

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

沈添耀,董海洲

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:为准确探测堤坝渗漏通道的位置及范围,降低单一探测方法的局限性及不确定性,提出了一种基于高密度电法与综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法。抽水蓄能电站实例验证表明:综合示踪法通过多种示踪试验对高密度电法测试成果进行验证,可以有效辅助高密度电法判别低阻异常区,解决高密度电法成果解释非唯一性问题;高密度电法和综合示踪法联合进行堤坝渗漏通道探测效率高,准确性强。

关键词:高密度电法;综合示踪法;渗漏通道;抽水蓄能电站

中图分类号:TV698.1;P624

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0063-07

Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method//SHEN Tianyao, DONG Haizhou (College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to accurately detect the location and range of dam leakage channels and reduce the influence of the limitation and uncertainty of single method on the detection result, a method of combining high-density electrical method and comprehensive tracer method to detect the hidden dangers of dam leakage is proposed. The verification of a pumped storage power station example shows that, the results of the high-density electrical method can be verified by the comprehensive tracer method through several tracing tests. The dam leakage channel detection technology combined with high-density electrical method and comprehensive tracer method accurately reveals the location and range of the hidden danger of dam leakage, overcomes the non-unique defect of single method detection result. The combination of high-density electrical method and comprehensive tracer method for dam leakage channel detection has high efficiency and accuracy.

Key words: high-density electrical method; comprehensive tracer method; leakage channel; pumped storage power station

堤坝的隐患具有隐蔽性、时空随机性等特征,隐患的存在会减少堤坝的使用寿命,甚至造成溃坝的发生^[1]。我国许多堤坝存在渗漏安全隐患,渗透破坏形成渗漏通道是产生安全隐患的重要原因之一^[2]。如果未能及时发现并采取有效措施对渗漏问题进行处理,就会对堤坝的使用寿命和安全性造成一定的威胁^[3-4]。因此,准确查明堤坝内部的渗漏通道,为堤坝防渗处理提供指导尤为重要,有利于提高工程的经济效益和社会效益^[5]。

目前的堤坝渗漏探测方法一般有地质钻探技术^[6]、地球物理勘探技术^[7-8](以下简称“物探”)以及综合示踪技术^[9]等。地质钻探技术只能探测出钻孔周围的地质条件,堤坝整体探测需要的钻孔数

量多,对堤坝破坏性较大,成本高,经济效益较低。物探广泛应用于水文、地质等领域,该方法探测堤坝隐患的原理是利用隐患处与周围岩体之间的物理性质(如密度、磁性、电学性质等)差异来寻找地质异常区域,不破坏堤坝结构,不影响使用性能,可以确定地层中的构造、裂缝、空洞等可能的导水通道,但较难确定这些通道内地下水的流动性、上下游的水力联系,不能确定这些通道是否造成了渗漏。综合示踪法是通过各种天然和人工示踪剂对堤坝内部地下水的来源进行辨别,将各种示踪剂得到的结果综合分析,描绘堤坝内部的渗流场,建立多点之间的水力联系,同时定量计算出地下水流速、渗流量等参数,但是根据这种方法得到的渗漏通道位置、走向等

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1510802)

作者简介:沈添耀(1998—),男,硕士研究生,主要从事堤坝渗透破坏探测研究。E-mail:1198318151@qq.com

通信作者:董海洲(1976—),男,副教授,博士,主要从事渗透破坏和环境岩土工程研究。E-mail:donghzh@hhu.edu.cn

是通过分析而来,其结果仅仅是一种推断。

由于单一方法的局限性以及不确定性等问题,近年来,国内外学者开始应用多种方法结合对堤坝渗漏进行探测,将多种方法得到的结果相互印证,提高探测渗漏通道位置的准确性。有学者采用多种物探方法对堤坝渗漏进行探测,如 Martinez-Moreno 等^[10-12]将电阻率法与其他物探方法(磁法、弹性波法等)联合对堤坝渗漏进行探测,结果表明综合物探方法能够较准确地揭示渗漏隐患位置与范围。除了应用综合物探方法进行探测以外,还有学者将物探方法与其他方法结合探测堤坝隐患,如 Lee 等^[13-15]将多种物探方法与钻探、染料示踪等方法联合对堤坝渗漏进行探测。

目前,高密度电法和综合示踪法为应用较广的探测方法,但将两者结合进行堤坝渗漏调查尚不多见。高密度电法^[16-17]是堤坝渗漏探测的重要且应用较多的方法。相对于传统电法而言,高密度电法具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点^[18]。高密度电法同时具备电剖面法和电测深法 2 种方法的综合探测能力,能够探测出地下沿长度-深度方向的二维空间电场分布情况,进而判断出可能存在的渗漏通道位置。现在发展起来的三维高密度电法^[19]更是能够探测出沿长度-宽度-深度方向的三维空间电场分布情况,能够更为直观地揭露堤坝内部渗漏通道的存在,降低了探测结果非唯一性的影响。但高密度电法作为物探方法在进行地下水渗漏探测时具有一定的局限性,而综合示踪法可以在高密度电法探测的基础上进行补充和验证。综合示踪法将同位素示踪与盐类示踪、染色示踪等结合,通过温度、电导、环境同位素等天然示踪剂,荧光剂、食盐溶液等人工示踪剂,对堤坝内部渗漏隐患进行探测,定性判断各点水力联系,定量计算地下水流速,解决高密度电法探测结果解释非唯一性问题。

