

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.019

黄土坝水蚀灾变动态演化的 GPR 成像研究

吕高, 罗磊, 邹国扬, 石韵, 程凯凯

(西安石油大学 管道工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 黄土坝是我国黄土高原地区重要水利枢纽工程,但其特殊土壤性质易在长期水力侵蚀下出现内部结构损伤,形成水蚀病害,直接威胁大坝安全运营。当前地质雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)作为无损检测技术在黄土坝水蚀病害探测中具有重要作用,但该领域缺乏针对水蚀劣化演变规律的系统理论支撑,导致病害定量诊断难以有效开展。为解决上述问题,明确黄土坝固结黄土裂缝水蚀劣化演变过程的 GPR 成像特征及规律,为 GPR 实测数据正演反推提供理论基础,并最终构建黄土坝水蚀病害定量诊断的理论模型与判据。研究采用基于坝体裂缝水蚀扩张过程的 GPR 探测方法,以土壤介电质理论为核心基础,通过时域有限差分法(FDTD)对裂缝溶蚀扩展过程开展数值正演模拟,同时结合现场检测数据进行验证分析。研究表明:裂隙填充体的相对介电常数增大时,GPR 反射波的弧顶波幅呈现显著增强趋势;裂隙张开度增加时,反射双曲线的整体张开程度明显扩大,且双曲线对应的波幅同步增强。

关键词: 地质雷达(GPR);时域有限差分法;黄土坝;水蚀病害;成像特征及规律

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0137-06

Dynamic Evolution of Water-induced Erosion Catastrophe in Loess Dams Based on Ground Penetrating Radar

LV Gao, LUO Lei, ZOU Guoyang, SHI Yun, CHENG Kaikai

(Xi'an Shiyou University, College of Pipeline Engineering, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The loess dam is an important water conservancy hub project in the Loess Plateau region of China, but its special soil properties prone to internal structural damage under long-term hydraulic erosion, forming hydraulic erosion diseases, which directly threaten the safe operation of the dam. At present, ground penetrating radar (GPR), as a non-destructive testing technique, plays an important role in the detection of hydraulic erosion diseases in loess dams, but there is a lack of systematic theoretical for the evolution law of water erosion deterioration in this field, resulting in the difficulty of effective quantitative diagnosis of diseases. To solve the above problems, the imaging characteristics and laws of G for the consolidation of loess cracks and hydraulic erosion deterioration in loess dams were clarified, and the theoretical basis for forward and reverse prediction of GPR field measurement was provided and finally the theoretical model and criterion for quantitative diagnosis of hydraulic erosion diseases in loess dams were constructed. The research method based on the GPR detection method of the see expansion process of cracks in the dam body was adopted, with the theory of soil dielectricity as the core basis, and the numerical forward simulation of the dissolution expansion process of cracks carried out by the finite difference method in the time domain (FDTD), and the verification analysis was carried out by combining the field detection data. The results of the research that when the relative dielectric constant of the crack filling body increases, the arc top amplitude of the GPR reflection wave shows a significant enhancement trend; when the crack opening degree increases, overall opening degree of the reflection hyperbola obviously expands, and the amplitude of the hyperbola corresponding to the wave amplitude is synchronously enhanced.

Keywords: ground penetrating radar(GPR); finite difference time domain; loess dam; water erosion diseases; imaging characteristics and laws

收稿日期:2025-08-02

修稿日期:2025-09-24

基金项目:陕西省城市公共交通空间综合规划与开发工程研究开放课题(CK20241101);岩土工程教学案例库建设与实践(2024-X-YAL-005);陕西省自然科学基金资助项目(2024JC-YBMS-277;2025JC-YBMS-561)

