

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0151

马宏新,李卓,范光亚,等.某水库大坝防渗加固效果综合物探检测与分析评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):193-200. MA H X, LI Z, FAN G Y, et al. Evaluation analysis and comprehensive geophysical detection of anti-seepage reinforcement effect for a reservoir dam[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 193-200. (in Chinese)

某水库大坝防渗加固效果综合物探检测与分析评价

马宏新¹, 李卓^{2,3}, 范光亚^{2,3}, 毕朝达^{2,3}, 蒋景东^{2,3}

(1. 西吉县水利工程管理中心, 宁夏 西吉 756200; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029;
3. 水利部大坝安全管理中心, 南京 210029)

摘要:在水库大坝防渗加固效果检测中,物探方法能够实现快速、无损探测,但采用单一物探方法存在多解性,对大坝防渗加固效果和质量难以准确判断。为分析某水库大坝混凝土防渗墙和帷幕灌浆的防渗效果,开展了探地雷达和高密度电法等多种物探方法现场检测试验,试验结果表明:坝体防渗墙基本连续,无明显间断、孔洞等异常缺陷,存在1处墙体不密实和2处墙底异常渗漏现象;坝体下游侧分布有间断性低阻区域,部分坝体含水量高;输水管道与坝体之间存在接触渗漏,桩号0+200至0+300段下游侧坝体填筑质量较差,存在松散体,含水量偏高;大坝右岸坝脚与山体结合部位岩溶发育,含水量高。采用基于不同物理场特征观测和分析的综合物探检测技术,可较好地应用于大坝混凝土防渗墙和坝基帷幕灌浆防渗加固效果检测。

关键词:大坝;探地雷达;高密度电法;混凝土防渗墙;效果检测

中图分类号:TV698 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation analysis and comprehensive geophysical detection of anti-seepage reinforcement effect for a reservoir dam

MA Hongxin¹, LI Zhuo^{2,3}, FAN Guangya^{2,3}, BI Chaoda^{2,3}, JIANG Jingdong^{2,3}

(1. Xiji Water Conservancy Project Management Center, Xiji 756200, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the detection of dam anti-seepage treatment effect, the geophysical method can achieve rapid and non-destructive detection. However, it is difficult to make an accurate judgment on the quality of anti-seepage treatment because of the multi-solution of single geophysical method. In order to analyze the anti-seepage effect of concrete seepage presentation wall and curtain grouting of a reservoir dam, different geophysical methods such as ground penetrating radar and high-density electrical method of detection were carried. The detection test showed that the continuity of the dam cut-off wall was generally good, and there were no obvious discontinuities, holes and other abnormal defects. There were intermittent areas of low resistance on the downstream side of the dam, some of which had high water content. There were contact and leakage between the water pipeline and the dam body. The dam body downstream of the K0+200 to K0+300 section had poor filling quality, loose body, and high water content. The karst was developed with high water content between the foot of right dam and the mountain. The geophysical exploration technology can be applied to the detection of seepage prevention effect of concrete impermeable wall and dam foundation curtain grouting.

Key words: dam; ground penetrating radar; high-density electrical method; concrete cut-off wall; effect evaluation

收稿日期:2019-06-11 修回日期:2019-09-18 网络出版时间:2019-09-030

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190930.1052.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405104)

作者简介:马宏新(1976—),男,宁夏西吉人,高级工程师,从事水利工程建设管理工作。E-mail:365354266@qq.com

通信作者:蒋景东(1988—),男,江苏溧阳人,高级工程师,博士,从事土石坝水利工程安全评价及灾变模拟研究工作。E-mail:jdjiang@nhri.cn

近 60 多年来,防渗墙在病险水库防渗加固中的应用已经极为普遍^[1]。采用混凝土防渗墙处理病险水库的坝基渗漏问题,可以消除坝体和坝基的隐患,是一种较为可靠的处理手段。然而,混凝土防渗墙作为隐蔽工程,若其连续性和均匀性较差,则会对大坝的防渗性能产生很大的影响,因此有必要对水库大坝防渗加固效果进行检测。最直接的方法是钻孔取芯或在墙体上造孔作弹性波 CT,但这两种方法均是破损性或局部破损性的。随着物探技术的大力发展,探地雷达方法^[2-9]和高密度电法^[10-14]等无损物探技术在水文地质调查、矿产资源勘查、工程检测等方面已广泛应用。探地雷达法是一种运用电磁波传播理论来进行勘探的物探方法,使用方便,工作效率高,受场地限制少。高密度电法又称高密度电阻率法,是以岩土介质的导电性差异为基础,通过观测和研究地下稳定电场的分布规律来查明异常体分布规律,具有成本低、效率高、信息丰富、便于解释、野外数据采集自动化、智能化等优点。但是由于物探方法存在多解性^[15],且水库大坝防渗加固处理效果检测涉及的主要介质为水、空气、混凝土、黏土、砾石

