第 30 卷 第 2 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 30 No. 2
2017 年 6 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Jun. 2017

基于 BOTDA 的岩质边坡锚杆变形规律分析

鲁洪强[1]， 高俊启[2]， 任 强[1]， 吴佳骐[2]

(1. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司，山东 青岛 266101；
2. 南京航空航天大学 土木工程系，江苏 南京 210016)

摘要：根据崂山路边坡现场情况，基于分布式光纤传感技术，设计一套监测网络，在锚杆上布设光纤，使用 BOTDA 设备进行长期监测，分析锚杆应变随时间的发展状况，研究同一断面不同锚杆的应变分布规律。研究成果表明，施工完成 1 a 后锚杆主要受拉力影响且多数锚杆拉力减小，在锚头处存在应力集中效应，而在锚杆中部至锚端应变变化较小。在同一边坡断面上靠近坡顶位置的锚杆应力降低较大，不同断面、不同高度的锚杆应变不同但主要呈现收敛的趋势，边坡趋于安全。

关键词：BOTDA；边坡；锚杆；应变；监测

中图分类号：TU454 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-0373(2017)02-0031-06

0 引言

分布式光纤传感技术可应用于边坡监测、温度场监测、土体变形监测等多个领域[1]。它采用传感光纤作为传感器件，克服了传统金属监测元件的不足，在耐腐蚀性、耐久性、适应性、敏感度、分布式等方面优势明显[2-3]。BOTDA 法是一种基于布里渊光时域分析的光纤传感技术，也被称为受激布里渊光时域散射分析技术，其基本原理[4]是当光纤沿线存在轴向应变或者温度变化时，光纤中的背向布里渊散射光的频率相对于注入的脉冲光频率将发生漂移，而布里渊散射光频率的漂移量与光纤所受的轴向应变和温度变化呈良好的线性关系，由此可以确认监测对象的变形情况。

国内外许多学者对光纤传感技术在边坡工程中的应用开展了研究工作。何建平[5]利用全尺度分布式监测手段对结构损伤探测问题展开研究，表明全尺度分布式监测手段能更有效地揭示结构损伤的全局性态。王宝军等[6]探究了 BOTDR 技术对埋入土工织布的边坡形变稳定监测及早期破坏警报的可行性，发现将光纤依附于锚杆和框梁中时监测效果更好。Higuchi K et al[7]将基于 OTDR 光纤传感技术的监测系统安装在富士山的 Takisaka 边坡上进行监测，研究发现光纤的弯曲会引起传输光的衰弱，与位移计测得的结果误差极小。隋海波等[8]利用 BOTDR 技术对粤赣高速公路边坡锚杆进行了监测研究，并结合数值模拟分析对其应变规律进行了总结。

以往研究工作多针对边坡施工完成后中短期内的变形或是锚杆拉拔试验展开[9-10]，而现主要对施工完成 1 a 后的锚杆应变情况加以研究，对边坡后期的发展状况进行监测分析，对监测数据与边坡稳定性的关系进行分析，提出岩质边坡锚杆的变形规律。

1 监测方案

1.1 项目概述

青岛市崂山路扩建工程，南面临海，北侧靠山，规划为城市主干道，全线设护坡 9 处，本监测路段位于 C 坡。该区岩性为安山岩、硅化安山岩，可见斑状结构、块状构造。构造岩以安山质断层角砾岩、糜棱岩、

收稿日期：2016-05-07 责任编辑：车轩玉 DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2017.02.06
基金项目：中国博士后科学基金(2013M541666)；江苏省博士后科研资助计划(1302138C)
作者简介：鲁洪强(1973-)，男，本科，教授级高工，主要从事道路与铁道工程的研究。E-mail：lhq9@163.com
鲁洪强，高俊启，任强，等. 基于 BOTDA 的岩质边坡锚杆变形规律分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2017，30(2)：31-36.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

碎裂岩为主。断裂两侧岩石较破碎,风化蚀变较强,主要为高岭土化、褐铁矿化,岩石含水性差。C坡长约178 m,高度为7.3～18.8 m,坡底标高约31.5 m,坡度60°～70°。自上而下分为杂填土、强风化安山岩、中风化安山岩3个岩层,C区边坡地质剖面图如图1所示。边坡安全等级二级,主要采用锚杆支护+喷播的处理方法。C1断面锚杆布置见图2。所用锚杆取HRB335级钢,直径25 mm,间距1.5 m,全长涂刷环氧树脂涂层防腐,方向与岩面垂直,钻孔孔径100 mm,采用孔底返浆的方式注浆。

