

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.04.012

【全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会 论文精选】

综合示踪技术在水库渗漏勘察中的应用

张清华¹, 陈亮^{2,3}, 颜书法^{2,3}, 司朋举^{2,3}

(1. 中电投蒙东能源集团有限责任公司扎哈淖尔工业供水分公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 河海大学 岩土力学与堤防工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 某水库在蓄水期间渗漏严重, 为了查明渗漏形式, 选择综合示踪技术对大坝右坝肩进行渗漏探测。利用温度示踪、电导率示踪对绕坝渗漏形式进行定性分析, 利用人工示踪对渗漏进行定量分析, 最后分析得到具体的渗漏路径并给出了建议的加固深度。

关键词: 大坝渗漏; 温度示踪; 电导率示踪; 人工示踪

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0349-06

Application of integrated tracer technique in reservoir seepage investigation

ZHANG Qing-hua¹, CHEN Liang^{2,3}, YAN Shu-fa^{2,3}, SI Peng-ju^{2,3}

(1. China Power Investment Mengdong Energy Group Co., Ltd., Zaha Nuor Industrial Water Supply Branch, Tongliao, Neimenggu 028000, China;

2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The leakage of a reservoir is serious problem during the impoundment. In order to find out the leakage form, the integrated tracer technology is selected to detect the leakage of the right abutment of the dam. The leakage forms around the dam are qualitatively analyzed by using temperature tracer and electrical conductivity tracer, and quantitatively investigated by using manual tracer. The specific leakage path is detected and suggested reinforcement depth is given in the end.

Key words: dam leakage; temperature tracer; conductivity tracer; artificial tracer

0 引言

截至2011年3月, 包含6 862个水库及相关大坝, 累计库容为6 197 km³的全球水库和大坝 (GRanD) 数据库显示大坝大部分存在渗流问题^[1]。《水利水电工程物探规程》(SL 326—2005) 规定的水库渗漏探测的主要方法有电阻率法、高密度电法、自然电场法、激发极化法、瞬变电磁法、同位素示踪法。同位素示踪法分为天然示踪和人工示踪。天然示踪剂包括温度和电导率, 人工示踪剂包括盐和荧光剂。同位素示踪法通过电缆和探针探测示踪剂在地下水中的变化情况获得大坝的渗流场数据分析大坝的渗漏情况。从1978年Bair通过采集7个月的地下水温度定性描绘地层的渗透性到2016年Dong利用

多示踪分析方法确定了黄河西夏湾大坝渗漏路径, 同位素示踪法在大坝渗漏探测中越来越彰显出它的重要性, 同位素示踪法也向人工示踪和天然示踪的综合示踪方向发展。

1 工程概况

某水电站正常蓄水位高程为 752.00 m, 总库容为 2.32 亿 m³, 调节库容为 1.43 亿 m³, 多年平均发电量为 4.95 亿 kW·h, 为大(2)型 II 等工程。该工程主要有混凝土面板堆石坝、深孔泄洪洞、溢洪洞、发电引水洞和电站厂房组成, 大坝典型剖面结构示意图见图 1。2015 年 5 月 28 日晚上及 29 日发现混凝土面板坝后坡脚有连续渗水点, 从右岸坡脚

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778210)。

作者简介: 张清华 (1988—), 男, 工程师, 主要从事大坝渗漏探测方面研究。E-mail: 1006514580@qq.com。

第一个渗水点开始,出现渗水点范围长 57m;渗水清澈,无浑浊现象;尾水渠边墙排水孔流量明显增大,有水的排水孔增多。5月29日前,所有渗水均通过量水堰计量;5月29日后,渗水通过量水堰和尾水渠排水孔排出,估算总渗流量为 1000 L/s。尾水渠边墙排水孔及厂房后边坡总体的渗水量初期没有明显的变化,后期略有增加。库水位变化时渗水量看不出明显变化。厂房后侧边坡在库水位超过 EL743 后,逐渐出现渗水湿润区域,并随库水位上升区域逐渐变大,局部能看到渗水水流,在库水位低于 EL741 后,渗水区域消失。

