

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.003

基于BOTDA的削坡作用下边坡破坏过程 模型试验研究*

张磊¹, 施斌¹, 魏广庆²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要:在众多诱发滑坡的因素中,人工削坡引发的边坡失稳现象十分普遍。采用布里渊光时域分析技术(以下简称BOTDA技术),通过模型试验和数值模拟分析,对削坡作用下的边坡变形机理及其演化过程进行了研究。由于传感光缆与土体之间的耦合性直接影响着监测结果的准确性,首先通过不同围压作用下的拉拔试验,掌握了传感光缆与土体耦合变形关系。然后,设计了坡顶加载试验模型,通过在水平向和竖直向植入传感光缆,实现对边坡模型在削坡作用下土体内部变形场的分布式监测。试验结果表明:水平和竖直向传感光缆监测到的应变异常区域与潜在滑动面位置相吻合,并被数值模拟所证实;在BOTDA监测数据的基础上提出了边坡模型水平特征最大应变值与安全系数之间的经验公式,对削坡作用下的边坡稳定性状态进行了评价,进而可对边坡失稳做出预警。

关键词: 边坡变形; 削坡; 模型试验; 布里渊光时域分析(BOTDA)技术; 破坏过程

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0698-08

Model Test Research on Slope Failure Process under Slope Cutting Based on BOTDA Technology

ZHANG Lei¹, SHI Bin¹, WEI Guangqing²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Nanjing University High-tech Institute at Suzhou, Suzhou 215123, China)

Abstract: Among other factors, artificial slope cutting is one of the most common triggering factors of landslide. In this paper, a series of model tests and numerical simulation have been conducted to investigate the failure mechanism and evolution process of the slope under slope cutting. As the coupling between sensing cables and soil directly affects the accuracy of monitoring results. Firstly, a new pull-out apparatus is designed and the coupling deformation relationship between sensing cables and soil is acquired through pull-out tests under different confining pressures. According to the pull-out tests, a surcharge loading test model was designed. Strain-sensing cables that can capture the strains at different positions of the model slope were embedded in the soil mass. The measurement data of the cut slope were analyzed. It can be found that an abnormal strain-field area obtained by horizontal and vertical sensors coordinated with the location of the potential slip surface. This is verified by a comparison

* 收稿日期:2018-07-05;修回日期:2018-12-05

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(41427801)资助

作者简介:张磊(1992-),男,博士研究生。主要从事岩土工程及分布式监测技术研究。Email:njuzhangl@163.com

通讯作者:施斌(1961-),男,教授,博士。主要从事工程地质和环境岩土工程方面的研究。Email:shibin@nju.edu.cn

between the measurements of the cables and numerical simulation results. Based on the BOTDA data, an empirical relationship is explored between the horizontal characteristic maximum strain and the safety factor to estimate the slope stability condition and perform early-warning of landslide under the action of slope cutting. The conclusions drawn in this study are of great significance to stability evaluation of artificial cut slopes.

Keywords: slope deformation; cut slope; model test; BOTDA technology; failure process

引言

作为一种常见的地质灾害,边坡失稳导致的滑坡灾害广泛分布于世界各地,并给人民的生命财产及生产活动造成巨大的损失^[1]。边坡的稳定性受一系列因素的影响,包括:降雨入渗、地下水渗流、河流冲刷、地震以及人工削坡等。其中,人工削坡诱发的边坡失稳现象十分普遍,因此,许多专家对此进行了研究,如王静等^[2]通过锚杆上黏贴的应变计分析了在人工削坡作用下边坡内部的变形情况,对滑带的大致位置进行了推断;张帆宇等^[3]基于FLAC3D数值模拟技术对削坡作用下的边坡变形破坏过程进行了模拟,探究了边坡的失稳机理;M. S. Morse等^[4]通过PIV技术对削坡作用下边坡表面的位移进行监测,推断出滑带发育的位置并对边坡的稳定性进行预测。但是这些研究都存在一些问题,如多为点式测量,无法获取连续的变形场信息;数值模拟对边界条件和材料属性进行了简化,得到的结果精度不高;测试技术只能获得边坡表面的位移信息,对其内部的变形情况缺乏了解等。因此影响了对削坡作用下边坡变形规律的认识。