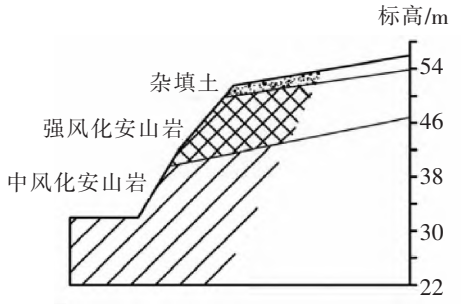


图1 崂山路C区边坡地质剖面图

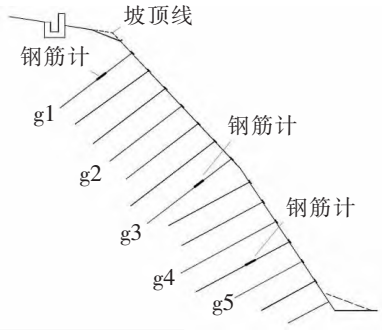


图2 C1断面锚杆布置图

1.2 光纤监测

分布式光纤传感技术首先需要解决光纤的固定与温度补偿问题[11]。本研究中锚杆上铺设的光纤采用粘结式固定与直接温度补偿的方法(图3)。在锚杆一侧,利用粘结材料将拉紧的光纤固定在锚杆上,绕过锚杆末端后,在锚杆另一侧将光纤套上软管,软管内光纤保持自由松弛状态,作为温度补偿段,贴靠于锚杆另一侧。光纤安装后的监测锚杆见图4。锚头处的传感光纤通过软管进行保护,并固定于锚杆锚头上。当锚杆安装于边坡之后,进行首次测量,确定应变段和温度补偿段。边坡监测中所用的光纤均为标准单模光纤,直径2 mm,表面材料为聚氨酯,应变传感系数499.8 MHz/%,温度传感系数1.89 MHz/℃,所用分析设备为瑞士产DITEST STA-R型BOTDA。

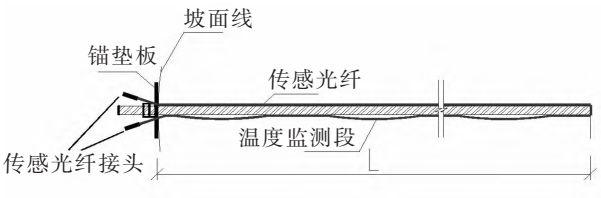


图3 锚杆光纤布设图

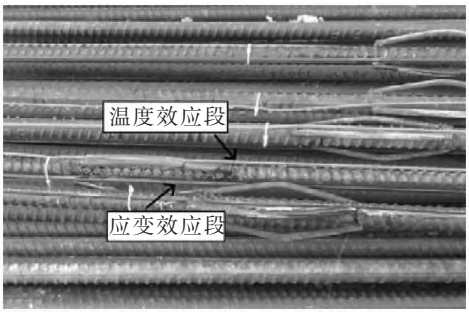


图4 布设光纤的监测锚杆

C坡监测共有5个断面(c1,c2,c3,c4,c5),其桩号分别为K0+034.3,K0+060.0,K0+080.0,K0+105.7,K0+138.0,每个断面分别在5根锚杆(g1,g2,g3,g4,g5)上铺设有光纤,各断面监测锚杆自上而下编号,锚杆监测布置见图5。普通锚杆布置见图2。

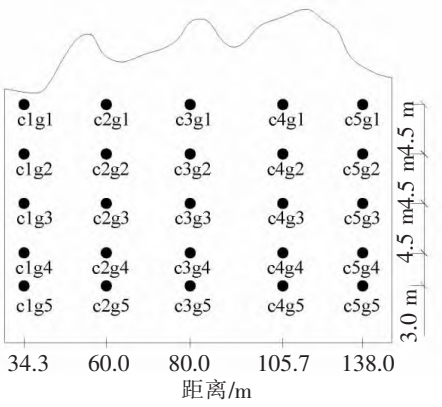


图5 监测锚杆布置图

2 数据分析

光纤传感器对应变与温度都十分敏感,其布里渊频移受到应变与温度变化两者影响的叠加,为准确得到监测对象的应变效应,需要消除温度效应的影响。光纤的轴向应变和温度与布里渊散射光频率的漂移量关系为

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$v_B(\varepsilon,T)=v_B(0,T_0)+\frac{\partial v_B(\varepsilon,T)}{\partial \varepsilon}\varepsilon+\frac{\partial v_B(\varepsilon,T)}{\partial T}\Delta T \tag{1}$$

