

综合物探信息融合技术在土石坝渗漏隐患探测中的应用

徐力群¹, 何英铭¹, 李东泽², 张国琛¹, 马泽锴¹, 沈振中¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:为解决单一物探技术无法精准定位土石坝局部渗漏问题,结合面波法和高密度电法探测技术,将不同源原始探测数据转化为电阻率,提出了采用主成分分析法的综合物探信息融合技术,开展了预设3处渗漏隐患通道的均质土石坝物理模型试验,对比分析两种单一物探技术与综合物探信息融合技术的渗漏通道定位区域,论证了综合物探技术的渗漏隐患定位的精准性,并给出了渗漏隐患区域的判别标准。将综合物探信息融合技术应用于某存在渗漏问题的土石坝工程,结果表明该技术具有无损探测、高效便捷、结果明显等优点,可实现渗漏隐患位置的精准定位。

关键词:土石坝; 渗漏探测; 综合物探技术; 信息融合; 电阻率; 主成分分析法

中图分类号: P631; TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)03-0086-07

Application of integrated geophysical information fusion technology in leakage hazard detection for earth-rock dams//XU Liqun¹, HE Yingming¹, LI Dongze², ZHANG Guochen¹, MA Zekai¹, SHEN Zhenzhong¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: To address the issue that a single geophysical exploration technology cannot accurately locate local seepage in earth-rock dams, through combining the surface wave method and high-density electrical method to transform multi-source original exploration data into resistivity, an integrated geophysical information fusion technology was proposed using principal component analysis. A physical model experiment was conducted on a homogeneous earth-rock dam with three preset seepage hazard channels. By comparing and analyzing the localization areas of seepage channels identified by two single geophysical techniques and the integrated geophysical information fusion technology, the accuracy of seepage hazard localization of the integrated geophysical exploration technology was demonstrated, and the criteria for identifying seepage hazard areas were established. The integrated geophysical information fusion technology was applied to an earth-rock dam project with seepage problems, and the results indicate that this technology has the advantages of non-destructive detection, high efficiency, operational convenience, and clear results, and can achieve precise localization of seepage hazards.

Key words: earth-rock dams; seepage detection; integrated geophysical exploration; information fusion; resistivity; principal component analysis method

土石坝是历史最为悠久的一种坝型,约占大坝总数的95%^[1],数量众多,安全运行至关重要。在运行管理过程中,许多土石坝或因自然老化,或因技术不足、维护不到位的问题,存在裂缝、渗漏等各类隐患问题。土石坝的破坏主要由渗漏造成,表现为坝体渗漏、坝基渗漏和绕坝渗漏等形式^[2],危及安全。因此,精准探测坝体隐患具有重要意义。

坝体隐患探测方法主要有人工检测、有损检测和无损检测^[3-4]。人工检测耗时间较长,难以发现内部隐患;有损检测包括对坝体取样、进行抽压水试

验等方式,检测过程简便,但有损检测会对坝体造成一定破坏,并且得到的数据量较少,难以展现坝体整体渗流情况,具有局限性;无损检测主要包括高密度电法、面波法、地质雷达法等,具有无破坏性、采集面广等优点^[5-6]。目前,土石坝渗漏主要采用多种无损检测技术进行多角度探测,通过对多种检测技术测得的数据进行归纳分析,进而判断坝体渗漏位置等。综合物探技术已在坝体渗漏检测方面取得了一定的研究成果,如赵丽娜等^[7]对某水库主坝采用探地雷达与高密度电法探测,证明不同物探方法可互为补

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510802)

作者简介:徐力群(1983—),男,副教授,博士,主要从事水工建筑物渗流分析控制与优化研究。E-mail: xuliquan6.2@163.com

充;皮雷等^[8]采用瞬变电磁法与高密度电法对某水库大坝进行探测,建立了钻孔、塌陷区与渗漏点水之间的电导率联系;马宏新等^[9]采用探地雷达与高密度电法进行检测,证明综合物探技术可以应用于坝基帷幕灌浆防渗加固效果的检测。但是,综合物探技术目前侧重于技术的组合,在信息融合方面的研究较少。本文采用高密度电法与面波法的电阻率数学转换方法,提出基于多源数据统一与主成分分析法的综合物探信息融合技术,并通过土石坝渗漏探测物理模型论证该综合物探技术的合理性与可行性。

