

基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量方法及应用

肖衡林 邓翔文 何俊 宋桂红

(湖北工业大学土木工程与建筑学院岩土与地下工程研究所 湖北 武汉 430068)

摘要 :详细介绍基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量系统与测量方法。结合思安江水库工程,提出测温光纤布置方案与布设工艺。在周边缝与 19 号和 15 号面板共布置 1 044.7m 传感光纤,采用分布式光纤温度测量系统对思安江水库不同时期与不同水位的库水温度进行测量,并分析测量数据。结果表明:库水温度曲线可分为快速下降、缓慢下降和稳定不变 3 个阶段,在距水面 60 m 以下库水温度保持在 11℃ 左右。最后,对该测量方法进行讨论,论证了该方法的可行性与可靠性。

关键词 :分布式光纤温度传感技术;库水温度;温度测量;思安江水库枢纽工程

中图分类号 :TU43 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)02-0085-04

Application of reservoir water temperature measuring method base on distributed optical fiber temperature sensing technology/XIAO Heng-lin, DENG Xiang-wen, HE Jun, SONG Gui-hong (*Institute of Geotechnical Engineering and Underground Construction, School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

Abstract :The reservoir water temperature measuring system and method based on distributed optical fiber sensing technology were introduced. The scheme and technology for the layout of sensing optical fibers were proposed with regard to Si 'anjiang Reservoir. The optical fibers 1 044.7 m in length were used in circumference joints and panel No. 19 and No. 15. The water temperatures of Si 'anjiang Reservoir at different time and water levels were measured by use of the proposed system, and the measured data were analyzed. It is concluded that the curve of the water temperature consists of three stages of fast variation, slow variation and steady state, and the water temperature maintains about 11℃ below the surface 60 m in depth. The feasibility and reliability of the proposed method are proved.

Key words :distributed optical fiber temperature sensing technology; reservoir water temperature; measurement; Si 'anjiang Reservoir

为了确定水电站厂房空调的取水口高程,计算混凝土坝体温度应力,需要知道不同时期坝前库水温度分布规律。然而,库水温度确定却很困难,它不仅与水库所在地的气温、天然来水的温度、流量和含沙量、地温有关,还与水库调节性能、泄水方式和泥沙淤积等有关,通过考虑这些因素来计算库水温度几乎不可行。目前国内外仍然没有较好解决库水温度预测的方法,我国采用规范推荐的统计经验公式和热量平衡法的计算结果均存在一定的误差和局限,特别是对于坝高超过 100 m 的大坝^[1]。因此,为了更好地确定库水温度的分布规律,为水工结构设计提供科学依据,实测工作仍必不可少。现阶段主要测量方法是在靠近库水的坝体表面埋设温度计,

通过布置的点式温度计来了解库水温度的变化规律。该方法存在以下缺点:①属于点式测量,不能得到完整的坝前温度分布曲线;②仪器埋设不便,随着监测点的增加,埋设复杂程度急剧增加,且不便监测;③成本较高;④影响坝体结构^[2]。分布式光纤温度传感技术可以完全解决以上问题,只要简单地将监测光纤敷设在需要测温处的坝体表面,便可以实现对坝前库水温度的实时动态监测,可以完整地得到整个近坝面断面的库水温度场。本文在介绍基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量系统的基础上,以思安江水库工程为例,讨论了测温光纤布置方案与布设工艺,对思安江水库不同时期与不同水位的库水温度进行测量,详细分析了测量数据,并对

基金项目:国家自然科学基金(50809026);湖北工业大学高层次人才计划(湖工科[2007]J)

