

# 滑坡体快速探测新技术应用研究

李金都<sup>1,2</sup>, 周志芳<sup>1</sup>, 石昆法<sup>3</sup>, 宋汉周<sup>1</sup>

(1. 河海大学 土木工程学院, 南京 210098; 2. 黄河水利委员会设计研究院, 郑州 450003;  
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100717)

**摘 要:** 通过工程实例, 就瞬变电磁方法 (TEM) 和可控源音频大地电磁法 (CSAMT) 在滑坡体快速探测中的应用问题进行了研究。结果表明, 通过瞬变电磁方法和可控源音频大地电磁法的使用, 再加以适量的钻探施工, 可以实现对滑坡体快速勘探的目的。

**关 键 词:** 滑坡体; 瞬变电磁方法; 可控源音频大地电磁测深方法

**中图分类号:** TV 441

**文献标识码:** A

## Application of transient electromagnetic method and controlled source audio magneto telluric to prospecting landslide rapidly

LI Jin-du<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhi-fang<sup>1</sup>, SHI Kun-fa<sup>3</sup>, SONG Han-zhou<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Reconnaissance, Planning, Design and Research Institute, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100717, China)

**Abstract:** Based on the experience in prospecting landslide at Baoquan pumped storage reservoir, the paper studies the feasible problem that the application of TEM and CSAMT to prospecting landslide rapidly. Analytical results show that the TEM and CSAMT can be applied to prospecting landslide rapidly by a small quantity of drilling for design of engineering.

**Key words:** landslide; transient electromagnetic method; controlled source audio magneto telluric

## 1 引 言

滑坡体稳定性定量评价需要准确的地质资料, 而确定滑面的准确位置是工程地质勘察工作中的首要任务。常规的勘察方法是通过布置较多的钻孔实施钻探, 对采取的岩芯进行鉴定。这种方法对于确定滑面是必不可少的<sup>[1~7]</sup>。众所周知, 钻探工作的实施往往需要耗费大量的时间和经费, 特别是对于一些正在施工的工程项目, 即使有钻探经费保证但勘探时间有限, 可能不允许实施较多的钻孔或者勘探的场地对钻孔实施也有限制, 这就需要研究快速勘探滑坡的技术。其基本技术思路是运用先进的物探方法快速查清滑坡的地质情况, 且在此基础上布置适量的勘探孔, 进行勘探, 起到验证物探结果、收集地质信息、进行室内外相关的试验, 达到查明

滑坡体地质条件以获得滑坡体稳定性计算所必须的物理力学参数对滑坡体进行定量评价的目的。在此技术作业流程中, 物探新方法的运用是最为关键的环节, 笔者结合从事水利水电工程大型滑坡体快速勘察的实践, 对此问题进行研究。

## 2 物探新方法的选择

### 2.1 TEM 方法

瞬变电磁方法属于时间域电磁感应法 (TEM), 在 20 世纪 90 年代以前它主要用于寻找金属矿床、煤田、石油、燃气等领域, 其基本原理是利用不接地回线 (或电偶源) 向地下发送一次脉冲磁场 (或电场), 即在发射回线上发送一个电流脉冲方波, 方波下降的瞬间, 将产生一个能向地下传播的一次磁场。在一次磁场的激励下, 地质体将产生涡流, 其

涡流大小取决于地质体的导电程度。在一次场消失后, 涡流不能立即消失, 它将有一个过度过程 (衰减过程), 该过度过程又产生一个衰减的二次磁场向地表传播, 地表仪器的接收回线或磁探头接收二次磁场。该二次磁场的变化将反映地下地质体的电性分布情况。在接收机中按不同的延迟时间测量二次感应电动势, 这样就得到了二次磁场随时间衰减的特性。通过计算程序可得到电阻率反演拟断面图, 进而可以对地下深部地质情况进行判断。瞬变电磁法的优点是搬运方便、地表场地适应强、工作效率高<sup>[8]</sup>。