1 综合物探信息融合技术

1.1 波速-电阻率转换

波速-电阻率转换主要利用 Faust 公式^[10],Faust 公式描述的是剪切波速度与电阻率之间的关系,其中剪切波速度指的是声波波速。由于面波法所利用的瑞雷波具有频散特性,与 Faust 公式中所需的声波并不一致,因此在利用 Faust 公式进行波速-电阻率转换时,应对测井声波与地震剪切波进行拟合。

1.1.1 Faust 公式地层参数的拟合

Faust 公式适用于声波波速与电阻率有良好统计关系的地下介质。波速-电阻率转换的过程就是利用 Faust 公式将面波法测得的剪切波速度转换为电阻率。由于面波法所使用的瑞雷波本身具有频散的特性,测井提取出的声波速度与 Faust 公式中所需的声波波速并不相同,因此需要建立两者间的数据转换关系,将测井声波数据转换为剪切波数据^[11]。综合 Faust 公式和 Garden 公式^[12],为方便进行最小二乘法拟合,将改进的 Faust 公式转化为

$$\rho^{1/m} = k^{1/m} c_0 + k^{1/m} c_1 (HR_l)^{1/6} \tag{1}$$

式中: c_0 、 c_1 为地层参数; H 为深度; R_l 为电阻率; ρ 为密度; k 为比例系数,一般取 0.31; m 为常数,取 0.25。

本文涉及的土石坝渗漏探测物理模型与实际工程的地质条件、地层物理特征不尽相同,因此应结合实际地质资料与土体试验结果,通过最小二乘法拟合出有关地层参数。本文所研究的土石坝渗漏探测物理模型与实际工程勘测结果分别如表 1、表 2 所示。表 1 数据源于实验室物理模型试验,通过高密度电法、面波法及土体试验实测;表 2 数据来自某水库土石坝工程现场,通过高密度电法、面波法结合地质勘察与插值融合方法获得。两者均通过电阻率转换公式与信息融合技术进行多源数据的统一,以确保结果准确性。本文采用模型坝和原型坝数据进行拟合,旨在验证综合物探信息融合技术的适用性和探测精度。模型坝采用中、重粉质壤土填筑,压实度

大于或等于 0.94。

表 1 土石坝模型岩土体参数

数据编号	埋深/m	密度/(g/cm ³)	电阻率/(Ω·m)
1	0.30	1.92	75.75
2	0.55	1.92	70.85
3	0.80	1.98	67.24
4	1.10	1.97	64.61
5	1.40	1.95	61.79
6	1.65	1.99	61.35
7	1.90	2.02	60.29
8	2.20	2.01	58.11
9	2.50	2.02	57.68

表 2 实际工程岩土体参数

数据编号	埋深/m	密度/(g/cm ³)	电阻率/(Ω·m)
1	0.50	1.95	71.66
2	1.50	1.88	59.73
3	2.55	1.91	55.25
4	3.71	1.90	51.46
5	4.98	1.94	49.44
6	6.37	1.94	47.08
7	7.91	1.93	44.80
8	9.60	1.95	43.34
9	11.46	1.97	42.04
10	13.51	1.98	40.65
11	15.76	2.01	39.75
12	18.24	2.01	38.35
13	20.96	2.00	36.83
14	23.95	2.01	35.75

改进的 Faust 公式为一次函数,通过最小二乘法拟合出 c_0 、 c_1 ,地层参数的求解方程组可参考文献[13]。将土石坝渗漏探测物理模型与实际工程勘测数据代入方程组,两者地层参数拟合结果如图 1 所示。