本文提出了一种高密度电法与综合示踪法联合探测堤坝渗漏隐患的方法(以下简称高密度电法-综合示踪法联合探测方法),实现 2 种方法优势互补,进而更大程度上提升探测的准确性,克服单一方法探测的不确定性,并通过某抽水蓄能电站右岸的渗漏探测的实例应用,对高密度电法与综合示踪法联合探测堤坝渗漏隐患的可行性进行了验证。

1 探测原理

1.1 高密度电法

在应用于堤坝渗漏探测的多种物探参数中,土体电阻率最敏感,因此多采用电法对堤坝渗漏隐患进行探测^[17]。其中高密度电法^[20]应用最为广泛,准

确性较高。高密度电阻率法属于直流电阻率法,它是在常规电法勘探基础上发展起来的一种阵列勘探方法,是以岩土体的电性差异为基础,研究在施加电场的作用下,地下传导电流的变化分布规律。当堤坝内部存在渗漏隐患时,隐患处孔隙率与含水率增大,使得该处与周围岩土体相比,会出现低阻异常现象。

高密度电法探测系统包括数据采集部分和数据处理部分,如图 1 所示。现场测量时,只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,并与电极转换器及高密度主机连接。高密度电法仪的核心是电测仪和电极转换器,电极转换器是一种由单片机控制的电极自动换接装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式及测点的转换,同时将测量信号送入电测仪。测量完成后,将测量数据导入计算机进行数据处理,最终通过正反演软件成像并对资料进行解释。

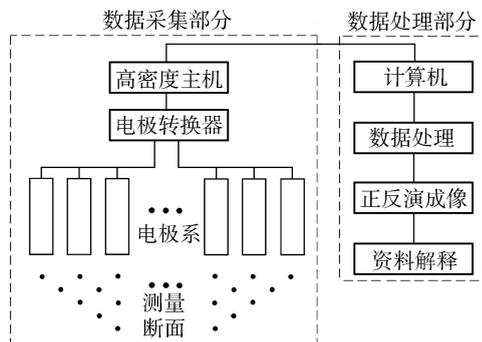


图 1 高密度电法探测系统

1.2 综合示踪法

综合示踪法^[21-22]是通过各种天然、人工示踪剂,测定水文地质参数、地下水渗透流速等,寻找渗漏源。综合示踪法对地下水渗流进行定性和定量的研究,探测水库或堤坝的渗漏情况,可以获得:①堤坝下游地下水的来源。堤坝下游的地下水来源不一定全是库水,可能是邻近含水层中的水、含水层中的水与库水的混合或者山坡水等。因此,在调查渗漏时,首先要做的就是判断渗流水的来源;②下游出水点的水力学特征。当库水某些成分发生变化时,通过出水点处水的成分是否随之发生变化,判断两点或多点之间的水力联系;③人工示踪剂浓度随时间的变化情况,进而定量计算库水与出水点之间水的流动速度。

综合示踪法分为天然示踪法^[23]和人工示踪法^[24],天然示踪剂包括温度、电导、环境同位素(如 δD 、 $\delta^{18}O$)、水化学离子(如 Cl^- 、 SO_4^{2-}),人工示踪剂包括荧光素、放射性同位素(如氡、 ^{131}I)、食盐溶液等。除了上述常规示踪剂外,其他通过不同方式进入水中的物质也可以作为示踪剂,如:①城市工业废水,这些废水根据来源不同经常含有一些特定的化学元素,可以通过这些化学元素建立库水与渗流水之间的水力

联系;②水中的微量元素,例如地震活动或者残余的火山活动会使水中微量元素硼的含量增多,在这些地区的水库可以通过硼作为示踪剂来探测渗漏。

2 高密度电法-综合示踪法联合探测方法

高密度电法-综合示踪法联合探测方法探测堤坝渗漏隐患的思路:①通过高密电法探测发生渗漏处的岩层电阻率分布情况,确定电阻率异常区域;②在电阻率异常位置布置钻孔,为后续示踪试验做准备;③对库水、山坡水、渗漏位置水、钻孔水等进行天然示踪试验;④在钻孔内投入人工示踪剂,计算钻孔内水的流速,同时在库水、山坡水等位置投放人工示踪剂进行连通试验;⑤联合分析高密度电法和综合示踪法探测成果,综合判断渗漏通道位置以及范围。

