

复杂条件下边坡稳定性监测预警研究

孙光林^{1,2}, 胡江春², 陶志刚¹, 王 进¹, 赵 帅¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中原工学院建筑工程学院, 郑州 450007)

摘 要 目的 解决受地层岩性、地质构造、水文地质和采矿空区等复杂条件影响下的边坡稳定性监测预警问题. 方法 以戒台寺古滑坡体为例, 基于戒台寺边坡地质条件分析基础, 采用边坡监测预警系统对戒台寺滑坡稳定性进行实时监测预警. 研究了系统的感知层、传输层、应用层, 根据恒阻大变形锚索受力状况证明了古滑坡体下滑力监测的可行性. 结果 在戒台寺安装的3个边坡稳定性监测预警站点应用结果表明, 滑动力相对变化值 P_v 处于动态变化调整之中, 30005#、30002#和30004#监测站点 P_v 的最大值分别为10%、14%和7%, 没有出现滑动力增量 ΔP 持续增大或减小且 P_v 大于10%的情况, 说明戒台寺滑坡暂时处于稳定模式状态. 结论 研究成果为类似滑坡监测工程提供了一种可靠、有效、崭新的解决方案.

关键词 边坡稳定性; 复杂条件; 恒阻大变形锚索; 监测预警

中图分类号 TU195; P642.2

文献标志码 A

Study on Slope Disaster Monitoring and Early Warning in Complicated Condition

SUN Guanglin^{1,2}, HU Jiangchun², TAO Zhigang¹, WANG Jin¹, ZHAO Shuai¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, China, 100083; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, China, 450007)

Abstract: Problems of slope stability monitoring and early warning, under the influence of complex conditions such as the lithology of construction, geology, hydrogeology and mining area, are needed to be addressed. In the case of Jietai Temple landslide, based on the analysis of slope geological, the slope monitoring and early warning system is designed. The system comprises sensing layer, transport layer and application layer. The status of constant large deformation resistance cable proves the feasibility of ancient landslide sliding force monitoring. Application results of 3 slope stability monitoring and early warning station installed in Jietai Temple show that: The sliding force's relative value (P_v) is in the dynamic changes and adjustment. 30005#, 30002# and 30004# sta-

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502323, 51574296)

作者简介: 孙光林(1989—), 男, 博士, 主要从事地质灾害及信息分析处理等方面研究.

tions' P_v maximum values are 10%, 14% and 7% respectively. No sliding force increase (ΔP) continues to increase or decrease and P_v is greater than 10%, which indicates Jietai Temple slope is currently in stable model condition. The research results have provided a reliable, effective and new solution for the similar landslide monitoring project.

Key words: slope disaster; complicated condition; constant resistance and large deformation cable; monitoring and early warning

为了提出有针对性的边坡灾害措施,必备的前提条件应该是可靠的现场调查与资料分析^[1]. 相比于削坡、加固支挡、压脚等传统边坡治理措施^[2],众多学者针对边坡的监测预警方法也开展了大量的研究工作. J. Klimes^[3]等将一种光学机械式 TM—71 型号的裂缝计应用于缓慢移动的滑坡的监测之中. 余修武等^[4]选取边坡倾角和水位作为监测对象开展了一些研究工作. Cascini Leonardo^[5]等对缓慢运动的滑坡提出了一种用位移速度发展趋势来预测的数学模型. 王利等^[6]通过模型试验的方法,对比分析了用于滑坡监测的差分 GPS 定位、载波相位实时动态差分定位、GPS 精密单点定位三种技术,结果表明后者优势明显. Marco Bittelli^[7]等对含黏土的浅层滑坡,现场测试了土壤水分和位移,结合卫星遥感数据和时域反射电缆来感知土体的失效特征. 马俊伟等^[8]将三维激光扫描技术运用到滑坡物理模型试验监测中,郭献涛等^[9]针对该技术在滑坡地面变形测量方面的缺点,利用最小二乘三维表面匹配算法,获得了三维位移及旋转变形结果,为激光测量技术在边坡监测中的应用提供了一种新的研究方法. J. Gance^[10]等利用数字化影像技术,通过比较一系列图形之间的差别来推测滑坡位移. 王佳佳等^[11]还针对三峡库区滑坡灾害采用 WEBGIS 技术进行了预测研究. K. S. Osasan 和 T. R. Stacey^[12]也尝试了将雷达技术用于露天矿边坡失稳的自动预测. E. Piegari 和 R. Di Maio^[13]对降雨诱发浅层滑坡的研究引入了地球物理学意义的边坡安全系数的概念,也有学者采用量子遗传和 Bishop 相结合的方法对边坡安全稳定系数

进行了计算求解^[14]. J. N. Goetz^[15]等运用机器学习评价和统计预测技术研究了滑坡敏感性建模问题. Suhua Zhou^[16]等针对位于四川中部滑坡受地震影响敏感性状况应用支持向量机建模方法进行了研究.

