

# 高密度电阻率法在贵州玄武岩边坡勘察中的应用

张著芳<sup>1</sup>, 徐良<sup>2</sup>, 柴寿喜<sup>2</sup>, 魏厚振<sup>3</sup>

(1. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵州 贵阳 550008;

2. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 岩土的电阻率受干密度、含水率和孔隙率等因素的影响。选取贵州省毕威高速公路有代表性的边坡, 利用岩土的电阻率差异区分残积土分布厚度和不同位置的风化程度, 进行高密度电阻率法勘察。试验结果表明: 玄武岩残积土边坡分层现象不明显, 不同位置残积土的厚度分布不均; 残积土与基岩的电阻率差别较大, 可初步确定基岩的分布形态; 在横向上不同位置残积土的风化程度差别较大。

**关键词:** 高密度电阻率勘察法; 玄武岩; 残积土; 地质勘察

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)02—0006—04

## Application of High-density Resistivity Method in Geological Exploration for Basalt Slope in Guizhou

ZHANG Zhu-fang<sup>1</sup>, XU Liang<sup>2</sup>, CHAI Shou-xi<sup>2</sup>, WEI Hou-zhen<sup>3</sup>

(1. Guizhou Province Highway Engineering Group CO., LTD., Guiyang, Guizhou 550008, China;

2. Tianjin City Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

3. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** The resistivity of rock-soil is affected by dry density, water content and porosity. For researching how to distinguish the thickness of residual soil and the depth of bedrock by using the difference of resistivity, the high-density resistivity method is used to explore the slope of Bijie-Weining Express Highway in Guizhou. The results show that: the layered soil of basalt slope is not obvious, and the thickness is nonuniform with different place; The distributional pattern of the bedrock could be initially defined based on the resistivity difference of the residual soil and bedrock; The weathering degree of the residual soil is variable greatly at different place on horizontal.

**Keywords:** high-density resistivity survey method; basalt; residual soil; geological exploration

贵州岩石分布主要为二叠纪玄武岩, 其特点与常见的碳酸岩有明显的不同, 在其分布地段岩石节理、裂隙发育, 强风化厚度大, 风化后成碎块状, 使得玄武岩工程性质难以把握, 引发大量边坡失稳, 地基不均匀变形。目前, 我国大力发展西部地区交通设施, 对工前的勘察来说, 时间紧、任务重, 钻探等常规的勘察手段往往以点带面且成本较大, 运用高密度电阻率法可以很好的辅助常规钻探、标贯及触探等完成勘察任务。

本文在玄武岩残积土地区进行高密度电法试验, 主要探究了玄武岩残积土的厚度分布情况和风化程度。

### 1 高密度电阻率法原理

高密度电阻率法是土的电阻率理论的延伸应用, 土的电阻率定义为单位长度和横截面积导体的电阻值, 影响其大小的因素有土的干密度、含水率和孔隙率等。高密度电阻率法的应用是以岩土的电性

差异为基础,人工建立地下电流场,通过采集地下空间不同位置点的电阻率值,从而研究相关地质问题的方法<sup>[5]</sup>。高密度电阻率法测试的电场分布示意图 1 所示。

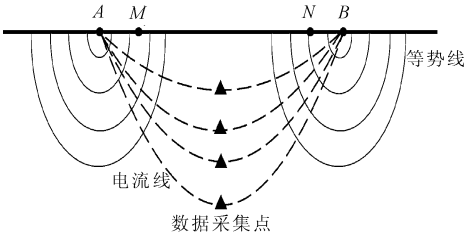


图 1 高密度电阻率法测试的电场分布示意图

图中  $A$ 、 $B$  为供电电极,  $M$ 、 $N$  为测量电极。当  $A$ 、 $B$  供电时,测量出  $A$ 、 $B$  间的电流  $I$  及  $M$ 、 $N$  间的电位差  $\Delta V$ 。  $M$ 、 $N$  两点的电位分别为:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \tag{1}$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \tag{2}$$

式中:  $\rho$  为电阻率( $\Omega \cdot \text{m}$ );  $I$  为电流(A);  $AM$ ,  $MB$ ,  $AN$ ,  $NB$  为两点间的距离(m)。那么  $MN$  两点的电位差为:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right] \tag{3}$$

可得土的电阻率为:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \tag{4}$$

其中  $K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}}$  (5)

由(4)式可知,测出  $MN$  点间的电位差及  $AB$  间的电流,计算出各点间的距离,即可得到土的电阻率。高密度电阻率法是一次布置多个电极,由仪器控制跑极方式,测量地下不同位置点的电阻率的探测方法,其测试示意图 2 所示。

