

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.016

基于分布式应变感测的堤防管涌探测试验研究

张子豪¹, 杨 博¹, 顾 凯^{1,2}, 张 博³, 施 斌¹, 刘 瑾³

(1. 南京大学地球科学与工程学院; 2. 南京大学(苏州)高新技术研究院; 3. 河海大学地球科学与工程学院)

摘要: 针对堤防管涌点定位难、探测时效性低等问题, 引入高精度的分布式光频域反射技术 (OFDR), 通过理论分析和模型试验, 研究了流速和管涌通道直径对分布式应变响应特征的影响, 建立了应变特征值用于评价渗流速度、管涌通道直径等关键指标的关系, 论证了基于高精度应变信息探测管涌的可行性。结果表明: OFDR 能够灵敏地检测到水流通过光缆时引起的应变变化, 随着流速增大光缆产生的应变相应增大, 符合理论推导的变化趋势, 流速与应变的相关性可达 0.993; 管涌通道直径增大也会引起光缆应变增大。

关键词: 堤防管涌; 应变; 监测预警; 光频域反射技术; 分布式光纤感测技术

Experimental study on embankment piping detection based on distributed strain sensing

Zhang Zihao¹, Yang Bo¹, Gu Kai^{1,2}, Zhang Bo³, Shi Bin¹, Liu Jin³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University;

2. Nanjing University (Suzhou) High-Tech Institute;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the problems of difficult positioning and low detection timeliness of embankment piping points, high-precision distributed optical frequency domain reflectometry (OFDR) was introduced. Through theoretical analysis and model tests, the influence of flow velocity and piping channel diameter on the distributed strain response characteristics was studied. Relationships between strain characteristic values and key indicators such as seepage velocity and piping channel diameter were established, and the feasibility of detecting piping based on high-precision strain information was demonstrated. The results show that OFDR can sensitively detect the strain changes caused by water flow through the optical cable. With the increase of flow velocity, the strain induced in the optical cable correspondingly increases, which is consistent with the theoretical derivation trend. The correlation between flow velocity and strain can reach 0.993. An increase in piping channel diameter also causes an increase in optical cable strain.

Key words: embankment piping; strain; monitoring and early warning; optical frequency domain reflectometry; distributed fiber optic sensing technology

管涌发生时, 随着堤防两侧的水位差增大, 下层较细土粒随水流不断涌出, 渗流通道直径逐渐增大并形成贯通的管涌通道, 导致土体内部结构改变, 引起土体失稳、堤坝溃决^[1-5]。我国洪涝灾害频发, 防洪工程至关重要, 汛期决堤的风险不可忽视。管涌险情至今仍多由巡堤查险人员排查发现, 深入开展堤防管涌实时监测预警技术创新研究, 对提高防洪体系的安全性具有重要意义。

常规的堤防管涌监测主要依赖于埋设测压管, 通过监测坝体浸润线、渗压压力、地下水位以及绕坝渗流等特征参数, 来判定管涌发生可能性的大小。该方法在实现工控自动化的同时, 可以进行人工比测, 以确保自动化测值的可靠性。然而, 测压管容易受人为破坏、降水量、固体和化学沉淀物的淤堵等影响, 长期监测费时费力, 且滞后时间较长^[6]。现代非光纤传感管涌监测采用了流场法、高密度电阻率法、瞬变电磁法、声发射法^[7-11]等, 但这些方法难以监测管涌发生初期的渗流变化情况, 对目标体的分辨率较低。无人机载红外-可见双光成像法受限于堤坝表面温度分布不均、日均温度不断变化的影响, 仅适用于管涌发生后引起的温度异常抵达堤坝表面或坑塘水面的情况^[12]。

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金面上项目 (BK20231216); 国家自然科学基金面上项目 (42277124); 江苏省“333”工程青年人才项目; 江苏省大学生创新训练计划项目 (202310284278Y)

作者简介: 张子豪 (2004—), 男, 博士研究生, 主要从事渗流监测研究。E-mail: 211830142@smail.nju.edu.cn

通信作者: 顾凯 (1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境工程地质研究。E-mail: gukai@nju.edu.cn

