一种新型大量程裂缝光纤传感器

包腾飞^{①②*}, 赵津磊^{①②}, 阎培林^③, 张万祝^③

① 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

② 河海大学水利水电学院, 南京 210098;

③ 中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024

* E-mail: baotf@hhu.edu.cn

收稿日期: 2014-12-23; 接受日期: 2015-06-05

国家自然科学基金(批准号: 51379068, 51139001)、江苏省杰出青年科学基金(批准号: BK20140039)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120094110005)资助项目

摘要 裂缝一直以来是判断混凝土结构健康程度的重要标志, 然而对于一些混凝土结构一定开度的裂缝对结构本身安全情况影响不大, 但当裂缝继续开展到一定的程度时就要采取必要的措施进行维护. 本文基于光纤宏弯曲损耗理论提出了一种大量程裂缝传感器, 并介绍了裂缝感知原理, 然后通过有机玻璃板模拟裂缝开展, 验证了此传感器的可行性. 最后, 通过将此传感器埋入混凝土梁, 对此传感器的实际应用能力进行了进一步的验证. 实验表明, 该传感器可对混凝土结构上大裂缝的开展情况进行持续性的监测.

关键词

光纤
传感器
裂缝监测
混凝土结构

1 引言

混凝土结构健康状况的监测和诊断一直以来是各国学者所关注的问题, 因为它直接关系到人民的生命财产安全. 在复杂的外界环境下, 许多混凝土建筑物发生不同程度的病变, 对这些建筑物进行及时的监测、修护尤为重要. 裂缝是混凝土结构健康状况的重要标志, 裂缝破坏了混凝土结构的整体性, 可能引起内部钢筋的锈蚀, 对于一些水工建筑物, 裂缝还可能引起渗透破坏. 因此, 对混凝土裂缝进行监测, 是判断混凝土结构健康状况的有效方法^[1~8]. 对于一些混凝土结构, 细微的裂缝就会对结构整体性产生较大影响, 一旦出现裂缝就要引起足够重视, 及时修护; 而对于另一些混凝土建筑物(如重力坝)受细微裂缝的影响较小, 也就是说一定开度的裂缝对此类工

程的安全性影响不大, 而且一些裂缝在外荷载作用下开展后会逐渐闭合, 因此, 对于这类混凝土结构上的裂缝需要进行实时的开度监测, 以防止裂缝开展到具有危险性的开度.

目前, 许多无损技术已经在结构裂缝监测中得到应用, 例如敲击回音法^[9]、超声波法^[10]、探地雷达^[11]、红外线温度记录法^[12]、云纹干涉法^[13]、全息干涉法^[14]、散斑干涉法^[15]等. 但上述方法均只能探测裂缝的存在与否, 却不能对裂缝的开展进行持续性观测. 近几年来, 光纤传感器以其质量轻、电绝缘、抗电磁干扰还有耐腐蚀等优势开始在土工结构安全监测中得到应用, 但现有的一些光纤传感器在应用上尚存在一些不足. 一些传感器依靠光纤断裂来判断裂缝是否存在, 不能对裂缝开展情况进行定量的监测^[16]. Ansari 和 Navalurka^[17]提出了一种点式裂缝

引用格式: 包腾飞, 赵津磊, 阎培林, 等. 一种新型大量程裂缝光纤传感器. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 984–990

Bao T F, Zhao J L, Yan P L, et al. A novel cracking sensing fiber sensor with wide range (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 984–990, doi: 10.1360/N092014-00189

