

中文引用格式:金晨晨,丁勇,李登华.基于感渗结构的土工膜等效渗流孔径判别方法[J].中国安全科学学报,2026,36(2):145-152.

英文引用格式:JIN Chenchen, DING Yong, LI Denghua. Equivalent permeation aperture identification method for geomembranes based on seepage-sensing structure[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 145-152.

基于感渗结构的土工膜等效渗流孔径判别方法^{*}

金晨晨¹, 丁勇^{**1}副教授, 李登华^{2,3}高级工程师

(1 南京理工大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210024)

中图分类号:X948

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0588

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3210703);国家自然科学基金长江水科学研究联合基金资助(U2240221);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(Yk325002, Y724011)。

【摘要】 为提高抽水蓄能水库渗流监测水平,针对土工膜孔径破坏引起的渗流,提出一种基于感渗结构与等效渗流孔径的土工膜孔径破坏渗流判别方法。首先,通过主动加热的方式得到干湿差温升值,将干湿差温升值与渗流速度归一化后进行对数线性拟合;然后,将渗流速度与等效渗流孔径进行线性拟合,通过现场标定试验并结合分布式光纤(DTS)曲线特征反演渗流情况;最后,开展室内试验进行验证。结果表明:等效渗流孔径的干湿差温升拟合优度 R^2 均超过0.96,且渗流速度均小于5%。室内试验与数值模拟温升值的残差86%位于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内;渗流速度均小于5%,证明数值模拟结果的可靠性。

【关键词】 土工膜; 渗流孔径; 感渗结构; 渗流判别; 数值模拟

Equivalent permeation aperture identification method for geomembranes based on seepage-sensing structure

JIN Chenchen¹, DING Yong¹, LI Denghua^{2,3}

(1 School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China; 2 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu 210029, China; 3 Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Nanjing Jiangsu 210024, China)

Abstract: To improve the seepage monitoring level of pumped storage reservoirs, a discrimination method was proposed for seepage caused by geomembrane aperture damage, based on a seepage-sensing structure and the concept of an equivalent seepage aperture. First, the temperature rise difference between dry and wet conditions was acquired through active heating, and a logarithmic linear fit was performed after normalizing the temperature rise difference with respect to the seepage velocity. Then, a linear fit was established between the seepage velocity and the equivalent seepage aperture. The seepage condition was inferred based on field calibration tests combined with the characteristics of distributed temperature sensing

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)02-0145-08; 收稿日期:2025-09-14; 修稿日期:2025-12-16

^{**} 通信作者:丁勇(1977—),男,江苏海安人,博士,副教授,主要从事大坝结构健康监测领域方面的研究。E-mail: 12005048@njtu.edu.cn。

(DTS) curve. Finally, laboratory tests were conducted for validation. The results show that the goodness-of-fit (R^2) between differential temperature and the equivalent seepage aperture exceeds 0.96, and the relative error of seepage velocity is below 5%. 86% of the residuals between experimental and simulated temperature rise values fall within $\pm 1^\circ\text{C}$, and the relative error of seepage velocity also remains below 5%, demonstrating the reliability of the simulations.

Keywords: geomembrane; seepage aperture; seepage-sensing structure; seepage identification; numerical simulation

0 引言

抽水蓄能水库对电力调节、电力系统运行优化和可再生能源消纳等方面具有重要作用。目前,我国已经建成并投入使用的抽水蓄能电站数量庞大,是世界上水库最多的国家^[1]。然而,抽水蓄能水库渗漏问题不仅会影响水库本身的蓄水能力与运行效率,还可能导致环境污染、结构破坏和社会安全风险;其对水库的长期安全性、电力供应的稳定性、周边环境的保护以及水资源的可持续利用产生危害。因此,及时发现、准确定位和修复渗漏问题是确保抽水蓄能水库安全运行和促进能源系统可持续发展的关键。

然而,传统的渗漏监测方法,如渗压计^[2]、测压管^[3]和量水堰^[4]等,存在精度低、空间分布不均和实时性差等缺点,难以满足现代水库管理对高效、全面和精准的要求。随着科学技术的不断进步,基于光纤传感技术^[5](Distributed Temperature Sensor, DTS)的渗漏监测逐渐成为研究的热点。BEKELE等^[6]通过物理和数值建模,证明了利用DTS检测渗流异常的实用性;GHAFOORI等^[7]使用无源DTS系统实现了实验室规模的渗流连续监测;汪东风^[8]设计室内试验,将光缆放入不同含水率砂土和混合土中加热,通过拟合得到环境特征值 K 反映温度变化;尹祥等^[9]基于土体热传导原理,提出反映光缆温升值 ΔT 与加热时间 t 关系的温度临界特征值 f ,借助拟合 f 值监测并反演不同土质的含水率值;JIANG Chen等^[10]提出一种用于混凝土坝面堆石坝渗漏监测的温度示踪法,并设计一种集成点热源阵列和温度传感器阵列的渗漏监测方案,通过人工拉动监测电路改变测点位置,实施多次重复测量,降低了自动化水平;李红涛^[11]通过室内渗流场监测试验,建立光纤温度变化值与渗流流速关系模型,验证了应用光纤定量监测渗流的可行性。

