

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.01.19

三维激光扫描技术在危岩监测中的应用

王梓龙 裴向军 董秀军 魏小佳 蒙明辉

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059)

摘要: 文章以丹巴沙坝子危岩为例,阐述了三维激光扫描技术在危岩体监测中的应用方法,并针对溜滑和掉块两种不同的破坏模式,提出了新的监测思路:(1)根据三维影像直接量化溜滑规模及厚度,并结合降雨分析溜滑变形与累计降水量关系;(2)从统计学角度分析危岩掉落规律及分布特征,对危险性区域做出预测。

关键词: 三维激光扫描;危岩;监测;溜滑;掉块

中图分类号: P642.8; P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)01-0124-06

Application of a terrestrial laser scanner to the study of rockfall monitoring

WANG Zilong ,PEI Xiangjun ,DONG Xiujun ,WEI Xiaojia ,MENG Minghui

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection ,Chengdu University of Technology ,ChengDu ,Sichuan 610059 ,China)

Abstract: High risk dangerous rocks occur widely in alpine gorge region , specifically in seismic disastrous area. The regular deformation monitoring aims at the dangerous rocks which have already deformed or have deformation evidence , and detects the spot displacement. It cannot early warn the risk of unknown rock and cannot catch the rock mass holistic deformation characteristics. With the help of three-dimensional laser scanning technology , the non-contact surveying can quickly get high precision dense slope entity spot cloud data from different period. This paper takes the Shaziba dangerous rock as an example and explains the technical application on dangerous rock. A new idea of detection aiming at slump and rockfall for these two different failure mode is put forward: (1) quantification of the slump scale and thickness by 3D image in combination of the rainfall to get the relationship between the slump deformation and accumulated rainfall , (2) statistical analysis of the rockfall scale and distribution to make prediction to dangerous region.

Keywords: three-dimensional laser scanning technology; unstable-rock; monitoring; slump; rockfall

川藏公路沿线山势陡峻,多为高山峡谷地带,峰谷高差数千米,受亚欧板块强烈的挤压效应,导致该区构造活跃,地质环境条件复杂^[1~2]。高寒高海拔山区,风化卸荷作用明显,促使区内岩体破碎,节理裂隙发育,从而孕育了大量崩塌危岩等地质灾害,对居民生活、生命财产及公路交通安全造成了极大的危害。尤其是“5.12”汶川地震和“4.20”庐山地震过程中,强烈的地

震动效应,导致裂隙扩张,岩体松动,产生了大量“松而未动,摇而未坠”的不稳定岩体,加剧了崩塌等次生地质灾害的滋生^[3~4]。同时,这类危岩体分布广泛,多处于难以企及的高陡地段,多为高位危岩体,其失稳往往具有突发性和随机性的特点。因此,这类危岩体的监测是目前预警工作的难点。

目前对危岩体有效的工程监测手段主要是利用全

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41302240)

第一作者: 王梓龙(1990-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害防治、监测、预警等研究。E-mail: wangzhilong_@126.com

站仪、GPS、测缝仪等对单一危岩体进行多点位移或裂缝监测^[5~6]。此类方法局限于特定位置的单点位移监测,测量值仅代表局部变形情况,无法反映整体变形过程及地质特征。而大多数高位危岩体,受结构面的影响,岩体破碎,不仅存在较大规模的滑塌失稳现象,也存在不定时、随机的碎落掉块现象,这就需要对比边坡危岩的总体规律进行评判和预测。

借助三维激光技术,进行非接触式的全面监测,为高位危岩体的监测提供了高效、精确的方法和手段。数亿计的高密度、高精度点云数据克服了传统监测数据单一的缺点,非接触式测量克服了对高陡危岩无法企及的障碍,从而实现准确、全面的监测。

本文以丹巴县沙子坝危岩为例,借助三维激光扫描技术提出危岩体监测新方法,阐述该技术在危岩体监测中的应用特点及效果,对危岩体失稳规律进行研究,从而达到监测预警的目的,并探索其应用前景。

