

DOI: 10.11779/CJGE20220902

# 土石堤坝渗漏病险试验装置的研制及初步应用

马朝阳, 任杰\*, 南胜豪, 徐松

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为准确模拟渗漏病险发生条件下土石堤坝渗流特性, 研制一种土石堤坝渗漏病险试验装置。该装置能够精准控制试验槽坡度、输水流量、库水温度等试验变量, 可实现边壁及底板平整度的自动校核、流控系统与温控系统的自动化控制、多种供吸水组合方式的水循环、库水的分级与线性升温和降温、坝体温度场和体积变形以及孔隙水压力的动态监测等功能。选用黏土心墙堆石坝为研究对象, 初步开展了土石堤坝渗漏病险试验研究。研究表明: 渗漏病险区将改变坝体的流热双场, 其周围的温度变幅大于孔压变幅; 随着渗漏病险区逐步下移, 所在位置处的温度值显著增大, 浸润线的波动情况与坝体渗流速率也随之增大, 影响坝体渗流稳定性的不利情况逐渐增强。该装置能够准确模拟各工况真实情况以及多场耦合效应对土石堤坝渗漏病险发生发展过程的影响, 能够实时监测渗漏病险发展过程中各物理场演变情况, 为深入研究土石堤坝渗流特性提供一种有效的技术工具。

**关键词:** 土石堤坝; 渗漏; 试验装置; 试验方法; 温度场; 渗流场

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)11-2268-10

作者简介: 马朝阳(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土石堤坝健康诊断与风险评估方面的研究。E-mail: mzyang1129@163.com。

## Development and initial application of test devices for leakage of earth-rockfill dams

MA Zhaoyang, REN Jie, NAN Shenghao, XU Song

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To accurately simulate the seepage characteristics of earth-rockfill dams during leakage, a test device is developed. The device can precisely control the test variables such as platform slope, water supply discharge, water temperature, etc. The device can realize the automatic check of the flatness of the side wall and the bottom plate, the automatic control of the flow control system and the temperature control system, the water circulation of various water supply and suction combinations, and piecewise or linear temperature rise and drop control of the upstream reservoir water, dynamic monitoring of dam body temperature field, volume deformation and pore water pressure. A clay core wall rockfill dam is selected as the research object, and the leakage tests on earth-rockfill dams are conducted. The results show that the leakage will change the seepage field and temperature field of the dam body, causing the surrounding temperature value to change significantly. With the gradual downward movement of the leakage area, the temperature value at the location increases significantly, the fluctuation of the saturation line and the seepage rate of the dam also increase, and the adverse conditions affecting the seepage stability of the dam body gradually increase. The test device can accurately simulate the real situation of various working conditions and the influences of multiphysics coupling effects on the leakage occurrence and development process of earth-rockfill dams, and it can monitor the evolution of various physical fields in the leakage development process in real time, providing an effective technical tool for the in-depth study on the seepage characteristics of earth-rockfill dams.

**Key words:** earth-rockfill dam; leakage; test device; test method; temperature field; seepage field

## 0 引言

土石堤坝是一种常用挡水建筑物, 同时也是水利工程中最经济的重要坝型之一。但是, 在土石堤坝兴建初期, 由于勘探、设计、施工等技术水平的限制, 导致土石堤坝存在较多危机安全的质量问题<sup>[1-3]</sup>, 这些

质量问题使大量水库处于带病运行状态<sup>[4]</sup>。此外, 随

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379134); 陕西省科技创新团队项目(2022TD-01); 水利部水库大坝安全重点实验室开放基金项目(YK323001)

收稿日期: 2022-07-20

\*通信作者(E-mail: renjie@xaut.edu.cn)

着土石堤坝服役时效的推移, 造成水利工程事故的病害险情逐渐增加。彭铭等<sup>[5]</sup>按地质因素对水利工程事故诱因进行分类统计, 得出约半数的水利工程事故是由渗透破坏引起的。坝体渗透破坏会造成不可估计的严重后果, 而土石堤坝渗漏病险问题又会直接诱发坝体渗透破坏, 严重威胁着大坝安全。湖北通山的小湄港心墙土坝、浙江舟山的沈家坑均质土坝和新疆乌鲁木齐的联丰均质土坝等多个土石堤坝工程均因渗漏病险问题诱发坝体渗透破坏而造成严重事故。因此, 关于土石堤坝渗漏病险的试验研究至关重要。

土石堤坝渗漏病险的发生发展多数位于坝体内部, 隐蔽性较强, 如何准确探查渗漏病险是目前国内外多学者关心的关键科学问题之一。然而, 目前针对土石堤坝渗漏病险的试验研究手段或多或少存在一些局限性, 且针对不同试验条件各技术手段的适用性也不尽相同。比如, 结合传统渗漏监测法进行试验研究的常规试验手段及装置<sup>[5-9]</sup>, 虽具有操作简便、结构简单等优势, 但在进行室内试验时均是手动控制试验条件, 无法实现参数的精准调控, 监测时仅透过仪器壁面观察表面现象, 或者只通过埋设在模型中的点式传感器推测坝体内部的渗流行为, 此类装置很难实现整体式覆盖监测, 容易产生因部分区域漏检而存在安全隐患的情况。另外, 一些学者进行了土石堤坝渗漏病险的整体可视化试验及装置研究, Nguyen 等<sup>[10]</sup>结合 CT 技术研究了病险发展过程中土体内部孔隙结构的发展规律, 但其成本昂贵, 难以广泛应用; 孔纲强等<sup>[11]</sup>和梁越等<sup>[12]</sup>均将 PIV 技术应用于试验装置, 但 PIV 技术观测示踪粒子有限, 而无法实现土体内部细颗粒的整体运移观测; 谷敬云等<sup>[13]</sup>和 Hunter 等<sup>[14]</sup>均将平面激光诱导荧光技术应用于试验装置中并制备透明土模型, 开展土体内部可视化试验研究, 但装置成本昂贵, 透明土模型制备复杂, 且该装置对研究内容有一定的局限性。近些年, 一些学者<sup>[15-20]</sup>将温度监测考虑到试验装置中, 结合渗流热监测技术研究土石堤坝渗漏病险问题, 均取得了较好的效果。相比于常规及可视化试验手段而言, 运用渗流热监测技术的试验手段对异常渗流点更为敏感, 漏检率相对更低, 能够更加全面的反馈土石堤坝渗流状况及防渗性能<sup>[21-22]</sup>。Nan 等<sup>[15]</sup>将渗流热监测技术用于试验装置研发中并开展土石坝集中渗漏砂槽试验, 但采用的是点式温度传感器, 利用侧壁开孔的方式布设, 很难实现整体式覆盖监测, 且研发的试验装置局限性较强, 无法循环使用, 试验条件采用手动控制, 使得温度实际值与控制值之间存在一定的误差。区别于点式温度传感器的分布式光纤测温系统, 拥有可视化的监测界面、分布式的的信息采集等优势, 极大地提高了监测效率<sup>[23]</sup>。一些学者将该

