

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.003

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 Yu-long, 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.)

基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测

何宁¹, 丁勇², 吴玉龙², 周彦章¹, 李登华¹, 何斌¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要:渠道堤坝普遍存在渗透变形及渗漏破坏等工程问题,传统大坝及岸堤安全监测技术测点分散、容易漏测。在介绍分布式光纤测温技术原理的基础上,通过室内试验和现场原型试验,开展了分布式光纤测温技术方法比选、测量精度和稳定性分析、渗漏监测及分析方法、常规监测技术对比分析、工程实践应用等研究,论证了分布式光纤测温技术应用于堤坝渗漏监测的可行性和适用性。布里渊测温系统受温度和应变影响,测值波噪明显,光纤埋设及保护要求较高,拉曼测温系统可测得绝对温度,其测温稳定性及精度均优于布里渊测温系统;加热法和梯度法监测渠道堤坝渗漏在技术上均可行;分布式光纤测温技术具有监测距离长、空间分辨率高、远程线性测量等特点,在渠道堤坝渗漏监测实践应用中具有显著的技术优势。

关键词: 分布式光纤测温; 堤坝; 渗漏; 室内试验; 现场原型试验

中图分类号: TV641.2; TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)01-0020-08

我国现有堤防总长近30万km,其中江河干堤总长约6万km;已兴建各类水库大坝近9万座,其中90%以上为土石坝^[1-2],江河渠道堤防、水库大坝在防汛抗旱、农业灌溉、供水及发电等方面发挥着巨大的社会经济效用。受早期勘测、设计和施工等技术水平限制,上述渠道堤防、水库大坝容易出现或已经发生包括流土、管涌、渗透破坏等渗漏现象和差异沉降、位移破坏等变形在内的安全稳定性问题及隐患^[3]。

导致渠道堤防、水库大坝存在安全稳定性问题或发生灾难性破坏的原因多且复杂,其中渗透变形与渗漏破坏占较大比重^[4-7]。如土石坝最容易受到渗透变形威胁,近32%的安全事故由渗漏破坏所引起^[8],而我国90%以上的堤防溃决灾害因渗漏破坏造成^[9],堤防大坝渗漏监测工作显得尤为重要。因堤防大坝大多具有长距离线性分布的工程特点,传统的大坝或岸堤安全监测技术存在测点少、点状分布、成本高等原理性缺陷,无法全面满足堤防大坝渗漏监测的技术需要,容易发生危险区域的漏测问题,存在安全隐患。因堤坝渗流不可避免,其渗漏监测的关键在于能够及时、准确地探测出堤坝内渗漏位置、流量大小以及渗漏范围。

传统堤坝渗流监测主要借助于测压管、渗压计及量水堰等技术手段,分别通过渗透压力和渗流量来监测其渗流异常情况。因堤坝内温度场在渗流场作用下表现为周期性平稳分布,堤坝渗流异常将引起温度场的局部异常,通过监测渗流作用下堤坝内温度场的分布及变化过程或异常现象,可以判断出堤坝内的渗流异常情况即渗漏发生。

基于分布式光纤温度传感技术的渗漏监测系统随着分布式光纤测温技术的日益完善,逐渐应用于堤坝渗漏监测。堤坝中预先埋设分布式测温光纤,渗流异常或渗漏发生时,渗流场变化必然引起温度场的异常变化,利用分布式测温光纤测得温度场异常区域,可以精确定位堤坝渗漏地点或区段。本文通过原理介绍、光

收稿日期: 2014-06-05

基金项目: 水利部“948”计划资助项目(201204); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y312010, Y312012, Y314003)

作者简介: 何宁(1969-),男,江西高安人,教授级高级工程师,主要从事岩土工程监测及检测技术、软土特性及其改良技术等研究。E-mail: nhe@nhri.cn

纤测温稳定性室内试验及渗漏监测原型试验,较为系统地论证了分布式光纤测温技术应用于堤坝渗漏监测的技术可行性,得到初步应用成果,对于丰富和完善堤坝渗漏监测技术手段具有理论价值及实践意义。

1 分布式光纤测温原理

光在光纤中传播,会发生散射,通常散射光被分为3种,即瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光。基于上述3种散射原理,分布式光纤温度传感系统也有3种。