作者简介:吕高(1986—),男,博士,讲师,主要从事水工结构检测、数值模拟等方面研究。E-mail:lvgaol16@xsyu.edu.cn

黄土高原地区广泛分布的黄土坝在区域水资源调控、农业灌溉及防洪减灾中发挥着关键作用。然而,黄土因其特殊的结构性和水敏性,在长期渗流、干湿循环及水力侵蚀作用下,易诱发坝体内部结构损伤,形成渗透通道、管涌、塌陷等水蚀病害。此类病害具有隐蔽性强、演化迅速的特点,严重威胁大坝安全运营,甚至可能引发溃坝灾害。因此,发展高效、精准的黄土坝水蚀病害诊断技术,对保障工程安全、延长服役寿命具有重要的作用。

近年来,探地雷达技术在多个研究中成为焦点。施从伟等^[1]研究了粗糙表面对煤岩界面探地雷达识别结果的影响,明确了表面状况对探测结果的作用机制,有助于在煤岩探测中优化探测方案,提高识别精度。朱四新等^[2]分析了非金属管线不同参数对探地雷达响应的影响,详细阐述了管线参数与雷达响应的关系,为地下非金属管线探测提供了理论依据。安娅菲^[3]等探究了砂岩体裂隙渗流区的探地雷达信号动态响应机制,揭示了复杂地质条件下雷达信号的变化规律,为地质水文研究提供了新思路。

范永亮等^[4]开展了探地雷达早期信号探测深度数值研究与应用,对早期信号探测深度进行量化分析,拓展了探地雷达在浅层地质结构探测中的应用。张浚丰等^[5]进行浆砌石挡墙非均匀数值模拟和电磁响应特征研究,为浆砌石挡墙的质量检测与病害诊断提供了技术手段。刘震等^[6]将探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法相结合,有效提升了道路裂缝检测的精度和效率。郭士礼等^[7]研究了沥青面层松散探地雷达波场响应特征,为沥青路面病害检测提供了可靠的技术支撑。

在水利工程领域,谭磊等^[8]对土石坝蚁巢地球物理探测技术现状及展望进行了探讨,梳理了现有技术并展望未来发展方向。赵丽娜等^[9]通过综合物探分析对郑州“7·20”特大暴雨后常庄水库主坝进行检测,为水库安全评估提供了数据支持。陈国光等^[10]将监测资料与探地雷达应用于均质土坝渗漏分析,实现了多手段联合诊断坝体渗漏问题。方艺翔等^[11]运用监测资料、压水试验与综合物探法对某心墙坝渗漏进行识别,提高了渗漏检测的准确性。宋洋等^[12]将探地雷达应用于堆石坝组合防渗体检测,验证了该技术在坝体防渗检测中的有效性。熊辉等^[13]基于 BIM 技术对混凝土面板堆石坝脱空进行检测与加固,为坝体病害治理提供了新途径。

然而,针对黄土坝水蚀病害的 GPR 成像研究相对较少,且黄土坝的特殊性质和水蚀病害的复杂性给 GPR 检测带来了诸多挑战。例如,黄土的高孔隙率和复杂矿物成分可能影响电磁波的传播和反射,导致信号衰减和干扰增加;水蚀病害的多样性和隐蔽性也使得准确识别和评估病害变得困难。

因此,本文旨在研究黄土坝在水蚀病害下的 GPR 成像特征,并探讨 GPR 技术在黄土坝水蚀病害检测中的应用。基于电磁波理论和地质雷达原理,构建上游坝坡地电模型,建立介电常数-回波幅值的双层地电模型,结合 GPR 电磁波反射特性与数值正演模拟,并依托实测数据验证方法可靠性。

1 基本模型

1.1 探地雷达原理简介

探地雷达是一种用于探测地下结构和目标的无损检测设备。探地雷达由探地雷达主机、发射天线、接收天线、数据处理系统、显示屏等部分组成。

影响探地雷达探测效果的因素主要有天线中心频率、介质的导电率和介质的介电常数。一般天线频率越高,则探测深度越浅,分辨率越高;天线频率越低,则探测深度越深,分辨率越低。而在探测深度范围内影响探测效果的主要因素是被探测目标体与其周围介质的介电常数差。不同介质的介电常数及导电率值如表 1 所示。

