

高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用

刘 晓,彭友文,袁志辉,唐 春,黄 诚

(南昌工程学院水利与生态工程学院,江西 南昌 330099)

摘要:在堤坝渗漏监测中,由于影响因素复杂,资料解释存在一定的干扰。通过建立两组典型的堤坝渗漏地电模型,结合正演模拟分析其响应特征,将视电阻率拟断面图和反演结果结合分析,可以排除一些假异常干扰,提高对目标体的识别。在对某大坝的渗流异常监测中,结合实测资料拟断面图和反演结果,通过对低阻异常体的连续追踪,推断出异常渗流的原因及渗漏通道的位置,可为下一步的工程处理提供依据。

关键词:高密度电法;渗漏监测;渗漏通道;堤坝

中图分类号:P631.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2021)05-0071-05

Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring//LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, TANG Chun, HUANG Cheng (School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: In dam leakage monitoring, due to the complexity of influencing factors, certain interference exists for data interpretation. Two groups of typical geoelectric models of dam leakage were established, and their response characteristics were analyzed by forward modeling. The combination analysis of apparent resistivity pseudo sections and inversion results can eliminate some false anomaly interference and improve the recognition of target. In the anomaly seepage monitoring of a dam, combined with the measured data and inversion results, through continuous tracking of the low resistance abnormal body, the causes of abnormal seepage and the location of the leakage passage were deduced, providing basis for engineering treatment in the next step.

Key words: high-density electrical method; leakage monitoring; leakage passage; dam

我国大部分堤坝修建较早,运行年久,病害较多,大约30%存在渗漏问题,堤坝工程中常见的隐患包括天然地质缺陷,施工中的质量缺陷,生物破坏造成的洞穴、裂缝及修补时的人为薄弱环节等^[1]。每年汛期,这些隐患容易诱发管涌、漫顶、散浸、滑坡、崩岸、坍塌等险情^[2],因此及时查明隐患,预先排除险情是堤防工程中迫切要解决的问题。

电法探测是堤坝无损探测的主要手段之一,已经广泛地应用于渗漏、洞穴等堤坝隐患的探测。电阻率是电法探测常用的物性参数,砂土的电阻率和它的孔隙度有关。堤坝内部或基础存在裂缝、洞穴时,其孔隙度变大,渗漏水时电阻率变小,干燥时电阻率变大,与背景电阻率形成差异,成为电法探测的物性前提。

高密度电法作为一种普遍应用的电法探测方

法,利用隐患和背景介质的电性差异,根据电阻率的空间变化规律来推断隐患的分布情况,具有采集自动化,分辨率高,成本低,效率高,解释方便等特点^[3-4],弥补了传统电阻率法野外采集时测点相对稀少和反演解释时依据单一等缺点^[5]。高密度电法在工程地质和水文地质勘查等方面有广泛的应用^[6-8],适用于探测堤坝裂缝、洞穴、高含沙层、不均匀体、软弱层、松散体及渗漏区,以及堤坝基础隐伏断层、破碎带等隐患。刘海心等^[9]、孙卫民等^[10]、李宏恩等^[11]应用高密度电法于堤坝渗漏隐患探测,樊炳森等^[12]应用高密度电法于水库的溶洞和溶蚀裂隙探测,取得了较好的效果。

在实际探测中,由于地质条件复杂,影响因素多变,以及反演自身的多解性,资料解释存在一定的干扰。笔者通过建立两组典型的堤坝渗漏地电模

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ161119,GJJ171006);深圳市深水水务咨询有限公司项目(0101-05190016)

作者简介:刘晓(1987—),男,讲师,主要从事工程物探应用研究。E-mail:friendat2010@163.com

通信作者:彭友文(1964—),男,教授,主要从事水电工程安全监控理论及应用研究。E-mail:913563546@qq.com

型^[13-14],计算其高密度电法响应,根据合成数据的正反演算例和工程实例,分析高密度电法的探测效果,为提高解释水平提供依据。

1 典型堤坝渗流模型的正反演

高密度电法二维正演问题为点电源电场二维地电断面的边值问题,应用有限差分法剖分网格形成大型线性方程组,通过解方程组即得到正演解,使用 RES2DMOD 软件来实现正演;高密度电法的反演目的是要找到拟合观测数据的模型,属于最优化问题,采用最小二乘法来计算^[15],通过 RES2DINV 软件实现反演^[16]。

