

混凝土坝裂缝光纤监测复用能力与与灵敏性的关系

吴永红^{1,2},邵长江¹,王尚志³,田志刚³,吴中如²

(1. 同济大学土木工程学院,上海 200092; 2. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;
3. 山东省水利厅,山东 济南 250013)

摘要 根据光纤微弯损耗原理,导出了混凝土裂缝引起的光纤微弯损耗方程. 基于理论分析和混凝土模型试验研究结果,指出分布式光纤裂缝传感的复用能力与灵敏性之间存在约束关系,灵敏性高,则复用能力低,反之亦然. 对两者关系的定量分析表明,光纤裂缝传感的工程应用,应结合具体的工程实际,对这 2 个基本参数进行均衡量化.

关键词 大坝安全监测 光纤裂缝传感 瑞利散射 复用能力 灵敏性 约束关系

中图分类号 :TV698.1+1;TP212.14 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)06-0677-04

光时领反射技术(OTDR)是较早用于结构裂缝检测研究的一种光通讯技术,在国外迄今尚未见其在水电工程或土木工程中的应用. 在我国,已先后在三峡工程和小湾工程的大坝裂缝监测研究中得到应用^[1]. 目前对这一技术的工程应用研究还停留在裂缝传感基本原理的探索上,而对工程裂缝光纤监测的机理和传感特性、监测方法等还缺乏必要的认识.

基于瑞利散射的光纤裂缝传感技术,是利用 OTDR 检测外界裂缝引起的光纤中后向传播的瑞利散射光的功率损耗来判别裂缝的存在,并分析裂缝的位置、宽度和方位等裂缝特征参量. 该技术基于“功分复用”的原理实现对工程结构空间裂缝的分布式监测. 由于其内在的传感原理,分布式光纤裂缝传感的灵敏性和复用能力(以下简称灵敏性和复用能力)之间存在相互制约的关系. 对此关系的揭示与定量认识,为对光纤裂缝传感工程适用性的整体把握,或对其工程应用方案的评价和优化的首要前提.

1 混凝土坝裂缝光纤监测复用能力

1.1 混凝土裂缝引起的光纤微弯损耗方程

假定布设在混凝土坝中的某根光纤穿越坝体裂缝 n 次,形成 n 个光纤与裂缝的交点,简称裂缝点,并记 i 为其中任意一点,如图 1 所示. $S(i)_1$ 和 $S(i)_2$ 为裂缝点 i 引起的 2 个光纤微弯(图 2), i_{11}, i_{12} 与 i_{21}, i_{22} , 分别为微弯 $S(i)_1$ 和 $S(i)_2$ 的端点. 其中, i_{12}, i_{21} 分别位于张开的同一裂缝的两面. 根据对称性,直线 $|i_{12}i_{21}|$ 即为该处裂缝的宽度 w ,始终保持在与裂缝面垂直的状态. 裂缝扩张时,光纤微弯路径 $i_{11}i_{12}$ 和 $i_{21}i_{22}$ 的长度及其各点的弯曲曲率随之改变,从而调节光损耗的变化. 裂缝点 i 引起的光纤微弯损耗 $A(i)$ ^[2-3] 表示为

$$A(i) = \int_{i_{11}}^{i_{12}} a(z) dz + \int_{i_{21}}^{i_{22}} a(z) dz$$

(1)

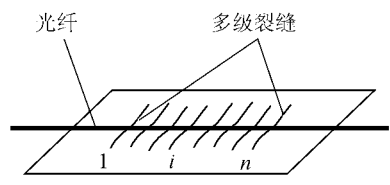


图 1 混凝土坝多级裂缝示意图

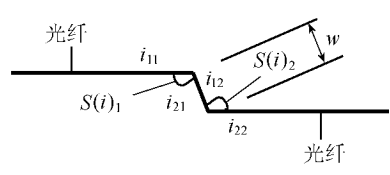


图 2 裂缝引起的光纤微弯

Fig.1 Schematic diagram of concrete dam with multicroacks Fig.2 Micro-bending of optic fibre induced by cracks

式中 $\alpha(z)$ 为光纤微弯损耗系数. 光纤与裂缝夹角一定时, i_{11}, i_{12} 与 i_{21}, i_{22} 及 $\alpha(z)$ 只是缝宽 w 的单值函数. 变换式(1), 得单裂缝点引起的光纤微弯损耗方程:

$$A(i) = \int_0^w a'(x) dx \quad (2)$$

式中 $a'(x)$ 已由光纤微弯损耗系数变为裂缝引起的光损耗随裂缝宽度的变化率, 反映光损耗对缝宽变化的敏感性.

