

# 堤坝滑坡灾害的探地雷达应用研究

何开胜<sup>1</sup>, 章为民<sup>1</sup>, 王国群<sup>2</sup>, 贾学天<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究所土工研究所, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省工程物理勘察院, 江苏 南京 210008)

**摘要** 通过太浦河泵站滑坡工程实例, 尝试应用探地雷达进行滑动面的探测, 探讨了探地雷达辨别滑坡区、滑动面、有机质夹层的探测机理, 分析推断了软土层分布、有机质夹层位置、滑坡区域、滑动面的起点、走向和出溢处。探测结果表明, 在一定条件下结合地质勘察资料, 利用探地雷达对堤坝滑动面进行探测是有效的。

**关键词** 堤坝; 滑坡; 探地雷达; 滑动面探测

中图分类号: TU413.6<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)02-0036-04

**Application of GPR to detection of landslide on embankments** // HE Kai-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Wei-min<sup>1</sup>, WANG Guo-qun<sup>2</sup>, JIA Xue-tian<sup>2</sup> (1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Engineering Geophysical Exploration Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

**Abstract**: In combination with a landslide project at the pumping station on the Taipu River, in which the Ground Penetrating Radar (GPR) was used for detection of the sliding surface, the mechanism of GPR in distinguishing the slide area, sliding surface, and organic interlayer was discussed, and the distribution of soft soil, the location of the organic interlayer, the slide area, and the initial point, trend, and overflow point of the sliding surface were deduced. The results show that GPR, combined with geological data, is effective for detection of sliding surfaces on embankments under certain conditions.

**Key words**: embankment; landslide; GPR; sliding surface detection

边坡稳定是土力学的一个重要课题, 世界上每年在边坡治理和防护上投入了大量的人力和物力。但边坡失稳在各国仍经常发生, 原因是边坡的计算理论和设计方法还不很成熟。因此, 有必要加强滑坡形成、发生和发展的机理研究, 滑动面的探测和确定是其基本内容之一<sup>[1, 2]</sup>。老滑坡的滑移面埋藏深度及特征可通过钻探、物探、洞探等手段测得, 而潜在滑移面的形态一般受层面、软弱夹层、地下水浸润带以及节理裂隙等软弱结构面的控制。只要对可能发生滑坡的斜坡进行详细的工程地质调查, 滑移面剪出口位置及形态也是不难划出的。滑移面的埋藏深度和形态划出后, 最好用数学、力学的方法(有限单元法、极限平衡法)进行验算修改, 以期得到最可能的滑移面位置<sup>[3]</sup>。

以往边坡滑动面多通过在现场埋设测斜管<sup>[4]</sup>进行长期监测来寻找, 这种方法费工费时, 不仅成本高, 而且只能做定点测量, 难以在宏观上把握滑动的范围和方向。本文通过太浦河泵站滑坡工程实例, 介绍探地雷达对滑动面的探测情况, 并进行效果分析。

## 1 堤身土质和滑坡过程

### 1.1 工程概况

太浦河泵站工程位于江苏吴江市太浦河南侧, 主要功能是在枯水期抽引东太湖水, 提高上海市半数以上人口的生活及企事业单位用水质量。工程设计流量 300 m<sup>3</sup>/s, 投资 2.76 亿元。

太浦河泵站进水渠全长 487.7 m, 为梯形明渠, 堤顶设计高程 7.00 m, 渠底高程 -2.50 m, 渠底宽 70 m, 渠道边坡 1:3, 在 3.20 m 处设置宽 5 m 的马道, 如图 1 所示<sup>[5, 6]</sup>。渠道边坡采用分段衬砌, 高程 -2.50 ~ 2.10 m 采用浆砌块石, 高程 2.10 ~ 3.20 m 采用干砌块石加水生植物生态护坡, 高程 3.20 m 至堤顶采用生态护坡。渠底根据流速的分布, 部分采用浆砌块石护底。

### 1.2 地质条件

进水渠原地面高程在 +5.00 m 左右, 堤身土质从上到下依次为: 填土及耕植土、粉质壤土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土<sup>②</sup><sub>3</sub>。强度最低, 厚度变化较大, 且含有机质薄层, 是影响