1 沙子坝危岩监测

1.1 工程地质条件

沙子坝危岩位于甘孜藏族自治州丹巴县城沙子坝南侧,坡脚紧邻丹巴县城(图1)。整个坡体上陡下缓,崩源区高差150余米,主要为基岩出露,岩性为志留系茂县群第四组黑云母斜长变粒岩,产状 $340^{\circ} \sim 20^{\circ} \angle 5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。岩体受风化卸荷作用影响多呈张开状,宽0.5~2 cm,深0.5~1 m。构造裂隙、卸荷裂隙密集发育,卸荷裂隙主要控制岩体后缘分离面,产状 $255^{\circ} \angle 72^{\circ}$,延伸长5~8 m,宽1~3 cm,深0.5~1 m;构造裂隙主要控制侧裂面,产状 $32^{\circ} \angle 85^{\circ}$,延伸长2~6 m,宽1 cm,深0.5~1 m。整个区域受结构面切割影响,岩体破碎,产生大量松动岩块,块径0.3~3 m,稳定性较差。近年来,曾多次发生崩塌事件,零星掉块和溜滑也时有发生(图2)。危岩体下部地形有所减缓,以崩塌堆积体为主,堆积体高约65 m,坡度 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$,结构松散,植被发育,堆积体的存在一定程度上减缓了滚石的动能作用。

1.2 点云影像特征获取

针对沙子坝危岩特殊地质条件,考虑到精度和仪器有效工作距离因素,本次扫描工作选用奥地利RIEGLVZ4000型激光扫描仪,其采样速率为22万点/秒,采样间距1 mm,远距离测量精度 < 15 mm,再加上多站点耦合矫正,从而保证精度误差处于毫米级。该区降雨充沛,夏季降雨更为集中,在渗透压力和裂隙水压力的作用下,块体不稳定性因素增加。因此,本次研

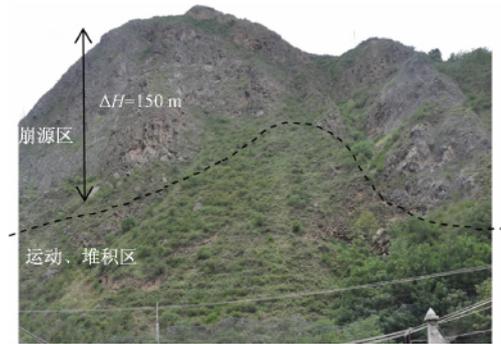


图1 丹巴沙子坝危岩全貌

Fig. 1 Bird's-eye view of the unstable rock in Shaziba



图2 溜滑和掉块

Fig. 2 Slump and rockfall

究监测时段选在降雨集中的7—8月,监测时段内降雨频率为3~5 d,故扫描周期定为5 d。监测持续45 d,共获取了9期边坡点云影像数据(图3)。

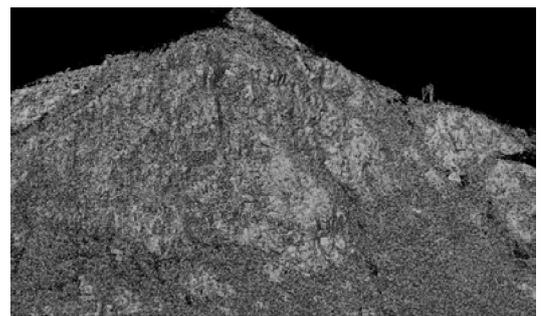


图3 2014年6月25日第1期扫描影像 S_0

Fig. 3 First scanning image S_0 (2014/6/25)

为使各期数据能够完美叠加分析,每次扫描在目标范围内均匀布设4个标靶点,结合仪器自身坐标系,实现坐标系统转换,从而保证每期数据的匹配与统一,为高精度的定量分析提供基础。同时,为了提高数据精度,每次扫描仪器均架设在同一固定位置。