后来经过检测、修复依然存在渗漏情况:根据近期 2020年2月11日—2020年5月1日观测的

水堰水量与库水位的关系曲线(见图2)可知,大坝渗漏量随库水位的升高而增大,尤其是在库水位上升至 EL735 后,渗漏量出现陡增趋势,库水在 EL735 上升至 EL748 的过程中,渗漏增加了近 110 L/s,库水在 EL748 左右时达到了最大值 403.36 L/s。

为了查明和验证渗漏原因,保证测量结果的准确性,采用综合示踪技术研究渗漏问题。综合示踪主要包括人工示踪法和天然示踪法,其中天然示踪法为温度示踪和电导率示踪。

在选择好方法后在右岸坝肩附近布置了 6 个孔,其中坝顶与右岸坝坡接触地方钻有 2 个孔,表孔溢洪洞 2 个孔,右岸趾板 2 个孔。各孔平面布置见图 3,各孔孔深见表 1。

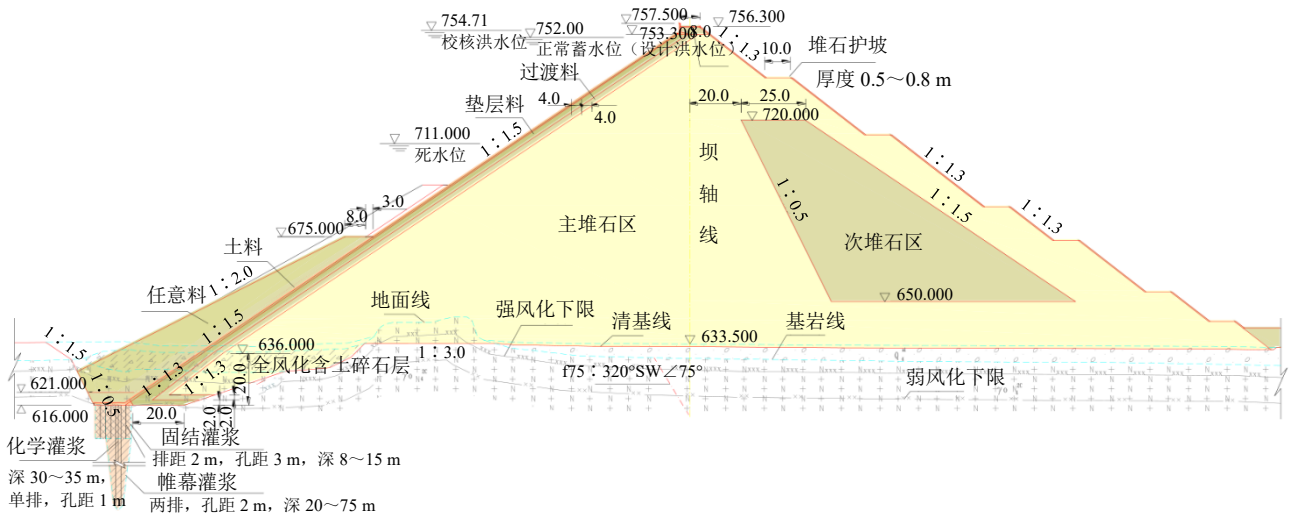


图 1 大坝典型剖面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical dam section structure

