

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.10

倾斜摄影测量技术在崩塌隐患调查评价中的应用

郭学飞,焦润成,曹颖,闫驰,王晟宇,赵丹凝
(北京市地质研究所,北京 100120)

摘要: 本次研究选取北京房山区一处典型崩塌隐患点,采用倾斜摄影测量技术获取了研究区三维实景模型,圈定了危岩体及受威胁对象,开展了崩塌隐患的稳定性分析,模拟了典型危岩体发生崩落后的运动轨迹。研究成果表明倾斜摄影技术能够获取崩塌灾害隐患的地形地貌、岩性构造、几何形态等特征信息,可以为崩塌灾害隐患的勘查、防治工作提供参考依据。

关键词: 倾斜摄影;崩塌隐患;危岩体;稳定性分析

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0065-05

Application of oblique photography in the investigation potential of rockfall

GUO Xuefei, JIAO Runcheng, CAO Ying, YAN Chi, WANG Shengyu, ZHAO Danning
(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: A typical potential collapse site in Fangshan district, Beijing is selected for research. The real-time 3D model of the potential collapse site is obtained by oblique photography. Then the landform, lithology and structure of the study area are analyzed. The dangerous rock mass and the threatened object were delineate, the track of the typical dangerous rock mass were analyzed. The results show that the oblique photography can obtain the landform, lithology, structure, geometric form and other information of the collapse hazard. It can provide reference for the exploration and prevention of potential collapse hazards.

Keywords: oblique photography; collapse hazards; dangerous rock mass; stability analysis

0 引言

北京地区西部为太行山余脉,北部属燕山山脉,山区面积广泛,地质构造复杂,人类工程活动频繁,崩塌地质灾害较为发育^[1]。为了有效防止崩塌灾害的发生,开展崩塌隐患的勘查和评估工作是十分重要的。传统的勘查方法属于接触式、单点调查^[2],但这仅限于工作人员能够到达的隐患点,对于很多所处位置高、地形复杂的崩塌隐患点,难以开展实地测量。这时倾

斜摄影技术可以以其非接触、全视角、高精度测量的优势,在崩塌地质灾害调查监测中发挥重要的作用。

倾斜摄影是利用无人机搭载多台航摄仪,同时从多个侧面和垂直面获取目标区影像和位置信息的测量技术^[3]。通过后期数据处理,可获取目标区高精度、可测量的三维实景模型,更加真实地反映出地物的原本面貌和形态特征。本文主要介绍利用倾斜摄影测量技术,对北京市一处典型崩塌隐患——中山村崩塌隐患进行了特征分析和稳定性评价,并进行了典型危岩

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-06-26

基金项目: 北京市突发地质灾害监测预警系统(一期)工程运行项目(2019年度)(PXM2019_158204_000005);北京市重要泥石流沟航空摄影测量项目

第一作者: 郭学飞(1990-),男,北京市人,地质工程专业,硕士,工程师,主要从事遥感地质、地理信息等方面的研究工作。E-mail: xuefeigu@163.com

体崩塌后落石运动轨迹的模拟分析。

1 研究区倾斜摄影测量

倾斜摄影测量主要包括外业无人机倾斜摄影获取数据和内业建立三维实景模型两部分^[4-5]。本研究测量工作外业采用的飞行平台为旋翼电动无人机,数码相机选用五拼倾斜相机系统;为满足后期制作三维的需要,航向重叠及旁向重叠均设定为 80%。内业采用大场景快速三维建模技术和模型精细化处理技术,通过多视立体空中三角测量、生成密集点云、构建 TIN 三角网、3D 纹理映射等过程^[6],建立了研究区 1:500 比例尺三维实景模型(图 1)。该模型可实现陡坡危岩体的具体坐标、高程、几何尺寸等要素的量测。通过测量空间点坐标参数,采用空间三点坐标法计算可得到结构面产状要素^[7],从而得到其准确的几何特征、空间特征以及地质特征。据此,可进一步判定危岩体的稳定性、崩落岩石的运动轨迹和破坏能量,为崩塌地质灾害的防治提供参考依据。