基于瑞利散射的测温技术使用的特殊光纤^[10]相比普通通信光纤寿命较短,测量温度的稳定性也不如普通光纤,这种光纤测温系统在实验室研制成功之后,并未得到广泛应用,而是被性能更为优良的光纤测温技术所取代。

分布式光纤拉曼测温系统利用光纤背向拉曼散射的温度效应进行测温,拉曼散射光是由两种不同波长的斯托克斯光和反斯托克斯光组成的。分布式光纤拉曼测温系统中,温度对反斯托克斯光强的影响最敏感,瑞利光、斯托克斯光以及反斯托克斯光本身都可以作为参照信号。分布式光纤拉曼测温系统中,光源为脉冲激光,之后经过波分复用器耦合,进入温度测试区的传感光纤中各点上发生散射,后向散射光经波分复用器分离得到反斯托克斯光(包含了温度信息)和参考光。光信号到电信号的转化和放大由光电探测器实现,电信号通过数据采集卡采集,在计算机完成数字信号的处理,最终完成对待测温度场的测量^[11]。

布里渊散射由光子与声子的非弹性碰撞产生,散射光的频率发生变化,变化的大小与散射角和光纤的材料特性有关,而与布里渊散射光频率相关的光纤材料特性主要受温度和应变的影响,因此通过测定脉冲光后向布里渊散射光的频移就可实现分布式温度、应变的测量。光纤中布里渊散射信号的布里渊频移和功率与光纤所处环境温度和承受的应变在一定条件下呈线性关系^[12],基于布里渊散射的测温技术是利用该线性关系,通过对传感光纤中的布里渊增益谱信号进行检测,实现对传感光纤温度的分布式测量。

2 光纤测温稳定性室内试验

为分析确定分布式光纤拉曼测温系统和布里渊测温系统的测温稳定性,开展了这两种分布式光纤测温系统的室内测试试验。

首先,将50 m普通单模(布里渊测温系统)和多模(拉曼测温系统)测温光纤分别展开并平铺在恒温室地面上,静置24 h;然后,用熔接机将跳线接头与测温光纤熔接相连,并做好熔接点及接头的保护;最后,跳线接头分别与分布式光纤测温系统设备接口连接,进行多次连续测量。

室内试验中两种测温系统的采样间隔均设置为0.5 m,即每0.5 m一个测值,共测得100个点的测值,试验过程恒温室的温度为7.9℃。两种测温系统分别同时测量7组数据,拉曼测温系统取中间段40 m测值,即80个点的温度值进行分析计算,其测量结果如图1。

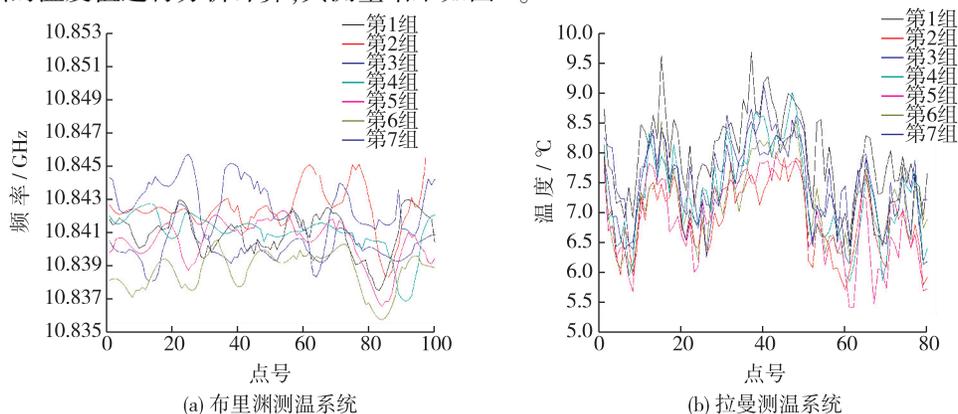


图1 布里渊和拉曼测温系统测温结果

Fig. 1 The measured results of Brillouin and Raman temperature measurement system

布里渊测温系统中频率变化 0.001 GHz 时测得温度变化为 1 °C, 图 1 中布里渊系统 100 个测点频率值(温度值)的 7 组测温结果, 经标准差分析后, 表明每个点 7 个温度测值的标准差变化范围为(1~3) °C, 其平均值为 1.77 °C, 室内试验可测得该布里渊测温系统对这种普通单模测温光纤的测温误差为 2 °C。