基金项目: 国家计划委员会高技术应用部门发展项目资助

作者简介: 何开胜(1963—), 男, 安徽枞阳人, 教授级高级工程师, 博士, 从事软土地基处理、土工数值分析和灾害防治研究。

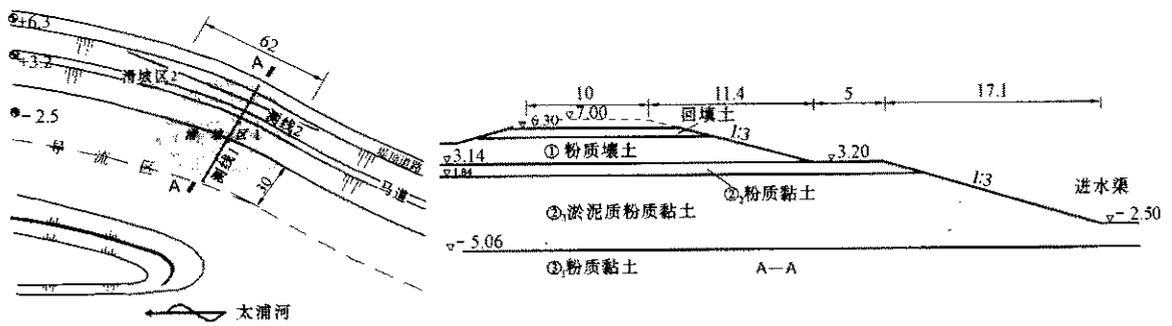


图1 堤坝滑坡位置及开挖断面(单位:m)

进水渠岸坡稳定的主要土层.该层最厚处达6.9m, 进水渠滑坡部位的渠底完全切进该层土.

### 1.3 滑坡过程

泵站渠道用下挖、上填相结合来形成,其中集水井部位挖深达17.2m,进水渠部位挖深7.5m,开挖时采用轻型井点降水,开挖渠道的一部分弃土就堆在堤顶.从开挖进水渠槽,至2001年10月中旬形成完整梯形断面,堤顶堆土高1.3m,均未出现边坡失稳现象.但2001年11月3日,在滑坡区下游侧衬砌坡面块石时,0413.00—0475.00m段突然发生了已开挖边坡的滑动破坏.滑坡范围沿堤轴线方向长约62m,滑坡引起的坡身土体向堤脚外堆移了30m,坡面上顺堤轴方向出现宽深不一的较多纵向裂缝.堤脚的滑动面为自然状态,未出现隆起现象.此后1个多月,在此滑坡区下游约20m处又出现了一次范围较小的滑坡.滑坡区位置、范围和土层分布见图1,滑坡现场见图2.

## 2 探地雷达原理和探测机理

### 2.1 探地雷达原理和设备参数选择

探地雷达利用高频电磁波(10 MHz~1 GHz),以脉冲形式通过发射天线定向地送入地下,雷达电磁波在地下介质中传播时,当遇到存在电性差异的地下介质或目标时,发生反射,返回地面后由接收天线接收.对接收到的雷达电磁波进行分析处理,依据波形、强度、几何形态等因素来确定地下目标体的性质

和状态.

本次使用的设备为美国产SIR-2型地质雷达系统,采用100 MHz天线,雷达电磁波记录深度范围为200~250 ns.电磁波传播速度依据钻孔土层分界面标定为0.08 m/ns.

### 2.2 滑动面特征和探测机理

堤坝滑坡后通常伴随有大量裂缝,在滑坡体的顶部因拉应力形成张裂隙,趾部形成鼓张缝,两侧为羽状裂缝,在滑坡体的内部因土体运动则出现较多裂隙.滑坡体底部的滑动面因受较强挤压和剪切力作用,土层的含水量和矿化度增高了<sup>[7]</sup>,从而使滑面的介电常数与导电率相对于上下介质差异变大,形成较强电磁波反射面,这是探地雷达探测滑坡面的主要依据.

### 2.3 软土层位和有机质夹层的探测机理

各种软土层的颗粒成分、组成、孔隙比、含水量等存在一定的差异,当电磁波遇到这些物性差异土层的界面时便发生反射,由反射波的特征可判断它们之间的层位.同理,有机质土通常含有腐殖质,含水量和孔隙比较大,使其有别于一般软土层,这些物性差异引起的电性差异使得探地雷达的探测成为可能.