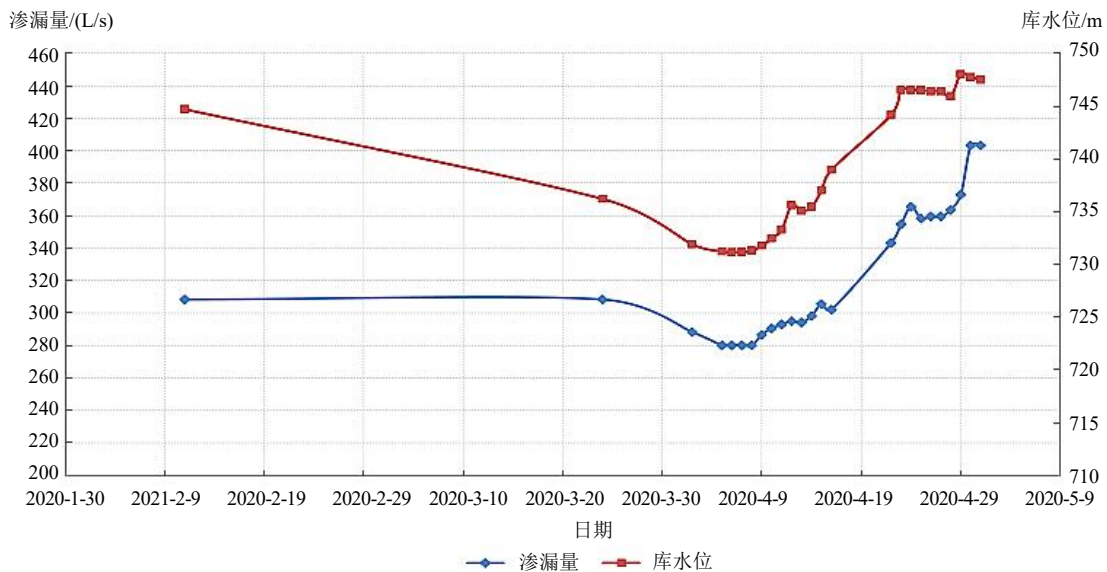
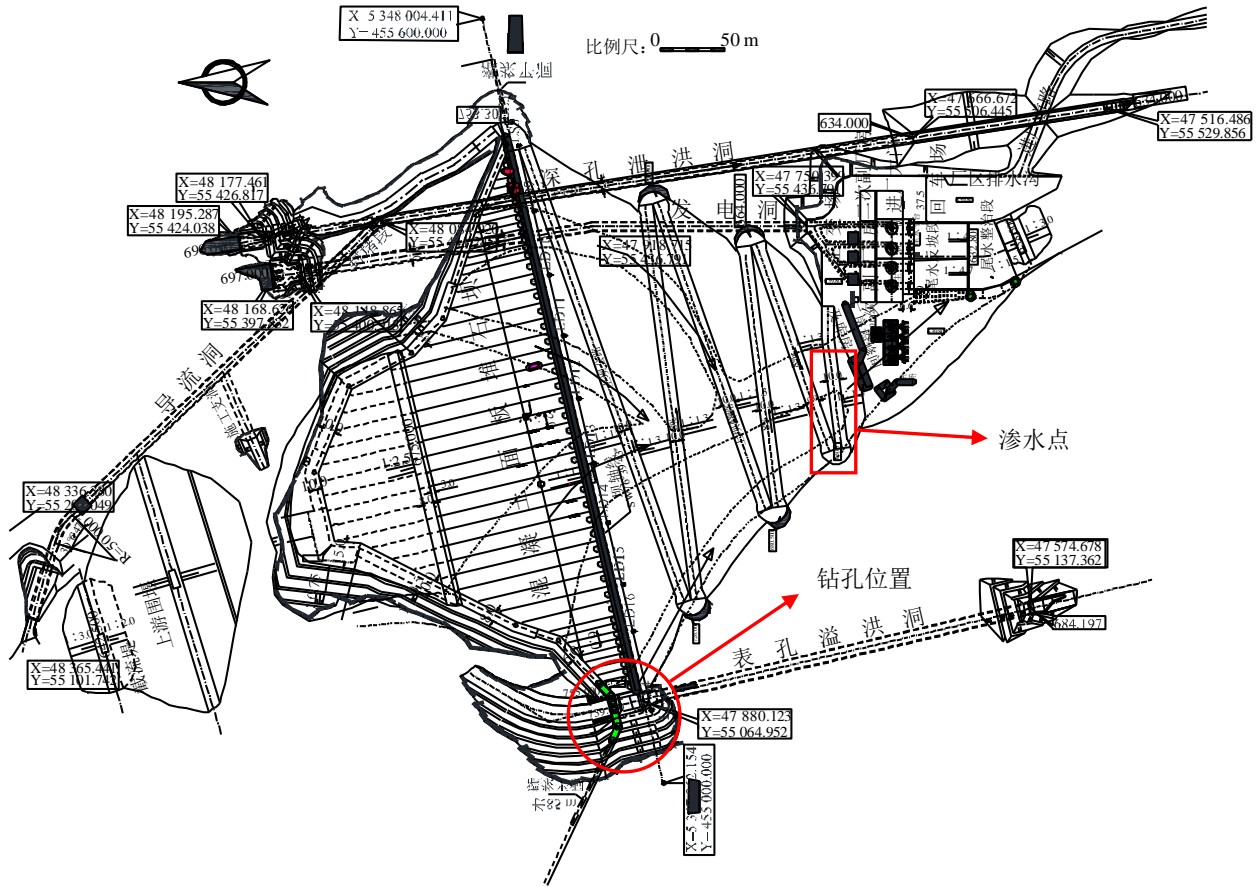
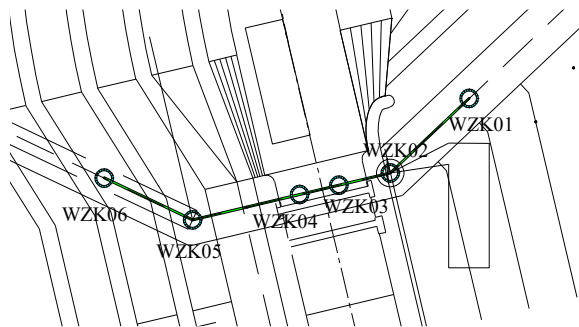