系统用于试验装置研发中并开展研究, Su 等<sup>[24-25]</sup>为研究水利工程渗流速率监测方法, 基于分布式光纤测温系统研发试验装置并开展室内试验, 研究成果为渗流速率监测方法的开发提供了一种潜在的途径; Chen 等<sup>[26]</sup>为弥补传统渗流监测手段效率低的缺点, 设计了一种光纤温度传感与水热循环一体化试验装置, 并证明了装置的可行性; Ghafoori 等<sup>[19]</sup>采用无源分布式光纤测温系统实时监测了土石堤坝缩尺模型的渗流过程, 证明了该系统监测渗流过程的可行性; 王家琛等<sup>[20]</sup>采用主动加热光纤法进行了多层土的水分迁移毛细阻滞机理室内试验研究, 为土石堤坝的渗流微观监测提供了良好的思路。此类技术手段能够实现大范围快速连续分布式测温, 且监测精度和空间分辨率都处于较高水平, 但以上学者在装置研发中仅采用了分布式光纤测温系统, 而缺少装置本身的改进, 难以实现自变量的精准调控, 无法准确模拟各工况的真实情况, 使其实际值与控制值之间存在一定的误差。

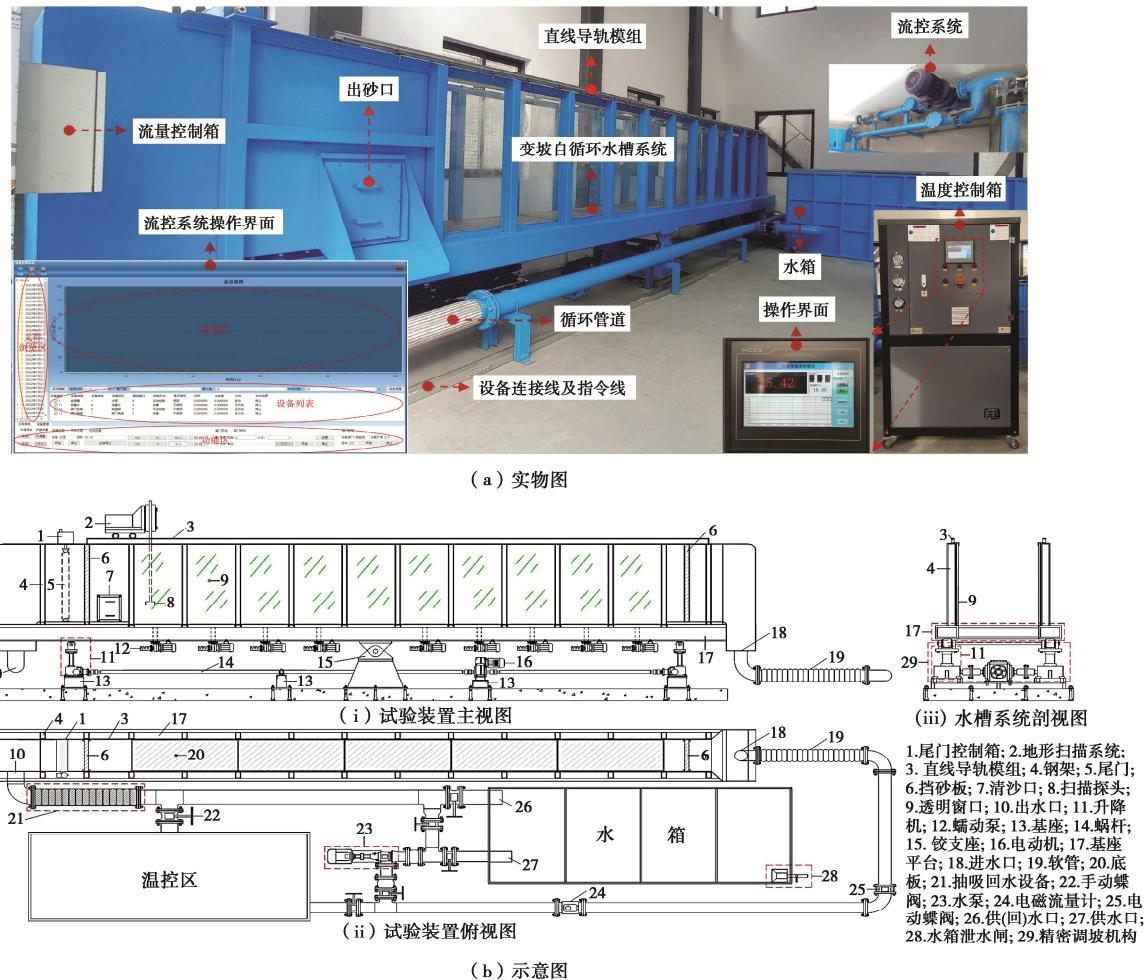
基于此, 本文将在诸多学者研究的基础上, 结合分布式光纤测温系统研制土石堤坝渗漏病险试验装置, 介绍试验装置的结构与功能、技术参数和特色所在, 并利用该装置开展土石堤坝渗漏病险试验研究, 分析土石堤坝渗漏病险发生发展过程中各工况对坝体内部流热双场的影响, 揭示各工况下坝体渗流运移规律, 为准确探查土石堤坝渗漏病险及监测与诊断提供坚实的依据, 为工程防汛抢险、除险加固及安全运行提供科学依据, 具有一定的学术价值和实践意义。

## 1 土石堤坝渗漏病险试验装置介绍

### 1.1 工作原理

研制的试验装置实物图如图 1 (a) 所示, 结合该装置开展的土石堤坝渗漏病险室内试验, 能够准确模拟各工况真实情况及多场耦合效应对土石堤坝渗漏病险发生发展过程的影响, 能够实时监测渗漏病险发展过程中各物理场演变情况。其工作原理示意图如图 1 (b) 所示, 主要包括变坡自循环水槽系统、流量控制系统、温度控制系统、数据采集与控制系统 4 大部分。

坝体中的流热双场是属于相互耦合的关系, 当坝体无隐患发生时只存在正常渗流, 此时渗流场与温度场均符合正常变化规律。但是, 当坝体一旦有隐患迹象发生或存在隐患区域时, 坝体必然会形成非稳定渗流, 介质中的水分运移会控制着坝体温度的分布, 并伴随着易监测数据的可视动态变化, 如坝体温度、孔压值和渗漏量等。基于已有的研究成果<sup>[15-17]</sup>, 可知坝体温度场对渗漏病险等隐患的响应较为敏感, 故该装置通过监测坝体温度场的异常变化来分析坝体渗流场的异常变化, 并辅以渗漏量和孔隙水压力, 则可反演



