

三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术

孙佳易, 邓昌, 汤雷, 王海军, 温嘉琦

Accurate identification technology for leakage channels in earth-rock dams through three-dimensional reconstruction and inversion

SUN Jiayi, DENG Chang, TANG Lei, WANG Haijun, WEN Jiaqi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20231017001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CCTV视觉图像处理方法在土石坝涵管病害诊断中的应用

Application of CCTV visual image processing method in culvert disease diagnosis of earth-rock fill dam
水利水电工程学报. 2019(2): 99 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.014>

并行电法探测水库坝肩渗漏

Reservoir abutment leakage diagnosis based on parallel electrical method
水利水电工程学报. 2022(1): 131 <https://doi.org/10.12170/20210314001>

土石坝渗压水位极值预测

Prediction of seepage water level extremum of earth rock dam
水利水电工程学报. 2021(4): 29 <https://doi.org/10.12170/20200824002>

砾石土粗粒含量对高土石坝稳定渗流的影响

Influence of coarse-grained content in the gravelly soil on steady seepage of high earth-rock dam
水利水电工程学报. 2021(4): 61 <https://doi.org/10.12170/20200826002>

近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示

Recent earth-filled dam failures or accidents of reservoirs in China and their enlightenment
水利水电工程学报. 2023(1): 27 <https://doi.org/10.12170/20211024002>

考虑坝体-地基接触效应的特高心墙堆石坝结构安全性研究

Study on safety of a high earth-core rockfill dam considering contact effect between dam and foundation
水利水电工程学报. 2019(6): 107 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.012>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20231017001

孙佳易, 邓昌, 汤雷, 等. 三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术 [J]. 水利水运工程学报, 2024(4): 71-79. (SUN Jiayi, DENG Chang, TANG Lei, et al. Accurate identification technology for leakage channels in earth-rock dams through three-dimensional reconstruction and inversion[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(4): 71-79. (in Chinese))

三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术

孙佳易, 邓 昌, 汤 雷, 王海军, 温嘉琦

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 高密度电法是探测土石坝渗漏的主要方法, 但对渗漏范围边缘的识别较为模糊, 无法分辨低阻识别成因。为了弥补该局限性, 提出一种三维重构反演(3D-reconstruction inversion)的渗漏通道精确识别方法: 首先布设多条正交于可能存在渗漏通道的 2D 平行测线并进行高密度电法反演, 将反演图简化处理后置于三维模型剖面中, 然后利用多条测线探测的低阻区高程推算出浸润线, 综合分析确定渗漏位置。结果表明: 该方法可以精确检测渗漏位置, 确定导致反演中低阻识别的原因, 可更加直观地观测渗漏通道走向, 有效减少因正常渗流导致的低阻识别误差。

关 键 词: 土石坝; 渗漏通道识别; 三维重构反演; 高密度电法

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)04-0071-09

大坝蓄水运行期出现的裂隙、渗漏等病害直接关系到坝体的运行安全。截至 2023 年底, 中国修建水库堤坝共计 9.8 万余座, 包括大中型水库 4 700 余座, 小型水库 9.4 万多座, 其中大部分修建于 20 世纪 50—70 年代, 且以土石坝为主^[1]。由于坝体服役年限较长和防护检测工作不当, 大量土石坝在渗漏、防洪等方面存在安全隐患。受限于地理环境, 中国的水库大坝多修建于冲积平原上, 为了降低成本, 大坝在修建时所用填料大多就地取材, 导致坝堤后形成了大量覆盖层薄弱的坑塘^[2], 汛期极易发生渗漏危害, 如果发现和维修不及时, 很有可能迅速发展成管涌甚至溃堤溃坝, 造成难以挽回的生命财产损失。因此, 及时检测识别出坝体渗漏病害至关重要。

近年来, 国内外通过研究渗漏病害部位的电、电磁、振动波、水流、热、声、光等的特征和变化规律^[3], 形成了多种渗漏检测手段, 如地质雷达勘探法、浅层地震勘探法、电阻率法、激发极化法等^[4], 而高密度电法因野外采集数据效率高、成本低、操作简单等优点而成为主要的物探方法之一^[5]。高密度电法以探测区域土壤、岩石及地下水等介质导电性能的差异为基础, 采用高密度电阻测试仪器, 对近地面电场的分布范围和变化规律进行观测, 获取场地的地质特性^[6], 且操作简便, 适用场景广泛, 可以运用特定的数据处理与分析方法, 构造形成直观的地质勘察数据模型, 便于准确全面地反映地质勘察状态的空间分布情况^[7]。中国电法勘探始于 20 世纪 30 年代^[8], 至 20 世纪 80 年代后期, 中国地矿部门开始了对高密度电法及其应用技术的研究, 主要沿袭国外的做法, 采用“三电位电极装置”系列: 温纳装置、偶极装置和微分装置及其相应的电极排列方式^[9]。高密度电法的基本理论与传统的电阻率法大致相同, 但是高密度电法在观测场设置了较高密度的测点, 现场测量时, 将电极布置在合理间隔的测点上, 人工施加稳定电流场, 由主机自动控制供电电极和接收电极的变化, 完成测量^[10]。随着技术的进步和理论的完善, 现如今高密度电法可以将多种电极排列方式组合排列或者自定义排列^[11]。

