

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.27

综合物探技术在堤防渗漏抢险探测中的应用

谭彩^{1,2,3}, 潘展钊^{1,2,3}, 袁明道^{1,2,3}, 史永胜^{1,2,3}, 刘建文^{1,2,3}, 林悦奇^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省大坝安全技术管理中心, 广东 广州 510610; 3. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510610)

摘要: 2017年受台风影响广东省某堤防部分堤段损毁,总缺口长175 m,灾后相关部门迅速对缺口堤段进行修复。2018年4月,修复堤段出现渗漏,严重威胁堤防安全。物探检测法是堤防渗漏抢险探测的最优手段,但目前物探技术均存在多解性和局限性,为弥补单一探测方法的不足,准确探明堤防渗漏险情,采用高密度电法和探地雷达综合物探技术对险情堤段进行探测,并结合现场检查和设计资料进行综合分析。结果表明:高密度电法和探地雷达综合物探技术能有效探测堤防渗漏险情;推测险情段桩号K0+618和桩号K0+642 m两处存在渗漏通道,堤防浸润界面深约3 m。

关键词: 综合物探技术; 探地雷达; 高密度电法; 堤防渗漏; 抢险探测; 险情分析

中图分类号:TV871.3 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)05-0184-05

Application of comprehensive geophysical prospecting technology in emergency detection of dike leakage

TAN Cai^{1,2,3}, PAN Zhanzhao^{1,2,3}, YUAN Mingdao^{1,2,3}, SHI Yongsheng^{1,2,3},
LIU Jianwen^{1,2,3}, LIN Yueqi^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China;
2. Guangdong Dam Safety Technology Management Center, Guangzhou 510610, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Hydrodynamics, Guangzhou 510610, China)

Abstract: A section of a dike in Guangdong Province were damaged with a total length of 175 m affected by typhoon in 2017, and the damage was quickly repaired after the disaster. In April 2018, the leakage occurred in the repaired dike section, which seriously threatened the dike safety. Geophysical prospecting method is the best technique for emergency detection of embankment seepage; however, it has the problem of nonunique solutions and many limitations. In order to solve the shortcomings of this single detection method so as to accurately detect embankment seepage, the high-density electrical method and ground penetrating radar integrated geophysical prospecting technology were used to detect the dangerous embankment section, and the field inspection and design data were combined for a comprehensive analysis. The results showed that high density resistivity method and ground penetrating radar integrated geophysical prospecting technology can effectively detect the seepage danger of embankment. It is speculated that there are two seepage channels in the dangerous section, located in pile number K0+618m and K0+642m, and the depth of the seepage interface of embankment is about 3m.

Key words: comprehensive geophysical prospecting technology; ground penetrating radar; high density resistivity method; river embankment leakage; emergency detection; dangerous condition analysis

1 研究背景

堤防是防洪体系的重要组成部分,是落实河长

制保障水安全的关键内容之一,目前我国堤防总长度超 40×10^4 km,其中绝大部分为早期人工填筑而成,质量相对较差,汛期高水位或台风等极端条件下

收稿日期:2019-03-30; 修回日期:2019-05-30

基金项目:广东省水利科技创新项目(2014-09); 深圳市水务发展专项资金科技创新项目(20170103)

作者简介:谭彩(1992-),男,湖南衡阳人,硕士,工程师,主要从事水利工程安全评估工作。

其薄弱位置极易发生险情,严重威胁人们生命财产安全^[1-2]。因此,如何在险情发生初期,快速准确探明堤防渗漏位置,为应急抢险科学决策提供依据,是目前亟待解决的问题。

堤防渗漏险情发生初期通常具有分布范围广、规模小、物性差异小、突发性和可变性等特点,险情发生后须动态监测其发展,这对探测技术的数据采集处理速度、灵敏度、分辨率以及抗干扰性均有较高的要求^[3]。物探检测法是堤防渗漏抢险探测的最优手段,目前常用的堤防渗漏物探技术主要有电法、地震法和电磁法 3 大类。电法尤其是高密度电阻率法在堤防渗漏探测中应用最广泛,但高密度电阻率法具有明显的体积效应,纵向探测分辨率较低,对埋深较大的小规模渗漏探测具有一定的局限性^[4-8]。地震法可通过探测堤防蚁穴、空洞、疏松带、裂缝和高含砂层等隐患特征推测渗漏发生部位,但普遍存在边界效应^[9-11]。电磁法尤其探地雷达法具有数据采集快、探测分辨率高、抗外部干扰强以及场地要求低等优势,但在高含水率区域电磁波衰减严重^[12-15]。上述 3 种物探技术在堤防渗漏探测中均有一定作用,但各方法均有其局限性和多解性,无法单独实现堤防渗漏的精确探测。