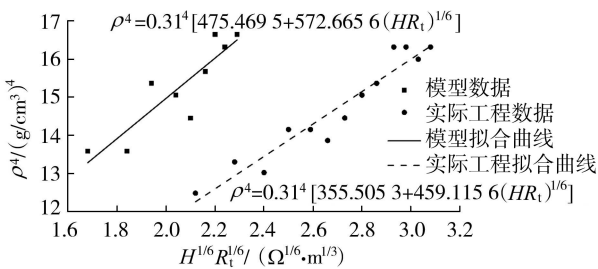


图 1 土石坝模型及实际工程地层参数拟合结果

拟合得到两区域对应地层参数分别为 $c_0 = 475.4695$ 、 $c_1 = 572.6656$ 和 $c_0 = 355.5053$ 、 $c_1 = 459.1156$,将 c_0 、 c_1 数值代入改进后的 Faust 公式,即可应用于后续土石坝渗漏探测物理模型与实际工程的面波法电阻率转换。

1.1.2 地震剪切波波速与测井声波波速的转换

测井资料合成地震记录与实际地震道记录这两种记录方式所应用的频率、观测尺度等均存在差异,造成地震波速度与从声波测井资料计算出的相应地层的层速度有较大差别。通过层速度与声波测井速

度的拟合,可以将地震波速度转换为声波测井速度。但由于通过面波法得到的剪切波速为相对值,运用具有常数项的模拟函数进行拟合时会产生较大误差,因此本文采用不具有常数项的幂函数模型^[14],面波法测得的剪切波可通过常见物理量关系式转换为纵波。综合前文推导,可得到面波法剪切波与电阻率的转换表达式为

$$R_t = \{ [0.65(\sqrt{2(1-v)/1-2\nu v_s})^{1.05} - c_0]/c_1 \}^6 / H \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比,取 0.35; v_s 为地震道深度域层速度,一般由地震测井或声波测井测得,这里指纵波速度。

1.2 高密度电法电阻率转换

高密度电法数据处理主要是将采集的数据通过畸变点剔除、多断面数据连接、地形校正后进行反演,进而得到电阻率等值线图。根据电阻率等值线图,结合场地环境、探测目的和既有地质资料进行地质分层和相关的地质解释。

a. 畸变点剔除。在进行高密度电法探测时,探测剖面会出现极大值点或极小值点,探测结果易呈现多解性。在进行实际探测时,首先需要检查电极是否固定牢固。当无法改善电极的接触条件时,需要将畸变点的数据信息剔除。

b. 多断面数据连接。由于探测仪器的限制,其勘测断面的长度往往难以满足探测要求,因此需要分段探测,将各断面的探测信息进行连接合并,进行整体反演。

c. 地形校正。在野外进行高密度电法探测时,地形起伏变化会导致视电阻率(观测得到的等效电阻率)异常区域出现偏移,因此对探测结果的数据信息需要进行地形校正。

d. 反演分析。反演分析是指根据正演结果得到的电阻率分布模型(即地电模型)和观测数据,建立一个目标函数,并寻找其最优解,从而推断出模型参数。通过不断更新模型参数,使正演数据与观测数据之间的残差最小,直至低于预设的误差阈值^[15-16]。

反演计算是通过算法构建实测数据与模型数据之间的误差函数,不断调整模型参数使误差最小,从而完成反演分析。本次反演分析使用的软件是 RES2DINV^[17],基于正演得到的地电模型各部位参数近似值与实测数据构建预测值与实测值之间的误差函数:

$$\Phi(a) = \sum [r_i^*(a) - r_i]^2 \quad (3)$$

式中: r_i^* 为正演得到的模型各部位参数近似值; r_i

为实测数据; a 为地电模型的参数, $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 。

反演计算通过对 a 经过 j 次迭代,得到 $a^{(j+1)} = a^{(j)} + \Delta a$,使得 $\Phi(a^{(j+1)})$ 取极小值,并且满足规定的误差限要求。经过正演、反演计算后,地电模型的参数矩阵 $a^{(j+1)}$ 可以认为是地下介质的真实参数。