分布式光纤感测技术具有分布式、高精度、长距离、易安装、多路复用等优点,能够实现空间连续的分布式应变、温度和振动监测^[13-15]。温度示踪法具有理论简明、环境友好、数据采集方便等特点,在含水率反演、渗流场评价中具有广阔的应用潜力,最早被研究人员引入到水文地质学领域的研究中^[16]。近年来,有学者利用温度示踪原理,基于分布式温度传感技术开展了堤防渗流感测相关技术研究,引起了广泛关注。肖衡林等^[17]提出了流速与光缆稳定温升的半理论公式,在物理模型试验中初步验证了采用主动温度信息法估算地下水流速的可行性,试验结果表明静水中的光纤温升明显高于流水,且加热功率和流速的增加将进一步增大两者差值,流速与光纤的温升成反比。何宁等^[18]通过室内模型试验和堤坝渗漏监测原型试验,验证了采用“加热法”通过分布式拉曼光纤测温系统监测渠道堤坝渗漏,能够实现更高的测量敏感性。Su 等^[19-20]基于分布式光纤测温系统研发室内渗流试验装置,开展多组不同流速和不同加热功率下的模型试验,建立了渗透速度与平均有效热传导系数之间线性相关的数学关系模型;马朝阳等^[21]研制了可以控制多场变量的试验装置,准确模拟各工况真实情况下堤防的渗漏病险发展情况。Zhang 等^[22]利用数值模拟方法,分离了在有回填料的钻孔中进行主动加热光纤热响应测试时各阶段传热过程,获得了温度响应曲线中符合移动线热源理论的部分温升曲线,用以估算地下水流速。

当管涌发生时,在渗透水流作用下土体周围应力场发生微小变化^[23],如在其中埋设应变感测光缆,可借助高精度、高空间分辨率的光频域反射技术(optical frequency domain reflectometry, OFDR)获得光缆应变的分布,通过研究光缆应变对渗流的响应机制,可得到堤防管涌监测的新方法。本文利用 OFDR 高精度、高分辨率的技术优势,开展了基于应变响应的管涌监测模型试验,模拟并分析渗流扰动光缆产生应变的演化过程,得出了试验条件下渗流流速及管涌通道直径影响光缆应变的机制,验证了通过光缆应变来识别管涌的可行性,为堤防管涌的监测提供了一种新的方法。

1 基于 OFDR 的渗流测试原理

1.1 OFDR 定位与应变测试原理

光纤传感技术是 20 世纪 80 年代伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而迅速发展起来的一种以光为载体、光纤为媒介来感知和传输外界信号的新型传感技术^[24]。在众多光纤传感技术中,OFDR 具有很高的空间分辨率和信噪比,高精度、高分辨率测试的优点(传感精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}/10^{-6}$,50 m 传感范围内空间分辨率达 1 mm,100 m 传感范围内空间分辨率达 1 cm),使其能够识别非常细微的应变和温度变化^[7,14],满足本文对堤防管涌发展初期渗流变化情况的监测和分析需求。OFDR 的测试原理见图 1,线性调频光源发射的持续线性扫频光经过耦合器后被分为两束,一束光经过固定反射镜后返回,其光程作为参考光;另一束光进入待测光纤产生背向瑞利散射信号光。两路信号光进入同一耦合器后,由于频率不同相互干涉产生拍频干涉。干涉信号的拍频与待测光纤的位置有关,通过频差测量,可以得到不同位置处待测光纤背向瑞利散射的信号信息^[21,25-26]。对于应变测量,当光纤产生轴向应变时,背向瑞利散射信号的频率会发生漂移,通过对参考臂和信号臂的测量信号进行相关运算,可以得到光谱漂移值,光谱漂移值与光纤应变呈良好的线性关系^[27]。

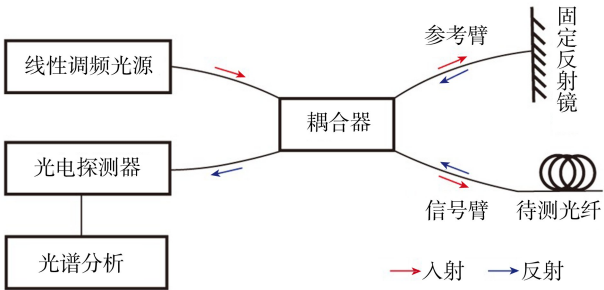


图 1 OFDR 测试原理
Fig. 1 Testing principle of OFDR

1.2 基于 OFDR 的渗流测试原理

土体中孔隙一般十分微小,水在其中流动时受到的黏滞阻力大,流速较小,流动状态大多属于层流^[28]。在管涌发生前的孔隙流体运动阶段,水力梯度与渗流速度呈线性关系,基本符合达西定律^[2,29]。此阶段细颗粒不受水流运动影响或仅发生有限运移^[3],埋置在土体中光缆的应变主要由渗流作用引起。为探究管涌渗流与光缆应变的定量关系,建立光缆渗流-应变物理模型。基于管涌发生初期的流场特征,作出如下假设:①管涌通道内水流为定常层流,流速分布满足哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseuille)定律;②穿越通道的光缆视为简支梁,在水流冲击力作用下发生微小弹性形变,忽略黏滞阻力和土体作用的影响,其物理作用机制如