为避免单一物探技术的局限性和多解性,近年来通过多种物探方法相互结合、相互补充、相互验证、相互约束的综合物探技术逐步发展。张建清等^[16]建立了一种大地电磁法、高密度电阻率法、微

动法组成的综合物探技术体系,并将其应用于大坝渗漏探测,取得了良好的效果。郑智杰等^[17]采用地震折射法、地震反射法及微动法 3 种物探方法组合探明了桂林市洛潭水库岩溶渗漏带发育的位置,为灌浆加固提供了科学依据。张伟等^[18]采用高密度电测深法、音频大地电磁法和地震折射法对淮河滨河浅滩塌陷区进行现场试验,结果表明受第四系淤泥层等低阻覆盖层影响,高密度电测深法和音频大地电磁法探测结果偏小,结合地震折射法可更准确划分覆盖层、溶蚀层和基岩面的空间位置。目前综合物探技术还只是通过多种物探技术多角度分析隐患,但综合物探技术不仅局限于几种物探技术探测结果的简单罗列,更应结合基础资料、现场检查综合分析验证。

广东省某堤防受 2017 年第 13 号台风“天鸽”(强台风级)和第 14 号台风“帕卡”(台风级)影响,出现 3 段损毁,分别编号为 1# 缺口、2# 缺口和 3# 缺口,缺口长度分别为 50、61 和 64 m,总缺口长度为 175 m,灾后相关部门迅速对缺口堤段进行修复,修复后堤防断面如图 1 所示,堤顶高程 3.5 m,堤身高度约 5.8 m,堤顶宽约 12.4 m,迎水面为干砌石挡墙,墙前采用抛石护脚,墙后回填黏性土并夯实,堤身为吹填膜袋砂,每层厚 60 cm,背水坡回填 50 cm 厚夯实土,坡比 1:3。2018 年 4 月,原 3# 缺口堤段出现渗漏,堤防安全受到严重威胁,险情堤段现状航拍如图 2 所示。

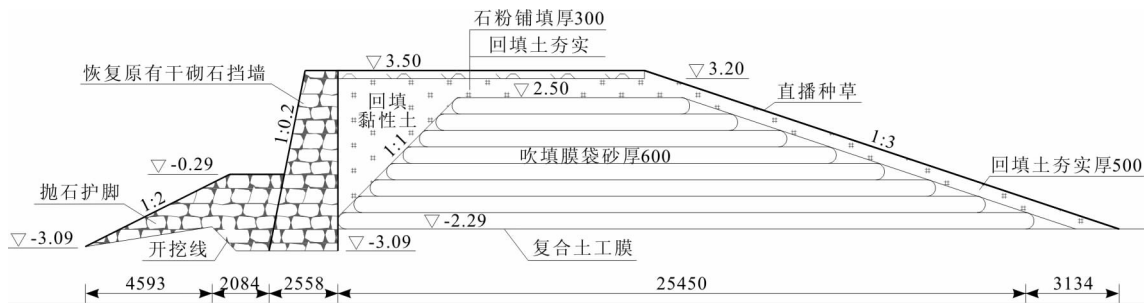


图 1 广东省某损毁堤防修复后横断面图(高程单位:m,标注单位:mm)



图 2 险情堤段现状航拍

快速准确探明堤防渗漏位置,合理评估该堤段险情是全面开展应急抢险工作的前提。针对该堤防渗漏险情具有的规模小、物性差异小和可变性等特征,本文采用高密度电阻率法和探地雷达法两种物探技术对险情堤段进行探测,两种方法相互结合、相互补充、相互验证、相互约束,并结合基础资料和现场检查对堤防渗漏险情进行分析,为该堤防后期全面开展应急抢险工作提供技术支撑,相关成果也可

供类似工程参考。

2 高密度电阻率法

2.1 探测原理与测线布置

高密度电法是以介质的电阻率差异为基础的一种电法勘探技术,其探测原理为通过电极向介质体输入电流,通过测量电极间电位差确定其视电阻率。根据实测的视电阻率进行数据装换、预处理、地形校正和反演计算,确定地层中的电阻率分布等值线图,从而可以划分地层,确定异常地层等。