1.3 信息融合技术

1.3.1 多源数据的统一

本文所涉及多源数据在探测物理量、探测范围与探测数值的大小方面不尽相同,因此对于不同源的原始数据,应在量纲、范围、数值上进行统一^[18]。量纲方面,面波法与高密度电法的电阻率转化方法是将二者的探测结果统一转化为电阻率;范围方面,利用克里金插值法对探测数据进行补全;数值方面,根据探测数值的相对大小,各自线性代换为同一区间,本文采用区间 $[0, 100]$,代换公式为

$$d_i = 100(d_{0,i} - d_{0,\min}) / (d_{0,\max} - d_{0,\min}) \quad (4)$$

式中: d_i 为代换值; $d_{0,i}$ 为原值; $d_{0,\min}$ 为系列数据最小值; $d_{0,\max}$ 为系列数据最大值。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析法能降低所研究的数据空间的维数。主成分分析法对经过量纲、范围、数值统一过后的多源数据进行信息融合,能确保融合后的综合变量在人为规定的信息采用区间内反映原本变量^[19]。本文计算得到面波法代换数据为第一主成分,高密度电法代换数据为第二主成分。土石坝物理模型和实际工程的第一主成分权数分别为 64.95% 和 78.74%,第二主成分权数分别为 35.05% 和 21.26%;此时得到能够反映两种物探方法所得视电阻率的综合变量,将其称为拟视电阻率。

2 土石坝渗漏探测物理模型试验

2.1 土石坝渗漏模型

为论证综合物探技术的准确性与可行性,建立室外土石坝物理模型(图 2),土石坝为均质土体结构,采用实际工程排泥区底部的中、重粉质壤土填筑,压实度不低于 0.94。模型坝的土层物理力学参数如下:渗透系数为 1.2×10^{-5} cm/s,内摩擦角为 24.5° ,黏聚力为 16.3 kPa,干密度为 $1.92 \sim 2.02$ g/cm³,最优含水率为 12.5%。施工时采取降水措施,填筑土料含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内。筑坝分层填筑厚度为 30 cm,碾压 6~8 遍,每层检测 3 个点的压实度。通过严格控制筑坝参数,确保模型坝与实际工程在物理力学特性上具有高度一致性。

渗漏通道 1 直径为 10 cm,呈直线布置在上游水

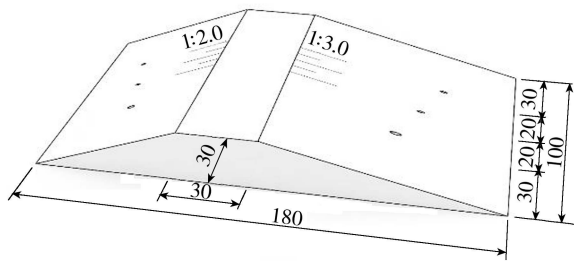


图2 土石坝三维模型示意图(单位:mm)

位以下,进出口距堤坝右岸边墙 3 m,距坝底 1.0 m,砂砾石以纱网包裹;渗漏通道 2 直径为 15 cm,呈弧线布置在上游水位以下,进出口距堤坝左岸边墙 3 m,距坝底 1.5 m,弧线段向边墙侧弯曲 1 m,砂砾石以纱网包裹;渗漏通道 3(天然渗漏通道)直径为 10 cm,呈直线布置在上游水位以下,进出口距堤坝左岸边墙 5 m,距坝底 1.25 m,通道内填细砂。渗漏通道布置如图 3 所示。

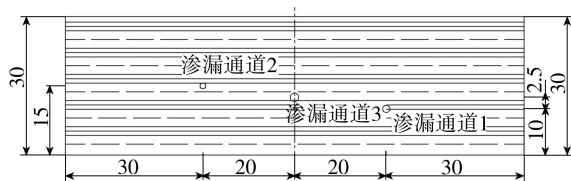


图3 渗漏通道下游立面图(单位:mm)

2.2 高密度电法探测结果

高密度电法装置分为温纳装置、偶极装置、微分装置及施伦贝尔 1 装置等^[20]。由于现场场地能布置的测线长度受限,所以本文高密度电法探测采用温纳装置。

采取温纳法排列方式对试验坝顶部坝轴线附近进行高密度电法探测,沿坝轴线设置电极,电极间距为 0.12 m。高密度电法探测选用瑞典 Guideline Geo 公司生产的 ABEM Terrameter LS2 型电法仪。探测结果如图 4 所示,可以看出高密度电法探测出的相对低阻区有 2 处,分别在深度 0.6 m、测线 3.6 m 交叉处与深度 1.5 m、测线 4.8 m 交叉处附近,与渗漏通道 2 和 3 的位置相近。测得渗漏通道含水率增大,视电阻率减小,但因受限于土石坝模型的大小,单一高密度电法未能准确反映模型预设的渗透通道 1。