分布式光纤感测技术(Distributed Fiber Optic Sensing Technology,简称DFOS技术),在近十几年来得到了快速的发展。由于其具有分布式、长距离、高分辨率、耐久性好、抗干扰能力强等监测优点,在土木工程和岩土工程领域得到不断应用,如高俊启等^[5]利用BOTDR技术对桥梁和路面进行了应变监测,根据不同位置测试所得的应变来诊断桥梁和路面的健康情况;M. Iten等^[6]利用BOTDA技术,通过在边坡内埋入光纤应变传感器,成功定位并获取滑坡边界和深部变形;王宝军等^[7]利用分布式光纤感测技术开展了室内边坡模型试验,得到了传统测试技术无法获取的、与边坡稳定相关的监测信息,证明了分布式光纤感测技术用于室内模型试验的独特优势。

本文利用BOTDA感测技术,对削坡作用下边

坡模型的水平向和垂直向的应变进行了分布式监测,发现了一些新的现象,并在边坡稳定性评价方面取得了新的进展。

1 基于BOTDA的边坡变形监测原理

布里渊光时域分析(BOTDA)的测量原理如图1所示。该技术在光纤两端分别注入阶跃型泵浦脉冲光和连续光,通过调节两束光频率,测量从光纤一段耦合出的连续光功率,可以得出传感光纤上各区域产生最大能量转换时的频率差。由于布里渊频移与光纤温度和应变间存在线性关系,因此可以得到光纤应变与温度的信息。布里渊频移与温度和应变间的线性关系可以表示为:

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(\epsilon_0, T_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon} (\epsilon - \epsilon_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial T} (T - T_0) \quad (1)$$

式中, $\nu_B(\epsilon, T)$, $\nu_B(\epsilon_0, T_0)$ 分别为测试前、后光纤中布里渊散射光的频移量; ϵ 和 ϵ_0 分别为测试前、后的轴向应变值; T 和 T_0 分别为测试前、后的温度值。

在边坡变形监测中,通过在边坡模型的内部植入传感光缆,边坡的变形和环境温度的变化将改变铺设光缆的布里渊频移,通过式(1),可确立光纤布里渊频移与边坡变形、环境温度之间的线性关系。

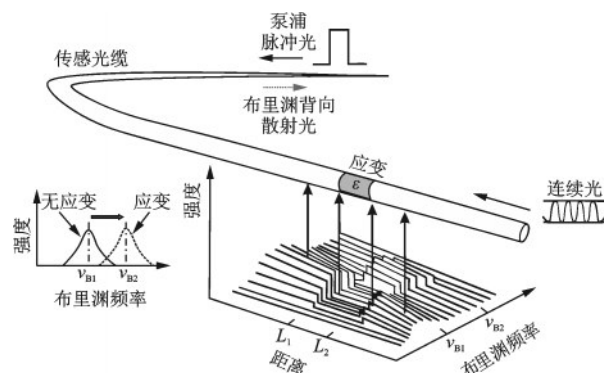


图1 BOTDA测试原理

Fig.1 Sketch of the principle of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA)

在剔除温度的影响后,就可以对光缆沿线的应变实现分布式测量,从而获取边坡的内部变形信息。

2 传感光缆与土体变形耦合性研究

传感光缆与土体之间的变形耦合性是决定BOTDA监测可靠性的关键因素之一^[8]。如果土体的变形没有完全传递至光缆,那么传感光缆测到的变形并不能代表土体真实的变形,掌握直埋式传感光缆与土体间的相互作用机理和耦合性就变得至关重要。为此,课题组设计并进行了光缆-土体拉拔试验,探究了不同围压作用下的传感光缆与土体的耦合变形关系。

试验装置如图2所示,主要由压力室、拉拔装置和测试装置构成。将土体试样水平放在如图2所示的压力室中,采用特制的夹具夹住其中一端的光缆,并连接至卧式拉力测试台。在法兰盘与压力室的连接处以及固定螺帽与法兰盘的连接处放置橡胶垫片,以保证压力室的密封性,然后通过油压千斤顶对土体试样分级施加0.2~1.6 MPa的围压(每级增量为0.2 MPa),在每级围压下,通过采用逐级施加拉拔位移的方式进行拉拔试验,每级位移下均采用NBX-6050A BOTDA解调仪(参数见表1)测试记录光缆的应变分布。光缆在土体中拉拔时应变分布如图3所示。土体-光缆界面呈现出渐进性破坏模式,但应变不能传递至光缆尾部,且最终扩展的深度随围压的增大而减小。在一定围压下,应变的扩展与传递被限制在很小的范围内(图3(b,c))。