## 2.2 CSAMT 方法

长期以来, 人们对工程区浅层地表的地质情况可以运用多种勘探手段解决所关心的工程地质和水文地质问题, 但对于深部地质情况的了解一直缺乏比较有效的方法。在地球物理探测中, 电法勘探由于其场源的多变性、方法的有效性, 已被人们所重视。其中, 可控源音频大地电磁测深 (CSAMT) 是 20 世纪 80 年代后期兴起的一种电法新技术, 该法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组, 导出了电场  $E$ 、磁场  $H$  与电阻率  $\rho_s$  的关系式:

$$\rho_s = \frac{|E|^2}{5\beta|H|^2} \quad (1)$$

式中  $\beta$  为频率(Hz)。

式(1)说明, 在地面上测定的  $E$  与  $H$  之比具有阻抗概念, 可获得地电阻率  $\rho_s$ , 称之为卡尼亚电阻率。又根据电磁波的趋肤效应理论, 可导出趋肤深度公式:

$$H \approx 256 \sqrt{\frac{\rho}{\beta}} \quad (2)$$

式中  $H$  为探测深度(m);  $\rho$  为电阻率( $\Omega \cdot m$ );  $\beta$  意义同前。

从式(2)可知, 当地表电阻率固定时, 电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比。高频时, 探测深度浅; 低频时, 探测深度深。因此, 可以通过改变发射频率来改变探测深度, 达到探测的目的。

20 世纪 80 年代末, 加拿大凤凰公司根据这一理论研究制造了 CSAMT 的测量仪器并在全球推广应用。CSAMT 技术测量系统包括一套发射系统和接收系统以及多套相关的数据处理软件系统。

CSAMT 法使用可控制的人工场源, 测量参数为电场与磁场之比而得出的卡尼亚电阻率, 同时,

基于电磁波的趋肤深度原理, 利用改变频率进行不同深度的电测深。因此, CSAMT 法在工作中具有如下优点: 适应于各种场地、工作效率高、一次发射可以同时接收 7 道电场  $E$  和 1 道磁场  $H$ ; 抗干扰能力强; 勘探深度范围大, 最大可达 1 000 m 以上; 横向分辨率高, 可灵敏地发现地质体的异常变化; 高阻屏蔽作用小, 可穿透高阻层<sup>[9-10]</sup>。正是由于其具有这些优点, 使它在 20 世纪 90 年代末迅速在世界各地的工程勘察中得到了推广和应用。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

宝泉抽水蓄能电站位于河南省新乡市辉县薄壁镇大王庙以上 2.4 km 的峪河上, 电站装机容量为 120 MW, 由峪河左岸东沟为上库、已建成的宝泉水库为下库和引水发电系统等组成。上库大坝坝高 93.9 m, 总库容为 756 万  $m^3$ 。万宝泉抽水蓄能电站距郑州市 130 km, 新乡市 45 km, 交通十分便利。目前宝泉抽水蓄能电站正处于施工阶段。

### 3.2 滑坡体概况

工程区位于太行山东南麓山区与豫北平原的交接地带, 上、下水库高差达 540 m 左右。区内地质条件较复杂。区内地层主要有太古界登封群、元古界汝阳群、早古生界寒武系。汝阳群石英砂岩致密坚硬, 抗风化能力强、其裸露边坡一般形成 150 余米高的绝壁, 分布于山体的底部, 登封群中主要发育走 NE30°~50°、近直立的节理; 汝阳群中主要发育走向 80°~90°的近直立的节理; 寒武系中主要发育走 NW300°~310°的节理。

寒武系毛庄组 ( $\epsilon^1_x$ ) 底部为页岩, 形成缓坡, 顶部灰岩形成陡坎和绝壁。徐庄组 ( $\epsilon^2_x$ ) 岩性主要为页岩, 一般形成缓坡。毛庄组和徐庄组一般分布于山体的中部。张夏组 ( $\epsilon^2_z$ ) 灰岩、白云岩出露于山体顶部, 呈长条状分布, 最大形成 180 余米的绝壁。山高谷深, 切割强烈, 多悬崖绝壁, 给勘探工作带来了很大不便。

滑坡体出露地层从西向东依次为  $\epsilon^1_m$ ,  $\epsilon^2_x$ ,  $\epsilon^2_z$ 。除西北部表层及局部岩石较破碎,  $\epsilon^2_z$  灰岩表层已胶结外, 其余基本保持原岩结构。据个别钻孔的勘探资料,  $RQD$  值一般为 40%~70%, 局部孔段小于 30%。总体表现为向 E~NE 倾斜的单斜构造。

为了方便宝泉抽水蓄能电站施工, 需要修建一条工程施工公路, 公路全长 12.4 km, 在 k6+710~k6+850 段存在 1# 滑坡体, 总方量为  $10 \times 10^4 m^3$ 。在宝泉抽水蓄能电站引水发电系统下库进/出水口的