## 3 滑坡面的雷达波形解析

探地雷达探测位置参见图1.在滑坡区布置了纵横测线各一条,布线时适当考虑到滑坡边缘区,长度分别为120 m和50 m.探测时导流区滑坡顶面已

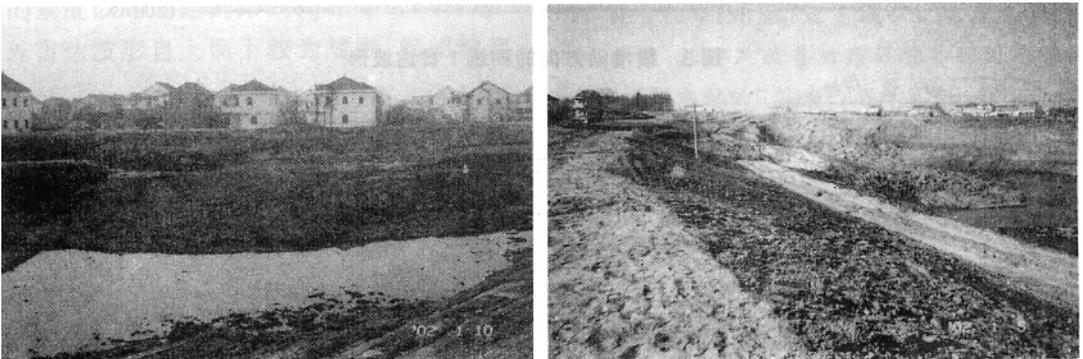


图2 太浦河大堤滑坡现场图片

被推土机找平,地面高程在 0.50~2.70 m,地下水面高程在 -1.00 m。

### 3.1 软土层位和有机质夹层的成果解析

以测线 1 所见雷达波形(图 3)来分析,从中可明显看出 4 种波形特征,结合地质勘察资料可推断出 3 个层位:第一层(0~20 ns)为地表松散找平层,波形视周期小,振幅较小,同相轴连续性好;第二层(20~180 ns)为淤泥质粉质黏土,该层受到地下水、有机质夹层、滑坡土体移动等影响,波形相对较复杂;第二层中 21~100 ns 为地下水位以上部分,该层顶界面出现反射波同相轴不连续,层内反射波视周期明显增大,振幅明显减弱,介质相对均匀;100~180 ns 左右为地下水位以下部分,波形与上层基本一致,只是视周期变小,振幅稍有增大;第三层(约 180 ns 以下)为粉质黏土层,反射波视周期变小,振幅比其上的淤泥质粉质黏土层小。

图 4 中淤泥质粉质黏土层内,在 100 ns 记录长度附近存在波形振幅较大的暗(黑)色带异常区域,特征是反射波视周期短、振幅较大,明显区别于周围的雷达波形,推断为有机质夹层。这与渠道开挖时,坡面上肉眼明显可见的深黑色软土夹层(即有机质土)深度基本吻合。

### 3.2 顺滑坡向土层的成果解析

测线 1 位于滑坡区中心,顺着滑坡方向,测线起始于堤顶下,该处已挖除了堤顶多圈环状开裂土体,进行了场地平整。图 3 为其雷达波形图,从图中可以看出:

a. 雷达波形杂乱、同相轴不连续等显著变化主要集中在 100 ns 以浅的区域,而其下波形基本连续、规则,由此推断滑坡体位于 100 ns 以浅区域内。

b. 在测尺 10 m 附近,左右两侧土层的雷达波形信号截然不同,在测尺 10~13 m 处有一个较大的裂缝异常,且层位错动明显,推断为探测线上的滑动面起点。测尺 10 m 左边波形完整,层位清晰,结合地质勘察资料,推断为天然原状土层;右边波形紊乱,特别是 100 ns 以浅部分变化很大,推断为滑坡体内受到很大扰动的土层,进一步对比 80~100 ns 间位于测尺 10 m 处的左右波形,可推断滑动面深度在 100 ns,位置从测尺 10 m 附近开始向右约呈水平状。

c. 在测尺 13~35 m 段,80 ns 附近断续出现振幅较大的波形(黑点状),推断此区间原波形类似于 10 m 测尺以左、深 80~100 ns 间的完整波形,现因处于滑动面位置,受土体运动和挤压作用,导致波形同相轴中断或错动。同时,该区段地表裂缝众多并向下延伸,裂缝走向有从左向右倾斜的趋势,推断为滑坡体内土体受底面向右的剪切力拉动、逆时针转动并产生裂隙的结果。

d. 35 m 以右,雷达图像表现为松散、扰动的土质特征,推断为左边滑体对其挤压、移动形成的表面裂隙。

根据以上分析推断,绘制的地质剖面 and 滑动面位置如图 4 所示。推断的滑动面为沿有机质夹层发生的非圆弧滑动面,它解释了滑坡前址处土体无隆起、土体水平前移达 30 m 的现象。