1.2 混凝土坝裂缝光纤监测复用能力分析

假定光波的传播方向是由点 1 至点 n , 由式(1)可推知 1 ~ k 个裂缝点所引起的光纤光衰减 A 为

$$A = \sum_{i=1}^k A(i) \quad (3)$$

式中 $A(i)$ 为任意裂缝点 i 引起的光纤微弯损耗, 其大小与光纤的埋设方式、几何规格及材料特性、埋入的工程材料种类和结构形式等有关. 不计外界其他因素对光纤光损耗的影响, 当 A 达到 OTDR 的检测功率阈值上限时, 对应的 n 即为光纤的复用能力.

显然, 难以完全通过原型试验方法确定光纤的复用能力. 可实现的途径是: 通过模型试验, 测出试件中某一裂缝点的光损耗与缝宽的系列对应值. 将测出的值分别代入方程(3), 即可估算出一根光纤的复用能力.

2 混凝土坝裂缝光纤监测复用能力与灵敏性的关系

2.1 光纤复用能力与灵敏性关系的理论分析

当裂缝相对于光纤的方位一定时, 对于裂缝宽度的微小变化, 由式(2)可得

$$dA(i) = \frac{dA(i)}{dw} dw \quad (4)$$

即

$$dA(i) = a'(w) dw \quad (5)$$

式(5)为光纤光信号对缝宽变化的灵敏性公式.

假定图 1 中光纤穿过 n 个宽度为 w 的等宽裂缝点, 根据式(3)有

$$n = \frac{B}{A(i)} \quad (6)$$

式中 B 为 OTDR 检测功率阈值上限. 再令光纤灵敏性增加 λ 倍, 则对于同一根光纤的光损耗 $A(i)'$ 和复用能力 n' , 分别有

$$A(i)' = \lambda \int_0^w a'(x) dx \quad (7)$$

$$n' = \frac{B}{\lambda A(i)'} \quad (8)$$

式(6)和式(8)表明, 对基于瑞利散射的光纤裂缝传感器, 裂缝方位一定时, 若提高光纤的平均灵敏性, 则其复用能力以反比例降低. 同种光纤、以相同方式、埋设在同类工程材料中, 光纤灵敏性和复用能力的改变总体遵循这一规律. 对于光纤的实际应用情况, 光纤灵敏性和复用能力之间的关系则应具体确定.

2.2 混凝土坝裂缝光纤监测复用能力与灵敏性关系的试验研究

试验采用标号 C30 的混凝土, 试件尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长). 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 2 种普通康宁 (Corning) 单模通信光纤 ($10/125/250 \mu\text{m}$, $10/125/900 \mu\text{m}$), 考虑大坝裂缝方位的随机性, 将光纤分别与试件预期的人工诱导缝成夹角 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 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, 直至试件完全断裂. 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. 图 3 给出了试验得到的 2 种典型的光纤光损耗与裂缝宽度关系曲线.

分析处理试验结果, 得到光纤的灵敏性和复用能力, 2 种典型分析结果见图 4 和图 5. 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 $0.012\text{ mm}^{[4]}$,作为光纤光损耗和缝宽灵敏性分析的缝宽基值. 光纤复用能力分析所用的光纤最大光衰减,取 OTDR 检测功率阈值上限的典型值 35 dB . 光纤复用能力和灵敏性的比较结果列于表 1.