拉曼测温系统中多模光纤沿线上 80 个测点的 7 组温度测值间存在差异(图 1), 且每个点温度测值的增大或减小是随机的, 其温度变化范围在 1 °C 以内; 对其 80 个测点的 7 组温度值进行标准差分析, 每个点 7 个温度测值的标准差变化范围为(0.3~0.7) °C, 其平均值为 0.47 °C, 室内试验可测得该拉曼测温系统对这种普通多模光纤的测温误差为 0.5 °C。

光纤测温稳定性室内试验测试结果表明, 分布式光纤拉曼测温系统的测温稳定性和精度均优于分布式光纤布里渊测温系统。

3 堤坝渗漏监测原型试验

为论证分布式光纤测温技术应用于渠道堤坝渗漏监测的适用性及可靠性, 并为该技术的推广应用提供理论依据和实践参考, 在南水北调中线工程京石线邢台段试验场地, 开展了分布式光纤测温技术用于渠道堤坝渗漏监测的原位模型试验研究。

原型试验的主要内容有: 蓄水前, 布里渊测温系统加温及降温的光纤定位测试试验; 蓄水后, 拉曼及布里渊测温系统监测效果的对比测试试验; 分别采用“梯度法”和“加热法”监测分析堤坝渗漏; 对比分析分布式光纤测温技术与常规渗漏监测技术的应用。

3.1 原型试验方案及光纤埋设

原型试验在南水北调中线工程京石线邢台段输水渠道临近区域开展, 以确保渠道断面、结构型式、土料、施工工艺及施工单位等均与渠道原型一致。渠道堤坝渗漏监测原型试验以南水北调输水渠道临近的邢台七里河北岸弃土场为试验场地, 在场地原有 2 m 厚的堆土层上填筑外边长 82 m(渠底内边长 50 m)、外边宽 38 m(渠底内边宽 6 m)、高 4 m 的渠道; 渠道堤底宽 16 m, 堤顶宽 4 m, 渠道内、外坡比均按 1:1.5 放坡; 在渠道内部铺设防渗土工膜。渠道填筑完成后, 引附近河水或其他水体入渠, 蓄水至设计深度 3.5 m, 模拟并监测渠道堤坝的渗漏情况。

渠道填筑过程中, 紧密结合施工步骤, 分别在渠道地基和堤坝中按设计方案布置并埋设了布里渊和拉曼测温光纤, 以及常规监测仪器(电阻式温度计和测压管)。原型试验渠道断面及平面图, 测温光纤及常规监测仪器的布置情况如图 2~4。

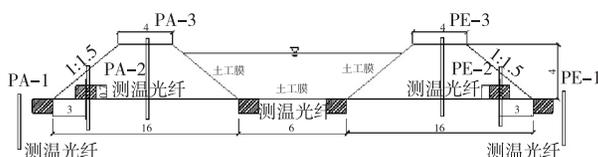


图 2 测温光纤及常规监测仪器布置剖面(单位:m)

Fig. 2 Section plan of temperature measurement optic fiber and conventional monitoring instrumentation (unit:m)

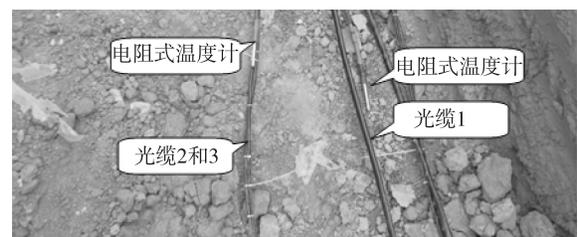


图 3 原型试验温度传感光纤埋设

Fig. 3 Installation of temperature measurement optic fiber in test channels

原型试验于 2012 年 7 月底开始填筑施工和埋设仪器, 因 8 月中旬至 9 月中旬频繁降雨停工及场地晾晒, 9 月下旬恢复施工, 至 10 月中旬填筑结束并蓄水至设计水位, 渗漏监测原型试验的观测工作至 2013 年 9 月结束, 按设计方案取得了相应的观测结果。