高密度电法-综合示踪法联合探测渗漏通道施工工艺流程如图2所示。联合探测具体实施步骤主要包括高密度电法探测、钻孔布置、综合示踪探测及渗漏通道综合判定等。

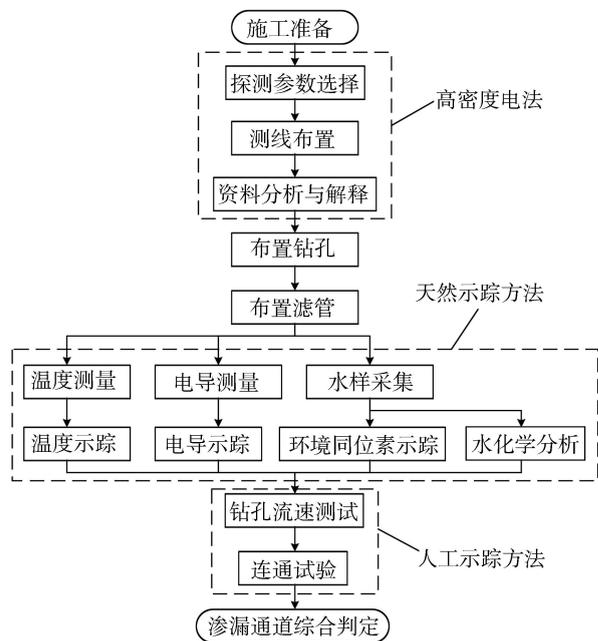


图2 高密度电法-综合示踪法联合探测渗漏通道施工工艺流程

2.1 高密度电法探测

高密度电法探测步骤包括探测参数选择、测线布置和资料分析与解释。①探测参数选择:包括电极极距、电极个数、排列方式等。根据堤坝长度选择合适的电极间距以及电极个数,以保证对堤坝内部电阻率的整体探测。根据多种排列方式对坝区的初步探测结果,对比坝区实际地质条件,选择合适的排列方式并确定电极布设安排。②测线布置:按照电极布设安排布置电极,保证电极与土体接触良好,并通过电缆连接电极。③资料分析与解释:根据测试要求采集数据,并将数据导入计算机,进行数据预处理,

最终通过正反演软件反演成像,根据成像结果,分析电阻率异常区域,初步确定可能存在的导水通道。

2.2 钻孔布置

根据高密度电法探测结果,选定合适位置布置钻孔。采用工程钻机进行钻孔,钻孔口径及钻具规格保证成孔后钻孔符合规范要求。各钻孔水位以下所有测试段采用透水滤管,滤管采用PVC管或钢管。滤管均匀呈梅花形开孔,上下两排孔交错布置。地下水水位以上的套管部分不开孔,保持原状不透水。套管高出地面20cm左右,防止地面上的杂物掉入钻孔内。

2.3 综合示踪法探测

综合示踪法探测步骤包括温度、电导示踪、采集水样、环境同位素、水化学示踪、钻孔流速测试和连通试验。①温度、电导示踪:探测库水、山坡水等可能的渗漏来源的温度、电导,同时绘制钻孔水的温度-深度、电导-深度图,分析钻孔水来源。②采集水样:采集库水、山坡水、钻孔水、渗漏处水的水样。③环境同位素、水化学示踪:对水样进行环境同位素、水化学分析,研究各点之间水组成成分的相似性。④钻孔流速测试:在钻孔内投入示踪剂,通过示踪剂浓度变化计算钻孔内水的水平、垂向流速。⑤连通试验:在库水、山坡水等位置投放人工示踪剂,监测钻孔、渗漏处是否出现示踪剂,验证各点之间的连通性。

2.4 渗漏通道位置及范围综合判定

以高密度电法探测的岩层电阻率分布情况为基础,在电阻异常区域钻孔,通过综合示踪法对电阻异常区域进行判别,依据大量的物探、同位素、温度电导、地下水流速、水化学等试验数据,对渗水点地下水来源、途径等进行综合判断,多种方法和技术可以相互验证和校正,得到更为准确的结论,实现2种方法联合对堤坝渗漏隐患进行探测,为后续防渗加固处理提供技术支撑。

3 实例验证

3.1 工程概况

将本文提出的联合探测方法应用于山东省某抽水蓄能电站(图3),电站上水库挡水坝采用钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程413.80m,坝顶长540.46m,最大坝高99.80m,坝顶宽10.00m。左岸布置有放空洞(兼导流、泄洪),右岸横岭山体布置有排水观测洞和上水库进/出水口,库盆防渗采用钢筋混凝土面板与库底高密度聚乙烯土工膜及垂直防渗帷幕相结合的综合防渗方案。2017年电站上水库右岸排水廊道渗流量突然增大,进出水口两侧渗压计测值出现大幅度增大的现象,严重影响电站的正常工作,造成安全隐患。