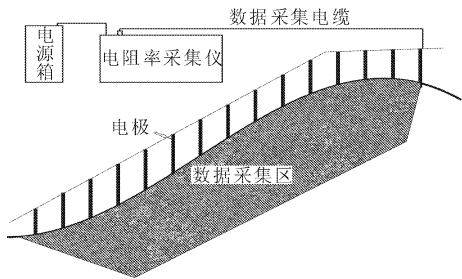


图 2 高密度电阻率法测试示意图

高密度电阻率法测试包括数据的采集和处理两部分。现场测量时,需要根据测线的长度确定电极

的间距,一般为  $1\text{ m} \sim 5\text{ m}$ ,然后将电极与数据采集电缆相连,数据采集电缆连接到由单片机控制的程控式多路电极开关上,可以根据需要自动进行电极装置形式及测点的转换。测量信号储存在数据采集仪主机,测量完毕后,再将数据导入电脑,便可用软件对数据进行处理。

数据采集仪常用的工作模式有 Winner、Schlumberger、Winner - Schlumberger、Dipole - Dipole、pole - pole 等。Seaton 等<sup>[6]</sup>(2002)的研究指出不同的工作模式会间接影响到探测精度、敏感性等,本文选择了精度较高、敏感性较好的 Winner、Winner - Schlumberger 工作模式来进行贵州玄武岩边坡的探测。Winner 模式<sup>[7]</sup>的电极排列规律是(对于 60 道):  $A$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $B$  (其中  $A$ ,  $B$  是供电电极,  $M$ ,  $N$  是测量电极),  $a$  为电极间距,  $AM = MN = NB = na$ ,随着间隔系数  $n$  由最大逐渐减小到最小,四个电极之间的间距也均匀收拢,装置系数可简化为  $K = 2\pi na$ 。该装置适用于固定断面扫描测量,其特点是测量断面为倒梯形,电极排列方式如图 3 所示。

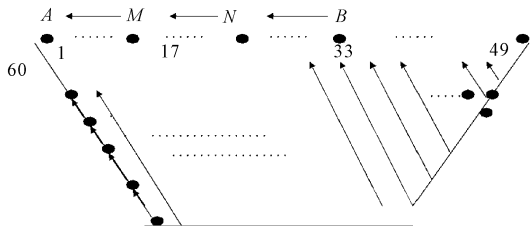


图 3 Winner 模式的电极排列规律

Winner 与 Winner - Schlumberger 均为分层测深,依据隔离系数设置的不同,测深也不同。

2 工区地质概况

选取贵州省毕节至威宁高速路段有代表性的边坡进行探测。工区位于云贵高原乌蒙山脉北段,地势西高东低,附近海拔  $1\,700\text{ m} \sim 1\,920\text{ m}$ ,相对最大高差约  $220\text{ m}$ ,植被较发育。属暖温带季风湿润气候区,年均气温  $13.3^{\circ}\text{C}$ ,极端最高  $37.1^{\circ}\text{C}$ ,极端最低  $-10.1^{\circ}\text{C}$ 。降水量在  $793.1\text{ mm} \sim 984.5\text{ mm}$  之间,年均降水  $851.6\text{ mm}$ ,年平均日照时数  $1\,380.7\text{ h}$ ,年平均相对湿度  $79\%$ 。历年最大风速  $28.0\text{ m/s}$ ,平均风速  $2.1\text{ m/s}$ ,年无霜期平均  $207\text{ d}$ 。灾害气候主要为干旱、倒春寒、冰雹、凝冻等。

场区上覆第四系残坡积( $Q^{\text{el+dl}}$ )粉质粘土,下伏二叠系上统峨眉山玄武岩( $P_2\beta$ )。位于黔北台隆遵义断拱毕节北东向构造变形区毕节向斜北西翼,无

断层通过,地质构造简单。

覆盖层为粉质粘土( $Q^{el+dl}$ ):褐黄色、灰褐色,可塑状,含少量碎石,厚 0~8 m,场区均有分布。基岩为二叠系上统峨眉山玄武岩( $P_2\beta$ ),按风化程度分为强、中风化两层,现分述如下,强风化层:灰黄色,节理裂隙发育,岩体破碎,岩质软,厚度较大,场区均有分布。中风化层:灰绿色,节理裂隙较发育,岩体较破碎,岩质较硬。