图 2(a)所示。为便于定量推导,根据材料力学及水力学理论^[30-31],将不规则的管涌通道抽象为理想圆柱管,构建如图 2(b)所示的层流压力作用模型,图中 d_0 为光缆半径, r_0 为管涌通道半径, v_1 、 v_2 分别为流体流经光缆前后的速度矢量, F_A 、 F_B 分别为光缆受力时端点 A 和 B 的支反力, y 为光纤上点距中心轴的垂直距离。

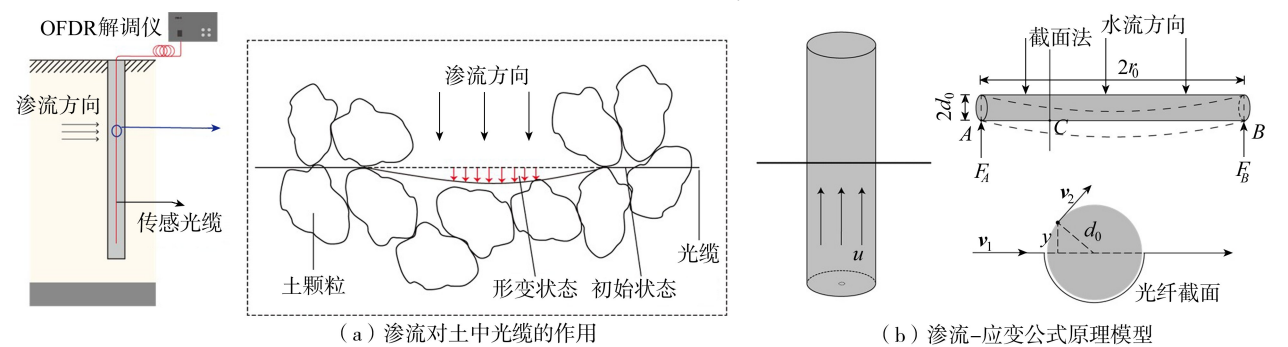


图 2 光缆中渗流引起的应变示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strain induced in optical fibers by seepage

由哈根-泊肃叶定律,流场流速分布在半径为 r_0 的圆形管涌通道中,流速沿径向呈抛物线分布。距管涌通道中心 r 处的流速 $u(r)$ 为:

$$u(r) = 2v \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \tag{1}$$

式中: r 为距管涌通道中心的径向距离, m ; v 为管涌通道断面的平均流速, m/s 。由式(1)可知,管涌通道中心流速最大,越靠近管壁流速越小。

当水流垂流过光缆时,水质点受阻导致运动方向发生改变。取光缆微元段进行分析,流体流经光缆后速度矢量由 v_1 变为 v_2 ,如图 2(b)所示。根据动量定理,单位时间内流体沿垂直于光缆轴线方向的动量变化量等于水流对该微元段光缆的冲击力。假设流体不可压缩并忽略摩擦及涡流的影响,对动量变化进行积分求解,可得水流作用在光缆单位长度上的分布荷载 $q(x)$:

$$q(x) = 4\rho_w d_0 v^2 \left(\frac{2x}{r_0} - \frac{x^2}{r_0^2} \right)^2 \tag{2}$$

式中: x 为光缆测段上某点到端点 A 的坐标距离, m ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 。

光缆的中部受力最大,且受力分布形态取决于流速分布。将光缆视为跨度为 $2r_0$ 的简支梁,在分布荷载 $q(x)$ 作用下光缆产生弯曲变形。利用截面法^[31]计算可得作用在光缆单位长度上的弯矩 $M(x)$:

$$M(x) = 4\rho_w d_0 v^2 \left[\frac{8}{15} r_0 x - \frac{x^4}{r_0^2} \left(\frac{x^2}{30 r_0^2} - \frac{x}{5 r_0} + \frac{1}{3} \right) \right] \tag{3}$$

根据材料力学纯弯曲理论,光缆最外侧表面(受拉伸/压缩最严重处)的轴向应变 $\varepsilon(x)$ 与弯矩 $M(x)$ 的关系为^[31]:

$$\varepsilon(x) = \frac{d_0}{EI_z} M(x) \tag{4}$$

式中: E 为光缆弹性模量, MPa ; I_z 为光缆的截面惯性矩, m^4 。

将式(3)以及截面惯性矩 I_z 代入式(4),化简可得光缆轴向应变 $\varepsilon(x)$ 随位置 x 及流速 v 变化的解析表达式:

$$\varepsilon(x) = \frac{64\rho_w v^2}{\pi E d_0^2} \delta(x) \tag{5}$$

其中 $\delta(x) = \frac{1}{15} R x - \frac{x^4}{R^2} \left(\frac{2x^2}{15 R^2} - \frac{2x}{5 R} + \frac{1}{3} \right)$