图 1 中山村崩塌隐患及其周边倾斜摄影三维实景模型
Fig.1 Real-time 3D model of the potential collapse site

2 崩塌隐患基本特征

2.1 研究区地质背景

中山村崩塌隐患位于房山区中山村北侧的山体上。对倾斜摄影三维实景模型进行地形地貌分析和构造岩性推测,可得出如下推论:研究区在地貌上分为上陡下缓两个部分。其中,北侧山体高耸,坡体陡峭,覆盖层较薄,植被以灌木为主,且覆盖程度相对较低,说明其岩性性质相对强硬,风化剥蚀程度较低;同时,在该侧坡脚位置可见一系列明显的断层三角面,预示该处有断裂构造通过。而南侧坡体地势低矮,坡度较缓,覆盖层厚度大,植被覆盖程度高,说明其岩性性质相对软弱,受风化剥蚀程度高。

结合区域地质背景的先验知识,研究区发育有霞

云岭逆冲推覆构造,展布方向与三维实景模型显示方位一致;断裂带南侧为石炭-二叠纪砂、板岩地层,北侧为寒武纪灰岩地层;受逆冲推覆作用,寒武纪灰岩地层叠覆于石炭-二叠纪砂、板岩地层之上(图 2)。

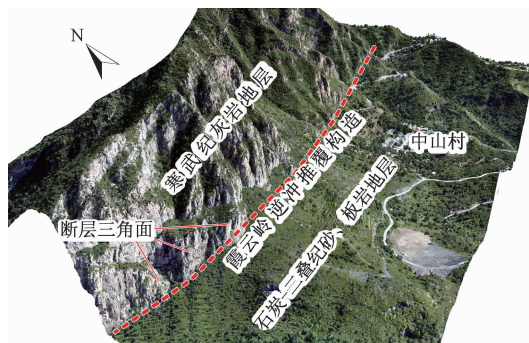


图 2 中山村崩塌隐患地质背景示意图
Fig.2 Geological background sketch map of the potential collapse site

2.2 崩塌隐患基本特征

研究区崩塌隐患处于断裂构造形成的断层三角面上(图 3),坡体岩性为寒武纪灰岩,山坡相对高差为 115 m,平均坡度为 80°,坡体陡峭,具有发生崩塌落石的地貌条件。岩层产状为 $42^\circ \angle 28^\circ$,倾向与坡体方向反向相交。受本身岩性和断裂构造作用的影响,山体发育以节理裂隙为主的多处结构面,采用空间三点坐标法计算,主要结构面产状如下: J1: $165^\circ \angle 82^\circ$; J2: $262^\circ \angle 87^\circ$; J3: $33^\circ \angle 62^\circ$ 。其中结构面 J1 倾斜方向与坡向基本一致,为近直立陡倾结构面,将岩体分成竖向的岩块;在其他结构面的共同作用下,岩体被切割为较破碎的块状。岩石下部经长时间的风化剥蚀后出现临空面,形成多处危岩体;崩塌体的类型主要为推移式崩塌(1#、2#、3#危岩体)和拉裂式崩塌(4#、5#危岩体),威胁山坡下方道路和中山村居民。各危岩体特征如表 1 所示。

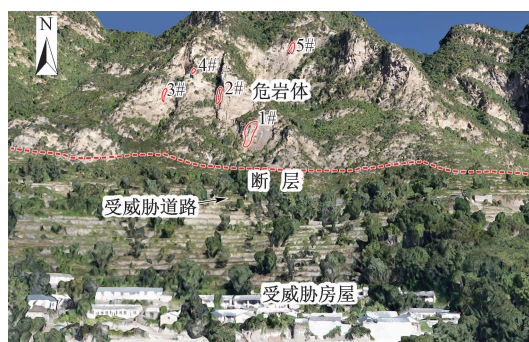


图 3 中山村崩塌隐患遥感判识结果示意图
Fig.3 Interpretation results of the potential collapse site on remote sensing map