场区地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水、基岩裂隙水,赋存于风化裂隙中。地下水埋藏深,地表无泉水出露。场区为地下水补给区,主要靠大气降水补给,大气降水一部分沿岩体节理裂面、岩层层面渗入地下,一部分经坡面汇流后向南东方向的小河径流排泄。

### 3 高密度电阻率法应用

试验用仪器为重庆地质仪器厂的 DUK-2B 高密度电法仪。现场沿边坡均匀布置四条测线,如图 4 所示。电阻率采集仪位于 1 号、3 号和 4 号的左端,位于 2 号线的下端。

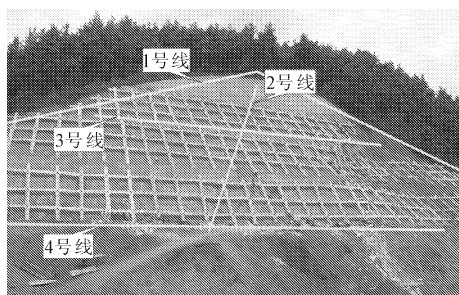


图 4 高密度电法测线布置

探测结果的解释原则:① 基本原则是不同物性差异的岩土体,其电阻率不同;② 地表粘土或含水率高的土体,电阻率值偏低;③ 完整性好、强度大的岩体,其电阻率相对较高,当岩体破碎裂隙发育时,其电阻率值更高;④ 当岩土体中存在大型裂缝或空洞时,出现特别明显的高阻区;⑤ 当岩体裂隙间充填粘土或含水,电阻率值偏低;⑥ 充填型溶洞,特别是粘土充填溶洞,出现低电阻率值异常区<sup>[2]</sup>。

#### 3.1 1 号测线

电极数 60 个,电极间距 5 m,剖面数 12,测得电阻率数据个数 552 个。整体来看(见图 5),右侧电阻率高于左侧电阻率,在沿测线 80 m~125 m 处,有明显的低电阻,可能为含水率或密度较大造成。右侧电阻率相对平均,说明右侧的土质较均匀,但在垂直测线方向存在竖向电阻率增大。在测区的底层存在

一层明显的高电阻率带,可能为基岩层顶部。

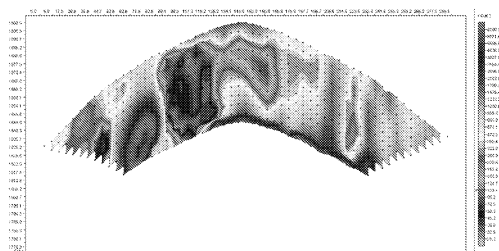


图 5 1 号测线高密度电法反演剖面图

#### 3.2 2 号测线

电极数 30 个,电极间距 4 m,剖面数 12,测得电阻率数据个数 192 个。2 号测线剖面(见图 6)沿坡面方向,可明显看出在坡面阶梯处出现电阻率明显较小的规律,约为 20~50  $\Omega \cdot m$ ,可能原因为阶梯处较平坦,雨后雨水不易沿边坡顺向流失,可以较长期存储,使得覆盖层土的含水率较大,阶梯处往下 10 m 范围内电阻率均较小。沿测线 50 m~73 m 下部呈高电阻,极有可能为基岩层,其基本未风化,孔隙水含量低,整体性好。测量过程中,由于坡顶已用混凝土覆盖,有两个电极无法钉入土中,使得坡顶处坡面电阻率较高。

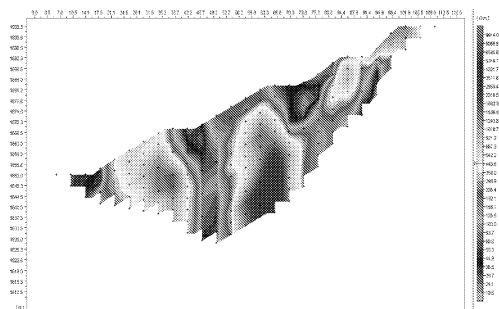


图 6 2 号测线高密度电法反演剖面图

#### 3.3 3 号测线

电极数 30 个,电极间距 2.5 m,剖面数 12,测得电阻率数据个数 192 个。该剖面(见图 7)电阻率普遍较低,右侧大部分土电阻率在 10~60  $\Omega \cdot m$ ,说明该区域风化程度较大,残积土含水率较高,造成其电阻率较低。右侧部分约 3 m 深度内土质较均匀,由于接近地表,水分蒸发较多,相比深部土层电阻率较高。沿测线 23 m~34 m 下部出现明显的低电阻率区,左侧约 3 m 深度内出现电阻率相对较高,在现场实测时发现该区域碎石较多,风化程度较弱,可能为造成其电阻率较高的原因。