等,各种介质本身的物性特征因其含水量不同有较大变化,再加上缺陷尺寸和周围环境的复杂性,探测工作具有较大的难度,每种探测技术都存在一些技术局限和片面性,精度难以取得满意的效果。因此,采用不同物探方法互相补充、验证,可提高防渗加固效果检测成果的合理性和准确性。本文基于某水库大坝防渗加固工程,开展了探地雷达法和高密度电法现场检测试验,分析了混凝土防渗墙的完整性及防渗墙和帷幕灌浆的防渗效果,验证了基于不同物理场特征观测和分析的综合物探技术应用于防渗加固效果检测的实用性和可靠性。

1 水库概况及防添加固情况

某水库是一座以防洪、灌溉为主,兼有发电、城镇供水和生态补水等综合效益的大(2)型水库,坝址以上控制流域面积 81.2 km²。水库大坝原设计为黏土心墙坝,但当时未按设计施工,整个坝体填筑材料为黏土和不均匀的砾(碎)石混合物。最大坝高 53.0 m,坝顶长 335.0 m,宽 8.0 m,大坝典型断面见图 1。

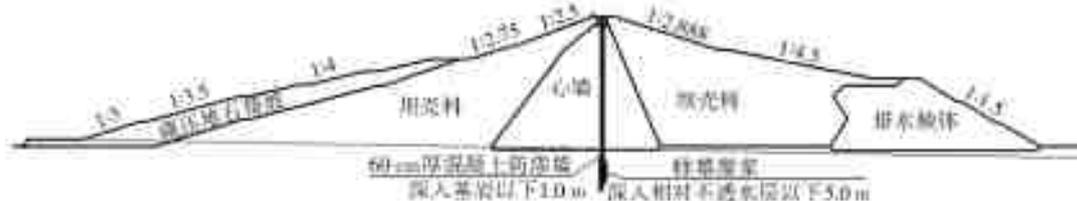


图 1 大坝典型断面

Fig. 1 Typical section of a dam

除险加固前,大坝主要存在以下问题:上游坝坡部分塌陷、松动,砌石风化严重;坝体施工质量差,坝坡代料压实度偏低;坝体渗透系数偏大,坝基基岩破碎,并存在岩溶和多条断层破碎带,坝体和坝肩存在渗漏。水库防渗处理主要包括坝体防渗墙和坝基帷幕灌浆施工。防渗墙施工桩号 K0+000 至 K0+

335,采用抓斗成槽(两钻一抓),浇筑混凝土(C20)成墙,厚度 60 cm,嵌入基岩深度 0.5~1.0 m,见图 2。坝基帷幕灌浆施工桩号 K0+000 至 K0+335,并向左右岸山体分别延伸 110 m 和 135 m,坝基灌浆孔单排布置,孔距为 1.5 m,灌浆采用水泥浆,设计帷幕灌浆后渗透性应小于 5 Lu。

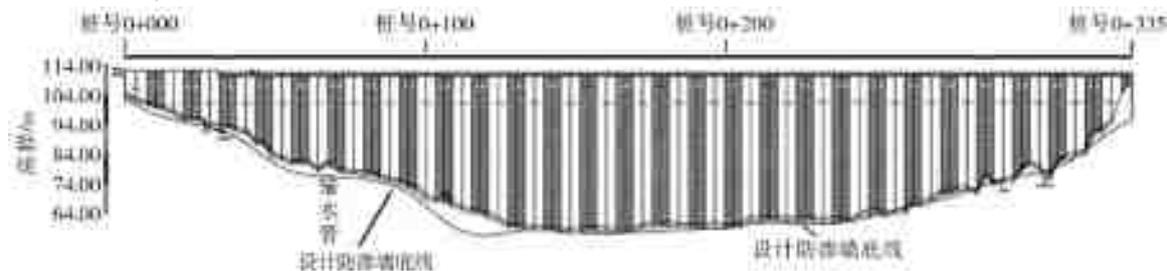


图 2 防渗墙竣工纵剖面

Fig. 2 Longitudinal section of finished cutoff wall

2 现场检测试验

考虑现场条件复杂性和物探方法的多解性,现

场检测采用探地雷达法和高密度电法相结合的综合物探方法,探测内容包括混凝土防渗墙的完整性和连续性(是否存在明显间断、松散体、孔洞等)、防渗

墙及部分帷幕灌浆的防渗效果(是否存在渗漏通道或高含水量区段)。

2.1 现场检测设备

探地雷达设备使用的是美国地球物理测量系统公司生产的 SIR-3000 型,频率范围 40 MHz 到 1.5 GHz,分辨率为 5 ps,量程增益-20~100 dB,滤波器包括垂直时间域滤波和水平滤波,扫描速率为2~800 次/s,具有 DSP 数据快速采集系统,时基精度 0.02%,信噪比大于 110 dB,动态范围 120 dB,记录长度 0~8 000 ns,图像处理使用 RADAN7 数据分析处理系统。探地雷达数据采集过程中,为了避免有效信号的缺失,滤波器设置采用全通的采集方式。数据处理采用 FIR 带通方法,对检测到的干扰信号进行压制,通过反褶积处理压制多次波干扰,提高雷达检测剖面的信噪比。

高密度电阻率法探测仪器采用重庆奔腾

WGMD-6 三维高密度测量系统,系统由主机、PDS-1 分布式开关适配器、分布式开关电缆与不锈钢电极、PDZ-1 分布式开关自检器、电法处理软件组成。测量时将全部电极置于观测剖面的各测点上,然后利用程控电极转换装置和微机工程电测仪实现数据的快速和自动采集,将测量结果送入微机后,可对数据进行处理并给出关于地电断面分布的各种图示结果。