表1 NBX-6050A 测试参数

Table 1 Measuring parameters of the NBX-6050A BOTDA instrument

参数	采样间隔/cm	空间分辨率/cm	应变测量精度/ $\mu\epsilon$	温度测量精度/ $^{\circ}\text{C}$
取值	5	5	± 7.5	± 0.75

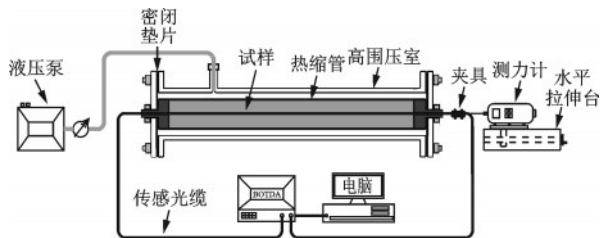


图2 试验装置示意

Fig.2 Schematic illustration of the test device

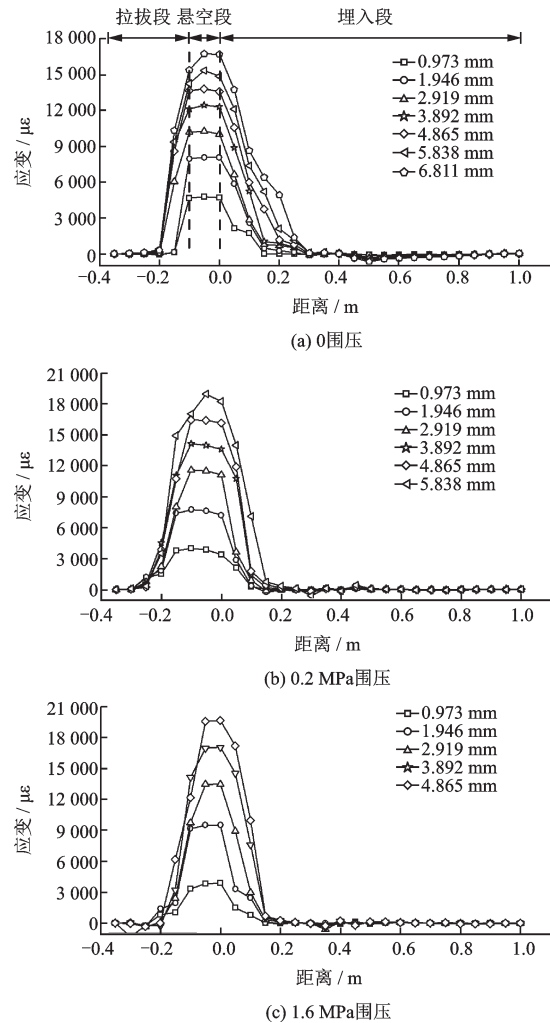


图3 光缆在土体中拉拔时的应变分布曲线

Fig.3 Distribution of strain along the optical cable during pullout

本文提出表征土体-光缆耦合变形能力的新参数:应变传递深度 d_c 。应变传递深度定义为在一次拉拔试验中,光缆轴向应变自埋入段向尾部传递的最远距离。显然,土体-光缆耦合变形能力越好,则应变传递深度越小。当土体与光缆能完全耦合变形时,即 d_c 接近于0时,光缆“固化”于土体中。

根据拉拔试验结果,并考虑受空间分辨率以及光缆连续性的影响,应变会“刺入”邻近光缆段(其距离约为一倍空间分辨率,即0.1 m)^[9],得出围压与光缆应变传递深度的关系,如图4所示。结果表明:随着土样法向围压增大,土体密度就会增加,土体与传感光缆之间的作用力增大,两者间的变形耦合性也会提高。当围压为0.2~1.6 MPa时,应变几乎不向土样内部传递,证明在0.2 MPa围压作用下,土体与光缆的变形耦合性很好,可以认为土体的变

形全部传递至传感光缆,这一试验结果表明,在一定的围压作用下,采用BOTDA测量技术监测土体内部的应变分布是可行的。

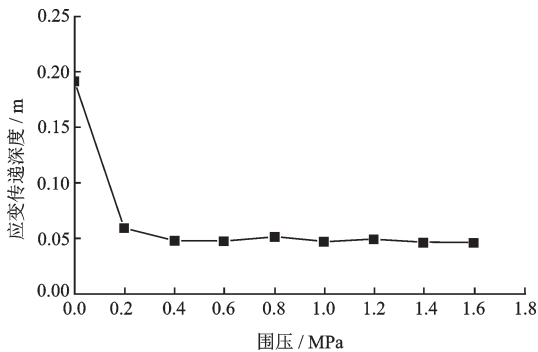


图4 围压对应变传递深度的影响

Fig.4 Effect of the confining pressure on the propagation length of strain

3 削坡作用下的边坡模型试验

3.1 试验装置以及试验材料

为了研究削坡作用下边坡内部的变形分布和变化,验证BOTDA分布式监测边坡内部变形的可行性和有效性,本试验制作了一个小型的边坡模型箱,如图5所示,并设计了BOTDA监测系统。