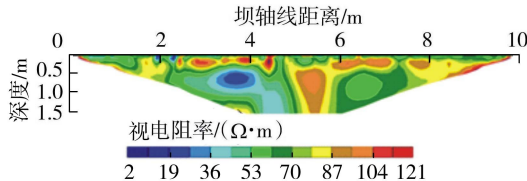


图4 土石坝物理模型高密度电法反演结果

2.3 面波法探测结果

沿坝轴线布置测线,采用瞬态面波法对土石坝渗漏模型进行渗漏探测,瞬态面波勘探数据采集中心

点距为 1 m,即每间隔 1 m 采集 1 个面波点数据。瞬态面波探测仪器为青岛骄鹏工程技术研究所有限公司生产的 miniseis48 道地震仪。面波法探测结果如图 5 所示,探测出的相对低速区有 3 处,分别在深度 1.5 m、测线 1~3 m 交叉处,深度 1.5 m、测线 5.0 m 交叉处,深度 1.8 m、测线 7.0 m 交叉处附近,其中深度 1.5 m、测线 1~3 m 交叉处为渗漏通道 2,表现为 1 个相对低速区。面波法测得结果反映出渗漏通道含水率越高,其剪切波速越小的规律。

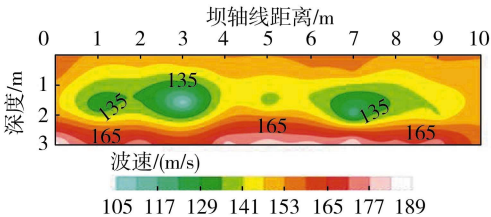


图5 土石坝物理模型面波法反演结果

2.4 综合物探信息融合技术

高密度电法探测范围为倒梯形,为匹配面波法探测范围,对高密度电法探测空白区域进行克里金插值,数据补全后探测结果见图 6。利用面波法剪切波与电阻率的转换表达式,可以对面波法反演提取出的剪切波数据进行转换,得到来源于面波法的土石坝渗透模型内部各部位视电阻率及其分布,如图 7 所示。

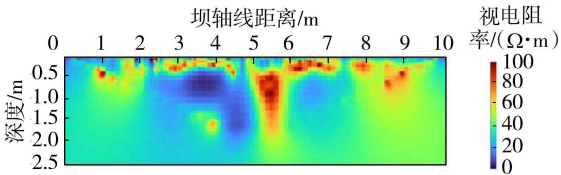


图6 高密度电法视电阻率分布

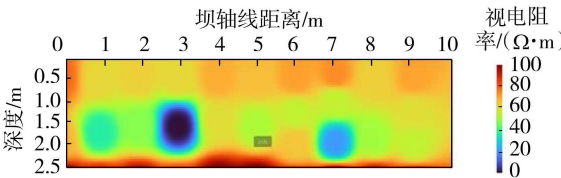


图7 面波法视电阻率分布

从图 6 和图 7 可以看出,两种单一物探方法中面波法效果较好,3 处渗漏通道在图中均有显示,但异常区分布分散,容易误判异常区的个数及位置,存在多解性^[21];高密度电法对渗漏通道 1 的反映效果较差。

对数据进行转化后,对高密度电法、面波法测得结果进行数据融合处理,将这两种方法测得的视电阻率进行多源数据的统一,将多源数据转化为 $[0, 100]$ 区间内的数据点,之后通过主成分分析法降维处理,整理两组数据融合后的综合数值信息,并根据

