

## 高密度电阻率法在某滑坡探测中的应用

杨德龙<sup>1</sup>, 朱丽丽<sup>2,3</sup>, 黄凡<sup>1</sup>, 葛宝<sup>2,3</sup>, 董湘龙<sup>2,4</sup>

(1. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵阳 550002;

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;

3. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;

4. 四川省地学核技术重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 在介绍高密度电阻率法工作原理和野外工作方法的基础上, 将其应用到毕威高速公路某工区的滑坡勘探中。结果表明, 高密度电阻率法可有效确定滑床的基本形态和滑动面埋深。

**关键词:** 滑坡; 高密度电阻率法; 视电阻率

**中图分类号:** P631.3; P642.22 **文献标识码:** A

### 1 引言

滑坡是高速公路建设中较为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体沿一定的软弱面或者软弱带整体地或者分散地顺坡向下滑动的现象<sup>[1,2]</sup>。为了发现隐患, 消除危害, 有效而经济地采取滑坡整治措施, 必须对滑坡进行勘察, 查明滑动面的位置、埋深和地下水的活动特征, 确定滑坡体的几何形态, 为滑坡治理设计提供科学的依据及合理的建议<sup>[3,4]</sup>。在岩土体结构上, 滑坡体的滑动面或软弱结构面, 通常结构较为松散, 且含泥和含水量高, 与滑坡体以及下伏的基床相比, 表现出明显的低电阻率特征, 滑坡的这些地质特征和地球物理特征, 为采用高密度电阻率法查明滑坡的空间分布特征提供了可能。高密度电阻率法已广泛地应用于滑坡勘察, 显示出了很好的应用效果<sup>[5]</sup>。

本勘察工区是毕威高速公路某段, 位于贵州省毕节市赫章县境内。由于人工开挖和降雨冲刷, 该地段的边坡出现了裂缝, 在山麓局部地方还能见到有泉水出露, 部分边坡已出现明显的滑坡。这不仅严重影响了公路的施工进度, 而且还会造成一定的经济损失。因此, 为有效地消除隐患, 必须对滑坡进行勘察。

### 2 高密度电法工作原理

高密度电阻率法是一种阵列勘探方法, 实质属于直流电法, 其基本原理与常规电阻率法相同, 都是以不同岩石之间导电性能差异为基础, 通过接地电极在地下建立人工电场, 以电测仪器观测因不同导电地质体存在时地表电场的变化, 但其电极布设是一次完成的, 减少了因电极设置而引起的故障和干扰<sup>[6]</sup>。采用的装置是一种组合式剖面装置, 集电剖面法和电测深法的特点为一体的一种地学层析成像技术。实际上是多种排列的常规电阻率法与资料自动反演处理相结合的综合方法, 自动的多种电极排列方式的扫描测量, 可以获得地层横向和纵向地电断面结构特征的地质信息。

高密度电法具有测点密度大、信息量大、工作效率高等特点<sup>[7]</sup>, 测量过程中, 通过转换装置控制电极间的不同排列组合, 能够实现直流电法勘探中的各种装置形式的探测, 如温纳、偶极、施伦贝尔、微分和温施等, 可以提供更多的地电断面信息, 有利于对比分析, 因此充分发挥了物探技术在勘察中的优势。

### 3 野外工作方法

本次高密度电阻率法采用 DUK-2 A 型多功能

数字直流(激电)仪和 DUK-2 A 型多路电极转换器进行数据采集,每条测线布设 60 个电极,极距 5 m,单条剖面最大长度为 295 m,使用温纳、施伦贝尔、偶极装置对比选取较好效果。

数据处理采用 RES2DINV 自动迭代反演程序经过重复观测剖面选择,坏数据点剔除,纵向与横向滤波,地形改正等处理环节。其正演过程采用有限元法,反演采用最小二乘反演,迭代次数 3~5 次,  $RMS < 10\%$ , 最终得到的高密度视电阻率断面图形象、直观地反映地电断面的电性分布、岩土体的界面形态。但是其对界面深度的解释属于定性结论,而埋深需要用钻孔资料验证。具体处理流程图见图 1。