1.1 层状模型

层状模型用来模拟土石坝等坝体内部的电性结构,在浸润面以下,由于岩土的空隙中几乎充满了水,电阻率变低,基岩为高阻体。模型的各层厚度和电阻率如表 1 所示。

表 1 层状模型的厚度和电阻率

层序	介质	厚度/m	电阻率/(Ω·m)
1	坝体非浸润区	20	200
2	坝体浸润区	20	40
3	坝基基岩	20	1 000

本文采用温纳装置,共 80 个电极,电极间距为 5 m,正演拟断面如图 1 所示。在正演数据中加入 2% 的随机误差,利用合成数据进行反演,迭代 5 次,误差为 0.29%,反演结果如图 2 所示。

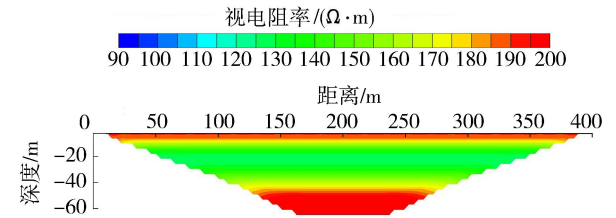


图 1 层状模型正演拟断面

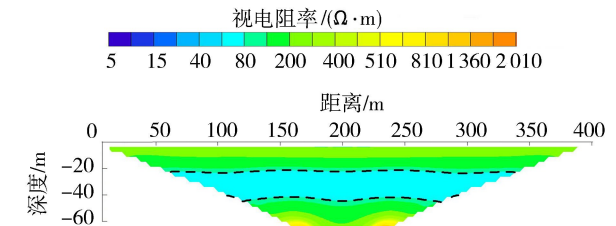


图 2 层状模型反演结果

图 1 中,视电阻率有明显的分层现象,坝体浸润区视电阻率为相对低值,坝基基岩视电阻率为相对高值,两者的差异不大。图 2 中,反演结果清晰地反映出低阻目标层,视电阻率最小可恢复到 50 Ω·m。虚线中间为视电阻率小于 80 Ω·m 的范围,与坝体浸润区基本重合。图中标出的浸润区和基岩分界线

略有起伏,结合正演拟断面图可知,分界线起伏是受算法多解性等因素影响所致。

1.2 二维渗流模型

在层状模型基础上,设计一个坝体二维渗流模型。图 3 中,在水平位置 185 ~ 215 m,深度 24 ~ 48 m 范围,有一个穿过坝体浸润区和坝基的倾斜渗漏通道,呈现低阻特征,视电阻率为 1 Ω·m。探测选用温纳装置,设置 80 个电极,电极间距为 5 m,正演结果如图 4 所示。在正演数据中加入 2% 的随机误差,利用合成数据进行反演,5 次迭代后,均方根误差为 1.87%,结果如图 5 所示。