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3090103)

作者简介: 孙佳易(2000—), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 主要从事结构工程研究。E-mail: sunjiayi13@163.com

通信作者: 邓 昌(E-mail: cdeng@nhri.cn)

国内许多学者将高密度电法应用到了实践中,例如刘晓东等^[12]利用高密度电法在岩溶及地质灾害调查等工程中进行探测;肖川等^[13]采用高密度电法探测了采空区含水情况。这些实践为高密度电法在物探方向的发展奠定了坚实基础,但上述研究仅停留在二维探测,只能对测线断面的渗漏情况进行检测,无法判断渗漏形成的原因也无法显示测线断面外的渗漏情况和渗漏通道的分布,探测结果具有局限性,不利于大坝整体的安全评估。

堤坝隐患探测技术是中国堤坝安全监控技术的重要内容^[14]。本文结合高密度电法勘探技术特点和应用优缺点,提出三维重构反演的土石坝渗漏精确定位技术,以实际工程为例进行验证,以期提升探测精度,为相似工程渗漏探测提供指导意见。

1 基本理论

1.1 高密度电法

高密度电法勘探大坝内部渗漏缺陷是以分析矿体、土壤的导电性差异为基础,利用计算机总结人工施加电场作用下地层传导电流的分布规律,推断测点下不同地质体分布情况^[15]。在实地应用中,需要根据探测深度和现场情况选择合适的装置进行测量,温纳装置和偶极装置因分别具有良好的纵向探测能力和优越的边缘探测能力而被广泛应用。

高密度电法原理与传统直流电阻率法相差无几,在 A、B 两点分别放置电源正负极(图 1),通过 A、B 电极向地下提供人工电流 I ,测量点 M 和 N 间电位差 ΔV_{MN} 。视电阻率计算公式^[16]如下:

$$\rho_s = K \Delta V_{MN} / I \quad (1)$$

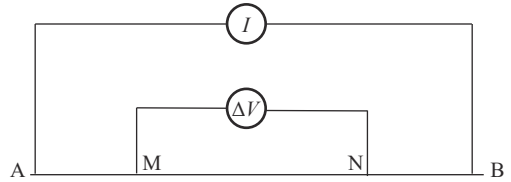


图 1 高密度电法工作原理

Fig. 1 Working principle of high-density electrical method

$$K = \frac{2\pi}{1/L_{AM} - 1/L_{AN} - 1/L_{BM} + 1/L_{BN}} \quad (2)$$

式中: ρ_s 为视电阻率; I 为电流; ΔV_{MN} 为 MN 之间电位差; K 为装置系数, L_{AM} 、 L_{AN} 、 L_{BM} 、 L_{BN} 分别为 AM、AN、BM、BN 之间距离。

1.2 有限元法反演

利用有限元法反演,是以电场所满足的微分方程为基础,利用变分原理,通过剖分、插值等方法将微分方程的求解问题转化为对应的泛函取极值的问题^[17]。求解过程为:按照电场满足的微分方程和边界条件,得到相应的泛函形式,并根据一定的规律将其离散成若干有限的小单元,在每个小单元内对函数进行线性插值后再对各单元的泛函求和,得到各节点的傅氏电位,然后采用圆滑约束最小二乘法处理反演数据,其原理是以牛顿最优化非线性最小二乘法为基础,通过调节单元模型的电阻率促使其正演值不断接近真实电阻率,通过循环迭代缩小误差得到最终反演成果。圆滑约束最小二乘法公式^[18]如下:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (3)$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (4)$$

式中: J 为雅克比偏导数矩阵; λ 为阻尼系数; d 为模型参数修改矢量; g 为残差矢量; f_x 为水平圆滑滤波系数矩阵; f_z 为垂直圆滑滤波系数矩阵。

2 三维重构反演渗漏识别方法

常规高密度电法探测的结果,是装置下方地电介质的分布和地下构造影响下的视电阻率二维断面图。

该方法仅能推测所布设测线剖面的低电阻范围, 可靠度较低, 且无法准确判断所测区域范围内产生低电阻的原因, 也无法排除是否为其他渗漏区域扩散导致的识别误差, 影响探测结果的准确性。

本文提出一种新的实地探测方法, 即三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术, 具体步骤如下:

(1)通过在坝体上下游布设正交于可能存在渗漏位置的多条具有一定间距的平行测线, 根据具体情况选择合适的电极距、电极数和探测装置, 利用高密度电法仪及相应正、反演软件对坝体剖面进行电阻率分布检测, 得到相应反演数据。