2.2 现场测线布置

本次共布置 6 条测线(图 3),其中探地雷达法测线 2 条,高密度电法测线 4 条。探地雷达法测线布置在防渗墙顶,结合探测深度与精度要求,分别采用 80 M 天线(1 号测线)和 40 M 天线(2 号测线)进行探测。高密度电法测线分别布置在坝顶背水侧(3 号测线),坝后一级平台(4 号测线),坝后二级平台(5 号测线),坝脚(6 号测线)。水库现场探测期间,库水位约为 93.33 m。

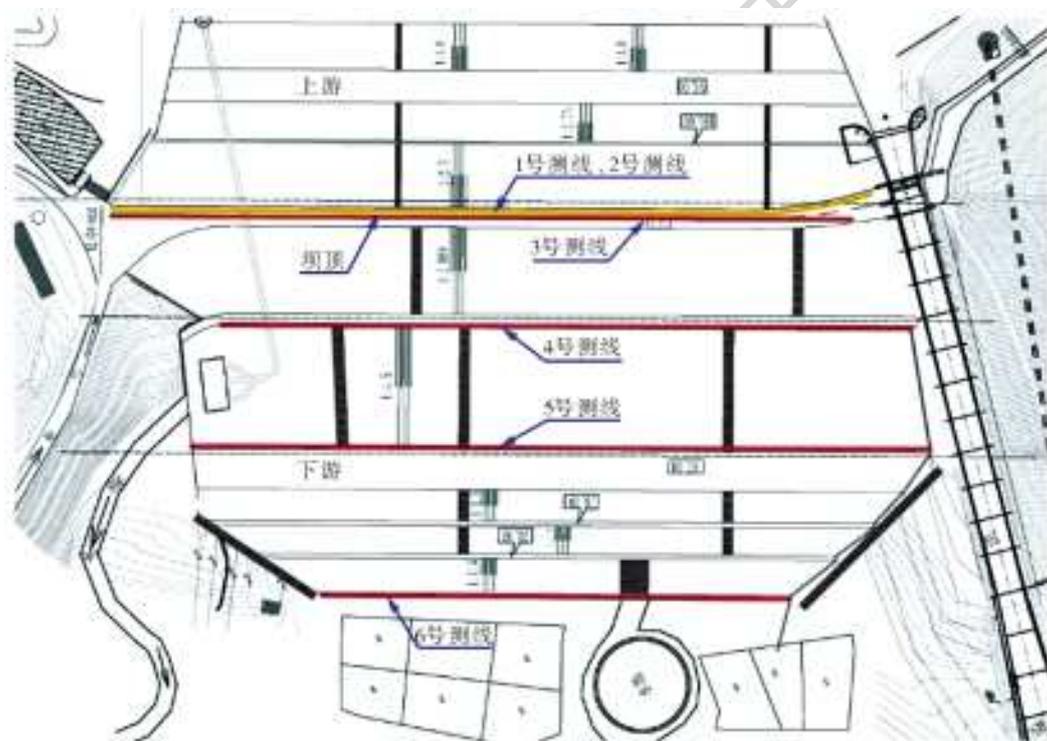


图 3 大坝探测测线布置

Fig. 3 Layout of dam detection lines

2.3 探测结果及分析

图 4 是坝顶防渗墙采用 80 MHz 天线的探测剖面,最大探测深度 20 m。探测结果显示雷达波同相轴总体连续,振幅、频率、波向一致性均较好,雷达波在防渗墙中传播时速度恒定,能量均匀衰减,表明该探测深度范围防渗墙连续性、密实性总体良好,没有明显的间断、不密实等。

图 5 是坝顶防渗墙采用 40 MHz 天线的探测剖面,最大探测深度 42 m 左右。由于 40 MHz 的探测

天线是低频非屏蔽天线,受环境电磁干扰影响较大。在排除抛物线形态的电力干扰信号和坝顶结构物的异常干扰后,从图中可以看出,大坝两端的防渗墙底部在雷达探测剖面中显示清晰,桩号 K0+090 至 K0+110(深度 34~39 m)和 K0+275 至 K0+310(深度 30~39 m)存在两处雷达波信号异常,表现为雷达波同相轴明显错断,振幅变强,波形变粗,呈低频低速特征。根据电磁波传播理论,该异常区域介质呈现低阻高介电性特征,可以推测该区域可能存在渗