确定土石堤坝渗流特性。

在试验过程中, 利用温度控制系统在操作界面上按照工况要求设置相关参数, 保证输水温度的精确性, 实现温控、流控、水箱和水槽相结合的上游库水定温循环加热; 利用流量控制系统在操作界面上设置输水流量和定水位水循环相关参数, 保证输水过程平缓以减少水位波动的影响, 实现上游库水保持恒水位; 利用数据采集与控制系统实时监测坝体温度、孔隙水压力和渗漏量, 保证试验数据的连续性和精确性。

## 1.2 装置结构与功能

### (1) 变坡自循环水槽系统

变坡自循环水槽系统提供坝体模型堆积及数据采集与控制的场所, 是整个装置的试验区与监测观察区。该系统主要由基座平台、试验槽、人字形尾门、抽吸回水设备、精密调坡机构、直线导轨模组等部件组成。其中, 基座平台用于支撑及固定试验槽等部件; 试验槽为试验开展提供  $7\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1.2\text{ m}$  的试验空间及试验环境, 槽两壁安装透明窗口, 若采用透明土且结合染色示踪技术或激光诱导荧光技术进行试验, 可实

现对土石堤坝渗漏病险的可视化研究。试验槽采用边壁及底板精度可调技术, 可确保试验区长期处于高精度状态。试验槽下方配有精密调坡机构, 在两边壁正上方安装有直线导轨模组, 在前端分别设有进出水口, 前端进水口与流量控制系统相连, 后端出水口处依次设有人字形尾门和抽吸回水设备; 人字形尾门启闭精度小于  $1^\circ$ , 是该水槽稳水设施之一, 开始试验时待输水口进水稳定且满足试验需求时, 可通过调控尾门角度达到控制下泄流量的目的; 抽吸回水设备设在试验槽出水口侧下方的循环管道内, 外包裹着钢丝软管, 可对抽吸回水设备起保护作用。抽吸回水设备主要由自吸式离心泵等部件组成, 其入口通过法兰及回收软管与试验槽出水口相连, 出口通过管道与储水箱相连, 该设计可为水的抽吸回箱提供动力, 从而实现试验后水流的再利用, 达到节约用水的目的; 精密调坡机构采用数字化界面控制, 通过电机经由减速机连接一根水平轴带动升降机丝杠垂直升降的方式, 实现对水槽的升降调节, 进而实现水槽的变坡功能, 可进行滑坡坝的相关试验研究。精密调坡机构配备限

位装置, 既保证升降调节的精度和便捷, 也能有效地确保水槽整体的安全性; 直线导轨模组采用双滑动轨道模式, 轨道内空精度与高程精度均小于 1 mm, 其可使高性能地形处理系统在水平方向实现单自由度平移。

## (2) 流量控制系统

流量控制系统为变坡自循环水槽系统提供流量可调的低高速水流, 是试验开展的动力来源。该系统是由离心泵所在管路和蠕动泵所在管路相互并联组成, 其工作原理示意图如图 2 所示。干路管道上除设置离心泵外, 还设置手动蝶阀、电磁流量计、电动蝶阀、流量控制箱等部件。其中, 手动蝶阀作为干路输水管道的总开关, 设置在储水箱的紧后侧, 用于停止、调节和启动流量; 电磁流量计设置在离心泵出口端管道处, 用于监测管道输水流量, 并反馈信号给流量控制箱。同时, 参考电磁流量计读数, 可通过调节手动蝶阀, 实现输水流量的初步控制; 电动蝶阀设置在电磁流量计后侧管道处, 用于输水流量的再次调节, 起到精准校核的作用。与手动蝶阀相比, 电动蝶阀可通过配置的流量控制箱实现阀瓣角度的自动精确调整; 流量控制箱通过电路与电磁流量计和电动蝶阀相连, 电磁流量计测量输水流量后会反馈信号给流量控制箱, 之后流量控制箱会对电动蝶阀发出控制信号, 进而实现输水流量的精准校核。另外, 流量控制箱还经过变频器及电路与离心泵相连, 通过信号的反馈与控制, 可精准控制水泵转速, 实现过泵流量的精准调节。与干路管道相并联的蠕动泵管路共有 10 通道并联组成, 10 通道出水口均匀分布在试验槽底面处, 各通道即可进行单独作业, 也可同时进行作业, 并且可实现正反转连续工作。蠕动泵管路的并联设计可精准实现定水位的相关试验研究, 在试验时, 只需设置好干路定流量输水和蠕动泵定流量逆转抽水回箱, 根据两管路流量设置即可实现定水位操作。

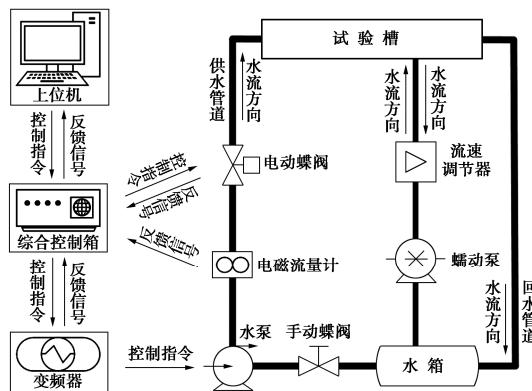


图 2 流控系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flow control system

## (3) 温度控制系统

温度控制系统可提供温度可调的冷热水源, 是采用渗流热监测技术和进行季节变化试验取得成功的必要条件。该系统制冷功率为 18 kW, 加热功率为 30 kW, 具备自动加热、降温和液位报警功能, 为试验提供一个冷热受控、温度均匀的液体环境。其机身外壳采用防老化静电喷塑技术, 内胆和台面采用优质 S304 拉丝不锈钢材质, 系统置入集成式 PID 自动温度控制程序, 内置精度 PT100 温度传感器 AAA 级, 配备液晶触摸式操控屏, 数显分辨率 0.1℃, 确保控温精准稳定。温度控制系统结合水箱及水槽, 可实现对试验模型的分级、线性循环加热升温和降温, 实现恒水温以及正弦式温度波动的相关试验研究。

## (4) 数据采集与控制系统

数据采集与控制系统可以实时监测坝体温度、体积变形和孔隙水压力等参数。该系统主要包括分布式光纤测温系统、孔隙水压力计、高性能地形扫描系统等。其中, 分布式光纤测温系统作为该试验装置的核心数据采集系统, 是利用光频域反射技术与光外差检测技术相结合的工作原理得到测点的信息, 其可以实现大范围快速连续分布式测温且监测精度和空间分辨率都较高, 用于实时监测坝体内部温度场变化, 进而反馈坝体渗流场变化情况; 孔隙水压力计可以实时监测坝体内部孔隙水压力变化情况, 与光纤测温系统联合使用, 相互补充, 相互对比验证; 高性能地形扫描系统提供土石堤坝体积变形、渗漏、管涌和溃坝等坝体破坏现象发生发展过程中坝体形貌的三维扫描图及定点数据。数据控制系统主要由温控系统和流控系统两部分组成。温控系统主要以 PID 为控制核心, 在试验时, 无需人工操作, 根据热负荷走动调节开机台数, 能够实现恒温输水和模拟 24 h 以内的正弦式温度变化输水模式, 且温度控制精度极高; 流控系统主要以流量控制箱为控制核心, 将离心泵、流量计、电动蝶阀、人字形尾门等部件一体化集成, 在同一操作界面上实现输水管路的切换及输水和下泄流量的监测与调节。