土工膜缺陷是导致土工膜防渗水库渗流的重要因素,廖志彬等^[12]将土工膜在生产、运输、铺设施工及水库运营等方面作为土工膜缺陷产生的随机条

件,进而提出土工膜缺陷出现概率30%是孔径为1、2、3 mm的孔洞,出现概率5%的是孔径为5、10 mm的孔洞;NOSKO等^[13]利用电弧测试法和偶极子法联合工作,实现了对施工期和运行期土工膜缺陷的探测;韩瑞晨^[14]通过室内试验和数值模拟总结分析土工膜在不同的缺陷面积、缺陷形状、缺陷尺寸、缺陷位置、缺陷个数和上覆水头的情况下缺陷渗流量的变化特征。

综上所述,现有研究尚存在以下不足:①通过含水率反演方法的研究大部分仍局限于静态试验,对实际动态渗流情况的适用性缺乏说服力;②利用铠装光缆定量研究渗流的方法在低流速渗流条件下的响应不敏感性尚未被充分考虑,限制了其实际监测效果;③对于土工膜缺陷感知,偶极子法对膜下导电环境要求高,易受上覆层厚度和导电性影响,且当前研究在土工膜微小缺陷引发的渗流定量识别与早期预警方面存在明显不足。

鉴于此,笔者拟设计基于多孔柔性外护套的感渗结构,针对土工膜不同孔径破坏提出基于最大干湿差温升 T_{dmax} 和等效渗流孔径 d_e 的土工膜孔径破坏的渗流判别方法,通过数值模拟与室内试验验证感渗结构的敏感性与渗流判别方法的可行性,以期对抽水蓄能水库渗流监测提供科学指导。

1 基于DTS系统的渗流判别方法

1.1 基于DTS的测渗原理

当多孔介质内部完全干燥时,光纤和多孔介质之间的热量传递主要以热传导方式进行。当多孔介质发生渗流时,传热机制也变得复杂,此时不仅需要考虑光纤和多孔介质之间的热传导,还需要考虑渗流水的热对流和渗流水与光纤之间的热传导;因此,当渗流发生时,多孔介质的温度与完全干燥时相比有明显差异,这种温度差异可以通过分布式测温光纤体现在DTS系统上,这种直接测量光纤所处环境温度方法称为梯度法^[15],当光纤所处环境有明显温度差异时,该方法可精确定位渗流位置。然而,当

多孔介质内部环境温度与水温相近时,温度差异难以体现出来,梯度法也就难以应用。因此,需要主动加热光纤所处的局部环境,以提高环境温度与渗流水温的差异,这种方法称为热脉冲法,目前主要通过额定功率的加热导线加热光纤所处的局部环境。

1.2 新型感渗结构

提出一种新型感渗结构,该结构以钢管为支撑,用磁吸式卡扣将光纤与加热导线固定在钢管上,再用多孔纱布将加热导线和分布式光纤包覆,结构截面如图 1 所示,纱布需采用透水不透砂的材质。这种设计沿用了集成式光缆的结构设计,不仅提高加热导线的加热效率,还利用纱布的吸水特性,极大地提高了光纤的渗流敏感性。

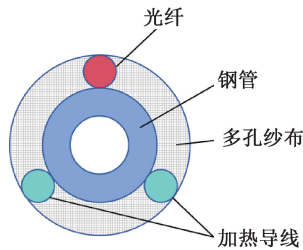


图 1 感渗结构

Fig. 1 Seepage-Sensing structure

1.3 土工膜孔径破坏渗流判别方法原理

加热感渗结构 30 min 后,干燥土体与局部饱和土体内的测点温升曲线如图 2 所示。

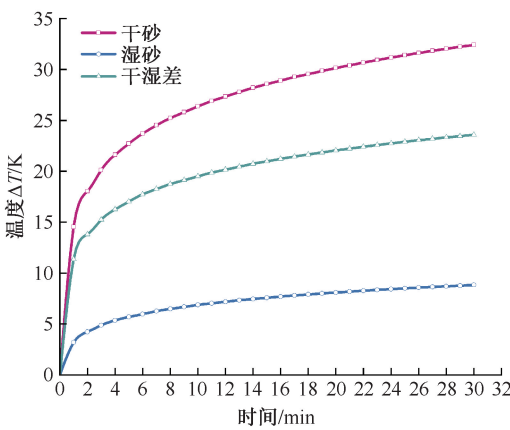


图 2 干湿差温升曲线

Fig. 2 Dry-wet differential temperature curve

定义干湿差温升为干燥土体温升值减去局部饱和土体内的测点温升值,得到干湿差温升值 T_d ,定义 T_{dmax} , T_{dmax} 与渗流流速通过对数函数拟合,如下式:

$$T_{dmax} = \max(T_y - T_w) \quad (1)$$

$$\ln v^* = a + b \ln T_{dmax}^* \quad (2)$$

式中: T_y 为干砂温升值, K; T_w 为湿砂温升值, K; v^* 和 T_{dmax}^* 分别为 v 与 T_{dmax} 除以 1 mm 工况条件下对应数值的归一化处理结果,无量纲; a 、 b 为回归系数,可由拟合式 (2) 得出,同一工况条件下 a 、 b 值不变。

对于土工膜孔径破坏定义等效渗流孔径 d_e ,土工膜孔径破坏主要分为集中型与分散型,其加热 30 min 时 DTS 曲线如图 3 所示。集中渗流与分散多孔渗流的 DTS 曲线分别为尖峰型、平台型。集中型分为集中单孔与集中多孔,分散型为分散多孔。单孔渗流的等效孔径即为单孔自身孔径;集中多孔渗流较为密集,容易形成合流效应,因此,可等效为与其有相同渗流面积的单孔渗流,等效单孔的直径为 d_e ,土工膜孔径破坏大都为小孔径,因此, d_e 大于经验阈值时可判断为多孔渗流;分散多孔渗流由于分散性,各个渗流孔相对独立,以其平均孔径为 d_e 。数值模拟与室内试验结果表明: v 与 d_e 呈明显的线性关系,用下式进行拟合:

$$v = k d_e + m \quad (3)$$

式中 k 、 m 为回归系数,可由拟合式得出,同一工况条件下 k 、 m 值不变。

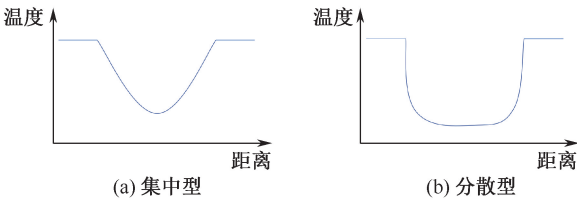


图 3 DTS 渗流曲线特征

Fig. 3 Features of DTS seepage curves

图 4 为土工膜孔径破坏渗流判别流程,通过现场标定试验得到 v 与 T_{dmax} 归一化后的对数线性拟合曲线和 v 与 d_e 的线性拟合曲线,在获取各测点得到 T_{dmax} 后通过拟合曲线反演出各测点的 v 与 d_e ,结合 DTS 温升曲线特征与 d_e 是否大于阈值即可判断土工膜孔径破坏情况。

2 土工膜孔径破坏流热耦合数值模拟试验

通过 Comsol Multiphysics 软件建立数值模型,验证渗流判别方法的有效性,试验工况见表 1,其中,集中多孔孔洞均匀分布在土工膜中心 10 cm×10 cm 的区域内,分散多孔孔洞均匀分布在整个土工膜上。