水。桩号 K0+275 至 K0+278(深度 25~32 m)的区域,雷达波同相轴错断,电磁波在该区域产生反射和

散射,波形紊乱无序,振幅强,该区域防渗墙局部不密实。其他部位防渗墙在探测深度范围内无明显缺陷。

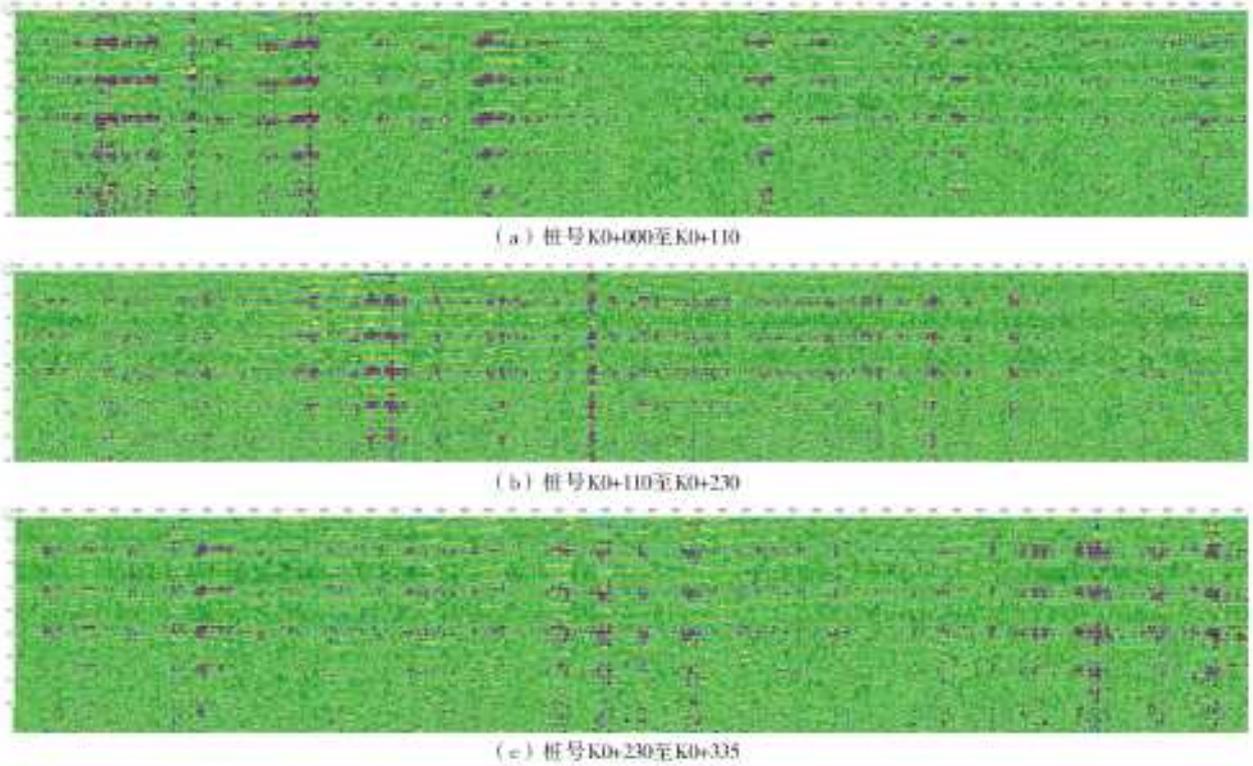


图 4 防渗墙雷达探测剖面(80MHz)

Fig. 4 Radar detection profile of cut-off wall (80 MHz)

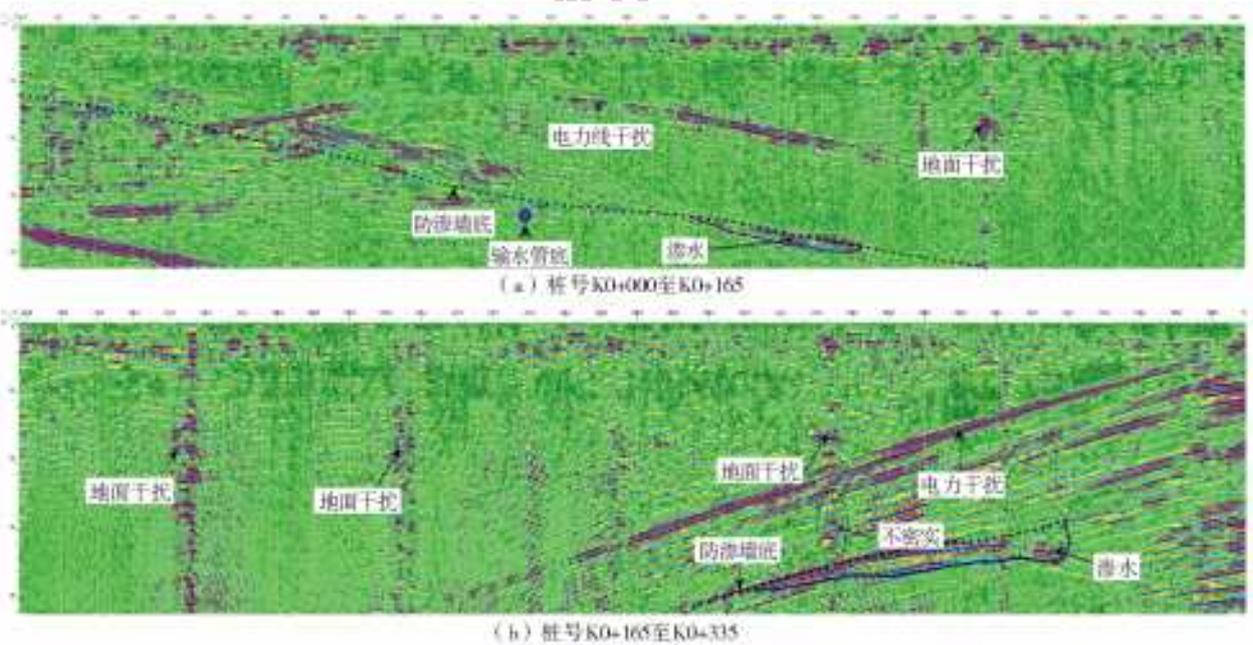


图 5 防渗墙雷达探测与解释剖面(40 MHz)

