

文章编号:1672-3031(2017)06-0418-07

库岸边坡变形场与水分场光纤监测技术研究

汪其超¹, 孙义杰², 施 斌¹, 曹鼎峰¹

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211800)

摘要: 三峡库区滑坡灾害频发, 采用高效的滑坡监测技术对预防和降低滑坡灾害十分重要。本文介绍了ROTDR (Raman Optical Time-Domain Reflectometry)、BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) 和FBG (Fiber Bragg Grating) 这3种光纤感测技术, 以及课题组基于这3种技术研发的滑坡体变形场与水分场监测技术。以三峡马家沟I号库岸滑坡为例, 介绍了相关的DFOS (Distributed Fiber Optic Sensing) 监测方案、传感器布设工艺、光纤的保护方法和部分水分场及变形场监测结果的分析成果。监测结果表明: DFOS技术应用于库岸滑坡变形场和水分场监测可行, 可为研究库岸滑坡演化机理及其预警预报提供一个新的监测手段。

关键词: 库岸滑坡; 光纤监测; 水分场; 变形场; 监测方案

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jjwhr.2017.06.002

1 研究背景

每当新的水库兴建, 库区沿岸原有地质环境和自然条件的平衡会被打破, 可能导致古滑坡的复活和新滑坡的产生, 从而改变河流水文情况、影响航道运行、产生堰塞湖等诸多隐患, 对沿岸居民、建筑、农田等形成巨大的危害^[1]。建立库岸滑坡的多场监测系统则可以了解和掌握滑坡体演变过程, 为滑坡的稳定性评价、预测预报及治理提供科学依据, 对保障库区人民的生命财产安全具有十分重要的意义。

分布式光纤感测技术(DFOS)近十多年来迅速发展, 它包括全分布式测量感测光纤应变的布里渊光时域反射技术(BOTDR)^[2], 全分布式测量感测光纤温度的拉曼光时域反射技术(ROTDR)^[3]和准分布式高精度测量应变和温度的布喇格光纤光栅测量技术(FBG)^[4]。DFOS技术具有分布式、高量程、高精度、大面积、长距离传输和实时在线监测的优点, 可通过分布式光纤监测网络获得滑坡体在空间和时间上连续的分布信息, 当滑坡体的变形场或水分场发生改变时, 监测系统可感知它们的分布和大小。DFOS技术目前已广泛应用于水利、建筑、矿山等地质灾害的监测。如Iten等^[5]利用BOTDA技术, 通过埋入光纤应变传感器, 定位并获取了滑坡边界和深部变形; 张丹等^[6]应用BOTDR光纤传感监测技术对某隧道进行了监测研究, 并论证了该技术应用于岩土工程等结构物监测的可行性和优势; 程刚等^[7]开展了基于BOTDR分布式光纤感测技术的采动覆岩变形现场试验研究, 为实现煤矿安全高效开采提供了一种新的监测技术。

本文通过介绍ROTDR、BOTDR和FBG这3种光纤感测技术, 以及课题组基于这3种技术研发的滑坡体变形场与水分场监测技术, 并以三峡马家沟I号库岸滑坡为例, 介绍了DFOS监测方案、传感器布设工艺和部分水分场、变形场的监测成果, 验证DFOS技术应用于库岸滑坡变形场和水分场监测的可行性。

收稿日期: 2016-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230636); 国家重大科研仪器研制项目(41427801)

作者简介: 汪其超(1991-), 男, 安徽池州人, 硕士生, 主要从事岩土工程及分布式监测技术等方面的研究。

E-mail: kicheewang@163.com

通信作者: 施斌(1961-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 主要从事工程地质和环境岩土工程研究。E-mail: shibin@nju.edu.cn

2 库岸边坡光纤监测技术的特点

目前库岸滑坡的监测主要集中在滑坡体的变形场和水分场的监测，随着我们对库岸边坡的预报和防治愈加重视，库岸边坡监测技术也在不断地发展，现在已经发展到仪器监测及自动化监测阶段。表1是几种常规的库岸边坡监测技术^[8]，由表可知：常规的库岸边坡监测技术具有各自的优点，但每种技术都存在一定局限性，如应用条件严格、多为点式监测、精度不高、价格昂贵等^[9]，因此还无法完全适应现代库岸滑坡监测的要求。

