

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.011

探地雷达在堆石坝组合防渗体检测中的应用研究

宋 洋¹, 杨 杰¹, 程 琳¹, 吕 高², 宋福彬¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 堆石坝组合防渗体作为隐蔽结构, 无法直接观测, 存在安全隐患。本文基于探地雷达方法, 对某爆破堆石坝组合防渗体结构进行探测分析, 并对混凝土面板下部的脱空、渗漏等缺陷的典型雷达图像进行分析。在将组合防渗体结构与探地雷达图像特征波形进行对应的基础上, 结合堆石坝结构破坏特点, 确定大坝可能渗漏的部位并进行成因分析。对于不宜开挖验证区域, 通过分析坝体内部渗压计监测资料, 对探地雷达法无损检测结果提供验证。结果表明: 探地雷达在大坝组合防渗体及内部缺陷检测中有较好的可行性, 其检测结果能为大坝后续除险加固等工程提供可靠的支持, 对确保工程安全具有重要意义。

关键词: 探地雷达; 堆石坝; 组合防渗体; 脱空; 渗漏

中图分类号: P631, TV640.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2021)02-0229-06

Application of ground penetrating radar in the detection of combined seepage prevention body of rockfill dam

SONG Yang¹, YANG Jie¹, CHENG Lin¹, LÜ Gao², SONG Fubin¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: As a concealed structure, the combined seepage prevention body of the rockfill dam cannot be directly observed, and there are hidden safety hazards. Based on the ground penetrating radar method, this paper detects and analyzes the structure of the combined seepage prevention body of a blasting rockfill dam and analyzes the typical radar images of the defects such as void and leakage under the concrete face slab. On the basis of correspondence between the structure of combined seepage prevention body and the characteristic waveform of ground penetrating radar image, combined with the failure characteristics of rockfill dam structure, the possible leakage location of the dam is determined with the causes analyzed. For areas that are not suitable for excavation and verification, the results of the ground penetrating radar method for nondestructive testing are verified by analyzing the monitoring data of the osmometer inside the dam. The results show that the ground penetrating radar has good feasibility in the detection of dam combined seepage prevention body and internal defects, and that its detection results can provide reliable support for subsequent dam reinforcement projects, which is of great significance in ensuring engineering safety.

Key words: ground penetrating radar; rockfill dam; combined seepage prevention body; void; seepage

收稿日期: 2020-05-21; 网络出版日期: 2020-11-27

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201127.1106.002.html>

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划重点资助项目(2018JZ5010); 陕西省水利科技计划资助项目(2018SLKJ-5); 引汉济渭联合基金资助项目(2019JLM-55)

第一作者: 宋洋, 男, 硕士生, 研究方向为水工结构安全监控及地球物理探测。E-mail: 934746236@qq.com

通信作者: 杨杰, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水工结构安全监控。E-mail: 7883365@qq.com

水工结构中常见的防渗体有黏土斜墙、复合土工膜和沥青混凝土面板等。

组合防渗体是一种由多种防渗体组合形成的防渗结构,大多设置在坝体上游。通过组合形式充分发挥防渗作用,控制坝体渗漏量,确保大坝安全稳定运行。

渗漏稳定是土石坝安全评价的一个重要指标,组合防渗体一旦失效,意味着大坝将面临严重的安全隐患^[1]。

防渗体受损大多由于坝体主要承重的堆石区块石粒径无法准确控制,块石不均匀分布导致局部孔隙率过大,甚至在有些部位出现架空现象。虽然通过一定的调整有所改善,但其变形期较长,主要依靠自然沉降来固结。

长期的沉降会导致组合防渗体下部出现脱空,进而使其产生不均匀变形,当拉应力过大时,组合防渗体可能会产生裂缝,坝体内部出现脱空现象,形成潜在的渗漏通道^[2]。因此,利用无损检测技术高效性及无损伤性特点,对此类无法直接观测到的结构与缺陷进行探测有重要意义。