Fig. 5 Radar detection profile of cut-off wall (40 MHz)

高密度电法数据采集阵列方式采用温纳 α 排列,后处理采用 2DRES 反演软件,通过反演所得视电阻率云图见图 6 至 9。云图中横坐标为测点坐标,采用常数坐标轴,纵坐标为实际高程。

3 号测线电阻率云图见图 6,该测线位于坝顶背

水侧(防渗墙后),高程 111.4 m,探测深度约 52.0 m。从图 6 可知,坝体范围内视电阻率整体可分为 2 层:第 1 层,大约在高程 100.0 m 至坝顶,土体整体成层性较好,每层视电阻率值较高且均一,未见明显低阻异常;第 2 层,大约在高程 70.0~100.0 m,该层视

电阻率整体较低,呈带状分布,有多个低阻异常区:
 (1)桩号 K0+144 至 K0+183,高程 91.0 m 至坝基以下的区域,形成低阻闭合圈,视电阻率值在 3~10 $\Omega \cdot m$,与周围形成明显对比;(2)桩号 K0+192 至 K0+225,高程 83.0~93.0 m 范围内,视电阻率值约为 10 $\Omega \cdot m$;(3)桩号 K0+249 至 K0+290,高程 88.0~99.0 m 范围内,视电阻率值约为

10 $\Omega \cdot m$;(4)桩号 K0+045 至 K0+096,高程 88.0~99.0 m 范围内,视电阻率值约为 10 $\Omega \cdot m$ 。这些低阻异常区表明该区域土体含水量较高。在 70.0 m 以下部分区域视电阻率逐渐增大,该高程为坝体与坝基结合部位,下部为基岩,探测结果基本能与基岩面的分布吻合,说明本测线探测结果较为准确。

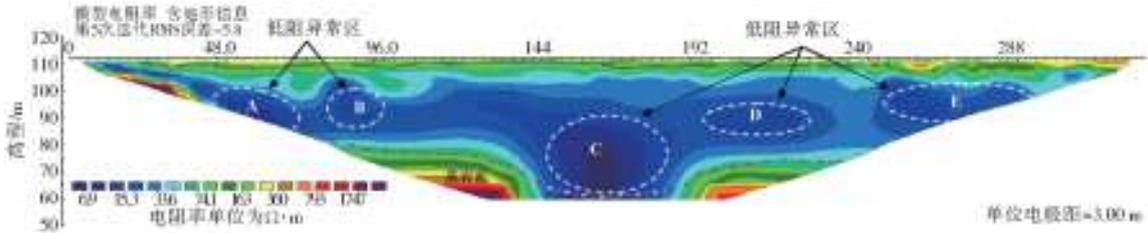


图 6 3号测线高密度电法视电阻率反演剖面云图

Fig. 6 Apparent resistivity inversion profile of high density electrical method at detection line 3

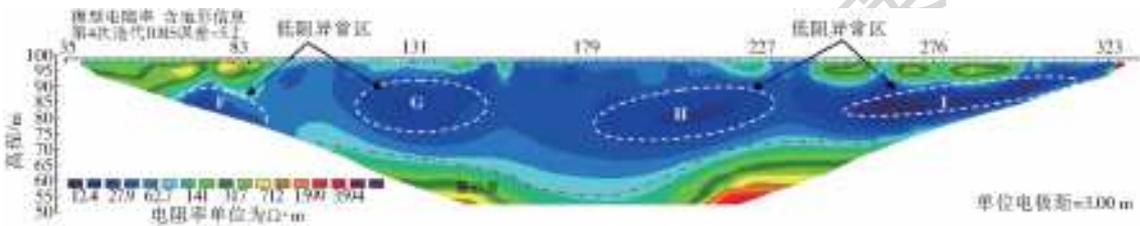


图 7 4号测线高密度电法视电阻率反演剖面云图

Fig. 7 Apparent resistivity inversion profile of high density electrical method at detection line 4

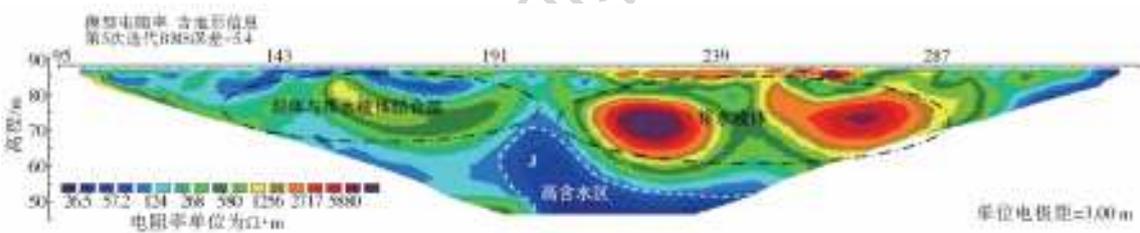


图 8 5号测线高密度电法视电阻率反演剖面云图

Fig. 8 Apparent resistivity inversion profile of high density electrical method at detection line 5