分布式光纤感测技术(DFOS)是一种以光为载体，以光纤为媒介，感知并传输被测量外界信号的新型传感技术。将DFOS技术应用于库岸边坡具有以下优势：基于DFOS技术的监测方法可获得滑坡体变形场和水分场的变化，实现了分布式、高量程、高精度、大面积和实时在线监测，弥补了常规库岸边坡监测方法的不足；基于DFOS技术的传感器具有体积小、高精度、长期稳定性好等优点，弥补了常规监测仪器(如振弦式渗压计)的测量精度低且缺乏长期稳定性的不足^[10]；基于DFOS技术的传感器相较于常规的监测手段(如位移计、渗压计)，安装、测试更加简单，光缆可回收，降低了人力、材料成本，具有更高的性价比。由于DFOS技术相较于其它监测技术具有明显的优势，它将进一步成为国内外竞相研发、应用的热点项目，也将在库岸边坡的监测中得到更深入的应用研究。

表1 几种常规的库岸边坡监测技术

种类	优点	不足
大地精密测量法	技术成熟、可确定滑坡范围、精确度较高、监控面积大	易受地形及气象条件影响、周期长、外业量大、不能连续监测
GPS法	可连续监测、高精度、全天候、自动化、费用低	卫星信号受高山地形影响较大、价格昂贵
近景摄影测量法	可多点监测、可随时进行比较	易受气象影响、位移监测绝对精度不高
TDR 检测法	可监测深部变形、价格低、监测时间短、数据提供快捷、安全性高	无法确定滑坡的位移量和滑坡移动的方向
渗压计	灵敏度较高	长期稳定性不足

3 库岸边坡光纤监测系统和监测方法

3.1 库岸边坡光纤监测系统

3.1.1 FBG 光纤光栅无线监测系统 本项目采用的监测系统为苏州南智传感科技有限公司研发的Nzs-FBG-A01型无线监测系统，分为传输和监测系统两部分组成，如图1所示。

该产品可用于长时间的现场测量，多个传感器通道可以同时解调多条光纤上的传感器或进行通道分析，根据现场环境和数据传输条件采用无线通讯将获得所有数据，并传送至客户端软件测试系统，进行实时过程监测。表2是该解调仪系统的测试参数。

课题组于2015年1月成功将FBG无人值守监测系统应用于三峡马家沟滑坡监测项目中。根据近半年的数据分析，证明该系统可对滑坡体中深部变形、渗流渗压及地下水位进行远距离、实时在线监测，并且信号传输非常稳定，对于及时获取和分析监测数据，掌握现场滑坡体水分场、变形场情况提供了一个先进的监测手段。

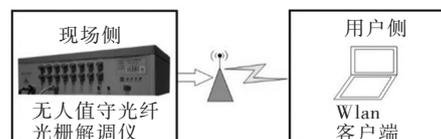


图1 FBG传感器应用示意

表2 NZS-FBG-A01型无人值守FBG解调仪参数表

参数类型	参数值
通道数	8/16
波长范围/nm	1527~1568
波长分辨率/pm	1
重复性/pm	±3
解调速率/Hz	≥1
动态范围/dB	35
光学接口类型	FC/APC
通道最大FBG数量	30

表3 DTS技术参数表

参数类型	参数值
温度精度/℃	≤±1
测温范围/℃	-190~700
定位精度/m	1
空间分辨率/m	0.5~2
主机工作温度/℃	-10~55
湿度	5%~95%
测量时间/s	≤2
测量距离/km	2~10

3.1.2 基于ROTDR的分布式光纤温度测量系统(DTS) 基于ROTDR技术的分布式光纤温度测量系统(Distributed Temperature Sensors, DTS)主要包含工控主机、温度监测主机、测温光缆、组态软件、分析软件。课题组研究采用的Sentinel DTS主要参数见表3。

3.1.3 BOTDR监测系统 BOTDR监测系统由传感系统、数据采集系统、储存与传输、数据处理等部分组成。采用的终端光纤应变解调仪为N8511型BOTDR,表4为N8511主要参数。

表4 N8511光纤应变分析仪的主要技术性能指标

参数类型	参数值				
测量范围/km	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80				
空间采样间隔/m	1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05				
空间定位精度/m	$\pm(2.0 \times 10 - 5 \times \text{测量范围(m)} + 0.2\text{m} + 2 \times \text{距离采样间隔(m)})$				
应变测量范围	-1.5% ~ 1.5% (15000)				
脉冲宽度/ns	10	20	50	100	200
空间分辨率/m	1	2	5	11	22
应变测量精度	±0.004% (40)		±0.003% (30)		