由于险情段堤顶铺有石粉,高密度电阻率法仪器探针难以插入,而背水坡的填土体较为松软,故仅在堤顶近背水坡侧设置1条测线,方向为顺水流方向。测线电极间距为2 m,测线总长度为78 m,测线桩号范围为K0+675~K0+597 m,测线装置类型为Wenner- α 法。

2.2 电阻率反演与分析

基于最小二乘原理进行电阻率反演,其基本原理为通过现场实测数据构造目标函数,并使之达到极小值。目标函数 Φ 可表示为^[19]:

$$\Phi = \|\Delta d - J\Delta m\|^2 \quad (1)$$

式中: Δd 为数据残余向量; Δm 为模型参数修改向量; J 为偏导矩阵,可写为:

$$J = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial d_1}{\partial m_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial d_1}{\partial m_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial d_1}{\partial m_N}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial d_2}{\partial m_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial d_2}{\partial m_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial d_2}{\partial m_N}\right)_0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial d_M}{\partial m_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial d_M}{\partial m_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial d_M}{\partial m_N}\right)_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $m = m_1, m_2, \dots, m_N$,为 N 维模型向量; $d = d_1, d_2, \dots, d_M$,为现场实测的 M 维视电阻率向量; $\left(\frac{\partial d_i}{\partial m_j}\right)_0$ 为初始模型 m_{a0} 处第 i 个实测视电阻率向量 d_i 对第 j 个模型向量 m_j 的偏导数。

为减少邻近网格电阻率突变,使模型连续、光滑,对目标函数施加光滑约束,则函数可改写为:

$$\Phi = \|\Delta d - J\Delta m\|^2 + \lambda \|C(m + \Delta m)\|^2 \quad (3)$$

对 Δm 求导并令目标函数为0,则有:

$$(J^T J + \lambda C^T C)\Delta m = J^T \Delta d - \lambda C^T C m \quad (4)$$

式中: λ 为拉格朗日乘数; C 为光滑矩阵,求解可得 Δm ,施加光滑约束的预测模型参数向量可写为:

$$m_{a(k)} = m_{a(k-1)} + \Delta m \quad (5)$$

重复上述过程,当实测数据与模拟数据平均均

方误差 R_{MS} 满足要求时,反演结束。 R_{MS} 写为:

$$R_{MS} = \sqrt{\Delta d^T \Delta d / n} \quad (6)$$

经最小二乘法反演堤防探测断面电阻率分布情况如图3所示。由图3可知:(1)堤防探测断面电阻率基本呈层状分布,电阻率在 $1.07 \sim 160 \Omega \cdot m$ 之间,其中险情堤段堤深3 m以下电阻率 $1.07 \sim 40 \Omega \cdot m$,电阻率整体偏低,说明堤深3 m以下险情堤段含水率相对较高,与现场检查背水坡距堤顶3 m处堤身较松软、湿润现象一致;(2)随堤深增大,电阻率逐渐减小,说明堤防含水率随堤深增大而增大,这与堤防背水坡土体含水率变化规律与特征一致;(3)探测段堤顶中部存在局部高阻异常,这主要是由于险情段堤顶铺有电阻率相对较高的石粉,此外背水坡的浅层坡面侵蚀也是导致局部高阻异常的主要原因;(4)桩号K0+625~K0+610 m堤顶下4.0~11.5 m以及桩号K0+637~K0+650 m堤顶下5.0~11.5 m两个区域存在明显的低阻异常,形成低阻闭合圈,电阻率趋近于零,说明该范围土体含水率非常高,已形成渗漏通道。

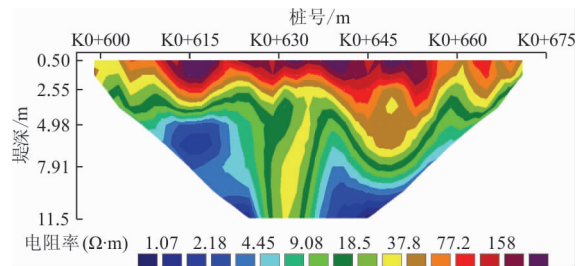


图3 堤防电阻率分布

3 探地雷达

3.1 探测原理

探地雷达探测系统主要由发射天线、接收天线和控制器(主机)等组成。探地雷达工作原理为发射天线发出高频电磁波,电磁波遇地下地层或目标体发生反射,传回地面为接收天线接收,通过发射接收控制器转换和计算机后处理可形成地下雷达图像。根据反射波振幅、大小、频谱特征和同相轴形态特征可对雷达目标波相进行识别。