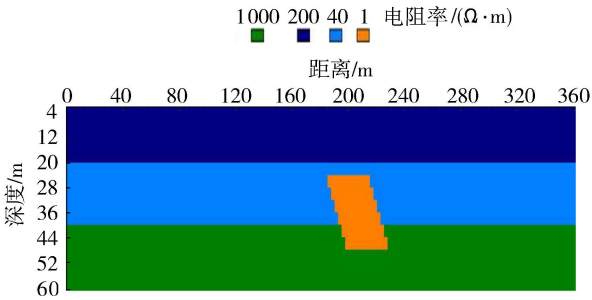


图 3 二维渗流模型

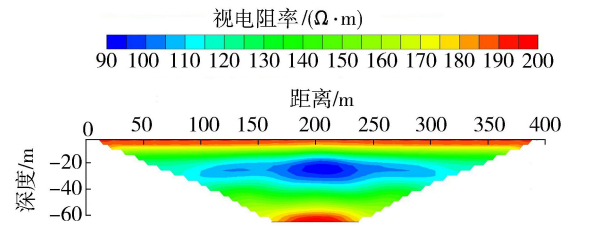


图 4 渗流模型正演拟断面

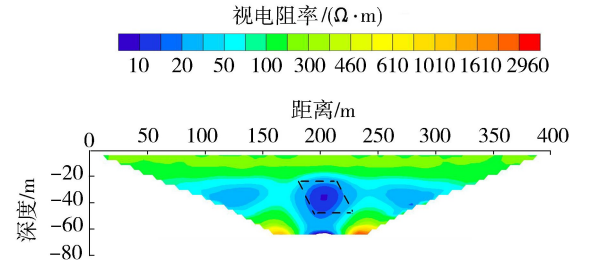


图 5 渗流模型反演结果

图 4 坝体浸润区视电阻率为相对的低值异常,低阻异常闭合区的水平位置与真实模型的水平位置接近,向两侧略有延伸,定性反映了渗漏通道的存在。图 5 中,反演结果对渗漏目标体有较好的反映,图中有视电阻率低值异常闭合区,异常中心和实际渗漏中心基本一致,低阻体的视电阻率最小可以恢复到 5 Ω·m,反演结果对异常体水平方向边界的分辨率高于垂直方向,难以分辨异常体的倾向。受低阻体影响,在异常闭合区的深部即基岩区出现了低阻假异常现象,比较图 4 和图 5,可以排除假异常对解释的干扰。

据理论模型计算可知,由视电阻率拟断面图可定性判断异常目标体的存在;由反演图可进行定量分析,受算法多解性等因素的影响,反演结果可能存在假异常现象。为避免错误解释,需要剔除假异常,将视电阻率断面图和反演结果结合分析,可提高对异常体的识别能力。

2 坝基渗漏监测工程实例

2.1 工程概况

某水库大坝蓄水后发现渗流量异常,大坝右端发现多处渗水位置,局部位置发现泉水。量水堰观测数据显示,大坝渗流量有明显增大趋势,右端渗流量达 $302\text{ m}^3/\text{d}$,总渗流量超出初步设计报告计算值,需查明大坝异常渗流的原因及其具体部位。

坝址处地层主要由残坡积粉质黏土、全-微风化基岩构成,局部有人工填土、可塑状冲积粉质黏土及冲洪积层(粉土层、粉细砂、中粗砂等)、淤泥等。基岩主要为花岗岩、混合花岗岩、花岗片麻岩(片麻状花岗岩)等,划分为全风化带、强风化带和弱风化带。全风化带的原岩已风化呈土状,以砂质黏土为主,层厚为 $9.5\sim 34.5\text{ m}$,一般为弱透水,局部为中等透水性。强风化呈半岩半土状,由于节理裂隙发育,其透水性较全风化稍强。弱风化带层厚 $16.7\sim 31\text{ m}$,风化裂隙发育,多为弱透水。库区无区域性构造断裂通过,构造稳定性较好,坝址区构造以小断层为主,大坝钻探过程显露了一些小规模断层,与大坝相交的有 F1 断层和 F5 断层。

坝体为黏土心墙坝,坝长 $1\,102\text{ m}$,坝顶高程 63.5 m ,宽度 8 m ,最大坝高 54 m 。中部黏土防渗心墙顶宽 6.0 m ,上下游坡比均为 $1:0.5$,上下游坝壳之间设有砂反滤层和砂砾石过渡层。坝基全线强风化岩及弱风化岩做帷幕灌浆防渗处理,灌浆上部接防渗墙。

2.2 探测方案

本次探测选用重庆地质仪器厂生产的 DUK-2B 多功能高密度电法仪,采用温纳装置,每个排列 60 个电极,电极距为 5 m ,最大供电电压为 180 V ,沿着大坝背水面平行布设 3 条测线^[17]。测线 1 平行于坝体中部的马道布设,总长 975 m ,10 次滚动完成;测线 2 布设在坝脚处,总长 900 m ,7 次滚动完成;测线 3 在坝体下游 50 m 处,总长 400 m ,2 次滚动完成。

2.3 探测过程

根据测线 1 第 2 个排列的实测数据,绘制视电阻率拟断面如图 6 所示,实测数据的反演结果如图 7 所示。根据测线 2 第 2 个排列的实测数据,绘制视电阻率拟断面如图 8 所示,实测数据的反演结果