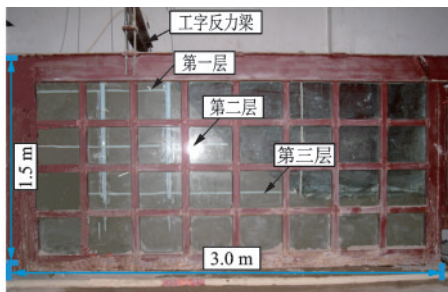


图5 边坡模型试验装置

Fig.5 Slope model test setup

边坡模型箱的尺寸为 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。该模型箱一面为加肋的透明钢化玻璃,便于观察边坡的整体变形情况,其余三面由厚钢板组成,边坡的加载系统包括工字反力梁、千斤顶和传压板。试验中用到的土样和光缆与上述拉拔试验中的一样,土样由90%砂土与10%高岭土混合而成,含水量为10%,所用光缆为2 mm聚氨酯紧套传感光缆,具有良好的强度和韧性,弹性模量为0.312 GPa。

3.2 模型制作与BOTDA监测系统安装

图6为边坡模型光缆布置。在堆填土体之前,首先在模型箱由厚钢板组成的侧面内壁涂抹一层凡士林来减小土体与模型箱之间的摩擦力。边坡模型采用逐层击实法制作,每堆填10 cm击实一次。垂直向和水平向布设的传感光缆按照如图6(a)设计的位置埋设在土体内部,垂直向布设的光缆从左至右依次为V1、V2、V3、V4;水平向布设的光缆从上到下依次为H1、H2、H3,其长度分别为0.8、1.2和1.5 m。为了达到准确定位以及温度补偿的目的,垂直向和水平向布设的传感光缆在标记位置各预留出1 m长的光缆并缠绕成圆环状放入塑料袋内,如图6(b,c)所示。根据上节中的土体与光缆耦合试验结果,在坡顶通过反力梁和打孔的传压板(0.6 m宽,1.5 m长)对边坡模型施加450 kPa压力,根据土压力计算方法,H1、H2和H3层的土压力分别为304、237和209 kPa。此种情况下,水平向光缆能够与土体协调变形。为了保证垂直向光缆与土体之间的耦合性,采用直径为3 mm的热缩管封装光缆,每个热缩管间隔为20 cm,如图7所示。热缩管能增大光缆与土体之间的摩擦力,显著提升光缆与土体之间协调变形的能力,而且每个热缩管的长度仅为2 cm,远小于光缆测量段长度,故几乎不影响测试结果。

3.3 试验步骤

坡顶加载后,边坡模型依旧完好。在试验开始之前,将模型静置24 h,使土体在自重和外部荷载作用下与光缆充分耦合。对此时模型箱内的土体取样,然后进行土工试验,土体的力学参数见表2。之后在边坡坡脚进行垂向削坡,每次削坡距离为10 cm,用NBX-6050A BOTDA解调仪记录每次削坡后垂直向和水平向光缆应变分布,当削坡至40 cm时,边坡模型破坏,试验终止。整个试验削坡的范围及过程如图8所示。为了获取更多更可靠的数据,将BOTDA解调仪的空间分辨率调为5 cm。