传感器,对于这种传感器只有当裂缝穿过一个光纤圈时才可以对裂缝的开度进行监测,所以这种方法需要事先确定裂缝发生的准确位置,而且由于光纤圈尺寸较小,当裂缝开度较大时必然容易引起光纤的折断. Brown 等人^[18]通过布里渊光时域反射仪测量光纤上应变的分布来监测裂缝,在裂缝发生的区域会有较高的应变出现,但高应变会引起光纤的脱落,所代表的裂缝发生位置的应变值是脱落区域的一个平均应变值,由于脱落长度难以判定,所以这种方法难以对裂缝的开展情况进行定量的测量. Zhang 等人^[19]也提出了一种布里渊光时域反射仪测量光纤上应变的方法,该方法通过在混凝土结构表面的横向和纵向布设大量布里渊光纤来测量应变分布,这种方法可获得裂缝发生的区域,但不能对裂缝的开度进行定量的测量. Leung 等人^[20]提出了一种分布式传感器,这种传感器可以通过一根光纤监测多条裂缝,对细小裂缝具有较好的监测能力,但不足的是裂缝的开展方向对测量结果影响较大,而且在裂缝宽度超过 1.5 mm 后,光损值的测量结果就趋于稳定,难以对开度较大的裂缝进行持续的监测.

基于以上裂缝监测方法的不足,以及目前尚无针对厘米级大裂缝持续性监测的有效方法,本文基于光纤宏弯曲损耗的基本原理,提出了一种大量程光纤传感器,通过室内有机玻璃板模拟裂缝实验获得该传感器在不同波长光条件下的裸光纤线圈初始感知直径及可监测裂缝开度范围. 最后将本传感器埋设在混凝土梁中进行试验,证明此方法的可行性.

2 裂缝传感原理

当光纤弯曲后,就会发生沿光纤弯曲半径方向的能量辐射,原有光波导中的传导模将变为辐射模,从而引起弯曲损耗. 当弯曲曲率半径远大于光纤直径的弯曲所产生损耗,就称为宏弯曲损耗. 宏弯曲损耗的主要原因是空间滤波效应,空间滤波是由于光纤弯曲导致光波传播的全反射条件受到破坏,从而将携带的能量辐射到光纤之外的一种物理效应. 光纤弯曲程度越大,则空间滤波效应越明显,光纤传输的模式数越少,造成的光纤传输损耗就越大. 对于阶跃单模光纤,单位长度上的弯曲损耗可以表示为^[21,22]

$$\alpha_c = A_c R^{-1/2} \exp(-UR), \quad (1)$$

其中 $A_c \approx 30\Delta^{1/4}\lambda^{-1/2}(\lambda_{cf}/\lambda)^{3/2}$, $U \approx 0.705\Delta^{3/2}/\lambda(2.748 - 0.996\lambda/\lambda_{cf})^3$, R 为宏弯曲半径, λ 为工作波长, λ_{cf} 为截止波长, Δ 为光纤芯与包层相对折射率差.

由(1)式可以看出,弯曲损耗值随弯曲半径减小而增大,随工作波长增大而增大. 需要注意的是,当弯曲半径大到一定值后,弯曲损耗基本可以忽略.

本文所提出的光纤传感器的结构形式如图 1 所示. 主要的传感结构为 1 个裸光纤圈,裸光纤线圈为 1 段没有保护层的光纤通过缠绕打结之后形成的 1 个光纤线圈,形成过程如图 2 所示,控制其直径在 15 mm 左右,裸光纤线圈的每个端头都与一根有保护层的光纤连接. 为保证组装过程中裸光纤线圈的直径免受影响,用环氧树脂胶将有保护层的光纤上伸出线口的一段与保护盒底部两侧的光纤粘贴平台粘连固定. 当裂缝发生时,光纤粘贴平台将随裂缝两侧混凝土向两侧移动,从而带动光纤向两侧移动,传感器内部的裸光纤圈的直径就会变小;裂缝开展后,若在外荷载作用下发生闭合,则裸光纤直径就会逐渐恢复. 裸光纤圈直径变化的过程会引起此处光损耗值的变化,光时域反射仪会监测到这个变化过程,从而实现了对裂缝的监测.