如图 9 所示。根据测线 3 第 2 个排列的实测数据,绘制视电阻率拟断面如图 10 所示,实测数据的反演结果如图 11 所示。

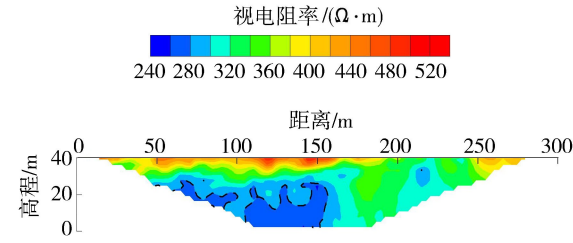


图 6 测线 1 第 2 个排列实测数据视电阻率拟断面

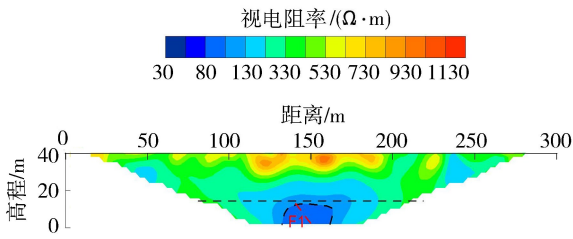


图 7 测线 1 第 2 个排列实测数据反演结果

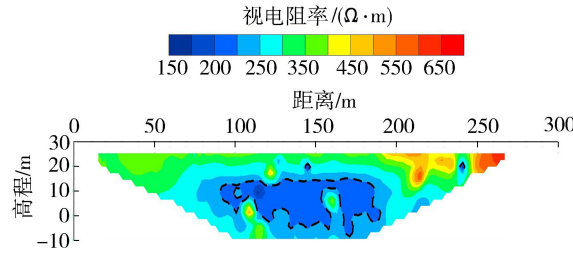


图 8 测线 2 第 2 个排列实测数据视电阻率拟断面

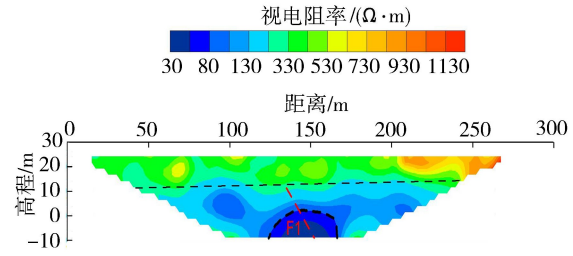


图 9 测线 2 第 2 个排列实测数据反演结果

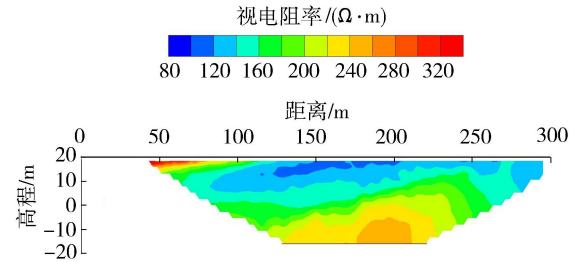


图 10 测线 3 第 2 个排列实测数据视电阻率拟断面

图 6 水平方向 $100\sim 160\text{ m}$ 点位下方有视电阻率低值异常,地表附近有视电阻率高值异常,结合相关设计资料,推断图 7 中黑色虚线上方为坝体,视电阻率大于 $180\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。黑色虚线下方为坝基,位于浸润线以下,地下水侵入坝基上部的花岗岩风化层,

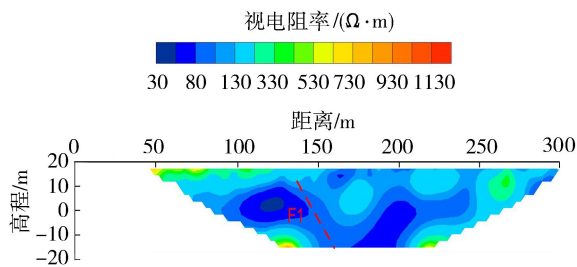


图 11 测线 3 第 2 个排列实测数据反演结果

使其视电阻率变小,剖面平距 130 ~ 160 m、深度约 30 ~ 40 m 范围内低阻异常明显,视电阻率小于 $80 \Omega \cdot \text{m}$,推断为富水区。

图 8 水平方向 100 ~ 180 m 点位下方有视电阻率低值异常,局部有视电阻率高值异常。结合图 8 及设计资料,推断图 9 中黑色虚线上方为坝体,视电阻率大于 $170 \Omega \cdot \text{m}$,局部高阻为混凝土排水沟的影响所致;黑色虚线下方为坝基,剖面平距 120 ~ 160 m、深度约 25 ~ 39 m 范围内低阻异常明显,视电阻率小于 $80 \Omega \cdot \text{m}$,推断为富水区,结合测线 1 结果,推断两者为贯通的异常渗流通道,沿通道方向到坝脚处发现多个出露的渗水点。