2 监测理论及精度

2.1 理论模型

常规监测数据反映的是岩体某一点的测量值大小,测量值按照指定方向对长度求差即为变形值。三维激

光扫描获取的是高密度点云影像数据,每个点都具有相应的空间形态特征,无法直接进行点坐标求差。变形值的求解是所有点云数据在同一坐标系统,然后对各期点云数据进行面域的整体比较^[7]。其方法是:将不同期扫描数据根据标靶点转换成相同坐标系统,使各期点云具有相同绝对坐标值。倘若边坡实体未产生变形,那么扫描的2期点云数据坐标一致,三维影像会完全重合;倘若边坡实体产生了一定的变形,那么扫描的2期扫描点云数据坐标不一致,三维影像则发生分离(图4)。此时,发生分离的2层面状数据的空间差异即为变形,面域点云的绝对坐标差值即为变形量。

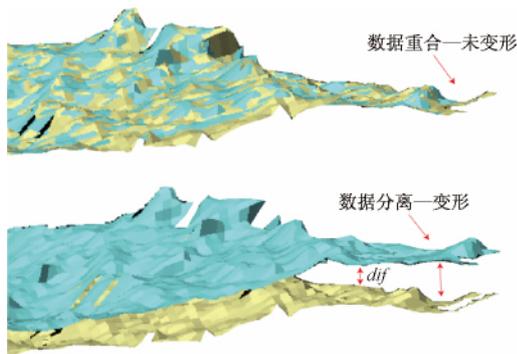


图4 影像对比结果

Fig. 4 Result of images comparison

变形量的计算遵循“最短距离原则”^[8],定义为:以第一期扫描数据基准面域数据为 S_0 ,之后每期数据为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_i$,每期数据中的每个点坐标记作 $S_i P_i$,取面域数据 S_0 的每一个点到 S_i 的法向距离作为该点的变形值,记作 dif_i :

$$dif_i = \text{distance}[S_i P_i] - \text{distance}[S_0 P_i]$$

dif_i 值的集合就是面域数据比较的差值,其结果反映了区域变形大小及规模。 dif 值为正表示正位移式变形,监测区域危岩可能向坡内出现倾覆、松动等; dif 值为负表示负位移式变形,监测区域危岩发生了一定规模的滑塌、掉块等。

2.2 误差分析

三维激光扫描仪属于高精密度仪器,对作业环境和数据处理要求较高,因此存在一定的误差,这些误差最终导致理论变形值与实际变形值发生偏差,反映到监测结果上就是理论上未发生变形的区域, dif 值却不为0,发生了变形的区域变形值存在 $0 \sim \pm dif$ 值的随机误差,该随机误差定义为监测精度 γ ^[9~10]。因此,监测前必须获取 γ 值来对监测结果进行精度评定。通过选定一块表面平整岩体,选取标准面积区域(1 m × 1 m)进行了2次扫描(默认危岩未变形, $dif_i = 0$) 将两次扫描

的点云进行叠减计算,得到了15000个 dif 值,从而根据 dif 值绘制误差分布曲线(图5),其结果反映:

(1) 所有的 dif 值均为正,说明误差只在一个方向上,不存在正负误差波动的情况。

(2) 误差值总体上呈高斯分布,主要集中在1~4 mm之间,连续最大误差7.6 mm,平均误差2.5 mm。考虑到沙子坝危掉落块体直径普遍大于5 cm,且变形量值不小于1 cm,故监测精度 γ 完全能满足常规危岩体监测的精度要求。