(2)将坝顶、后坝坡多剖面探测得到的 x 、 y 坐标对应电阻率数值结果数据组导入 MATLAB 软件中, 坐标间电阻率值采取均分法, 拟定一定范围内数据对应 RGB 数值的规则, 对导入数据进行处理, 将简化后数据与颜色块对应形成剖面反演图, 将其置于三维模型(坝体同比例缩小模型)固定位置中进行分析。

(3)根据高密度电法反演结果初步分析确定渗漏所在桩号的大致范围, 在三维模型中找到相应位置, 沿桩号位置垂直于反演图进行剖面截取, 通过旋转模型对比多条测线相同桩号处的低阻区域, 确定水流渗流趋势, 根据测线所处剖面反演图的低阻极值高程得出该处的浸润线高度。

(4)结合以上分析结果和上下游浸润线高度, 确定渗漏通道位置、分布及低电阻产生原因, 进行全面安全检测和科学评价, 查清大坝的运行情况。

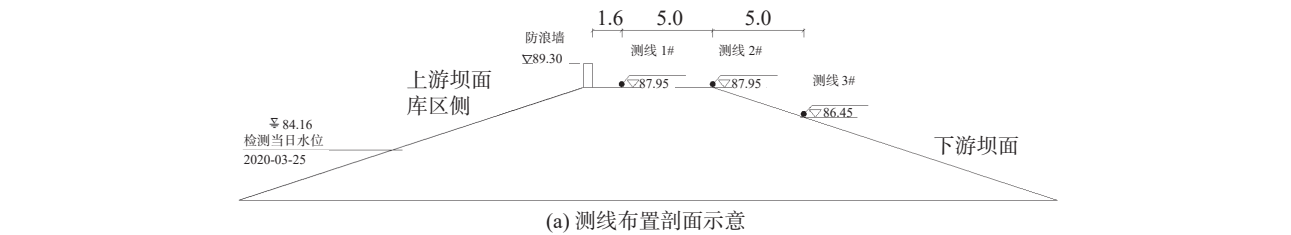
3 工程验证

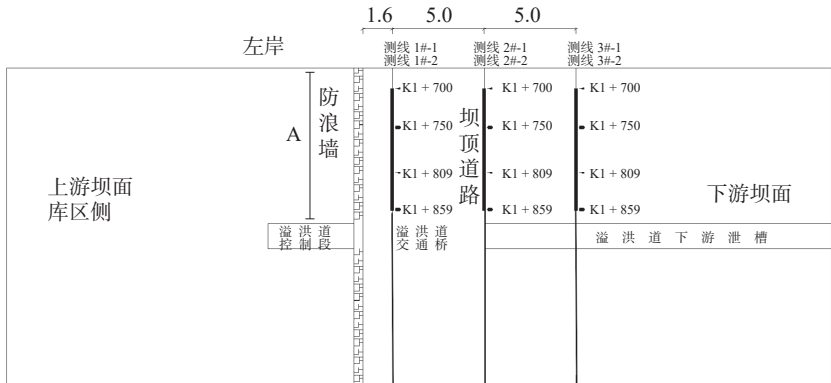
山东省宁阳县堽城镇境内的月牙河水库, 属山丘区水库, 水库总库容 1 006 万 m^3 , 兴利库容 548 万 m^3 , 坝顶高程 88 m, 最大坝高 11 m, 坝长 3 612 m, 坝顶宽 6.6 m。水库于 1958 年兴建, 1960 年建成蓄水, 1963 年对大坝进行维修加固, 1972 年 10 月至 1973 年 5 月分别完成了大坝、溢洪闸、放水洞等主体工程, 2008 年进行了除险加固工程。自水库蓄水至今, 大坝服役期长达 63 年, 坝体内部出现多处分散的渗漏缺陷, 急需对水库大坝进行渗漏探测安全评估。

根据坝体情况, 高密度电法使用温纳 α 排列方式进行渗漏检测。建立独立坐标系, x 轴与大坝轴线方向一致, y 轴与大坝轴线垂直指向库区方向一致, z 轴垂直于水平线。上游坝面库区侧修建运行过程中, 为了加固坝坡面进行了抛石护岸工程和植被上层护坡工程, 且上游坝坡填充材料空隙较大, 水位变化不明显, 所以上游坝坡不宜布置测线。布设正交于渗漏可能存在位置的 3 条平行测线, 测线布置整体情况如下: 以溢洪道左侧大坝为实验坝体, 在坝顶靠近防浪墙、坝顶路面靠近下游侧和坝坝下游面测段 A 处布置由左岸至右岸方向桩号为 k1+700~k1+859 的长测线 3 组, 测线布置情况如表 1 所示。整体测线布置位置如图 2 所示。

表 1 测线布置
Tab. 1 Layout of survey lines

测线编号	测线	高程/m	总长/m	起点桩号~末点桩号	电极阵列	电极数量/个	电极间距/m
1#	1#-1	87.95	110	K1+700~K1+809	α 排列	110	1.0
	1#-2	87.95	110	K1+750~K1+859	α 排列	110	1.0
2#	2#-1	87.95	110	K1+750~K1+859	α 排列	110	1.0
	2#-2	87.95	110	K1+700~K1+809	α 排列	110	1.0
3#	3#-1	86.45	110	K1+700~K1+809	α 排列	110	1.0
	3#-2	86.45	110	K1+750~K1+859	α 排列	110	1.0