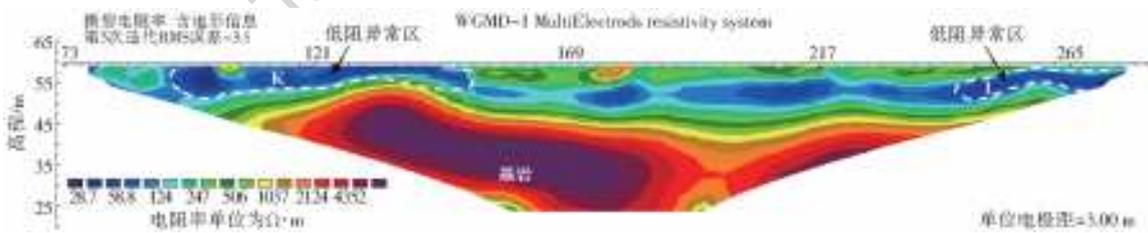


图 9 6号测线高密度电法视电阻率反演剖面云图

Fig. 9 Apparent resistivity inversion profile of high density electrical method at detection line 6

4号测线电阻率云图见图7,该测线位于坝后一级平台,测线高程99.0m,探测深度约46.0m。从图7可知,坝体与坝基分界面较明显,且在坝体范围内存在三处低阻异常区,分别为:(1)桩号K0+116至K0+152,高程75.0~88.0m。(2)桩号K0+180至K0+230,高程73.0~88.0m。(3)桩号K0+251至K0+308,高程80.0~92.0m。以上3处区域土体视电阻率值相对较小,与周围土体形成较明显对

比,说明该处区域土体含水量高。

5号测线电阻率云图见图8,该测线布置于坝后二级平台(棱体顶面)以上的土质坝面上,测线高程约88.0m,探测深度约42.0m。从图8可以看出,高程60.0m以上整体呈现为相对高阻区,在桩号K0+191至K0+245,高程60.0m以下的坝基范围呈现为低阻异常,说明该处介质含水量高。根据工程地质剖面图和大坝横断面图,各坝段棱体横截面

并非完全相同,棱体伸入坝体的距离也不甚相同,因此高程 60 m 以上测线部分位于棱体上部,部分位于棱体与坝体结合部位。

6 号测线电阻率云图见图 9,该测线布置于坝脚,测线高程 60.0 m,探测深度约 37.0 m。从图 9 可以看出,坝脚的上部覆盖层与下部基岩分界面十分明晰。覆盖层电阻率整体较低,但分布基本均匀。测线两头靠近山体的部位视电阻率相对较低,土体含水量相对较高。

3 探测结果讨论

综合物探方法异常区域见图 10,高密度电法探测结果中低阻异常区域按测线和桩号位置依次编号 A 至 L 区,采用黑色阴影表示,探地雷达探测防渗墙质量缺陷部位编号 M 和 N 区,采用蓝色阴影表示。图中 3 号—6 号测线用红色线条标识,岩溶渗漏通道是水库加固设计工程地质勘察报告(1987 年)中的探测成果,用蓝色线标识。

根据防渗墙施工记录,在桩号 K0+97.26 至 K+110.76(高程 66.50~72.90 m)位置发现溶洞。由于岩溶裂隙较发育,可能存在渗流路径。K0+275 至 K0+310(深度 30~39 m)位于防渗墙变向拐角处(K0+295.26),在帷幕灌浆施工时,此处存在

地表冒浆,浆液顺墙壁由顶部冒出,施工时采取待凝、复灌措施。由水库历次地质勘察的情况知,在桩号 K0+295 处存在 1 条顺水流向的推测断层,综合推断该处裂隙发育,可能存在渗流路径,导致墙底帷幕灌浆不密实,造成该处墙底雷达波异常。

高密度电法探测中显示的异常低阻区 A 区(K0+048 至 K0+072)、B 区(K0+081 至 K0+093)和 F 区(K0+065 至 K0+089)位于输水管道附近(输水管道位于桩号 0+068 处,埋深约 32 m),除险加固前输水管道洞身及伸缩缝处存在较为严重的渗漏现象,防渗墙施工时曾将输水管顶击穿,且防渗墙与输水管道结合部位只采用灌浆措施处理,因此可推断输水洞道与坝体之间存在接触渗漏。从异常低阻区 D 区(K0+192 至 K0+225)、E 区(K0+249 至 K0+290)、H 区(K0+180 至 K0+230)、I 区(K0+251 至 K0+308)和 L 区(K0+240 至 K0+277)分布来看,在路径上存在一定的关联性。根据工程资料,此段为 1971 年多次滑坡后重新填筑坝体,存在填筑土料含水量大,碾压不密实等质量问题。异常低阻区 K 区(K0+094 至 K0+150)位于右侧坝脚与山体结合部位,根据地质勘察报告,右坝肩部位电站厂房处浅部存在发育的溶洞和溶坑,岩溶极为发育,该区域含水量高可能与此有关。