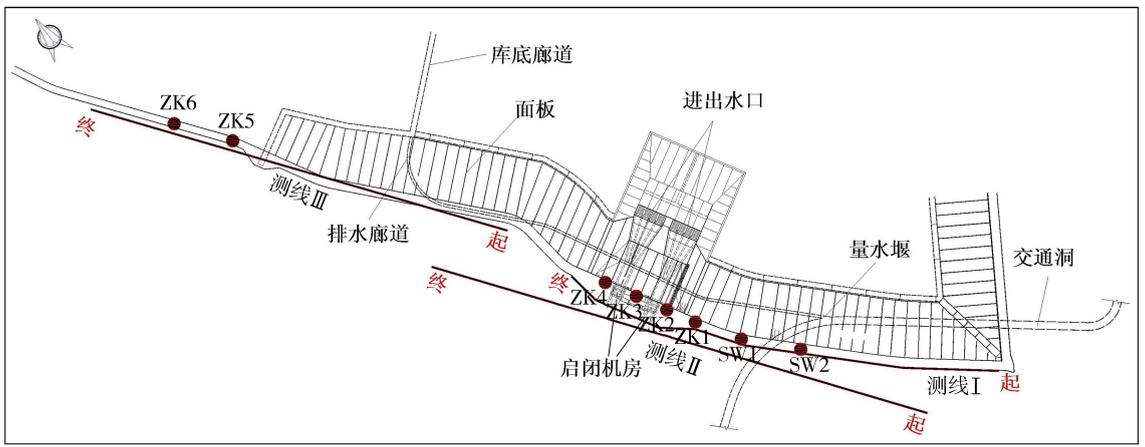


图3 测线以及钻孔布置

3.2 高密度电法探测

在电站上水库右岸沿岸共布置了3条测线(图3), 每条测线有110个电极, 电极极距为5 m, 长550 m。每条测线都是由南至北布设, 对应图3从右向左。测线I在进出水口位置弯曲, 但由于测线较长且弯曲弧度较小, 因此对结果的影响可忽略不计。采用温纳排列对3条测线进行探测分析, 将探测得到的结果进行坏点剔除、地形校正、格式转换、反演计算成图等步骤, 最终得到3条测线的电阻率图(图4~6)。当堤坝内部存在渗漏通道时, 渗漏位置处有地下水经过, 使得电导率增加, 电阻率降低, 在反演图中显示为低电阻异常。因此, 高密度电法探测可以通过识别反演图中低电阻区域, 判断出可能存在的渗漏通道位置, 如图4~6反演图中圈定位置即为断面低阻区域。

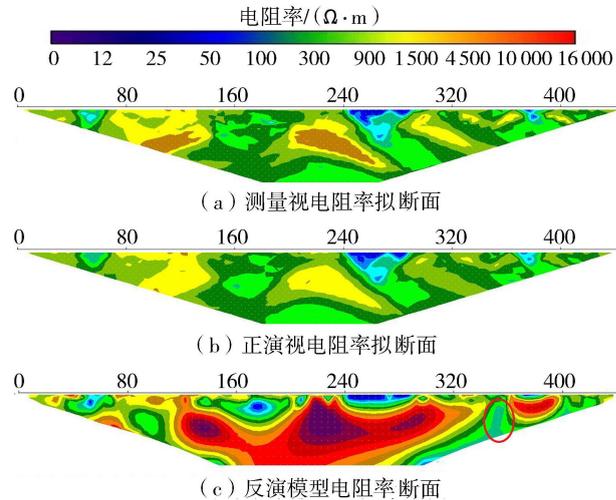


图4 测线I高密度电法断面

由图4可知, 测线I断面电阻率数据范围较大, 且存在多处表层低阻区域, 原因是测线经过公路花坛, 花坛填土材料或结构不均匀, 因此无需对该区域进行验证, 值得注意的是在长度方向350 m下方存在一个低阻区域。

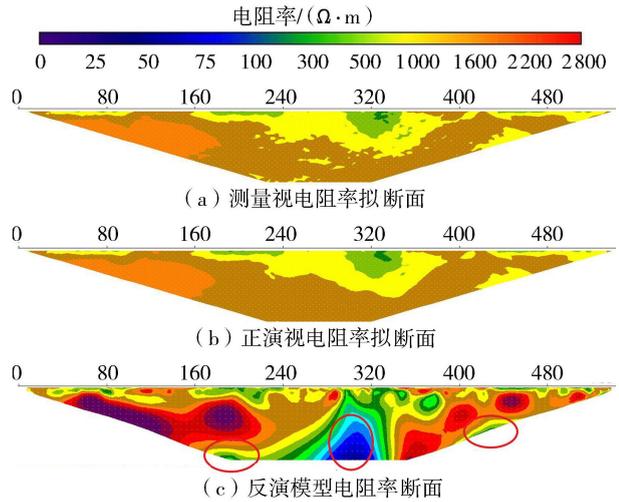


图5 测线II高密度电法断面

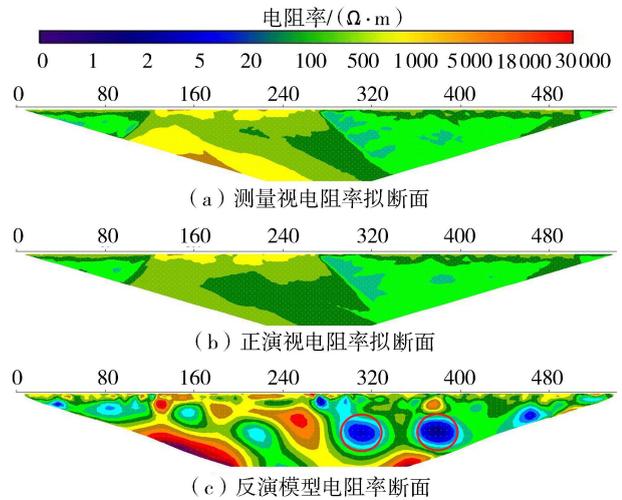


图6 测线III高密度电法断面

由图5可知, 测线II断面长度方向300 m下方有一处明显的低阻区域, 该区域为进出水口位置; 长度方向190 m、420 m下方有两处低阻区域, 结合前期渗压计观测数据, 两处均存在渗压异常现象, 因此也可能存在渗漏风险。