(b) 测线布置平面示意

图 2 测线布置示意图(单位: m)

Fig. 2 Schematic diagram of survey line layout (unit: m)

通过现场测量,建立大坝附近关键位置地形坐标,根据防浪墙顶设计高程,换算坝顶、坝坡测线,上游水位等高程,为高密度电法勘探提供基础地形数据。

3.1 断面反演识别分析

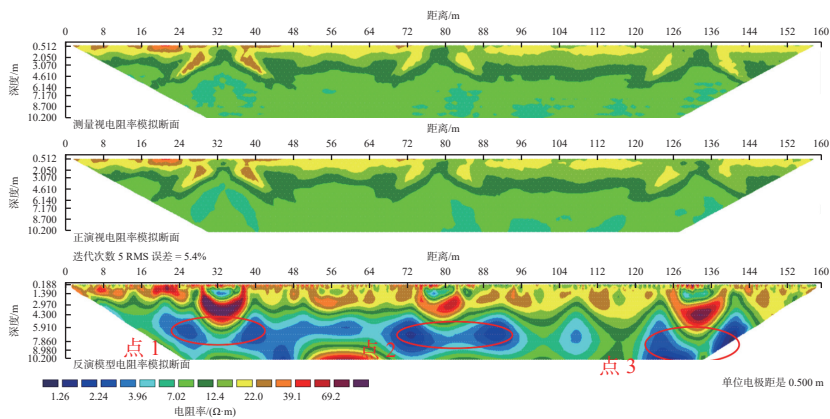
本文以该案例中的左岸测线 1#、2#、3#为例分析,将所测数据经 res2dmod 软件正演处理再通过 res2Dinv 软件采用温纳装置使用有限元法对试验勘测数据进行光滑约束的最小二乘反演,所有结果均经过 5 次迭代完成收敛,均方根误差均小于 7%。

根据表 1 测线布置情况,将桩号 K1+700~K1+809 测线 1#-1 和桩号 K1+750~K1+859 测线 1#-2 数据合并分析,测线 1 断面反演结果见图 3(a)。将桩号 K1+750~K1+859 测线 2#-1 和桩号 K1+700~K1+809 测线 2#-2 数据合并分析,测线 2 断面反演结果如图 3(b)所示。将桩号 K1+700~K1+809 测线 3#-1 和桩号 K1+750~K1+859 测线 3#-2 数据合并分析,得测线 3 断面反演数据如图 3(c)所示。

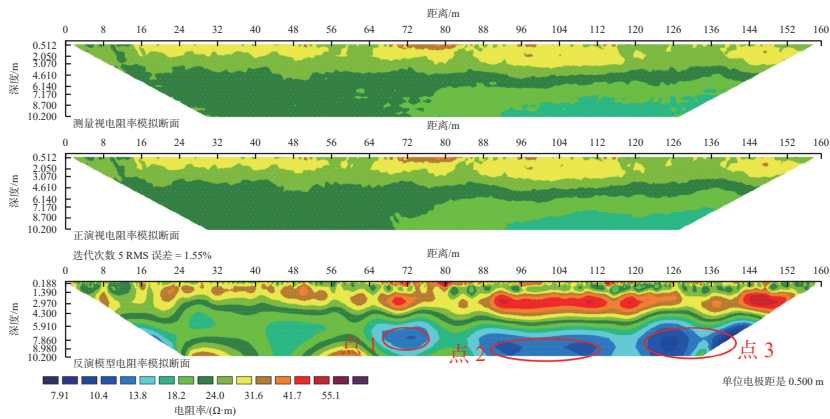
由图 3(a)测线 1 断面反演可见:在大坝桩号 K1+720~K1+742,高程 80.0~83.0 m 高程范围出现低电阻区域点 1,推测此处为渗漏点且该渗漏缺陷导致周围坝体出现渗流;大坝桩号 K1+766~K1+794,高程 79.0~83.0 m 范围出现低电阻区域点 2,反演图显示该处疑似有两处位置相邻的渗漏缺陷;大坝桩号 K1+820~K1+844 范围内,约高程 83.0 m 以下出现低电阻区域点 3,推断该处有相邻两处渗漏。上述区域疑似存在渗漏缺陷,且 3 处渗漏点上方均出现高阻区域下沉趋势,疑似因渗流冲刷导致缺陷处上方土体下沉。