拟视电阻率及其各自的位置信息,绘制土石坝物理模型坝轴线剖面综合物探拟视电阻率,见图 8。

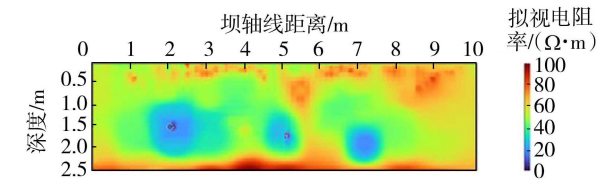


图 8 综合物探拟视电阻率

从图 8 可以看出,坝轴线剖面呈现 3 处相对低阻区,与实际预设渗漏通道数量及位置吻合。其中渗漏通道 1 因探测盲区采用插值补全,故未作验证。通过综合物探信息融合技术标定的渗漏位置(红色标记)与实际预设点(白色标记)最大偏差为 0.14 m,最小偏差小于 0.1 m,表明其探测精度较高;相较于单一物探技术,综合物探信息融合技术有效解决了探测范围局限及多解性问题。

综合物探信息融合技术定位结果显示,渗漏通道对应区域的拟视电阻率范围为 0~25 Ω·m。试验模型严格参照实际工程标准构建,采用中、重粉质壤土填筑,控制参数包括颗粒分析试验参数、压实度及含水率。数据对比分析表明,模型坝拟视电阻率(57.68~75.75 Ω·m)与实际工程(35~75 Ω·m)存在差异,这主要源于地质非均质性与施工波动性。尽管如此,改进 Faust 公式结合主成分分析法仍实现了模型坝小于 0.14 m 的定位精度,并在实际工程中成功识别渗漏隐患,表明该方法在参数差异范围内具有稳定性。

然而,由于实际工程的填筑材料、地层结构及环境荷载的复杂性可能导致电阻率数值范围显著扩大,建议在应用时需结合具体工程的地质勘察数据,对拟视电阻率阈值进行动态调整,并通过局部物理模型试验验证探测标准的适用性,以确保技术成果的精准转化。

3 工程应用实例

3.1 工程概况

为全面评估某水库土石坝的安全性态,需对其运行状况进行系统检测与科学评价。坝体由中、重粉质壤土分层碾压而成,压实度大于或等于 0.94,坝基为砂砾石层,局部夹杂薄弱夹层。填筑材料颗粒均匀,含水率严格控制在最优值±2%范围内。然而,施工碾压不实及土工膜局部破损导致坝体潜伏多处渗漏隐患,主要表现为坝体渗漏和绕坝渗漏。结合高密度电法和瞬态面波法的探测结果,综合分析土石坝坝体和基础的土体密实均匀性和密实程度、土石坝坝体内含水分布情况等。测区划分为

5 个区域(WT1~WT3),本文重点分析 5 区测线(WT3)。

3.2 高密度电法探测结果分析

测线 WT3 段采取温纳法排列方式进行了高密度电法探测,电极间距为 2 m,探测结果如图 9 所示,在深度 4.98~13.5 m、桩号 744~778 m 处有相对低阻区域,推测该区域含水率较高,容易发展为渗漏通道;在深度 15.8 m 以下、桩号 736~776 m 处存在相对高阻区,产生的原因是上方低阻异常区域对该区域具有屏蔽作用,致使该区域电流较弱,在视电阻率剖面图上表现为高阻异常区[16]。

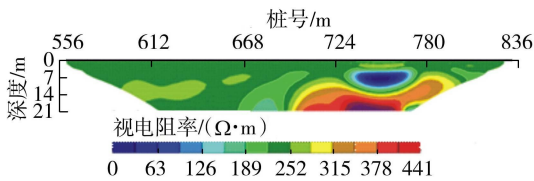


图 9 高密度电法探测结果

3.3 面波法探测结果分析

瞬态面波勘探数据采集集中点距为 10 m,即每隔 10 m 采集 1 个面波点数据。排列好 20 道采集器后,以 3 m 的偏移距进行锤击,当触发地震采集系统记录开关时进行数据采集,之后将剖面推进 10 m。瑞雷面波速度受介质孔隙率、含水率等因素影响,根据其波速与介质特性之间的关系可知:瞬态面波反演结果中剪切波速以低速为主要特征[22],波速值一般介于 130~180 m/s 之间。测线 WT3 面波法探测结果见图 10,可见深度 10 m 以下、桩号 745~770 m 处存在低波速异常区,其呈较低的剪切波速特征,小于左右两侧正常区域的剪切波速。