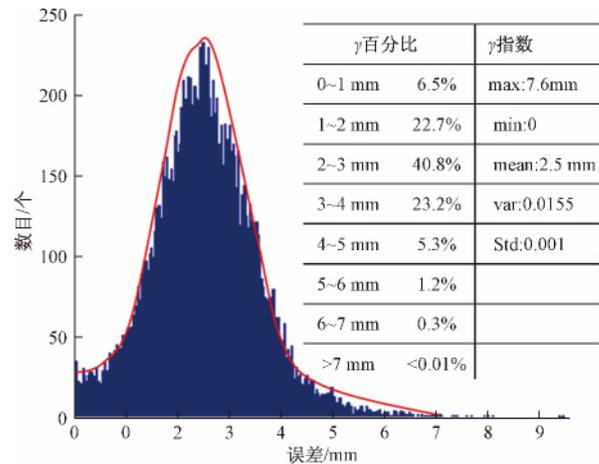


图5 误差分布曲线

Fig. 5 Error distribution curve

3 监测结果分析

9期边坡实体的扫描点云影像数据经过坐标转换校正后,以第一期扫描数据 S_0 作为基准,依次将其余各期数据与第一期数据进行叠加计算,得到各期数据累计差异变化值。根据 dif 值的范围,首先将变形值进行分级,每一级赋予不同颜色,就可以得到监测区域的变形值云图,然后由颜色的差异来初步判断各区域变形情况,分析其破坏模式,并对变形失稳类型进行划分,再对每种类型进行单独研究。根据9期监测数据计算云图并结合现场勘查,判断监测期间内主要存在两种变形失稳类型:块碎石土溜滑、碎落掉块。

图6为 S_0, S_2 期数据变形计算云图,根据变形值颜色尺度带,就能初步判定危岩区变形类型。其中1~4#位置变形属于覆盖层局部溜滑现象,影像特征表现为局部变形量较大,颜色差异明显;5~6#位置变形属于碎落掉块现象,影像特征表现为变形量均匀,无色彩畸变。7~8#位置影像显示是正变形和负变形错落交替分布,这是由于该区域存在植被,每次扫描时间不同,植被生长变化差异影响导致计算结果出现不稳定

波动 影像上表现差异 ,但是实际上可认为稳定区域。

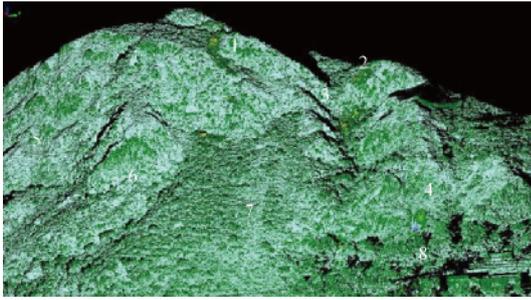


图 6 变形计算云图

Fig. 6 Cloud images of S_0 & S_2 deformation calculation

3.1 局部溜滑

1~4#位置的覆盖层溜滑主要发生在降雨过程中或降雨结束后短时间内 ,其原因是降雨入渗 ,浸泡软化块碎石土 ,降低其抗剪特性 ,再加上渗压力和浮托力的影响 ,从而导致其失稳破坏。这类变形单次变形值较大 ,属于面状形变 ,水是主控因素。对于这类变形的解译 ,首先是根据变形区域色彩差异 ,圈定变形区域边界 ,量取变形区域的尺寸 ,对其变形范围进行量化。并且在点云数据中通过提取剖面线还原变形区域变形前后准确地形 ,从而对比分析得到溜滑部位的厚度变化、坡度变化、垮塌方向等特征信息 ,同时对崩滑体积进行准确量测 ,再结合该时段内雨量数据 ,分析得到冲刷速率(规模)与雨量关系之间的关系。

通过图 6 锁定 2#变形区 ,提取该位置两期点云数据叠加影像的典型剖面线(图 7)。剖面线的获取不是

通过提取等高线或传统勘察中对地形的实测 ,而是在点云数据上直接截取。只要在叠加影像上按照指定方向截取剖面线 ,就能得到 2 条 1:1 还原实际地貌的高精度地形线。图 7 反映 2#溜滑体总体呈“漏斗”状 ,发育高程 2 035~2 022 m ,宽 13.2 m ,长 14.9 m ,厚 0.2~1.1 m ,体积 100.3 m^3 ,原始地形坡度 57° ,失稳后地形坡度 60°。当单次溜滑规模较大时 ,根据失稳方向和三维模型就能确定溜滑块体滑落的最大可能滑塌路径。1~4#溜滑体解译特征见表 1。