3 实验方法

为验证本传感器的可行性,这里通过两组实验对本传感器进行实验验证. 首先是在无混凝土环境中,用有机玻璃板模拟裂缝产生与发展,使得在试验过程中只有裸光纤线圈直径这一个变量,从而测出最敏感的直径区间,这也为混凝土试验提供初始线圈直径设置的依据;其次是将本装置埋设在混凝土中可能产生裂缝的区域,通过对混凝土施加荷载,监测混

图 1 传感器结构示意图

1, 保护盒; 2, 裸光纤线圈; 3, 有保护层的光纤; 4, 胶; 5, 光纤接头; 6, 出线口; 7, 光纤粘贴平台

图 2 裸光纤圈局部示意图

凝土试件裂缝的发生与发展, 验证传感器的实用性.

3.1 无混凝土环境中的实验过程

在无混凝土的环境中, 将一段裸光纤打结形成线圈, 两端的光纤粘贴于有机玻璃板上, 其中一端与光时域反射仪连接. 通过水平移动有机玻璃板, 模拟裂缝的开裂, 用游标卡尺控制裂缝的大小, 实验装置如图 3 所示.

3.2 混凝土梁实验过程

首先将传感器埋设于混凝土中, 为保证光纤在混凝土梁制作过程中不会断裂, 需要对光纤进行一定的保护措施, 本实验采用直径为 3 mm, 厚度为 2 mm 的橡胶管对光纤进行防护. 运用万能加载机对混凝土梁施加压力使其缓慢产生裂缝, 加载时混凝土试件采用简支形式, 对混凝土梁中间加集中线荷载, 动态监测混凝土裂缝的开裂情况, 测出光损耗与裂缝之间的关系, 实验装置如图 4 所示.

图 3 (网络版彩图)无混凝土环境试验装置图

图 4 (网络版彩图)混凝土梁试验图

4 实验结果

4.1 无混凝土环境实验结果

本实验中, 光时域反射仪输出 1310 与 1550 nm 两种波长的光, 不同波长下裸光纤线圈直径与光损耗对应关系的实验结果如表 1 及图 5 所示, 裂缝宽度与光损耗对应关系的实验结果如表 2 及图 6 所示.

由表 1 可以看出, 在光时域反射仪输出光波长为 1310 nm 时, 裸光纤线圈直径大于 18 mm 时, 光时域反射仪监测得到的光损耗值为零, 可见此时光纤宏弯曲损耗较小可以忽略, 当光纤线圈直径小于等于 8 mm 时, 光时域反射仪将达到其最大测量量程. 当输出光波长为 1550 nm 时, 光纤线圈直径大于 26 mm 时, 光时域反射仪监测得到的损耗值为零, 当直径小于等于 15 mm 时, 光时域反射仪将达到其最大测量量程.

图 5 光损耗与光纤线圈直径关系图

表 1 波长分别为 1310 nm 和 1550 nm 时光损耗与线圈直径关系的试验结果^{a)}

直径(mm)	波长 1310 nm 对应损耗值(dB)				波长 1550 nm 对应损耗值(dB)			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值	第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.401	0.399	0.384	0.395
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.505	0.466	0.450	0.474
21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.973	0.995	1.023	0.997
20	0.000	0.000	0.000	0.000	1.657	1.561	1.587	1.602
19	0.000	0.000	0.000	0.000	2.301	2.259	2.107	2.222
18	0.000	0.000	0.000	0.000	3.163	3.182	3.068	3.138
17	0.080	0.079	0.084	0.081	4.156	4.398	4.337	4.297
16	0.350	0.337	0.365	0.351	4.948	4.607	4.874	4.810
15	0.420	0.426	0.427	0.424	—	—	—	—
14	1.166	1.135	1.163	1.155	—	—	—	—
13	1.954	1.970	1.983	1.969	—	—	—	—
12	2.883	2.866	2.868	2.872	—	—	—	—
11	3.966	3.976	3.971	3.971	—	—	—	—
10	6.832	6.821	6.860	6.838	—	—	—	—
9	10.172	10.174	10.232	10.193	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—