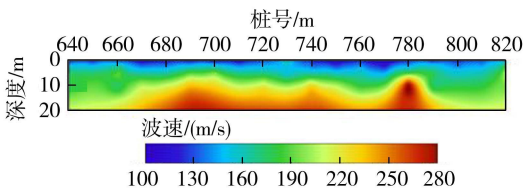


图 10 面波法探测结果

3.4 综合物探信息融合分析隐患位置

根据上文高密度电法与面波法探测结果,对两种方法分别进行克里金插值,得到深度 0~24 m、桩号 620~820 m 处的数据,将其转化为具有统一丈量尺度的数据,并进行数据融合,得到信息融合后的综合物探拟视电阻率如图 11 所示,根据前文土石坝渗漏模型试验得到的渗漏隐患区域判别条件,判断拟视电阻率小于 25 Ω·m 的区域为渗漏隐患区域。

从图 11 可以看出:WT3 区表层及深度 10 m、桩号 755 m 处为相对低阻区,表层区域可能是由于施工碾压不实导致,而深度 10 m、桩号 755 m 处具有向

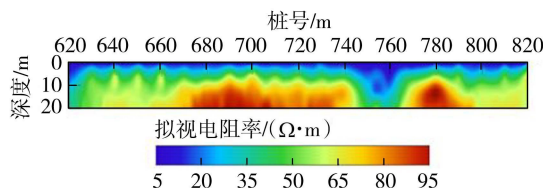


图 11 综合物探拟视电阻率

下凹的、具有较明显边界的低阻区,将其命名为渗漏通道 A,其主要特点为窄而深。经现场人工检查后发现,该区域确实存在渗漏。推测形成原因为土工膜破损,导致土体内部细微颗粒在渗透压力的作用下随水流移向下游,土体内部孔隙不断增大,形成渗漏通道^[23-24]。从实际应用来看,该融合技术能准确定位渗漏。

4 结 论

a. 提出了综合物探信息融合技术,包括研究利用面波法、高密度电法的电阻率数学转换方法,通过对多源信息的统一与主成分分析法进行处理分析,得到能够反映两种物探方法所得视电阻率的综合变量。

b. 构建土石坝渗漏模型并预设多条渗漏通道,利用面波法与高密度电法进行探测,通过综合物探信息融合技术对探测结果进行分析,结果表明分析推测渗透通道与实际位置基本一致、误差较小,论证了该综合物探信息融合技术的合理性与准确性。

c. 通过对某水库土石坝进行两种物理探测技术检测,获取了该土石坝的多源物探信息,利用综合物探信息融合技术查明了该水库在 WT3 区深度 10 m、桩号 755 m 处存在渗漏,该处的渗漏会影响大坝安全。

d. 综合物探信息融合技术具有无损探测、高效便捷、结果明显等优点,对信息融合技术所得数据进行分析可以较大幅度地减少由单一方法产生的多解性,能够较为准确地查明坝体结构及隐患,有效指导土石坝隐患检测。

参考文献:

[1] 徐力群,张国琛,马泽锴. 土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1769-1779. (XU Liqun, ZHANG Guochen, MA Zekai. Development of comprehensive geophysical prospecting technology for hidden danger detection of earth rock dams [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1769-1779. (in Chinese))

[2] 孙礼钊. 地球物理方法在某水库坝体隐患探测中的应用研究[J]. 城市勘测, 2022(1): 200-204. (SUN Lizhao. Application of geophysical methods in defect

detection for a reservoir dam [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(1): 200-204. (in Chinese))

[3] 葛双成,江影,颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 263-272. (GE Shuangcheng, JIANG Ying, YAN Xuejun. Application of comprehensive geophysical exploration technique to hidden trouble detection of dyke [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 263-272. (in Chinese))

[4] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 74-81. (LIU Guoqing, HONG Yunfei, WANG Wei, et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 74-81. (in Chinese))

[5] 梁国. 联合高密度电法和地质雷达法在北江大堤检测中的应用[J]. 水利技术监督, 2022(12): 36-39. (LIANG Guo. Integrated application of high-density electrical resistivity tomography and ground penetrating radar in defect detection for North River Levee [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2022(12): 36-39. (in Chinese))