3.2 库岸边坡光纤监测方法

3.2.1 库岸边坡变形场监测

(1)监测技术及方法。库岸边坡向滑坡演化的过程中,岩土体的变形破坏通常是渐进性的^[11]。通过对库岸边坡岩土体的变形场进行测量,可以监测其动态演化规律,建立滑坡演化模式,预测预报滑坡体的失稳滑动^[1]。监测对象包括岩土体深部和浅层变形场。监测时,利用BOTDR的全分布式和FBG的高精度监测的优点,可采用BOTDR与FBG两种光纤传感技术相结合的技术方案。

(2)深部岩土体变形场监测。库岸边坡岩土体深部变形场监测通常采用钻孔埋设测管的方法,即将基于BOTDR和FBG技术的应变感测光缆粘贴于测斜管外壁,将测斜管下放到指定深度,再对钻孔进行回填充实,如图2所示。通过对光纤传感光缆应变进行监测,可对滑坡体深部滑动面进行定位,继而掌握滑坡体的演化过程及规律,实现滑坡体失稳滑动的预测预报。

(3)浅层岩土体变形场监测。库岸边坡岩土体浅层变形场监测可采用感测光纤沟槽定点布设的方法,即在沟槽开挖完成后,在槽内每隔一定间距设置锚固点,将基于BOTDR和FBG技术的应变感测光缆施加一定预应变后逐点固定于锚固点上,如图3所示。

3.2.2 库岸边坡水分场监测

(1)监测目的。库水位的周期性变化将对库岸滑坡体的稳定性产生重要影响。库水位上升时,边坡内部地下水将出现“倒流”现象,地下水浸润线上升,浸润线上部土体含水率增加;库水位下降时,边坡内部地下水浸润线下降,浸润线上部土体含水率减小^[12]。通过监测库岸边坡地下水位及含水率的变化规律,即可掌握边坡体内部水体变化情况,从而为边坡稳定性分析提供参考。

(2)C-DTS含水率光纤测试。根据C-DTS测试技术原理^[13],可将碳纤维内加热式温度感测光缆纵

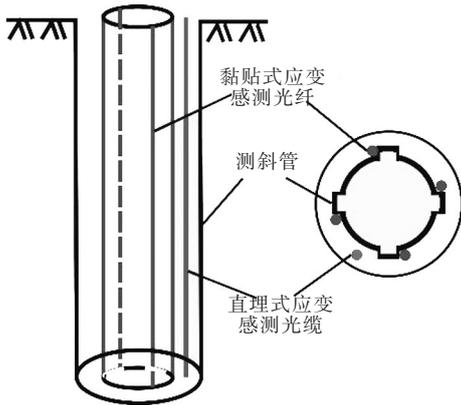


图2 应变感测光缆布设图

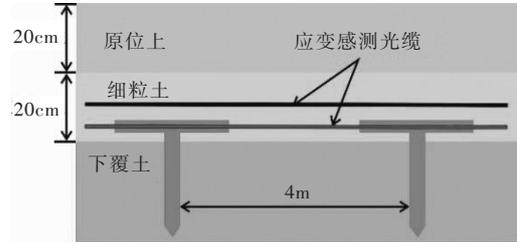


图3 沟槽应变感测光缆布设示意

向植入滑坡体深部(图4)。采用单节长度为4 m，直径为5 cm的PVC管作为内管，环氧树脂胶对内管两端的接口螺丝进行粘合固定，将碳纤维内加热光缆螺旋式缠绕于内管上，逐节将成品下放于钻孔内，安装后采用中细砂对钻孔进行回填，完成光缆布设工作。

