

# 综合物探方法在滑坡勘查中的应用

张光大, 张磊, 鲁勇波, 宋玉强

(四川省煤田物探工程院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 探明滑坡的构造特征, 才能有针对性地提出合理治理方案。结合工程实例, 利用面波勘探和高密度电法的手段对某滑坡体进行勘查, 较全面地确定了滑坡位置、深度及底界面形态等情况, 同时还获得速度、电阻率等参数, 从而对滑坡的稳定性计算及治理方案提供了有效依据。

**关键词:** 面波; 高密度电法; 滑坡

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**收稿日期:** 2013—05—08

## The Application of Integrated Geophysical Method to Landslide Exploration

Zhang Guangda, Zhang Lei, Lu Yongbo, Song Yuqiang

(Coalfield Exploration and Engineering Institute, Chengdu Sichuan 610072, China)

**Abstract:** A reasonable treatment scheme can be put forward only when the landslide structural characteristics are made clear. In this paper, taking some projects as an example, surface wave exploration and high density electric method are used to make a landslide exploration and a landslide location, depth and bottom state are confirmed. And at the same time, the parameters of the velocity and resistivity are obtained, which provides an effective basis for the calculation of landslide stability and the project scheme.

**Key words:** surface wave; high density electric method; landslide

## 1 引言

滑坡是工程勘察中常见的一种地质灾害现象, 主要表现为组成边坡的部分岩土沿贯通的剪切面向临空面发生整体下滑<sup>[1]</sup>。明确滑坡的潜在滑面位置、几何形态及构造情况等参数, 能为其稳定性计算、范围确定、灾害程度预测以及治理方案设计等提供有力依据。传统勘探手法常常是在工区布置横向和纵向钻孔或人工挖孔, 费用高、工程

量大, 且作为点测手段容易遗漏重要的地质信息<sup>[2]</sup>。物探方法作为经济、快捷、有效的工程地质勘察手段, 已被国内外工程界所认可, 并得到了广泛应用。

新龙县某滑坡位于雅砻江一级支流霍曲河沟口上游约 3km 的左岸斜坡上。滑塌体长约 150m, 沿沟底宽约 400m, 平面形态呈扇形, 前缘直抵霍曲河心, 两侧均有基岩出露, 后缘有一宽缓平台, 为中型土质滑坡。该滑坡自 2006 年 10 月发生较大崩滑以来, 长期断断续续崩落而堵塞河

道,并且大量飞石崩落至对岸,导致对岸公路多次改道。在汛期极有可能堵水成湖,对下游 500m 处霍曲电站的取水口造成破坏,影响霍曲电站正常运转。本次物探工作目的和任务是探测滑坡堆积体底界面起伏形态和崩塌体厚度,为治理方案的选择提供参考依据。

## 2 工区地质及地球物理特征

根据现场调查和试验工作结果,工区内崩塌堆积层的波速为 50~150m/s,视电阻率比较零乱,整体呈高阻反应,视电阻率值在 100~900 $\Omega \cdot m$  范围内呈不规则变化;第四系冲洪积层波速为 150~300m/s,电阻率为 200~600 $\Omega \cdot m$ ;基岩波速为 300~600m/s,电阻率大于 600 $\Omega \cdot m$ 。上述试验结果表明,该区各层位有较明显的速度、电阻率等物性差异,为面波和高密度电法勘探提供了必要的地球物理条件。

## 3 物探方法选择及设计

根据以往工作经验和工区地质情况,崩塌区地层从新到老依次为崩塌堆积层、第四系冲洪积层和基岩。崩塌堆积层结构松散,堆积物成份杂乱;第四系冲洪积层结构较松散,以卵石、砂土混合物为主,由于长期的沉积作用,层面形态相对比较规则;基岩相对比较坚硬,但构造发育的区域节理较为发育。各层结构和组成不同,其弹性和电性特征存在差异,且本次勘探任务的目标深度较浅,因此选择面波勘探和高密度电法相结合的工作方法,物探施工平面布置如图 1。