式中: R 为管道直径, m ; $\delta(x)$ 为控制应变空间分布的形函数。式(5)表明,前半部分的乘数项决定了应变的整体幅值大小,其与流速的平方成正比,与光缆半径的平方成反比;后半部分的形函数项决定了应变沿光缆轴向呈现中间大、两端小的下凹形分布特征。

2 基于 OFDR 的渗流测试

2.1 试验装置

室内渗流测试模型装置由供水设备、模拟管涌通道、应变感测光缆和解调设备四部分组成。如图 3 所示,使用不同直径的亚克力管模拟不同规模的管涌通道,将直径为 0.9 mm 的单芯应变感测光缆(型号 NZS-DSS-C07)穿过位于圆管中部预留的对称小孔,施加相同大小的预应力拉紧并固定光缆,密封小孔。圆管底部设置通水装置,在相同大小的水头下使用阀门控制管内流速,并设置缓冲层以确保管中水流稳定;圆管顶部侧壁设有出水孔,通过测量一定时间内的出水量计算管内实际平均流速。

2.2 试验方法

试验开始前,保持试验环境温度恒定,通过圆管底部通水装置注水至侧壁出水孔,静置至水体温度稳定后开始试验。单次流速试验时长为 10 min,分为静置、通水、停水 3 个阶段,时长分别为 3、4、3 min。各阶段具体操作如下:①静置阶段,监测光缆在静水中的应变状态,以评估环境扰动对光缆应变的影响;②通水阶段,通过调节控流阀控制流量,使流速达到预设值,监测光缆应变从初始状态增大至稳定的过程,以揭示光缆应变与流速变化的响应机制;③停水阶段,关闭水源并记录光缆应变恢复过程,以分析停水后光缆应变的恢复特性。在通水阶段,通过量筒收集一定时间内的水量计算管内平均流速,控制流量范围在 0~3 L/min 之间,对应不同管径流速范围为 $0\sim9\times10^{-3}$ m/s,以模拟管涌发展的初期状态。

为消除光缆残余应变对试验结果的影响,相邻试验间设置至少 60 min 的恢复间隔,并在每次试验前重新采集光缆状态作为应变计算的零点基准。试验采用 OFDR 解调仪实时记录光缆应变,设置空间和时间采样间隔分别为 2 mm 和 10 s。试验在 3 种管径模型中分别设定了 3 个名义流量等级开展渗流试验,受过流断面差异及控制精度影响,相同流量级下的实测断面流速存在差异,具体实测流速详见表 1。

此外,本文还开展了分级持续通水试验,以探究光缆在多级流速累积作用下的应变响应。该试验步骤与单次通水试验一致,区别在于通水阶段采取分级递增流速的方式,保持每一级流速的持续时间与单次试验一致。

3 试验结果与分析

3.1 光缆应变特征值与流速的关系

因基于 OFDR 的分布式光纤感测技术的高精度特征,试验测试结果易受环境随机噪声的影响,需要对原始测试数据进行处理。本试验采用高斯滤波算法对测试数据进行预处理^[32],有效消除了随机噪声,保留数据的边缘和细节特征,使应变分布更加清晰,有助于更精确地识别应变信息。

图 4(a)为 10 cm 管径中光缆在不同流速下沿管涌通道径向实测和根据式(5)模拟计算得到的光缆应变分布情况。由图 4(a)可知,在两端固定的条件下,光缆受到水流作用稳定后产生的应变呈现下凹状分布,靠近管壁处的流速接近于 0,光缆中部产生的应变最大,即管涌通道轴线处。对比可知,管道中实际应变分布情况和模拟应变情况在相同流场下所表现出的应变变化形状趋于一致,但变化值大小略有不同。产生差异的原因可能是由于实际试验过程中,管道内部出现紊流导致光缆应变增大,从侧面反映出高精度、高分辨率的 OFDR 技术能够捕捉环境力场的细微变化。

为进一步分析光缆应变与流速和管径的关系,将下凹形光缆应变分布曲线峰值的平均值定义为光缆应变特征值 ε_c 。图 4(b)为 10 cm 管径实测和模拟计算的光缆应变特征值随流速变化情况。数据分析显示,光缆总体应变分布和应变特征值随流速增加而增大,流速每增大 1 mm/s,应变特征值将同时增大约 2×10^{-6} ,故