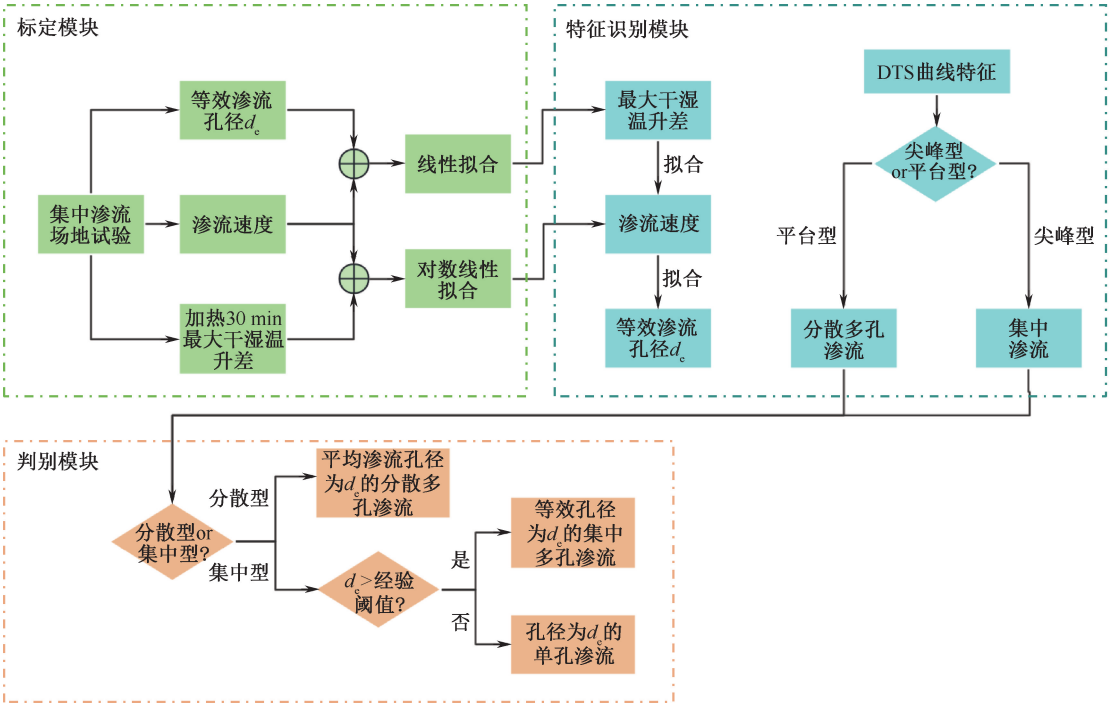


图 4 土工膜孔径破坏渗流判别流程

Fig. 4 Flowchart of seepage identification for geomembrane aperture failure

表 1 土工膜破坏渗流试验工况

Table 1 Test conditions for geomembrane failure seepage

破坏形式	工况	渗流孔径/mm	渗流孔数量	d_e /mm
单孔渗流	1	1	1	1
	2	3	1	3
	3	5	1	5
	4	7	1	7
	5	15	1	15
集中多孔渗流	6	1	225	15
	7	3	25	15
	8	5	9	15
分散多孔渗流	9	1	225	1
	10	3	25	3
	11	5	9	5
干砂	12	—	—	—

2.1 渗流场-温度场耦合方程

饱和状态下的渗流场采用达西定律^[16]描述,考虑其重力影响,其瞬态渗流场方程如下式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (4)$$

$$u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g) \quad (5)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子; ε_p 为多孔介质孔隙率; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; u 为水的流速, m/s ; Q_m 为质

量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; k 为渗透率, m^2 ; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

温度场采用多孔介质传热接口,其瞬态对流-扩散-热传导方程如下式:

$$(\rho_s C_s)_e \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_f u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (6)$$

$$q = -k_e \nabla T \quad (7)$$

式中: ρ_s 为热源密度, kg/m^3 ; C_s 为热源恒压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $(\rho_s C_s)_e$ 为有效热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; C_f 为水的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\nabla \cdot q$ 为热通量散度, W/m^3 ; Q 为热源项, W/m^3 ; k_e 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.2 边界条件

多孔介质为 $1\,000 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的砂堆,上部设有一层土工膜,膜上按照工况设有渗流孔,孔上水头为 10 cm ,下部出流孔直径为 28 mm ,在土工膜下方 5 cm 处设置加热导线,导线半径 1 mm ,设为固体热源,为 $8.8 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^3$,为体现主动加热法的有效性,将砂土温度与水温均设置为 293.15 K ,其余外边界均为无流动边界和热绝缘边界,设置域点探针 P_1 位于加热导线外边界中心,砂土、土工膜与加热导线参数见表 2,参数参照后续室内试验,便于对比验证。

表 2 热力学和物理力学参数

Table 2 Thermodynamic and physical-mechanical parameters

材料	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	恒压比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率	渗透率/ m^2
砂土	—	920	1 600	0.4	1×10^{-10}
加热导线	400	385	8 960	—	—

2.3 网格收敛性分析

为确保数值模拟结果的稳定性与精度,分析所建立的热-渗流耦合模型的网格收敛性,通过不同网格划分方案计算工况 1 的温度场,网格划分方案见表 3,图 5 为网格收敛性分析。

表 3 网格划分方案

Table 3 Mesh generation strategies

方案	最大单元/mm	最小单元/mm
1	240	1
2	120	0.8
3	60	0.4
4	30	0.1
5	20	0.05

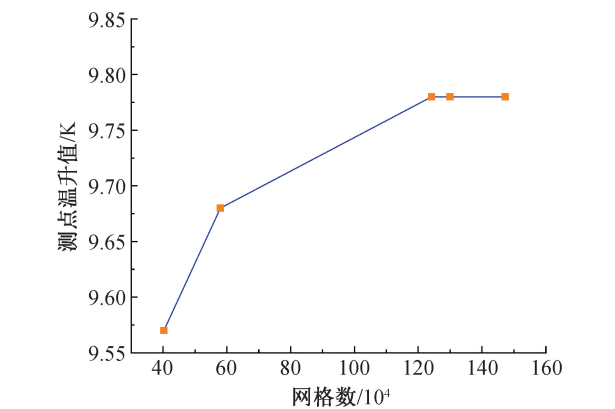


图 5 网格收敛性分析

Fig. 5 Mesh convergence analysis

由图 5 可知:当最大网格单元由 120 mm 缩小至 60 mm 时,温升出现明显提升,但进一步将最大网格单元缩小至 30 mm 后,测点温度已经没有变化,说明解算精度已收敛。因此,选用方案 3 进行后续数值模拟计算。模型与网格划分如图 6 所示,其中,包含 1 165 984 个域单元、67 580 个边界单元和 8 170 个边单元,在温度或渗流梯度较大的导线、渗流孔及出流孔附近采用自动加密,以提升局部计算精度和数值稳定性。