表 1 不同介质的介电常数及导电率值

介质	导电率	相对介电常数
空气	0	1
清水	0.0001~0.03	81
砂(干)	0.0000001~0.001	4~6
淤泥(饱和)	0.001~0.01	10
砂(饱和)	0.0001~0.1	30
粘土(饱和)	0.1~1	8~12
干砂(海岸)	0.002	12

不同电性介质界面会引起电磁波传播路径的改变,基于接收波场的双程走时、相位及波形畸变特征,可反演隐伏地质体的空间展布与几何形态参数,进而实现地下异常体的精确识别。目标物所在位置可根据式(1)确定。

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

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。

式(1)中 v 由介质的相对介电常数 ε 确定:

$$v = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

式中: C 为电磁波在真空中的传播速度,标准为 3×10^8 m/s。

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:

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 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 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 差异越大反射越强烈。

1.2 上游坝坡地电模型

为了对大坝上游坝坡不同介质的电阻率差异进行分析,了解坝坡的地层结构、岩性分布、地下水情况等信息,为大坝的安全评估和病害诊断提供依据。

本文构建上游坝坡地电模型时,考虑上下表层和垫层其材料性质不同而进行。其工作流程如下:

(1) 收集大坝的地质勘察报告、设计图纸、施工记录等相关资料,了解坝坡的坝体分区、坝料岩性、浸润线等基本信息,确定电极布置的合适位置,检查坝体分区、坝料岩性、浸润线是否与已有资料相符,并且准备高精度的电阻率测量仪器和足够数量和规格的电极、电缆、数据采集装置等辅助设备和材料。

(2) 按照预定的测量方式在坝坡上游表面布置电极,用仪器测量不同电极组合之间的电阻率,记录好电位差、电流等数据,并且确保测量过程中避免外界干扰,灵活调整探测走线。

(3) 将现场测量得到的数据传输到计算机,检查数据的完整性和准确性,剔除异常数据点;根据测量得到的视电阻率数据,通过反演算法来计算出地下不同深度的真实电阻率分布情况。

(4) 结合大坝的实际地质情况和设计资料,对构建的地电模型进行解释。

构建上游坝坡地电模型的作用是根据不同介质的电阻率差异,识别坝坡中的不同地质体,如土体、岩石、含水层等。分析坝坡的结构特征,包括地层的分层情况、界面的位置和性质等。分析电阻率的异常变化,探测坝坡中可能存在的病害,如渗透通道、管涌、滑坡等。

2 黄土填层介电特性及反射规律

为了分析垫层相对介电常数的变化引起的波幅变化,建立两层黄土地质模型,如图1所示。

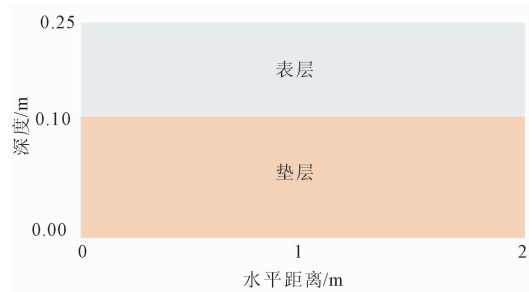


图1 双层地电模型

表层相对介电常数分别为7,15,30,40;垫层相对介电常数分别为5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80。

根据数值正演结果,以金属界面的反射波幅 A_m 为1,设表层相对介电常数为 ε_1 ,垫层相对介电常数为 ε_2 ,对不同界面的反射波幅进行归一化处理,具体数据如表2所示。