式中,$v_B(\varepsilon,T)$是光纤应变为 ε,温度为 T 时的布里渊频移;$v_B(0,T_0)$是光纤应变为 0,温度为 T_0 时的布里渊频移。T_0、T 分别为初始温度与测量时的温度;ε 与 ΔT 分别为应变与温度变化量;$\partial v_B(\varepsilon,T)/\partial\varepsilon$ 与$\partial vB(\varepsilon,T)/\partial T$ 即应变系数与温度系数。

对单根锚杆不同时间的布里渊频率做差可得频移,并可分为温度效应段与应变温度效应叠加段。图 6 所示为 2014 年 7 月 14 日至 2015 年 4 月 16 日间 c3g3 锚杆光纤的频率与频移情况。

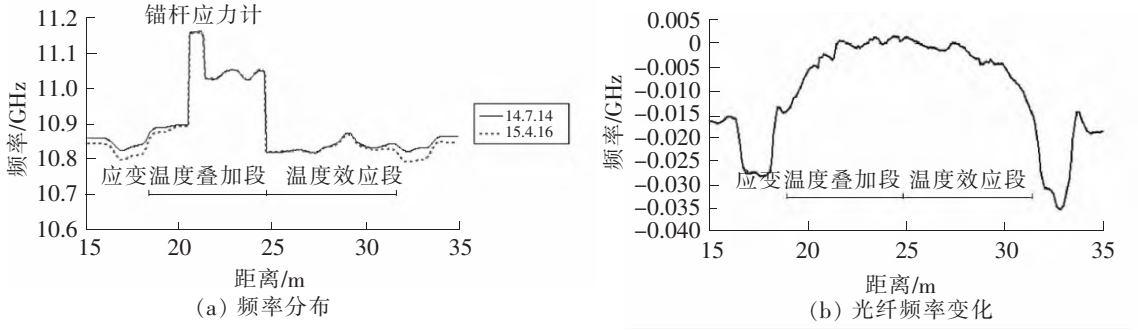


图 6　光纤频率频移图

2.1　锚杆应变分析

以 2014 年 7 月 14 日即施工完成约 1 a 后的监测数据为初始值,该时间点至 2014 年 11 月 4 日为 t1(113 d),至 2015 年 1 月 10 日为 t2(180 d),至 2015 年 4 月 16 日为 t3(276 d),至 2015 年 8 月 4 日为 t4(386 d)。图 7 为 c1g1、c2g1、c4g1、c4g3 锚杆应变随时间的分布,距离表示距坡面长度。