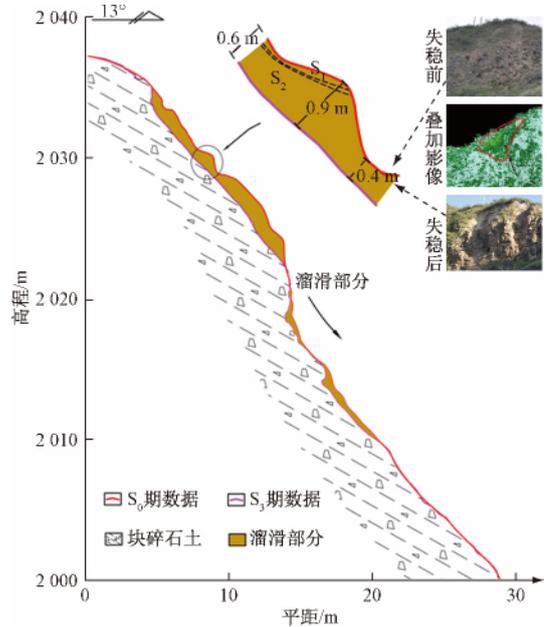


图 7 2#溜滑体纵剖面图

Fig. 7 Cross section of 2# slump

表 1 溜滑体解译特征

Table 1 Interpretation characteristics of slumps

编号	长/m	宽/m	厚度/m	体积/ m^3	变化坡度/(°)	失稳方向/(°)	弹跳高度/m	冲击力/kJ
1	18.5	5.5	0.3~1.6	150	45/52	332	<0.1	522.89
2	14.9	13.2	0.2~1	100	57/60	13	<0.1	239.15
4	11.4	2.3	0.2~0.8	10	42/44	22	<0.1	39.12

注:3#区域未产生变形 ,属于 2#溜滑区滑塌物质部分堆积在 3#位置凹陷处 ,影像上表现为变形。

2#溜滑区单次监测周期内降水量与平均溜滑深度关系如图 8 所示。在监测期间内 ,仅在第三次监测周期内出现过一次大变形 ,溜滑深度达到 9 cm ,其余批次监测数据约为 1~2 cm。这次大规模的溜滑现象前 ,出现了持续 22 d 的降雨 ,累计降水量达 271.6 mm ,是历史同期该月降水量的 2.1 倍 ,说明溜滑破坏规模与前期降水量密切相关 ,表现出一定的滞后性 ,从而充分说明了前期累计降水量的重要性。块碎石土渗透性良好 ,长时间的降雨入渗 ,土体逐渐饱水 ,在渗透力和软化效应作用下 ,改变了土体的稳定性现状。因

此 ,即使后期出现较小强度的降雨情况 ,也易造成较大规模的失稳破坏。7 月 5 日之前 3 个周期日降雨为 9.8 mm/d ,之后 9 个周期日降水量为 3.1 mm/d ,仅为前期 1/3 ,该规模下主要表现为表层土体冲刷流失 ,说明无降雨或降雨很小时块碎石土的溜滑主要受自身结构控制。

因此 ,持续强降雨是诱发大规模溜滑失稳的直接因素。监测期内其累计降水量和日降水量可以作为该地区溜滑预警雨量的参考值 ,但由于只有一次雨季监测数据 ,该值存在一定误差 ,尤其是失稳前的持续降雨

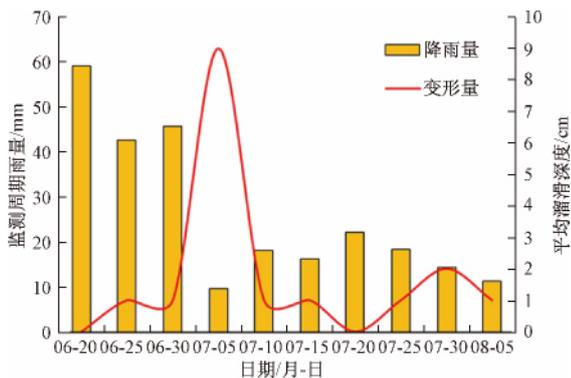


图 8 溜滑深度与降水量关系图

Fig. 8 Relationship between slump depth and rainfall

时间关系到土体的软化程度。因此,需要多个雨季监测数据来修正临界降水量及确定持续降雨时间。

3.2 碎落掉块

针对沙子坝这类破碎危岩,借助三维激光扫描还原真实三维影像,能够全面掌握整个区域内各危岩单体的变形情况,准确捕捉变形位置和变形规模,依靠影像直接判断是否发生碎落掉块。通过统计危岩区块体掉落的频率数据、体积数据、区域密度数据、高程分布数据等,综合评判危岩区碎落掉块规律,从而对其发展趋势进行预测。