由图6可知, 测线III断面以长度方向280 m附近库底廊道入口为分界, 呈现左高右低的趋势, 与右

岸面板布置对应。库底廊道入口以南有面板防渗,电阻较高,测线左侧存在低阻区域,但深度较浅,无须验证,右侧未布置面板,电阻较低,而长度方向300 m 和 370 m 处存在两处明显的低阻区域。

在上述可能存在渗漏通道的6处低电阻区域布置钻孔,钻孔位置如表1所示。上水库右岸原有观测孔SW1和SW2位于ZK1南侧,钻孔布置点如图3所示,在上述钻孔内进行综合示踪法试验。

表1 钻孔位置

编号	位置
ZK1	启闭机房南侧公路
ZK2	启闭机房南侧
ZK3	进出水口中间
ZK4	启闭机房北侧
ZK5	库底廊道入口北侧 30 m
ZK6	库底廊道入口北侧 100 m

3.3 综合示踪法探测

3.3.1 天然示踪法探测

在8个钻孔内采用温度电导仪以及多参数仪对钻孔温度和电导进行探测,得到温度-深度曲线和电导-深度曲线(图7、图8),将两条曲线联合分析。

— ZK1 — ZK2 — ZK3 — ZK4 — ZK5 — ZK6 — SW1 — SW2

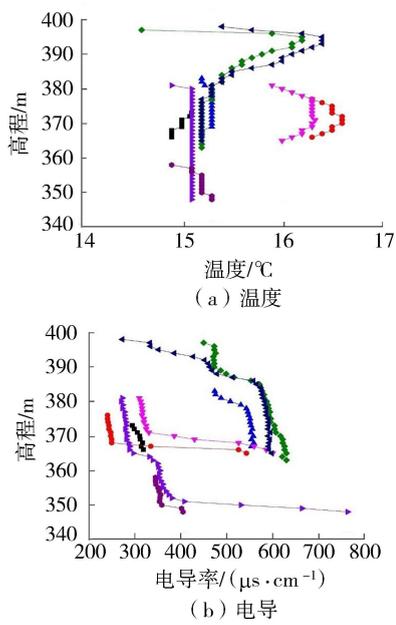


图7 各孔温度和电导随深度变化曲线

表2 温度和电导分析

编号	温度分析	电导分析	综合分析
ZK1	整孔温度较低	整孔电导较低	主要受边坡渗水影响,但附近有低温库水渗流
ZK2	高程370 m以上升高,以下降低	高程368 m以上较低,以下急剧升高	高程370 m以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK3	整孔温度较低	整孔电导较高,高程378 m处突变	主要受库水渗漏影响,高程378 m处面板可能渗漏
ZK4	高程370 m以上升高,以下降低	高程370 m以上较低,以下急剧升高	高程370 m以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK5	高程395 m以上升高,以下降低	整孔电导较高,387 m处突变	高程390 m以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK6	高程395 m以上升高,以下降低	上部电导较低,后急剧升高	高程395 m以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
SW1	整孔温度较低	上部电导较低,高程364 m处突变,底部急剧升高	垂向流使得整孔温度均匀,高程364 m处可能受裂隙渗流影响
SW2	整孔温度较低	整孔电导较低	受边坡渗水影响,但附近有低温库水渗流

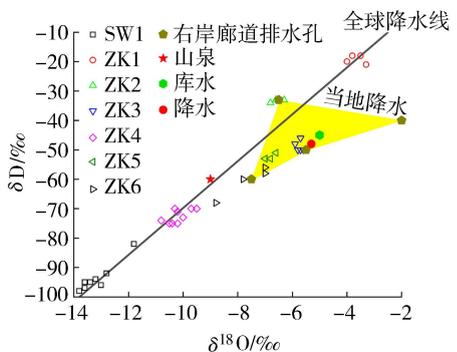


图8 钻孔水氢氧同位素组成分布特征

渗漏水一般有两个来源,分别为库水和边坡渗水,可以通过库水与边坡渗水的温度、电导差异,对比各钻孔内的温度、电导变化,推导各钻孔内水的来源。

钻孔温度探测在冬季进行,当时库水温度低于边坡渗水温度。经过探测,库水电导率平均值为768 μs/cm,边坡水电导率范围为200 ~ 300 μs/cm,库水电导率高于边坡水电导率。而右岸排水廊道渗漏水为库水与边坡渗水的结合,且库水所占比例较大。根据这2个特点可以对各钻孔地下水来源进行分析判断,各孔温度和电导综合分析见表2。