#### 3.4 4 号测线

电极数 30 个,电极间距 5 m,剖面数 12,测得电阻率数据个数 192 个。该剖面(见图 8)所测位置位

于坡脚以下,测量时由边坡附近开挖后出露情况看,风化程度较低,电阻率普遍较高,地表下 5 m 深度出现一层较低电阻率带,电阻率随着深度的增加逐渐增大,且部分出现高电阻率区,可能为基岩区。

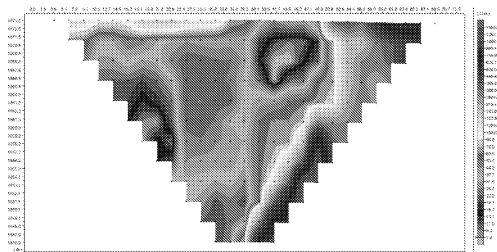


图 7 3号测线高密度电法反演剖面图

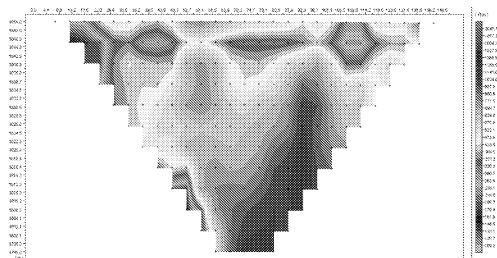


图 8 4号测线高密度电法反演剖面图

纵观四条测线的高密度电法反演剖面图,在垂直测线方向没有明显的成层特性,在沿测线方向成局部高阻分布,无地下裂缝出现。可根据粘土与玄武岩的电阻率参考值进行相关解释,有关电阻率参考值如表 1<sup>[8]</sup>。

表 1 有关电阻率参考值

| 类别  | 电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )  | 类别  | 电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )    |
|-----|-------------------------------|-----|---------------------------------|
| 粘土  | $n\times 0.1\sim n\times 10$  | 玄武岩 | $n\times 10^2\sim n\times 10^5$ |
| 砾岩  | $n\times 10\sim n\times 10^5$ | 石灰岩 | $n\times 10^2\sim n\times 10^3$ |
| 白云岩 | $n\times 10\sim n\times 10^3$ | 花岗岩 | $n\times 10^2\sim n\times 10^5$ |
| 河水  | $n\times 10\sim n\times 10^2$ | 矿井水 | $n\times 1$                     |

4 结 语

(1) 玄武岩残积土边坡分层现象不明显,不同残积土的厚度分布不均。残积土与基岩的电阻率差别较大,可初步确定基岩的分布形态。在横向上不

同位置残积土的风化程度差别较大。

(2) 高密度电阻率法对物性差异越大的地质体越具有很高的分辨率,在发现异常区域后,采用纵向横向测量结合的方式,往往能准确判定异常区域位置,是辅助常规钻探、标贯及触探的较好手段。

(3) 高密度电阻率法在探测地下含水率较大的区域,现象会比较明显,地表水下渗又是造成滑坡的主要因素,因此高密度电阻率法用于边坡勘察有优越性。残积土与基岩的电阻率差异也较大,可以利用此种差异确定基岩的分布形态。

(4) 高密度电阻率所测为视电阻率,受到多种因素的影响,电阻率数值存在重叠区域,差别很大的土或岩石其电阻率值可能一样,因此不能像常规的岩土参数一样给出明确的解释。在运用电阻率法研究岩土的性质时,需联合其它测试手段进行分析。

参考文献:

[1] 曾 玉,徐宏武,易 俊,等.高密度电法在公路边坡探查中的应用[J].公路与汽运,2009,(1):92-94.

[2] 黄建秋,刘宝山,王昇泉,等.高密度电阻率法在阆中古城墙探索中的应用[J].物探与化探,2010,34(6):754-758.

[3] 何红前,于维刚,王佳运.高密度电阻率法在矿区岩溶地质勘察中的应用[J].路基工程,2009,143(2):93-95.

[4] 黄利成,宋矿银.高密度电法物探技术在玄武岩地区勘察中的应用[J].工程勘察,2009,(S2):482-485.

[5] 赵明阶,张 尧,汪 魁,等.基于温度场和电阻率成像的土石坝渗漏诊断试验研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):1-4.

[6] SETON W J, BUDBEY T J. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002,(51):21-41.

[7] 柏 巍.裂隙性红黏土的工程特征及其电导特性试验研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2011.

[8] 常士骠,张苏民.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:115.