对于这类监测解译,首先根据整个区域的监测云图确定异常变形区域,如图 6 的 6#位置所示颜色无畸变区域,这个区域特点是颜色异常于周围,但是无明显突出明亮斑点,反映的是小范围异常。这是因为整个区域的监测云图反应的是整个区域的变形差异,其变形值范围是整个区域最大变形值和最小变形值构成的区间,那么在整张区域云图上,对面积较小、变形量较小的危岩就无法根据颜色准确识别。因此需要将变形部分(6#位置)的点云数据提取出来进行单独计算分析,缩小变形量分级范围(最大最小值仅是 6#区域内),从而更精细显示 6#位置的变形云图(图 9)。根据前文阐述该地区节理裂隙发育规律,不稳定的岩块直径普遍大于 5 cm,因此判别依据是变形云图上颜色异常的区域直径范围大于 5 cm,而小于 5 cm 的区域则直接忽略,因为该级别大小的岩块即便脱落,影响较小。图 9 反映了 6#区域上 6 次岩块的掉落现象。

根据以上方法逐步分析各个异常区域,即可得到整个危岩区的块体掉落数据(表 2)。其中块体直径表示掉落岩体的体积大小,一定程度上反映了该区域岩体的破碎程度。监测周期内掉块岩石直径普遍小于 20 cm,少数岩石直径大于 20 cm,说明该区域内岩体整体失稳

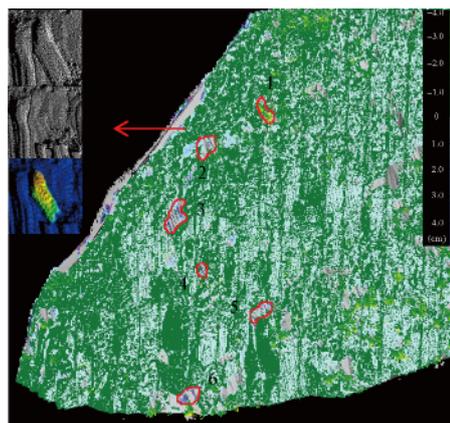


图 9 6#区域精细变形计算云图

Fig. 9 Cloud images of 6# region calculation

几率小,都是零星碎落掉块,掉落块体直径受结构面发育程度控制。结合解译块体特征和三维地形数据,依据《公路路基设计规范》^[11]就能估算不同块径岩体掉落的最大冲击动能及最优滚动路径,其结果为布设防护措施提供了可信依据。图 2 是被动防护网成功拦挡 30 cm 以下块径岩体案例,现有级别防护措施足够拦截直径小于 30 cm 的岩块,而块径在 30 cm 以上的岩体危险性较大,一般的被动性措施无法拦挡。图 10 是每个周期内降水量与块体掉落频率关系图,前 3 个监测周期内降水量是后 6 个周期降水量的 2~3 倍,掉块数略有增加,可能是因为降雨期雨水渗透作用使裂隙水压增加,同时软化了部分软弱接触面,导致岩体稳定性降低,但这种关系不明显,降雨只能是诱发因素之一。

表 2 块体掉落统计特征

Table 2 Characteristics of blocks

日期/月-日	块径/cm	高程/m	日期/月-日	块径/cm	高程/m
06-20	00	-	07-05	18	1 967.6
	8	1 896.9		56	1 907.3
	6	1 929.3		11	1 916.3
06-25	11	2 017.5	07-10	7	1 939.5
	5	2 005.4		5	1 938.9
	9	1 981.3	07-15	8	1 897.5
	13	1 941.7		6	1 902.4
	06-30	7	1 919.6	07-20	0
12		1 954.6	07-25	4	1 931.9
7		2 000.1		6	2 000.0
8		1 964.4	7	1 944.5	
07-05	11	1 906.9	07-30	9	1 917.4
	21	1 919.3	8	1 955.1	
	9	1 980.9	9	1 927.8	
07-05	7	1 942.5	08-05	6	1 949.8
	15	1 961.1		7	1 923.1
	33	1 967.6	-	-	-