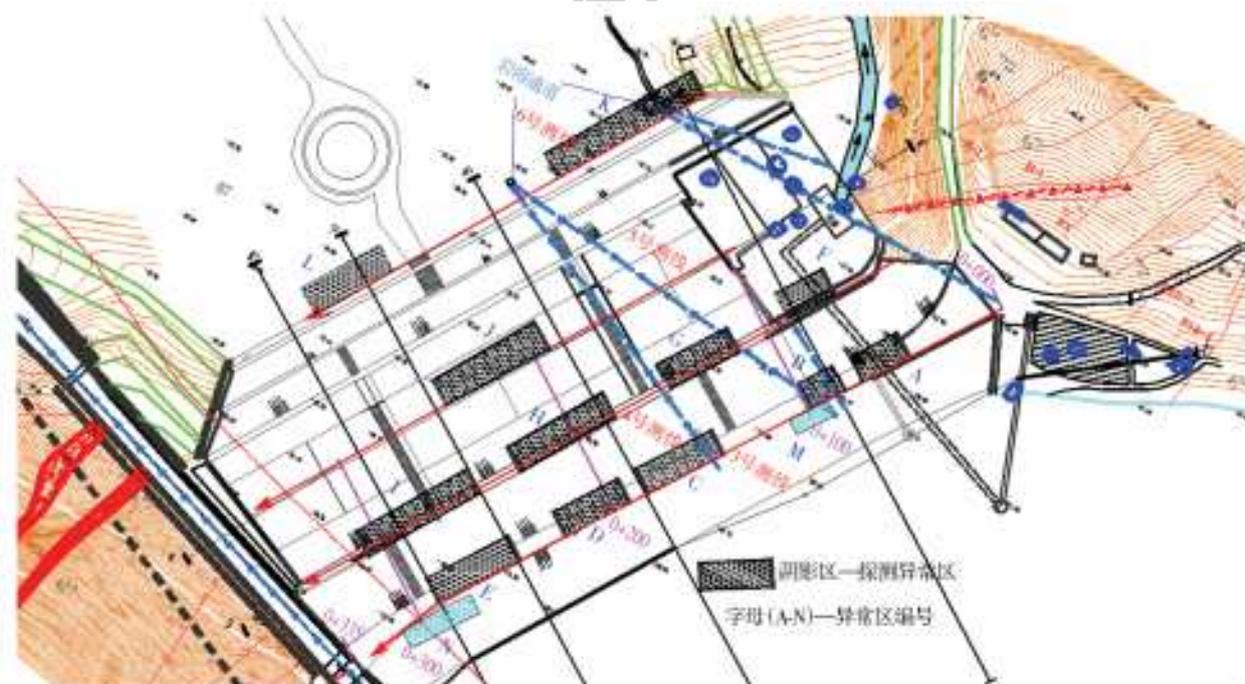


图 10 综合物探法探测坝体异常区分布

Fig. 10 The abnormal layout of dam body detected by comprehensive geophysical method

根据水库渗流观测资料,大坝除险加固后,水库整体渗流量较小,且渗水清澈。在排除降水影响后,对比除险加固前后大坝渗流量,由表 1 可见,在新的防渗体系建立后,库水位较为接近的情况下,三角堰

和梯形堰的渗流量均有所减少,表明防渗墙及坝体渗流性态总体良好。

综上所述可知,防渗墙质量整体较好,局部有不连续性或不均匀性缺陷存在;坝体部分区域松散或

含水量较高。对比2号测线(探地雷达)和3号测线(高密度电法)异常区域,可以发现,坝体含水量较高区域基本是探地雷达发现防渗墙墙体不密实或缺陷处,两种探测方法的结果较吻合,并且综合物探方法检测异常区域基本与工程施工记录和地勘资料揭示的溶洞、断层或输水管道等工程施工处理复杂区域吻合,表明综合物探方法可以较有效地用于查明大坝防渗墙和坝体内部不均匀等可能隐患位置和分布,进而用于分析大坝防渗加固效果。

表1 无降水影响情况库水位与渗流量统计

Tab. 1 Statistical table for reservoir water level and seepage flow without precipitation impact

日期	库水位/ m	三角堰渗 流量/(L·s ⁻¹)	梯形堰渗 流量/(L·s ⁻¹)	备注
2016-11-20	95.38	2.534	5.799	除险加固前
2016-11-25	93.49	2.534	8.928	
2016-12-05	90.16	1.234	3.156	
2016-12-10	89.47	1.234	3.156	
2018-02-15	89.64	1.234	3.156	除险加固后
2018-07-20	92.13	1.825	3.156	
2018-09-30	94.21	1.825	3.156	
2018-10-05	93.81	1.825	3.156	

4 结论

本文采用综合物探法对某水库大坝混凝土防渗墙的完整性、防渗墙和帷幕灌浆的防渗效果进行探测后,得出以下结论。

(1)探地雷达探测工作表明,坝顶以下埋深20 m范围内防渗墙墙体整体连续性较好,未见明显间断、孔洞等异常缺陷,埋深20 m以下墙体可能存在局部不密实,部分防渗墙底部与基岩结合部位存在异常渗漏。