本工程滑坡后,对滑坡区内外土体进行了静力触探试验和十字板强度试验,对施工期边坡稳定进行了圆弧滑动和非圆弧滑动计算,结果表明边坡稳定受含有有机质夹层的非圆弧滑动控制,当井点降水失效、存在渗流时安全系数为 1.01,处于失稳的临界状态。静力触探试验测得马道下滑动面位置在高

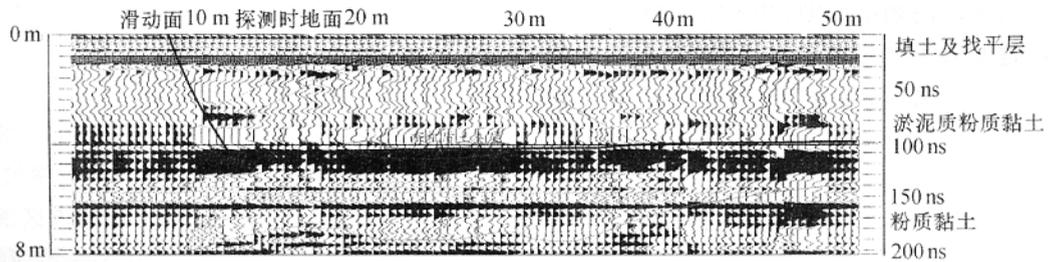


图 3 沿滑动方向的测线 1 雷达波形

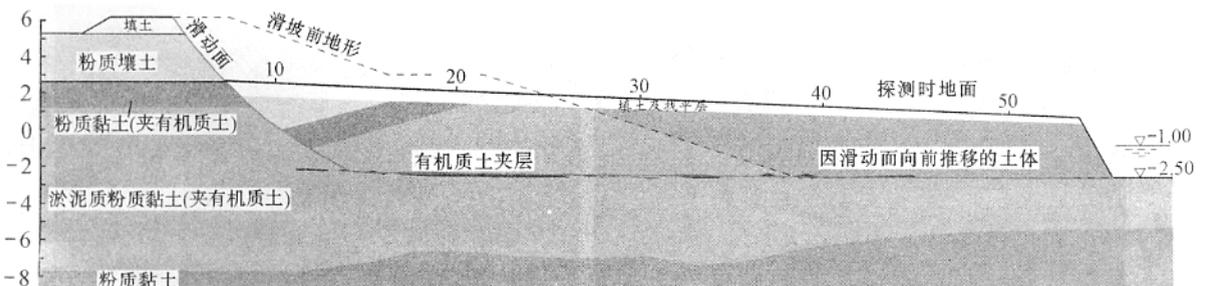


图 4 测线 1 地质雷达探测成果推断示意图(单位:m)