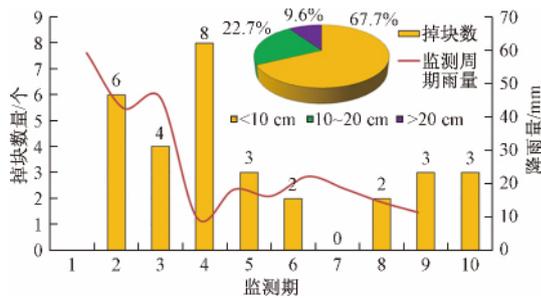


图 10 掉块频率与降水关系图

Fig. 10 Relationship between rainfall and rockfall frequency

为了得到整个区域危岩掉落的分布数据,将整个监测区域的掉落岩块都以“点”的形式,按 1:1 的比例尺在水平视线方向上,把全部危岩块体投影到平面上,就可以得到危岩区掉块分布图(图 11)。从图中可以发现碎落掉块存在高程集中的现象,海拔 1 915 ~ 1 965 m 之间,掉块数占了总数的 70%。结合现场调查,发现该海拔段危岩普遍较陡,坡度达到 70° 以上,局部位置近垂直,而上方危岩相对较缓,说明危岩掉落与坡度密切相关。掉块的空间分布规律则表明块体掉落存在密度差异,图中 A、B 两个区域范围内掉块相对集中,说明这两个区域内结构面贯通性较好,坡体结构更破碎,岩体稳定性更差,应作为重点监测和防范对象。

监测结果表明,监测期间内共计掉落 31 块岩体,平均每两天就掉落一块,平均直径 12 cm,大部分块体滚动休止于下方堆积区,少数被防护网拦挡,并未出现较大块体的崩塌,整个区域危岩属于稳定状态。只有 A、B 两个区域内岩体掉落较集中,存在坡表岩体整体剥落的可能,但需要进一步监测。

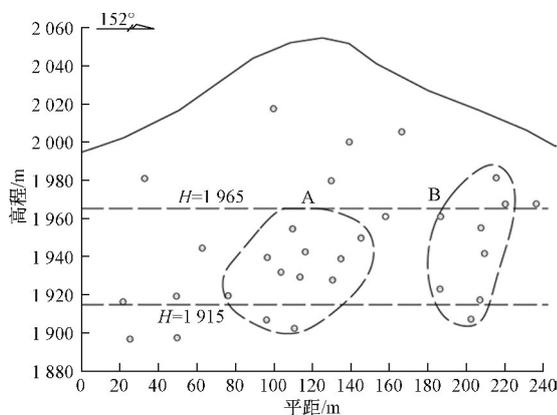


图 11 块体展布立面图

Fig. 11 Distribution elevation of blocks

4 结论

(1) 三维激光扫描技术能够突破传统危岩单点调

查和监测的手段,克服了技术上获取危岩变形特征信息不准确、不全面的局限,避免了高陡危岩调查的危险性。

(2) 通过海量点云数据准确解译出危岩体变形特征,不仅能够反映局部区域危岩的变化,而且能够对大变形危岩区域进行精确分析,还原其变化过程,获取地貌的微变化、滑塌体空间特征等信息,准确度更高。其中对掉块监测是提出了直接从影像上捕捉失岩体的方法,从统计学角度进行分析,突破了传统“变形值”的概念,具有一定创新性。

(3) 溜滑变形与降雨密切相关,累计降水量直接影响变形规模;掉块则主要受岩体结构控制,与降雨关系不明显,表现出高程集中和区域集中的现象。根据监测结果能够划分出危岩区危险等级,具有一定预警作用。