以上众多科研成果为今后的研究工作提供了重要的借鉴价值,但滑坡发生的本质在于下滑力大于抗滑力,只有抓住了这一力学本质关系,才能做到本质监测. 地表位移等监测属于表象监测,未能反映滑坡灾害发生的本质因素,而基于力学本质研发的边坡监测预警系统以滑坡发生的力学充分必要条件为依据,得到了广泛的运用^[17]. 笔者结合戒台寺地质环境、坡体结构等现场勘查成果,采用边坡监测预警系统对戒台寺滑坡稳定性进行实时监测预警,研究了系统的感知层、传输层、应用层,根据恒阻大变形锚索受力状况证明了古滑坡体下滑力监测的可行性.

1 监测预警原理

一般地,影响边坡稳定性的因素复杂^[18],主要包括:①边坡自然形态:坡形、坡率、坡高;②地层岩性;③构造结构面;④地下水;⑤坡体结构等. 为了便于对边坡稳定性的研究,假设 G 为岩体自重, c 为岩体黏聚力, φ 为内摩擦角, L 为滑动面长度, θ 为滑动面倾角, P 为岩体对恒阻大变形锚索的作用力,边坡安全系数 k 的非线性函数表达式为

$$k=f(G, c, L, \theta, \varphi, P), \quad (1)$$

故有

$$P=f^{-1}(G, c, L, \theta, \varphi, k). \quad (2)$$

所以锚索所测得力 P 可以反映边坡下

滑力的变化情况,监测原理如图 1 所示.

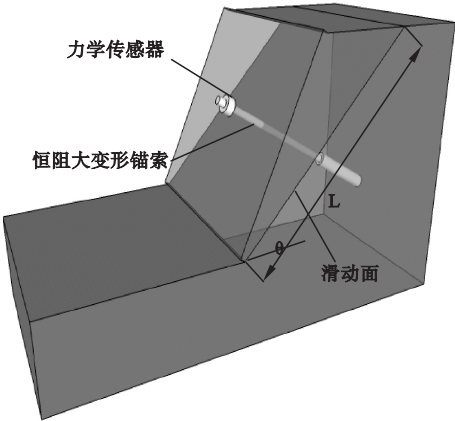


图 1 三维监测原理简图

Fig. 1 Three dimensional monitoring principle diagram

2 边坡监测预警系统

2.1 系统结构

边坡监测预警系统体系结构如图 2 所示.

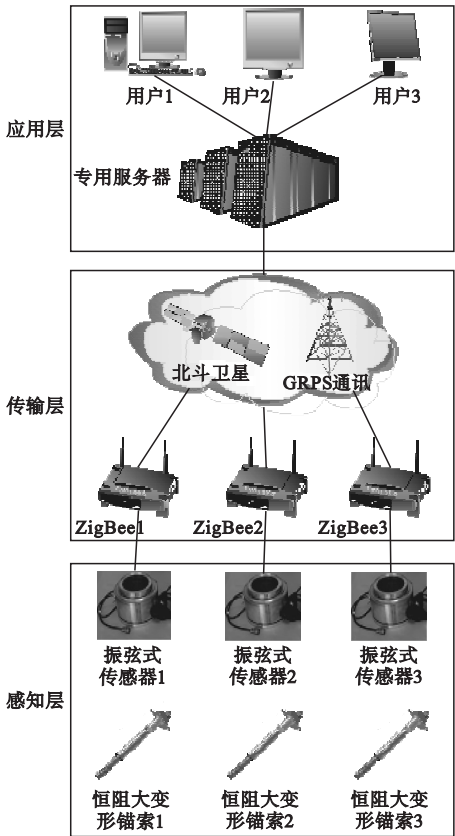


图 2 边坡监测预警系统结构图

Fig. 2 Slope monitoring and early warning system structure

由上至下可分为应用层、传输层、感知层,各层功能互补,成为一个有机整体.