4 试验结果及分析

经过温度补偿后,得到了边坡模型BOTDA的应变测值,监测结果如图9所示。

图9(a)为垂直向光缆所测到的应变分布。在

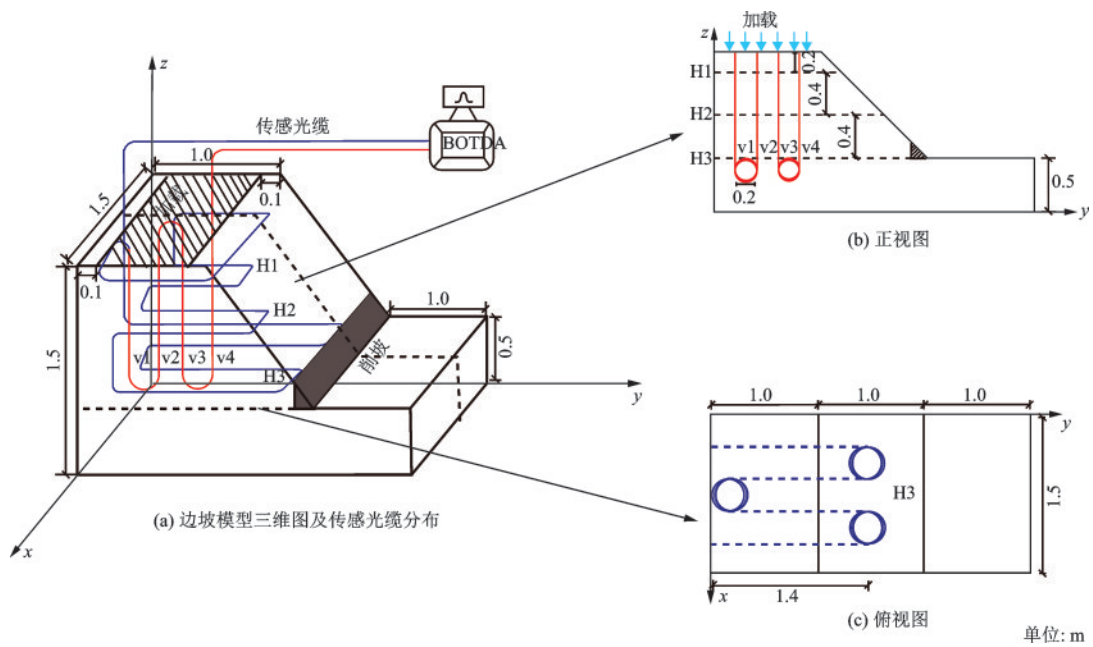


图6 传感光缆布设图

Fig.6 Layout of the sensing cables in the slope model

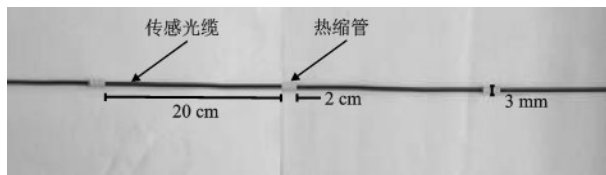
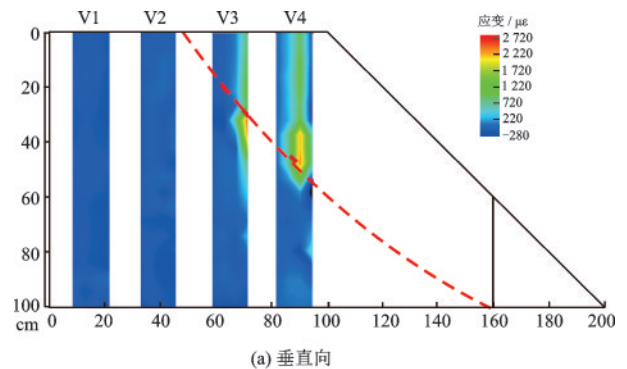
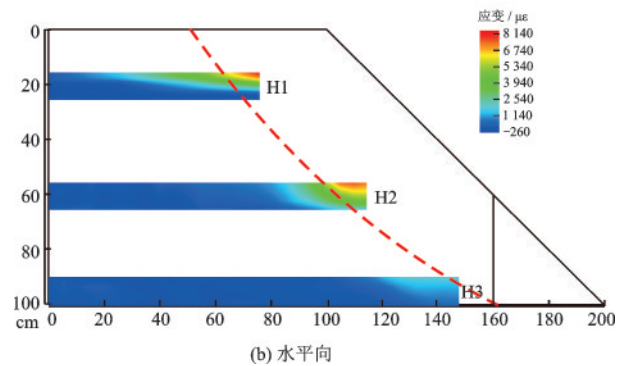


图7 2 mm 聚氨酯紧套传感光缆

Fig.7 Detail of the tight buffered sensing cable with the diameter of 2 mm



(a) 垂直向



(b) 水平向

图9 削坡作用下光缆应变分布

Fig.9 Strain distributions of the sensing cables during slope cutting



(a) 削坡过程



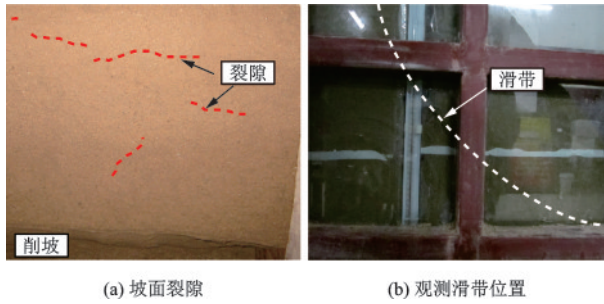
(b) 开挖至10 cm (c) 开挖至20 cm (d) 开挖至30 cm (e) 开挖至40 cm