图 2 量水堰水量与库水位关系曲线

Fig. 2 Relation curve between the quantity of weir and the reservoir water level



(a) 大坝平面示意图



(b) 钻孔位平面布置图



(c) 渗水位置

图 3 大坝渗漏检测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dam leakage detection

表 1 孔位信息汇总表

Table 1 Summary of hole location information

孔号	孔口高程/m	孔深/m
WZK-01	731.20	61
WZK-02	734.80	34
WZK-03	736.30	54
WZK-04	736.30	62
WZK-05	756.30	67
WZK-06	756.30	65

2 温度示踪分析渗漏来源

水在 4 °C 时密度最大, 4 °C~100 °C 之间的水服从热胀冷缩原理, 冷水的密度大向下沉, 热水的密度小而上升, 从而造成在河水、库水、湖水等的表层的温度较高, 而低部的温度较低。而地层中温度的变化趋势则与水中相反, 随着地层深度的增加, 温度也随之增加, 一般深度每增加 100 m, 温度增加 3 °C。

由于上述原因,地层中地下水温度的变化可以反映库水对下游地下水的补给情况和程度,由此可以推断出渗漏区域。一般来说,在堤坝渗漏较强的坝后观测孔中我们可以测定到低温区,温度最低的区域一般是渗透性最强的区域。利用温度异常测定和检查地层的渗透性是目前简单有效的方法之一^[2]。WZK-01至WZK-06孔中温度分布曲线见图4。

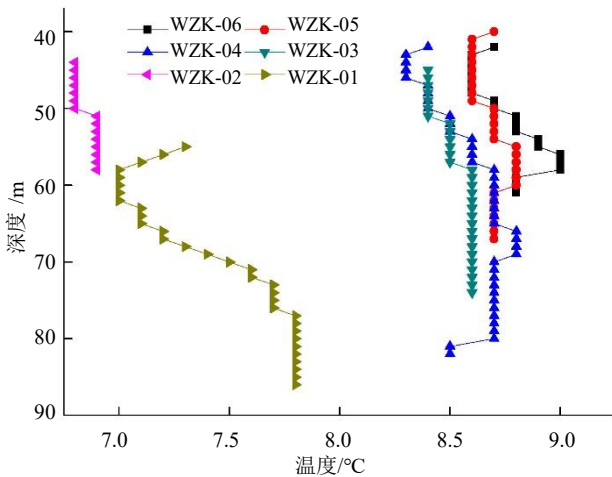


图4 钻孔温度分布曲线

Fig. 4 Temperature distribution curve of borehole

库水的表层温度是随着季节的温度而变化的,而库水的深层温度随季节的变化则较小。经过现场实测,发现库水的水温在 10°C 左右,水温随深度变化较小,渗漏水的温度在 7.1°C 。