2.4 模拟试验结果分析

1) 单孔渗流。域点探针 P_1 的温升试验数据为 30 min 内每隔 1 min 的采样数据,将采样数据减去初始温度值,得到温升值 ΔT ,将各工况下的温升数

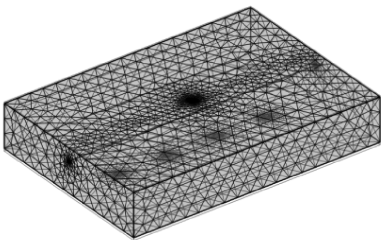


图 6 网格划分

Fig. 6 Mesh generation

据减去干燥条件下的温升数据得到各工况下的干湿差温升曲线,如图 7 所示。

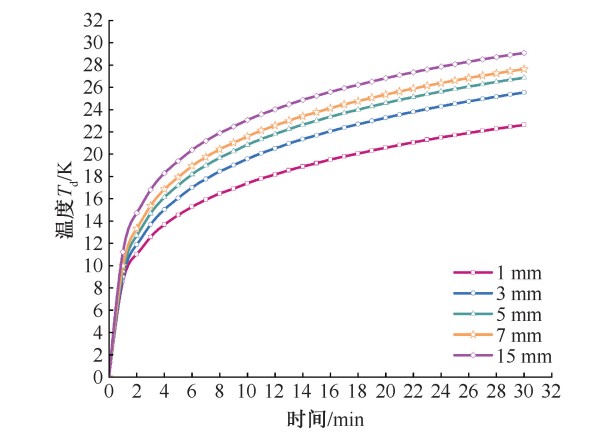
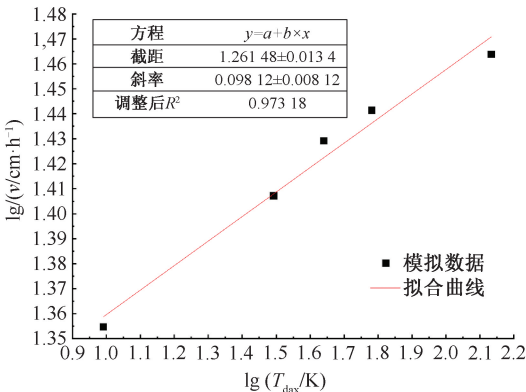


图 7 单孔渗流干湿温升差曲线

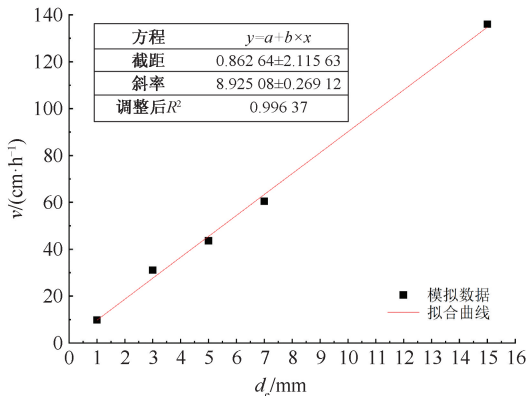
Fig. 7 Dry-wet differential temperature curve for single-hole seepage

单孔渗流干湿差温升曲线大致可分为 2 个阶段,前 5 min 为快速温升阶段,其曲线斜率较高,温升增长迅速,5 ~ 30 min 为缓慢升温阶段,温升增速降低。通过干湿差温升曲线得到 T_{dmax} ,并将其与 v 归一化后进行对数线性拟合,其中, R^2 为拟合优度,拟合曲线如图 8a 所示。从图 8a 可以看出, v^* 与 T_{dmax}^* 的对数线性拟合程度较高, R^2 达到 0.97,能够较好地反映 v 与 T_{dmax} 的关系。图 8b 为 v 与 d_e 的线性拟合曲线,可以看到,拟合优度 R^2 达到 0.99,证明 v 与 d_e 有良好的线性关系。因此,通过拟合曲线反演渗流速度 v 与有效渗流孔径 d_e 是可行的。