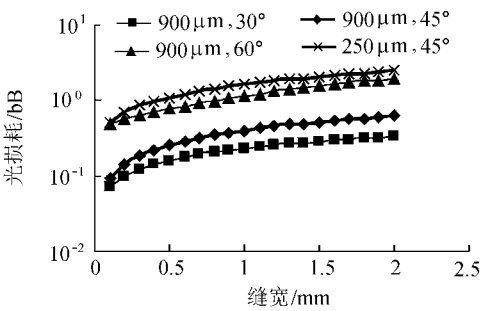


图 3 光纤光损耗与裂缝宽度关系

Fig.3 Relationship between optic loss of optic fibre and crack width

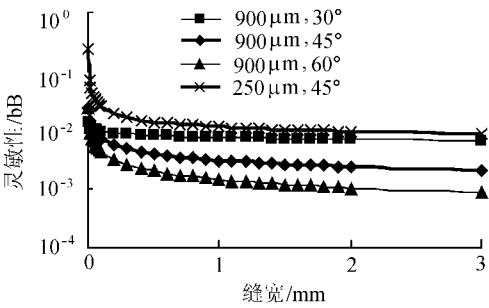


图 4 光纤灵敏性与裂缝宽度关系

Fig.4 Relationship between sensitivity of optic fibre and crack width

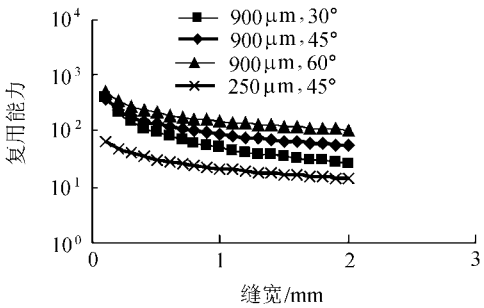


图 5 光纤复用能力与裂缝宽度关系

Fig.5 Relationship between multiplexing capability and crack width

表 1 光纤灵敏性和复用能力的比较

Table 1 Comparison of sensitivity and multiplexing capability of optic fibre

裂缝宽度/mm	灵敏性		复用能力	
	900 μm (30°/60°)	45° (250 μm/900 μm)	900 μm (60°/30°)	45° (900 μm/250 μm)
2.0	7	4	4	4
1.9	6	4	4	4
1.7	6	4	4	4
1.3	5	4	3	4
0.9	5	4	3	4
0.5	4	4	2	4
0.1	2	4	1	6

注 表中数据表示光纤与裂缝夹角不同或涂覆层厚度不同时光纤灵敏性及复用能力的比值.

由图 4 和图 5 及表 1 可知：

- a. 裂缝与光纤夹角为 45° 时,对于试验使用的 2 种光纤,其灵敏性与复用能力之间的约束关系,与本文理论分析结果基本一致. 说明在此种情况下,光纤涂敷层的材料特性和几何特征,主要改变光纤光损耗的数值大小,对光的衰减形式影响不大. 因此,裂缝方位一定时,只要知道 2 种光纤灵敏性大小,即可估算它们之间复用能力的差异.
- b. 对于 2 次涂覆光纤 ($10/125/900\text{ }\mu\text{m}$),与裂缝夹角不同时,光纤灵敏性和复用能力相对于自身的变化,两者存在差异. 且两者的变化差异随裂缝宽度的增加而变大,表明光的衰减形式发生了改变. 但在缝宽各点,光纤灵敏性和复用能力相对变化的比值落在一定范围,约为 $1.5\sim 2$.

3 结 语

- a. 光纤裂缝传感的复用能力与灵敏性之间存在约束关系,灵敏性高,则复用能力低,反之亦然. 对两者

关系的定量分析表明,光纤裂缝传感的工程应用,应以对这2个基本参数的均衡量化为前提.

b. 混凝土坝裂缝的分布式光纤监测,目前还主要停留在光纤裂缝传感基本原理的探索性研究阶段. 光纤裂缝传感的工程应用还缺乏充分、可靠的理论分析、实验模拟及工程试用等前提条件,具有工程实用化参照意义的研究方法和结论还有待探索.

参考文献:

- [1] 吴永红,徐洪钟,高培伟,等. 混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化[J]. 水利水电科技进展,2006,26(6):37-39.
- [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 C K Y. 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] 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[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002:144.

Relationship between sensitivity and multiplexing capability of optic fibre for crack monitoring in concrete dams

WU Yong-hong^{1,2}, SHAO Chang-jiang¹, WANG Shang-zhi³, TIAN Zhi-gang³, WU Zhong-ru²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

3. Department of Water Conservancy of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: An equation for micro-bending loss of optic fibre caused by cracks in concrete was deduced. Based on theoretic analysis and model tests, it is pointed out that there is a constraint relationship between the sensitivity and multiplexing capability of distributed fibre optic sensors for crack monitoring, i. e. the higher the sensitivity, the lower the multiplexing capability, and vice verse. The quantitative analysis of the relationship shows that the balanced quantification of the two parameters should be performed for specific engineering conditions when fibre optic sensors are applied to practical projects.

Key words: dam safety monitoring ; fibre optic sensor for crack monitoring ; Rayleigh scattering ; multiplexing capability ; sensitivity ; constraint relationship

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊 全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊 《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是全国中文核心期刊,中国科技核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊. 主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2008 年每期定价 10 元,全年 6 期共计 60 元. 可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅.

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部

联系电话:(025)83786335 传真:(025)83786335

E-mail:jz@hhu.edu.cn

http://kkb.hhu.edu.cn