

# 心墙堆石坝光纤渗漏监测技术研究

谭志伟, 胡灵芝

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 近年来, 快速发展的光纤技术为心墙堆石坝渗漏监测提供了全新解决方案。根据心墙堆石坝渗漏监测及光纤传感技术的基本原理, 提出光纤传感技术应用方式。通过动态仿真计算及模型试验验证了心墙堆石坝光纤渗漏监测技术的有效性, 可弥补了常规监测手段的不足, 具有很好的应用推广价值。

**关键词:** 心墙堆石坝; 渗漏破坏; 光纤; 监测; 糯扎渡水电站

## Study on Optical Fiber Seepage Monitoring Technology of the Vertical Core Rockfill Dam

Tan Zhiwei, Hu Lingzhi

(HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, Yunnan, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of optical fiber technology provides a new solution for the seepage monitoring of vertical core rockfill dam. According to the basic principles of the seepage monitoring and the optical fiber sensing technology, the application mode of optical fiber seepage monitoring is proposed. Through dynamic simulation and model tests, the optical fiber seepage monitoring technology for vertical core rockfill dam is proved to be effective, and can eliminate the shortcomings of conventional monitoring tools. The new technology has higher value in application.

**Key Words:** vertical core rockfill dam; seepage damage; optical fiber; monitoring; Nuozhadu Hydropower Station

中图分类号: TV698.12(274)

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2011)03-0083-03

## 0 引言

心墙堆石坝安全监测的核心目标在于监测渗漏破坏和滑坡, 预防渗漏破坏的发生。集中渗流和管涌事故的发生和发展, 具有隐蔽性、局部性和时空随机性。对于这种时空随机性很强的“细部病灶”的探测难度很大。常规的渗流监测设备难以可靠地捕捉渗漏和管涌的早期征兆信息, 无法达到不漏测漏报的要求。

近年来, 快速发展的光纤技术为心墙堆石坝渗漏监测提供了全新解决方案。通过研究开发光纤渗漏监测系统, 可以提高心墙堆石坝的渗漏监测水平, 防患于未然。

## 1 心墙渗漏的主要诱因和风险因素

(1) 水力劈裂。由于心墙堆石坝的坝壳料变形模量相对心墙高, 心墙通常存在一定程度的拱效应, 导致心墙上游面应力水平较高, 可能诱发水力劈裂的“楔劈效应”。

(2) 土体裂缝。根据工程统计<sup>[1]</sup>, 在大型水库大坝出现的质量问题中属于土石坝裂缝方面的约占 39%, 几率相当高。按裂缝的成因划分, 除了水力劈裂裂缝以外, 还有多种因素可能导致裂缝。如, 陡坡、界面剪应力区(剪切屈服带)和高应变梯度区最容易滋生裂缝。

(3) 心墙和反滤层局部质量缺陷。土体发生渗透破坏的判别式是  $j \geq j_{cr}$  ( $j$  为水力坡降,  $j_{cr}$  为土体抗渗强度)。二者都是高变异性的随机量, 渗透破坏与否是多重随机事件的组合。心墙内一旦出现局部质量缺陷就可能形成冲蚀。心墙-反滤联合防渗能力也会因局部质量缺陷而遭受局部破坏, 成为“病灶”部位。

(4) 渗透变形受多种因素影响。试验表明, 渗透稳定性随围压增大而减小, 且水头快速增加, 临

收稿日期: 2010-12-12

作者简介: 谭志伟(1978—), 男, 重庆人, 工程师, 主要从事水工建筑物的安全监测工作。

界坡降也会减小。这说明除防渗土与反滤料的粒径比及粒径级配等因素外,冲蚀破坏还受到土体应力应变状态、水力条件的影响。总之,冲蚀破坏受到众多因素的影响,尚蕴含一些未知性和不确定性。

## 2 心墙堆石坝渗漏监测的基本原理

水体从坝体中流过,当两种介质存在温度差时,必然产生热量交换。由于土石体具有较低的热传导特性,且温度场分布较均匀;微量渗流存在时,流动速度缓慢而稳定,土水间有充足的时间和充分的接触空间改变温度场。

当土石体内存在大量水流动时,土石体热传导强度将随之发生改变,土石体传导热的传递将明显被流体运动所引起的对流热的传递所超越,由此引起温度场变化。在研究该处正常地温及参考水温后,就可确定监测点处温度异常是否由渗流水活动引起,这一变化可作为渗流探测的指标特征,从而实现对比体内集中渗漏点的定位和监测<sup>[2]</sup>。