图8 试验削坡范围及过程

Fig.8 Range and process of slope cutting

整个试验过程中, V1和V2光缆几乎没有应变变化, 这表明在整个削坡过程中, 滑裂带并未扩展到该区

域。当削坡至30 cm时, V3和V4传感光缆出现拉应变异常区域, 异常区域分别在0.3 m和0.45 m深度处。当削坡至40 cm时, V3光缆拉应变继续增大, 但V4光缆测到的应变值则小于削坡至30 cm



(a) 坡面裂隙 (b) 观测滑带位置

图10 试验现场照片

Fig.10 Photograph of the test

时,这可能是由于V4光缆距开挖面最近,滑裂面处的剪应力过大而导致光缆与土体出现滑脱现象。

图9(b)为削坡过程中,水平向传感光缆应变分布图。由图可知,削坡对边坡模型的稳定性有较大影响,当削坡至10 cm时,H1、H2和H3光缆几乎同时捕捉到了应变变化,表明水平向布设光缆对边坡变形更为敏感。当削坡至20 cm时,边坡上层(H1层)光缆测到的最大应变值约为 $2\ 000\ \mu\epsilon$,与此同时坡顶出现少量微小裂隙。随着削坡的不断进行,水平向布设的光缆应变也相应地增大。当削坡至30 cm时,裂隙出现的范围由坡顶扩展到坡体表面,如图10(a)所示,此时应变开始在应变异常区域累积,表明潜在滑裂面正在慢慢形成。开挖至40 cm时,滑坡破坏,滑裂面完全形成,如图10(b)所示。此时,边坡内应变最大值出现在上层(H1层)光缆处,最大值达到 $8\ 000\ \mu\epsilon$ 。由于边坡下层(H3层)光缆处于最下层,远离滑裂带区域,受削坡影响较小,测得应变值明显小于中层和上层,但三者变化规律一致,均表现为:随着开挖的进行,应变相应的增大,并在特定区域出现应变集中现象。

通过水平向和垂直向布设的光缆能够有效地区别出应变异常带,而应变异常带也表征了滑裂面的位置,如图9中虚线所示。水平向和垂直向光缆测得的滑裂面位置相近并且与图10(b)实际观测到的滑带位置和轮廓高度一致。

5 数值模拟论证

为了探究在坡脚开挖作用下的边坡土体变形规律,使用由美国ITASCA公司开发的FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua)仿真计算软件对边坡开挖过程进行模拟。数值计算模型与实际模型尺寸大小一样,模型网格划分为 $30\times 15\times 15$

个结构单元(长 \times 宽 \times 高)。设置模型在左右边界 x 方向位移固定,下边界 x,y 方向位移固定。在如图6(a)坡顶传压板作用范围($0.8\text{ m}\times 1.5\text{ m}$)施加450 kPa压力,土样采用摩尔-库伦模型,力学参数见表2。

表2 试样力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the test samples

参数	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦 角/($^\circ$)	内聚力/ kPa
取值	19.8	100	0.33	25.4	12.3

最大剪应变增量,一般用来搜索边坡滑动带。图11为随着削坡的进行,边坡最大剪应变增量的发展过程。

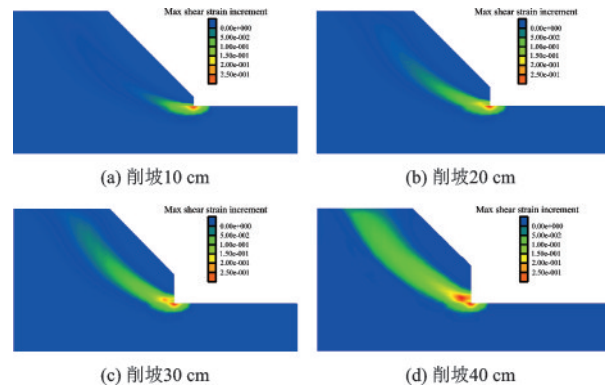


图11 在削坡作用下的边坡数值模拟演化过程

Fig.11 Numerical simulation of slope cutting process

当削坡至10 cm时,坡脚开挖导致剪应力在坡脚处集中。当削坡至20 cm时,坡脚处剪应力随着削坡的进行,不断向顶部发展;当开挖至30 cm时,坡脚剪应变增量区域已接近坡顶位置,但仍未贯穿,此时,FLAC3D计算出的边坡安全系数为1.052,表明边坡处于不稳定状态。直到开挖至40 cm时,最大剪应变增量贯通边坡,滑带形成,且滑带位置与实际观测到的滑带(如图10(b)虚线所示)一致,FLAC3D计算出的边坡安全系数为0.901,也同样证实了边坡已经破坏。