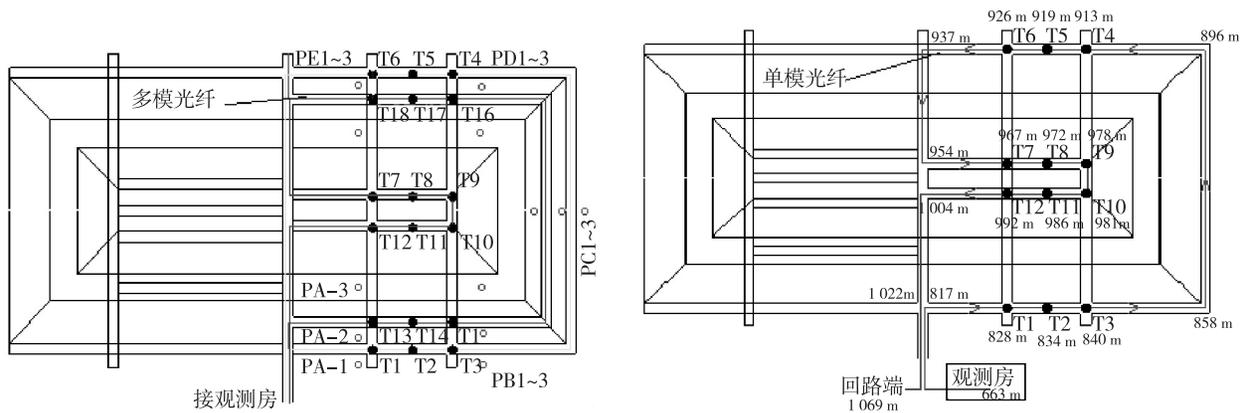


图 4 测温光纤及常规监测仪器平面布置

Fig. 4 Plane layout of temperature measurement optic fiber and conventional monitoring instrumentation

3.2 布里渊测温光纤定位试验

为验证分布式光纤测温技术应用于渠道堤坝渗漏监测的温度敏感性,以及测温光纤的温度感应在其长度距离上的位置准确性,原型试验蓄水前,分别开展了对布里渊测温光纤局部某段加温及降温的光纤定位测试试验。

定位试验中,对已埋设好的、长约 140 m 的测温光纤裸露在外的某段用毛巾裹覆,分别用热水或冷水浇灌,使得该段光纤被加温或降温,通过分布式光纤布里渊测温系统测得光纤发生加温或降温的幅度及位置;并利用该测温光纤塑封层表面的长度标识,记录该加温或降温段的长度位置,以验证布里渊测温光纤的温度敏感性和定位准确性。布里渊测温光纤定位试验测试结果如图 5。

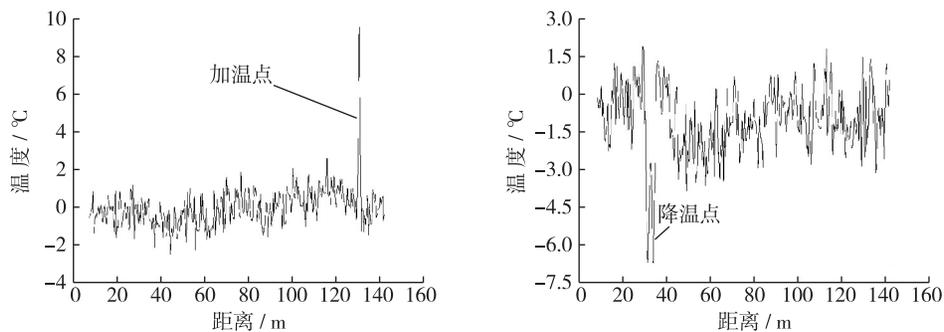


图 5 分布式测温光纤加温及降温定位试验温度曲线

Fig. 5 Temperature curves of temperature measurement optic fiber during heating and cooling

根据蓄水前测温光纤定位试验测试结果,布里渊测温光纤对局部温度升高及降低具有较为显著的敏感性,说明利用分布式光纤测温技术测量及监测光纤沿线的温度变化是可行的,并且可以准确定位温度升高或降低的位置。定位试验所得到的“温度变化量-距离”曲线中,未进行加温或降温的布里渊测温光纤区段的温度变化基本围绕温度 0 °C 基准线上下波动,波动幅度 ± 2 °C,但噪波略为明显。