(1)感知层

感知层位于边坡监测预警系统最底层,主要功能在于感知滑坡下滑力变化情况,并将其数字化,便于传输层传输.采用恒阻大变形锚索来捕捉滑坡体下滑力的变化,由于恒阻大变形锚索能够在 120 ~ 350 kN 恒阻拉伸力作用下发生 0.5 m 以上的大变形而保持不断,打破了传统锚索小变形的局限,实现了滑坡大变形破坏过程下滑力的全程可测性和数据采集的连续性,并在室内及采矿、边坡监测工程现场应用中得以证实^[19-20].振弦式力学传感器则安装于恒阻大变形锚索外端头部,它是实时采集边坡作用于恒阻大变形锚索作用力的关键设备.

(2)传输层

传输层主要解决感知层所获得力学数据信息的短距离和远距离传输问题.该层首先将位于滑坡体上一定较小范围内的多个监测站点通过 ZigBee 无线通信技术进行短距离传输,然后将此多个监测点信息传输到数据中心站 DTU,再通过中心站将信息发送至北斗卫星/GPRS 双路通讯模式识别接收器,经辨识后实现信号的远程传输,最终经信号接收器接收后发送至监控中心.短距离和长距离通讯方式、北斗卫星/GPRS 双路通讯模式既节约了成本,又提高了抗干扰性,保证了信息传输的安全稳定有效.

(3)应用层

应用层主要解决所接收数据信息的处理、分析和人机交互问题等.传输层传输来的数据存储在监控中心的专用服务器中,通过专用软件进行分析处理,并及时发布监测预警信息.

2.2 系统功能

边坡监测预警系统功能如图 3 所示.用户与现场形成了一个信息采集、传输、反馈的闭环功能系统,为现场边坡监测区域工程安

全提供了强有力的实时保障。

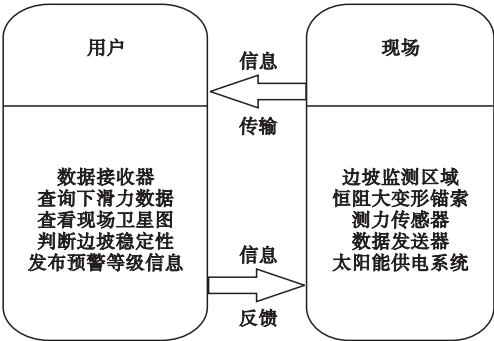


图 3 边坡监测预警系统功能图

Fig. 3 Slope monitoring and early warning system functional diagram

2.3 监测预警准则

参考室内试验和监测原理^[11],根据滑动力相对增量百分比,定义滑动力增量为

$$\Delta P = P_n - P_{n-1}.$$
 (3)

式中:下标 n 代表传感器第 n 次采集到恒阻大变形锚索的力学值.

滑动力相对变化量 P_v 为

$$P_v = \frac{\Delta P}{P_n} \times 100\%.$$
 (4)

由阈值准则,将边坡稳定性划分为稳定、次稳定、裂缝、滑移和扰动 5 种模式(见表 1).

表 1 监测预警准则

Table 1 Monitoring and early warning criterion		
稳定性	$\Delta P / \text{kN}$	$P_v / \%$
稳定模式	—	—
次稳定模式	持续增大	5 ~ 10
裂缝模式	持续增大	—
滑移模式	持续减小	> 10
扰动模式	—	—

注:每种模式需同时满足 ΔP 和 P_v 变化特征.

3 边坡工程条件

3.1 工程概况

戒台寺位于北京市门头沟马鞍山北麓,平均海拔 410 m,体积约 $9 \times 10^6 \text{ m}^3$. 所处山梁岩体裂隙发育,结构较破碎,出露岩石风化程度大,给戒台寺及其周边安全构成了严重

威胁. 特别是 2004 年以来,在地质岩性、地质构造、强降雨、山体下伏采空区等复杂条件作用下,戒台寺内外发现数道地表裂缝,且裂缝所经之处建筑物开裂破坏趋势明显.