上方存在 2<sup>#</sup> 古老滑坡体, 滑坡体长 550~800 m, 宽为 260~350 m, 最大厚度为 210 m, 平均为 110 m, 总方量为 2100 万 m<sup>3</sup>, 距今 14~21 万年, 地质概况见表 1。

表 1 滑坡体地质概况表

Table 1 The geological features of the landslide

| 滑体<br>编号       | 滑体<br>性质                       | 滑体<br>物质                          | 滑床<br>岩性     | 滑面<br>特征                             | 滑带赋水情况         |
|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------|
| 1 <sup>#</sup> | 坡积、崩积<br>物沿强风<br>化基岩面<br>变形并滑动 | 第四系坡<br>积、崩积块<br>石及壤土             | 古老变质<br>片麻岩  | 后缘陡立、<br>中间平缓<br>基本与基<br>岩强风化<br>面一致 | 滑带<br>干燥       |
| 2 <sup>#</sup> | 古老岩体<br>塌滑推移<br>形成滑坡           | 寒武系砂岩、<br>白云岩、灰岩<br>及页岩与泥<br>灰岩互层 | 古老变质<br>石英砂岩 | 滑面后缘陡立,<br>总体呈圈椅状                    | 滑带<br>富水<br>饱和 |

### 3.3 TEM 法和 CSAMT 法探测

沿着 1<sup>#</sup> 滑坡体的滑动方向(I 线, 长度为 134 m) 和垂直滑动方向(II 线, 长度为 87 m) 分别布置了各一条 TEM 法探测线, 工作使用 20 m×20 m 和 50 m×50 m 方形线圈, 发射频率分别采用 625, 25, 225 Hz。对 1<sup>#</sup> 滑坡体进行了快速探测得到了图 1 所示的电阻率反演拟断面图。

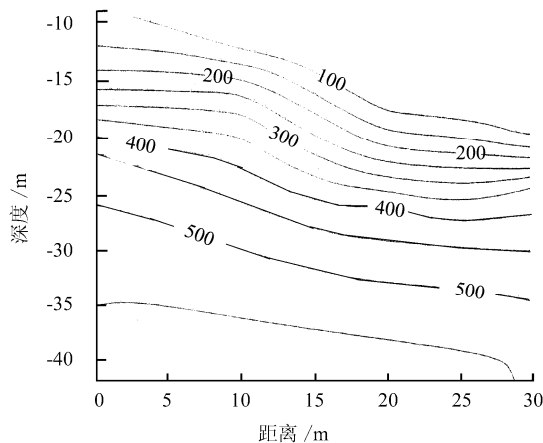
图 1 1<sup>#</sup> 滑坡体 TEM 法电阻率测深曲线

Fig.1 Isolines of electrical resistivity of landslide No.1 by TEM

根据前期工程勘察资料, 第四系坡积、崩积块石及壤土波速为 500 m/s 左右, 电阻率为 100~200 Ω·m, 其下伏的基岩片麻岩波速在 3 000 m/s 左右, 电阻率为 450~600 Ω·m, 据此可解释出 1<sup>#</sup> 滑坡体滑面的情况, 见图 2。滑面埋深为 12.5~35 m, 通过探槽验证 TEM 法的探测结果与实际情况非常