作者简介:肖衡林(1977—),男,湖南衡阳人,副教授,博士,从事环境岩土工程、光纤传感技术在岩土工程中的应用及地下工程研究。

E-mail: xiao-henglin@163.com

该方法进行了讨论。

1 测量系统与测量方法

1.1 测量系统

测量系统由分布式光纤温度测量仪(DTS)与温度传感器2个部分组成。DTS测温精度为0.1℃。

1.1.1 DTS的组成^[3-4]

a. 激光组件:由带尾纤 MOCVD InGaAsP 高功率脉冲半导体激光器(出纤功率大于500 mW)和激光器驱动电源组成。

b. 光纤波分复用器:由1×3双向光纤耦合器(BDC)和波分复用器系统(多光束干涉型高隔离度光学滤光片)组成。

c. 光电接受、放大组件:由带尾纤、带前放的光雪崩二极管(APD)和高增益、宽带、低噪声主放大器组成。

d. 信号处理系统:由双通道高速瞬态(50 MHz)信号采集处理卡和信号处理软件组成。

e. 光纤和光纤绕组温度、应力、压力传感器。

1.1.2 温度传感器

光纤温度传感器是指线性分布光纤温度传感器和分布光纤绕组温度传感器。线性分布光纤温度传感器为外在的温度测量设备,根据需要,可以选用线性裸纤、外封塑料线性光纤和金属铠装线性光纤。分布光纤绕组温度传感器为仪器内测温设备,一般为金属铠装线性光纤。为了提高测量精度与抵抗外界干扰和损伤,温度传感器一般经常选用金属铠装光纤。

1.2 测量方法

a. 确定测量范围:根据实际工程情况与需要,确定测量库水温度的要求和范围。

b. 铺设并固定光纤:如果采用的是裸纤,建议采用黏结剂将裸纤牢固粘贴在坝体表面,如果采用的铠装光纤或外封塑料光纤则既可以采用黏结剂粘贴也可以采用金属卡将光纤固定在坝体表面。

c. 将光纤接头编号并引至监测室。

d. 检测光纤的通畅性:光纤布置完毕后,应立即采用DTS检测光纤是否通畅,如果发现断点,应及时熔接并将接头保护好。水库蓄水前应再次检查光纤是否通畅。

e. 将传感光纤与主机连接,根据需要对沿程光纤的温度进行测量,即对周围库水温度进行测量。

2 工程应用

2.1 工程简介

思安江水库枢纽工程位于桂林市东部漓江支流思安江上,为中型水利水电枢纽工程,正常蓄水位为

327 m,死水位为254 m,河床高程为228 m。该工程由钢筋混凝土面板堆石坝、溢洪道、引水建筑物、发电厂及变电站组成。坝顶全长385.92 m,最大坝高为103.40 m,面板混凝土一次性滑升最大斜长为168.68 m,上游坝坡从顶部的1:1.35变为1:1.4,下游坝坡为1:1.25。混凝土面板共分为38块。整个坝体由铺盖、面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区、下游堆石区等组成。

2.2 传感光纤布设方案与工艺

2.2.1 传感光纤布设方案

为了对坝体的安全进行监测,在面板坝的17号和19号面板与周边缝布置了传感光纤。本工程所使用的传感光纤为英国进口的镍铬合金金属铠装光纤,直径为3.2 mm,护套壁厚为0.5 mm,承受的气压为700 bar,质量为33 kg/km,光缆弯曲半径的最小值为150 mm。金属铠装里面包裹有4根光纤,光纤外面包有颜色各异的塑料保护层。在周边缝、19号面板和15号面板布置了传感光纤,布置情况如图1所示。其中,布置在周边缝内的传感光纤沿 $a_1b_1c_1d_1$ 长度共计177.3 m,周边缝 a_1 点至光纤汇集点 O 的长度 a_1O 为82.5 m,汇集点 O 至坝后监测房 H 的长度 OH 为13.5 m,所以用于周边缝监测光纤总长度为273.3 m。19号面板内共埋设传感光纤302 m,其中 a_2b_2 段和 c_2d_2 段的长度相等,为150 m, b_2c_2 段长2 m;坝顶光纤 a_2 至汇集点 O 的长度 a_2O 为31.5 m, d_2 至汇集点 O 的长度 d_2O 为29.5 m,加上 OH 段的27 m(13.5×2),所以用于19号面板监测光纤总长度为390 m。15号面板内共埋设传感光纤长度 $a_3b_3c_3d_3$ 为299.4 m,其中 a_3b_3 段和 c_3d_3 段的长度相等,为148.7 m, b_3c_3 段长2 m,坝顶光纤 a_3 至汇集点 O 的长度 a_3O 为26.5 m, d_3 至汇集点 O 的长度 d_3O 为28.5 m,加上汇集点 O 至监测房 H 的长度27 m,所以用于15号面板的监测光纤总长度为381.4 m。