戒台寺所处区域边坡可以分为四级台阶(见图 4),其中戒台寺位于一级平台,南西高、北东低,向东侧沟倾斜,高程 380 ~ 400 m;画家院子位于 370 m 高程的二级平台;三级平台高程为 340 ~ 350 m;四级平台北端有数条反倾贯通裂缝,高程 300 ~ 310 m. 108 国道以南地势较陡,以北地势平缓. 山梁东、西各有自然沟,西侧沟发育有滑坡群,东侧沟靠山梁一侧局部坍塌.

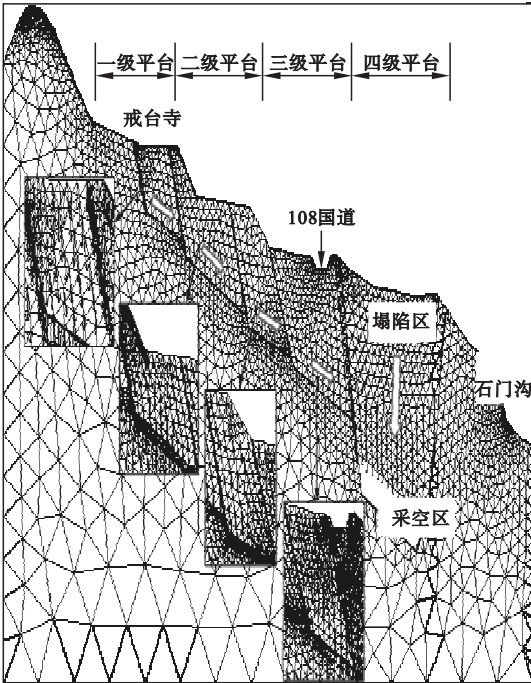


图 4 戒台寺边坡断面变形机制图

Fig. 4 Jietai temple slope deformation mechanism

3.2 地层岩性

地层岩性特征对边坡稳定与否具有关键影响作用. 组成戒台寺边坡的主要地层有第四系、二叠系及石炭系地层. 其中,石炭系上石炭统灰峪组构造扭曲特征明显;石炭系上统强 ~ 中风化砂页岩层,上部系 20 ~ 40 m 厚以中薄层、灰色砂质页岩为主,受水浸湿后可软化而丧失强度;第四系多人工杂填土以

及残坡积层.这些都对边坡的安全稳定性构成不利影响.

3.3 地质构造

戒台寺一级平台地段,上石炭系地层较浅,受北东东向断层 F_2 和北北东向构造作用影响,近东西向压扭性构造结构面带和层间错动带较发育.岩层中的次级褶曲轻微舒缓,岩层北西西向至近东西向走向,倾向北.该平台地段形成3个变形沉降带.

二级平台地段,受北东东向断层 F_2 和近东西向断层 F_5 两者的控制,在北东向—北东向逆时针力偶作用和后期北北东向构造应力场作用下,岩层揉皱扭曲严重,陡倾构造结构带和层间错动带发育.陡倾构造结构面(带)多以密集剪性劈理带形式出现.以北东(东)向断层 F_4 为界,断层北侧的岩层走向为近东西向至北西西向,倾向北,倾角 $40^\circ \sim 90^\circ$.坡体易沿陡倾结构面松弛张开,依附于软弱夹层和顺坡缓倾断层产生向北西的浅层松弛滑动变形.

三级平台地段(108国道至三岔路口地带)断裂褶皱带,岩层褶皱强烈,断层、层间错动带、顺坡断层或构造结构面带发育.山梁发育有两个近东西向的冲沟.近东西向构造断层 F_{11} 将戒台寺近南北向山梁划分为南、北两单元,该段坡体的南侧界为 F_4 构造破碎带.

四级平台北端塌陷带由北东东向或近东西向断层或构造破碎带 F_7 形成.108国道以北缓坡地段北东东向陡倾扭性构造结构面(带)发育,层间错动带较发育.此类裂缝在108国道以北有6~7道.

3.4 水文地质

戒台寺边坡区域位于暖温带半湿润季风大陆性气候区,春季少雨而夏季雨量充沛,雨期多集中于6~8月.年均降水量592 mm,最大降雨量970 mm.边坡区域由缓坡和多级平台构成,雨季汇水面积大,并伴有地表水下渗.地下水具承压性,裂隙孔隙水赋存于裂隙发育的砂岩和构造破碎带中.地下水来源于

构造破碎带、断层带和地表水渗流.