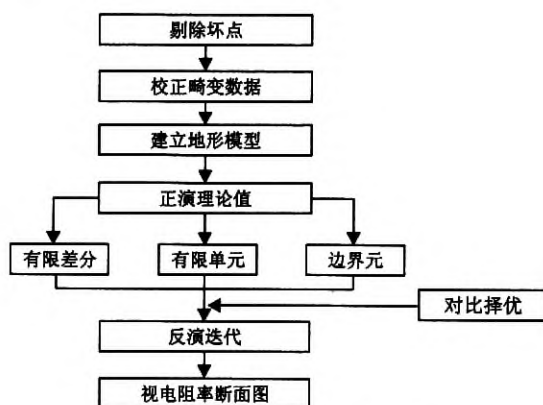


图 1 高密度电阻率法处理流程图

Fig. 1 Processing flow chart with the high-density resistivity method

## 4 工程实例

### 4.1 勘察工区概况

勘察工区位于贵州省中部,地处苗岭山脉北坡,

地形起伏较大,原始斜坡坡度一般为  $25^\circ \sim 30^\circ$ 。开挖边坡最高为 60 m,岩层产状平缓,形成地势开阔的缓丘地貌。坡体地表植被较发育,以灌丛林为主,局部上边坡发育松、杉等高大乔木。

勘察工区内主要出露地层为古生界的二叠系和新生界的第四系。从新到老简述如下:第四系(Q):褐色、褐黄色粘土、粉质粘土,砂砾;二叠系上统( $P_2$ ):峨眉山玄武岩组( $P_2\beta$ ),为暗绿、暗灰、灰黑色斑状玄武岩、拉斑玄武岩,为勘察区主要出露基岩。玄武岩裂隙十分发育,勘察区地下水类型主要为基岩裂隙水,局部为松散堆积层孔隙水。

勘察工区处于川滇南北构造带之东,南岭东西向构造带之北,新华夏构造体系最西边。沿线区域一级褶皱构造带主要由罗州-赫章背斜,褶皱构造轴向约  $NE20^\circ \sim 40^\circ$ ,岩层倾向为 NW 或 SE,倾角  $5^\circ \sim 38^\circ$ 。距离较近的断层有坝都断层等,该断裂为非活动断层,区域地质稳定性较好。

### 4.2 资料分析与解释

勘察发现,该段边坡发育一老滑坡( $HP_1$ ),老滑坡平面上呈不规则椭圆状,顶部较窄,中间较宽,向下逐渐变窄,北西-南东向展布,主滑方向  $155^\circ$ 。由于高速公路路基从老滑坡中、下部通过,在右侧边坡开挖过程中,坡脚抗滑段被挖除,上部含碎石粘土层受牵引生成 2 个较小的次级滑坡  $HP_1$  和  $HP_2$ ,滑坡后缘出露清晰,且前缘可见明显多级剪出口。

