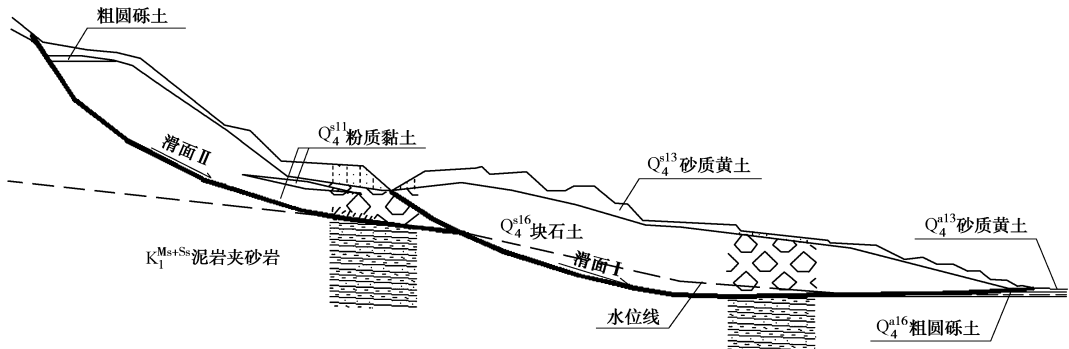


图 2 盖家阴山滑坡主轴断面图  
Fig. 2 Section profile of Gaijiayin Mountain landslide

研究区内的地下水以孔隙水为主,裂隙水发育相对较弱,分布于中生代白垩系(K)地层的空隙和裂隙之中,主要受大气降水、第四系潜水以及渭河水系补给,以泉水的形式排泄地表或者从沟谷潜水径流。据渭源气象站气象资料显示:本区属陇中冷温带半湿润、半干旱大陆性气候区(见表 1)。

表 1 滑坡所在区主要气象要素表

Table 1 meteorological elements of landslide area			
多年平均降水量/mm	历年最大降水量/mm	多年平均蒸发量/mm	多年平均气温/℃
522.0	793.0	1441.9	5.8

据勘察资料,测试区域的地层主要分为第四系全新统滑坡堆积层、白垩系下统泥岩夹砂岩。第四系全新统滑坡堆积层中,粉质黏土( $Q_4^{s11}$ )呈透镜体状分布于滑坡体局部段落、层厚 0.5~5 m;砂质黄土( $Q_4^{s13}$ )广泛分布于滑坡体地表,层厚一般 0~2 m,局部层厚 3~5.5 m;块石土( $Q_4^{s16}$ )为滑坡体主要组成物质、层厚 3~25 m。白垩系下统泥岩夹砂岩( $K_1^{Ms+ss}$ ),广泛分布于滑坡区底部,以棕红色、褐红色为主,多呈泥岩和砂岩互层状。盖家阴山滑坡主滑方向 NW87°,垂直于兰渝线铁路线路方向,滑坡面积约 103100 m<sup>2</sup>,滑坡体体积约 2×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,滑体厚 13~29.6 m,为大型中厚层红层软岩滑坡。面向滑坡,左侧边界为覆盖层较薄的基岩鼻梁,右侧为覆盖层较厚的山梁,后壁陡坎高 20~50 m,坡度 35°~50°,坡面覆盖层较薄,局部基岩裸露;滑坡体呈 3~5 级平台形态,平台面积 500~4000 m<sup>2</sup> 不等,多已夷为耕地;滑坡前缘突出邻近缓坡带 80~130 m,覆盖于锹峪河一级阶地之上;滑坡体主轴长约 350 m,平均宽约 400 m,坡度 8°~25°。滑坡区海拔高程 2095~2220 m,最大高差约 120 m。

3 现场测试

3.1 物探测试方案

根据高密度电阻率法对场地要求及盖家阴山滑坡所处地质环境,测试剖面在滑坡体上沿滑坡方向布置,剖面起点在抗滑桩旁边,剖面长度 168 m。测试



仪器用吉林大学生产的 GeoPen E60CN 型高密度电法工作站, 测试方法采用 Wenner 装置形式, 极距为 6 m, 最小隔离系数为 1、最大隔离系数为 9, 总电极数为 28, 观测系统的装置排列形式见图 3。