3.5 人类工程活动

人类工程活动日益成为诱发边坡失稳地质灾害的重要外在动力,该区域主要有开采形成的采空区和采动爆破两大类.①长期以来对矿产资源的开发造成山梁破碎松弛.尤其采矿强度持续加大,坡体底部现规模不一的采空区,采空区促使山体边坡的分段逐级下滑,造成坡体稳定性降低.地下矿物的开采容易诱发地表裂缝,加上降雨作用的驱使,又加速了地表裂缝的发育,所以戒台寺边坡稳定性问题不是单一模式、单一结构的简单问题,而是伴有地表裂缝、地面沉降和移动等一系列不良后果的综合体^[21~23].因此,戒台寺下伏空区给边坡整体稳定性带来了不可忽视的不利影响.②区域南侧采石场和东侧采石场的爆破作业也对坡体产生扰动,爆破震动的危害程度随着距离的减小而增大.

综合戒台寺地层岩性、地质构造、水文地质和人类工程活动,尤其是采矿空区等复杂条件决定了戒台寺边坡的危险性高,亟待通过监测手段对其稳定性进行实时掌控.

4 监测站点设计及效果

4.1 方案设计

戒台寺滑坡地层岩性软弱、地质构造发育等综合作用形成了较大岩石破碎滑坡群.戒台寺大部分处于滑坡体上,向北北东($28^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{E}$)蠕动滑移,8道变形带自上而下分布于滑坡之上,下端易滑部分对上部具有牵引拉张作用,具多级、多条、多层的逐级下滑特点.

通过现场调查分析,确定布设三个下滑力监测站点:

(1)戒台寺西围墙—大悲殿—真武殿—牡丹院—千佛阁遗址—大雄宝殿—加蓝殿—鼓楼—山门殿后—停车场—东侧自然沟—线地裂缝严重,裂缝宽度5~200 mm不等,裂缝旁边的建筑物出现局部下沉或拉裂破坏特

征. 因此,在第三停车场加固挡墙底部布设 30005#监测点,对停车场以上滑体的稳定性进行实时监测.

(2)戒台寺内画家院落南部滑坡变形体达 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$. 滑坡体后缘位于画家院子北院墙附近,后缘出现较大裂缝,危险等级较高. 所以,在画家院子大门左右两侧的挡墙位置布置 30002#监测点,对停车场至画家院子之间的滑坡体稳定性进行实时监测.

(3)寺外 108 国道与进寺道路交汇处有一长、宽、厚分别约为 90 m、40 m、30 m 的滑坡,滑坡边境及“羽状”剪切裂缝明显,后缘

产生拉张裂缝,向西侧自然沟临空方向滑动. 因此,在戒台寺大门 108 国道旁布设 30004#下滑力监测点,对 108 国道附近滑坡体稳定性进行实时监测.

4.2 工程实施及效果

三个监测站点各布设 1 套恒阻大变形锚索、1 套智能传感发射系统,每套恒阻大变形锚索设计预应力值为 80 t,张拉力值为 85 t,锁定值为 20 t. 施工完成经测试,三监测站点各项参数均符合设计要求,并开始正常工作,现场监测点效果如图 5 所示.