[6] 冷元宝,黄建通,张震夏,等. 堤坝隐患探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 370-379. (LENG Yuanbao, HUANG Jiantong, ZHANG Zhenxia, et al. Research progress in scatheless detection of hidden troubles in embankments [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 370-379. (in Chinese))

[7] 赵丽娜,霍吉祥,俞扬峰,等. 郑州“7·20”特大暴雨后常庄水库主坝综合物探分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(11): 152-155. (ZHAO Lina, HUO Jixiang, YU Yangfeng, et al. Comprehensive geophysical prospecting analysis of the main dam of Changzhuang Reservoir after the torrential rainstorm of July 20, 2021 in Zhengzhou [J]. Yellow River, 2022, 44(11): 152-155. (in Chinese))

[8] 皮雷,谭磊,李波. 综合物探方法在水库绕坝渗漏隐患探测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 82-86. (PI Lei, TAN Lei, LI Bo. The application of the integrated geophysical prospecting method to the detection of leakage hazards around the dam [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(5): 82-86. (in Chinese))

[9] 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 Hongxin, LI Zhuo, FAN Guangya, 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))

[10] 陈钢花,王永刚. Faust 公式在声波曲线重构中的应用

- [J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 125-128. (CHEN Ganghua, WANG Yonggang. Application of Faust formula in acoustic waveform reconstruction [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28(2): 125-128. (in Chinese))
- [11] 管泽英, 党如姣. 东莞某区地下岩样声波波速、密度、主频降低量、电阻率关系研究[J]. 国防交通工程与技术, 2018, 16(4): 24-27. (GUAN Zeying, DANG Rujiao. Correlation analysis of acoustic velocity, density, dominant frequency attenuation and resistivity in subsurface rock samples from Dongguan Area[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2018, 16(4): 24-27. (in Chinese))
- [12] 黄小平, 高玉春. 对 Garden 公式应用条件的探讨[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(3): 233-234. (HUANG Xiaoping, GAO Yuchun. Critical Evaluation on the applicability conditions of Garden Formula [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(3): 233-234. (in Chinese))
- [13] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 基于不等式约束的最小二乘法三维电阻率反演及其算法优化[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 260-268. (LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, et al. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization [J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(1): 260-268. (in Chinese))
- [14] 王明路. 声波测井速度与地震速度的关系研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [15] 刘晓, 彭友文, 袁志辉, 等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 71-75. (in Chinese))
- [16] 沈添耀, 董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 63-69. (in Chinese))
- [17] 孙天宇, 潘磊, 杨睿扬. 基于 RES2DINV 的高密度电法在地下水勘查中的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2020, 30(4): 37-42. (SUN Tianyu, PAN Lei, YANG Ruiyang. Application of high-density electrical resistivity tomography for groundwater exploration using RES2DINV inversion [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 30(4): 37-42. (in Chinese))
- [18] 刘鸿扬. 多源信息融合技术在滑坡灾害评估中的应用研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
- [19] 印兴耀, 孔国英, 张广智. 基于核主成分分析的地震属性优化方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2): 179-183. (YIN Xingyao, KONG Guoying, ZHANG Guangzhi. KPCA-driven seismic attribute optimization: an innovative framework and its geophysical applications [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(2): 179-183. (in Chinese))
- [20] 赵荣春, 吕玉增, 张智, 等. 基于 2.5D 有限元的高密度电法不同装置勘探效果研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 128-136. (ZHAO Rongchun, LYU Yuzeng, ZHANG Zhi, et al. Exploring the detection performance of different array configurations for multi-electrode resistivity method tomography using a 2.5D finite element method [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 128-136. (in Chinese))
- [21] 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. (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. (in Chinese))
- [22] 石明, 冯德山, 戴前伟. 综合物探方法在堤防质量检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1328-1331. (SHI Ming, FENG Deshan, DAI Qianwei. Application of integrated geophysical method in quality detection of dikes [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1328-1331. (in Chinese))
- [23] 岑威钧, 和浩楠, 李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 61-65. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 61-65. (in Chinese))
- [24] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 16-22. (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 16-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-21 编辑: 骆超)