吻合, 说明 TEM 法探测滑坡的深部情况是可行的。

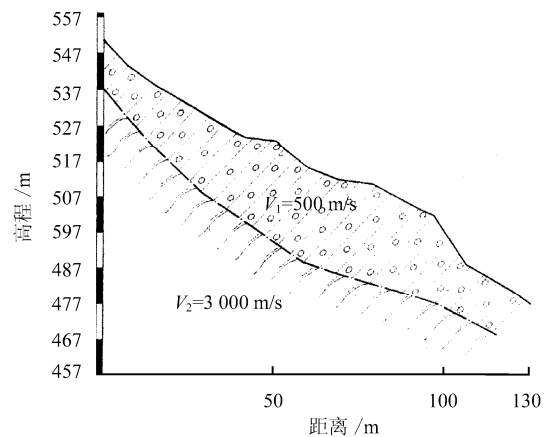
图 2 据 TEM 法推测的 1<sup>#</sup> 滑坡体地质剖面

Fig.2 Prospecting results of landslide No.1 by TEM

沿着 2<sup>#</sup> 滑坡体的滑动方向布置了 2 条 CSAMT 法探测线 (A 线和 B 线), 其中 A 线长度 134 m, B 线长度为 400 m。根据实测数据, 分别进行了电阻率断面图、滤波图和反演图的数据计算, 计算由事先编好的程序完成, 程序可对测量数据进行近场改进、静态改正、正反演计算, 并可按照需要绘制不同频率、不同深度的频率切片图, 供地质分析使用, 最后可根据解释结果 绘制出滑坡体的立体分布图。图 3 为绘制的 CSAMT 反演成果图, 可以看出, 2<sup>#</sup> 滑坡体的滑面埋深及其形态(图中的阴影部分), 滑体的底界面为锅底状并略向山体内侧倾斜。图 4 为根据 A 线和 B 线所控制区域的探测信息恢复出的滑坡体的立体分布图。通过在龟山滑坡体上布置的 4 个钻孔 GZK1, GZK2, GZK3, GZK4, 钻探结果说明, CSAMT 法探测的 2<sup>#</sup> 滑坡体的滑面埋深、空间形态基本是准确的。

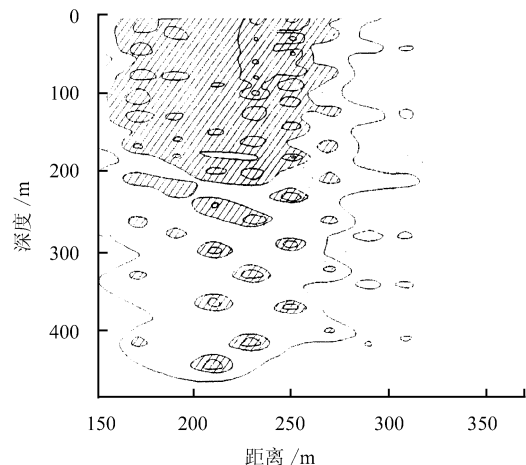
图 3 2<sup>#</sup> 滑坡体 CSAMT 法电阻率测深曲线

Fig.3 Isolines of electrical resistivity of landslide No.2 by CSAMT

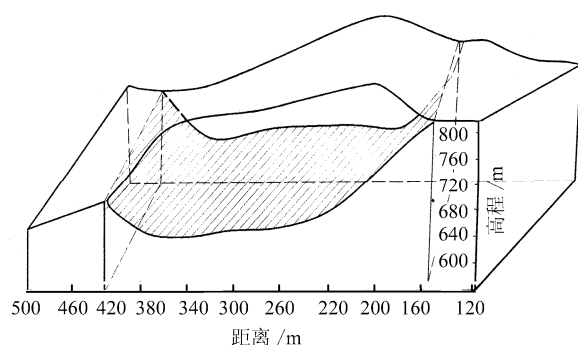


图 4 根据探测信息恢复出的滑坡体的立体分布图  
Fig.4 Prospecting results of landslide No.2 by CSAMT

## 4 结 论

滑坡是工程实践中经常遇到的工程地质问题，滑坡的工程勘察方法也一直是工程地质勘察方法研究的重要内容之一<sup>[11~17]</sup>。通过河南宝泉抽水蓄能电站两个滑坡快速进行探测的实例，说明瞬变电磁的方法（TEM 法）和可控源音频大地电磁测深的方法（CSAMT 法）是可以用于滑坡探测的，两种方法具有较为快速和较为准确的特点，在两种方法探测结果的基础上，再结合地质经验进行判断并通过布置适量的钻孔，可以快速完成对滑坡体的野外勘察工作，为地质分析提供准确的基础性成果。

## 参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] GB50287 - 99, 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [3] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [4] 张发明. 岩质高边坡锚固问题研究[J]. 河海大学学报, 1999, (11): 74 - 76.
- [5] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [6] 祝玉学. 边坡工程可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [7] 姚耀武, 陈志伟. 土坡稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1994, (2): 80 - 87.
- [8] 母光荣, 郭玉松. 水利水电物探新技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [9] 张晓东, 张虎生, 朱伟忠. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. 工程勘察, 2001, (4): 64 - 66.
- [10] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [12] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [13] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slope[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [14] Huang C C, Tsai C C. New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(10): 917 - 927.
- [15] 张咸恭, 王思敬, 张倬元. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 216 - 238.
- [16] 刘涌江, 胡厚田, 赵晓岩. 高速滑坡岩体碰撞效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 255 - 260.
- [17] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼, 等. 应用三维快速拉格朗日法进行三峡船闸高边坡锚固稳定与机理研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 68 - 74.