2) 集中多孔与分散多孔渗流。为验证集中多孔渗流等效为相同渗流面积单孔渗流和分散多孔渗流等效为多个独立单孔渗流的可行性,将工况 6—



(a) 单孔渗流 v^* 与 T_{dmax} 对数线性拟合曲线



(b) v 与 d_e 线性拟合曲线

图 8 线性拟合

Fig. 8 Linear fit plot

工况 8 的温升曲线与 v 、工况 5 的温升曲线与 v 、工况 9—工况 11 的温升曲线与 v 、工况 1—工况 3 的温升曲线与 v 进行对比,评价等效程度。温升曲线评价指标为 R^2 、均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 和相对误差 (Relative Error, RE), 渗流速度评价指标为 RE, 集中多孔与分散多孔渗流温升曲线等效评价指标见表 4, 从表 4 可以看出, 各工况的干湿差温升曲线 R^2 均大于 0.96, 且 MSE 均小于 1.3, re 均小于 3.8%。

表 4 集中多孔与分散多孔渗流温升曲线评价指标

Table 4 Evaluation indicators of temperature rise curves under concentrated and dispersed porous seepage

集中多孔渗流				分散多孔渗流			
工况	R^2	MSE/℃	RE/%	工况	R^2	MSE/℃	RE/%
6	0.963	1.232	3.722	9	0.989	0.135	1.931
7	0.970	0.585	3.318	10	0.992	0.133	1.718
8	0.999	0.005	0.293	11	0.999	0.003	0.253

表 5 为集中多孔与分散多孔渗流速度误差, 从表 5 可以看出, 各工况的 RE 均小于 5%, 因此, 将集中多孔渗流等效为相同面积的单孔渗流、将分散多孔渗流等效为多个独立的单孔渗流是合理的, d_e 可

作为土工膜孔径破坏的特征。

表 5 集中多孔与分散多孔渗流速度误差

Table 5 Seepage velocity errors under concentrated and dispersed porous seepage

集中多孔渗流		分散多孔渗流	
工况	RE/%	工况	RE/%
6	3.944	9	4.890
7	2.523	10	1.539
8	1.039	11	4.417

3 土工膜孔径破坏流热耦合室内试验

为验证感渗结构的敏感性以及验证数值模拟试验的可靠性, 进行相同工况的室内试验, 试验工况同数值模拟工况 (表 1), 材料性质与数值模拟材料相同 (表 2)。

3.1 流热耦合物理模型试验系统

室内试验设备主要由 DTS 测温系统、水库模型、加热系统、水循环系统等组成, 如图 9 所示。DTS 测温系统主要由分布式光纤和 DTS 解调仪组成, 分布式光纤采用 50 μm 单模光纤。水库模型长 1 000 mm、宽 700 mm、高 350 mm, 模型整体由砌块支撑, 下部开有等间距的 4 个直径为 28 mm 的渗流出水孔, 出水孔用 200 目的纱布封住, 砂堆高 20 cm, 砂堆上覆盖一层 5 mm 厚的高密度聚乙烯材料的土工膜, 距离砂堆上表面 10 cm 处设置一个阀门, 以控制水头恒定。加热系统由家用电源、24 V 变压器、电流计、加热铜导线、滑动变阻器和空气开关组成, 使用滑动变阻器将电路电流稳定在 18 A, 由此对铜导线进行恒功率加热。水循环系统主要由集水槽、蓄水箱、水泵和输水软管组成, 将烧杯接续集水槽即可得到渗流流量, 从而可计算渗流速度。

3.2 感渗结构敏感性与模拟可靠性分析

单孔渗流温升如图 10 所示, 在单孔直径为 1 mm 的渗流条件下, 结构所测得的温升约为 10 $^{\circ}\text{C}$; 在干燥土体环境中, 温升可达 32 $^{\circ}\text{C}$, 两者之间形成约 22 $^{\circ}\text{C}$ 的显著温差。由此可知: 即使在渗流孔径极小的情况下, 该感渗结构仍能够有效检测到由渗流引起的热响应变化, 从而实现对微小渗流孔的可靠识别。该结果充分验证了所提出感渗结构在渗流检测方面的高敏感性与识别能力。

不同工况 v 误差分析见表 6, 从表 6 可以看出, 数值模拟与室内试验的渗流速度误差均小于 5%。图 11 为单孔渗流工况与多孔渗流工况温升数据残差的箱线图与正态分布拟合图, 从图 11 中可以看