表2 归一化回波幅值

ε_2	ε_1			
	7	15	30	40
1	-0.45282	-0.58575	-0.60938	-0.70819
5	-0.08491	-0.27190	-0.42399	-0.48014
10	0.09147	-0.10302	-0.27276	-0.33843
15	0.19338	0.00000	-0.17557	-0.2455
20	0.26383	0.07406	-0.10377	-0.17597
25	0.31703	0.13127	-0.04692	-0.12039
30	0.35939	0.17773	0.00000	-0.07522
35	0.39436	0.21670	0.04005	-0.03452
40	0.42400	0.25017	0.07480	0.0000
45	0.44962	0.27942	0.10548	0.03071
50	0.47212	0.30536	0.13292	0.05822
55	0.49212	0.32863	0.15772	0.08316
60	0.51010	0.34969	0.18033	0.10595
65	0.52560	0.36892	0.20109	0.12693
70	0.54129	0.38660	0.22026	0.14635
75	0.55497	0.40293	0.23807	0.16442
80	0.56764	0.41812	0.25469	0.18130

根据双层地电模型的数值计算结果可知,回波幅值的基本规律如下:表层介质不变,垫层介质的相对介电常数增加,对应的地质雷达归一化回波幅值也必然增加;而垫层相对介电常数不变时,归一化回

波幅值是随着表层相对介电常数增加而减小的。同时,当表层与垫层的相对介电常数相等时,回波幅值为 0,表明电磁波完全穿透该界面。

根据双层地电模型的波幅特征,可得出其基本规律如图 2 所示。图 2 中,横坐标为垫层相对介电常数,表示通过改变不同材料属性得到不同的垫层相对介电常数;纵坐标为相对振幅 A_i/A_m ,其中 A_i 表示垫层和表层不同界面的反射波幅, A_m 表示金属界面的反射波幅为 1。表层相对介电常数 ϵ_s ,表示通过改变不同材料属性得到不同的表层相对介电常数。

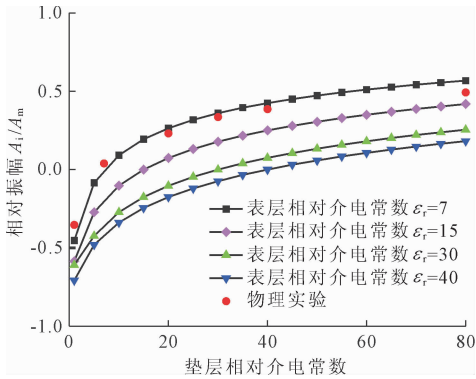


图 2 回波幅值规律曲线

图 2 中,可直观发现物理实验数据与数值模拟方法对比结果,物理实验的界面反射测试数据的基本规律和数值结果基本一致,都是随着垫层相对介电常数增加,回波波幅增加。说明数值计算的成果具有较高的准确性。

3 坝坡裂缝溶蚀数值正演分析

3.1 土石坝裂缝数值模型

用数值方法相对于试验的方法具有非常理想的波形传播效果,试验存在较多的缺陷,如介质并不是理想均匀;较大试样不能确保均匀压实;室内环境容易受到外界干扰以及后期处理中的读数误差。因此本文主要以数值方法研究不同赋存介质的 GPR 成像特征,以试验作为参考及修正。

模具试验显然不具备更为精确细致的裂缝的 GPR 成像特征研究,以及进一步的溶蚀过程。因此基于课题思路,建立基于时域有限差分方法的数值模型,以数值的方法,研究土体中裂缝的溶蚀劣化过程。

本模型的水平距离为 2.0 m,探测深度为 0.7 m,单元格大小为 0.0025 m × 0.0025 m,时间测深为 20 ns;地质背景中碾压黄土相对介电常数为 5,电导率为 0.00001 S/m;子波主频分别设置为 900 MHz,激励源为 Ricker 子波,计算步为 180,每个计算步为