a) “—”表示光时域反射仪监测不到数据

由图 2 可以看出, 光损耗值随着光纤线圈直径的不断减小而增大, 波长为 1550 nm 的光比比波长为 1330 nm 的光感知光损耗要更早. 对于波长为 1550 nm 的光, 光时域反射仪可以感知的线圈直径范围是从 16~23 mm, 而对于波长为 1310 nm 的光, 光时域反射仪可以感知的线圈直径范围是从 9~17 mm. 从图中还可以看出, 波长为 1550 nm 的光, 损耗值最大值为 4.810 dB, 而波长为 1310 nm 的光, 损耗值最大值为 10.193 dB, 可见, 输出光波长为 1310 nm 时传感器的敏感性更高.

由以上结果可知, 在光纤线圈直径为 23 mm 时, 1550 nm 的光开始感知损耗, 所以, 在模拟裂缝的过程, 初始线圈使用 24 mm, 且由于初期光损耗变化不明显, 所以初期采取 2 mm 测一次, 后期采用 1 mm 测一次的方法, 测试结果如表 2 及图 6 所示.

由表 2 可以看出, 输入波长为 1310 nm 的光时, 测试量程为 45 mm-19 mm=26 mm, 输入波长为 1550 nm 的光时, 测试量程为 23 mm-3 mm=20 mm, 可见波长为 1310 nm 测试量程大于 1550 nm.

由图 6 可以看出随着裂缝宽度的增加, 两种输入波长下的光损耗值增长趋势基本一致. 需要注意的是, 图 6 中输入波长为 1310 nm 的光时光损值与裂缝宽度关系曲线之所以在裂缝宽度为 19 mm 才出现光损耗值是由于实验中裸光纤线圈初始直径都采用了 24 mm, 接近输入波长为 1550 nm 的光时本传感器的

初始感知直径, 而输入波长为 1310 nm 的光时本传感器的初始感知直径相对较小, 所以这就是输入波长为 1550 nm 的光时较早出现裂缝宽度与光损值对应关系, 而输入波长为 1310 nm 的光时裂缝宽度与光损值对应关系出现较晚.

4.2 混凝土梁实验结果

由前面的实验结果可知, 输入波长为 1310 nm 的光时, 本传感器量程较大, 所以本部分实验均采用波长为 1310 nm 的光, 而且此波长对应的初始感知直径为 17 mm. 为了提高本传感器对裂缝的初始敏感性, 在本试验中, 线圈初始直径取为 15 mm. 在万能加载机上对埋设有传感器的混凝土梁进行加载, 测量裂缝宽度与光损耗对应关系, 结果如图 7 所示.

由图 7 可以看出, 随着裂缝宽度的增加, 光损耗值起初缓慢增加, 之后光损值增幅明显变大, 与有机玻璃板模拟裂缝发展所得规律基本符合. 在裂缝达到 10 mm 时光纤折断, 量程已达到厘米级别.

5 监测裂缝闭合能力的试验

裂缝在发生后不一定会继续开展, 在外荷载作用下, 有些裂缝还可能继续闭合, 因此要求裂缝传感器不仅能监测裂缝开展过程也能监测裂缝闭合过程. 对于本传感器, 裂缝开展时裸光纤线圈直径逐渐变