(a) 效果图1



(b) 效果图2

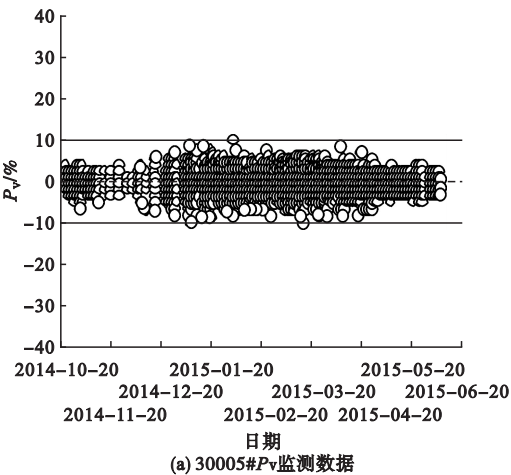
图 5 监测站点效果图

Fig. 5 Effect picture of monitoring sites

4.3 结果分析

边坡下滑力监测结果见图 6. 由图可知,边坡下滑力监测点 30005#最大值监测值 370.5 kN,最小监测值 318.3 kN,监测平均值 339.4 kN,最大值相对均值变化幅度 9.1%,最小值相对均值变化幅度 6.2%,均方差 11.9;边坡下滑力监测点 30002#最大值监测值 359.0 kN,最小监测值 183.7 kN,监测平均值 211.2 kN,最大值相对均值变化幅度 69.9%,最小值相对均值变化幅度 13.0%,均方差 9.0;边坡下滑力监测点 30004#最大值监测值 339.9 kN,最小监测值 304.7 kN,监测平均值 325.3 kN,最大值相对均值变化幅度 4.5%,最小值相对均值变

化幅度 6.3%,均方差 5.3. 以上三个边坡下滑力监测站点数据总体平稳,且 30005#、30002#和30004#监测点的滑动力相对变化



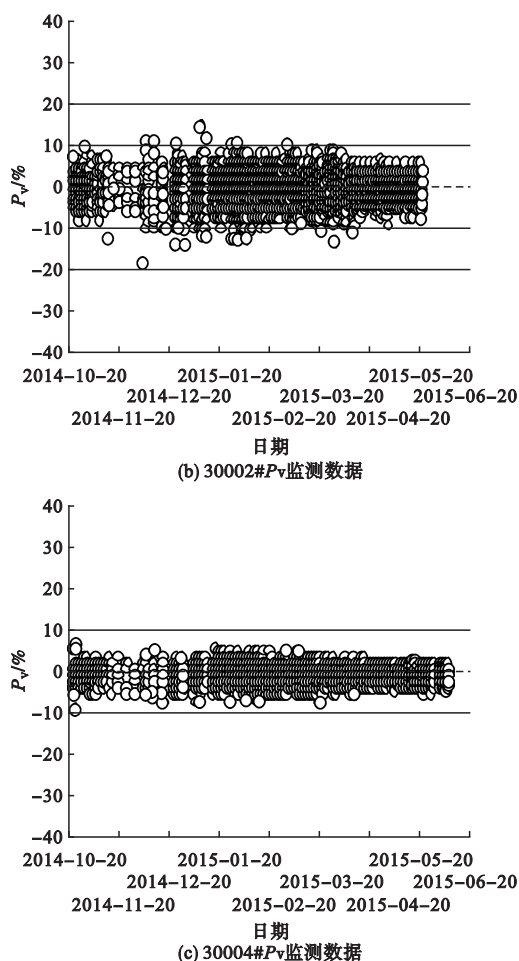


图6 边坡下滑力监测数据

Fig. 6 Slope sliding force monitoring data

值 P_v 处于动态变化调整之中,30005#、30002#和 30004#的最大值分别为 10%、14% 和 7%。根据监测预警模式准则,所监测区域目前处于相对稳定状态。