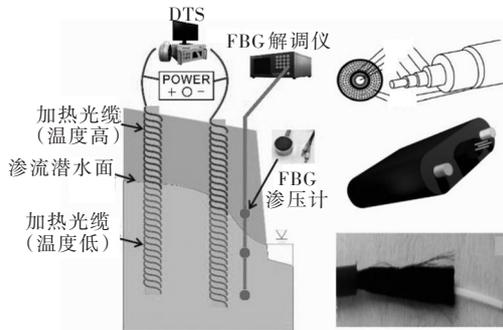


图4 碳纤维内加热光缆及FBG渗压计布设图

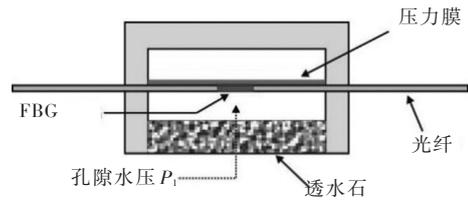


图5 FBG渗压计原理图

(3)FBG 渗压计水位监测。将FBG 渗压计埋设于钻孔中监测边坡深部孔隙水压力，在孔内同一光缆不同位置串联多个FBG 渗压计，实现分层监测，图5为FBG 渗压计原理图。预先向孔内倒入20~40 cm厚的中粗砂，将表面包裹好纱布的渗压计放入孔中^[14]，并在孔口对其固定。渗压计检验合格后，其上回填20~40 cm厚中粗砂，再填入10~20 cm细砂，最后在余孔段灌入水泥膨润土浆，完成FBG 渗压计的布设。

4 库岸边坡光纤监测实例及分析

4.1 马家沟滑坡光纤监测

4.1.1 监测实例简介 马家沟1号滑坡位于三峡库区长江支流吒溪河左岸，整体呈舌形分布，发育有多级缓坡平台和分布较多的陡坎，边坡基岩地层岩性主要为石英砂岩和粉砂岩，基岩上部为粉质黏土及石英砂岩碎块，结构松散，透水性强，遇水易软化、泥化，是三峡地区易滑地层之一。鉴于此，2012年8月开始应用分布式光纤感测技术对滑坡进行光纤布设、数据采集、监测分析工作。前期监测结果显示，DFOS技术可以准确地识别和定位滑坡体深部滑动面，实现探索马家沟滑坡体内部变形规律^[15]。

为进一步掌握马家沟滑坡体中水分场对变形场的影响，掌握滑坡动态演化过程，采用课题组新近研发的C-DTS技术，对滑体中的水分场进行了分布式监测。同时，结合NZS-FBG-A01光纤光栅无线监测系统，对滑坡体变形场进行远程实时在线监测(图6)。

4.1.2 水分场监测 为实现滑坡体水分场的监测，沿滑坡体主滑方向补充设置了3个光纤综合监测孔



图6 光纤传感器布设位置示意

(图6),沿坡体从下到上编号依次为OFS5、OFS4、OFS6,对应测孔深度分别为37.5 m, 40 m, 28 m。用纱布制作成反滤砂包,将渗压计包裹其中。成孔后,采用直埋方式在确定孔深处布设FBG渗压计,用于滑坡孔压及地下水位监测。单节铝制测斜管长度为4 m,将碳纤维内加热式温度感测光缆环向绕制于测斜管上,用布基胶带将光缆固定,再用热缩管对光缆进一步保护,制作过程如图7。

4.1.3 变形场监测 为监测滑坡体深部变形场,采用全接触粘贴方式沿测斜管外壁对称布设应变感测光缆,在测斜孔内布设直埋式应变感测光缆。为监测坡体浅层变形场,在坡体前缘OFS1孔高程处新布设横向测线SF3和纵向测线SF4(图5),其中SF3垂直于主滑方向,SF4平行于主滑方向。分别采用定点和直埋的方式布设应变感测光缆,用于坡体浅层场监测,施工状况如图8。布设、回填完成后在地表砌筑光纤综合监测墩,将通信光缆一端与感测光缆熔接,熔接端置于电表箱内封闭保护,另一端引至监测站,便于后期采集数据。



图7 碳纤维内加热光缆布设图



图8 沟槽施工图

4.1.4 光纤的保护 为提高光纤在钻孔及槽内的成活率,获得长期、有效的监测数据,施工中采取以下措施:(1)将0.9 mm应变光纤粘贴于管壁四周凹槽,于表面均匀涂抹环氧树脂,形成高强度覆盖层以保护光纤;(2)直埋于土体中的光纤采用金属基索状结构,光纤外表包有高强度金属加强件,提高了传感光纤的强度;(3)钻孔中布设好管壁光纤、直埋光纤后,回填材料采用细砂、黏土球,按一定配比混合均匀后逐次回填,减少对光纤的磨损;槽底部布设直埋式应变感测光缆,上层覆盖20 cm厚度细粒土,再回填不含碎石的原位土。