### 3.1 面波勘探

面波勘探是根据瑞雷波传播的频散特性,利用人工震源激发产生多种频率成分的瑞雷波,分析波速随频率的变化关系,最终确定地表岩土体的瑞雷波速度随场点坐标( $x, z$ )的变化关系,以解

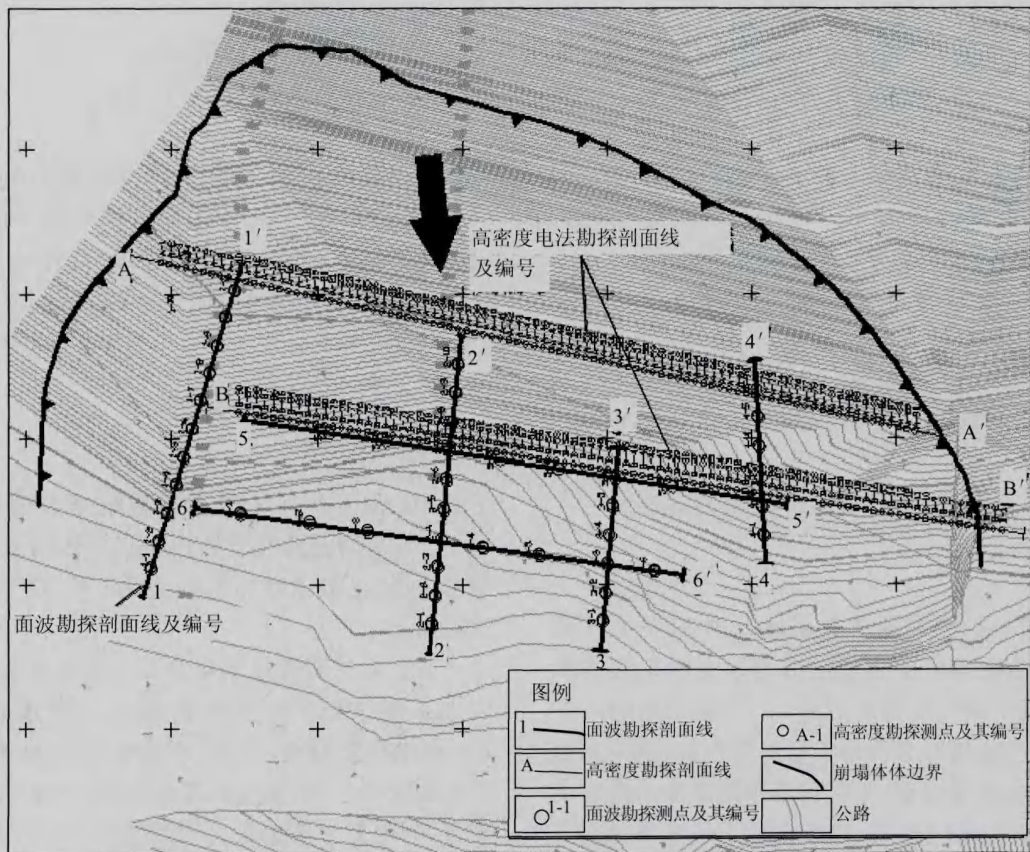


图 1 物探施工平面布置

Fig. 1 Layout plan of geophysical construction

决浅层工程地质和地基岩土的地震工程等问题<sup>[3]</sup>。

面波沿地面传播，表层厚度约为一个波长，同一波长的瑞雷波传播特性反映了地质条件在水平方向的变化，而不同波长的瑞雷波传播特性则反映了不同深度的地质变化情况。在地面上沿波的传播方向，以一定的道间距  $\Delta x$  设置  $N + 1$  个检波器，就可以检测到瑞雷波在  $N\Delta x$  长度范围内的波场。设瑞雷波的频率为  $f_i$ ，相邻检波器记录的瑞雷波时间差为  $\Delta t$  或相位差为  $\Delta\phi$ ，则相邻道  $\Delta x$  长度内瑞雷波的传播速度为<sup>[5]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} V_{Ri} &= \Delta x / \Delta t_i \\ V_{Ri} &= 2\pi f_i \Delta x / \Delta\phi_i \end{aligned} \right\} (\Delta t = \frac{T}{2\pi} \Delta\phi)$$