在众多无损检测技术中,声波透射法、多道瞬态面波法和弹性波 CT 等在各类混凝土结构的质量检测中的得到应用。相比其他无损检测技术,探地雷达由于操作简便、可连续快速探测、受周围环境影响较小,近年来在隧洞衬砌、围岩、公路、堤防等工程的缺陷探测和质量评价中得到广泛的应用^[3-7]。

在水利工程无损检测方面,汪魁峰^[8]应用探地雷达法对水工隧洞衬砌混凝土厚度、内置钢筋分布、内部缺陷等进行探测标识。Li 等^[9]通过探地雷达技术,预测了大坝裂缝破碎带的位置。余博^[10]在利用探地雷达技术探测求取堆石坝隐伏缺陷体积方面做了深入的探究,并证明探地雷达能够对堆石坝隐伏缺陷做出准确预估。赵波^[11]通过探地雷达对水库堤坝中防渗墙的连续性进行了探测,找到了相对薄弱的墙段,但缺少验证手段。李秀琳等^[12]应用探地雷达对沥青混凝土面板防渗缺陷进行快速检测,并进行钻芯验证,但仅探测了防渗体系表层出现的鼓包、开裂等现象。对于水利工程的探地雷达检测工作,坝体部分部位不宜采用钻芯验证,此时往往缺少验证结果准确性的方法。

本文通过探地雷达技术对堆石坝组合防渗体进行无损检测。结合雷达检测图像,对大坝组合防渗体可能存在的裂缝、脱空、渗漏等问题进行分析,并识别出组合防渗体结构的特征雷达图像。对于不宜开挖的探测区域,通过分析该区域土工膜后渗压计

监测资料,对探地雷达检测成果进行验证,为找出渗漏的位置及原因提供更加准确的依据,为工程安全运行提供保障,对类似工程检测工作具有一定的参考价值。

1 探地雷达检测原理

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)近年来由于其高效、可靠并且可实现无损探测,在混凝土结构检测中得到广泛应用。它是通过天线发出的高频宽带电磁脉冲波在不同介质表面发生反射进行无损探测。探地雷达探测原理见图 1。

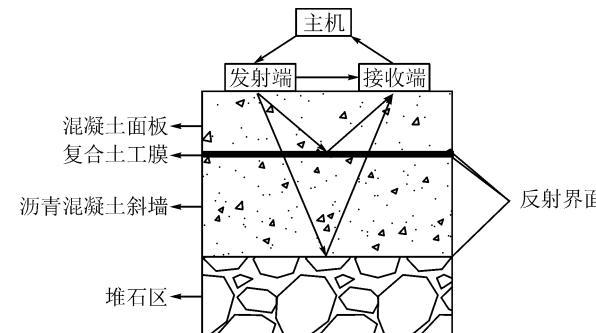


图 1 探地雷达探测原理图
Fig. 1 Schematic diagram of ground penetrating radar detection

电性不同的介质会影响电磁波的传播途径,通过分析接收波的双程旅行时间、波形等参数可以判断地下不可见目标体的空间位置和几何形态,达到识别不可见目标物的目的。目标物所在位置可根据式(1)确定。

$$h = \sqrt{v^2 t^2 - x^2} / 2 \quad (1)$$

式中: h 为目标体埋深; v 为电磁波在介质中的传播速度; t 为双程旅行时间; x 为发射天线与接收天线的距离。其中 v 由介质的相对介电常数 ϵ 确定:

$$v = C / \sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

混凝土的相对介电常数为 7 左右,空气的相对介电常数为 1,水的相对介电常数为 81,堆石体的相对介电常数为 5 左右。

电磁波在传播时,遇到不同阻抗界面时将产生反射波和透射波,并遵循反射与透射原理。反射波的能量大小由反射系数 R 决定,反射系数 R 可由下式计算:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