### 1.3 技术参数

装置主要技术参数如下: ①试验槽整体平整度为  $\pm 1\text{ mm}$ ; ②变坡高程精度为  $\pm 0.1\text{ mm}$ ; ③蠕动泵单通道流量为  $2\sim 700\text{ mL/min}$ ; ④蠕动泵转速为  $1\sim 100\text{ rpm}$ ; ⑤干路管道输水流量为  $2.5\sim 30\text{ L/s}$ ; ⑥干路管道流控精度为  $\pm 0.3\text{ L/s}$ ; ⑦目标流量调节时间为  $20\sim 60\text{ s}$ ; ⑧温控范围为  $5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ⑨温控精度为  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ⑩流量计为 0.5 级精度; ⑪变频器分辨率为  $0.01\text{ Hz}$ 。

### 1.4 装置特色

与国内外现有的同类试验装置相比较, 所研制的土石堤坝渗漏病险试验装置具有 5 个主要特色。

(1) 该试验装置为多功能水槽试验装置, 可控变量有平台坡度、尾门角度、输水流量、抽吸流量、供吸水组合方式和库水温度等。因此, 该试验装置研究内容丰富, 且能实现多种试验目的。

(2) 变坡自循环水槽系统采用边壁及底板精度可调技术和精密调坡技术, 可实现水槽试验区长期处于高精度状态。另外, 通过数字化的设置操作, 变坡自循环水槽系统可以自动化控制设备, 实现试验槽动态坡度自动调整, 从而进行滑坡坝的相关试验研究。

(3) 流量控制系统采用三反馈三调节模式, 即变频器、电磁流量计和电动蝶阀反馈信号, 手动蝶阀、离心泵和电动蝶阀流量调节, 能够确保输水流量的高度精确性。并且, 流控系统不仅可以实现上游库水的定水位及骤升与骤降模拟试验, 还可以实现多种供吸水组合方式。另外, 流控系统还可通过蠕动泵的抽吸功能实时收集试验过程中的坝体渗漏量。

(4) 温度控制系统具备温度自动控制程序, 可实现对试验模型的分级、线性加热升温和降温, 为试验提供一个冷热受控、温度均匀的液体环境。

(5) 流控系统与温控系统均具备程序运行功能, 搭载上人机交互界面, 在试验时, 无需人工操作, 可实现自动化控制。

## 2 试验装置的初步应用

该装置为多功能水槽试验装置, 初步应用是以土石堤坝渗漏病险试验为例。设计一种用于心墙热监测的分布式测量试验, 利用在试验槽中布设的动态数据采集系统来监测数据, 定量研究心墙内部存在渗漏病险区情况下的土石堤坝温度场和渗流场的时空变化响应规律。

### 2.1 试验设计

#### (1) 模型及材料参数

采用的坝体模型参照瀑布沟心墙土石坝给出, 并做适当修改, 使其更具普遍性。瀑布沟心墙土石坝上游坡度为 1:2, 下游坡度为 1:1.8, 坝高为 186 m, 坝顶宽为 14 m, 坝底宽为 780 m。大坝心墙部分主要由防渗体和反滤体组成, 心墙高为 184 m, 顶宽为 4 m, 底宽为 96 m, 上下游坡度为 1:0.25。根据相似比原理和试验装置尺寸, 将坝体模型的几何相似比  $n$  设为 300, 其缩尺模型剖面图如图 3 所示。缩尺模型为心墙堆石坝, 坝高为 64 cm, 坝底宽为 253.2 cm, 坝体上游的坡度比为 1:2, 下游的坡度比为 1:1.8, 心墙上、下游坡度比均为 1:0.25。坝顶如果严格按照几何相似比进行缩尺设计会导致宽度极小而难以填筑, 所以将坝顶宽度设为 10 cm, 使其更具合理性。

坝体由堆石区、过渡区、心墙区和病险区组成。其中, 堆石区土料主要起保护心墙的作用, 渗透系数较大, 故此次试验对其颗粒组成及级配情况不作严格要求; 过渡区和心墙区土料均采用英国马尔文公司研发的 MS3000 型激光粒度测定仪进行颗粒粒径测定; 病险区所用土料与过渡区相同, 通过透水纱布进行包裹来固定形状, 横截面为直径 2 cm 的圆型截面。根据颗粒粒度分布作出土料级配曲线如图 4 所示。另外, 试验过程中根据土工试验测定, 测得各分区土料参数如表 1 所示。

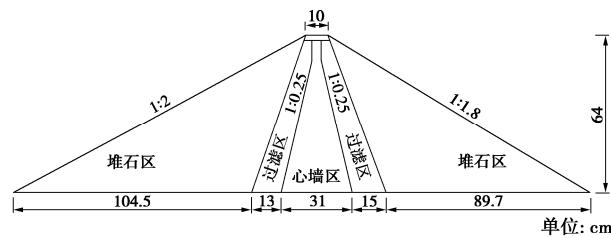


图 3 坝体模型剖面图

Fig. 3 Section view of dam model

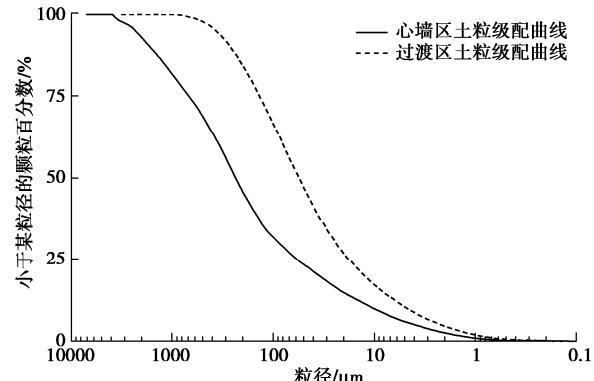


图 4 坝体模型土料级配曲线图

Fig. 4 Grain-size distribution curves of soils of dam model

表 1 各分区土料参数

Table 1 Parameters of soils in each area of dam body

坝体分区	渗透系数 $K/(m \cdot s^{-1})$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $w/\%$
堆石区	$4.71 \times 10^{-2}$	1.69	1.99
过渡区	$2.83 \times 10^{-5}$	1.79	6.87
病险区	$2.83 \times 10^{-5}$	1.79	6.87
心墙区	$5.16 \times 10^{-7}$	2.03	8.81