从图 3(b)测线 2 断面反演可见:在大坝桩号 K1+764~K1+778,高程为 79.0~81.5 m 范围出现低阻区域点 1,但低阻异常闭合圈范围较小且根据反演图推测该处渗漏缺陷较小;在大坝桩号 K1+786~K1+814,高程约为 80.7 m 以下出现低电阻区域点 2,呈现长条状低阻异常闭合圈,根据反演图推测渗漏缺陷在其两端;大坝桩号 K1+820~K1+852 范围,高程约 82.0 m 以下出现低电阻区域点 3,低阻闭合区中间向内凹陷,推测该渗漏位于其两端,且中间段防渗墙功能完好。测线 2 断面底部土层含水率较高,与现场观察下游出渗情况相吻合。

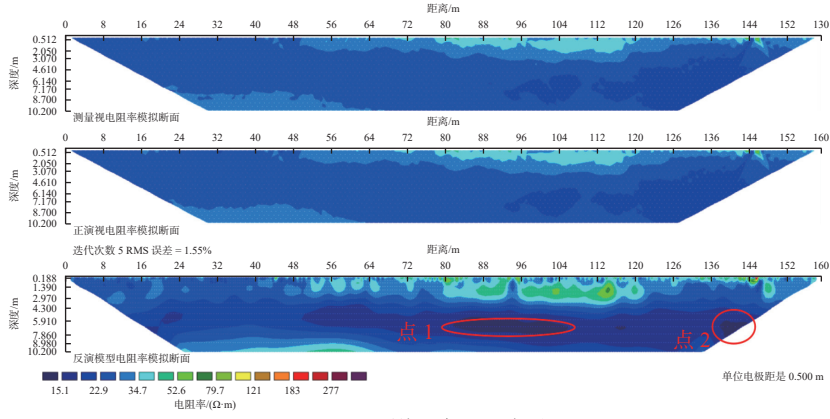
图 3(c)表明,从测线 3 断面反演图可以得到,高程约 81.0 m 以下大部分区域电阻率较低,土层含水率较高,根据断面图推测,该测线处土层可能分布密而小的多处渗漏缺陷,参照电阻率颜色对应图例,标记低阻更为明显的区域,其中大坝桩号 K1+783~K1+806 点 1、大坝桩号 K1+839~K1+850 点 2 处可能存在较大渗漏缺陷,但因为土层含水率整体偏高且探测位置较深导致低电阻识别范围不准确,无法确认该测线处渗漏缺陷的准确位置。



(a) 测线 1 断面反演图



(b) 测线 2 断面反演图



(c) 测线 3 断面反演图

图 3 断面反演结果

Fig. 3 Cross-sectional inversion results

3.2 三维重构分析

根据反演图和水位高程分析的结果, 利用 MATLAB 软件建立大坝左岸部分三维立体模型将数据重构并进行旋转分析确定最终结论。

模型取 0~160 m 为 X 方向长度坐标, $-15\sim0$ m 为 Z 方向坐标长度, $-40\sim50$ m 为 Y 坐标长度, 包含测线 1、2、3。模型截取位置示意图如图 4(a)所示。将测线 1、2、3 断面的反演电阻率结果导入 MATLAB 中, 采用两相邻坐标点间电阻率均分原则, 且根据本文需求将电阻率大于 $70\ \Omega\cdot\text{m}$ 的数据向下取整至 $70\ \Omega\cdot\text{m}$, 拟定一定范围内数据与 RGB 值对应规则, 将电阻率值与颜色块一一对应转化(如图 4(b)右侧颜色标尺图所

示), 精简图像, 生成最终结果。简化后的三维图像使渗漏通道的识别更加直观。参照实际工程测线布置位置, 将测线 1~3 处理过的反演结果图分别置于三维模型断面 1、2、3 上关联分析, 如图 4(b) 所示。