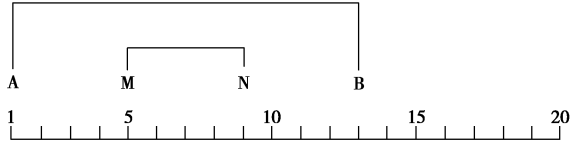


图 3 高密度温纳装置 (Wenner) 图

Fig. 3 High-density Wenner device

瑞利面波现场测试剖面与高密度电阻率法剖面重合, 剖面起点与高密度起点重合, 测点均布置在滑坡体较平坦部位, 剖面长度 320 m, 剖面包含 8 个面波测试点, 如图 4。

3.2 高密度电法测试

由于岩土体的种类、成分、湿度和温度等不同的因素, 而具有不同的电阻率。通过地表观测某点垂直方向或某剖面的水平方向的电阻率变化, 从而了解岩层的分布和地质构造特点。根据现场面波法实测数据, 采用 RES2DINV (semi demo) 高密度电阻率 2D 反演软件进行电阻率模型反演计算, 其反演的电阻率剖面见图 5。

由于测试地层的电性差异, 反演的电阻率剖面上层位显示非常明显。反演剖面图上, 电阻率小于 20  $\Omega \cdot m$  的部位属白垩系下统泥岩夹砂岩地层反映; 滑坡

体呈现相对高阻反映, 由于测试地形及剖面长度限制, 电阻率剖面没有覆盖全滑坡体。测试剖面范围内, 滑坡体明显分为两期滑动, 其分界面在剖面位置 98 m 左右。

异常特征分析:

(1) 滑坡体表层和内部局部出现半闭合或闭合的相对高阻圈, 主要与第四系块石土和粗圆砾土层有关。该地层土体中夹杂碎石、大块石等, 磨圆度差, 之间存在一定间隙, 所以电阻率相对于表层黄土层高。

(2) 在 18~26 m 和 45~60 m 范围内, 滑坡表层 (0~2 m) 出现低阻异常区, 电阻率小于 15  $\Omega \cdot m$ , 这主要与滑坡台地被夷为耕地有关。进行物探测试期间, 部分田地正进行灌溉补水, 水分入渗进入土体, 直接提高了表层土体的含水率, 导致了电阻率的降低。

从电阻率剖面可以看到, 在 98 m 剖面位置存在明显的分界面, 出现了厚度较大的高阻异常区。进行瑞利面波物探测试时, 在滑坡后部设置了两个测试点, #7 和 #8 测点。由观测结果可知,  $V_R$  随深度的增加而大幅增大。尤其是 #8 测点处, 深度不足 5 m 时,  $V_R$  已接近 400 m/s; 当深度超过 20 m 时,  $V_R$  已超过 800 m/s。说明滑坡后部第四系覆盖层较薄, 底部白垩系泥岩夹砂岩受扰动小, 岩层完整。从高密度电阻特征可以看出, 目前的古滑坡体经过前后两次滑动, 如图 5 和图 7 中的①和②。