式中: ϵ_1, ϵ_2 分别为反射界面上、下层介质的相对介电常数。反射界面两侧介质的介电常数差异越大反射越强烈。

2 工程实例

2.1 工程概况

某水库兴建于1970年,控制流域面积 132 km^2 ,多年平均径流量 0.97 亿 m^3 ,水库总库容为 2810 万 m^3 ,是一座集灌溉、防洪、发电、城市供水等综合利用的中型水库。枢纽工程由大坝、输水洞、泄洪洞及电站组成,其中大坝为定向爆破沥青混凝土斜墙复合土工膜防渗堆石坝,最大坝高 85 m ,坝顶高程 735 m ,

坝长 265 m ,顶宽 7.5 m ,大坝级别为2级。爆破堆积体平均高度 57.3 m ,最低高度 51.0 m ,坝体防渗采用沥青混凝土斜墙作为防渗措施。河床覆盖层平均厚度为 $14\sim15\text{ m}$,多为砂卵石和大漂石。河床防渗采用混凝土作为截水墙,最大深度 21.8 m ,其顶部与沥青混凝土斜墙相接,下部采取帷幕灌浆措施。其大坝典型横断面见图2。除险加固后,考虑到复合土工膜良好的防渗性能,在整个上游面沥青混凝土防渗斜墙上铺设一层抗拉能力大、变形性能好的复合土工膜。

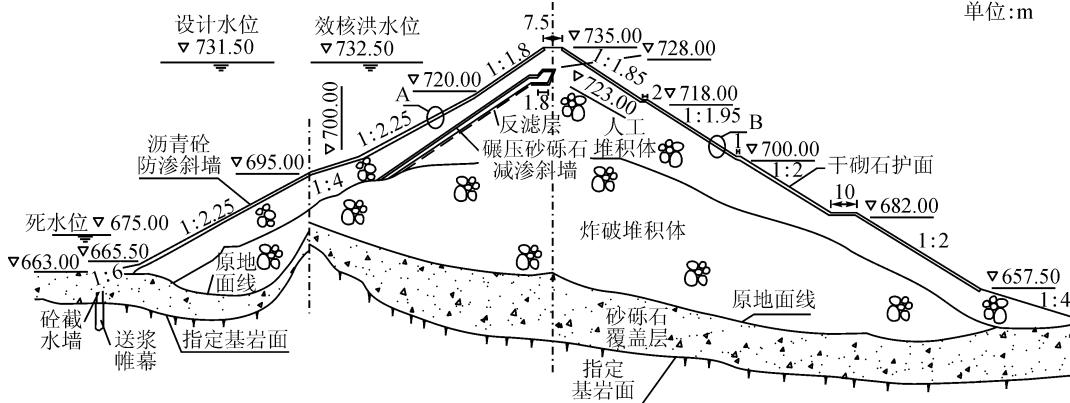


图2 大坝典型横断面图
Fig. 2 Typical cross-sectional view of the dam

2.2 探测设备与测线布置

探测设备采用美国劳雷公司生产的SIR-3000型便携式探地雷达,测量范围为 $0\sim8000\text{ ns}$ 。根据探测现场实际情况,选用中心频率为 400 MHz 的单体屏蔽天线,其探测深度约为 $1\sim5\text{ m}$,可以满足对坝体组合防渗体的探测要求。

根据无损检测区域的整体特点,测网布置范围

为大坝坝顶、两岸坝肩和上游水位以上面板部位。在上述范围内共布置了11条测线。测线采用常规的定点打标进行定位,采集过程为匀速进行,可以根据采集图像有效区域的宽度,等比放大到实际区域的方法来进行精确定位,可较为全面、完整地检测出坝顶、上游坝面的内部实际情况。