(4) 无论是局部溜滑还是碎落掉块,其监测结果均可作为计算滚石的弹跳高度、冲击力大小提供依据,直接为危岩治理防护提供准确的数据,包括危岩安全等级、被动网支护级别、最优防护位置等,具有重大的工程意义。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1526 - 1527. [HUANG R Q. Geodynamical process and stability concept of high rock slope development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1526 - 1527. (in Chinese)]
- [2] 钱海涛, 张力方, 修立伟, 等. 中国地震地质灾害的主要类型和分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 122 - 123. [QIAN H T, ZHANG L F, XIU L W, et al. Types and distribution characteristics of earthquake induced geological disasters in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 122 - 123. (in Chinese)]
- [3] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1240 - 1241. [HUANG R Q. Mechanism and Geotechnical models of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1240 - 1241. (in Chinese)]
- [4] 肖进, 李辉. 汶川地震灾区地质环境演化过程与后重建防治措施[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 533 - 537. [XIAO J, LI H. Geology environment evolution process of Wenchuan earthquake epicenter and disaster prevention and control measures for post reconstruction [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 533 - 537. (in Chinese)]

(下转第 142 页)

- [11] Xu T, Pruess K. Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks [J]. American Journal of science 2001(301) : 6 - 33.
- [12] Pruess K, Oldenburg C M, Moridis G J. TOUGH2 User's Guide Version 2 [M]. Bay Area: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [13] Pruess K, Garcia J, Xu T *et al.* Codeinter comparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO₂ [J]. Energy, 2004, 29(9) : 1431 - 1444.
- [14] Xu T, Apps J A, Pruess K *et al.* Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a sandstone formation [J]. Chemical Geology, 2007 242(3/4) : 319 - 346.
- [15] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(5) : 892 - 898.
- [16] 武文慧. 鄂尔多斯盆地上古生界储层砂岩特征及成岩作用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [WU W H. Research on the Characteristics and Diagenesis of Stone in the Upper Paleozoic Reservoir in Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology 2011. (in Chinese)]
- [17] Gennaro V, Frank R. Elasto-plastic analysis of the interface behavior between granular media and structure [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29: 547 - 572.
- [18] 李德栋. 气水盐矿体系相平衡耦合化学平衡及其在二氧化碳地质储存数值模拟中的应用 [D]. 北京: 中国科学院, 2008. [LI D D. Gas-water-salt-rock System Phase Equilibrium Coupling with Chemical Reaction Equilibrium and its Application in CO₂ Geological Storage Numerical Simulation [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)]
- [19] 那金. CO₂-EGS 水-岩-气作用对地层孔渗特征的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2013. [NA J. The impact of water-rock-gas interaction on the formation porosity and permeability in CO₂ - EGS [D]. Changchun: Jilin University 2013. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华

(上接第 129 页)

- [5] 杨秀元, 孙强, 晏鄂川, 等. 基于实测的望霞 W1 危岩体失稳动态过程分析 [J]. 水文地质工程地质 2014 41(1) : 96 - 99. [YANG X Y, SUN Q, YAN E C, *et al.* A study of the failure process of the Wangxia dangerous rock mass W1 based on site-monitoring [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014 41(1) : 96 - 99. (in Chinese)]
- [6] 高伊航, 刘之葵, 唐克静, 等. 重庆襄渡场北崩滑体变形特征及成因分析 [J]. 水文地质工程地质, 2014 41(2) : 149 - 151. [GAO Y H, LIU Z K, TANG K, *et al.* Deformation characteristics and forming factors of the Chongqing Northern Rangduchang landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014 41(2) : 149 - 151. (in Chinese)]
- [7] Nguyen H T, Fernandez Steeger T M, Wiatr T, *et al.* Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes—an example from Madeira island (Portugal) [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences 2011 11: 810 - 817.
- [8] Abellan A, Jaboyedoff M, Oppikofer T, *et al.* Detection of mill metric deformation using a terrestrial laser scanner experiment and application to a rock fall event [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009 9: 365 - 370.
- [9] Antonio Abell, Thierry, Michel Jaboye, *et al.* Terrestrial laser scanning of rock slope in stabilities [J]. Earth Surface Progress and Landforms, 2014 (39) : 87 - 92.
- [10] Arosio D, Longoni L, Papini M, *et al.* Towards rock fall forecasting through observing deformations and listening to micro seismic emissions [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences 2009 9: 1125 - 1128.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D30—2004 公路路基设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. [Ministry of Communications of PRC. JTG D30—2004 Code for Design of Highway Subgrades [S]. Beijing: China Communications Press 2014. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华