## 3 光纤传感技术的应用

对于心墙堆石坝温度场的监测,常规监测手段存在网络覆盖面窄、精度不高等局限性,而目前迅速发展的光纤传感技术提供了解决方案。

### 3.1 光纤传感技术的基本原理

光纤传感技术较传统仪器具有灵敏度高、适应环境能力强、易于集成以及自动化程度高等特点。光纤传感技术中光纤光栅系统(FBG)应用较为广泛。该系统利用光纤的纤芯材料的光敏性,采用紫外光写入技术在纤芯中生成空间相位光栅。在温度变化情况下纤芯长度会改变,从而导致光栅周期发生变化,其反射波长会偏移;由此建立波长变化与温度的对应关系。

### 3.2 光纤传感技术的应用方式

为监测温度场,将多支光纤光栅传感器串联在一根光缆上。每支传感器的中心波长互不相同,由二次仪表(主机)光栅解调仪进行检测,该机发射宽带光,入射于FBG网络或阵列,接收各个FBG的反射光,测出各个波长偏移量,即可确定FBG埋设范围内的温度场。

光纤监测系统能够观测到渗漏的基本前提是,渗漏产生的异常温度场与正常渗流的温度场存在明显差异。根据库水与传感器埋设介质之间的温差大小,渗流监测主要采用以下两种办法:

(1) 梯度法。当库水与传感器埋设点的土体介质之间存在一定温差时,集中渗流的对流散热(或加热)作用,就会使渗流集中通道附近的温度场与

正常渗流区之间产生温差或温度梯度,从而指示渗漏的出现。

(2) 加热法。当渗漏水温与埋设点地温之间温度梯度小时,可加铺一条加热电缆(或其他电热装置)与传感光缆或光纤传感器并行。施测时通电预热,传感器升温偏低者指示渗流异常。

图1为糯扎渡水电站心墙堆石坝坝体一坝基三维温度场空间云图。计算成果表明,心墙上、下游面部位的常年温度分别为21℃和23.5℃。这说明,心墙上、下游面的温差较小,相差仅约2.5℃,相应的温度梯度也较小。因此,需要采用加热法放大监测信号。

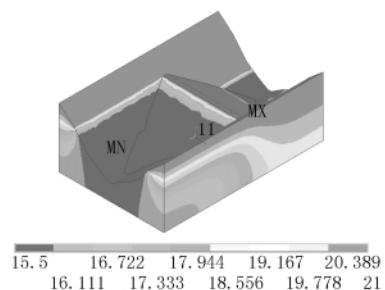


图1 糯扎渡水电站坝体一坝基三维温度场空间云图

## 4 渗流—温度耦合分析

通过对所构建光纤渗漏监测模型在不同流速工况下渗流—温度双场耦合的仿真计算,得到的温升时程曲线见图2。从图2可知,在通电加热初期,温度上升很快,随后温升大体按指数型曲线的规律趋缓而最终趋于稳定。

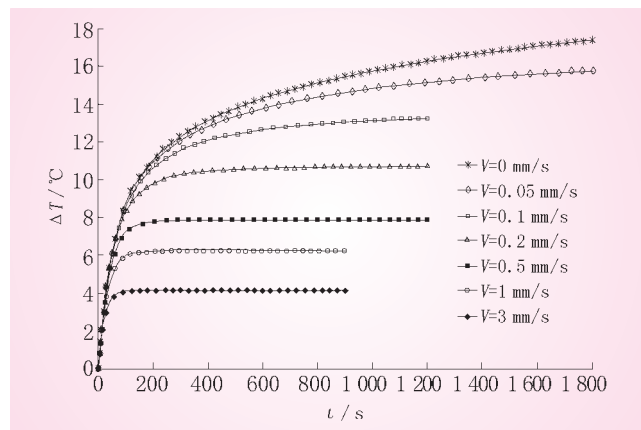


图2 温升时程曲线

稳定温升与流速的关系曲线见图3。图3显示,渗水静止时,稳定温升约达18℃;渗流流速0.05 mm/s时温升16℃;流速0.1 mm/s温升13℃;流速0.2 mm/s时温升10.5℃;流速1~3 mm/s时,温升4~6℃。由此可见,温升与流速关系十分明显。在一定条件下,渗流速度成为温升的惟一控制因素。

因此,这从理论上确立了渗流流速与光电传感单元温升之间的一一对应规律,从而依据观测到的温度异常区,把相应的异常渗漏凸显出来。故上述理论分析及动态仿真成果再次证实了用光纤传感监测渗流的可行性。

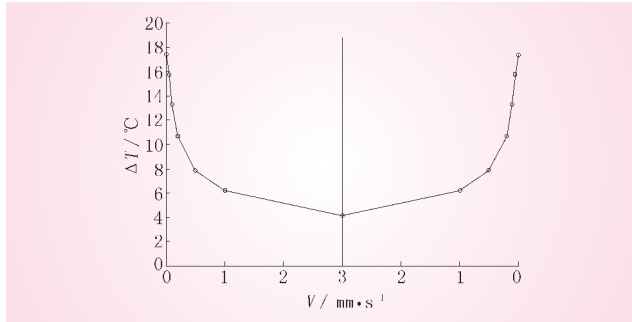


图 3 稳定温升与流速的关系

## 5 心墙渗流识别方法

大坝土质防渗体的抗渗安全取决于心墙防渗料与反滤层的联合抗冲蚀作用和能力。心墙的任何一处防渗料的渗透破坏,无不存在一个发生、发展过程,渗流冲蚀一旦开始,就存在两种发展过程和趋势:当反滤机制失效时,冲蚀越来越快,呈恶性循环,最终导致重大事故甚至溃坝;而当冲刷的土粒或土团一旦被反滤料所截留,则渗流通道被逐渐淤塞而自行愈合。