各条测线布置情况见图3。

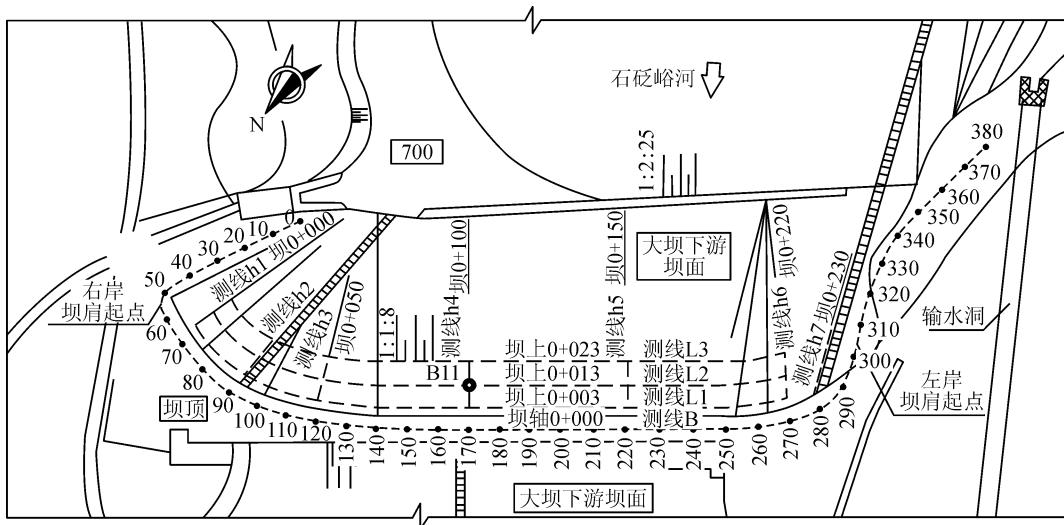


图3 测线布置图
Fig. 3 Line layout

表1为各条测线与对应桩号的汇总表。

表1 测线编号及名称汇总表
Tab. 1 Line number and name summary table

测线	L1	L2	L3	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	B
桩号(0+)	坝上 003	坝上 013	坝上 023	坝 000	坝 020	坝 050	坝 100	坝 150	坝 220	坝 230	坝 轴 000

2.3 探测结果与分析

2.3.1 组合防渗体雷达图像分析

大坝组合防渗体结构见图4,人工堆石体上游侧设有厚25 cm的沥青防渗斜墙,斜墙上表面铺有复合土工膜。为保护组合防渗体,在土工膜上均匀铺设厚15 cm的现浇混凝土。由于面板、土工膜、沥青防渗斜墙结构铺设规整,所以其雷达图像多呈平行波,且同相轴连续。图5为截取的部分探测图像,同一测线的雷达图上部图像均与所截取部分具有结构相同、同相轴连续的平行波。通过对比设计图与雷达图,可以分别确定混凝土面板、组合防渗体在探地雷达图像上的位置。明确各部分结构对应的雷达图像有助于分析检测数据、判断缺陷的位置和类型。

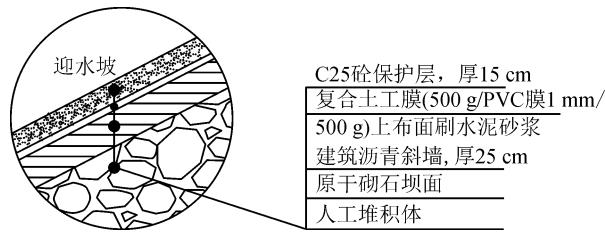


图4 水库大坝防渗加固设计图

Fig. 4 Design drawing of anti-seepage and reinforcement of reservoir dam

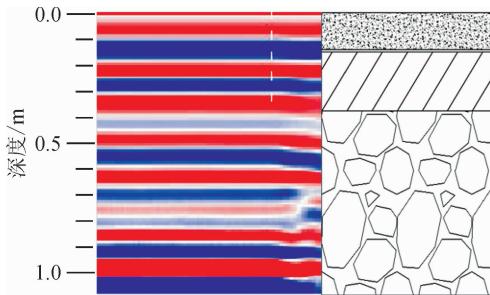


图5 组合防渗体区域雷达图

Fig. 5 Radar image of combined seepage prevention body

2.3.2 典型裂缝图像分析

裂缝的雷达探测图像主要表现为同相轴错段,平行波不连续。现场雷达探测图像及裂缝照片见图6,位于测线h5上的桩号为坝上0+010与坝上0+009之间的h5-1处存在缺陷,面板表面至深度0.4 m处均存在明显的同相轴错断、平行波下凹现象,判断为深度40 cm的裂缝。虽然裂缝深度较浅,不属于400 MHz的常规探测范围,但是由于裂缝较大,其