#### (2) 工况设置

为了研究心墙内部有渗漏病险存在情况下的坝体渗流特性, 试验共设置 4 组工况, 考虑了病险区位置对坝体温度场和渗流场的影响, 各工况设置详情如表 2 所示。关于入渗水温和入渗水头的设置, 考虑到自变量与因变量之间的响应关系, 通过控制变量法将试验中除病险区位置这一自变量以外会对因变量产生影响的因素保持相同设置且恒定, 即入渗水温设为

28℃, 入渗水头设为 55 cm。关于心墙渗漏病险区位置的设置, 考虑到模型尺寸和坝前水位设定, 坝体内部的孔隙水压波动范围较小, 将心墙渗漏病险区位置设定为距坝基 15, 30, 40 cm 处, 分别代表着低位、中位和高位处病险, 分析研究心墙不同位置处存在渗漏病险区的坝体渗流特性。另外, 考虑到环境温度对试验结果的影响, 本试验于 4 月—5 月在实验室内完成, 实验室房屋构架完善, 具有较好的防热防寒等功能, 室内温度约为 15~18℃, 且试验期间经测量每日的温度波动大致相同, 消除了环境温度差异较大对试验结果造成的影响。

表 2 各工况设置详情

Table 2 Setting details of each working condition

工况	入渗水温/℃	入渗水头/cm	距坝基高度/cm	备注
1	28	55	—	无病险
2	28	55	40	高位
3	28	55	30	中位
4	28	55	15	低位

## 2.2 试验方法

在进行坝体填筑时, 首先在试验槽边壁及底板上画出坝体剖面轮廓, 然后在所画轮廓处涂抹一层约 2 mm 厚的硅胶, 起到增大界面摩擦力的作用, 从而减小界面渗流。上述工作完成后, 为保证坝体各部分的各向同性, 由心墙向上下游两侧依次分层填筑相应土料时, 通过土样含水率和密度指标控制其余变量相对不变, 即每次填筑均采用未使用过的同批原材料, 且严格按照所测含水率和密度进行分层土料称重, 确保每层的填筑土量均符合称重要求。仪器的布设和坝体填筑是同步进行的, 在坝体填筑过程中, 将测温光纤、光纤光栅温度计和孔隙水压力计分别布置在所预定的位置, 仪器布设图如图 5 所示。其中, 测温光纤用于监测坝体温度分布, 各测点温度用 T 表示; 光纤光栅温度计共埋设 2 个, 分别位于测温光纤的两端, 距离坝底面均为 5 cm, 用于校核光纤测温的准确性; 孔隙水压力计共埋设 13 个, 分别位于坝底处和距坝底 15, 30, 40 cm 心墙中心线位置处, 用于监测坝体浸润线分布情况及心墙内部不同位置处孔隙水压力变化情况, 各测点孔隙水压力用 CH 表示。待坝体填筑完成后, 在坝体下游试验槽卡口处插入挡水板, 以便通过蠕动泵自动回收渗漏水量来实时监测试验过程中的坝体渗漏量。坝体填筑模型图如图 6 所示。

坝体填筑及仪器布设全部完成且静置 24 h 后, 要进行设备调试及参数设置, 以确保室内试验能够顺利进行, 且保证试验监测数据的可靠性。主要包括: 温控系统采用恒温循环加热模式, 恒温参数设为 28℃; 干路管道采用自动输水模式, 输水流量设为 2.5 L/s; 蠕动泵供吸水单通道流量设为 300~600 mL/min; 光

纤采集系统采用自动监测及记录模式, 采集频率设为 2 次/min, 测量精度设为 2 mm; 光纤光栅温度计采用自动监测及记录模式, 采集频率设为 2 次/min; 孔隙水压力计采用自动监测及记录模式, 采集频率设为 10 次/min; 渗漏量采用蠕动泵自动抽吸模式进行实时采集, 并用天平称重, 每次记录间隔 6 min, 采集时长与孔隙水压力监测时长保持一致。

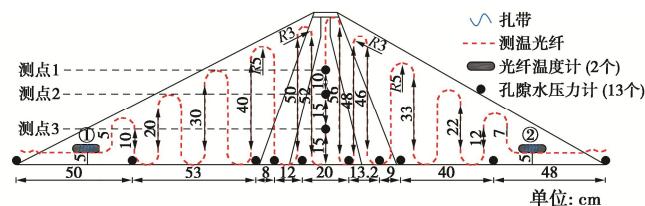


图 5 仪器布设图

Fig. 5 Layout of instruments

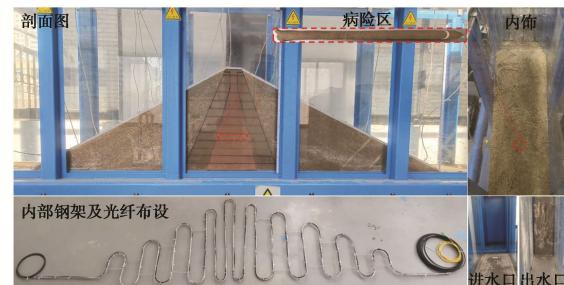


图 6 坝体填筑模型图

Fig. 6 Dam body model

## 3 试验结果与分析

### 3.1 光纤测温校核

对比光纤光栅温度计和所埋设位置处的光纤测温结果, 用于校核光纤测温的准确性。以工况 1 为例, 结果如图 7 所示, 两种监测方法的测温结果具有较强的吻合性, 一致性极其可观, 故测温光纤能够较为准确地监测坝体温度分布且精度较高, 确保了数据监测的可靠性。

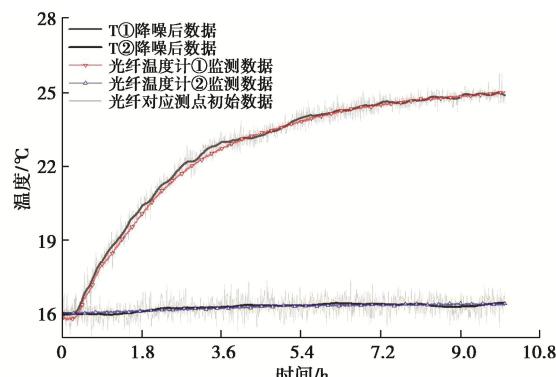


图 7 光纤光栅温度计与光纤测温结果对比图

Fig. 7 Comparison of results of fiber grating thermometer and fiber temperature measurement

### 3.2 瞬态温度场的响应

同一时刻各工况坝体温度分布云图对比详情如图 8 所示。工况 1 无渗漏病险区时 (图 8 (a)), 坝体温度场由上游库水逐渐过渡到坝体内部, 等温线无异常且变化均一; 工况 2~工况 4 存在渗漏病险区时 (图 8 (b)~8 (d)), 坝体左侧温度与工况 1 相比更接近上游库水水温, 且上游库水会通过病险区进入下游非饱和区, 从而使整个病险区及周围的温度发生由大到小的递减变化。随着渗漏病险区的位置下移, 坝体温度场的空间分布将发生变化, 其所在区域的温度值显著升高, 且温度向后传递更加明显。

