

混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化

吴永红¹, 徐洪钟², 高培伟¹, 蔡海文³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 210093;
3. 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究室, 上海 201800)

摘要 提出基于瑞利散射的混凝土高拱坝裂缝分布式光纤监测网络优化的目标及技术路线, 针对基于瑞利散射的光纤监测网络构型的优化, 进行了正交失效混凝土模型试验, 发现在光纤与裂缝面交角成 60° 时, 在大坝安全监控缝宽控制范围内光纤最小裂缝分辨率仅达到我国水利技术标准规定的 $1/6$, 指出要满足大坝裂缝监测灵敏性的要求, 对于基于瑞利散射的光纤裂缝传感, 应将光纤布置在与预期的裂缝面交角小于 60° 的范围内。基于此, 结合小湾拱坝裂缝光纤监测研究, 初步提出高拱坝裂缝光纤监测网络优化的构型。

关键词 大坝安全; 光纤传感; 裂缝监测; 瑞利散射; 网络构型优化; 正交失效

中图分类号: TV698-1

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2006)06-0037-03

Optimization of optical fiber monitoring network structure for crack detection of high concrete arch dams // WU Yong-hong¹, XU Hong-zhong², GAO Pei-wei¹, CAI Hai-wen³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210093, China; 3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The target and technical route of optimization of distributed optical fiber monitoring network for crack detection of high concrete arch dams based on Rayleigh scattering are presented, and orthogonal ineffectiveness concrete model tests are performed for optimization of the network structure. It is found that, at an angle less than 60° between optical fiber and cracking surface and within the crack width range permissible in dam safety monitoring, the minimal resolution of cracks only reaches $1/6$ of the corresponding water conservancy technical standard in China. It is pointed out that the optical fiber should be embedded within an angle 60° to the predicted cracks in this method so that the monitoring results can meet the requirement of sensitivity of dam safety monitoring. Furthermore, an optimal structure for optical fiber monitoring network is proposed for crack detection of Xiaowan arch dam.

Key words: dam safety; optical fiber sensing; crack monitoring; Rayleigh scattering; network structure optimization; orthogonal ineffectiveness

混凝土坝体裂缝的发生范围、方向和开展深度往往是不确定的, 具有时空随机性、隐蔽性等显著特征, 要捕捉大坝裂缝发生的动态发展过程, 只有对整个大坝施行全方位的空间、立体式、连续监测。而坝体裂缝发生的这种不确定性特征, 使常规的点式电测技术难以捕捉工程结构内部的裂缝等局部损伤的有效信息。混凝土高坝由于体积巨大、不确定性因素多、施工过程难以控制, 进一步强化了裂缝发生的不确定性特征。光纤传感不仅能对环境物理量进行分布式监测, 还具有抗电磁干扰、防雷电等诸多优越特性, 有望成为大坝裂缝监测的实用技术。

光纤传感是一种接触式检测技术, 只有当裂缝与它相遇时才有可能被感知。此外, 光纤传感还

有其他特点和局限^[1]。因此, 如对混凝土高坝的各个部位完全施行全方位的立体式连续监测, 则需构建庞大、密集而复杂的传感网络。这种网络显然难以实施于大坝工程实际。为不影响大坝的施工质量和进度, 光纤监测网络的设计、布置和埋设应总体顺应大坝的施工方法、施工工艺和步骤。传感光纤的本质是纤细的玻璃质载体和感应体, 脆弱、易折, 需加特别保护才能被应用于工程实践。即便如此, 光纤传感的工程应用还始终受到“存活瓶颈”的制约。如果工程内部的光纤传感网络过于密集、复杂, 在大坝施工这种极其粗放的工程环境中, 光纤的工程“存活率”则会进一步降低。光纤传感的分布式监测是把“双刃剑”, 一方面可以对环境物理量实现大范围

的连续检测 ;另一方面 ,如果光纤在某一处损伤短路 ,则整个传感光路随即中断、报废。这就使得提高光纤传感的工程“存活率”以保证光纤传感网络的完整和通畅 ,成为光纤传感工程应用的关键性技术问题。庞大、复杂的监测网络不便于光信号的解调、复用、定位以及数据采集、分析和处理 ,不利于整个监测系统的合理配置和可靠、稳定运行。