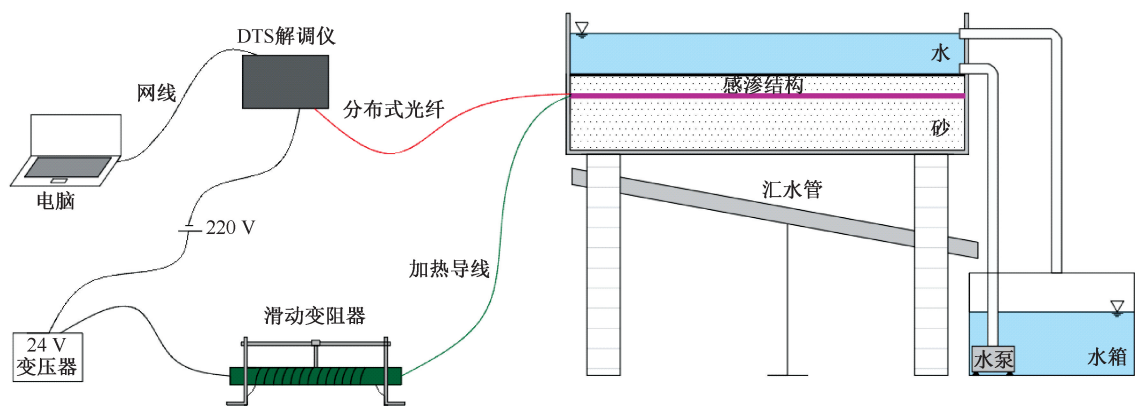


图 9 室内试验设备
Fig.9 Laboratory test equipment

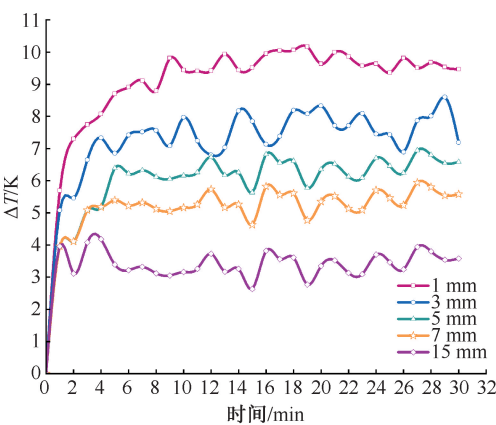


图 10 单孔渗流与干砂温升
Fig.10 Temperature rise in dry sand and single-hole seepage

出,残差分布集中,86%误差位于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,且符合近似正态分布,表明模拟结果与实测数据拟合良好,误差较小。温升数据残差分析与 v 的RE分析表明:模拟试验结果能够较好地反映试验情况,感渗结构与土工膜孔径破坏渗流判别方法具有实用性。

表 6 不同工况渗流速度误差分析

Table 6 Error analysis of seepage velocity under different working conditions			
工况	RE/%	工况	RE/%
1	3.509	7	3.480
2	3.373	8	2.140
3	2.041	9	4.417
4	1.982	10	4.127
5	3.951	11	3.285
6	4.321	12	—

4 结论

1) 基于多孔柔性外护套的感渗结构具有良好

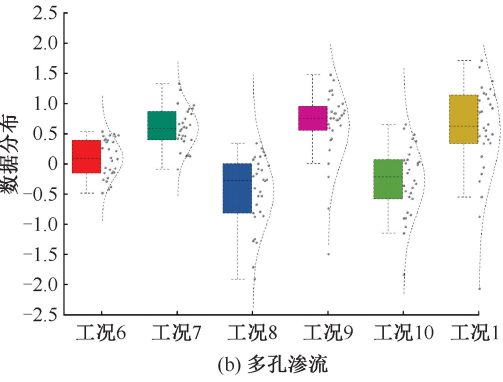
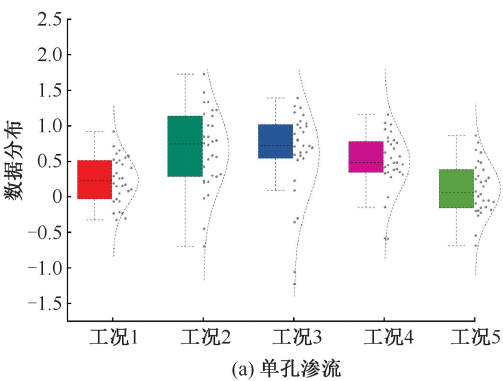


图 11 温升数据残差分析

Fig.11 Residual analysis plot of temperature rise data

的加热效果,能够使得光纤直接接触到渗流水,当多孔介质环境温度与渗流温度相近时,具有渗流高敏感性,证明其渗流监测的可行性。

2) 提出 T_{dmax} 与 d_e ,构建 T_{dmax} 与 v 归一化后的对数线性拟合关系曲线,以及 d_e 与渗流速度 v 的线性拟合关系曲线。模拟试验结果表明: T_{dmax} 与 v 的 R^2 大于0.97, d_e 与 v 的 R^2 大于0.999。