从图 8 可以看出, 当坝体无渗漏病险区时, 坝体温度分布无异常现象, 且心墙区温度与环境温度较为接近, 约为  $16.5^{\circ}\text{C}$ ; 而坝体存在渗漏病险区时, 病险区会改变坝体温度场的时空分布, 成为非稳定渗流的优势通道。

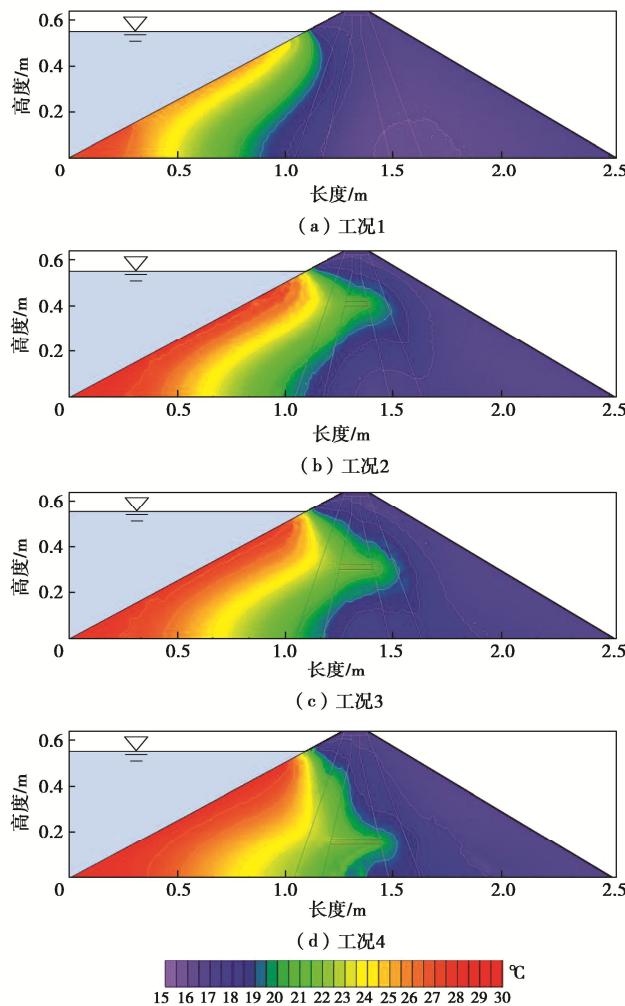


图 8 各工况坝体温度分布云图

Fig. 8 Cloud map of temperature distribution of dam under various working conditions

心墙区孔隙水压力计所在位置处的温度时序曲线 (图 9) 和心墙中心线的温度变化曲线 (图 10) 可有

效反映出坝体渗漏病险发生时间点与发生位置。工况 1 无渗漏病险区时, 各测点的温度时序曲线变化较为平缓无异常突变点; 工况 2~工况 4 存在渗漏病险区时, 病险所在位置测点的温度时序曲线与工况 1 同测点相比均出现温度快速抬升且持续升温现象, 在同一监测时间点下, 各工况心墙中心线温度变化曲线与工况 1 相比均出现异常突变点。相比之下, 在渗漏病险区存在且水力条件相同时, 高位病险处温度 ( $T_{\text{高位}}$ ) 率先升高, 中位病险处温度 ( $T_{\text{中位}}$ ) 次之。但随着时间的推移, 最终结果与初始升温点成反比, 与水压成正比, 表现为  $T_{\text{低位}} > T_{\text{中位}} > T_{\text{高位}}$ 。

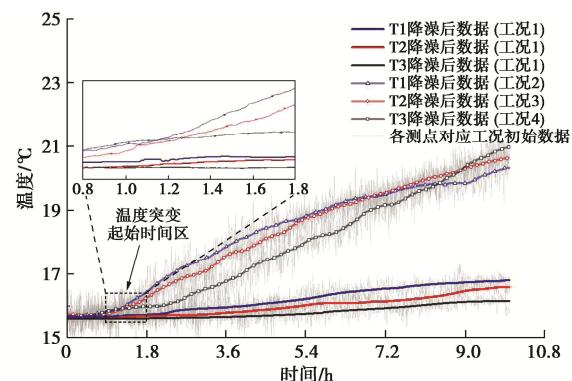


图 9 不同工况下温度监测结果

Fig. 9 Monitoring results of temperature under different working conditions

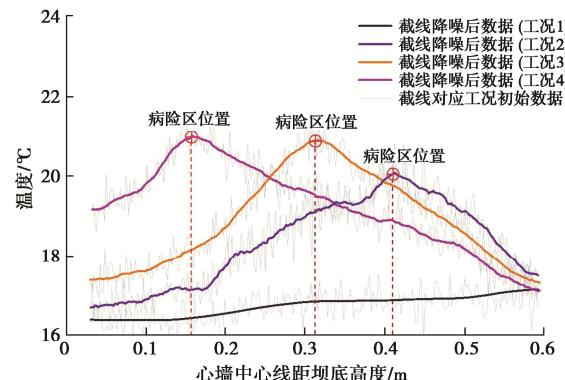


图 10 各工况心墙中心线监测结果

Fig. 10 Monitoring results of center line of core wall under various working conditions

坝体温度场对渗漏病险等隐患的响应较为敏感, 温度时序曲线的异常波动点能有效反映出渗漏病险发生时间点; 光纤整体测温曲线能精确定位发生突变的测点位置, 从而确定渗漏病险发生位置。

综上所述, 渗流场的变化会引起坝体温度场的变化, 土石坝的光纤测温资料所表现出的分布式与连续式, 可体现出坝体温度场的时空分布特征, 进而反演出渗流场的时空分布, 可精确定位渗漏病险发生的时间点及发生位置。另外, 根据光纤光栅温度计及测温