表 1 危岩体特征统计					
Table 1 Statistics of dangerous rock mass characteristics					
危岩体 编号	崩塌类型	分布 高程/m	形态	规模(长× 宽×高)/m	体积/ m ³
1#	滑移式	674~689	不规则块状	16×4×4	260
2#	滑移式	705~715	不规则块状	14×3×2	84
3#	滑移式	708~716	不规则块状	10×2.5×2	50
4#	拉裂式	728~724	不规则块状	5×2.5×1.5	18.75
5#	拉裂式	758~766	块状	9×4.5×2.6	101.3

3 崩塌隐患稳定性分析

3.1 稳定性宏观分析

中山村崩塌隐患主要发育灰岩,岩体较完整,结构面结合一般,受节理裂隙影响发育多处危岩体。根据边坡岩体的完整性及坚硬程度,该边坡岩体类型属Ⅱ类,风化程度属微风化,危岩带平均高差约 76 m。根据坡率法判定崩塌边坡稳定性^[8],中山村崩塌点容许坡率为 1:0.25~1:0.35,即 70.4°~75.6°,而坡体实际坡度平均约 80°,超过容许坡率值,稳定性较差,容易发生随机块体崩落。

3.2 典型危岩体稳定性计算

1#危岩体位于边坡中下部,属于典型的滑移式崩塌体。在三维模型上测量,危岩体规模(长宽高)为 16 m×4 m×4 m,呈不规则块状,体积约为 260 m³,是研究区体积最大的一处危岩体。该危岩体下方具有临空面,且存在明显的后缘裂隙(图 4),裂隙最宽处达 45 cm,破裂面的倾向与坡向基本一致,在暴雨或受到扰动时,该危岩体容易发生滑动。



图 4 1#危岩体实地照片
Fig. 4 Picture of 1# dangerous rock mass

危岩体的稳定性受多种因素制约,其稳定性计算涉及较多参数和复杂的边界条件。本文参照《地质灾害防治工程勘察规范》(DB50/43—2018)中的滑移式崩塌体的稳定性计算公式和稳定性划分标准,对 1#危

岩体的稳定性进行评估^[9],计算公式如式(1)~(4)所示,稳定性划分标准如表 2 所示。

$$F_s = \frac{(W\cos\alpha - Q\sin\alpha - V\sin\alpha - U)\operatorname{tg}\varphi + cl}{W\sin\alpha + Q\cos\alpha + V\cos\alpha} \quad (1)$$

$$Q = \zeta_e W \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w l h_w \quad (4)$$

式中: F_s ——稳定性系数;
 W ——危岩体自重与建筑等地面荷载之和/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);
 α ——滑面倾角/(°);
 Q ——作用于滑坡体或其某条块的地震力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);
 V ——后缘裂隙水压力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);
 U ——滑面水压力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);
 φ ——滑面内摩擦角标准值/(°);
 c ——滑面黏聚力标准值/kPa;
 l ——滑面长度/m;
 ζ_e ——地震水平系数;
 γ_w ——水的重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);
 h_w ——裂隙充水高度/m。

表 2 稳定状态划分标准				
Table 2 Standard of division for rock stability				
稳定性系数 F_s	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s \geq F_{st}$
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

注: F_{st} 为滑坡稳定性安全系数。

对上述危岩体分现状、暴雨和地震三种工况进行稳定性计算(计算参数取值如表 3 所示),得到三种工况下危岩体的稳定性系数:现状工况下,稳定性系数为 1.05,属于欠稳定状态;暴雨工况下,稳定性系数为 0.88,属于不稳定状态;地震工况下,稳定性系数为 0.73,属于不稳定状态。