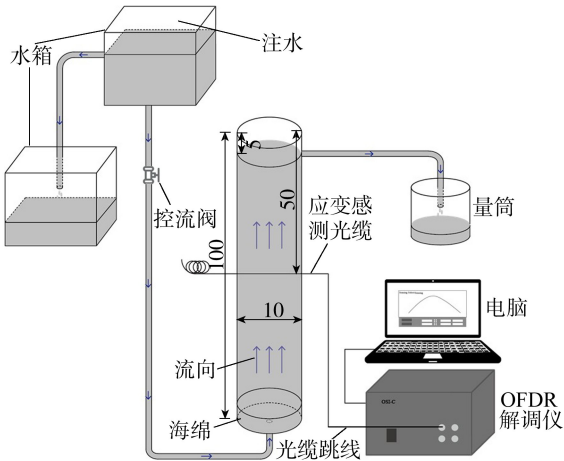


图 3 渗流测试模型装置(单位:cm)

Fig. 3 Seepage measurement model(unit: cm)

表 1 渗流试验工况参数

Table 1 Parameters of seepage experimental conditions			
管径/cm	断面平均流速/(mm/s)		
	第 1 级流量	第 2 级流量	第 3 级流量
8	3.7	5.9	7.0
10	2.6	3.8	4.9
12	1.6	2.5	3.7

光缆应变特征值的增大可以表征所测流体的流速也变大。图 4(c) 为在相同流速(3.8 mm/s)下不同管径中光缆应变特征值的分布情况,当通水管道的直径增加时,光缆的应变特征值随之增大,具体表现为管径每增大 2 cm,光缆应变特征值 ε_c 同时增大大约 4×10^{-6} 。光缆的应变特征值在试验条件下与流速、管径呈现明显的正相关性,与式(5)推导的理论结果趋于一致,相关系数分别可达 0.993 和 0.996,由此可知,在实际应用中可以通过监测 ε_c 的实时变化情况来监测并判断管涌流速及管涌通道直径的变化情况。

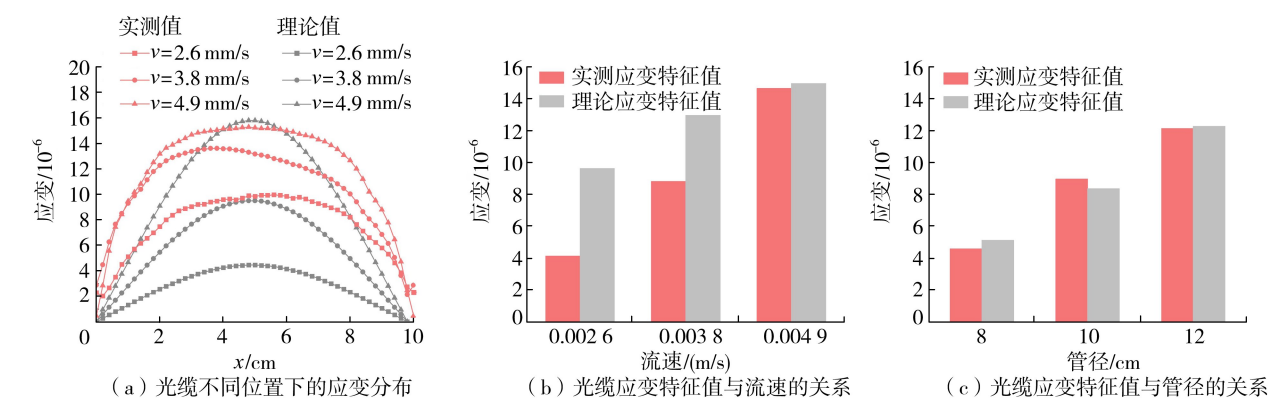


图 4 光缆应变与流速及管径的关系

Fig. 4 Relationships among optical cable strain, flow velocity, and pipe diameter

3.2 光缆总应变与流速的关系

为分析光缆应变对流速变化的敏感性,引入光缆总应变,定义其为光缆应变曲线对时间轴积分的累积。图 5(a) (b) 为 10 cm 管径下不同流速的通水试验中光缆总应变随时间变化的情况,结果表明,当通水开始时,总应变迅速增大直至达到峰值,通水结束后,应变逐渐恢复。在 12 cm 管径下分级持续通水试验(图 5(c))中,随着每一级水流速度增大,光缆的总应变也随之增长,且反应迅速。在第 1 级较低的流速下,光缆应变的增幅较小;但随着流速的增加,应变迅速累积至该级流速下的峰值;进一步增加流速,尽管光缆的总应变仍在增长,但由于光缆两端的固定约束,其变形能力开始降低,应变的增长速率逐渐减缓;停止通水后,光缆应变随时间逐渐恢复。试验结果表明,通过监测光缆总应变的变化,能够精确地识别到管涌事件的发生与进展。但值得注意的是,在评估过程中须考虑光缆应变的极限能力,以确保监测结果的准确性和可靠性。