光纤监测资料可有效反映出温度控制系统结合水箱及水槽所实现的上游库水定水温循环加热的可行性。

### 3.3 坝体渗流场的响应

不同工况下心墙区孔隙水压力监测结果(图 11)可对相应工况下温度监测结果进行有效的验证与补充。各工况下孔隙水压力值随着时间的增加逐渐抬升并趋于稳定, 主要表现为启动期、快速抬升期、缓慢增长期和稳定期。工况 1 无渗漏病险区且达到稳定期时, 得到 CH1, CH2, CH3 的孔隙水压力值分别为 1.21, 1.66, 2.52 kPa。此工况下坝体渗漏发生时间约为 50 min, 随时间变化的单宽渗漏速率曲线(图 12)无明显的异常波动现象, 整体变化较小, 且在水入渗约 95 min 后便达到稳定。渗漏量监测约 2.7 h 后停止监测, 经测算工况 1 条件下坝体渗漏量最小, 平均渗漏量为 3.21 L/h; 工况 2, 3, 4 存在渗漏病险区时, 病险所在位置测点的孔隙水压力值与工况 1 同测点相比均出现增大现象, 分别为 1.37, 1.98, 2.93 kPa, 同时各测点的孔隙水压力值由 0 开始升高的时间提前, 即启动期缩短, 这与相同测点的温度时序曲线变化规律相对应。此工况下坝体渗漏发生时间与工况 1 相比均有所提前, 且 3 种工况的渗漏发生时间相差不大, 随时间变化的单宽渗漏速率曲线均出现异常且快速抬升现象, 在水入渗约 130 min 后基本达到稳定, 但 3 种工况的单宽渗漏速率在达到稳定时数值则不相同, 表现为: 工况 4>工况 3>工况 2。待停止监测时, 经测算在渗漏病险作用下坝体渗漏量会显著增大, 平均渗漏量分别为 7.66, 8.52, 9.02 L/h。若以工况 1 无渗漏病险情况为基础, 工况 2~工况 4 的平均渗漏量增幅分别为 138.6%, 165.4%, 180.9%, 相比之下, 工况 4 的平均渗漏量增幅最大, 分别是工况 2 和工况 3 的 1.31 倍和 1.10 倍, 此时坝体更趋于不稳定。

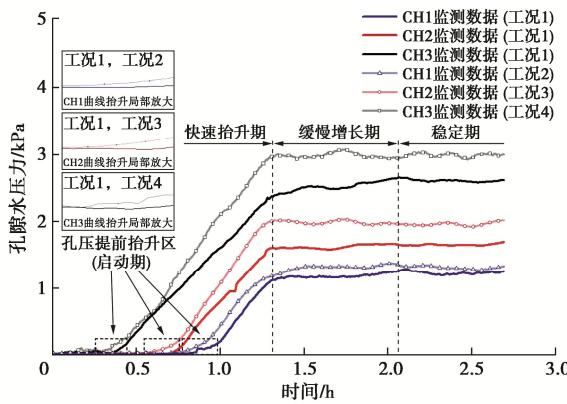


图 11 不同工况下孔隙水压力监测结果

Fig. 11 Monitoring results of pore water pressure under different working conditions

坝体在渗漏病险作用下各测点的孔隙水压力值虽呈现不同的变化规律, 但与无渗漏病险区相比均出现

抬升现象, 且越靠近心墙底部, 抬升越明显, 其监测资料可对温度监测起到较好的验证及补充作用, 相比之下, 温度变化较为明显; 渗漏病险区域的存在会使坝体渗漏量显著增加, 并且渗漏病险区下移坝体渗漏速率会随之增大, 使影响坝体渗流稳定性的不利因素逐渐增强。

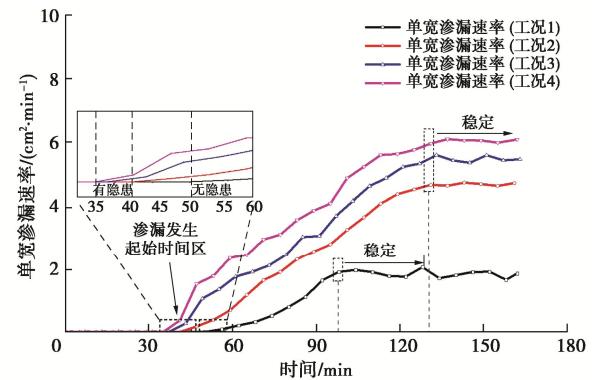


图 12 不同工况下坝体单宽渗漏速率时序曲线

Fig. 12 Variation of single-width leakage rate of dam body with time under different working conditions

同一时刻各工况坝体浸润线监测结果如图 13 所示。工况 1 无渗漏病险区时, 心墙上游区水头基本接近库水水位, 水流经心墙时, 在防渗体的低渗透性作用下心墙水头会急剧降低, 而心墙下游区渗透系数较大, 水头会随着渗流路径而变平缓; 工况 2~工况 4 存在渗漏病险区时, 渗漏病险所在区域会形成非稳定渗流的优势通道, 以工况 1 无渗漏病险区为基础, 工况 2~工况 4 的浸润线波动值分别为 0.0805, 0.0951, 0.12 m, 数值大小表现为工况 4 波动>工况 3 波动>工况 2 波动, 其波动情况与渗漏量呈正相关关系。

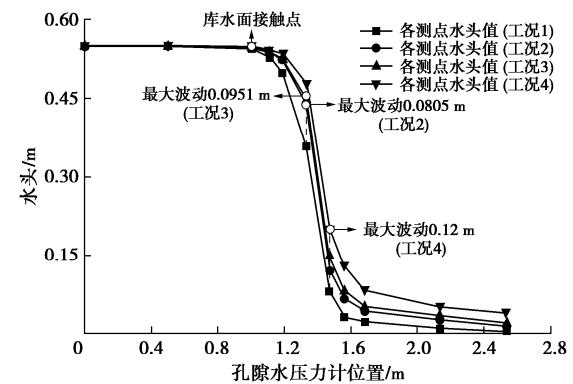


图 13 各工况浸润线监测结果

Fig. 13 Monitoring results of infiltration line under various working conditions

综上所述, 渗漏病险区的存在会改变坝体渗流场, 且越趋于心墙底部, 渗流场变化越明显, 坝体渗流越趋于不稳定, 这与温度监测所呈现的规律相对应, 但相比之下, 温度变化较为明显。因此, 孔压监测资

料可对温度监测起到较好的验证及补充作用。另外,如图 11 所示,各工况下孔压时序曲线无大幅度上下波动现象,说明流量控制系统在输水及维持定水位过程中并未造成水位上下波动现象,能够确保输水流量的高度精确性,可精准实现定水位的相关研究。

## 4 结 论

本文基于土石堤坝渗漏病险发生机理及其监测方法,研制了一种土石堤坝渗漏病险试验装置,并以黏土心墙堆石坝为研究对象,开展了渗漏病险不同位置状态下土石堤坝流热耦合试验研究,得到 4 点结论。

(1) 该装置能够准确模拟各工况真实情况以及多场耦合效应对土石堤坝渗漏病险发生发展过程的影响,能够实时监测基于各工况作用下的渗漏病险发展过程中各物理场演变情况,是一种可有效研究土石堤坝渗流特性的试验工具。

(2) 该装置为多功能水槽试验装置,能实现多种试验目的。变坡自循环水槽系统可实现边壁及底板平整度的自动校核和试验槽动态坡度自动调整;流控系统可实现多种供吸水组合方式的水循环,以及上游库水的定水位和骤升与骤降模拟试验,并可以实时收集试验工程中的坝体渗漏量;温控系统可实现对输水温度的自动精确控制,为试验提供一个冷热受控、温度均匀的液体环境;数据采集与控制系统可实时监测坝体温度场、体积变形和孔隙水压力变化等。