概言之 ,为实现光纤传感网络在工程中的应用 ,同时使之能满足大坝安全监测的要求 ,应对传感网络的工程实施进行优化。与混凝土重力坝相比 ,拱坝由于自身的结构特点和受力特征 ,坝体的不同部位(如坝肩)对大坝的结构完整和整体稳定具有不同的作用 ,坝体一些部位潜在裂缝的特征参量并非都是随机性的 ;特征参量不同的裂缝对大坝安全的影响也不尽相同。拱坝裂缝分布及其对工程影响的特征为高拱坝光纤传感网络的优化提供了技术上的可行性。

1 混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络优化的技术路线

混凝土高拱坝裂缝分布式光纤监测网络优化的目标和内容主要包括 :对高拱坝的安全运行具有关键意义的坝体特殊关键部位的确定 ;传感网络构型及其在坝体内部布设通导率的优化 ;传感光纤灵敏性-复用能力-缝宽量程-工程存活率的均衡优化。总体优化技术路线如图 1 所示。

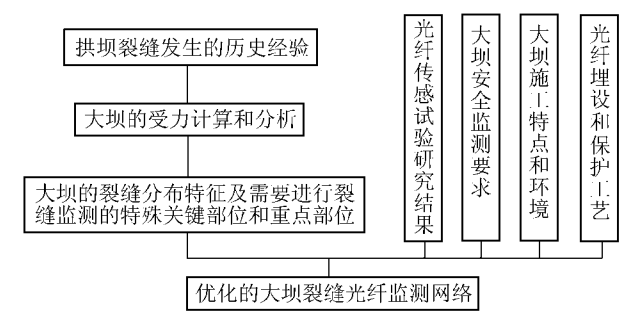


图 1 混凝土高拱坝裂缝分布式光纤监测网络优化的技术路线示意图

由内在的传感机理决定 ,基于瑞利散射的分布式光纤裂缝传感存在正交检测失效的缺陷 ,略称正交失效。所谓正交失效 ,是指光纤与裂缝正交(交角为 90°)时 ,因仅受到单纯的轴向拉力的作用而始终保持平直 ,无微弯生成 ,从而光路中不出现局部高损耗 ,因而无法检测到裂缝的存在。正交失效是影响基于瑞利散射的光纤裂缝监测网络构型最主要的因素。在工程结构内部构建光纤监测网络时 ,首先需要考虑的是避免正交失效的出现。

从纯数学的角度看 ,正交失效似乎只是小概率

事件。但从工程应用来分析 ,正交失效应是一个渐变的区间而非整个连续空间中的一个突变的、孤立的数学奇点。在此区间内微弯效应均不明显 ,光信号不随裂缝的出现和扩展发生明显的变化。即光纤与裂缝成近似正交时 ,会出现光纤与裂缝一定夹角范围内的检测失效 ,并可统归为正交失效。因此 ,交角 90°时的正交失效只是理想数学条件下的理想小概率事件。光纤监测网络构型的工程优化应对这一失效区间进行定量的分析界定。

2 正交失效混凝土模型试验及结果

2.1 光纤中的瑞利散射

光纤中传播的光波是由一系列激光脉冲组成的。脉冲功率较小时 ,光脉冲会沿行程各点发生瑞利散射 ,形成后向瑞利散射光。光纤中距离始端 Z 处、长度为 dZ 的一段光纤 ,所产生的后向瑞利散射光传播至光波注入端的功率 $dP(Z)$ 可表示为^[2]

$$dP(Z) = P_{in} a_s S \frac{3N_a^2}{8n_1^2} e^{-2a_t Z} dZ \quad (1)$$

式中 : P_{in} 为注入光纤的脉冲光功率 ; a_s 为瑞利散射(损耗)系数 ; S 为后向散射因子 ; N_a 为光纤的数值孔径 ; n_1 为光纤纤芯的群折射率 ; a_t 为光纤吸收和散射衰减系数。