为均衡探测剖面各雷达波的能量,增强弱信号的对比以及有用雷达波的追踪,需对雷达现场实测数据进行增益,增益通过现场实测数据乘以增益权函数实现^[20]:

$$\tilde{y}(t) = P(t)y(t) \quad (7)$$

式中: $\tilde{y}(t)$ 为增益后雷达波数据; $P(t)$ 为增益权函

数; $y(t)$ 为现场实测数据。

第 i 个时窗中心对应的增益权函数 p_i 可写为:

$$p_i = \frac{M}{A_i} \quad (8)$$

式中: M 为调整有效振幅的平衡系数; A_i 为第 i 个时窗的平均振幅,其计算式为:

$$A_i = \frac{\sum_{t=T_{i-1}}^{t=T_{i+1}} |y(t)|}{N} \quad (9)$$

式中: T_{i-1} 为第 i 个时窗起始时间; T_{i+1} 为第 i 个时窗终止时间; N 为第 i 个时窗采样点数。

为消除雷达实测数据中的干扰信号,需进行滤波处理。假定探地雷达实测信号为反射波和干扰波的叠加,则实测信号二维函数可写为:

$$f(x, t) = s(x, t) + n(x, t) \quad (10)$$

式中: x 为测点位置; t 为时间; $s(x, t)$ 为反射波函数; $n(x, t)$ 为干扰波函数。

其对应的滤波输出频波谱为:

$$\begin{aligned} \hat{F}(k, f) &= \hat{S}(k, f) + \hat{N}(k, f) \\ &= S(k, f)H(k, f) + N(k, f)H(k, f) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\hat{F}(k, f)$ 为滤波输出频波谱; $\hat{S}(k, f)$ 为反射波输出频波谱; $\hat{N}(k, f)$ 为干扰波输出频波谱; $H(k, f)$ 为滤波器的频率响应; $S(k, f)$ 为反射波实测频波谱; $N(k, f)$ 为干扰波实测频波谱。

为剔除干扰信号,则干扰波频波谱为零,即:

$$\begin{cases} H(k, f)S(k, f) = S(k, f) \\ H(k, f)N(k, f) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 探测结果与分析

本次探地雷达探测共布设 3 条测线,探测频率均为 100 MHz,测线桩号 K0 + 653 ~ K0 + 605 m,探测典型结果如图 4 所示。分析探测结果可知:(1)在堤深 0.3 和 1.0 m 处有清晰的反射层面,同相轴连续,层面较为平直,推测堤深 0.3 m 为石粉铺填层与回填土层交界面,堤深 1.0 m 为回填土层与吹填膜袋砂交界面,与设计厚度一致,说明本次探地雷达探测结果是可靠的;(2)在堤深约 3 m 处反射波同相轴连续性较差,多处出现零星分布的强反射信号,当堤深超过 3 m 时,反射波能量急剧衰减,整体回波相对较弱,推测堤深约 3 m 处为浸润界面。分析其原因为,吹填砂是一种非均质的颗粒材料,其渗透系数存在明显的非均匀性和各向异性,浸润界面处部分吹填砂受水浸润处于相对饱和状态而部分未受水浸润,受水浸润的吹填砂相对介电常数明显增大,与

周围未受到水浸润的吹填砂形成明显的电性界面,表现出同相轴不连续,多处出现零星分布的强反射信号特征。浸润面下吹填砂处于相对饱和状态,对电磁波吸收能力强,表现为回波减弱;(3)桩号 K0 + 620 ~ K0 + 610 m 以及桩号 K0 + 645 ~ K0 + 640 m 两处存在多重强弱交错的凸形条纹,且桩号 K0 + 620 ~ K0 + 610 m 处反射波较桩号 K0 + 645 ~ K0 + 640 m 处条纹间距宽,反射幅度大,推测险情堤段在桩号 K0 + 618 m 以及桩号 K0 + 642 m 两处已形成渗漏通道,且桩号 K0 + 618 m 处渗漏通道埋深较浅。经现场检查发现该两处有明显涌水,验证了探测结果。