表 2 波长为 1310 和 1550 nm 时光损耗数值与裂缝宽度关系表

裂缝宽度(mm)	1310 nm 光损耗值(dB)				1550 nm 光损耗值(dB)			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值	第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0.358	0.406	0.375	0.380
5	0	0	0	0	0.309	0.339	0.328	0.325
7	0	0	0	0	0.387	0.367	0.404	0.386
9	0	0	0	0	0.502	0.506	0.536	0.515
10	0	0	0	0	0.866	0.866	0.876	0.869
11	0	0	0	0	1.050	1.030	1.028	1.036
12	0	0	0	0	1.409	1.327	1.362	1.366
13	0	0	0	0	1.363	1.377	1.262	1.334
14	0	0	0	0	1.356	1.350	1.409	1.372
15	0	0	0	0	1.414	1.433	1.384	1.410
16	0	0	0	0	1.439	1.515	1.481	1.478
17	0	0	0	0	1.632	1.555	1.513	1.567
18	0	0	0	0	1.708	1.722	1.672	1.701
19	0.078	0.072	0.000	0.050	1.798	1.772	1.723	1.764
20	0.085	0.086	0.078	0.083	2.119	2.154	2.195	2.156
21	0.090	0.094	0.095	0.093	3.439	3.266	3.228	3.311
22	0.097	0.084	0.090	0.090	3.888	3.888	4.026	3.934
23	0.098	0.101	0.098	0.099	4.739	5.018	4.749	4.835
24	0.162	0.159	0.149	0.157	—	—	—	—
25	0.258	0.273	0.249	0.260	—	—	—	—
26	0.355	0.353	0.339	0.349	—	—	—	—
27	0.379	0.377	0.379	0.378	—	—	—	—
28	0.428	0.41	0.346	0.395	—	—	—	—
29	0.43	0.428	0.429	0.429	—	—	—	—
30	0.519	0.515	0.513	0.516	—	—	—	—
31	0.789	0.746	0.794	0.776	—	—	—	—
32	0.946	0.936	0.962	0.948	—	—	—	—
33	1.023	1.046	1.051	1.04	—	—	—	—
34	1.115	1.119	1.125	1.12	—	—	—	—
35	1.331	1.333	1.331	1.332	—	—	—	—
36	1.656	1.65	1.656	1.654	—	—	—	—
37	2.259	2.265	2.254	2.259	—	—	—	—
38	2.557	2.559	2.548	2.555	—	—	—	—
39	2.941	2.949	2.918	2.936	—	—	—	—
40	4.108	4.107	4.093	4.103	—	—	—	—
41	5.066	5.067	5.011	5.048	—	—	—	—
42	5.119	5.143	5.119	5.127	—	—	—	—
43	5.384	5.333	5.377	5.365	—	—	—	—
44	7.778	7.771	7.746	7.765	—	—	—	—
45	9.872	9.849	9.859	9.86	—	—	—	—

小, 裂缝闭合时裸光纤线圈又不断恢复变大, 所以裂缝开展闭合的过程就是本传感器裸光纤线圈直径变大变小的过程.通过有机玻璃板模拟裂缝的开展与闭

合, 测得的光损耗值与裸光纤线圈直径的关系如图 8 所示.

由图 8 可以看出, 裸光纤线圈直径增大与减小的

图 6 光损耗与裂缝宽度关系

图 8 裂缝扩展与闭合情况传感器监测能力

图 7 混凝土梁试验光损耗与裂缝关系图

过程所测得的光损耗规律基本相同,说明本传感器

亦可以有效监测裂缝的闭合过程. 光纤线圈直径在减小过程所得的光损耗值要稍高于线圈直径在增大过程中的光损耗值,这是由于光纤线圈直径在变大时,光纤折射率有微小的变化,在线圈直径逐渐恢复时,光纤的折射率没有立刻恢复到原来的状态.

6 结论

本文基于光纤宏弯曲损耗理论提出了一个大量程光纤传感器,通过实验表明,该传感器理论大量程可达 26 mm,可以有效监测混凝土结构上一些无危害性大裂缝的开展情况,可在这些裂缝发展到需要进行必要养护时给以预警,而且该传感器还能有效监测裂缝的闭合过程. 基于以上的研究,本传感器可应用到混凝土结构大裂缝的持续性监测.