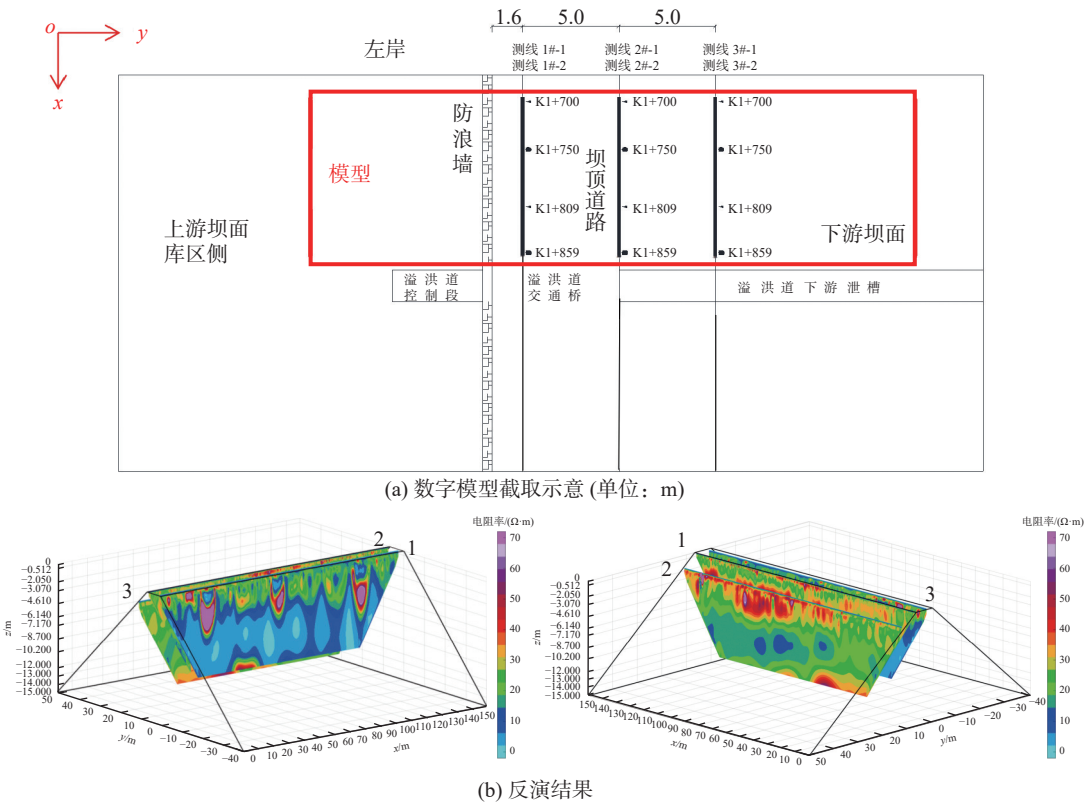


图 4 三维模型示意
Fig. 4 Schematic of three-dimensional model

根据高密度电法反演结果初步分析, 本文在测线 1 点 2 疑似渗漏范围内截取模型为例进行分析, 将模型 x 轴坐标相应更改成大坝桩号, 便于对照实例, 在大坝桩号 K1+766~K1+794 范围内选取左侧边界 K1+766 为基准沿 y 轴方向进行剖分, 观察坝体渗流趋势, 隐去 K1+700~K1+766 范围内电阻数据, 方便多角度观察。截取情况如图 5 所示, 并分析水流渗流趋势, 如图 6 所示。

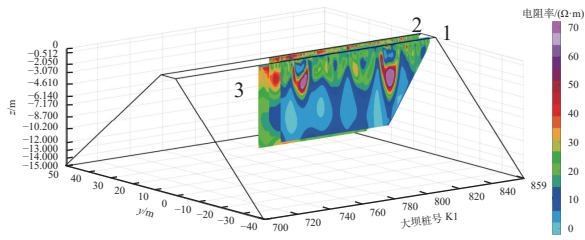


图 5 桩号 K1+766 处剖面
Fig. 5 Profile at station K1+766

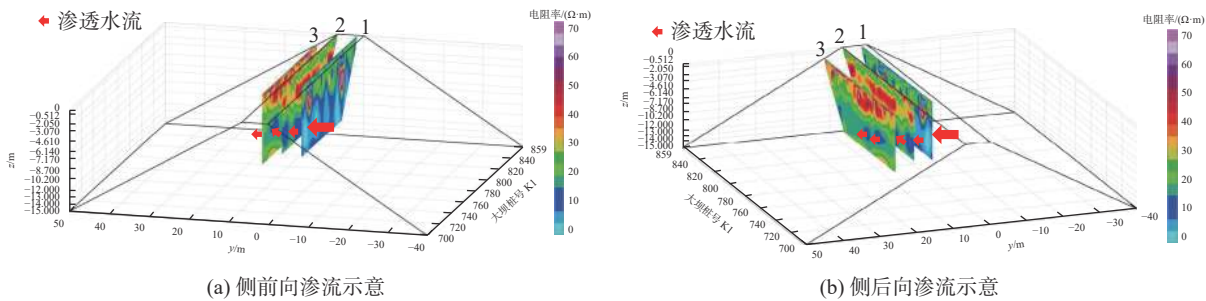


图 6 桩号 K1+720 处渗流示意
Fig. 6 Conceptual illustration of seepage at station K1+720

可见, 测线 1 断面处大坝桩号 K1+766~K1+794, 高程 79.0~83.0 m 低阻异常点 2 范围内识别出渗漏; 测线 2 断面处大坝桩号 K1+764~K1+778, 高程 79.0~81.5 m 低阻异常点 1 识别出两处相邻渗漏; 测线 3 断面在大坝桩号 K1+786~K1+814, 高程约 80 m 以下低阻异常点 2 识别出两处相邻渗漏; K1+836~K1+847, 高程 82.0 m 以下低阻异常点 3 识别出微小渗漏。

测线 2 断面处的两个相邻渗漏缺陷坐标与测线 1 断面低阻异常点 2 处渗漏坐标位置大致相同, 且低阻范围更大。测线 3 断面整体呈现低阻但相同坐标点 1 处电阻较周围比更低, 由此推断测线 1 断面处低阻异常点 2 防渗墙有缺陷, 通过两条渗流通道经过测线 2 断面低阻异常点 1 和点 2 处缺陷向测线 3 断面处大范围扩散。因测线 3 处整体电阻较低, 测线 3 断面处异常点 1 处防渗墙渗漏准确范围无法确定。