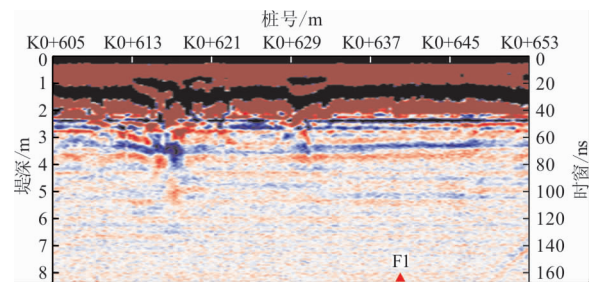


图 4 堤防雷达探测结果

4 结 论

采用高密度电法和探地雷达综合物探技术对广东省某堤防险情堤段进行探测,并结合现场检查和设计资料进行综合分析,主要结论如下:

(1)高密度电法与探地雷达法综合物探技术通过高密度电法与探地雷达法两种方法进行相互结合、相互补充、相互验证、相互约束,避免了单一物探技术的多解性和局限性,探测结果与堤防设计资料以及现场检查结果一致性良好,能有效地探测堤防渗漏险情。

(2)在堤深约 3 m 处探地雷达反射波同相轴连续性较差,多处出现零星分布的强反射信号,当堤深超过 3 m 时,反射波能量急剧衰减,整体回波相对较弱,电阻率整体偏低,背水坡堤身松软湿润,推测堤深约 3 m 处为其浸润界面。

(3)桩号 K0 + 625 ~ K0 + 610 m 以及桩号 K0 + 637 ~ K0 + 650 m 两个区域存在明显的低阻异常,形成低阻闭合圈,推测为渗漏通道,探地雷达探测结果验证了该结论并将渗漏通道范围缩小为桩号 K0 + 618m 和桩号 K0 + 642 m,经现场检查发现该两处有明显涌水,充分验证了该结论。

参考文献:

- [1] 贾海磊,李军,张敏,等. 高密度电法在堤防渗漏抢险探测中的应用[J]. 水利水电技术,2018,49(10):165-172.
- [2] 田福昌,张兴源,苑希民. 溃堤山洪淹没风险评估水动力耦合模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):127-131.
- [3] 李雷,张国栋. 我国堤坝隐患探测技术及面临的问题与建议[J]. 水利水运工程学报,2009(4):91-99.
- [4] 刘海心,朱瑞,王文甫,等. 高密度电法在水库大坝渗漏勘察中的应用[J]. 人民黄河,2018,40(10):99-103.
- [5] 陈松,余绍文,刘怀庆,等. 高密度电阻率法在水文地质调查中的应用研究——以江平圩幅为例[J]. 地球物理学进展,2017,32(2):849-855.
- [6] 郑智杰,曾洁,甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电阻率法响应特征的影响研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(5):161-165+172.
- [7] 杨天春,许德根,张启,等. 高密度电法在隐伏溶洞勘探中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):145-148.
- [8] 徐云乾,黄春华,陆雪萍,等. 高密度电阻率法在水库坝肩渗漏隐患检测中的应用[J]. 无损检测,2016,38(5):41-44+68.
- [9] 彭向东,彭敬全. 浅层地震勘探方法在跨海桥梁断裂带探测中的应用[J]. 公路,2016,61(7):150-153.
- [10] 程建设,李鹏. 微动勘探技术在水库大坝隐患探测中的应用[J]. 人民长江,2017,48(3):57-60.
- [11] 葛双成,赵永辉,陈永根,等. 新桥建设后钱塘江海塘安全隐患探测与分析[J]. 地球物理学进展,2013,28(4):2148-2154.
- [12] 汪魁峰. 探地雷达法在水工输水隧洞衬砌混凝土检测中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):215-217+221.
- [13] 张先武,高云泽,方广有. Hilbert谱分析在探地雷达薄层识别中的应用[J]. 地球物理学报,2013,56(8):2790-2798.
- [14] 金鑫. 管线渗漏异常探地雷达数据的电场分量成像分析[J]. 煤田地质与勘探,2018,46(2):159-163.
- [15] 任爱武,柯柏荣,程建设,等. 岩溶地区水库渗漏原因分析与无损检测验证[J]. 水利学报,2014,45(S2):119-124+129.
- [16] 张建清,徐磊,李鹏,等. 综合物探技术在大坝渗漏探测中的试验研究[J]. 地球物理学进展,2018,33(1):432-440.
- [17] 郑智杰,张伟,曾洁,等. 综合物探方法在碳质灰岩库区岩溶渗漏带调查中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2017,32(5):2268-2273.
- [18] 张伟,甘伏平,魏巍,等. 综合物探方法在淮河滨河浅滩岩溶塌陷调查中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(2):832-839.
- [19] 戴前伟,肖波,冯德山,等. 基于二维高密度电阻率勘探数据的三维反演及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(1):293-300.
- [20] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.