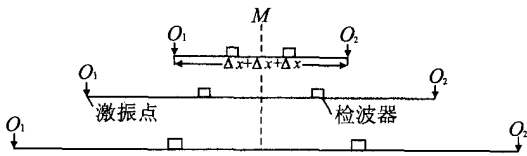


图 2 面波勘探激振方式

Fig. 2 Excitation mechanism of surface wave surveying

根据现场试验结果，本次面波工作数据采集使用美国产 RAS-24 型浅层地震仪，人工锤击震源，4.5Hz 低频检波器。仪器工作参数为采样率 0.5ms，滤波档采用全通。根据现场实验成果，面波勘探选用 2m 道间距，同时为提高资料精度，每点均采用 2m、5m 偏移距作 2 次记录，采用 12 道接收，3 次叠加，双边激振观测系统(图 2)，共布置 6 条测线，资料解释采用 WINSWS 面波处理软件。

### 3.2 高密度电法

高密度电法基本原理与常规电法相同，仍然是以地层岩性的电阻率差异为基础。利用电场的分布与地下岩土介质的相关关系，根据公式  $\rho_s = K \cdot U_{MN} / I$  求得地下不同位置及深度介质的视电阻率，获得地下介质视电阻率  $\rho_s$  的分布规律，并根据该规律推断地下地质结构。

高密度电法原理清晰、图像直观、信息量大、测量密度高，是一种分辨率较高的物探方法。近年来计算机技术的发展和数据采集技术的改进，使其探测效率大大提高，增大剖面覆盖面积和探测深度的同时，在强干扰环境下也能取得较为可靠的数据，明显提高了信噪比，能较准确地探测地质体及其结构特征。

当采用温纳装置(排列，图 3)测量时， $AM = MN = NB = AB/3$ ，为一个电极间距，探测深度为  $AB/3$ ， $A、B、M、N$  同步向右移动，得到第一层深度的剖面线( $n=1$ )；接着  $AM、MN、NB$  增大一个电极间距， $A、B、M、N$  同步向右移动，得到第二层深度的剖面线( $n=2$ )；依此类推，通过对地表不同部位人工电场的扫描测量，得到地下各点的视电阻率值(图 4)。

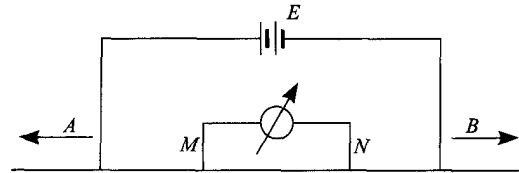


图 3 对称四极装置

Fig. 3 Symmetrical four-pole device

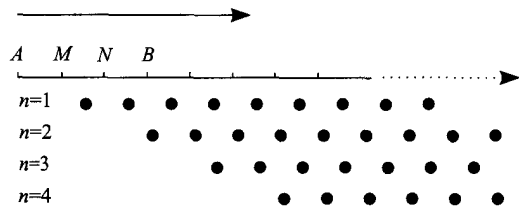


图 4 温纳装置电极滚动和记录数据排列示意

Fig. 4 Electrode moving and data recording of Wenner device

本次高密度电法仪器使用重庆奔腾地质仪器厂产 WDJD-3 型数字激电仪。采用  $\alpha$  排列，剖面总数 12，电极总数 60，共布置 2 条测线，资料处理采用 RES2DINV 二维反演解释软件。

## 4 物探成果解释

### 4.1 面波勘探资料解释

面波频散曲线的突变特征点与地层速度及弹性特征等参数有关，可通过突变特征点初步判定地层分界面及厚度和速度范围。由于工区内堆积体与第四系土层厚度较大，浅层块石土较为松散，因而能量传播过程中衰减较快。虽然大部分面波勘探点的频散曲线不能达到基岩埋深深度，但通过对曲线的综合分析，可以达到确定堆积体厚度的目的。