2.2 混凝土裂缝光纤分布式监测机理

混凝土裂缝光纤分布式监测的机理^[3]是 :混凝土开裂时 ,埋入其中的光纤会在裂缝面上分别形成两个微弯(见图 2) ,从而引起光信号出现局部高损耗——微弯损耗 ,形成裂缝-光损耗的单值对应关系 ,即光衰减受裂缝调制。用光时域分析反射计 OTDR 探测后向瑞利散射光损耗的位置和大小 ,可推知在相应的位置是否存在裂缝。据此 ,无论混凝土中何处出现裂缝 ,只要与埋入的光纤光路相交(非正交)即可被感知。如果有 2 根成一定夹角的光纤穿过裂缝 ,还可定出裂缝的宽度及延展方位。

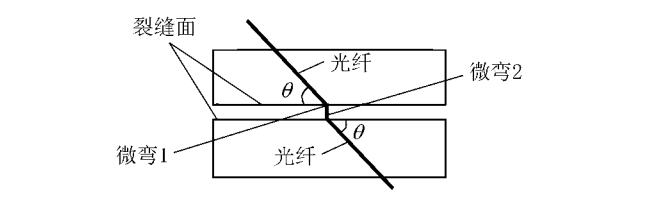


图 2 OTDR 裂缝检测机理示意图

2.3 正交失效混凝土模型试验及结果

试验采用标号 C30 的混凝土 ,试件尺寸为 70 cm × 10 cm × 10 cm(长 × 宽 × 高)。为控制混凝土材料的脆性破坏速度 ,沿试件的长度方向配有一定数量的小直径钢筋。传感光纤选用在大坝工程中相对容易存活的普通康宁单模通信光纤 10/125/900 μ m ,将

光纤与预期的人工诱导缝分别成夹角 80° 、 70° 、 60° 埋设在试件中。将试件作为简支梁在跨中以集中力实施极缓慢加载,直至完全断裂。试验采用全数字式 MTS-816 岩石和混凝土力学试验系统,将试件施加载致裂并进行数据采集,应变传感器的型号为 MTS632.94F-20(分辨率 $0.1\mu\epsilon$)。为能采集到足够的试验数据,选用分辨率为 0.001 dB 的光功率计(型号为 EXFO PM-1600H)检测光信号,所用光源型号为 ASE-CL。试验得到混凝土试件中光纤与裂缝成 3 种夹角的光损耗与裂缝宽度关系见图 3。

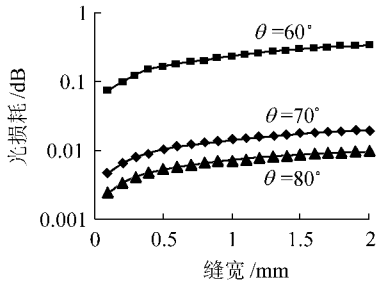


图 3 光纤光损耗与裂缝宽度的关系

2.4 试验结果分析

分析处理试验结果得到传感光纤与裂缝成 3 种夹角的灵敏性。由于光纤的灵敏性随光纤与裂缝面交角的增大而降低,夹角 70° 时的最大光损耗只有 0.02 dB ,低于 OTDR 的线形度,故此处仅给出交角 60° 时的分析结果(见图 4)。目前,由于缺乏分布式裂缝传感器灵敏性明确的参照标准,故暂取我国水利技术标准中列出的量程为 5 mm 的混凝土测缝计的最小读数 0.012 mm ^[4]作为光纤光损耗-缝宽灵敏性分析的缝宽基值。由图 4 可见缝宽各点的灵敏性与裂缝宽度之间呈显著的非线性关系,并且灵敏性随缝宽的增加而降低。在裂缝发生的起始阶段光纤灵敏性较低的情况下,这种变化趋势会造成光纤在缝宽增大时的灵敏性不足。夹角 60° 时,只有在缝宽 0.012 mm 这一微小范围内(即在微裂隙的形成和扩展阶段)光纤的灵敏性才能在理论上满足我国水利技术标准相关标准的要求,超过此范围则光信号对缝宽 0.012 mm 的变化几乎没有感应。在大坝安全监控缝宽控制范围 3 mm 内,光纤的裂缝分辨率 R 最