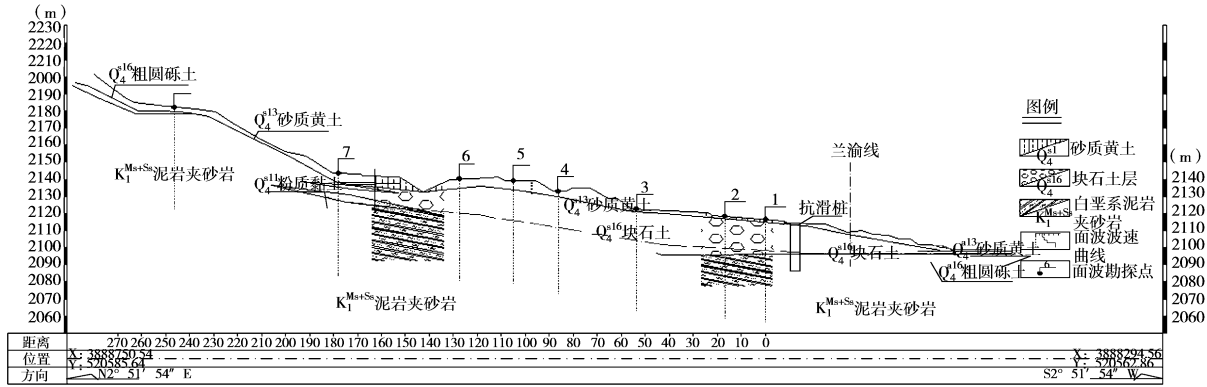


图 4 盖家阴山滑坡瑞利面波测试剖面图

Fig. 4 Rayleigh surface wave tests on Gaijiayin Mountain landslide

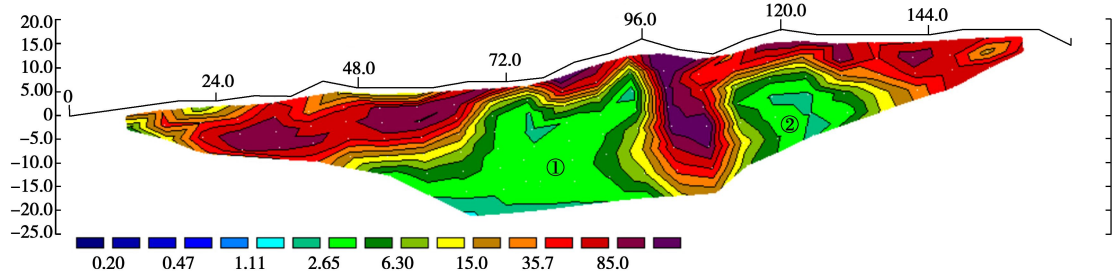


图 5 反演模型电阻率剖面图

Fig. 5 Resistivity profile of inversion model

3.3 瑞利面波法测试结果

由现场实测面波振动曲线采用瑞利波谱分析法对原始曲线进行计算机分析处理, 使用 FFT 快速相关算法计算的各剖面面波典型  $V_R - H$  频散曲线及速度曲线见图 6。经 FFT 快速相关算法计算的面波典型频散曲线形态规整、分层明显。结合其它测试点的资料处理结果, 按面波速度进行滑坡深度划分, 其结果见图 7。

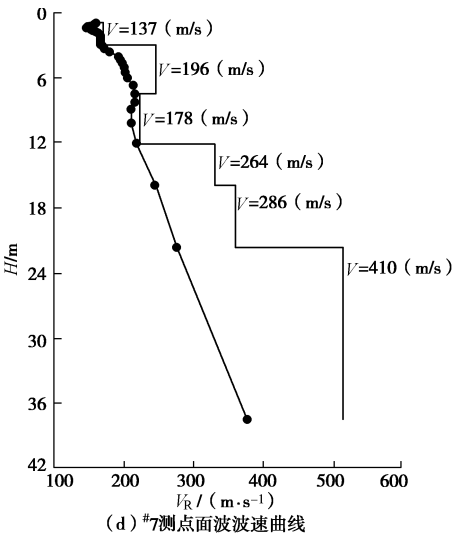
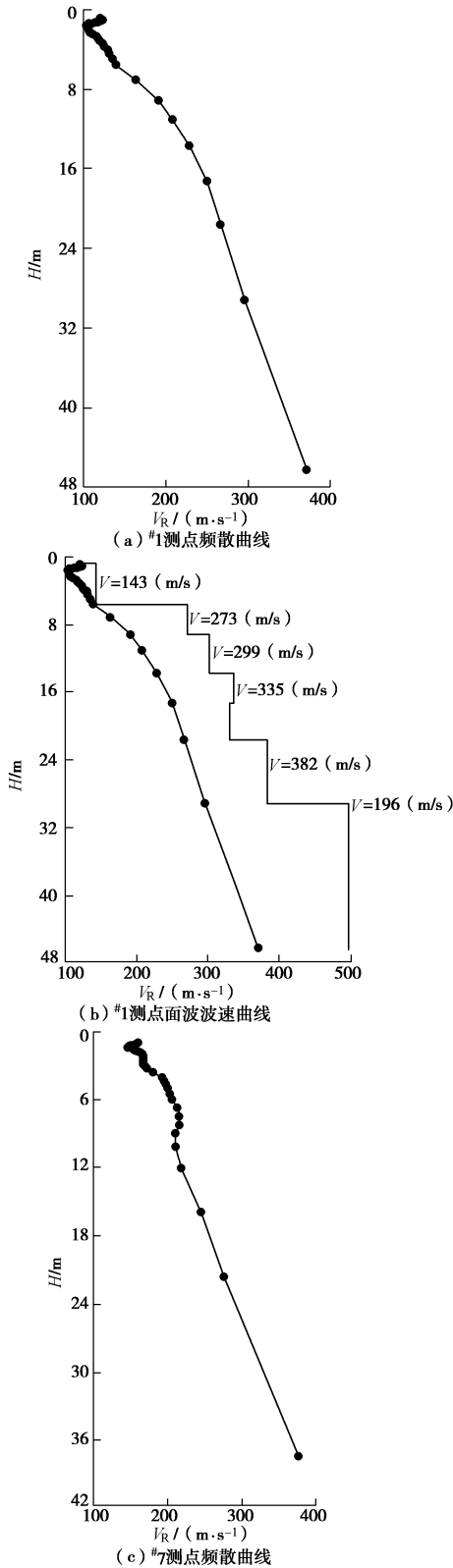