3) 通过模拟试验验证了将集中多孔渗流等效为渗流孔径 d_e 的单孔、分散多孔渗流等效为平均孔径 d_e 的单孔的合理性。模拟结果表明:等效模型的

最大干湿差温升曲线 R^2 均大于 0.96,且 MSE 均小于 1.3, re 均小于 3.8%,渗流速度相对误差 re 均小于 5%。

4) 通过对比室内试验结果与模拟结果,验证了

数值模拟试验结果的可靠性。数值模拟与室内试验的渗流速度误差均小于 5%。温升数据残差分布集中,误差 86%位于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,模拟试验结果能够较好地反映试验情况。

参考文献

[1] 佟瑞鹏,陈大为. 流域梯级水库事故风险分析与防洪联合调度实现[J]. 中国安全科学学报,2009,19(3): 119-124.
TONG Ruipeng, CHEN Dawei. Accident risk analysis and flood control operation of cascade reservoir[J]. China Safety Science Journal,2009,19(3): 119-124.

[2] 郑艳双. 渗压计的埋设[J]. 西部探矿工程,2006,18(增 1):339.

[3] 张玉龙,鲁米香. 土石坝渗流监测仪器设备应用研究[J]. 中国水能及电气化,2015(10):36-40.

[4] 卢慧. 量水堰法自动测流系统的设计[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
LU Hui. The design of the automatic measurement system for weir flow[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2016.

[5] 周孟然,李振壁,朱宗玖. 分布式光纤传感瓦斯气体系统的研究[J]. 中国安全科学学报,2007,17(8):167-170.
ZHOU Mengran, LI Zhenbi, ZHU Zongjiu. Research on distributed optical fiber gas system[J]. China Safety Science Journal,2007,17(8): 167-170.

[6] BEKELE B, SONG C, KIM S, et al. Seepage anomaly detection via fiber optic distributed temperature sensing: insights from physical and numerical modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2024,150(6): DOI:10.1061/JGGEFK.GTENG-11851.

[7] GHAFORI 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): DOI:10.3390/w12020367.

[8] 汪东风. 基于分布式光纤测温技术的渠道堤坝渗漏监测研究[D]. 南京:南京理工大学,2021.

[9] 尹祥,周彦章,孔洋,等. 基于主动加热型分布式光纤测温技术的土体含水率监测试验研究[J]. 水利科学与寒区工程,2024,7(2):4-8.
YIN Xiang, ZHOU Yanzhang, KONG Yang, et al. Study on soil moisture content monitoring experimental based on active heating distributed fiber temperature measurement technology[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2024,7(2): 4-8.

[10] JIANG Chen, SHUN Hangjiang, FENG Xiong, et al, Experimental study on the leakage monitoring system with integrated point heat source and temperature sensor array in concrete face fockfill dams[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2023,72:1-12.

[11] 李红涛. 分布式光纤测温技术在平原水库渗流监测中的应用研究[D]. 济南:山东大学,2018.
LI Hongtao. Application research of distributed optical fiber temperature measurement technology in seepage mortoring in plain reservoir[D]. Ji'nan: Shandong University,2018.

[12] 廖志彬,袁俊平,曹雪山,等. 平原水库的土工膜防渗结构方案及其影响因素研究:以西夏水库为例[J]. 河南科学,2022,40(11):1 768-1 775.
LIAO Zhibin, YUAN Junping, CAO Xueshan, et al. Study on geomembrane impermeable structure scheme of plain reservoir and its influencing factors:an example of Xixia reservoir[J]. Henan Science,2022,40(11):1 768-1 775.

[13] NOSKO V, CROWTHER J. Can the holy grail of the geosynthetics industry "zero leakage" be achieved by arc testing[C]. Geosynthetics 2015,2015:15-18.

[14] 韩瑞晨. 新疆某平原水库复合土工膜缺陷渗漏试验及数值模拟研究[D]. 济南:济南大学,2023.
HAN Ruichen. Leakage test and numerical simulation of composite geomembrane defects in a plain reservoir in Xinjiang[D]. Ji'nan:Ji'nan University, 2023.

[15] 曹哺梁. 基于光频域反射技术的土石坝渗流热示踪监测试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
CAO Buliang. Experimental study on heat tracing monitoring of earth-rock dam seepage based on optical frequency domain reflectance technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2022.

[16] 柳崎,索丽敏. 地下岩体内多孔介质中裂隙流运移过程的 COMSOL Multiphysics 仿真模拟[J]. 系统仿真技术,2019,15(3):184-187,197.
LIU Qi, SUO Limin. COMSOL Multiphysics simulation of fracture flow migration in porous media in underground rock masses[J]. Systems Simulation Technology,2019,15(3):184-187,197.



作者简介: 金晨晨 (1998—),男,江苏溧阳人,硕士研究生,主要研究方向为水利工程结构健康监测。E-mail:1544072243@qq.com。