从图4可以发现WZK-01和WZK-02的温度明显低于其他孔中地下水的温度,WZK-03至WZK-06孔中的温度相接近,但这4个孔也存在些许差异,WZK-03和WZK-04温度更接近,WZK-02和WZK-01温度更接近。此外发现WZK-06、WZK-05和WZK-04号孔的温度在底部出现转折,温度曲线不再是线性增长,反而降低,呈“尖峰状”。

水库大坝在没有集中渗漏的状态下,孔隙水只发生渗流,流动速度缓慢而稳定,土水间有充足的时间和充分的接触空间进行热交换。因而其温度和土体一致。当有渗漏发生时,渗漏通道中的水流速很快,和渗流水相比更接近渗漏水的水温。所以即使渗漏和渗流同源,渗流水温和渗漏水温往往相差很远。温度差的存在必然产生热传导,渗流水和土体间热量来不及充分交换,仅仅在通道边缘与周围土体进行部分热量交换,然后热量交换依次向周围推进。背景温度场就会在通道和周围改变很大,越远离渗漏通道,温度改变越小,这就形成了具有一定特征的温度场。由于在季节温度影响深度以下的深

部地层的温度随着深度的增加而线性增加。但当钻孔穿过地层中集中渗漏通道时,由于受渗漏水水平流动的影响,温度分布曲线会出现异常,呈“尖峰状”^[3]。

根据各孔的温度可知在WZK-01、WZK-02、WZK-04、WZK-05和WZK-06孔附近存在渗漏异常,但是渗漏的深度却不能通过温度示踪反映出来。

3 电导率示踪分析渗漏来源

电导是指水的导电能力,电导值为浸入水中的两个电极在 1cm^2 的表面上,距离 1cm 、电势为 1V 时的电流强度。电导以 S/cm 为单位,这个单位对于电导值来说特别大,因而自然界中的水通常使用 mS/cm 和 $\mu\text{S/cm}$ 为单位,它们分别等于 10^{-3}S/cm 和 10^{-6}S/cm 。钻孔的天然电导率分布曲线见图5。

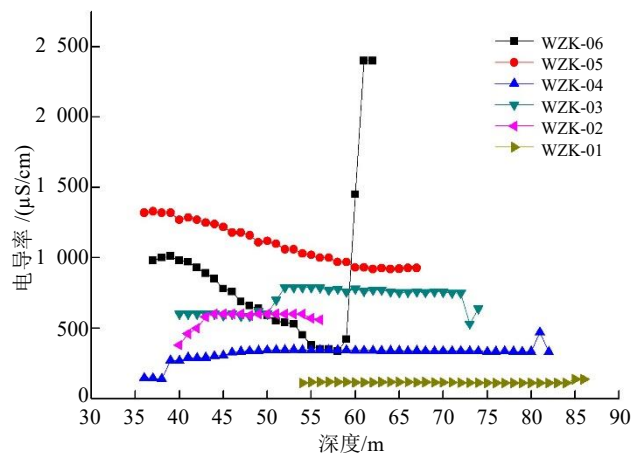


图5 天然电导率分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of natural conductivity of borehole