3.3 拉曼及布里渊测温对比试验

原型试验渠道内蓄水至设计水位后,随即采用分布式光纤拉曼测温系统和布里渊测温系统开展了渠道堤坝渗漏监测的连续测量和对比分析,两种分布式光纤测温系统的典型测量结果如图 6~7。

分布式光纤拉曼测温系统的典型温度曲线如图 6,结合图 4 中多模(拉曼测温系统)测温光纤的平面布置,其温度曲线可分为 6 个不同状态下的区段:①0~7 m 段为监控室内光纤段,本次观测时该段光纤所测的

室内温度高于室外;②7~40 m 段为监控室后盘成一圈的光纤段,因长期位于背阴处,温度略低;③40~60 m 段为监控室后引至通讯沟之前的光纤段,长约 20 m,受阳光直射,温度上升较快;④60~160 m 段为通讯沟中光纤段,一段位于背阴处,一段在水里,一段被土体回填覆盖(有工程车辆经过),情况复杂,温度波动明显;⑤160~360 m 段为渠道地基内的光纤段,即目标测试段光纤,长约 200 m,光纤位于地面以下约 1 m 深,由于埋深和土体湿度存在差异,温度变化较为平稳,略有波动;⑥360~404 m 段为从渠道地基内引出的光纤段,部分埋设在通讯沟内,部分盘成一圈放置在通讯沟外,受阳光照射差异等因素影响,温度波动较大。原型试验中分布式光纤拉曼测温系统测得光纤沿线的温度分布规律符合该测温光纤的平面布置情况(图 6),即拉曼测温系统能够较为理想地反映光纤沿线的温度分布及变化情况。

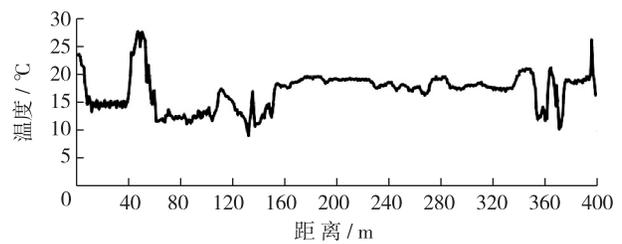


图 6 拉曼测温光纤的典型温度曲线

Fig. 6 Typical temperature curve of Raman temperature optic fiber

因测温原理存在差异,分布式光纤布里渊测温系统无法直接测出光纤上某点温度值,需通过两次测量测得其温度变化量。根据布里渊测温系统典型温度曲线(图 7),当连续两次测量时间间隔较短、被测区温度保持恒定时,温度变化量-距离($\Delta T-D$)曲线基本围绕温度 0 °C 基准线上下波动,其中内圈光纤温度变化量波动幅度 ± 3 °C,外圈光纤温度变化量波动幅度 ± 4 °C,且噪波严重,该测值曲线明显较拉曼测温系统的温度曲线粗糙。