(2)高密度电法探测工作表明,大坝下游测分布有间断性低阻分布区域,部分坝体含水量高;输水管道与坝体之间存在接触渗漏,K0+200~K0+300段大坝下游侧坝体填筑质量较差,存在松散体,含水量偏高;右岸坝脚与山体结合部位岩溶发育,含水量高。

(3)物探方法种类繁多,但在水库大坝防渗加固效果检测中,没有一种方法能全面解决各类问题。采用综合物探方法相结合,能够相互验证,避免单一方法的局限,数据更可靠,更精确。本文采用探地雷达和高密度电法对某水库大坝检测结果基本吻合,且检测异常区域基本与工程施工记录和地勘资料揭示的溶洞、断层或输水管道等工程施工处理复杂区域吻合。

(4)本次物探试验研究表明,探地雷达、高密度

电法等物理探测方法及其综合运用,可有效地用于水库大坝混凝土防渗墙的完整性及防渗墙和帷幕灌浆的防渗效果检测,也可为类似工程的检测提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等. 水工建筑物防渗墙技术60年I:成墙技术和工艺[J]. 水利学报,2016,47(3):455-462. (ZONG D F, LIU J F, XIAO E S, et al. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage control, Part I: construction method and workmanship[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 455-462. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160029.
- [2] 白冰,周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):527-527. (BAI B, ZHOU J. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 527-527. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2001.04.021.
- [3] 郭士礼,段建先,张建锋,等. 探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展,2019,10(3):1-9. (GUO S L, DUAN J X, ZHANG J F, et al. Application of GPR in urban road hidden diseases detection[J]. Progress in Geophysics, 2019, 10(3): 1-9. (in Chinese))
- [4] 于清水,徐聪,齐迪,等. 高密度电法与探地雷达在地下溶洞探测中的联合应用:以广西柳州地区为例[J]. 世界地质,2017,1(3):964-969. (YU Q S, XU C, QI D, et al. Combined application of high density resistivity method and GPR in detecting underground karst caves: a case study of Liuzhou area in Guangxi, China[J]. Global Geology, 2017, 1(3): 964-969. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2017.03.030.
- [5] 刘澜波,钱荣毅. 探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2606-2617. (LIU L B, QIAN R Y. Ground Penetrating Radar: A critical tool in near-surface geophysics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2606-2617. (in Chinese)) DOI: 10.6038/cjg20150802.
- [6] 黄成,王正,俞先江. 路用探地雷达在公路病害探测中的应用[J]. 工程技术研究,2017,1(2):26-27. (HUANG C, WANG Z, YU X J. Application of road ground penetrating radar in the detection of highway diseases[J]. Engineering and Technological Research, 2017, 1(2): 26-27. (in Chinese)) DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.02.010.
- [7] SCHMID L, HEILIG A, MITTERER C, et al. Continuous snowpack monitoring using upward-looking ground-pene-

- trating radar technology[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60 (221):509-525. DOI:10.3189/2014jog13j084.
- [8] CARBONEL D, RODR? GUEZ V, GUTI? RREZ F, et al. Evaluation of trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) for sinkhole characterization[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2014, 39 (2): 214-227. DOI: 10.1002/esp.3440.
- [9] RAZ-YASEEF N, KOTEEN L, BALDOCCHI D D. Coarse root distribution of a semi-arid oak savanna estimated with ground penetrating radar[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2014, 118 (1): 135-147. DOI:10.1029/2012JG002160.
- [10] CATALDO A, PERSICO R, LEUCCI G, et al. Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes[J]. *Ndt & E International*, 2014, 62(2):14-28. DOI:10.1016/j.ndteint.2013.10.007.
- [11] 张先林, 许强, 彭大雷, 等. 高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(4): 1862-1867. (ZHANG X L, XU Q, PENG D L, et al. Application of high-density resistivity method to groundwater exploration in Heifangtai[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32 (4): 1862-1867. (in Chinese)) DOI:10.6038/pg20170462
- [12] 王爱国, 马巍, 王大雁. 高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比[J]. *工程勘察*, 2007, 1(1): 72-75. (WANG A G, MA W, WANG D Y. Comparison of detection effect of different electrode arrangement by high density electrical method[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007, 1(1):72-75. (in Chinese))
- [13] 郭成超, 杨建超, 石明生, 等. 高密度电法在高聚物防渗墙检测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(2):0709-0716. (GUO C C, YANG J C, SHI M S, et al. Application of high density electrical method in detection of polymer cutoff wall [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34 (2): 0709-0716. (in Chinese)) DOI:10.6038/pg2019BB0500.
- [14] 陈军, 杨川, 陈泽元. 地下隐蔽水库的高密度电法探测研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 1(2): 934-939. (CHEN J, YANG C, CHEN Z Y. Study on high density resistivity method of underground reservoir [J]. 2015, 1 (2): 934-939. (in Chinese)) DOI: 10.6038/pg20150262.
- [15] 杨良权, 李波, 高焕芝, 等. 综合物探技术在大宁调蓄水库防渗墙检测中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(15):3657-3661. (YANG L Q, LI B, GAO H Z, et al. Application of comprehensive geophysical exploration technique to the detection of Daning storage reservoir seepage prevention wall[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12 (15): 3657-3661. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2012.15.026.