间空气与两侧混凝土面板对电磁波反射有明显差异,所以在雷达图像上可以清楚分辨。该裂缝贯穿土工膜及沥青防渗斜墙,且组合防渗体出现一定程度的变形。出现缺陷的原因可能是由于斜墙下部堆石体长期沉降,导致组合防渗体下部出现脱空,使组合防渗体产生不均匀变形。当拉应力过大时,防渗体便会出现裂缝甚至贯穿性裂缝。铺设在斜墙表面的复合土工膜随时间增长面临老化的问题,适应变形的能力变差,土工膜自身也会出现裂缝。

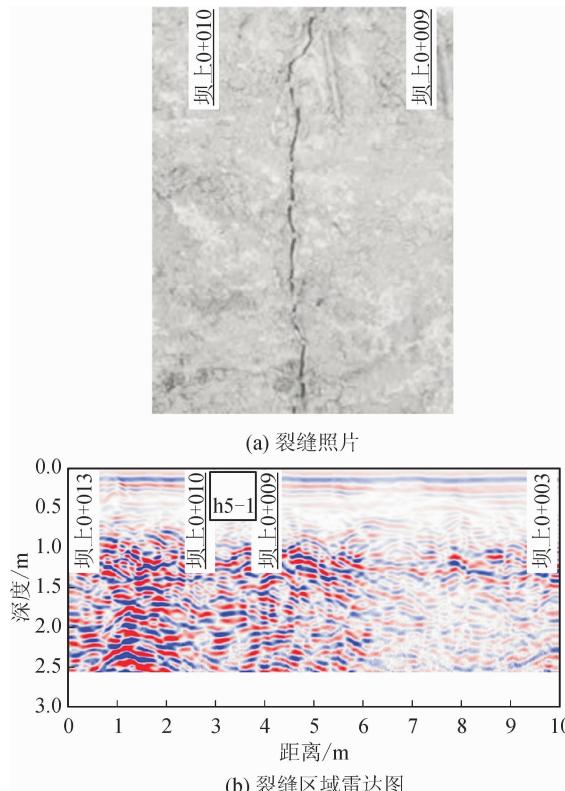


图6 裂缝照片与裂缝区域雷达图

Fig. 6 Crack photo and radar image of crack area

2.3.3 脱空及渗漏部位图像分析

脱空部位往往充满空气,空气与周围介质的介电常数差异较大,雷达图像表现为局部拱形强烈反射。测线L3的现场探测图像见图7,雷达剖面经过了增益调整、背景去噪、一维滤波等处理措施。可以看出,上部雷达波形无较大变化,面板与组合防渗体结构完整。但在位于桩号为坝0+113,深度为0.45 m的L3-1处存在较为强烈的弧形反射现象,且有明显的顶界面,电磁波由相对介电常数大的堆石体进入

相对介电常数小的空气,反射系数为正,顶界面相位与表面波相位相反,结合反射出现的位置,判断缺陷为斜墙后堆石体的局部脱空。出现脱空可能是由于堆石体随时间延长而增长的沉降导致,也可能与施工质量等因素有关。