图 10 水平方向 100 ~ 200 m 点位下方有视电阻率低值异常。图 11 中,剖面平距 100 ~ 200 m、深度约 10 ~ 40 m 范围内视电阻率低值异常明显,视电阻率小于 $80 \Omega \cdot \text{m}$,推断为富水区。结合地质资料,发现 F1 断层通过该渗流区域,并向坝体后方延伸。F1 断层破碎带宽度为 0.5 ~ 1 m,胶结较好,为弱透水,一侧延伸至水库内,坝基处理时仅对该断层与坝轴线相交位置处做了混凝土防渗墙和帷幕灌浆处理,未对其他部位进行处理。

图 12 为根据高密度电法和已有工程地质资料的推断结果,沿断层 F1 的破碎带形成渗流通道。随着库水位上升,水压力作用对断层 F1 的破碎带进行潜蚀,在其深部形成渗漏通道,并在灌浆帷幕下部沿

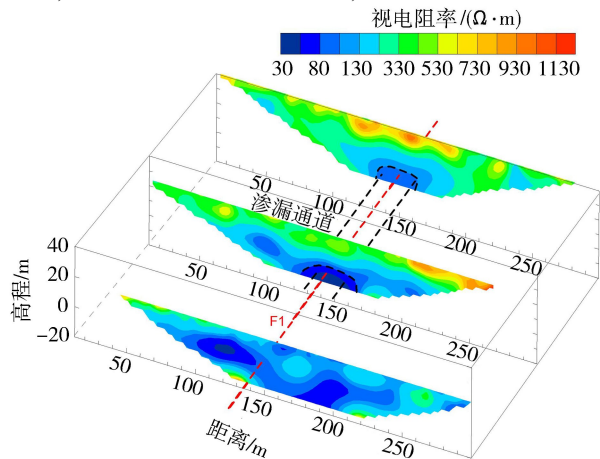


图 12 高密度电法推断结果

断层破碎带渗出,其流出区域与渗流异常区域基本吻合。受断层带影响,测线 3 附近的富水区域面积较大,并出露有上升泉。

3 结 论

a. 被地下水浸润的断层等目标体,与围岩之间存在明显的电性差异,成为高密度电法工作的良好物性前提。

b. 受算法多解性等因素的影响,反演结果可能存在假异常现象,将视电阻率拟断面图和反演结果结合分析,可提高对异常体的识别能力。

c. 结合实测资料拟断面图和反演结果,通过对低阻异常体的连续追踪,推断该大坝的渗漏通道沿断层破碎带形成,从而造成渗流异常,该结论为下一步的工程处理提供了依据。

参考文献:

- [1] 冷元宝,朱文仲,何剑,等.我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J].水利水电科技进展,2002,22(2):59-62. (LENG Yuanbao, ZHU Wenzhong, HE Jian, et al. Current research status and prospect for hidden dam troubles and leakage detection technology[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(2):59-62. (in Chinese))
- [2] 周华敏,肖国强,周黎明,等.堤防隐患物探技术研究现状与展望[J].长江科学院院报,2019,36(12):164-168. (ZHOU Huamin, XIAO Guoqiang, ZHOU Liming, et al. Geophysical detection technology of hidden embankment troubles: current research status and prospect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(12):164-168. (in Chinese))
- [3] 雷宛,肖宏跃.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,2006:230-235.
- [4] 曾昭发,刘四新.工程与环境地球物理[M].北京:地质出版社,2016:96-102.
- [5] 底青云,王若,王妙月,等.电法精细探测在雄安新区的应用展望[J].工程地质学报,2018,26(1):137-144. (DI Qingyun, WANG Ruo, WANG Miaoyue, et al. Application and prospect of fine detection in Xiong-An New Area by electrical method [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1):137-144. (in Chinese))
- [6] SONKAMBLE S, SATISHKUMAR V, AMARENDER B, et al. Combined ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity applications exploring groundwater potential zones in granitic terrain[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(8):3109-3117.
- [7] TASSY A, MAXWELL M, BORGOMANO J, et al. Electrical resistivity tomography (ERT) of a coastal carbonate aquifer [J]. Environmental Earth Sciences,