该工区内面波频散曲线特征可归纳为以下两类：

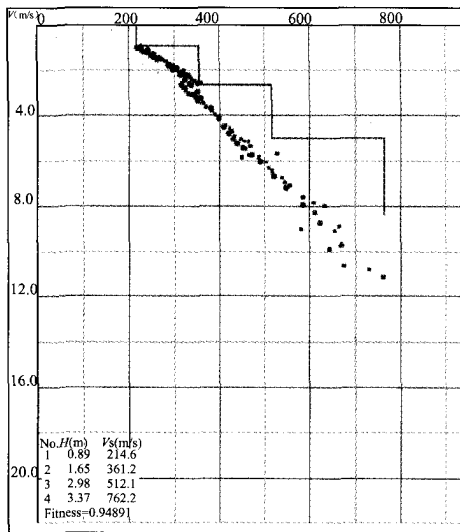


图 5 A 类频散曲线

注:图中方点—实测数据,圆点—拟合数据

Fig. 5 Dispersion curves of type A

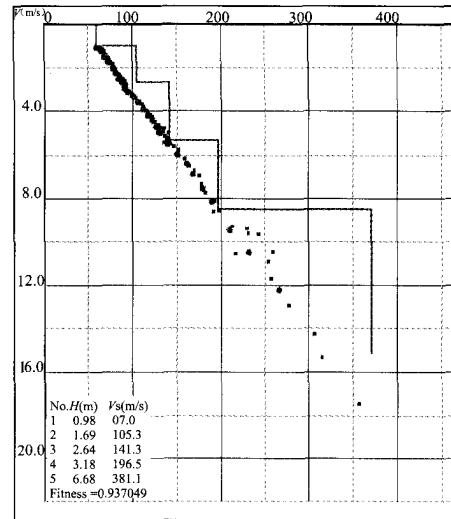


图 6 B 类频散曲线

注:图中方点—实测数据,圆点—拟合数据

Fig. 6 Dispersion curves of type B

1) A 类频散曲线(图 5)。该类频散曲线的特点是浅部波速较低,深部波速随深度增加而增加。曲线上深度 3m 位置有一个“之”字形拐点,其上方的面波速度  $V_R$  一般为 100~300m/s,深度在 1~3m 区间变化。其下为基岩岩层,由于基岩倾角较大,从露头上看,层间较为破碎,曲线在弹性分界面有一段较为明显的突变,面波速度约为 300~700m/s。此类面波频散曲线主要出现在基岩出露区的面波试验点,推测是基岩与第四系土层分界面。

2) B 类频散曲线(图 6)。该类频散曲线的特点是整体速度较低,一般为 100~300m/s,速度随深度的增加而缓慢递增。曲线中出现了 2~3 个拐点,推测第 1、2 两个拐点是位于崩塌积层各块石和砂土成份及密实程度的差异,导致层位的弹性波传播条件有所区别。第 3 个拐点是崩塌积物堆积层和第四系沉积层分界面,因崩塌积层结构极松散,波速相对较低,下覆第四系沉积层相对较密实,波速有所增大。此类频散曲线拐点不明显,大多出现在靠近河道的勘探区域,推测是由于河道卵石土混合沉积层与崩塌积层无明显的弹性分界面所致。

#### 4.2 高密度电法勘探资料解释

从高密度电法反演图(图 7 和图 8)上看,地表薄层为崩塌物堆积层,呈现零乱的高阻反应,厚度在 3~12m 范围内变化;其下方地层视电阻率反演断面所呈现的起伏状态与第四系层面变化具

有相似性;深部区域无明显高阻反应。同时结合地表露头所反映的基岩产状,可推测基岩面倾角较大,在崩塌体上方埋深浅,下方埋深较深。

A-A 横剖面视电阻率反演图(图 7)显示,地表浅层电阻率较零乱,符合崩塌积层电性特征,其堆积厚度呈不规则状,横向变化较大。下覆为第四系冰水沉积层,主要为原生第四系砾石、砂土、黄土富集层,视电阻率呈连续变化,形态变化大致反映出第四系层面变化趋势。高密度电法剖面 15m 位置与面波剖面 1-1 第 11 号面波点位置邻近,所反映的堆积体厚度范围与面波点实测结果相近,推测堆积体厚度为 10.7m 左右。高密度电法剖面 100m 位置与面波剖面 2-2 第 10 号面波点位置相距约 12m,所反映的堆积体厚度范围与面波点实测结果相近,推测堆积体厚度为 9.9m 左右。