图 6 瑞利面波法测试结果

Fig. 6 Test results of Rayleigh surface wave method

4 综合物探分析

4.1 滑体结构特征

由图 5 可以看出：①滑坡体表层和内部局部出现半闭合或闭合的相对高阻圈，主要第四系块石土和粗圆砾土层有关。该地层土体中夹杂碎石、大块石等，磨圆度差，之间存在一定间隙，所以电阻率相对于表层黄土层高。②在 18~26 m 和 45~60 m 范围内，滑坡表层（0~2 m）出现低阻异常区，电阻率小于 15  $\Omega\cdot m$ ，这主要与滑坡台地被夷为耕地有关。进行物探测试期间，部分田地正进行灌溉补水，水分入渗进入土体，直接提高了表层土体的含水率，导致了电阻率的降低。③从电阻率剖面可以看到，在 98 m 剖面位置存在明显的分界面，出现了厚度较大的高阻异常区，这与盖家阴山滑坡的滑动过程有关。

综观电阻率剖面 and 面波速度测试结果，可将滑坡地层大体划分为如下两层：

第一层：电阻率 20~200  $\Omega\cdot m$ ，面波速度 140~380 m/s。反映该层结构相对疏松，孔隙率大，含水程度也不高，不利于电流传导和面波传播。该层厚 3~25 m，分布较广，为滑坡体的主体组成物质。推测为第四系风积黄土层和坡积块石土和粗圆砾土等。

第二层：电阻率小于 20  $\Omega\cdot m$ ，面波速度大于 400 m/s。反映该层结构较为密实，含水程度较高，为相对含水层，利于电流传导和面波传播。该层广泛分布于滑体底部，分布范围内电阻率差异很小，说明该层岩体较完整，推测为白垩系泥岩夹砂岩层。