分别计算 3 391 次。具体模型设计如图 3 所示。

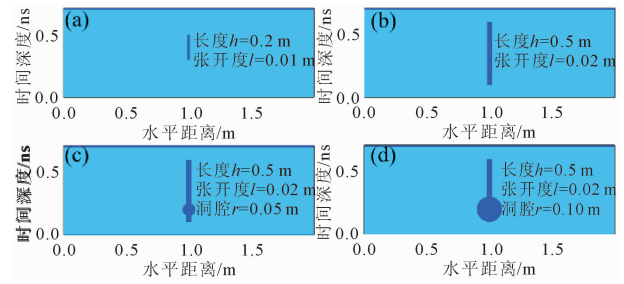


图 3 土体裂缝溶蚀过程的数值模型

图 3(a)—图 3(d) 分别为初始微裂缝、裂缝扩张、裂缝渗水溶蚀和溶蚀空洞扩大的数值分析模型。对比分析,通过数值方法进一步研究裂缝产生以及逐渐溶蚀的过程的成像特征分析,可以较为全面的了解相对介电常数对回波波形的影响程度与效果,以及土石坝中填筑土体的裂缝在不同时期的波形、振幅变化规律与趋势。

3.2 裂缝的 GPR 成像特征及规律

通过对浅层地表裂缝溶蚀扩张过程的 GPR 探测成像计算,在 900 MHz 子波条件下,得出的 GPR 成像特征分别如图 4 所示。

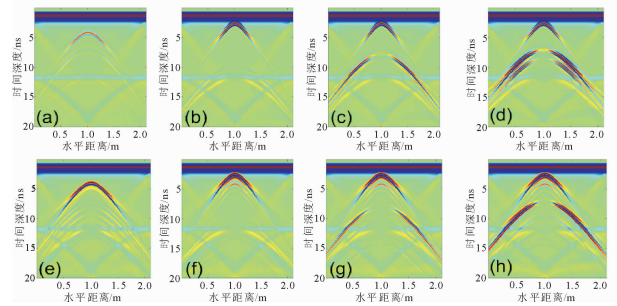


图 4 潜伏裂隙的 GPR 成像特征

在这些地质雷达探测成像图中,颜色越深或色调差异越大,表示反射波幅度越高,意味着该位置处介质的电磁特性差异越显著,对应着不同的裂缝或溶蚀区域。在裂缝、溶蚀空洞等位置,由于与周围介质存在电磁特性差异,会产生较强反射波,在图中以深色显示出来。

图 4(a)—图 4(d) 分别为赋存空气的初始微裂缝、裂缝扩张、裂缝渗水溶蚀和溶蚀空洞扩大的数值计算结果;图 4(e)—图 4(f) 分别为赋存水体的初始微裂缝、裂缝扩张、裂缝渗水溶蚀和溶蚀空洞扩大的数值计算结果。对比图 4(a) 和图 4(e),当裂隙赋存性质的相对介电常数增大时,反射波弧顶波幅显著增强。这表明相对介电常数与反射波弧顶波幅之

间存在正相关关系,即相对介电常数越大,反射波弧顶波幅越强,意味着在GPR成像中,相对介电常数大的裂隙在弧顶处的信号反射更为强烈,更容易在图像上被识别;对比图4(a)和图4(b),随着裂隙张开度的增加,双曲线整体的反射波幅增强。然而,对于相同深度的腔体,其回波双曲线特征的张开度并未发生变化。这说明裂隙张开度主要影响反射波幅的强度,而对相同深度腔体回波双曲线的张开形态影响较小,即在GPR成像中,裂隙张开度的变化会使双曲线反射信号强度改变,但不会改变相同深度处双曲线的横向展布形态。