根据现场地形地貌及地质灾害的特征,结合本次物探的目的与任务,共布设两条电法剖面,采用十字型交叉剖面,对整个滑坡体进行控制测量,具体见图 2。

图 3 为 W1-W1' 剖面高密度视电阻率解译剖面

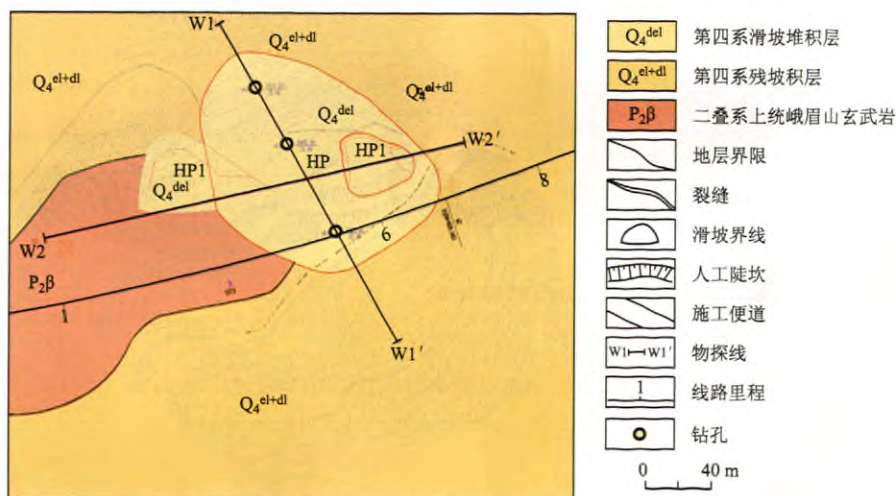


图 2 物探测线及钻孔布置平面图

Fig. 2 Layout plan of geophysical measuring lines and boreholes



图, W1-W1' 剖面走向为  $150^\circ$ , 地形呈北高南低的趋势。在剖面 190~295 m 植被相对较为茂密, 在 110~190 m 之间出现不同程度开裂、下挫等坡体滑动的迹象, 在测线前端有两处泉水出露。由图 3 可见, 在剖面 10~180 m 的位置, 表层整体呈现相对高阻, 中下部为相对低阻区, 且呈圈闭状, 底部初见相对高阻区, 分析认为 180 m 处为一级滑动面的后缘, 平台下挫后在后缘形成拉裂缝, 且地表碎石土较为干燥, 因此剖面表层呈现相对高阻, 中下部相对低阻区为软弱层含水所致; 在剖面 195~280 m 位置,

表层视电阻率较下部相对较高, 分析认为该段第四系覆盖层较为疏松, 透水性较好, 而在 280 m 的位置为二级滑坡的后缘, 平台轻微下挫且地表有多条拉裂缝, 其下部基岩结构松散, 岩体破碎, 风化较严重, 裂隙发育, 富水性好, 从而在该段出现低阻圈闭。拟推断滑动面为表层相对高阻与其下伏低阻的界线, 形态如图 3 所示。剖面上 ZK03 钻孔揭露滑面埋深 2.7 m, ZK02 钻孔揭露滑面埋深 9.85 m 和 11.4 m, ZK01 钻孔揭露滑面埋深 9.48 m, 通过与钻孔资料对比, 推测滑面埋深与钻孔资料吻合较好。

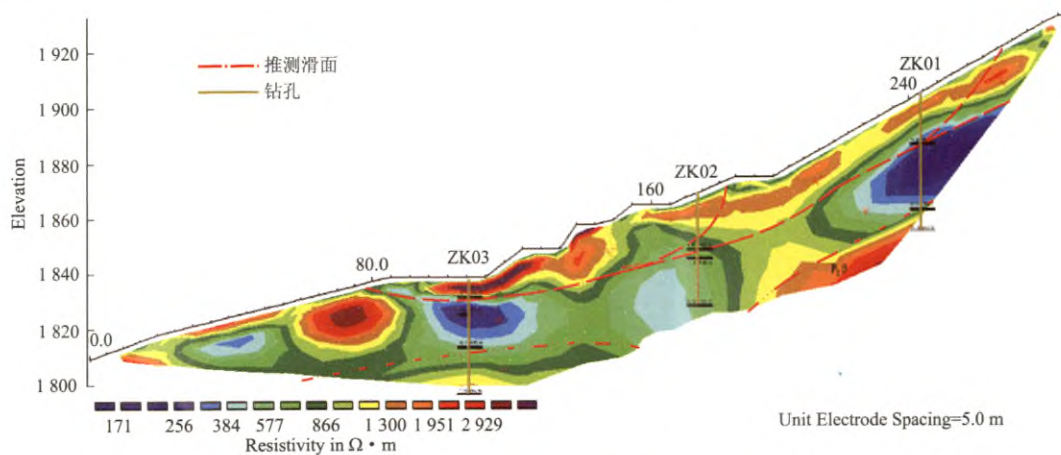


图 3 高密度视电阻率解译剖面图(W1-W1')

Fig. 3 W1-W1' profile of high-density resistivity

图 4 为 W2-W2' 剖面高密度视电阻率解译剖面图, W2-W2' 剖面为垂直坡向布置, 方向为  $80^\circ$ , 剖面两端地形起伏较大, 中间部位较平缓, 覆盖层厚度变化相对较大以残坡积为主, 下伏基岩为玄武岩, 视电阻率  $1\ 100\sim3\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。从图 4 可以看出, 在剖面的 130~170 m 之间地表呈现高阻晕团, 拟推断为

地表裂缝及崩塌松散堆积物引起; 其下部呈现低电阻率阻闭合圈且与连续性较好的高阻地层界线较为明显, 结合现场调查, 推断该界面为滑动面。在剖面 220~250 m 的位置覆盖层较厚, 厚度约 12 m, 且呈低视电阻率闭合圈, 与下伏中风化玄武岩表现出的高阻形成明显界线, 拟推断为滑动面。