3.3 地下水位高程分析

坝体浸润线选取高度以该桩号处高密度电法反演结果中低阻异常区域边界顶点高程为准。实例中装置的电极距等参数均为最优选, 且选取了适当的极距参数进行校核, 有效排除了浸润线高度选取受装置分辨率的影响。

根据测线 1~3 反演结果图, 分析 3 组测线在桩号 K1+772 处含水率最高位置推测整体浸润线分布, 按其高程分别绘制在图 7 中。

由图 7 可知, 检测当日水位高程为 84.46 m, 测线 1 处土层浸润线高程为 83.00 m, 在防渗墙位置土层最高含水率高程骤降 1.46 m; 测线 2 处土壤最高含水率高程为 81.50 m, 相较测线 1 处下降 1.50 m; 测线 3 处浸润线高程 81.00 m, 相较于测线 2 处下降 0.5 m。根据不同测线断面之间浸润线高程差, 综合分析可得坝体渗漏情况(表 2)。

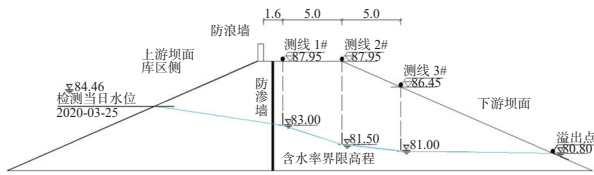


图 7 K1+772 处大坝地下水位截面图(单位: m)
Fig. 7 Cross-sectional diagram of groundwater level at station K1+772 (unit: m)

表 2 坝体渗漏情况
Tab. 2 Leakage situation of dam

测线编号	大坝桩号	高程范围	渗漏编号	渗漏情况	备注
测线1	K1+720~K1+742	[80.0, 83.0] m	点1	两处相邻渗漏	渗漏点上方出现土体下沉趋势
	K1+766~K1+794	[79.0, 83.0] m	点2	两处相邻渗漏	
	K1+820~K1+844	83.0 m以下	点3	两处相邻渗漏	
测线2	K1+764~K1+778	[79.0, 81.5] m	点1	存在渗漏	不排除测线1点1处与测线2点2、点3间存在渗漏通道
	K1+786~K1+814	80.7 m以下	点2	存在渗漏	
	K1+820~K1+852	82.0 m以下	点3	存在渗漏, 但程度较轻	
测线3	K1+786~K1+814	80.7 m以下	点1	两处相邻渗漏	因为测线2处渗流扩散, 测线3断面整体呈现低阻, 渗漏边界不明确, 微小渗漏易被掩盖。
	K1+836~K1+847	82.0 m以下	点2	存在微小渗漏	

根据现场实际情况, 测线 2 桩号 k1+772 进行水位校核, 通过布设在该处的测压管测得此处当日水位为 81.57 m, 与试验测得该处浸润线高度相差仅 0.07 m, 误差符合试验要求。现场通过全站仪测量的下游坝面出水口水位为 80.80 m, 与测线 3 处相差仅 0.2 m, 反向验证测线 3 处浸润线高度的准确性。

4 结 语

(1)三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术, 通过结合三维视角下模型断面处高密度电法反演结果图分析渗流趋势, 对比测点水位计算出的浸润线分布, 确定渗漏通道, 准确判断该测线断面范围内是否存在渗漏缺陷。当一段范围内的防渗墙出现多处渗漏, 会导致该范围内的断面反演图出现大范围低阻区, 影响渗漏缺陷的定位, 应减小电极距, 且在上游面补充探测断面, 通过多断面探测结果建立三维模型进行多