根据蓄水后两种测温系统的典型测量结果,将出分布式光纤拉曼测温系统的测温稳定性和分辨率均优于分布式光纤布里渊测温系统。

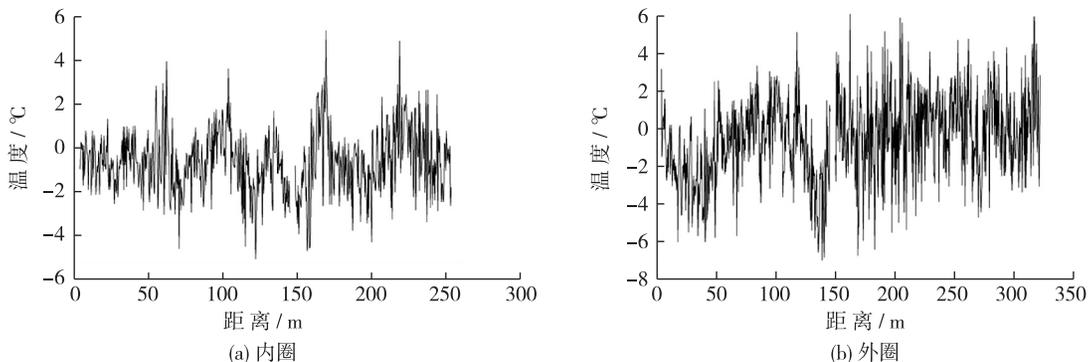


图 7 布里渊测温光纤的典型温度变化曲线

Fig. 7 Typical temperature curves of Brillouin temperature optic fiber

3.4 梯度法及加热法监测堤坝渗漏

基于分布式光纤测温技术的渠道堤坝渗漏监测可采用“梯度法”和“加热法”测量分析堤坝渗漏情况,通过拉曼测温系统,以 2013 年 6 月 20 日“梯度法”全天每隔 2 h 自动测得堤坝内目标段的共 12 组测值和 6 月 22 日“加热法”的测量对比结果为例,分析分布式光纤测温技术应用于渠道堤坝渗漏监测的适用性。图 8 为 2013 年 6 月 20 日“梯度法”12 组温度曲线;图 9 为 6 月 22 日通过定制在测温光纤内的加热电缆以 20 A 电流加热 30 min“加热法”加热前后的温度及其差值曲线。采用“梯度法”分析拉曼测温系统 2013 年 6 月 20 日全天每隔 2 h、目标测试段共 12 组温度测量结果,全天 24 h 内目标测试段连续两次测量任一点的温度变化均小于 0.5 °C,即测温敏感性为 0.5 °C,从理论上说明土体与水体间温差超过 0.5 °C 的渗流,均可被测得。由于堤坝内水体与土体间存在温度差异,堤坝如发生渗漏,渗漏点周围土体温度场将发生改变,渗漏引起土

体温度改变超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可被拉曼测温系统所测得,表明基于分布式光纤的拉曼测温技术用于堤坝渗漏监测具有其技术可行性及测量精度。“梯度法”12组温度曲线(图8)显示全天24h内测得目标段多模(拉曼测温系统)测温光纤沿渠道内、外圈全程的温度升降梯度一致性良好,蓄水8个月以来的测量数据表明拉曼测温光纤沿线的温度升降梯度具有一致性,蓄水后渠道堤坝内尚未发生明显渗漏。

采用“加热法”分析蓄水后拉曼测温系统加热前后的温度及其差值曲线,并以2013年6月22日测量对比结果为例(图9)。加热前后,目标测试段拉曼测温光纤(160~360m区段)温度变化基本一致;通过定制在测温光纤内的加热电缆以20A电流加热30min后,该段光纤上的任一点温度升高均为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。温度升高不一致的区段主要因目标测试段以外的光纤处于通讯沟中或裸露在外,使外界环境对加热效果存在差异性影响,如7~40m段温度升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,即因其置于空气中升温较快。采用“加热法”测量分析时,如果渠道堤坝内存在渗漏或渗流异常,测温光纤在该处受其影响,将发生升温异常现象,即该处比其临近的测点升温幅度小,加热前后的温度差-距离($\Delta T-D$)曲线必然存在下凹点。图9中的蓝色曲线为加热前后温度差值-距离($\Delta T-D$)曲线,该曲线在目标测试段内为一平线,说明蓄水后渠道堤坝内尚未发生明显的渗漏或渗流异常情况。

原型试验中完成了多组不同加热时间、不同加热电流的“加热法”分析试验,其测量结果同6月22日温度及其差值曲线变化规律基本一致,仅温度差值随加热时间长短、加热电流大小而存在差别,加热时间长或加热电流大时,目标测试段内测得温度升高幅度也相应增大。

3.5 常规渗漏监测技术对比分析

原型试验渠道填筑施工过程中布置并埋设布里渊及拉曼测温光纤的同时,在渠道地基和堤坝中设计位置埋设了以电阻式温度计和测压管为主的常规渗漏监测仪器。在蓄水完成后的8个月内,渠道堤坝中不同位置的18支电阻式温度计测得堤坝土体内各代表性测点的温度升降随季节变化而变化,具有明显的季节性变化规律,各测点间的温度升降变化过程基本同步;捆扎固定在测温光纤上的温度计测值变化与对应位置测温光纤测点的温度变化规律基本一致。同期观测的A~E共5个测压管监测断面,从堤顶、坡面中部、至外坡脚P1~P3各3支,共15支测压管中始终处于干涸状态,常规渗漏监测技术的观测资料也说明蓄水后渠道堤坝内尚未发生明显渗漏。