- 2014,71(2):601-608.
- [8] 甘建军,陈炳贵,刘晓,等. 高密度电法与 GMD 法在灰岩区滑坡勘查中的应用[J]. 地球物理学进展,2019,34(6):2429-2436. (GAN Jianjun, CHEN Bingui, LIU Xiao, et al. Application of high density electrical method and GMD method in landslide exploration in limestone area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6):2429-2436. (in Chinese))
- [9] 刘海心,朱瑞,王文甫,等. 高密度电法在水库大坝渗漏勘察中的应用[J]. 人民黄河,2018,40(10):99-103. (LIU Haixin, ZHU Rui, WANG Wenfu, et al. Application of electrical resistivity imaging to reservoir dam leakage investigation[J]. Yellow River, 2018, 40(10):99-103. (in Chinese))
- [10] 孙卫民,孙大利,李文忠,等. 基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J]. 长江科学院院报,2019,36(10):157-160. (SUN Weiming, SUN Dali, LI Wengzhong, et al. Technology of detecting dyke's hidden danger using time-lapse high-density resistivity method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10):157-160. (in Chinese))
- [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] 樊炳森,郭成超. 高密度电法在水库渗漏检测中的应用[J]. 长江科学院院报,2019,36(10):165-168. (FAN Bingsen, GUO Chengchao. Application of high density resistivity method to reservoir leakage inspection[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10):165-168. (in Chinese))
- [13] 王志鹏,刘江平,李小彬. 高密度电法对不同溶洞探测效果模拟[J]. 科学技术与工程,2019,19(27):74-80. (WANG Zhipeng, LIU Jiangping, LI Xiaobin. Simulation study on detection effect of different karst caves by high density resistivity method[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(27):74-80. (in Chinese))
- [14] 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[C] //中国地质学会. 2019 年全国工程地质学术年会论文集. 北京:《工程地质学报》编辑部,2019:367-370.
- [15] 金聪,刘江平. 二维高密度电阻率法数值模拟与应用[J]. 地质与勘探,2014,50(5):984-990. (JIN Cong, LIU Jiangping. Two-dimensional numerical simulation and application of the high-intensity resistivity method[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(5):984-990. (in Chinese))
- [16] 宋朝阳,王锐,李长征,等. 高密度电法探测堤防隐患研究[J]. 人民黄河,2020,42(7):104-106. (SONG Chaoyang, WANG Rui et al. Research on resistivity tomography to detection for hidden dangers of embankment[J]. Yellow River, 2020, 42(7):104-106. (in Chinese))
- [17] 葛双成,梁国钱,陈夷,等. 探地雷达和高密度电阻率法在坝体渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(5):59-61. (GE Shuangcheng, LIANG Guoqian, CHEN Yi, et al. Application of GPR and high-density resistivity method to leakage detection of dam bodies[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(5):59-61. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-24 编辑:骆超)

(上接第 52 页)

- [17] 束一鸣,吴海民,姜晓桢,等. 高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法[J]. 水利水电科技进展,2015,35(1):10-15. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1):10-15. (in Chinese))
- [18] 李佳男,赖国伟,王义鹏. 基于子模型的高面板堆石坝周边缝变形分析[J]. 水电能源科学,2014,32(8):81-84. (LI Jianan, LAI Guowei, WANG Yipeng. Study on deformation regularity for peripheral joints of high concrete faced rockfill dam based on submodel method[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2014, 32(8):81-84. (in Chinese))
- [19] 沈凤生. 混凝土面板堆石坝设计与实践关键技术研究[J]. 水利规划与设计,2017(1):1-6,10. (SHEN Fengsheng. Research on key technology of design and practice of concrete face rockfill dam[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(1):1-6,10. (in Chinese))
- [20] 徐泽平. 现代高混凝土面板堆石坝筑坝关键技术[R]. 北京:水电水利规划设计总院,2016.
- [21] 朱安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):48-55. (in Chinese))
- [22] 甘磊,沈振中,肖钧升,等. 河谷坡度对高面板堆石坝应力变形特征的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):78-83. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XIAO Junsheng, et al. Effect of valley slopes on stress and deformation characteristics of a high concrete face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5):78-83. (in Chinese))

(收稿日期:2020-10-23 编辑:骆超)