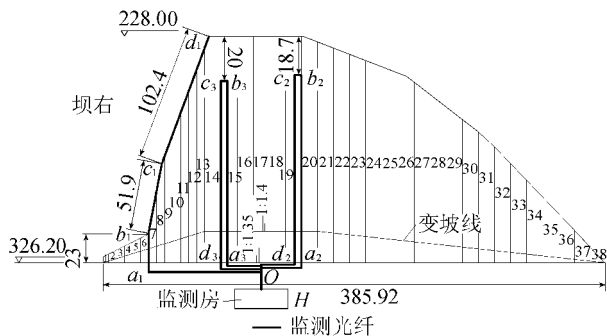


图1 分布式光纤传感网络布置尺寸(单位:m)

2.2.2 传感光纤布设工艺

光纤属于脆性材料,容易折断,即使是刚度较大

的金属铠光纤也时常会发生断裂事件。因此,对光纤的布设应该特别注意,务必保证光纤通畅无断点。传感光纤的成功布设对整个监测系统起着关键作用。

由于传感光纤还兼顾其他监测作用,因此,在本工程中光纤不是粘贴在坝体表面,而是埋入坝体表面以下约 15~40 cm 处,其中周边缝中的光纤埋设较深,约 40 cm,面板中的光纤埋设较浅,约 15 cm。

光纤埋设的施工工艺如下:

a. 周边缝光纤埋设:①在垫层区域内沿周边缝清理并平整布置带。②沿布置带开挖 1 条断面尺寸为 5 cm×5 cm 的小槽。③从一端开始沿着小槽将光纤放入,并每隔一定距离固定好。在光纤的放置过程中需要特别注意防止弯折,因为铠装光纤抗弯性能较差。④当光纤全部布设就位之后,采用 DTS 检测光纤是否有断点,发现断点应及时熔接,并保护好断点接头。⑤用原筑坝材料回填整平,并沿线喷上红漆做好标记,每隔一定距离树立标签,以防止后期清理及面板浇筑等施工损坏光纤。⑥再次采用 DTS 检测光纤是否通畅,并保护好光纤的接头。

b. 面板内光纤埋设:①沿一根纵筋由上往下布置光纤,光纤位于纵筋的底部。当遇到横向肋筋时,应让光纤从肋筋上部沿纵筋侧面布置。边布置边将光纤绑扎在纵筋上,并沿线喷上红漆做好标记,以免混凝土面板浇筑时光纤被破坏。②采用 DTS 检测光纤是否通畅,并保护好光纤的接头。光纤埋设完后,凡是涉及光纤埋设处及其上部的施工都需派专人在场,提醒施工人员,防止光纤被施工破坏。

3 监测结果及分析

在 2005 年 6 月 17 日与 7 月 26 日对该库水温度进行了测量,6 月 17 日气温为 27℃,库水水位高程为 320 m,即在面板坝顶部以下 6.2 m,7 月 26 日气温为 32℃,库水水位高程为 326 m,即在面板坝顶部以下 0.2 m。以面板坝顶部高程为零点,以高度为纵坐标,温度为横坐标,建立库水温度与水库深度的曲线关系,以周边缝温度曲线为例说明,如图 2 所示^[5]。