图12为边坡最大剪应变增量与边坡开挖至40 cm时水平光缆所测应变值的对比。图中白色圆圈的位置代表光缆应变的位置,其半径大小代表光缆所测应变值的大小。

水平布设的三条传感光缆的应变值都存在明显的分界现象,滑带左侧的光缆应变值普遍很小,而当光缆接近或者在滑带上时,应变急剧增大,其

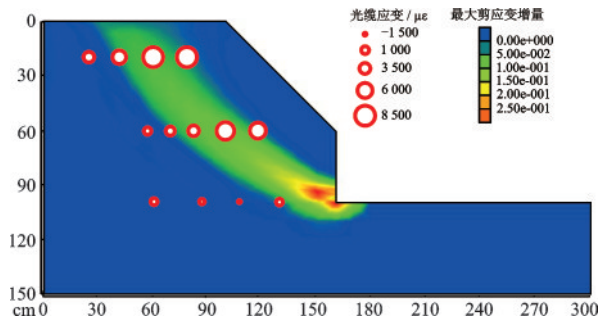


图 12 边坡最大剪应变增量与开挖至 40 cm 时光缆水平应变测值对比

Fig.12 Maximum shear strain increment and horizontal strain values of the sensing cables (Cutting to 40 cm)

中边坡中层(H2层)光缆在穿过滑带后,应变又出现略微的减小。光缆所测应变能够很好的表征滑裂带所在位置,准确获取边坡内部的变形信息。需要注意的是,由于光缆测线H3布设于模型试验底部位置,由于边界效应,H3光缆应变监测结果与数值模拟结果略有差异。

6 削坡作用下的边坡稳定性评价与预测模型

随着削坡的进行,基于FLAC3D计算的边坡安全系数见表3,边坡从削坡10 cm至40 cm时,安全系数从1.310降至0.901。

通过数值模拟结果可知,边坡的安全系数随着削坡的进行不断变小。光缆监测到的数据表明:光缆的应变随着削坡的进行不断增大,与边坡削坡过程具有很好的相关性,边坡的稳定性取决于削坡程度。

表 3 削坡过程中边坡安全系数

削坡/cm	10	20	30	40
安全系数	1.310	1.141	1.052	0.901

由于传感光缆监测到的应变为轴向应变,可反映监测位置的变形情况。也就是说,由削坡引起的光缆应变变化可用于评价边坡的稳定性。根据土压力计算结果,在整个削坡过程中H1、H2和H3层的土压力最小值为209 kPa(大于200 kPa),表明传感光缆所测应变能准确地反映边坡的稳定性状态。

H. H. Zhu等^[10]发现:在加载作用下,边坡的安

全系数与水平最大应变平均值存在经验关系。根据图9的结果分析可知,水平向布设的光缆对边坡内部变形更加敏感,而削坡过程中光缆所测应变最大值最能体现边坡的整体稳定性状态,所以本文提出取每次边坡削坡过程中的水平向光缆应变最大值 $\epsilon_{h,max}$ (式(2))来评估边坡的稳定状态,发现水平向光缆最大应变值与边坡安全系数存在如式(3)所示的幂函数关系:

$$\epsilon_{h,max} = \text{Max}(\epsilon_{H1}, \epsilon_{H2}, \epsilon_{H3}) \quad (2)$$

$$F_s = a(\epsilon_{h,max})^b \quad (3)$$

式中, F_s 为边坡安全系数; a 和 b 为两个无量纲参数。

每次开挖后的水平向光缆最大应变拟合曲线如图13所示。根据拟合结果, $a=5.0365$, $b=-0.187$,相关系数 R^2 为0.9525,证明经验公式是可靠的。随着开挖的进行,边坡的安全系数不断减小,并可根据该公式对边坡的稳定性状态进行评价和预测。