B-B 横剖面视电阻率反演图(图 8)显示,地表浅层电阻率较零乱,符合崩塌积层电性特征,其堆积厚度呈不规则状,横向变化较大。下覆为第四系沉积层,主要为原生第四系砾石、砂土、黄土富集层,视电阻率呈连续变化,形态变化大致反映出第四系层面变化趋势。高密度电法剖面 75m 位置与面波剖面 2-2 第 7 号面波点位置相距 5m,所反映的堆积体厚度范围约 12m,而 7 号面波点实测结果约 14m,推测堆积体厚度在坡度拐点处达到最大。高密度电法剖面 130m 位置与面

波剖面 3—3' 第 6 号面波点位置相距约 2.4m, 所反映的堆积体厚度范围与面波点实测结果相近, 推测堆积体厚度为 6.7m 左右。

### 4.3 综合推断解释

根据面波勘查以及高密度电法综合解释的崩塌堆积体厚度情况, 同时结合已有地形资料, 利用 Matlab 绘制出崩塌堆积体底界面形态图(图 9), 从而推测崩塌堆积体底界面的基本形态。崩塌堆

积体厚度整体呈现上薄下厚的趋势, 坡顶有因崩塌露出的基岩, 两侧在标高 3060m 以上有基岩露头, 标高 3050m 以下基岩未出露。崩塌积层从坡顶到坡底逐渐增厚, 到达崩塌体地形拐点附近达到最厚。标高 3060m 以上区域, 地表是薄层崩塌堆积物, 其下为基岩, 而标高 3060m 以下区域, 地表厚层堆积物, 其下为第四系冰水沉积层, 其厚度因第四系冰水沉积层原地貌而改变。

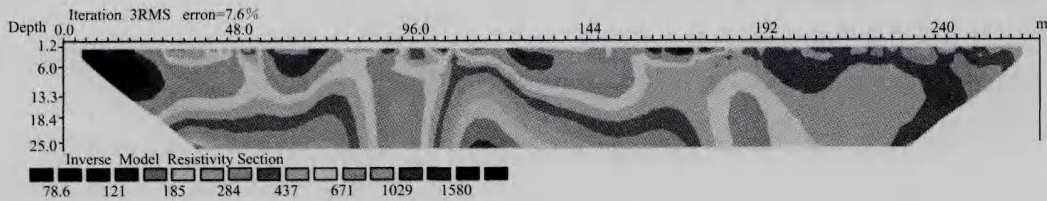


图 7 A—A' 高密度电法视电阻率反演剖面

Fig. 7 Apparent resistivity inversion profile A—A' of high density electric method

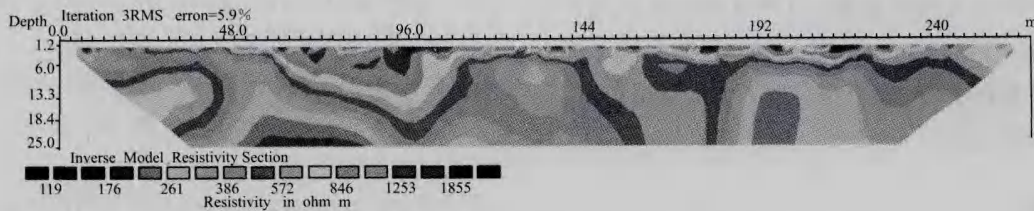


图 8 B—B' 高密度电法视电阻率反演剖面

Fig. 8 Apparent resistivity inversion profile B—B' of high density electric method