参考文献

- 1 Bao T F, Wang J L, Yao Y. A fiber optic sensor for detecting and monitoring cracks in concrete structures. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 3045–3050
- 2 吴中如, 徐波, 顾冲时, 等. 大坝服役状态的合评判方法. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42: 1243–1254
- 3 郑东健, 霍中艳, 李波. 基于 XFEM 的拱坝裂缝变形监控混合模型. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42: 213–219
- 4 Gu C S, Li Z C, Xu B. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete dam based on dynamical structure mutation. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1930–1939
- 5 顾冲时, 李占超, 徐波. 基于动力学结构突变的混凝土坝裂缝转异诊断方法研究. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41: 1000–1009
- 6 吴中如, 苏怀智, 郭海庆. 重大水利水电病险工程运行风险分析方法. *中国科学: 技术科学*, 2008, 38: 1391–1397
- 7 He X F, Gu C S, Wu Z R, et al. Dam risk assistant analysis system design. *Sci China Tech Sci*, 2008, 51: 101–109
- 8 Zheng D J, Huo Z Y, Li B. Arch-dam crack deformation monitoring hybrid model based on XFEM. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 2611–2617
- 9 Mori K, Spagnoli A, Murakami Y, et al. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. *NDT & E Int*,

- 2002, 35: 399–406
- 10 Shah A A, Ribakov Y, Hirose S. Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics. *Mater Design*, 2009, 30: 775–782
 - 11 Huston D, Hu J Q, Maser K, et al. GIMA ground penetrating radar system for monitoring concrete bridge decks. *J Appl Geophy*, 2000, 43: 139–146
 - 12 Cheng C C, Cheng T M, Chiang C H. Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves. *Automat Constr*, 2008, 18: 87–92
 - 13 Guo Z K, Kobayashi A S, Hawkins N M. Further studies on fracture process zone for mode I concrete fracture. *Eng Fract Mech*, 1993, 46: 1041–1049
 - 14 Regnault P, Brühwiler E. Holographic interferometry for the determination of fracture process zone in concrete. *Eng Fract Mech*, 1990, 35: 29–38
 - 15 Biolzi L, Cattaneo S, Rosati G. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. *Cement Concrete Comp*, 2008, 30: 907–916
 - 16 Rossi P, Le Maou F. New method for detecting cracks in concrete using fibre optics. *Mater Struct*, 1989, 22: 437–442
 - 17 Ansari F, Navalurkar R K. Kinematics of crack formation in cementitious composites by fiber optics. *J Eng Mech*, 1993, 119: 1048–1061
 - 18 Brown A W, Smith J P, Bao X, et al. Brillouin scattering based distributed sensors for structural applications. *J Intel Mat Syst Struct*, 1999, 10: 340–349
 - 19 Zhang W, Shi B, Zhang Y F, et al. The strain field method for structural damage identification using Brillouin optical fiber sensing. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: 843
 - 20 Leung C K Y, Elvin N, Olson N, et al. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures. *Eng Fract Mech*, 2000, 65: 133–148
 - 21 Gambling W A, Matsumura H, Ragdale C M. Curvature and microbending losses in single-mode optical fibres. *Opt Quant Electron*, 1979, 11: 43–59
 - 22 廖延彪. 光纤光学——原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2010. 93–94

A novel cracking sensing fiber sensor with wide range

BAO TengFei^{1,2}, ZHAO JinLei^{1,2}, YAN PeiLin³ & ZHANG WanZhu³

¹State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

²College of Water-conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

³China Hydropower Consulting Group Beijing survey and Design Institute Co. Ltd., Beijing 100024, China

The health of concrete structures is usually reflected by cracking. For some structures, small cracks may have little influence on the safety of the structures. But maintenance measures have to be taken if the cracks continue to develop. A sensing fiber sensor with wide range was developed in this paper based on the theory of macro bending loss of fiber. The sensing concept was introduced and the feasibility of this sensor was studied by a cracking simulator. Finally, the sensor was embedded in a concrete beam and the actual application ability of it was studied. The experimental results showed that the sensor has a real-time monitoring capability in cracks monitoring.

fibers, sensor, cracks monitoring, concrete structures

doi: 10.1360/N092014-00189