根据上述定性评价和定量计算结果,综合分析可知:中山村崩塌隐患点在暴雨和地震条件下表现为不稳定,容易发生随机崩塌落石。

4 典型危岩体崩落轨迹模拟

危岩崩塌是陡峭边坡上的岩块在重力及其他外力作用下突然脱离母岩,并以坠落、滑移、滚动、弹跳或其组合方式向坡下猛烈运动,最终堆积在坡脚的地质灾害;具有突发性强,影响因素多,随机性高,频率大等特

点^[10-12]。危岩体一旦由于某种原因而崩落,将直接威胁其下方的道路、居民点等建筑物,危害行人和居民的

生命财产安全。因此,对危岩体运动破坏的路径进行分析有重要的意义。

表 3 1#危岩体稳定性计算参数取值一览表

Table 3 Parameter values of stability calculation for 1# dangerous rock mass

	灰岩重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	水的重度 $\gamma_w/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	裂隙充水高度 h_w/m	滑面长度 L/m	滑面倾角 $\alpha/(^{\circ})$	地震水平 系数 ξ_e	黏聚力标准值 c/kPa	危岩体内摩擦角 标准值 $\varphi/(^{\circ})$
现状工况	25	10	7	16	70	0	40	55
暴雨工况	25.5	10	7	16	70	0	35	50
地震工况	25	10	7	16	70	0.16	40	55

4.1 模拟原理介绍

本文利用 RocFall 软件对 1#典型危岩体进行落石运动轨迹模拟分析,其模拟原理为:边坡上的危岩体相对坡体下方具有较大的势能,当危岩体失稳崩落时,危岩体势能转换为动能,开始向下坠落,当落石接触到坡面时开始反弹,由于不同的地表性质具有不同的切向和法向阻尼系数,落石的弹跳高度也不同;同时,接触坡面对落石的动能有消减作用,直至落石的动能为零,整个过程遵循能量转化和守恒定律。据此原理,RocFall 软件将落石视为均匀且不会破碎的质点,坡面为各向同性的弹性塑体,忽略空气阻力,通过对危岩体崩落过程所接触的不同的坡面性质设置相应的阻尼系数,可模拟落石在崩落过程中的能量、弹跳高度与运动轨迹等信息。

4.2 危岩体崩落轨迹模拟

首先明确 1#危岩体崩落时可能经过的地形剖面,利用高精度三维实景模型,可获取精细的 1:500 比例尺地形剖面线,结合实地调查验证,对地形剖面各坡段的地表性质进行判断,以确定各坡段相应的阻尼系数;然后根据 RocFall 软件的要求,将地形剖面线比例尺转换为 1:1 000,并导入软件中,设定好落石位置和相应参数后,即可进行落石轨迹模拟。

本次模拟对象为 1#危岩体,危岩体体积为 260 m^3 ,初始速度为 0;从坡顶到坡底,坡面的岩土体性质依次为:裸露的基岩,少量的灌木覆盖的风化岩面,少量乔木覆盖的密实边坡,碎石土为主的坝阶地,混凝土路面,碎石土、块石为主的坝阶地,灌木覆盖的土质边坡;各坡段切向阻尼系数 R_t 和法向阻尼系数 R_n 取值如表 4 所示。对 1#危岩体进行 50 次崩落路径模拟的结果如图 5 所示。

模拟结果显示:危岩体失稳掉落,兼具滑动和弹跳两种运动模式。落石在贴坡面滑动水平距离约 30 m 时,能量迅速增加,开始多次弹跳;落石经翻滚、跳跃、碰撞能量逐渐被地面消减,在坡脚处能量达到最低,落石逐渐堆积。落石最大水平运动距离可达

143 m,超越了坡下道路和房屋安全距离,将对行人和居民的人身财产安全造成危害;落石最大跳跃高度可达 6.4 m,出现在中山村上方的道路附近,相应的落石能量在该处也第一次达到最高值,因此在考虑使用拦挡方式进行灾害防治时,宜将拦挡工程建在上游。