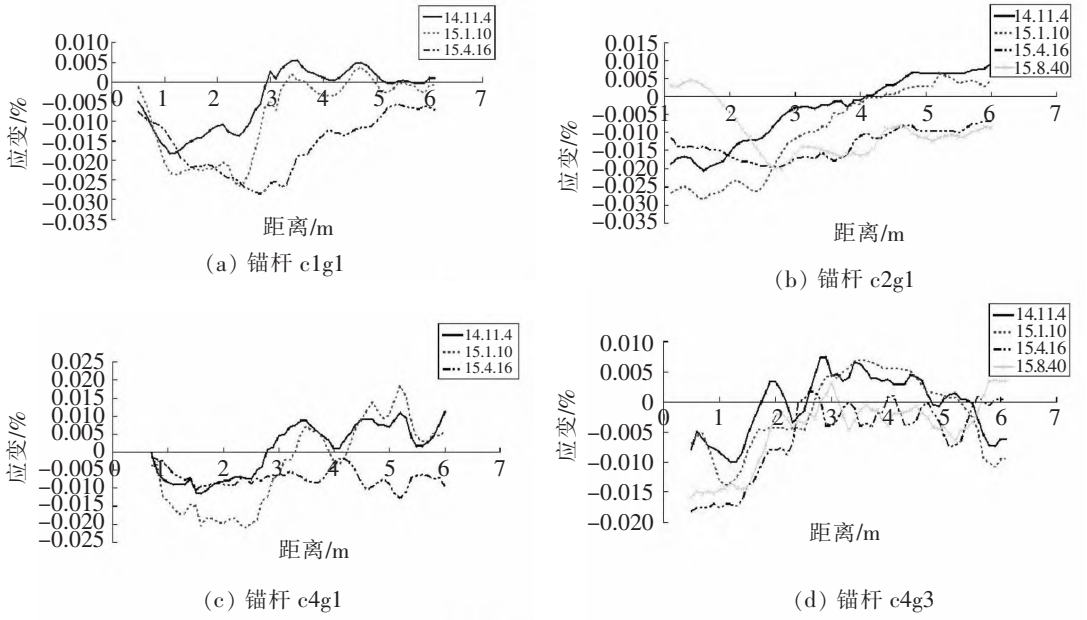


图 7　锚杆应变图

由图 7 可见,在锚杆深度方向上,不同锚杆在不同时间段上呈现相对一致的规律,即在浅部靠近锚头的位置,锚杆应变减小,即相对 2014 年 7 月 14 日时的应力,锚杆应力减小。应力减小段落主要集中在深度 1～3.0 m 位置。在锚杆深度 3～6 m 的段落,锚杆应变变化较小,相较 2014 年 7 月 14 日时的应力状态,锚杆深部应力稍有波动,但变化不大,较为稳定。

c1g1 在 1～3 m 处具有明显的负应变,这表明其拉力有所下降。随时间推移,锚杆应变趋于减小,至 2015 年 4 月 16 日,经过 276 d 的发展,c1g1 锚杆全线应变均减小,这表明 c1g1 锚杆发生应力松弛。c2g1

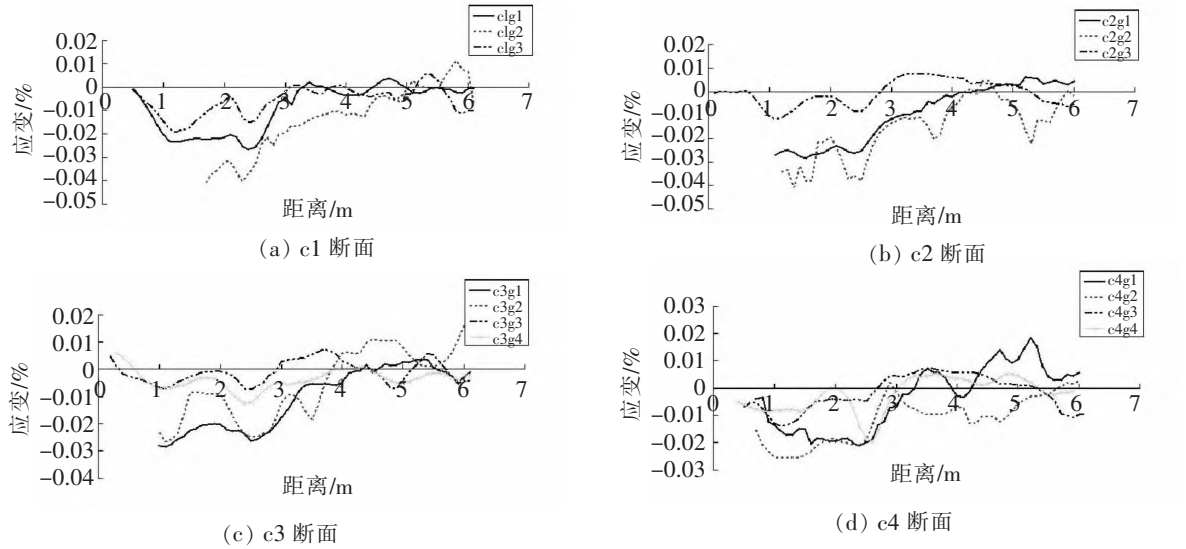
?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

锚头处应变先减后增,但到2015年8月4日时,在1～3 m内产生了异常变形,即锚头应变突然增大,比2014年7月14日的应变还大。查询2015年8月4日的天气记录,发现当日温度25～29 ℃,雷阵雨。这说明当日的降雨导致锚杆c2g1穿过的表层岩层发生了变化,引起锚杆锚头应变异常,深部岩层稳定。c4g1锚杆在1～3 m范围内应变在减小,在3～6 m范围内应变稍有增加。至2015年4月16日,经过276 d的发展,c4g1锚杆全线应变均减小,这表明c4g1锚杆发生应力松弛,岩层稳定。c4g3锚杆在0～2.5 m范围内应变减小,在2.5～6 m范围内应变稍有波动,变化不大。这说明经过386 d的发展,c4g3锚杆同样全线应变均减小,这表明c4g3锚杆应力降低,c4g3锚杆附近岩层稳定。