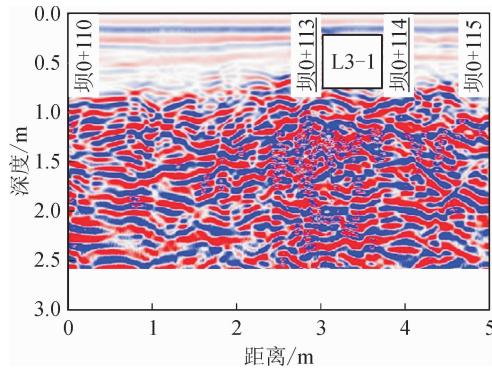


图 7 堆石体脱空区域雷达图

Fig. 7 Radarimage of rockfill void area

渗漏病害的典型雷达图像表现为同相轴错断、

不连续的大范围强反射现象,由于空隙中充满水或含水率较高时,该区域的反射明显强于干燥部位,且往往在图像上可以分辨出渗漏起始界面。

测线 L3 所处位置靠近当日上游水位,未能进行开挖验证,所以参考监测资料分析结果进行辅助验证。为观测坝体内部孔隙水压力,在大坝上游土工膜后埋设渗压计,若防渗结构完整,则渗压计测值应与上游水位无明显相关性。其中 B11 渗压计特征值见表 2,该测点最大年变幅、最小年变幅均较大,最大年变幅超过 30 m。由 B11 渗压计水位与上游水位过程线(图 8)可以看出,渗压计水位与库水位变化保持同步、变幅接近,说明土工膜损坏。同时,在图 7 雷达剖面的中下部,观察到有明显的分界面,出现大范围同相轴错断、不连续的强反射现象,是典型的渗漏雷达图像。究其原因,应为由于下部堆石体可能发生不均匀沉降,导致沥青斜墙防渗体变形进而失效,造成渗流异常。

表 2 土工膜后 B11 渗压计特征值统计表

Tab. 2 Statistical table of characteristic values of B11 osmometer after geomembrane

年份	最大值/m	日期	最小值/m	日期	年变幅/m	年均值/m
2001	713.39	20011114	703.85	20010711	9.54	706.35
2002	715.54	20020712	704.93	20020204	10.61	707.74
2003	723.08	20031018	713.95	20030830	9.13	711.71
2007	728.05	20071021	720.88	20071231	7.17	713.47
2008	726.13	20081028	697.03	20080720	29.10	712.74
2009	724.88	20090920	701.42	20090514	23.46	712.28
2010	723.23	20100911	704.60	20100310	18.63	711.75
2011	729.86	20111109	694.62	20110510	35.24	714.37
2012	720.81	20120109	696.97	20120806	23.84	710.44
2013	719.44	20130726	692.79	20131017	26.65	709.93
2014	724.03	20141206	696.88	20140106	27.15	712.06
2015	729.63	20150419	704.11	20150909	25.52	714.29
2016	721.83	20170519	703.91	20171005	17.92	710.98
2017	728.97	20171010	707.67	20171227	21.30	713.97
2018	724.41	20180523	701.66	20180328	22.75	712.17

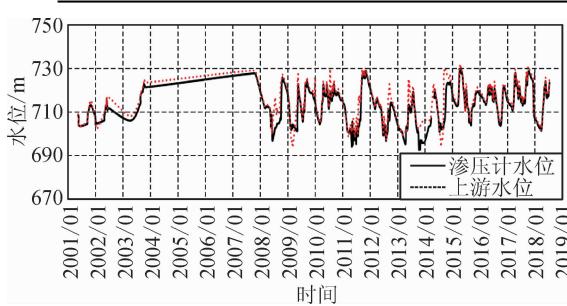


图 8 B11 渗压计水位~上游水位过程线(坝 0+100.00 m)

Fig. 8 B11 osmometer water level ~ upstream water level process line (0 + 100.00 m of the dam)

3 结 论

1) 根据雷达图像,可以初步判断病害的位置与大小。分析认为病害的出现,主要是由于长期的沉降导致组合防渗体下部出现脱空,进而使组合防渗体产生不均匀变形,当拉应力过大时,组合防渗体可能会产生裂缝,最终导致渗漏。