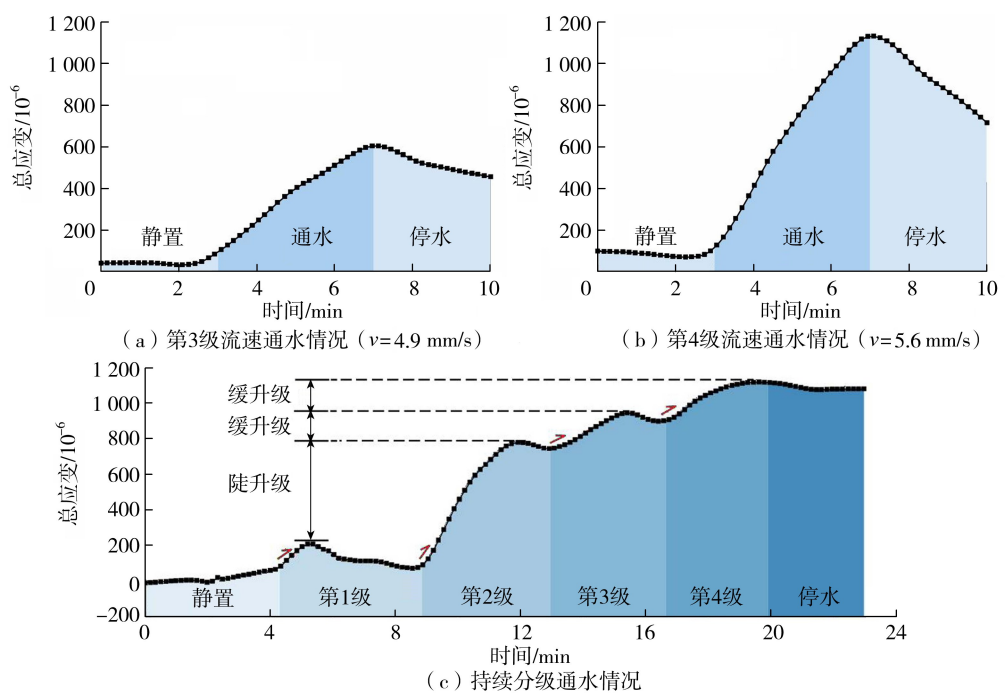


图 5 不同流速下光缆总应变随时间的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of total strain of optical cables with time under different flow velocities

4 讨 论

4.1 光缆应变恢复过程

在试验结束通水后,观察到光缆应变特征值 ε_e 从峰值逐渐降低,并在约 90 min 后恢复到初始状态。应变平均恢复速率相对较慢(图 6)。分析原因,可能有两点:①光缆为非理想弹性体,存在一定的塑性,且在悬空布设状态下受力后的变形难以立即恢复,呈现出缓慢回弹趋势;②在光缆应变恢复过程中,理想的稳定环境条件难以满足,致使应变受到一定程度的环境噪声影响,表现出恢复滞后的特性。该现象表明光缆应变恢复时间对管涌监测存在潜在影响,同时为更准确地预测间歇性管涌的发生和发展情况、优化监测策略、提高监测效率和为 OFDR 在实际管涌监测中的应用提供借鉴。

4.2 原位管涌监测方案

本文通过室内模型试验,初步验证了基于 OFDR 的分布式应变感测技术在监测管涌方面的可行性。未来,计划进一步开展原位监测试验,在堤防背水坡侧构建应变传感光缆监测网络(图 7),该网络主要由浅表监测和深部监测两部分组成。