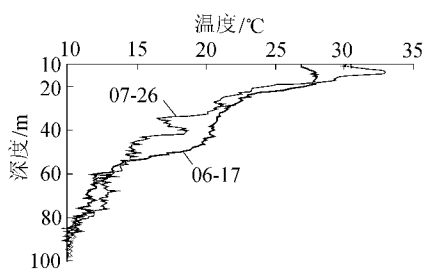


图 2 不同时刻周边缝温度测量曲线

从图 2 中可以看出,2 条温度曲线相似,在水面附近库水温度和大气温度接近,到水下一定深度后水温开始下降,温度下降曲线大致分为 3 段:第 1 段为快速下降段,在水下约 10~30 m 范围内,该段温降速率很快;第 2 段为缓慢下降段,在水下约 30~70 m 范围,该段温降速率较慢;第 3 段为温度稳定段,在水下约 70 m 以下范围,该段温度维持稳定。19 号面板与 15 号面板所测的温度曲线也基本遵循这个规律,分为 3 个阶段:在水下约 15 m 以内温度快速下降,在水下 15~60 m 温降速率变缓,在水下 60 m 以下库水温度维持稳定。将周边缝、19 号面板和 15 号面板温度曲线进行对比,可以发现周边缝布置的光纤不同时刻测量的库水温度有较大差异,而在中间面板布置的光纤不同时刻所测库水温度差别较小,说明坝肩的库水温度随时间变化较大,而坝前库水温度变化较小。其原因可能是布置在右坝肩的溢洪道导致了右坝肩溢洪道附近库水的流动,从而改变了库水温度。而坝前库水几乎不流动,因此库水温度保持稳定。同时,经过对比分析发现,布置在 19 号与 15 号面板平行的 2 段光纤所测温度曲线具有良好的重复性。在距水面约 60 m 以下库水温度维持在 11℃左右。

4 讨论

a. 基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量方法的可行性与可靠度问题。自 20 世纪 70 年代,人们开始研究分布式光纤温度测量技术,经过长期试验和科研开发,测量理论不断完善,测试技术日趋成熟,产品性能更稳定、实用性更强,现已在石油测井、电力系统温控、管道工程、火警系统等方面成熟应用,同传统设备相比,其具有更高的可靠性^[5]。将一种成熟测量技术引入新的测量领域,只要在测量过程中处理好与新测量对象有关的特性问题,便可成功测量。同时,通过现场试验发现数据具有很好的稳定性与重复性,且该仪器的精度达到 0.1℃。因此,该技术在测量库水温度方面是可行的,也是可靠的。

b. 该技术的优越性。与传统技术相比,该技术主要的优越性表现在:①抗电磁干扰、抗雷击、耐高压、高精度;②具有分布式传感能力,能实现长距离、实时快速分布式测量并定位,大幅度降低了点式测量的漏检率;③集传输与传感于一体,施工简单方便;④光纤精巧柔软,不影响埋设部位材料性能和力学参数,有利于监测值的代表性。以上优点弥补了传统仪器设备的不足,实现简便、快速、准确测量。同时,该测量设备成本较低,除了第 1 次硬件投入较

大之外,后期的投入很少,当测点多于500个时则比传统电测技术更经济。

c. 该测量方法可能存在的问题及解决方案。由于所处环境为水体,因此需要考虑水体可能对光纤产生的不利影响。①光纤的腐蚀问题,水体对光纤外包的塑料或者金属铠均有腐蚀作用,特别是酸性较高的水体。因此,在布置之前需要对光纤进行防腐处理,在外包材料中添加抗腐蚀材料,增加其抗腐蚀性。②冲刷侵蚀性问题,库水中挟带的泥沙会对光纤产生冲刷,逐渐侵蚀光纤外包材料,从而导致光纤断裂。为了防止冲刷,可以将光纤适当埋入坝体内一定深度,或者在光纤外面布置抗冲刷垫层。③库水中的鱼类以及较大固体物对光纤的牵绊影响。在布设光纤的时候一定要注意光纤的牢固固定,以免锚固失效导致光纤被拉断。