处渗漏定位分析。结合三维断面反演图,可以有效减少因其他渗漏通道渗流导致的缺陷识别误判,提高检测精度,减少经济损耗,为坝体渗流分析和大坝安全评价提供技术支撑。

(2)通过在坝体防渗墙下游处布设高密度电法测线检测其渗漏情况,当防渗墙距地面高度较高处出现渗漏缺陷,由于重力作用,水流通过防渗墙缺陷会向低处渗透,导致防渗墙下游坝体截面含水率增加,在结合高密度电法断面反演图分析时可能会掩盖防渗墙低处的渗漏病害,且坝体渗流通道多为倾斜向下,并具有横向扩散趋势,影响识别精度。当高密度电法检测下游出现低阻异常时应考虑是否为上游渗漏扩散导致,排除相关影响,减小识别误差,再确定具体缺陷位置。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2024 年全国水利工作会议在京召开[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(1): 1-2. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The 2024 National Water Conservancy Work Conference was held in Beijing[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2024, 44 (1): 1-2. (in Chinese))
- [2] 邹声杰. 堤坝管涌渗漏流场拟合法理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. (ZOU Shengjie. The research on theory and application of the flow-fitting method for detection of piping and leakage in dykes and dams[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [3] 苏怀智, 周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1-10, 39. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 1-10, 39. (in Chinese))
- [4] 胡少伟, 陆俊, 王国群. 地质雷达在探测地下富含水区域中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 33-37. (HU Shaowei, LU Jun, WANG Guoqun. Application analysis of detecting water-rich areas with ground-penetrating radar[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6): 33-37. (in Chinese))
- [5] 刘金安. 高密度电法在水文地质和工程地质中的应用[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(2): 109-110. (LIU Jin'an. Application of high density electrical method in hydrogeology and engineering geology[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(2): 109-110. (in Chinese))
- [6] FAYOU A, ZHOU H Q. Comparative study on the application of high-density electrical method and ground penetration radar in fault surveying[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 501/504: 2187-2191.
- [7] 黄真萍, 胡艳, 朱鹏超, 等. 高密度电阻率勘测方法分辨率研究与探讨[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(5): 1015-1021. (HUANG Zhenping, HU Yan, ZHU Pengchao, et al. Analysis of resolution influence factors of high-density electrical method and its application[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 1015-1021. (in Chinese))
- [8] 张赛珍, 王庆乙, 罗延钟. 中国电法勘探发展概况[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊 1): 408-424. (ZHANG Saizhen, WANG Qingyi, LUO Yanzhong. An overview on the development of the electrical prospecting method in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(Suppl1): 408-424. (in Chinese))
- [9] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 576-584. (YAN Jiayong, MENG Guixiang, LÜ Qingtian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(4): 576-584. (in Chinese))
- [10] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176. (DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 171-176. (in Chinese))
- [11] 史箫笛, 黄勋, 康小兵, 等. 高密度电法在覆盖型岩溶地区探测中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(增刊 2): 117-120. (SHI Xiaodi, HUANG Xun, KANG Xiaobing, et al. The application of high-density electrical method in the detection of covered karst areas [J]. *Yangtze River*, 2018, 49 (Suppl2): 117-120. (in Chinese))
- [12] 刘晓东, 张虎生, 黄笑春, 等. 高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, 13(1): 72-75. (LIU Xiaodong, ZHANG Husheng, HUANG Xiaochun, et al. The application of high density electrical method to Karst geological survey in Yichun city[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(1): 72-75. (in Chinese))
- [13] 肖川, 张义平, 刘超, 等. 高密度电法在探测煤矿采空区赋水情况的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 7999-8003. (XIAO Chuan, ZHANG Yiping, LIU Chao, et al. Research of high-density resistivity method in detection of coal-mine gob water-bearing condition[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(30): 7999-8003. (in Chinese))
- [14] 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. (LI Lei, ZHANG

- Guodong. Detective techniques and problems of hidden troubles of dams and dikes in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4): 91-99. (in Chinese))
- [15] 刘晓, 宋双林, 梁运涛. 典型岩溶模型的高密度电法正反演研究及应用[J]. 工程地质学报, 2019, 27(增刊1): 367-370. (LIU Xiao, SONG Shuanglin, LIANG Yuntao. Research and application of forward and inversion of high density electrical method to karst exploration[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(Suppl1): 367-370. (in Chinese))
- [16] 杨振威, 严加永, 刘彦, 等. 高密度电阻率法研究进展[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 969-978. (YANG Zhenwei, YAN Jiayong, LIU Yan, et al. Research progresses of the high-density resistivity method[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(5): 969-978. (in Chinese))
- [17] 孟海东, 杨成华, 温学飞. 高密度电法探测装置对比以及反演[J]. 煤炭技术, 2018, 37(8): 85-88. (MENG Haidong, YANG Chenghua, WEN Xuefei. Comparison and inversion of high density electrical detection device[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 85-88. (in Chinese))
- [18] 于文福. 高密度电阻率法正、反演模拟及其应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (YU Wenfu. Simulation and application of forward modeling and inversion of high-density resistivity survey[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))

Accurate identification technology for leakage channels in earth-rock dams through three-dimensional reconstruction and inversion

SUN Jiayi, DENG Chang, TANG Lei, WANG Haijun, WEN Jiaqi

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: High-density electrical method is the main technology for detecting leakage in earth-rock dams, but it often lacks precision in identifying the edges of the leakage area and discerning the causes of low resistivity identification. To address this limitation, a precise identification method for leakage channels through three-dimensional reconstruction and inversion is proposed: Multiple 2D parallel survey lines are laid out orthogonal to potential leakage channels, and high-density electrical method inversions are performed. The simplified inversion results are then placed within a three-dimensional model cross-section. Subsequently, the infiltration lines are deduced from the elevation data obtained from multiple survey lines, and a comprehensive analysis is conducted to determine the leakage position. Results demonstrate that this method accurately detects leakage positions, identifies the reasons for low resistivity identification during inversion, provides a more intuitive observation of the direction of leakage channels, and effectively reduces low resistivity identification errors caused by normal seepage.

Key words: earth-rock dam; leakage channel identification; three-dimensional reconstruction inversion; high-density electrical method