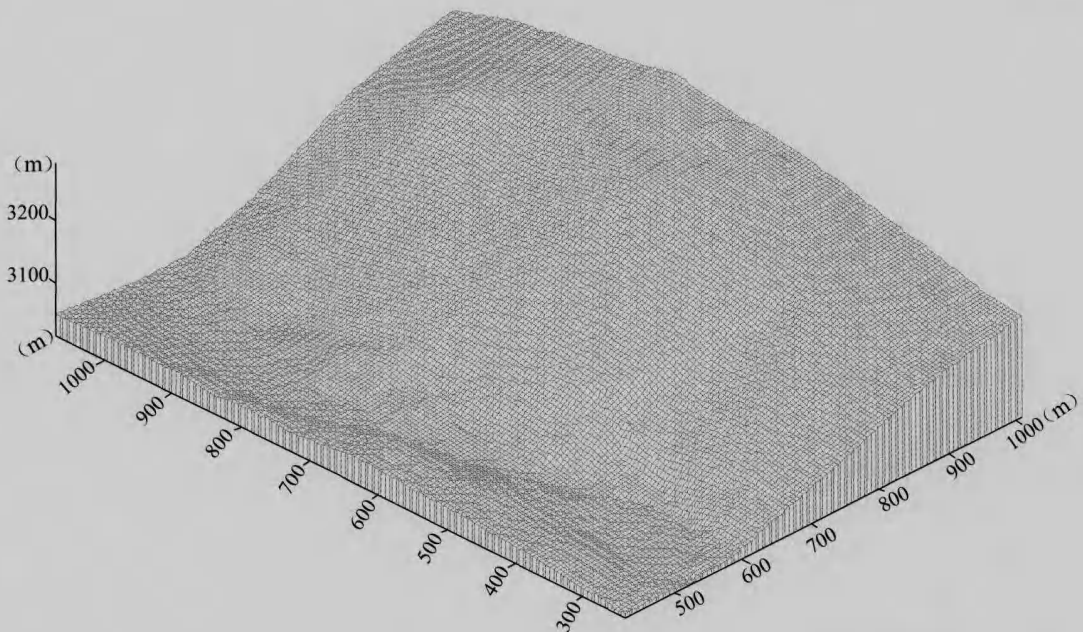


图 9 崩塌堆积体底界面形态

Fig. 9 Bottom boundary morphology of talus slide

## 5 结 语

1) 崩塌堆积体与第四系沉积层及河床堆积层在电性、波速特性上差别较小,推断解释的堆积体厚度可能与实际情况存在一定的误差,建议结合其他相关资料综合利用。

2) 滑塌体前缘以块石堆积为主,不具备物探测试条件;崩塌体后缘地形坡度较大,且上部有松动岩体,不具备施工条件。因此,物探剖面控制不到的区段,建议结合地质调查和其他方法进行综合分析。

通过实践证明,在复杂地区滑坡勘查中不利于钻探等传统手段时,利用地层弹性和电性差异,综合面波和高密度电法的物探手段,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,在实际工作中,根据实际地形和环境条件进行物探方法设计和布置,灵活变通,能使工作更加行之有效。

### 参考文献:

- [1] 刘彦华,熊章强,方根显,等.综合物探方法在秦井高速公路滑坡调查中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(4):295~298.
- [2] 闫建飞,牛建军,杜立志,等.电阻率层析成像技术在滑坡调查中的应用[J].中国科技信息,2008(22),16~18.
- [3] 雷宛,肖宏跃,邓一谦.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,2006.
- [4] 周竹生,马翠莲,石中平.瞬态瑞雷波法在滑坡勘查中的应用及其效果评价[J].工程地球物理学报,2008,5(1):9~13.
- [5] 马涛.多次覆盖观测系统在瑞雷波勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2012,9(2):205~211.
- [6] 熊章强.浅层地震勘探[M].北京:地震出版社,2002.
- [7] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [8] 李凯.面波勘探技术在工程勘察中的应用进展[J].工程地球物理学报,2011,8(1):97~104.
- [9] 徐元璋,高桥松.瑞雷面波勘探法的资料处理与解释[J].工程地球物理学报,2013,10(1):76~80.
- [10] 张碧星,鲁来玉,鲍光淑.瑞利波勘探中“之”字形频散曲线研究[J].地球物理学报,2002,45(2):263~274.
- [11] 张光保.褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析[J].地球物理学进展,2012,27(6):2716~2721.
- [12] 武玉龙.高密度电法在滑坡勘查工程中的应用与分析[J].土工基础,2012,26(5):102~104.