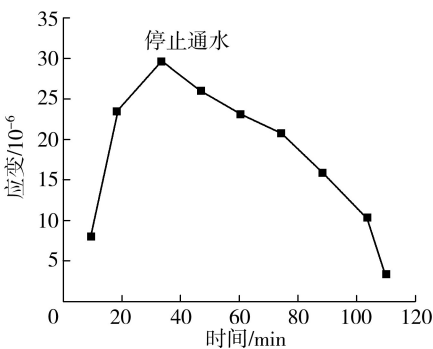


图 6 停止通水后应变随时间恢复

Fig. 6 Strain recovery with time after stopping water supply

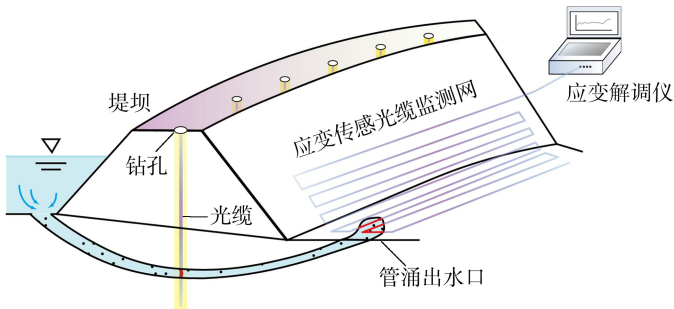


图 7 管涌原位监测应变传感光缆网络

Fig. 7 Strain sensing optical cable network for in-situ piping monitoring

浅表监测通过沿堤防表面开槽回填或使用定制夹具以网格或“之”字形固定传感光缆,实现对管涌出水口位置的精确监测,并通过测量出水口处的流速和出水规模,为评估管涌的发展状态提供数据支持。深部监测则通过将光缆安装在钻孔中并用回填料固定,深入坝体内部,以监测深层渗流动态。这不仅有助于揭示管涌发生的内在机制,还为管涌的早期预警和风险评估提供了科学依据。

5 结 语

光缆应变特征值随流速增加而增大,且管涌通道的扩展进一步增强了应变响应。该特征值可作为定量反演流速的关键指标,为基于分布式应变传感的管涌监测提供了新的技术依据。通过对光缆应变数据的积分分析,研究验证了总应变值可作为流速变化的敏感表征参数,能够快速响应管涌渗流的动态演化过程,为管涌事件的早期预警和实时监测提供技术支持。理论推导与模型试验的对比分析验证了 OFDR 应变响应机制与渗流流速、管涌通道直径的理论模型具有高度一致性(相关系数达 0.993),为揭示光缆应变分布特征与渗流动力参数间的定量关系提供新视角。

本文通过室内模型试验验证了分布式应变感测技术对管涌监测与定量表征的可行性,但仍存在一定的局限性:①在管涌事件的识别中,尚需建立应变异常信号判别机制并设定相应阈值;②在实际现场应用时,光缆的布设方式和缆土耦合程度对监测精度至关重要,需要进一步优化以提高监测效果。未来工作将聚焦于上述问题,完善现有计算方法,探究基于应变响应的分布式光纤传感技术在实际堤防管涌监测中的应用。

参考文献:

[1] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[2] 梁越,喻金桃,张强,等. 骨架颗粒组成对散粒土管涌规律影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):63-69. (Liang Yue, Yu Jintao, Zhang Qiang, et al. Experimental study on the effect of skeleton particle composition on piping law of cohesionless soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):63-69. (in Chinese))

[3] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue, He Huiru, Xu Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):60-66. (in Chinese))

[4] 邬爱清,吴庆华. 堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备[J]. 岩土工程学报,2022,44(7):1310-1328. (Wu Aiqing, Wu Qinghua. Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical equipments of emergency rescues[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(7):1310-1328. (in Chinese))

[5] 湖南省交通运输厅. 岳阳华容洞庭湖决堤,直击湖南水运部门抢险救援一线! [EB/OL]. (2024-07-15). https://jtt.hunan.gov.cn/jtt/hnsy/sydt/202407/t20240715_33355866.html.

[6] 崔盈. 基于分布式光纤传感技术的堤防渗漏监测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.

[7] 房纯纲,葛怀光,鲁英,等. 瞬变电磁法探测堤防隐患及渗漏[J]. 大坝观测与土工测试,2001(4):30-32. (Fang Chungang, Ge Huaiguang, Lu Ying, et al. Transient electromagnetic method for detecting seepage and hidden dangers in dikes[J]. Dam Monitoring and Geotechnical Testing,2001(4):30-32. (in Chinese))

[8] 邓居智,刘庆成,莫撼. 高密度电阻率法在水坝隐患探测中的应用[J]. 工程勘察,2002(6):63-65. (Deng Juzhi, Liu Qingcheng, Mo Han, et al. Application of high-density resistivity method in dam hidden danger detection[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2002(6):63-65. (in Chinese))

[9] 徐力群,何英铭,李东泽,等. 综合物探信息融合技术在土石坝渗漏隐患探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):86-92. (Xu Liqun, He Yingming, Li Dongze, et al. Application of integrated geophysical information fusion technology in leakage hazard detection for earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(3):86-92. (in Chinese))

[10] 邹声杰. 堤坝管涌渗漏流场拟合法理论及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

[11] 明攀,耿晓明,陆俊,等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):33-38. (Ming Pan, Geng Xiaoming, Lu Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):33-38. (in Chinese))

[12] 周仁练,马佳佳,苏怀智. 基于无人机载红外-可见双光成像的土石堤坝渗漏巡查方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):154-161. (Zhou Renlian, Ma Jiajia, Su Huaizhi. Leakage inspection method of earth-rock embankment based on UAV with infrared and visible dual-light imaging[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(3):154-161. (in Chinese))

[13] 施斌,顾凯,魏广庆,等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报,2018,26(2):356-364. (Shi Bin, Gu Kai, Wei Guangqing, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. Journal of Engineering Geology,2018,26(2):356-364. (in Chinese))

[14] 施斌,张丹,朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京:科学出版社,2019.