4.2 监测结果分析

4.2.1 OFS5孔渗压水位与库水位比较 根据每日公布的三峡库区水情数据,取茅坪水文站2016年1月20日至3月23日的库水位数据,与相同时段OFS5孔渗压水位对比分析。由图9可知:除去个别数据,1月20日至3月23日期间,渗压水位与库水位的变化规律基本一致。因此,可通过FBG渗压计读数较好地反映库水位变化规律,从而对库岸边坡的水分场进行分析。

4.2.2 OFS5孔渗压水位与测斜管应变比较 将OFS5孔的渗压水位与黏贴式应变感测光缆的变形进行比较,由图10可知:2016年1月21日至1月30日,边坡前缘水位在缓慢下降,测斜管所受的应变增速较小;1月30日至3月3日,水位下降速率在增大,测斜管的变形增速也增大;3月3日至3月8日,水位在快速下降,测斜管所受应变的增速进一步增大;3月8日之后水位有所上升,应变增速减

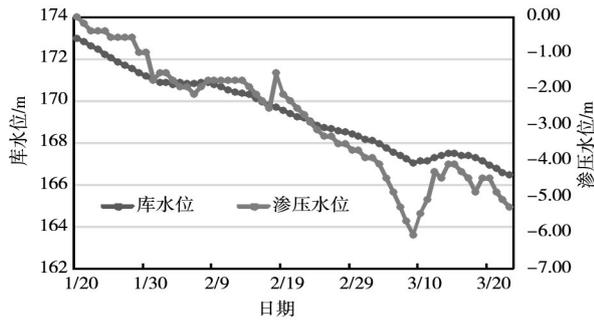


图9 渗压水位与库水位

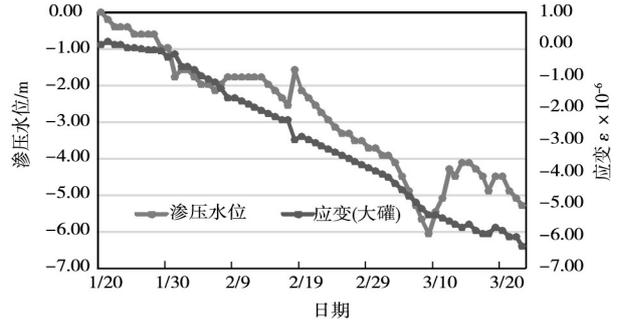


图10 渗压水位及测斜管应变

小。可知：水位变化与边坡变形密切相关，水位加速下降过程中，应变增速在增加，上升过程中，应变增速减小。

4.2.3 基于C-DTS技术的土体含水率部分监测结果由图11可知，地下深度在0~3.8 m范围，土体体积含水率在0.15~0.23范围内波动；3.8 m~4 m范围，土体体积含水率出现突变，由0.17骤增至0.35；4 m以下时，土体体积含水率基本稳定在0.34~0.43之间。根据实验室的测定，土体含水率在0.32以上时土体已经饱和，由此可判定0~3.8 m深度范围土体处于非饱和状态，4 m以下深度土体为饱和状态，即地下4 m深度处为地下水位深度，与实测水位深度一致。