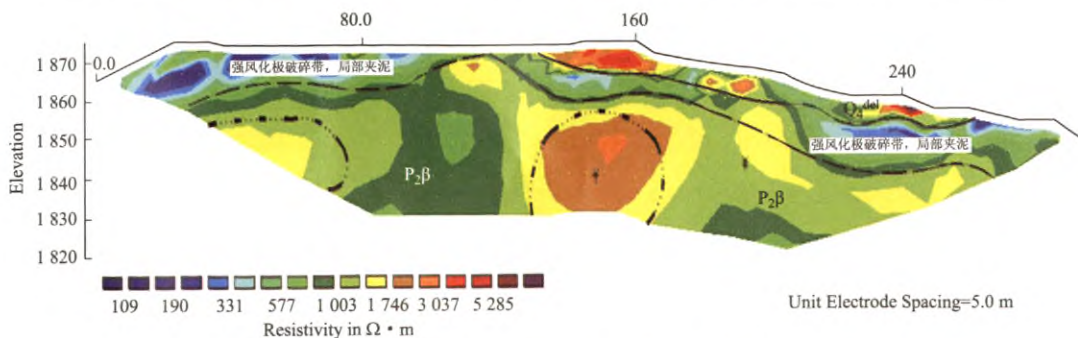


图 4 高密度视电阻率解译剖面图(W2-W2')

Fig. 4 W2-W2' profile of high-density resistivity

根据高密度电法解译成果分析, 滑体土较干燥, 视电阻率明显较高。在滑动面附近, 也存在较为明显的低阻带, 与钻孔揭示的滑面大致相同。滑坡前

缘外侧的强-弱风化玄武岩, 完整性较好, 视电阻率也较高。滑床的全-强风化玄武岩, 岩体十分破碎, 含水量较高。

### 4.3 效果验证

为充分利用本次物探工作的成果,在应用高密度电法勘探滑坡的过程中,对地面圈定的异常区进行验证,验证孔位如图2所示,将物探解译成果与钻探资料进行对比分析。通过对比发现,高密度电阻率法探测滑动面的埋深,与钻探资料基本一致。充分表明,本次高密度电阻率法在滑动面的查找和对滑床形态特征推断是可靠的、可信的。

## 5 结论

(1) 本次勘探工作达到了对目标体的预期探测效果,掌握了滑动面的埋深位置、滑床的基本形态特征,对该滑坡体的整体情况有了较为清楚的认识,对指导现场安全施工和治理方案的设计具有非常重要的意义。

(2) 通过钻探与物探相结合的工作模式,不仅保证了探测效果而且加快了勘察工作的效率,为今后滑坡勘察提供了更多的方法途径。

(3) 本次勘察工作的不足之处在于,受地形、现

场施工条件等因素的影响,测线探测深度相对浅了点,同时对目标体的探测方法也过于单一,今后可尝试结合一些探测深度大、受地形因素影响相对较小的物探方法。

### 参考文献

- [1] 刘彦华. 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): 295-298.
- [2] 戚筱俊. 古滑坡复活实例分析[J]. 西部探矿工程, 2002, (2): 125-126.
- [3] 谢尚平. 浅层地震和高密度电法在滑坡勘察中的应用[J]. 东华理工学院学报, 2004, (4): 361-364.
- [4] 徐昌平. 高密度电法在滑坡体勘察中的应用[J]. 广东水利水电, 2009, (6): 32-35.
- [5] 何文勇. 高密度电法在山区高速公路地质灾害勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2009, (3): 89-94.
- [6] 郭秀军. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1662-1669.
- [7] 滕宏伟. 高密度电阻率法在滑坡识别中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, (4): 688-692.

## APPLYING THE METHOD OF HIGH DENSITY RESISTIVITY IN THE SURVEY OF A LANDSLIDE

Yang De-long<sup>1</sup>, Zhu Li-li<sup>2,3</sup>, Huang Fan<sup>1</sup>, Ge Bao<sup>2,3</sup>, Dong Xiang-long<sup>2,4</sup>

(1. Guizhou highway engineering group co. LTD, Guiyang 550002, China; 2. State Key Laboratory of Geo-hazard prevention & Geo-environment protection, Chengdu 610059, China; 3. Key Laboratory of Earth Exploration & Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Applied nuclear techniques in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The working principle and field work methods are introduced before the high density resistivity method is applied in prospecting a landslide on Bi-Wei Expressway. The results show that the method can effectively determine the geometry of the landslide and the depth of its slip surface, thus offering a guiding role to handle landslides and construct highways.

**Key words:** landslide; high-density resistivity method; apparent resistivity

**作者简介:** 杨德龙(1966—),男,贵州省习水县人,高级工程师,主要从事地质工程工作。