综合分析比较分布式光纤测温渗漏监测技术与常规渗漏监测技术,两者在渠道堤坝渗漏监测方面均具备技术可行性,但因分布式光纤测温技术的分布式特性,最小空间分辨率可达 0.1 m ,可以避免常规渗漏监测技术可能发生的漏测问题;而分布式光纤测温技术可实现长距离监测,监测长度最大可达 32 km ,也可实现远程自动化监测测量,且分布式光纤传感技术的抗电磁干扰及抗雷击能力较常规监测技术更为优良,在渠道堤坝渗漏监测方面分布式光纤测温技术具有更为明显的优势。

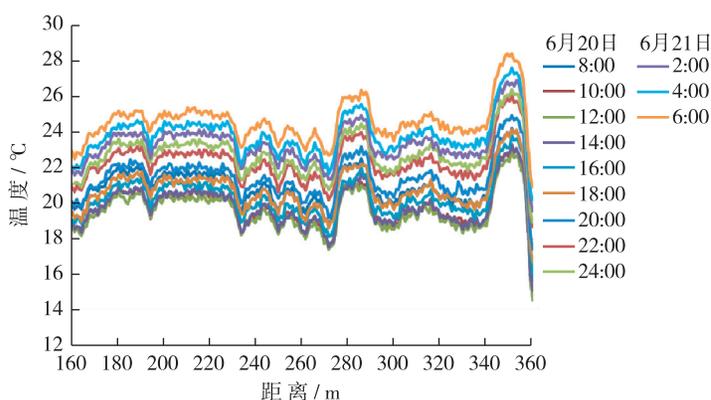


图8 拉曼测温系统测得温度曲线

Fig. 8 Temperature curves of Raman temperature optic fiber

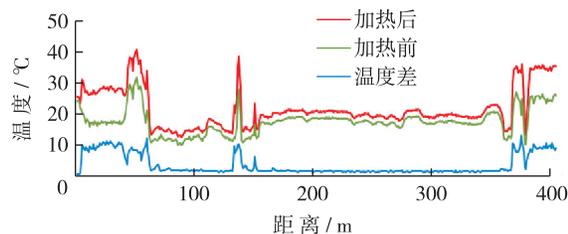


图9 加热前后拉曼测温系统测得温度曲线

Fig. 9 Temperature curves of Raman temperature optic fiber while heating

4 结 语

针对渠道堤防、水库大坝普遍存在渗透变形与渗漏破坏等工程问题,传统的大坝或岸堤安全监测技术测点分散、容易漏测,本研究在介绍分布式光纤测温技术原理的基础上,通过室内试验和现场原型试验,开展了分布式光纤测温技术方法比选、测量精度和稳定性分析、渠道渗漏监测及分析方法、常规监测技术对比分析、工程实践应用试验等研究,论证了分布式光纤测温技术应用于堤坝渗漏监测的可行性和适用性,主要结论如下:

(1) 布里渊测温系统受温度和应变影响,室内试验测值敏感性为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,实际渗流监测中温度测值敏感性为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,且测值波噪明显,光纤埋设及保护要求较高;拉曼测温系统可测得绝对温度,测值敏感性可达到 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其测温稳定性及精度均优于布里渊测温系统,采用分布式光纤测温技术监测渠道堤坝渗漏应以拉曼散射原理的多模光纤温度监测系统为宜。

(2) 渠道堤坝内水体与土体间存在温度差异,堤坝如发生渗漏,渗漏点周围土体温度场将发生改变,采用“梯度法”,渗漏引起土体温度改变超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可被拉曼测温系统测得,分布式光纤的拉曼测温技术用于堤坝渗漏监测的可行性较高,能够满足测量精度要求。

(3) 采用“加热法”通过拉曼测温系统监测渠道堤坝渗漏能够实现更高的测量敏感性,但在经济成本、设备安全、人员安全及自动化测量方面要求更高也更为复杂,利用“梯度法”24 h 自动监测的最大温差曲线代替“加热法”温差曲线,能够达到近似的监测效果,为降低成本和保障安全,长距离渠道堤坝渗漏监测建议采用“梯度法”,“加热法”适用于坝长较短、测量精度较高的堤坝渗漏监测。