通过图5发现WZK-06孔在含水层上部电导率较高,从中部开始电导率骤减,在 58m 处电导率值最小;WZK-05的电导率比较于其他孔电导率普遍较高;WZK-04孔的电导率值普遍偏小,只比WZK-01孔的电导率大;WZK-03孔含水层上部的电导率值和WZK-02相近,从 50m 开始电导率陡增,然后趋于平缓;WZK-02孔的含水层上部 3m 电导率值偏低,剩余位置电导率值和WZK-03孔的上部电导率值相同;WZK-01孔中电导率值分布均匀且是6个孔中电导率值最低的,此外上游库水的电导率在 $100\mu\text{S/cm}$,下游渗漏水的电导率在 $120\mu\text{S/cm}$,尾水的电导率为 $94\mu\text{S/cm}$ 。

由于堤坝孔隙水主要是库水通过缓慢渗流作用形成的,其次是降水通过垂向渗透缓慢渗入到含水层中,在长期运移过程中,堤坝孔隙水与地层中

的矿物质作用发生溶解、物理化学反应、蒸发浓缩等作用, 水中的矿化度不断提高, 而集中渗漏通道中的水流要比正常渗流速度快的多, 因而和渗漏作用范围内的地下水相比, 渗流形成的地下水具有较高的电导值; 或者渗漏通道作用范围内反对电导更加接近水库电导值^[4]。

根据 WZK-06 中的电导率先减小后增大可以推断在 WZK-06 孔周围存在明显渗漏, 渗漏范围在 59 m 以上; WZK-05 孔中的电导率虽然呈现下降的趋势, 但由于普遍较高, 因此 WZK-05 孔中不存在明显渗漏, 只能推断出 WZK-05 孔下部流速较快; WZK-04 孔中电导率和库水电导率接近, 推断 WZK-04 周围也存在渗漏; WZK-03 和 WZK-02 孔的电导率较为接近, 因此推断 WZK-03 和 WZK-02 孔附近的地下水存在联系, 但由图 3 可知 WZK-03 和 WZK-02 的温度曲线相差较大, 结合温度和电导可以得出这 2 个孔中的地下水不存在联系, 此处无渗漏路径; WZK-01 孔的电导率值与渗漏水的水电导率值最为接近, 并且温度最低, 因此推断 WZK-01 处在渗漏路径上。

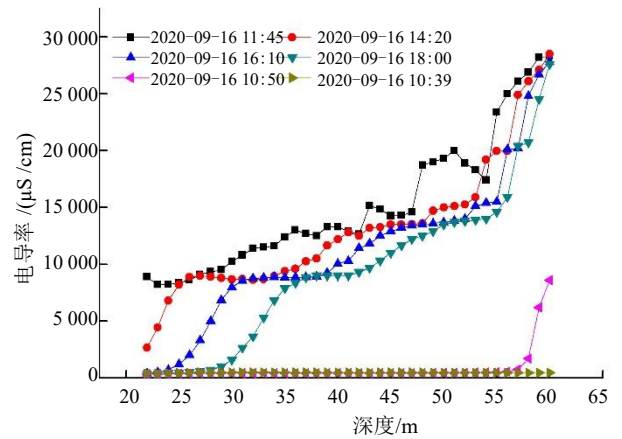
通过对各孔含水层的天然电导率进行分析后发现在 WZK-06、WZK04 和 WZK-01 孔中电导率明显异常, 但是在温度示踪时发现 WZK-02 和 WZK-05 中也存在异常, 并且对渗漏的深度进行了定性分析。接下来通过人工示踪试验对渗漏的方式和具体深度进行定量分析。