通过构建光纤渗流监测模型,对心墙堆石坝渗流状态进行了模型试验。试验设定了以下 3 种工况:①工况 I——正常渗流;②工况 II——局部渗透冲蚀逐步自愈;③工况 III——局部渗透冲蚀逐步扩展。各工况渗流速度  $V$  值及其演化情况见表 1。

表 1 各工况不同历时渗流速度  $V$

工况	渗流速度 $V/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
I	0~24 h: $V=0.1$ (稳定值)
II	0~4 h: $V=0.1$ ; 4~8 h: $V$ 线性增至 0.5; 8~12 h: $V$ 线性增至 0.7; 12~16 h: $V$ 线性降为 0.5; 16~20 h: $V$ 线性降为 0.1, 并维持不变。
III	0~6 h: $V=0.1$ ; 6~12 h: $V$ 线性增至 0.5; 12~18 h: $V$ 线性增至 1.1; 18~24 h: $V$ 线性增至 2。

大坝渗流状态与温度场对应演化规律的数值仿真结果见图 4。试验成果如下:

(1) 工况 I, 时间零点通电加热后, 约 0.5 h 到达峰值  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 约 2 h 降至  $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  并维持不变, 这代表了渗流流速小且稳定的情况。这时通电后各测点温度升至  $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 空间分布均匀, 时间上保持稳定。据此, 当工程中观测到类似的温度信息时, 可

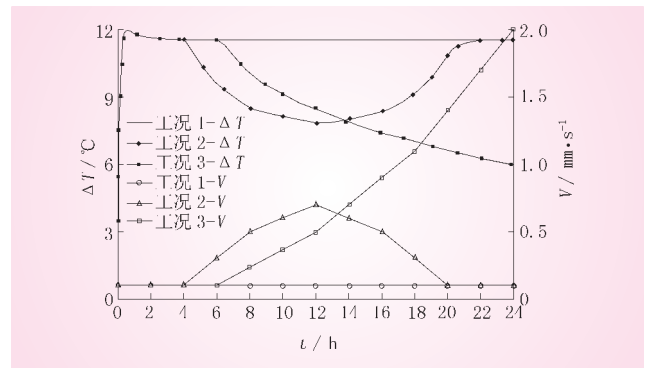


图 4 大坝渗流状态与温度场对应演化规律的数值仿真结果

判断心墙渗流维持常态, 大坝运行正常。

(2) 工况 II, 流速由小而大、再变小, 导致相应的温度变化呈碗状。其流速增大至恢复常态历时 16 h, 温度异常历时约 22 h。碗底处的温度最低点 ( $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 比流速最高点滞后约 0.5 h, 由此可以判断大坝经历了冲蚀后逐步自愈。

(3) 工况 III, 流速逐步增加造成的温度后果是温度值持续下降, 至 24 h 时已降至  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 比常态渗流场的相应温度低了  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 由此表明大坝经历冲蚀后而逐步扩展的过程。

试验结果表明, 本系统所构建的渗流监测模型能够有效识别正常渗流、局部渗透冲蚀逐步自愈、局部渗透冲蚀逐步扩展等心墙渗流的不同状态, 能全过程监控大坝的渗流演变情况, 可有效地捕捉渗流异常的早期信号, 弥补了传统监测手段的不足。

## 6 结语

本文分析了心墙渗流的主要诱因和风险因素, 根据高心墙堆石坝渗流监测及光纤传感技术的基本原理提出了光纤传感技术应用方式。通过动态仿真计算及模型试验, 建立了光纤传感阵列温升与渗流流速之间的确定而明显的对应关系; 同时, 文中还给出了土石坝的 3 种基本的渗流状态——常态渗流、冲蚀自愈、冲蚀扩展的流速变化与温度变异之间的对应规律。

光纤渗流监测技术理论依据充分, 技术上可验证, 在心墙堆石坝渗流监测中具有创新性, 可以提高大坝监测技术水平, 具有较高的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 牛运光. 土石坝裂缝原因分析与防治处理措施综述[J]. 大坝与安全, 2006(5): 61-66.
- [2] 李端有, 陈鹏霄, 王志旺. 温度示踪法渗流监测技术在长江堤防渗流监测中的应用初探[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(增): 48-51.

(责任编辑 杨 健)