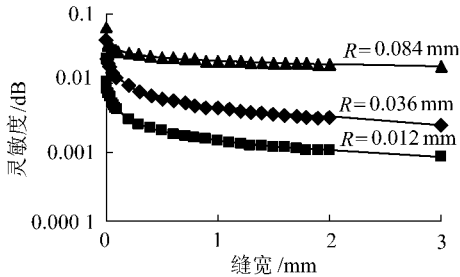


图 4 光纤与裂缝夹角 60° 时的灵敏性曲线

后降低到 0.084 mm ,仅为我国水利技术相关技术标准的 $1/6$ 。

上述分析结果表明,要满足大坝裂缝监测灵敏性的要求,对于基于瑞利散射的光纤裂缝传感,应将光纤布置在与预期的裂缝面成交角小于 60° 的范围内。

光纤纤细易折、工程存活率低,构成光纤传感工程实用化的制约瓶颈。将光纤与预期裂缝以小夹角布置,不仅工程铺设困难,而且会进一步降低光纤的工程存活率和缝宽量程,因而正交失效使基于瑞利散射的光纤裂缝传感失去了最优方式的工程应用,造成即使在裂缝方位预知的情况下(如在拱坝拱冠处),也需将光纤按照某种复杂的波浪式构型埋设于坝体监测区域,造就特定的非正交构型,构建裂缝(力学效应)与光波导变异(光学效应)之间的间接转换机制,形成所谓基于瑞利散射原理的微弯效应型分布式光纤裂缝监测网络。这种复杂的网络构型难以与粗放的大坝工程实际相融合。

3 高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化

根据拱坝的裂缝分布特点及对拱坝不同部位的安全性要求,结合小湾拱坝的裂缝光纤监测研究,初步提出基于正交失效研究结果的高拱坝裂缝光纤监测的优化网络构型,见图 5、图 6。

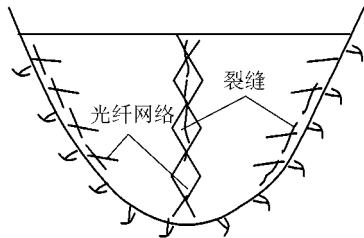


图 5 拱坝拱冠和坝肩周边裂缝优化的光纤监测网络

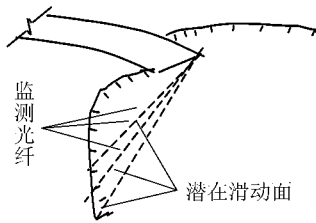


图 6 拱坝坝肩稳定优化的光纤监测网络

4 结 语

a. 鉴于混凝土高拱坝裂缝分布式光纤监测网络优化的必要性和可行性,提出基于瑞利散射的混凝土高拱坝光纤裂缝传感网络优化的目标和技术路线;为优化光纤监测网络构型,进行了正交失效混凝土模型试验,发现在光纤与裂缝面成交角 60° 时,在大坝安全监控缝宽控制范围内光纤(下转第 84 页)

下,于 25 日下午胜利合龙,最大落差为 4.37 m,最大平均流速为 5.5 m/s(表面最大流速为 6.5 m/s),创造了当时国内外截流的先进水平。从三门峡截流到今天已有 48 年,我国现在的导截流理论、关键技术、模型试验等的水平已全面跨进国际导截流工程先进行列^[10]。展望未来,再上一个台阶,在我国“十一五”规划之末,交出满意答案是有充分把握的!