4 实例数据分析

4.1 工程概况及探测方法

某土石坝主体采用土石材料填筑而成,以土料和石料为主要构筑材料,坝体内部设置了防渗体,采用黏土心墙或斜墙结构。大坝上游面采用混凝土块护坡结构,混凝土块护坡由预制或现浇的混凝土块铺设而成,块体之间通过一定的连接方式相互固定,形成连续的防护层。由于后期运行和库区升降水位的影响,造成混凝土块护坡下存在缺陷,以致库内蓄水量不能达到最大,严重影响效益。大坝下游面设置排水设施,同时,下游坝坡进行植被防护或碎石铺设。利用地质雷达200 MHz天线对其进行检测,以期寻找出具体缺陷信息和位置。根据现场条件,在确保安全的情况下,对上游护坡从下到上依次布置三条测线,每条测线间隔1.5 m,每条测线5 m标记一次。具体测线布置图如图5(a)、图5(b)所示。

经现场扫描测试,该土石坝的上游坝坡表观及内部均有不同程度的破损和潜蚀。本文选取表观破坏较为明显的第85#点位为代表,见图5(c),分析坝面出现严重错台、掉块以及防渗膜局部破坏的情况下坝体的深层破坏情况及其范围。



图5 现场测试及测线布置示意图

4.2 实测数据病害特征分析

图6为第85号点位及其附近的地质雷达扫描图,分别对应图5(a)中的三条测线。针对第85号点位的具体分析如下:

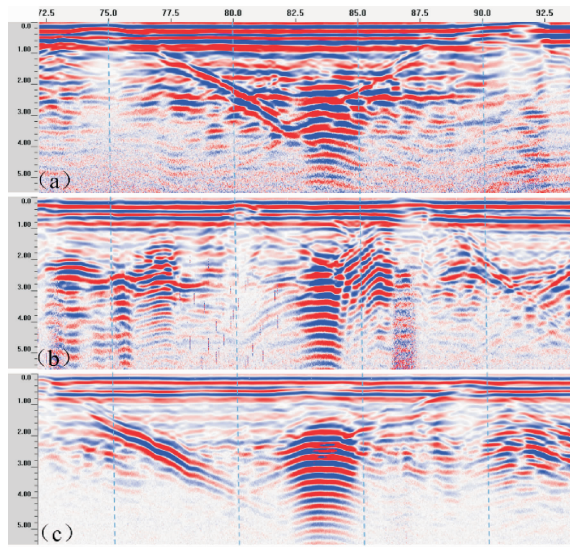


图6 第85号点位的测线对比

在临近库水的第一条测线,即图6(a)中,深度2 m,水平82.5 m~85.0 m的水平位置,电磁波主要特征为多次连续强反射,对应为潜伏水体,符合第3节中“充水洞腔”的成像特征。结合表1中清水介电常数为81与黄土介电常数为5的巨大差异,可推断该区域存在高含水率的溶腔;而随着水平位置抬升,在图6(b)第二条测线中,该腔体水平范围逐渐减小,可推测为较为狭深的潜蚀通道,对应第3节中“裂缝渗水溶蚀”阶段的特征,此时水流可能沿垂直方向侵蚀,形成狭深通道,而非横向扩展,与数值模拟中“潜蚀通道”的形态一致;图6(c)第三条测线中,该腔体的反射幅值增加,且距离坝坡深度约为1.5 m,符合第3节中“溶蚀洞腔扩大并接近地表”的成像规律,表示该潜伏腔体含水率增加,且沿坡面不断侵蚀,已逐渐接近地表。

通过对表观破损严重区域的覆盖扫描,可以发现水体通过防渗层进入坝体,并对坝体中的填筑黄土造成侵蚀,且该侵蚀具有上蚀发展的趋势。

5 结论

本文研究土石坝中典型地电模型的反射特征以及水蚀条件下坝体内部的渗透破坏过程,并通过实例证明得出如下结论:

(1) 土石坝填筑土体的相对介电常数受含水率

影响,随着土体中含水率升高,其相对介电常数增大。

(2) 土石坝中水对土体的潜蚀破坏过程由表及里,对应的 GPR 回波呈现双曲线特征,且溶蚀破坏的腔体半径并不影响回波双曲线的张开度。

(3) 水体通过防渗层进入坝体,并对坝体中的填筑黄土造成侵蚀,且该侵蚀具有上蚀发展的趋势。

参考文献:

- [1] 施从伟,高忠斌.粗糙表面对煤岩界面探地雷达识别结果影响研究[J].煤炭工程,2024,56(11):176-181.
- [2] 朱四新,王浩茵,朱安福,等.非金属管线不同参数对探地雷达响应的影响[J].科学技术与工程,2024,24(31):13540-13552.
- [3] 安娅菲,冯 晷,董泽君,等.砂岩体裂隙渗流区的探地雷达信号动态响应机制[J].重庆大学学报,2024,47(10):181-190.
- [4] 范永亮,郭士礼,梁 栋,等.探地雷达早期信号探测深度数值研究与应用[J].地球物理学进展,2024,39(5):2069-2077.
- [5] 张浚丰,许 明,刘先珊,等.浆砌石挡墙非均匀数值模拟和电磁响应特征研究[J].地球物理学进展,2024,39(6):2393-2406.
- [6] 刘 震,顾兴宇,李 骏,等.探地雷达数值模拟与道

路裂缝图像检测的深度学习增强方法[J].地球物理学报,2024,67(6):2455-2471.

- [7] 郭士礼,蔡文才,田朋飞,等.沥青面层松散探地雷达波场响应特征研究[J].地球物理学进展,2024,39(4):1620-1627.
- [8] 谭 磊,彭 渊,张平松,等.土石坝蚁巢地球物理探测技术现状及展望[J/OL].水利水电科技进展,1-19[2025-02-28].<https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20240319.1347.003>.
- [9] 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.
- [10] 陈国光,李 卓,方艺翔,等.监测资料与探地雷达在均质土坝渗漏分析中的应用[J].人民黄河,2022,44(10):127-132,158.
- [11] 方艺翔,李 卓,范光亚,等.监测资料、压水试验与综合物探法在某心墙坝渗漏识别中的应用研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):87-97.
- [12] 宋 洋,杨 杰,程 琳,等.探地雷达在堆石坝组合防渗体检测中的应用研究[J].西安理工大学学报,2021,37(2):229-234.
- [13] 熊 辉,周君蔚.基于 BIM 技术的混凝土面板堆石坝脱空检测与加固[J].水电能源科学,2020,38(12):83-86.

(上接第 136 页)

- [24] 胡佳雯,何武全,裴文武,等.寒区渠道接缝材料老化性能及技术指标研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(1):185-191.
- [25] 建筑防水材料老化试验方法:GB/T 18244—2022[S].中国标准出版社,2022.
- [26] 建筑防水涂料试验方法:GB/T 16777—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [27] 铁路工程喷膜防水材料:Q/CR 517.2—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [28] 王樱峻,宁志远,叶 谦.沥青混凝土面板与土工膜防渗连接结构试验研究[J].水电能源科学,2023,41(8):113-116.
- [29] 张志恩,雷 军,李利平,等.隧道衬砌施工缝抗渗性及影响因素室内试验研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(8):1609-1616.
- [30] 蒋雅君,赵菊梅,刘基泰.含聚合物防水膜的隧道衬砌界面剪切-滑移力学特性试验研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(3):496-505.
- [31] 陆新征,叶列平,滕锦光,等.FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J].建筑结构学报,2005,26(4):10-18.
- [32] 蔡光义.聚氨酯涂层的老化机制及改性与失效评价方法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [33] 朱广超,王贵友,胡春圃.交联密度对脂肪族聚氨酯弹性体结构与性能的影响[J].高分子学报,2011(3):274-280.
- [34] 肖 欢.热塑性聚氨酯弹性体增韧聚氯乙烯的研究[D].西安:西安科技大学,2025:45-57.
- [35] 聚氨酯防水涂料:GB/T 19250—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.