2) 探地雷达在大坝组合防渗体结构检测中的应用是可行且可靠的,可以高效、便捷、准确地探测坝体表层结构中的裂缝、脱空、渗漏等不可直观辨别

的缺陷,有助于判断缺陷出现位置以及成因,为判断工程结构的安全性提供参考,对后期可能进行的加固处理有参考意义。

3) 通过探地雷达检测发现大坝组合防渗体存在贯穿于混凝土面板、土工膜以及沥青混凝土斜墙的局部破坏问题,通过对土工膜后渗压计监测资料进行分析,为检测结果提供验证。本方法相对于钻芯开挖验证,有更佳的经济性,并对不宜开挖区域的探地雷达检测结果验证提供一种新思路。

4) 探地雷达精确探测深度较浅,对于深层缺陷的探测精度不足,且探测过程中如遇到杂物或金属,均会对探测结果产生影响。应综合运用多种物探方法进行探测,互相弥补检测盲区,增加结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 韩春影. PVC 复合土工膜在爆破堆石坝坝面防渗工程中的应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38(7): 52-54.
HAN Chunying. Application of PVC composite geotechnical membrane to impervious facing of blasting rock-fill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(7): 52-54.
- [2] 卢建华, 谭界雄, 周和清. 定向爆破堆石坝的病害特点及加固技术综述[J]. 水电与新能源, 2017, 29(10): 10-12, 26.
LU Jianhua, TAN Jiexiong, ZHOU Heqing. Review of the illness characteristics and reinforcement technology of directed blasting rockfill dams [J]. Hydropower and New Energy, 2017, 29(10): 10-12, 26.
- [3] 卢贤锥. 探地雷达在铁路隧道检测中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 775-778.
LU Xianzhu. Application of ground penetrating radar in railway tunnel inspection [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 775-778.
- [4] 郭亮, 李俊才, 张志铖, 等. 地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3009-3015.
GUO Liang, LI Juncai, ZHANG Zhicheng, et al. Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3009-3015.
- [5] 郭士礼, 许磊, 李修忠. 探地雷达在公路路面变形沉降

检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1213-1217.

GUO Shili, XU Lei, LI Xiuzhong. Application of GPR in detection of road surface settlement [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1213-1217.

- [6] 葛双成, 张莎, 李强, 等. 探地雷达在海塘堤脚淘空损伤检测中的应用试验及分析[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 989-993.

GE Shuancheng, ZHANG Sha, LI Qiang, et al. Experimentation and analysis on the application of detecting hollow injury in the sea wall by means of ground penetrating radar [J]. Progress in geophysics, 2007, 22(3): 999-993.

- [7] XU Xingxin, ZENG Qiaosong, LI Dong, et al. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams [J]. Engineering Geology, 2010, 111(1/2/3/4): 31-42.

- [8] 汪魁峰. 探地雷达法在水工输水隧洞衬砌混凝土检测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 215-217, 221.

WANG Kuifeng. Application of ground-penetrating radar method in detection of lining concrete in hydraulic tunnel [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 215-217, 221.

- [9] LI Hui, MA Haitao. Application of ground penetrating radar in dam body detection [J]. Procedia Engineering, 2011, 26(3): 1820-1826.

- [10] 余博. 地质雷达在堆石坝隐伏缺陷体积探测技术中的应用[D]. 长沙:湖南大学, 2015.

YU Bo. The application of ground penetrating radar detection technology on concealed defects of concrete faced rock-fill dam [D]. Changsha: Hunan University, 2015.

- [11] 赵波. 水库堤坝中的防渗墙中地质雷达的应用[J]. 珠江水运, 2016, 27(14): 44-45.

- [12] 李秀琳, 马保东, 汪正兴, 等. 地质雷达在沥青混凝土面板防渗结构病害检测中的应用[J]. 大坝与安全, 2017(6): 74-78.

LI Xiulin, MA Baodong, WANG Zhengxing, et al. Application of ground penetrating radar in defect detection of seepage prevention structures of as-phalt concrete facing [J]. Dam & Safety, 2017(6): 74-78.

(责任编辑 王绪迪)