4.2 滑动面

滑带土由于滑体的蠕动而发生变形，导致其物理性质发生变化，另外裂隙渗水等会使滑带土湿润，有

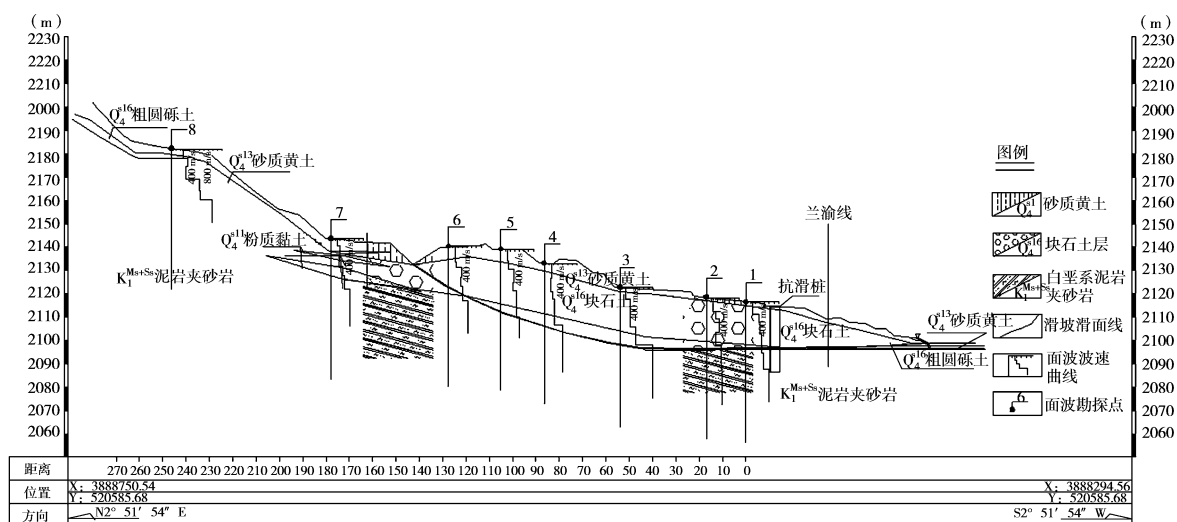


图 7 面波测试结果图

Fig. 7 Test results of surface wave

时候甚至达到饱和状态,这样就导致滑动带土体电阻率较低,形成低阻带;滑坡体和未扰动岩体在密实度、含水率等方面都有较大差异,瑞利面波的传播速度也存在差异,导致二者接触带上存在明显的速度界面。故滑动面的确定,需找到滑坡体中明显的低阻带和波速差异界面。

受测试地形及剖面长度的限制,电阻率剖面并没有覆盖全滑坡体,故图 5 中不能完整地反映整条低阻带,但是由瑞利面波法的测试结果可以看到明显的波速分界面,界面波速约为 400 m/s。表层岩土体为滑体,由于滑体的滑动变形导致其结构较为松散,瑞利面波波速较小,  $V_R=110\sim 380$  m/s,厚 3~30 m,为第四系滑坡堆积层;往下为滑床,结构较为密实,其瑞利面波波速较大,  $V_R>400$  m/s,为白垩系红层软岩。以 400 m/s 为界面波速作分界面,如图 7 中所示,发现盖家阴山滑坡前部存在一古滑动面。结合勘察资料可断定,该滑动面为盖家阴山滑坡古滑面,且该古滑坡为两期滑动。

盖家阴山滑坡后部是否存在滑动,是本次滑坡稳定性研究的重点之一。在进行瑞利面波物探测时,在滑坡后部设置了#7 和#8 两个测试点。由观测结果可知,  $V_R$  随深度的增加而大幅增大。尤其是#8 测点处,深度不足 5 m 时,  $V_R$  已接近 400 m/s;当深度超过 20 m 时,  $V_R$  已超过 800 m/s。说明滑坡后部第四系覆盖层较薄,底部白垩系泥岩夹砂岩受扰动小,岩层完整。由面波测试结果可推测,盖家阴山滑坡后部,地层相对完整,坡体稳定。

另外,现场调查显示,滑坡后部红层软岩地层横向连续性好,无顺坡向擦痕,均显示滑坡后部斜坡稳定性良好,不存在明显的滑动变形迹象。

### 4.3 古滑体滑动过程

(1) 从高密度电阻特征可以看出,目前的古滑坡体经过前后两次滑动,如图 5 中的①和②。

(2) 一期滑动阶段。根据现场调查访问,研究区曾发生一场较大的地震,地震引起土体内部结构发生变化,部分岩土体液化,形成软弱层,蠕动区的后上部不断向前推挤,使前下部抗滑力减少和出现新的滑动面。当上、下部同时滑动形成贯通性滑动面时,滑坡体因失去后缘支撑呈阶梯状下落,在滑体表面形成阶梯状错落平台。滑坡前部被推挤,覆盖至锹峪河一级阶地,受河水冲刷侵蚀,致使滑坡前缘呈现目前形态。

(3) 二期滑动阶段。滑体①的整体下滑,导致滑坡后部岩土体失去支撑,抗滑力减小。坡体表层第四系松散覆盖层沿坡滑动堆积于滑体 I 后部,形成了电阻率剖面 98 m 位置的高阻异常区。由于滑体①的阻挡作用,滑体②后部形成相对较高的台地,有明显的鼓起,受降水等冲刷,形成目前的形态;滑坡后缘与滑坡壁之间形成滑坡洼地,下降泉出露,是滑坡区主要的地表水。

## 5 结 论

(1) 滑坡大致可以分为两层。第一层:该层层厚 3~25 m,孔隙率较大,含水程度不高,电阻率为 20~200  $\Omega\cdot\text{m}$ ,面波速度 140~380 m/s。第二层:该层结构较为密实,含水程度较高,为相对含水层,利于电流传导和面波传播,电阻率小于 20  $\Omega\cdot\text{m}$ ,面波速度大于 400 m/s。