5 结 论

(1)通过对戒台寺滑坡复杂成灾机理的分析,确定采用边坡监测预警系统为手段的监测对策。

(2)边坡监测采用恒组大变形锚索,系统结构由应用层、传输层、感知层三层组成,实现了信息采集传输、信息反馈功能。

(3)戒台寺滑坡区域设计安装了 3 个监测站点,监测数据总体平稳,由此判断监测区域滑坡目前暂时处于稳定状态。

参考文献

- [1] 赵俭斌,李博,徐岩,等. 辽宁省普通公路岩质边坡调查与分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(2):269-276.
(ZHAO Jianbin,LI Bo,XU Yan,et al. Investigation and analysis of ordinary highway rocky slope in Liaoning province[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014,30(2):269-276.)
- [2] 任德斌,常思萌,涂俊胤,等. 排桩加固支护边坡作用机理的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(4):671-679.
(REN Debin,CHANG Simeng,TU Junyin,et al. Finite element method analysis on mechanical behavior of the reinforced slope with anti-slide piles [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31 (4):671-679.)
- [3] KLIME Š J,ROWBERRY M D,BLÁHUT J, et al. The monitoring of slow-moving landslides and assessment of stabilisation measures using an optical-mechanical crack gauge[J]. Landslides,2012,9(3):407-415.
- [4] 余修武,余员琴,江珊. 基于无线传感器网络的滑坡地质灾害预警监测系统研究[J]. 南华大学学报(自然科学版),2014,28(1):34-39.
(YU Xiuyu,YU Yuanqin,JIANG Shan. Study of early warning monitoring system in landslide disaster based on wireless sensor network[J]. Journal of south university (science and technology),2014,28(1):34-39.)
- [5] CASCINI L,CALVELLO M,GRIMALDI G M. Displacement trends of slow-moving landslides;classification and forecasting[J]. Journal of mountain science,2014,11(3):592-606.
- [6] 王利,张勤,黄观文,等. GPS PPP 技术用于滑坡监测的试验与结果分析[J]. 岩土力学,2014,35(7):2118-2124.
(WANG Li,ZHANG Qin,HUANG Guanwen,et al. Experiment results and analysis of landslide monitoring by using GPS PPP technology [J]. Rock and soil mechanics,2014,35(7): 2118-2124.)
- [7] BITTELLI M,VALENTINO R,SALVATORELLI F,et al. Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays[J]. Geomorphology,2012,173/174:161-173.

- [8] 马俊伟,唐辉明,胡新丽,等. 三维激光扫描技术在滑坡物理模型试验中的应用[J]. 岩土力学,2014,35(5):1495-1505.
(MA Junwei, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test[J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(5):1495-1505.)
- [9] 郭献涛,黄腾,臧妻斌,等. 基于最小二乘三维表面匹配算法的滑坡变形测量[J]. 岩土力学. 2015,36(5):1421-1427.
(GUO Xiantao, HUANG Teng, ZHANG Qibin, et al. An approach for monitoring landslide deformation using least-square matching algorithm[J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(5):1421-1427.)
- [10] GANCE J, MALET J P, DEWEZ T, et al. Target detection and tracking of moving objects for characterizing landslide displacements from time-lapse terrestrial optical images[J]. Engineering geology, 2014, 172:26-40.
- [11] 王佳佳,殷坤龙. 基于 WEBGIS 和四库一体技术的三峡库区滑坡灾害预测预报系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5):1004-1013.
(WANG Jiajia, YIN Kunlong. Landslide hazard predicting system based on WEBGIS and integrated databases in three gorges reservoir area[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(5):1004-1013.)
- [12] OSASAN K S, STACEY T R. Automatic prediction of time to failure of open pit mine slopes based on radar monitoring and inverse velocity method[J]. International journal of mining science and technology, 2014, 24:275-280.
- [13] PIEGARI E, MAIO D R. Simulations of landslide hazard scenarios by a geophysical safety factor[J]. Natural hazards, 2014, 73(1):63-76.
- [14] 赵建强,陈必科,戴青松. 基于量子遗传算法的边坡稳定性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(1):18-26.
(ZHAO Jianqiang, CHEN Bike, DAI Qingsong. Slope stability analysis based on the quantum genetic algorithm[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(1):18-26.)
- [15] GOETZ J N, BRENNING A, PETSCHKO H, et al. Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling[J]. Computers & geosciences, 2015, 81:1-11.
- [16] ZHOU S, FANG L. Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China[J]. Geoenvironmental disasters, 2015, 2(1):1-12.
- [17] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6):1081-1090.
(HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(6):1081-1090.)
- [18] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
(ZHENG Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian, et al. Engineering treatment of slope & landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.)
- [19] 何满潮. 工程地质力学的挑战与未来[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4):543-556.
(HE Manchao. The challenges and future of engineering geomechanics[J]. Journal of engineering geology, 2014, 22(4):543-556.)
- [20] HE M C, TAO Z G, ZHANG B. Application of remote monitoring technology in landslides in the Luoshan mining area[J]. Mining science and technology, 2009, 19(5):609-614.
- [21] 范士凯. 采空区上边坡稳定问题[J]. 资源环境与工程. 2006, 20(增刊):617-627.
(FAN Shikai. A discussion on the slope stability on the goaf[J]. Resources environment & engineering, 2006, 20(S):617-627.)
- [22] 刘辉,何春桂,邓喀中,等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3):380-384.
(LIU Hui, HE Chungui, DENG Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining[J]. Journal of mining & safety engineering, 2013, 30(3):380-384.)
- [23] PENG Xinlai, YANG Luping, GAVANSKI E, et al. A comparison of methods to estimate peak wind loads on buildings[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2014, 126(1):11-23.