总体来说,不同位置的锚杆沿线应变随时间的变化较为复杂。施工后期锚头3 m范围内存在较大负应变,表明其拉应力逐渐减小。3～6 m范围内锚杆应变变化较小。随时间推移,多数锚杆应力从锚头至锚端均减小。当天气降雨时,锚杆c2g1锚头应力明显增加,说明锚杆c2g1附近岩层受降雨的影响,有发生滑移的危险。

2.2 边坡各断面应变分析

分析相同断面不同位置锚杆的应变情况,图8为c1、c2、c3、c4断面2015年1月10日测量的应变结果。



(a) c1断面 (b) c2断面

(c) c3断面 (d) c4断面

图8 断面应变图

由图8可见,c1断面中c1g2锚杆应变降低最多,c1g1与c1g3应变降低接近。3个锚杆深部应力变化不大,均是锚头段1～3 m范围应力下降明显,表明c1断面岩层稳定;c2断面中c2g3锚杆应变降低最小,c2g1与c2g3锚杆应变变化相近。在锚头1～4 m范围内,锚杆c2g1与c2g3的应力均降低,表明c2断面岩层稳定。c3断面中c3g1与c3g2应变降低最大,c3g3与c3g4锚杆应变变化较小。4个锚杆在锚头段落应力均降低,这表明c3断面也是稳定的。c4断面中c4g1、c4g2锚杆应变1～3 m范围下降较大,c4g3、c4g4锚杆应变变化相对较小,但锚头段应力也是下降的,说明c4断面整体上是稳定的。比较4个断面锚杆应变状态可以看出,靠近坡顶位置的锚杆应力降低较大,锚杆中部至底部的应力下降较小。整个边坡是稳定的。

边坡问题多是围绕边坡稳定性分析展开的。通过监测锚杆应变随时间的发展规律可以确定其内力变化的敛散情况。若应变持续发散式增加则表示工程可能存在危险,需要进行预警,若应变增速收敛或是拉力逐渐减小则可辅证工程的安全性与可靠性。本次边坡监测项目中大部分锚杆的应变逐渐减小,表示其拉力减小,锚杆内力趋于稳定,边坡工程整体安全可靠。

2.3 锚杆应力计测量结果

在利用传感光纤进行边坡监测的同时,在5个断面中g1、g3锚杆上也安装了锚杆应力计(见图2)。2014年7月13日c2g1锚杆上钢筋计测量的锚杆拉力为23.08 kN。以2014年7月13日测量结果为基

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

准，钢筋计和传感光纤测量结果见图 9。

由图 9 可见，随着时间增加，由 2014 年 11 月 4 日至 2015 年 8 月 4 日，锚杆拉力逐渐减小。钢筋应力计测量结果和传感光纤测量结果一致，这说明 BOTDA 测量结果是准确的。

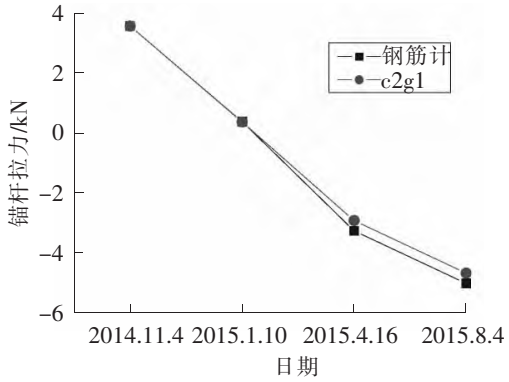


图 9　c2g1 锚杆拉力变化

3　结论

通过在崂山路边坡若干断面的锚杆上布设传感光纤，利用分布式光纤传感技术对锚杆变形进行长期的监测，探讨其应力应变分布规律，结论如下：

(1)施工完成 1 a 后多数锚杆拉力减小，拉力减小段落主要集中在锚杆靠近锚头深度 1.0～3.0 m 位置。在锚杆深度 3.0～6.0 m 的段落，锚杆拉力变化较小。不同锚杆应变随时间的发展存在差异，但大部分锚杆的应变趋向收敛。

(2)在同一边坡断面上靠近坡顶位置的锚杆应力降低较大，靠近坡底及坡中位置的锚杆应力降低较小。锚杆中部至底部的应力下降较小。大部分锚杆的应变逐渐减小，锚杆内力趋于稳定，边坡工程整体安全可靠。

(3)对于降雨等特殊天气情况，BOTDA 技术可以发现不稳定岩层位置。基于 BOTDA 的光纤传感技术在边坡锚杆监测中是可行的，可以用于危险边坡监测。

(4)相比锚杆应力计，分布式光纤传感技术最显著的优点就是可以测出光纤沿线任一点上的应变、温度和损伤等信息，实现对监测对象的全方位监测。但由于基于 BOTDR 的分布式光纤传感器的布里渊频移同时包含应变和温度信息，这种应变和温度的交叉敏感问题增加了光纤布设和后期数据处理难度。

参　考　文　献

[1]高磊，陈晖东，余湘娟，等. 岩土与地质工程中分布式光纤传感技术研究进展[J]. 水利水运工程学报，2013(2)：93-99.