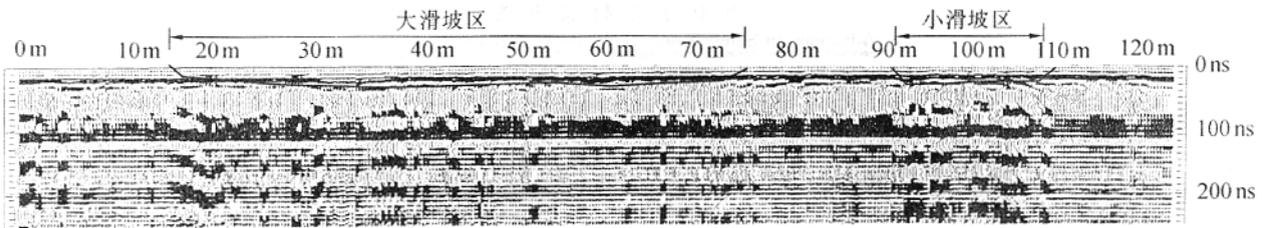


图5 垂直于滑动方向的雷达波形

程 -2.44m处,这与雷达探测的滑动面位置基本吻合。

### 3.3 垂直于滑坡向土层的成果解析

图5为垂直于滑坡方向测线2的雷达波形图。该测线因位于滑坡顶部区,滑动面深度过浅,而所用记录长度又过大,所以波形信号不明显。尽管如此,仍可以看出:①100 ns附近的暗色带有有机质夹层。②测尺0~15 m,73~90 m,110~120 m区间,雷达波形自上而下较规则,同相轴连续性较好。结合实际滑坡位置,推断该区域为滑坡区外。③测尺15~73 m,90~110 m区间,雷达波形较紊乱,同相轴连续性中断严重。特别是浅层区域波形同相轴的紊乱以等间距的形式向深层区域传递,原因是滑坡体内含有大量裂缝、松散土体,与下伏介质存在较大物性差异,界面反射波信号强,产生多次反射所致。结合实际滑坡位置,推断这两个区域分别位于大、小两次滑坡区内。

## 4 结论

应用探地雷达探测堤坝滑坡还属于探索阶段,本次对太浦河工程滑动面和有机质夹层的探测结果表明,在一定条件下,结合地质勘察资料,探地雷达可对堤坝滑动面进行有效地探测,发挥了浅层探测精度高、速度快、连续可视化的优势。虽然本次探测对象是已发生滑坡的工程,其原理和方法同样可用于潜在滑坡或正在滑坡的工程,但需加强研究,以完善滑坡的预测和预报方法。

a. 探地雷达辨别滑坡区与非滑坡区的依据是滑坡区存在大量裂缝,它引起雷达波的多次反射,形成波形紊乱、同相轴连续性中断。特别是浅层区域波形同相轴的紊乱以等间距的形式向深层区域传递。而滑坡区外雷达波形自上而下较为规则,同相轴连续性较好。

b. 探地雷达探测滑动面的依据是滑动面受较强挤压和剪切力作用,土层的含水量和矿化度增高了,使滑动面的介电常数与导电率相对于上下介质差异变大,形成较强电磁波反射面。

c. 探地雷达探测有机质土的依据是其含有腐殖质,含水量和孔隙比较大,使其有别于一般软土层,这些物性差异引起了电性差异。

d. 根据以上特征,推断了太浦河泵站工程软土

层分布,有机质夹层位置,滑坡区域,滑动面起点、走向和出溢处。本次滑动面为沿有机质夹层发生的非圆弧滑动面,与滑坡前址处土体无隆起、土体水平前移很多的现场景象相吻合。

### 参考文献:

- [1] 文宝萍. 滑坡预测预报研究现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 1996(1): 86—92.
- [2] 李天斌, 陈明东. 滑坡预报的几个基本问题[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 200—206.
- [3] 王成华. 大型水库滑坡研究的几个问题[A]. 见: 滑坡文集编委会. 滑坡文集(第九集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1992. 97—102.
- [4] 邬晓岚, 涂亚庆. 滑坡监测方法及新进展[J]. 中国仪器仪表, 2001(3): 10—13.
- [5] 郑海龙. 太浦河泵站工程深基坑的设计与施工[J]. 上海水务, 2003(1): 35—37.
- [6] 王为人. 太浦河泵站工程深基坑设计方案选择与实施[J]. 浙江水利科技, 2002(6): 11—14.
- [7] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 119—127.

(收稿日期 2004-08-31 编辑 高建群)

### · 简讯 ·

## 洪家渡水电站简介

洪家渡水电站(见封面照片)是国家重点建设工程项目,为国家“西电东送”首批开工项目之一,是贵州省的标志性重点工程。洪家渡水电站位于贵州省黔西县(左岸)与织金县(右岸)交界的乌江干流北源六冲河下游,距贵阳市158 km。该电站以发电为主,兼顾防洪、供水、养殖、旅游及改善生态环境和航运等综合效益,是乌江梯级电站的“龙头”,总库容49.47亿 m<sup>3</sup>,装机容量60万 kW,总投资49.27亿元。

洪家渡水电站2000年11月8日正式开工建设;2001年10月15日截流,2004年7月18日第一台机组正式投产发电,这是贵州省“西电东送”工程继去年引子渡水电站、乌江渡扩机工程投产后,开发乌江进程中奏响的又一曲凯歌。该工程将于2005年上半年全部竣工。

(李红灵供稿)