[15] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):81-88. (Lu Yi, Song Zezhuo, Liu Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):81-88. (in Chinese))

[16] Anderson M P. Heat as a ground water tracer[J]. Groundwater,2005,43(6):951-968.

[17] 肖衡林,张晋锋,何俊. 基于分布式光纤传感技术的流速测量方法研究[J]. 岩土力学,2009,30(11):3543-3547. (Xiao Henglin, Zhang Jinfeng, He Jun. Research on theory of seepage monitoring based on distributed optical fiber sensing technology [J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(11):3543-3547. (in Chinese))

[18] 何宁,丁勇,吴玉龙,等. 基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测[J]. 水利水运工程学报,2015(1):20-27. (He Ning, Ding Yong, Wu Yulong, et al. Experimental study of distributed optical fiber temperature measurement technology for measuring leakage in embankment dam[J]. Hydro-Science and Engineering,2015(1):20-27. (in Chinese))

[19] Su H, Tian S, Cui 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.

[20] Su H, Cui S, Wen Z, 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.

110[R]. Tulsa: Gas Processors Association, 1987.

[23] Chang Chun, Zhou Quanlin, Xia Lu, et al. Dynamic displacement and non-equilibrium dissolution of supercritical CO₂ in low-permeability sandstone: An experimental study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 14: 1-14.

[24] Borgman O, Fantinel P, Lühder W, et al. Impact of spatially correlated pore-scale heterogeneity on drying porous media[J]. Water Resources Research, 2017, 53(7): 5645-5658.

[25] Rad M N, Shokri N, Keshmiri A, et al. Effects of grain and pore size on salt precipitation during evaporation from porous media [J]. Transport in Porous Media, 2015, 110(2): 281-294.

[26] 李铤. CO₂-盐水-岩石系统中残余水形成机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.

[27] Li Yi, Hu Lisha, Shen Zhaoli, et al. The effects of brine concentration on the formation of residual water[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7: 496-499.

(收稿日期: 2024-08-28 编辑: 熊水斌)

(上接第 142 页)

[21] 马朝阳, 任杰, 南胜豪, 等. 土石堤坝渗漏病险试验装置的研制及初步应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2268-2277. (Ma Zhaoyang, Ren Jie, Nan Shenghao, et al. Development and initial application of test devices for leakage of earth-rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2268-2277. (in Chinese))

[22] Zhang B, Gu K, Bayer P, et al. Estimation of groundwater flow rate by an actively heated fiber optics based thermal response test in a grouted borehole[J]. Water Resources Research, 2023, 59(1): e2022WR032672.

[23] 刘胜, 王媛, 冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 10-16. (Liu Sheng, Wang Yuan, Feng Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 10-16. (in Chinese))

[24] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73. (Zhang Xuping, Zhang Yixin, Wang Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11-73. (in Chinese))

[25] 吴涵, 朱鸿鹄, 周谷宇, 等. 考虑变形协调的土体剪切位移分布式测试研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 716-724. (Wu Han, Zhu Honghu, Zhou Guyu, et al. 2020. Experimental study on distributed monitoring of soil shear displacement considering deformation compatibility[J]. Journal of Engineering Geology, 28(4): 716-724. (in Chinese))

[26] Liang C, Bai Q, Yan M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry[J]. IEEE Access, 2021, 9: 41647-41668.

[27] 吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 140-147. (Wu Jinghong, Liu Hao, Yang Peng, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique[J]. Laser Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 140-147. (in Chinese))

[28] 河海大学土力学教材编写组. 土力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

[29] Wilson G V, Nieber J L, Sidle R C, et al. Internal erosion during soil pipeflow: state of the science for experimental and numerical analysis[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 465-478.

[30] 李家星, 赵振星. 水力学[M]. 2 版. 南京: 河海大学出版社, 2001.

[31] 范钦珊, 唐静静, 刘荣梅. 工程力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[32] Qu S, Qin Z, Xu Y, et al. High spatial resolution investigation of OFDR based on image denoising methods[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18871-18876.

(收稿日期: 2025-02-19 编辑: 彭桃英)