(4) 对比分析常规渗漏监测技术方法,分布式光纤测温技术具有监测距离长、空间分辨率高、线性测量、远程自动化、抗干扰能力强等特点,在渠道堤坝渗漏监测实际应用中具有更为显著的技术优势。

参 考 文 献:

- [1] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.(CHEN Sheng-shui. Breach mechanism and simulation of breach process for earth-rock dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.(in Chinese))
- [2] 柯礼丹, 牛运光. 我国大坝安全问题及展望[M]. 北京:水利电力出版社,1981.(KE Li-dan, NIU Yun-guang. Dam safety problems and prospects in China [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1981.(in Chinese))
- [3] 杨杰, 吴中如. 大坝安全监控的国内外研究现状与发展[J]. 西安理工大学学报, 2002, 18(1): 26-30.(YANG Jie, WU Zhong-ru. Present condition and development of dam safety monitoring and control researches home and abroad[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2002, 18(1): 26-30.(in Chinese))
- [4] 张光斗, 王光纶. 水工建筑物[M]. 北京:水利电力出版社,1994.(ZHANG Guang-dou, WANG Guang-lun. Hydraulic structure [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.(in Chinese))
- [5] 张人权. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,2011.(ZHANG Ren-quan. The basis of hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 2011.(in Chinese))
- [6] 刘杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 714-718.(LIU Jie, XIE Ding-song. Advances of earth-rock dam seepage control theory in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 714-718. (in Chinese))
- [7] 白永年. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.(BAI Yong-nian. New technology of dam reinforcement for seepage in China[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001.(in Chinese))
- [8] 吴中如, 沈长松, 阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,1990.(WU Zhong-ru, SHEN Chang-song, Ruan Huan-xiang. Safety monitoring theory of hydraulic structure and its application[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1990.(in Chinese))
- [9] 姜帆, 宓永宁. 土石坝渗流研究发展综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2006(4): 94-97.(JIANG Fan, MI Yong-ning. Development of research on seepage of embankment dam[J]. Journal Water Resources and Architectural Engineering, 2006(4): 94-97.(in Chinese))

- [10] HARTOG A H. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibres[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1983(3):498-509.
- [11] 国兵,牟志华,姜明顺,等. 单模光纤分布式喇曼温度传感系统设计[J].光通信研究, 2009(4): 48-49. (GUO Bing, MOU Zhi-hua, JIANG Ming-shun, et al. Design of a single-mode fiber distributed Raman temperature sensor system[J]. Study on Optical Communications, 2009(4): 48-49.(in Chinese))
- [12] 李建蜀,江毅,黄尚廉.光纤拉伸应变分布测量的新方法-布里渊光纤时域分析技术[J]. 半导体光电, 1996, 17(1): 56-59.(LI Jian-shu, JIANG Yi, HUANG Shang-lian. A novel technology for measurement of tensile strain distribution in optical cable—Brillouin optical fiber time domain analysis technique[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1996, 17(1): 56-59.(in Chinese))

Experimental study of distributed optical fiber temperature measurement technology for measuring leakage in embankment dam

HE Ning¹, DING Yong², WU Yu-long², ZHOU Yan-zhang¹, LI Deng-hua¹, HE Bin¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: The technology of temperature measurement by distributed optic fiber is introduced in this paper. By laboratory tests and field tests, comparison and selection of distributed temperature measurement optic fiber, analysis of its accuracy and stability, monitoring and analyzing leakage in the embankment dam using distributed optic fiber, comparing with conventional monitoring technology, and its engineering applications are carried out. Based on these tests, the feasibility of and applicability to the monitor of the leakage in the embankment dam using distributed optic fiber are discussed. The technology of temperature measurement by distributed Raman optic fiber, whose sensitivity of temperature is $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, is feasible in monitoring leakage in the embankment dam using temperature gradient analysis method and heating method. Comparing with the results measured by conventional monitoring technology, the accuracy of data measured by distributed Raman optic fiber and its reliability of monitoring leakage in the embankment dam have been verified. Monitoring leakage in the embankment dam using distributed optic fiber has obvious advantages, such as distributedness, long range and anti-interference.

Key words: technology of temperature measurement by distributed optic fiber; embankment dam; leakage; laboratory tests; filed tests