4 人工示踪法分析渗漏来源

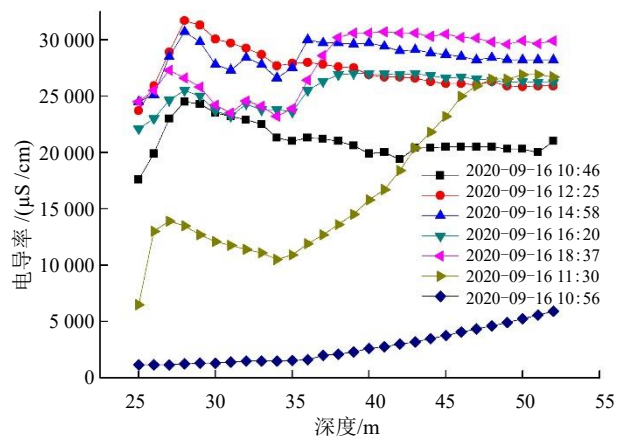
最后利用人工示踪法对渗漏进行定量分析, 确定渗漏的路径和深度。人工示踪方法在多孔介质含水层中研究了近 40 年, 已获得极大的成功^[5-7], 并已广泛地应用于水利、采矿、地下水勘察等领域。它的优点是便于实施, 可在钻孔中获取大量的参数。

通过对这 6 个水文勘测孔进行人工示踪试验得到了各孔的流速分布情况。其中 WZK-04、WZK-03 和 WZK-01 存在明显的垂向流, 其他各孔无明显垂向流。

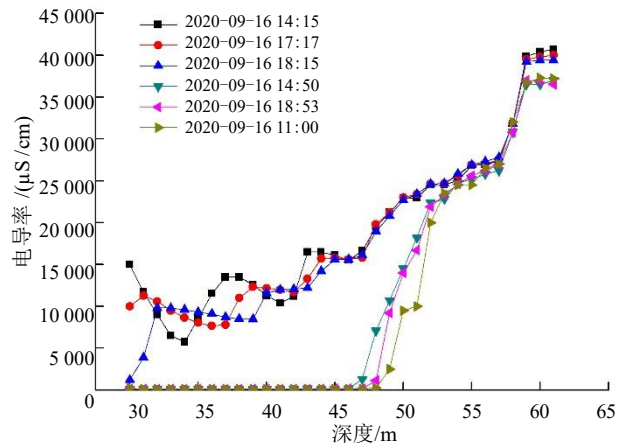
根据图 6 钻孔电导率历时曲线可以分析出各孔的垂向流方向和垂向流流速。WZK-04 孔中垂向流的流向为从上往下, 从 60 m (高程为 676.30) 的深度流出。利用观测到的曲线结合峰值法可以计算得到 WZK-04 垂向流速为 0.08~0.1 cm/s; 从 WZK-03 孔的电导率历时曲线中可以看出各个时段电导率曲线相似, 但有明显的 2 个峰值偏移, 分别为 31 m



(a) WZK-04 电导率历时曲线



(b) WZK-03 电导率历时曲线



(c) WZK-01 电导率历时曲线

图 6 钻孔电导率历时曲线

Fig. 6 Duration curve of electrical conductivity of borehole

附近的向上垂向流, 34 m 附近的向下垂向流, 向上的垂向流最终从 27 m (高程为 709.30) 的位置流出, 流速为 0.007 cm/s, 向下的垂向流最终从 54 m (高程为 682.30) 的位置流出, 流速为 0.014 cm/s; 从 WZK-01 孔的电导率动态图中可以看出各个时段电导率曲线存在明显的峰值偏移, WZK-01 孔中存在明显的垂向流, 垂向流的流向为从上往下, 从 49 m