在钻孔、水库、排水廊道等位置采集水样,进行环境同位素以及水化学示踪,得到的结果如图8和图9所示。由图8可知,库水与右岸排水廊道渗漏水的氢氧同位素组成极为接近,渗漏水主要是库水。ZK3的氢氧同位素组成分布在两者附近,说明ZK3处主要受库水影响,渗漏通道经过ZK3处。而其余钻孔的氢氧同位素分布距离这3点都较远。图9的水化学Piper三线图可以揭示各点2009—2020年的水化学离子浓度变化。其中,廊道水、施工支洞水以及量水堰水水体在三线图上所在位置与库水集中分布,水化学类型相似,表明了这些水体的水化学形成存在一定的联系。

3.3.2 人工示踪法探测

在ZK1 ~ ZK6中通过示踪剂进行钻孔流速测试,所用示踪剂为饱和食盐溶液,仪器为温度电导仪和多参数仪,通过孔内水的电导率变化,对孔中地下水水平流速进行计算,得到各孔水平流速如图10所示。

- 巴山沟水库(2009—2020年)
- 1号施工支洞(2009—2020年)
- 上水库(2009—2020年)
- × 5号施工支洞(2009—2020年)
- ▲ 库底郎道量水堰(2009—2020年)
- 下水库1996年
- 坝后量水堰(2009—2020年)
- 右岸平洞1996年
- ▽ 右岸排水廊道(2009—2020年)
- ◁ 樱桃园沟1996年
- + 下水库(2009—2020年)
- ▶ 左岸平洞1996年
- B2高乐支管廊道(2009—2020年)

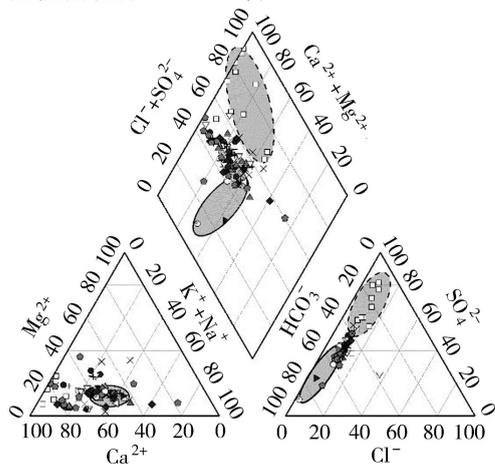


图9 水化学 Piper 三线图

由图 10 可知,ZK1 流速较低,小于 0.01 m/d ,主要受边坡渗水影响;ZK2 靠近启闭机房和 ZK3,流速较大,且流速较大的部位对应电导率示踪分析所确定的深部库水渗漏;ZK3 整孔流速较大,且在 $377 \sim 372 \text{ m}$ 处存在流速相对较大的区域,对应库水渗漏;ZK4 靠近启闭机房和 ZK3,在 373 m 、 369 m 处以及 365 m 处流速相对较大,对应库水渗漏;ZK5 受库水影响但整孔流速较低,但局部裂隙或节理处流速变大;ZK6 上部流速较大,原因为边坡水水位升高,渗漏量增加,下部受库水渗漏影响,流速较小,但比 ZK5 高,渗透性更强,也存在局部裂隙或节理处流速相对变大的现象。