(3) 渗漏病险区会成为非稳定渗流的优势通道,造成坝体浸润线发生 0.0805~0.12 m 的波动情况,导致病险区附近的温度发生显著变化,同时病险区的存在会使坝体渗漏速率显著提升。因此,通过坝体温度场与渗漏量的变化,辅以孔压值对比验证,可有效判断心墙质量是否存在。

(4) 随着渗漏病险区下移,其所在位置处的温度增值最为显著。病险区越靠近坝基,浸润线和渗漏速率变化越大,若以高位病险为基础,低位病险与中位病险增值的比值分别为 2.71 倍,1.58 倍。相比之下,低位病险状况下的坝体渗流更趋于不稳定。因此,在坝体设计及运行过程中,要严格控制心墙中病险的位置和数量,着重把控好距坝基较近位置处病险的发生及延展。另外,结合(3)的规律通过温度值的变化,可准确定位坝体渗漏病险发生位置及时间点。

本文对心墙不同位置处存在渗漏病险状况下的坝体渗流特性进行了初步研究,定性及定量描述了渗漏病险发生条件下各物理场演变规律。后续将开展病险从无到有的整个发展过程、不同水力条件、病险类型以及季节响应下的多场耦合试验研究,最终实现对坝

体病险发生、发展过程的实时及准确监测与预报。

## 参 考 文 献:

- [1] SALMASI F, NOROUZI R, ABRAHAM J, et al. Effect of inclined clay core on embankment dam seepage and stability through LEM and FEM[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, **38**(6): 6571-6586.
- [2] 苏怀智, 周仁练. 土石堤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, 39. (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, 39. (in Chinese))
- [3] SCHMITZ V, ERPICUM S, EL KADI ABDERREZZAK K, et al. Overtopping-induced failure of non-cohesive homogeneous fluvial dikes: effect of dike geometry on breach discharge and widening[J]. Water Resources Research, 2021, **57**(7): 029660.
- [4] 钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利学报, 2019, **50**(1): 38-52, 61. (ZHONG Denghua, SHI Mengnan, CUI Bo, et al. Research progress of the intelligent construction of dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(1): 38-52, 61. (in Chinese))
- [5] 彭铭, 毕竟超, 朱艳, 等. 存在高渗透区的黏土心墙土石坝渗流稳定性分析[J]. 水利学报, 2020, **51**(11): 1347-1359. (PENG Ming, BI Jingchao, ZHU Yan, et al. Seepage stability analysis of earth and rockfill dam with clay core by considering high permeability zones[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(11): 1347-1359. (in Chinese))
- [6] DONG H Z, CHEN J S, LI X Y. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests[J]. Engineering Geology, 2016, **212**: 136-145.
- [7] RATIAT A, KHETTAL T, MEDDI M. The piezometric and isotopic analysis of leaks in earth dams: the case of the fountain of Gazelle Dam, Biskra, Algeria[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, **79**(6): 138.
- [8] LUO Y L, NIE M, XIAO M. Flume-scale experiments on suffusion at bottom of cutoff wall in sandy gravel alluvium[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(12): 1716-1727.
- [9] ROCHIM A, MAROT D, SIBILLE L, et al. Effects of hydraulic loading history on suffusion susceptibility of cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, **143**(7): 04017025.
- [10] NGUYEN C D, BENAHMED N, ANDÒ E, et al. Experimental investigation of microstructural changes in

- soils eroded by suffusion using X-ray tomography[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(3): 749-765.
- [11] 孔纲强, 孙学谨, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. 水力学报, 2017, **48**(11): 1303-1310. (KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LIU Hanlong, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(11): 1303-1310. (in Chinese))
- [12] 梁越, 陈鹏飞, 林加定, 等. 基于透明土技术的多孔介质孔隙流动特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1361-1366. (LIANG Yue, CHEN Pengfei, LIN Jiading, et al. Pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(7): 1361-1366. (in Chinese))
- [13] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1287-1296. (GU Jingyun, LUO Yulong, ZHANG Xingjie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, **40**(6): 1287-1296. (in Chinese))
- [14] HUNTER R P, BOWMAN E T. Visualisation of seepage-induced suffusion and suffosion within internally erodible granular media[J]. *Géotechnique*, 2018, **68**(10): 918-930.
- [15] NAN S H, REN J, NI F, et al. Heat tracing of embankment dam leakage: laboratory experiments and 2D numerical modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **608**: 127663.
- [16] 王新建, 潘纪顺. 堤坝多集中渗漏通道位置温度探测研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1800-1805. (WANG Xinjian, PAN Jishun. Location detection of concentrated-leakage passages in dam by groundwater temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(11): 1800-1805. (in Chinese))
- [17] 谷艳昌, 王士军, 庞琼, 等. 土坝温度场反馈渗流场可行性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1721-1726. (GU Yanchang, WANG Shijun, PANG Qiong, et al. Feasibility of temperature field feeding back seepage field for earth dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(9): 1721-1726. (in Chinese))
- [18] CUONG B Q, ZHOU Y H, ZHAO C J. Seepage evaluation in embankment dam based on short-term temperature observation and heat injection[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **21**(26):10493-10506.
- [19] GHAFOORI Y, MAČEK M, VIDMAR A, et al. Analysis of seepage in a laboratory scaled model using passive optical fiber distributed temperature sensor[J]. *Water*, 2020, **12**(2): 367.
- [20] 王家琛, 朱鸿鹄, 王静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(1): 147-155. (WANG Jiachen, ZHU Honghu, WANG Jing, et al. Laboratory model tests on capillary barrier infiltration using actively heated fiber optic method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(1): 147-155. (in Chinese))
- [21] SMITH M, KONRAD J M. Analysis of the annual thermal response of an earth dam for the assessment of the hydraulic conductivity of its compacted till core[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **45**(2): 185-195.
- [22] GHAFOORI Y, VIDMAR A, ŘÍHA J, et al. A review of measurement calibration and interpretation for seepage monitoring by optical fiber distributed temperature sensors[J]. *Sensors*, 2020, **20**(19): 5696.
- [23] 何斌, 徐剑飞, 何宁, 等. 分布式光纤传感技术在高面板堆石坝内部变形监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(3): 627-633. (HE Bin, XU Jianfei, HE Ning, et al. Application of distributed optical fiber sensing technology in internal deformation monitoring of high face rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(3): 627-633. (in Chinese))
- [24] SU H Z, TIAN S G, CUI S S, et al. Distributed optical fiber-based theoretical and empirical methods monitoring hydraulic engineering subjected to seepage velocity[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, **31**: 111-125.
- [25] SU H Z, CUI S S, WEN Z P, et al. Experimental study on distributed optical fiber heated-based seepage behavior identification in hydraulic engineering[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, **55**(2): 421-432.
- [26] CHEN J A, CHENG F, XIONG F, et al. An experimental study: Fiber Bragg grating-hydrothermal cycling integration system for seepage monitoring of rockfill dams[J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, **16**(1): 50-61.