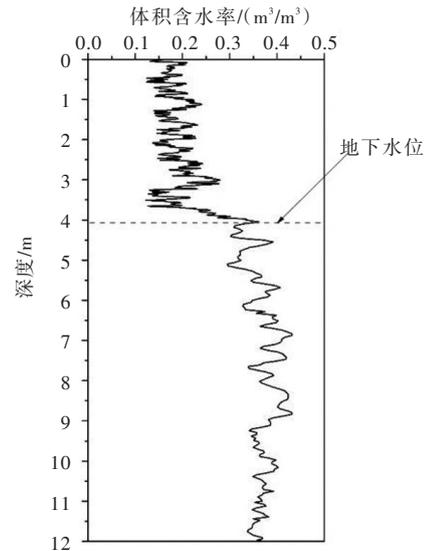


图11 滑坡土体含水率随深度变化曲线

5 结论

本文介绍了库岸边坡水分场和变形场的DFOS光纤监测技术，提出了水分场与变形场的监测方法，结合三峡马家沟库岸滑坡，建立了基于DFOS技术的光纤综合监测系统，对水分场及变形场的部分监测数据进行了分析，得到以下结论：(1)FBG渗压计读数能很好的反映出库水位的变化规律。(2)边坡变形场与库水位变化密切相关，库水位下降，变形速率增大；水位上升，变形速率降低。(3)C-DTS技术可以准确测定土体中水分场的变化规律，可确定滑坡体滑动面地下水位变化规律。(4)监测结果证明了DFOS技术对库岸边坡水分场和变形场的监测的可行性，值得推广应用。(5)由于监测时间较短，测得水位数据主要处于库水位下降过程，所得的结论还不够充分，因此下一步将继续对马家沟滑坡进行跟踪监测，确定库水位下降及上升的完整周期内水分场与变形场的变化及其相互联系。

参 考 文 献：

- [1] 孙义杰. 库岸边坡多场光纤监测技术与稳定性评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [2] 施斌, 张丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[J]. 工程地质学报, 2007, 15(S2): 109-116.
- [3] 丁勇, 施斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 338-342.
- [4] 林玉兰, 陈永泰. 拉曼散射分布式光纤温度传感器的设计[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(2): 33-36.
- [5] ITEM M, PUZRIN A M, SCHMID A. Landslide monitoring using a road-embedded optical fiber sensor[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008.

- [6] 张丹,施斌,徐洪钟.基于BOTDR的隧道应变监测研究[J].工程地质学报,2004,12(4):422-426.
- [7] 程刚,魏广庆,童恒金,等.煤层采动覆岩变形分布式光纤感测技术现场试验研究[J].工程地质学报,2014,22(S1):524-529.
- [8] 李亚玲,苏海峰,李铭全.滑坡监测方法研究综述[J].西南公路,2015(4):153-156,164.
- [9] 李川,张以谟,韩雪飞,等.光纤Bragg光栅的温度传感研究[J].传感技术学报,2002,15(4):311-314.
- [10] 苏军,王治宇,袁子清,等.光纤光栅(FBG)传感器在尾矿库在线监测中的应用[J].中国安全生产科学技术,2014(7):65-70.
- [11] 肖衡林,鲍华,王翠英,等.基于分布式光纤传感技术的渗流监测理论研究[J].岩土力学,2008,29(10):2794-2798.
- [12] 罗红明,唐辉明,章广成,等.库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J].地球科学(中国地质大学学报),2008,33(5):687-692.
- [13] 曹鼎峰,施斌,严珺凡,等.基于C-DTS的土壤含水率分布式测定方法研究[J].岩土工程学报,2014,36(5):910-915.
- [14] 陈平,朱赞凌,陈念斯,等.公路边坡监测与信息化施工[J].广东公路交通,2003(S1):60-63.
- [15] SUN Y J, CHEN S E, SHI B, et al. Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR[J]. Smart Struct & Syst, 2014, 13(1): 41-53.

Study on optical fiber monitoring technique of deformation field and moisture field of bank slope

WANG Qichao¹, SUN Yijie², SHI Bin¹, CAO Dingfeng¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2. College of Transportation in Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Landslide hazards occur frequently in the Three Gorges Reservoir area. Therefore, it is of great importance to use highly efficient landslide monitoring techniques to prevent and mitigate these hazards. This paper describes three optical fiber sensing technologies, i.e., ROTDR, BOTDR and FBG, and the corresponding landslide deformation field and moisture field monitoring techniques. Taking the Majiagou #1 landslide as an example, the DFOS-based monitoring scheme, the layout of sensors, and the method for fiber protection are introduced, and the monitoring results of deformation field and moisture field are analyzed. The monitoring results show that it is feasible to apply DFOS technology to deformation and moisture fields monitoring of reservoir landslides, which can provide a new method for investigating the evolution mechanism and early warning of reservoir landslides.

Keywords: bank slope; fiber monitoring; moisture field; deformation; monitoring program

(责任编辑: 祁 伟)