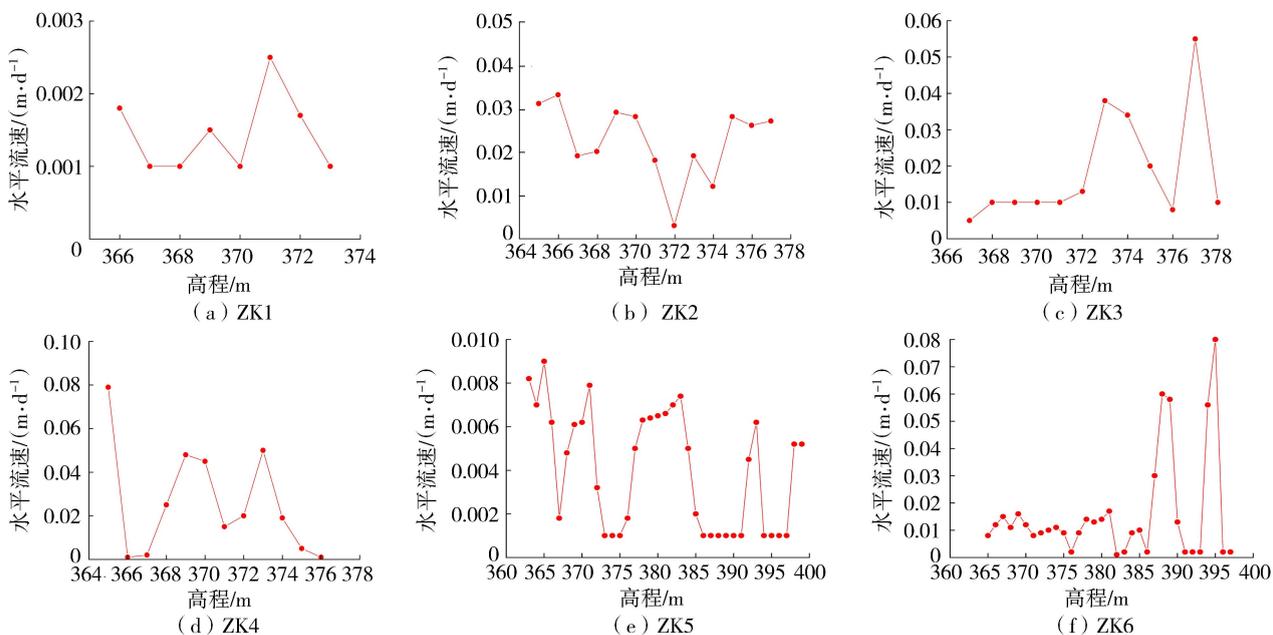


图10 各钻孔水平流速

3.4 联合探测结论

经过高密度电法和综合示踪法联合探测,最终得出结论:①水体天然同位素监测右岸廊道为库水渗漏补给为主,库底廊道排水孔水受区域地下水补给影响较大,受库水影响较小。钻孔水受渗漏库水和地下水双重补给影响。②ZK3 孔冬季天然状态下的高电导率和流速特征反映出目前库水的主要渗流在启闭机房对应高程 378 m 以下,同时 ZK3 孔流速相对较大,判断进出水口侧壁存在渗漏通道可能性较大。启闭机房两侧 ZK2 和 ZK4 都受到库水渗漏的影响,流速较大,对应的渗漏较强。③ZK1 主要受边坡渗水影响,而 ZK5 和 ZK6 由于处于没有面板防渗的库尾,孔中受库水渗流的影响,表现为高电导和低温,但这 2 个孔的流速较小,右岸排水廊道渗水来自库尾绕流的可能性较小。后续对结论所得渗漏区域进行防渗处理,处理结果显示,排水廊道渗流量显著减小。由此可验证该联合探测方法准确揭示了渗漏的位置和范围,为后续防渗处理提供了指导性意见。

3.5 联合探测优势与改进措施

高密度电法探测结果显示右岸存在 6 处可能的渗漏通道,如只采用高密度电法探测,则需要对这 6 处区域都进行加固处理,处理成本较高。如只采用综合示踪法探测,则需要右岸每隔一定距离钻孔,在每个钻孔内进行示踪试验探测,钻孔多成本高,对堤坝破坏性较大,且数据量庞大,费时费力。而本文采用的高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术结合 2 种方法优势,在高密度电法探测结果基础上进行综合示踪法探测,在上述 6 处隐患位置钻孔进行示踪试验,最终发现仅有 1 处存在渗流通

道。由此可见,联合探测方法所需钻孔数量少,且减少了单一方法探测结果多解性,相较于单一方法,探测结果更准确,具有显著的经济效益。

在联合探测过程中,还可通过一些措施来提高探测准确性,如高密度电法大极距探测异常区可能不明显,可通过减小极距,布设多条测线,数据拼接提高精度,或在大极距探测基础上对重点区域进行小极距加密探测,进一步确定异常区域;如综合示踪法中温度为辅助物理量,可添加热源法理论,通过温度独立分析渗漏位置与范围。

4 结 语

高密度电法具有抗干扰能力强、观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点,但成果解释存在非唯一性的问题,而综合示踪法通过多种示踪试验对高密度电法成果进行验证,可以有效辅助高密度电法判别低阻异常区,解决高密度电法成果解释非唯一性问题。实例验证结果显示基于高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术极为准确地揭示了渗漏的位置与范围,效率高,准确性强。在实际工程中,为达到更高的准确性,可对本文提出的高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术进行改进,在高密度电法探测中减小电极极距、布置多条测线进行数据拼接,对重点区域小极距加密探测;在综合示踪法探测中添加热源法理论等。

相较于单一方法探测结果,多种方法综合测试能够起到相互补充、相互验证的效果,保证了探测的准确性。因此,在可行的条件下,采用多种方法对堤坝渗漏进行探测,避免某些因素对结果产生干扰,影响结果的准确性,有重大的静、动态经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] ZHONG Q, WANG L, CHEN S, et al. Breaches of embankment and landslide dams; state of the art review [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 216: 103597.

[2] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 土石坝渗透破坏溃决机理及数值模拟 [J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42 (6): 697-703. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, CAO Wei. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2012, 42 (6): 697-703. (in Chinese))

[3] 岑威钧, 陈司宁, 李邓军, 等. 考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (5): 413-418. (CEN Weijun, CHEN Sining, LI Dengjun, et al. Characteristic analysis of 3d seepage field of a geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (5): 413-418. (in Chinese))

[4] 宋锦焘, 袁帅, 段梦强, 等. 基于麻雀搜索算法和滞后效

应的土石坝渗流监控模型 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (5): 52-57. (SONG Jintao, YUAN Shuai, DUAN Mengqiang, et al. Seepage pressure monitoring model for earth-rockfill dams based on sparrow search algorithm and hysteresis effect [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5): 52-57. (in Chinese))

[5] 苏怀智, 周仁练. 土石坝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))

[6] WU Y, XU S, LI Q, et al. Estimation of real fracture parameters of a dam concrete with large size aggregates through wedge splitting tests of drilled cylindrical specimens [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 163: 23-36.