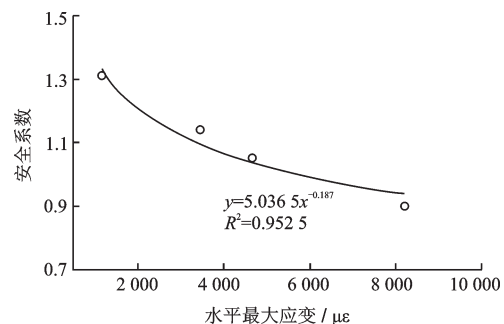


图 13 光缆最大水平应变与边坡安全系数关系

Fig.13 Relationship between the safety factor and the maximum strain of the horizontally laid cables

7 结 论

设计了加载和削坡作用下的边坡模型试验和BOTDA测试方案,通过在水平向和垂直向植入传感光缆,获得了土体在上覆荷载和削坡作用下的水平向和垂直向的应变分布变化,根据BOTDA应变监测结果,结合数值模拟分析,得到如下结论:

(1)BOTDA能够很好地监测到削坡作用下边坡模型内部的应变分布。水平和垂直向布设的传感光缆能够确定应变异常区域,且与实测到的潜在滑动面相吻合,并被数值模拟所证实。

(2)水平向的传感光缆测值存在明显的应变分界现象,应变最大值出现在滑带附近或滑带上,与实测情况一致。

(3)削坡对边坡模型的稳定性有显著影响。水平特征最大应变与安全系数之间存在经验关系,并且这种关系可以用于评价边坡模型在削坡过程中的稳定性状态,进而可对边坡失稳进行预警。

以上研究成果表明:BOTDA 分布式光纤感测技术具有很好的测量和监测功能,可以在土工模型试验中和实际地质与岩土工程监测中推广应用。需要说明的是,在实际边坡监测中,通常是将应变光缆黏贴在结构物上对土体的变形进行监测。由于结构物的变形与边坡的变形较为一致,因此,一般不考虑土体与光缆之间的耦合变形问题。此外,结合本文试验以及数值模拟分析结果,在现场监测时,通常是在滑坡的前、中、后缘布设竖向应变光缆用以确定滑坡的滑带位置;而边坡的安全系数与上层和中间层水平向光缆应变最大值密切相关,因此通常是在滑坡的浅部和中部位置布设水平向应变光缆。

参考文献:

- [1] Petley D. Global patterns of loss of life from landslides [J]. *Geology*, 2012, 40(10):927-930.
- [2] 王静,施斌,严珺凡,等.基于光纤光栅传感器的灾变滑坡模型试验研究[J].*工程地质学报*, 2012, 20(增): 810-815.
Wang J, Shi B, Yan J F, et al. Model test of landslides catastrophe based on fiber bragg grating sensors [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(Sup): 810-815. (in Chinese)
- [3] 张帆宇,白世彪,刘高,等.兰临高速公路袁家湾段切坡开挖失稳过程及其机理[J].*工程地质学报*, 2009, 17(1):81-87.
Zhang F Y, Bai Sh B, Liu G, et al. Process and mechanism of cut slope instability at Yuanjiawan section of Lan-Lin expressway [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1):81-87. (in Chinese)
- [4] Morse M S, Lu N, Wayllace A, et al. Experimental test of theory for the stability of partially saturated vertical cut slopes [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(9):04014050.
- [5] 高俊启,施斌,张巍,等.分布式光纤传感器用于桥梁和路面的健康监测[J].*防灾减灾工程学报*, 2005, 25(1):14-19.
Gao J Q, Shi B, Zhang W, et al. Application of distributed fiber optic sensors to bridge and pavement health monitoring [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(1): 14-19. (in Chinese)
- [6] Iten M, Puzrin A M, Schmid A. Landslide monitoring using a road-embedded optical fiber sensor [J]. *PSPIE The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. San Diego, California, USA: [s. n.], 2008.
- [7] 王宝军,李科,施斌,等.边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J].*工程地质学报*, 2010, 18(3): 325-332.
Wang B J, Li K, Shi B, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3):325-332. (in Chinese)
- [8] Hauswirth D, Iten M, Richli R, et al. Fibre optic cable and micro-anchor pullout tests in sand [C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Zurich, Switzerland: [s. n.], 2010.
- [9] 张诚成,施斌,刘苏平,等.钻孔回填料与直埋式应变传感光缆耦合性研究[J].*岩土工程学报*, 2018, 40(11):1 959-1 967.
Zhang Ch Ch, Shi B, Liu S P, et al. A study of the mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11):1 959-1 967. (in Chinese)
- [10] Zhu H H, Shi B, Zhang J, et al. Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4):979-989.

(本文责编:赵霞)