5 结 论

a. 基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量方法具有可靠性好、精度高、连续线性测量等优点,能快速、实时、自动地完成库水温度的测量,是一

种比传统库水测温仪器先进的测量方法。

b. 通过多次测量结果分析,发现测量数据具有很好的重复性与稳定性,证明该技术用于库水温度测量是可行的。

c. 通过对库水温度的实际测量,发现库水温度曲线可以分为3个阶段,即快速下降段、缓慢下降段与温度稳定段,且库水温度在距水面约60m以下保持基本不变。

参考文献:

[1] 袁琼.高拱坝近坝库水温度分布研究[D].武汉:武汉大学,2004.

[2] 肖衡林,鲍华,何俊.分布式光纤温度传感技术在水电工程中的应用[J].长江科学院院报,2009,26(S1):104-107.

[3] 丁涛.光纤传感技术监测百色碾压混凝土坝温度场[D].宜昌:三峡大学,2005.

[4] 邹建.分布式光纤温度测量系统关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2005.

[5] 肖衡林.渗漏监测的分布式光纤传感技术的研究与应用[D].武汉:武汉大学,2006.

(收稿日期:2010-06-17 编辑:方宇彤)

(上接第73页)

由图4中可以看出在混凝土层开裂后,混凝土层的径向应力有明显的减小,而钢丝上的环向应力有明显的增大,这与试验中测得的钢丝的应变变化规律(图5^[7])相符。

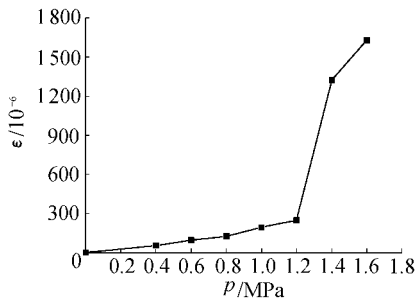


图5 试验测得的钢丝应变

3 结 语

本文的理论推导及计算模型简单直观,并通过正交异性模型考虑混凝土的开裂。当混凝土开裂后,不考虑混凝土在环向的承载能力,通过递推公式推导出钢丝上的应力,从而依据钢丝的屈服来判断PCCP的承载形态。将计算结果与试验结果进行比较,可以看出计算结果满足一定的精度要求,能为PCCP的大型数值计算和内水压试验提供一定的参考。本文方法没有考虑钢丝预应力作用以及钢筒的

作用,在推导计算上还有待进一步的提高和完善。

参考文献:

[1] ANSL/AWWA C304—99 Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe[S].

[2] 潘一毅.预应力钢筒混凝土管回顾与展望[J].混凝土与水泥制品,2004(6):30-31.

[3] 温开亮.PCCP的发展和应[J].山西水利科技,2005(1):86-87.

[4] 杨桂通.弹塑性力学[M].北京:人民教育出版社,2000.

[5] 董哲仁.钢衬钢筋混凝土压力管道设计与非线性分析[M].北京:中国水利水电出版社,1998.

[6] 胡少伟.南水北调超大钢筒混凝土管道结构安全评估[J].水利水运工程学报,2010(1):74-82.

[7] 张玲,沈捷,胡少伟.预应力钢丝松弛对超大口径PCCP承载能力的影响[J].水利水电科技进展,2010,30(5):69-72.

[8] 沈捷.超大口径PCCP结构安全性能试验与数值分析研究[D].南京:南京水利科学研究院,2010.

[9] 胡少伟,沈捷,刘晓鑫,等.超大口径PCCP管内水压承载能力试验[J].水利水电科技进展,2009,29(5):9-14.

[10] 胡少伟,沈捷,王东黎,等.超大口径预埋裂缝钢管混凝土管结构分析与试验研究[J].水利学报,2010,41(7):876-882.

(收稿日期:2010-08-30 编辑:高建群)