[7] 白广明, 张守杰, 卢建旗, 等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (1): 52-58. (BAI Guangming, ZHANG Shoujie, LU Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (1): 52-58. (in Chinese))

[8] HOHLFELD T, DOERRER T, SERFLING U, et al. Der einsatz von innovativen geophysikalischen methoden bei der erkundung von hochwasser-rueckhaltebecken und talsperren-fallbeispiele aus der praxis [J]. Wasserwirtschaft, 2013, 103 (5): 136-139.

[9] MOZAFARI M, RAEISI E, ZARE M. Water leakage paths in the doosti dam, Turkmenistan and Iran [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65 (1): 103-117.

[10] MARTINEZ-MORENO F J, DELGADO-RAMOS F, GALINDO-ZALDIVAR J, et al. Identification of leakage and potential areas for internal erosion combining ert and ip techniques at the negratin dam left abutment (Granada, southern Spain) [J]. Engineering Geology, 2018, 240: 74-80.

[11] 李宏恩, 徐海峰, 李铮, 等. 地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34 (4): 1627-1634. (LI Hongen, XU Haifeng, LI Zheng, et al. In situ experimental study on resistivity-magnetic resonance sounding coupling imaging diagnosis method for an embankment dam with seepage defects [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34 (4): 1627-1634. (in Chinese))

[12] GOLEBIEWSKI T, PIWAKOWSKI B, CWIKLIK M, et al. Application of combined geophysical methods for the examination of a water dam subsoil [J]. Water (Basel), 2021, 13 (21): 2981.

[13] LEE J, CHOI Y, KIM H, et al. Hydrologic characteristics of a large rockfill dam; implications for water leakage [J]. Engineering Geology, 2005, 80 (1/2): 43-59.

(下转第 75 页)

- Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 67-71. (in Chinese))
- [14] DOUGHTY C, TSANG C F, HATANAKA K, et al. Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan [J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): doi:10.1029/2007WR006441.
- [15] TSANG C F, DOUGHTY C. Multirate flowing fluid electric conductivity logging method [J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): doi:10.1029/2003WR002308.
- [16] DOUGHTY C, TSANG C F. Signatures in flowing fluid electric conductivity logs [J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/2/3/4): 157-180.
- [17] DOUGHTY C, TSANG C F, YABUUCHI S, et al. Flowing fluid electric conductivity logging for a deep artesian well in fractured rock with regional flow [J]. Journal of Hydrology, 2013, 482: 1-13.
- [18] DOUGHTY C, TSANG C F, ROSBERG J E, et al. Flowing fluid electrical conductivity logging of a deep borehole during and following drilling: estimation of transmissivity, water salinity and hydraulic head of conductive zones [J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(2): 501-517.
- [19] 李明, 缪海宾, 马明康, 等. 基于达西定律的渗流边坡稳定性分析 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 238-241. (LI Ming, MIU Haibin, MA Mingkang, et al. Stability analysis of seepage slope based on Darcy's law [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 238-241. (in Chinese))
- [20] 侯文高, 曹始友, 高旭波. 新安煤矿首采工作面顶板岩层富水性探测及涌水量评价 [J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊 2): 270-272. (HOU Wengao, CAO Shiyu, GAO Xubo. Water detection and water inflow evaluation of first coalface roof in Xin'an coal mine [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Sup2): 270-272. (in Chinese)) (收稿日期: 2022-04-28 编辑: 骆超)

(上接第 69 页)

- [14] LOPERTE A, SOLDVIERI F, PALOMBO A, et al. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at monte cotugno rock-fill dam (southern Italy) [J]. Engineering Geology, 2016, 211: 162-170.
- [15] YILMAZ S, KOKSOY M. Electrical resistivity imaging and dye tracer test for the estimation of water leakage paths from reservoir of akdegirmen dam in Afyonkarahisar, Turkey [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(24): 1-9.
- [16] 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, LYU 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))
- [17] 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))
- [18] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用 [J]. 地学前缘, 2003(1): 171-176. (DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and application of high density electric method [J]. Earth Science Frontiers, 2003(1): 171-176. (in Chinese))
- [19] 郭福钟, 朱瑞, 闫汝华, 等. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2264-2273. (GUO Fuzhong, ZHU Rui, YAN Ruhua, et al. Research of geological bim model based on 3d electrical resistivity tomography [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2264-2273. (in Chinese))
- [20] ALSHEHRI F, ABDELRAHMAN K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography [J]. Journal of King Saud University-Science, 2021, 33(5): 101468.
- [21] 陈建生, 董海洲. 堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.
- [23] WANG T, CHEN J, LI P, et al. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 1-12.
- [24] WOLKERSDORFER C, GOEBEL J, HASCHE-BERGER A, et al. Assessing subsurface flow hydraulics of a coal mine water bioremediation system using a multi-tracer approach [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 164: 58-68. (收稿日期: 2022-03-29 编辑: 刘晓艳)