(高程为 682.20) 的深度流出。利用观测到的曲线结合峰值法可以计算得到垂向流速为 0.023 cm/s。

各孔的水平流速见图 7。

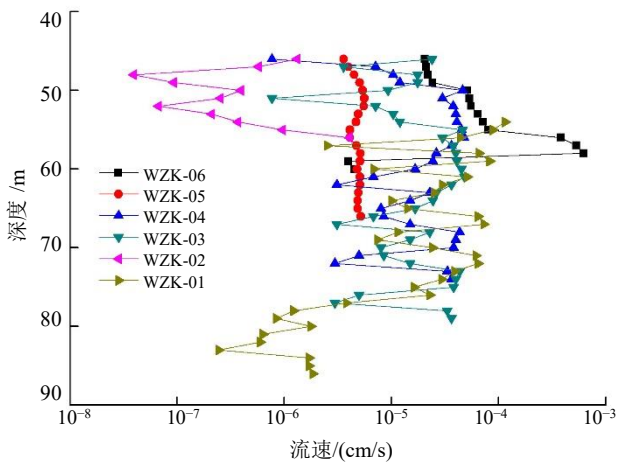


图 7 钻孔水平流速分布

Fig. 7 Horizontal velocity distribution of borehole

从图 7 可以发现: WZK-06、WZK-04、WZK-03、WZK-01 孔中存在较大的水平流, 其中 WZK-06 孔最为严重的渗漏(流速在 10^{-4} cm/s 为严重渗漏)位置在高程 700.30~698.30, WZK-04 孔的渗漏位置在 718.30~717.30, WZK-03 孔的渗漏位置在 713.30~711.30, WZK-01 孔的渗漏位置在 701.20~700.20 的位置, 这些位置的水平流速在 10^{-4} cm/s 的数量级, 其次这些孔在表层存在异常渗漏(流速在 10^{-5} cm/s 为异常渗漏); WZK-05 孔和 WZK-02 孔的水平流速正常, 在 10^{-6} ~ 10^{-7} cm/s 数量级。

5 结 论

通过对水库的右坝肩进行了温度示踪、电导率示踪以及人工示踪试验后发现右坝肩的主要渗漏路径有 3 个: (1) 靠近 WZK-06 的渗漏为坝体与坝坡岩体直接接触空隙导致的; (2) 靠近 WZK-04 和 WZK-03 的渗漏来源于混凝土与岩体接触不完整以及岩体内部破碎带; (3) WZK-01 附近的渗漏来源于混凝土与岩体接触不完整以及岩体内部破碎带。在利用综合示踪技术查明渗漏路径后, 准备对右坝肩进行灌浆加固, 加固范围从坝趾一直到大坝与岩石接壤处, 根据综合示踪查明的渗漏路径范围确定加固的高程达到 680.20 即可保证加固的效果。

本文选自“全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会”征集论文, 会议旨在探讨病险水库评估方法以及除险加固新技术、新措施, 推进病

险水库除险加固工作、提高防灾和供水保障能力, 会议于 2021 年 5 月 26—27 日在杭州召开。

本期刊登其中 3 篇精选论文。

参考文献

- [1] LEHNER B, LIERMANN C R, REVENGA C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [2] 董海舟, 陈建生. 利用温度示踪方法探测基坑渗漏[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 22(5): 733-740.
DONG Hai-zhou, CHEN Jian-sheng. Study on groundwater leakage of foundation pit with temperature tracer method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 22(5): 733-740.
- [3] 段珣. 基于温度示踪法的堤坝渗漏探测研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(9): 140-143.
DUAN Xun. Study on detection dam leakage with temperature tracer method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(9): 140-143.
- [4] 王新建, 陈建生, 陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(6): 67-71, 74.
WANG Xin-jian, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(6): 67-71, 74.
- [5] 姚立新, 常伟峰, 韩洋, 等. 示踪法在水利工程渗漏检测中的应用[J]. *人民黄河*, 2009, 31(10): 98-99.
YAO Li-xin, CHANG Wei-feng, HAN Yang, et al. Application of tracer method in leakage detection of hydraulic engineering[J]. *Yellow River*, 2009, 31(10): 98-99.
- [6] 高为壮, 陈亮, 夏兵兵, 等. 人工示踪法测试砂土渗透流速的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(20): 286-289.
GAO Wei-zhuang, CHEN Liang, XIA Bing-bing, et al. Experimental study on seepage velocity of sand using tracer method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(20): 286-289.
- [7] 陈建生, 董海洲, 凡哲超, 等. 示踪法对小浪底坝区绕坝渗漏通道的研究[J]. *长江科学院院报*, 2004, 21(2): 14-17.
CHEN Jian-sheng, DONG Hai-zhou, FAN Zhe-chao, et al. Nature tracer method for studying leakage pathway of bypass dam abutment of Xiaolangdi Reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, 21(2): 14-17.