参考文献:

[1]肖焕雄.世界水电工程大江大河截流现状报告[R].武汉:武汉水利电力大学,1998.
[2]肖焕雄.施工水力学[M].北京:水利电力出版社,1992.
[3]肖焕雄.截流抛石的粒径计算研究[J].水电站设计,2000(1):1-7.
[4]肖焕雄,唐晓阳.江河截流中混合粒径群体抛投石料稳

定性研究[J].水利学报,1994(3):10-18.
[5]长江科学院.三峡大江截流试验阶段报告[R].武汉:长江科学院,1994.
[6]肖焕雄,周克己.深水截流研究[J].长江科学院院报,1997(4):16-21.
[7]贺昌海,肖焕雄.立堵截流戗堤堆石分叉特性研究[J].中国工程科学,2001(6):69-74.
[8]肖焕雄,刘发全.双戗堤立堵截流水力控制条件研究[J].水利学报,1988(10):61-66.
[9]肖焕雄,夏明跃,王年云.宽戗堤截流的宽度效应研究[J].水利学报,1983(4):60-65.
[10]XIAO Huan-xiong. River diversion for high earth-Rockfull dams in China[C]//Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfull Dams. Beijing, 1993.
(收稿日期:2006-05-31 编辑:马敏峰)

(上接第 39)最小裂缝分辨率仅达到我国水利技术标准规定的 1/6,要满足大坝裂缝监测灵敏性的要求,对于基于瑞利散射的光纤裂缝传感,应将光纤布置在与预期的裂缝面成交角小于 60°的范围内。基于此,结合小湾拱坝裂缝光纤监测研究,初步提出高拱坝裂缝光纤监测网络的优化构型。

b. 正交失效使基于瑞利散射的光纤裂缝传感失去了最优方式的工程应用,导致需在工程内部构建复杂的特定构型的光纤监测网络。这种复杂的网络构型既增加了光纤传感工程应用的困难,同时还会进一步降低传感光纤的工程存活率和缝宽量程,因而需进一步探索研究结构简单、工程实用的新型混凝土大坝裂缝光纤监测技术。

c. 混凝土坝裂缝光纤传感的研究目前还主要停留在原理性和方法性的探索性研究阶段,光纤裂缝传感的工程应用还缺乏充分、可靠的试验模拟和工程试用这一前提条件,具有工程实用化直接参照意义的研究方法和结论还有待探索。

d. 大坝裂缝监测是久悬难决的复杂工程技术问题,解决这一难题绝非任何一种技术手段一蹴而就之

事。分布式光纤裂缝传感技术还不成熟,处在不断发展的探索性研究阶段。基于瑞利散射的光纤传感只是较早用于裂缝检测研究的一种辅助性技术,由于其自身固有的技术局限,一直没有得到大规模的工程应用(包括试用)。混凝土高坝裂缝的光纤分布式监测还远非一种成型可靠的工程技术系统,目前不宜进行系统化集成开发研究及商业性应用推广。

参考文献:

[1]吴永红.光纤光栅水工渗压传感器封装的结构分析与实验[D].成都:四川大学,2003.
[2]王惠文.光纤传感技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2001:85.
[3]江毅,LEUNG K Y C.光纤裂缝传感器中裂缝宽度与光纤损耗关系分析[J].北京理工大学学报,2003,23(4):492-495.
[4]中华人民共和国水利部国际合作与科技司.水利技术标准汇编(水利水电卷·仪器)[Z].北京:中国水利水电出版社,2002:144.
(收稿日期:2005-12-30 编辑:高建群)

·简讯·

中国水利学会勘测专业委员会 2006 年年会暨学术研讨会在石家庄举行

中国水利学会勘测专业委员会 2006 年年会暨学术研讨会于 2006 年 10 月 27~31 日在河北省石家庄市举行。河北省水利厅副厅长、河北省水利学会常务副理事长刘凯军、中国水利学会李赞堂秘书长到会并作了讲话。中国水利学会勘测专业委员会原主任委员金德濂教授给大会发来贺信。来自全国各地 50 多个教学、研究、设计单位的 100 多位代表参加了会议。会议的主要议题是:引水工程的地质问题。研讨会共收到 60 多篇学术论文,有 7 位教授、专家为大会作了学术报告,10 多篇论文进行了大会交流。会议期间,代表们还考察了黄壁庄水库及南水北调中线古运河枢纽和漕河渡槽工程。(张勤供稿)