(2) 结合勘察资料及电阻率剖面图可以看出,在 98 m 剖面位置存在明显的分界面,出现了厚度较大的

高阻异常区, 这与盖家阴山滑坡的两期滑动有关。

(3) 综合勘察资料与物探分析, 盖家阴山滑坡为一个经过两次滑动的古滑坡。

(4) 通过盖家阴山滑坡工程实践证明在水系发育不充分的复杂地区进行滑坡地质特征勘查时利用综合物探手段能方便有效地得到滑坡相关特征参数为滑坡治理提供可靠依据。同时根据实际地形地貌和环境条件进行物探方法设计和灵活布置能使勘查工作更加行之有效。

## 参考文献:

- [1] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585 - 2592. (HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on development and distribution of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12 May, 2008.[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585 - 2592. (in Chinese))
- [2] 杨 君, 唐红梅, 罗 红. 南山风景名胜地质灾害危险性分区评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 93 - 97, 137. (YANG Jun, TANG Hong-mei, LUO Hong. Risk zoning assessment of geological hazard at nanshan scenic spot[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010, 29(1): 93 - 97. (in Chinese))
- [3] GHOSH J K, BHATTACHARYA D. Knowledge-based landslide susceptibility zonation system[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(4): 325 - 334.
- [4] STARK T D, CHOI H, MCCONE S. Drained shear strength parameters for analysis of landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 575 - 588.
- [5] 何 禹, 邓 专, 周 磊. 综合物探法在益阳市岳家桥镇地面塌陷勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013(6): 814 - 821. (HE Yu, DENG Zhuan, ZHOU Lei. The Application of integrated geophysical methods to surface collapse exploration in Yuejiaqiao[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013(6): 814 - 821. (in Chinese))
- [6] 段 黎, 姜文姜, 刘 钊. 综合物探方法在划分滑坡不稳定区的作用[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013(2): 33 - 36. (DUAN Li, JIANG Wen-jiang, LIU Zhao. Effect of Integrated Geophysical Methods on Dividing Unstable Areas of landslide[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2013(2): 33 - 36. (in Chinese))
- [7] 闫金凯, 殷跃平, 马 娟. 滑坡防治独立微型桩性状的大物理模型试验研究[J]. 水文地质与工程地质学报, 2012(4): 55 - 60. (YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MA Juan. Large scale model test study on single micropile in landslide reinforcement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012(4): 55 - 60. (in Chinese))
- [8] TIWARI B, DOUGLAS R. Application of GIS tools for three-dimensional slope stability analysis of pre-existing landslides[J]. GeoCongress, 2012: 479 - 488.
- [9] 牛建军, 张晓培, 邱建慧. 综合物探方法在中里滑坡调查中的应用[J]. 水文地质与工程地质学报, 2000(3): 53 - 55. (NIU Jian-jun, ZHANG Xiao-pei, QIU Jian-hui. The application of comprehensive geophysical prospecting method in the landslide investigation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000(3): 53 - 55. (in Chinese))
- [10] 张玉池, 温佩琳, 周 屹, 等. 综合物探在滑坡地质灾害勘察中的应用[J]. 物探与化探学报, 2007(增刊): 9 - 10. (ZHANG Yu-chi, WEN Pei-lin, ZHOU Yi, et al. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of landslide geological disasters[J]. Journal of Geophysical and Geochemical Exploration, 2007(S0): 9 - 102. (in Chinese))
- [11] 周海滨, 李志华. 客运专线路基隐患的综合物探研[J]. 铁道工程学报, 2013(4): 46 - 50. (ZHOU Hai-bin, LI Zhi-hua. Research on comprehensive geophysical exploration for hidden danger to subgrade of passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(4): 46 - 50. (in Chinese))
- [12] 刘 垒, 雷 宛, 蒋富鹏, 等. 综合物探法在地基工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 117 - 122. (LIU lei, LEI Wan, JIANG Fu-peng, et al. The combined application of integrated geophysical methods in engineering survey[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(1): 117 - 122. (in Chinese))
- [13] 汤罗圣, 殷坤龙, 周 丽, 等. 基于数值模拟与位移监测的滑坡抗剪强度参数反演分析研究[J]. 水文地质与工程地质学报, 2012(4): 32 - 37. (TANG Luo-sheng, YIN Kun-long, ZHOU Li. A study of landslide shear strength parameters by inversion analysis based on numerical simulation and monitoring displacement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012(4): 32 - 37. (in Chinese))
- [14] LAGASSE P F, SCHALLJ D, PAGÁN-ORTIZ JORGE E. Comprehensive stream stability evaluation methodology[J]. Wetlands Engineering & River Restoration, 2001: 1 - 11.

(本文责编 孙振远)