[2]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.

[3]刘永莉. 分布式光纤传感技术在边坡工程监测中的应用研究[D]. 杭州：浙江大学，2011.

[4]耿军平，许家栋，韦高，等. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的进展[J]. 测试技术学报，2002，16(2)：87-91.

[5]何建平. 全尺度光纤布里渊分布式监测技术及其在土木工程的应用[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[6]Wang Baojun, Li Ke, Shi Bin, et al. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil monitoring [J]. Landslide, 2009, 6(1):61-68.

[7] Higuchi K, Fujisawa K, Asai K, et al. New landslide monitoring technique using Optical Fiber Sensor in Japan [C]// Schaefer V R, Schuster R L and Turner A K. Proceedings of the First North American Landslide Conference, Landslides and Society: Integrated Science, Engineering, Management, and Mitigation. Vail, Colorado, USA: Association of Engineering Geologists Special Publication, 2007, 23:73-76.

[8]隋海波，施斌，张丹，等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(s2)：3725-3731.

[9]宋杨，娄国充，高云娇. 复杂地质条件下隧道燕尾段支护体系现场监测试验分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2013，26(3)：43-47.

[10]张旭珍. 关角隧道大变形处理技术[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2011，24(1)：17-20.

[11]吴智深，施斌，原田隆郎，等. 可用于结构健康监测的 BOTDR 光纤变形检出特性的试验研究[J]. 土木工程学报，2005，38(8)：56-73.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Analysis on Rock Slope Monitoring Based on BOTDA

Lu Hongqiang[1], **Gao Junqi**[2], **Ren Qiang**[1], **Wu Jiaqi**[2]

(1. Qingdao Municipal Engineering Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266101, China;
2. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Taking a monitoring slope project as an example, a monitoring system based on distributed optical fiber sensor was designed, using BOTDA for long term monitoring to analyze the time-strain development and the distribution of stress of anchor bars in a slope of Laoshan Road. The results show that it is mainly affected by the tensile force after one year and the majority of the tensile forces in bolts decrease. There exists the effect of stress concentration in the anchor head, but in the anchor bar from the middle to the end its strain is becoming smaller. The stress reduction in the middle of anchor bar which is near the top of the slope is apparent. The strains at the same depth for the anchor bars installed at different heights are different but the majority of internal force of anchor bars are convergence over the long term and the slope tends to be safe.

Key words: BOTDA; slope; anchor bar; strain; monitoring

(上接第5页)

[9]何涛,张巍,吴植安. 基于动静载试验数据的预应力混凝土梁模型修正方法试验研究[J]. 公路交通科技,2015,32(12):75-80.

[10]张耀庭,李宏健. 全预应力砼梁动力性能试验研究[J]. 工程力学,2008,25(S1):71-75.

[11]王慧东,马其森. 韩江大桥(48+80+80+88+48)m道岔连续梁车桥耦合动力响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(1):12-16.

[12]刘寒冰,王龙林,谭国金,等. 预应力对体外预应力简支钢梁自振频率的影响[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(1):37-39.

Experimental Study on Sensitivity of Steel Beam Inherent Frequency to Impact of Prestress

Ding Hongyan[1,2,3], **Zhao Sisi**[3], **Liu Peng**[3], **Guo Yaohua**[3]

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;
3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the relationship between the fundamental frequency of simple steel beam and prestressed value, two analysis methods based on FFT(Fast Fourier Transformation) and HHT (Hilbert-Huang Transform), with prestressed simply-supported steel beam as the research object, by the research on the steel beam under different prestress value base frequency, the applicability of the two analysis methods are compared. The results show that the traditional mechanics theory cannot well explain the relationship between the fundamental frequency and prestress value, compared with FFT analysis method. The HHT method can better capture the instantaneous frequency of the beam body. The fundamental frequency will increase with the increase of prestress value, and the instantaneous frequency of the oscillation amplitude will increase too.

Key words: prestress; simply supported beam; fundamental frequency; experimental study

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net