表 4 坡段特征与切向/法向阻尼系数取值一览表

Table 4 Slope features and tangential/normal damping coefficient values

坡面特征	切向阻尼系数 R_t	法向阻尼系数 R_n
裸露的基岩	0.91	0.42
少量的灌木覆盖的风化岩面	0.87	0.37
少量乔木覆盖的密实边坡	0.83	0.33
碎石土为主的坝阶地	0.81	0.30
混凝土路面	0.87	0.41
碎石土、块石为主的坝阶地	0.82	0.31
灌木覆盖的土质边坡	0.79	0.29

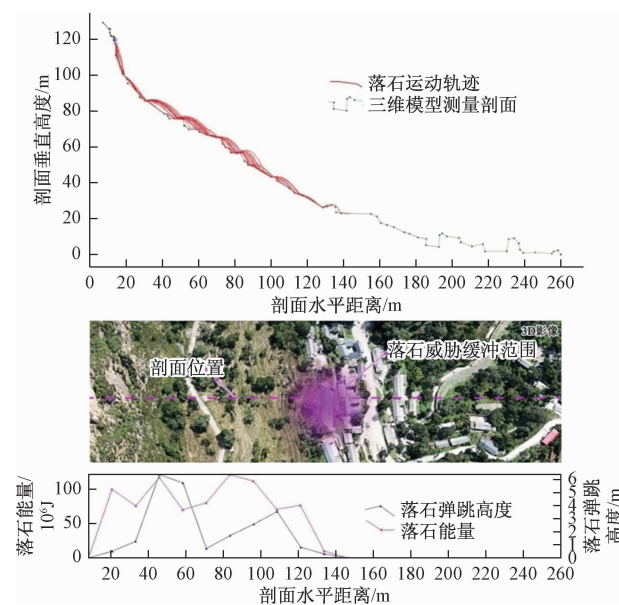


图 5 中山村崩塌隐患 1#典型危岩体崩落模拟结果

Fig.5 Simulated movement track of 1# dangerous rock mass

5 结论

(1)大比例尺倾斜摄影能够获取工作区高精度的

三维实景模型,可实现地质灾害发育背景、灾害体基本特征、威胁对象等关键信息的识别,在崩塌灾害调查评价工作中能够发挥重要的作用。

(2) 倾斜摄影测量技术能够获取崩塌危岩体的位置、高程、几何形态等信息,进而可以判断危岩体的稳定性,模拟崩塌落石的运动轨迹,为崩塌灾害的防治提供有效技术支撑。

(3) 倾斜摄影测量技术具有非接触、全视角、高精度的特点,能够提高崩塌灾害隐患的调查效率,保障调查人员安全,在高位崩塌灾害隐患调查中具有独特的优势。

参考文献:

- [1] 赵忠海,李敏. 北京山区公路边坡地质灾害隐患监测预警技术研究[J]. 城市地质, 2018, 13(3): 72-83. [ZHAO Z H, LI M. Study on monitoring and early warning technology of the potential slope geological disaster along the mountainous roads in Beijing[J]. Urban Geology, 2018, 13(3): 72-83. (in Chinese)]
- [2] 刘海洋,王学良,李丽慧,等. 无人机航空摄影测量技术在崩塌灾害调查中的应用[J]. 工程地质学报, 2017, 25(增刊): 82-87. [LIU H Y, WANG X L, LI L H, et al. Application of UAV aerial photogrammetry for rockfall disaster survey [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25 (Supp): 82-87. (in Chinese)]
- [3] 方留杨,赵鑫,吴晓南,等. 山区公路典型地质灾害倾斜摄影三维建模与分析方法研究[J]. 公路, 2018, 63(12): 170-176. [FANG L Y, ZHAO X, WU X N, et al. Research on oblique photography 3D modeling and analysis method of typical highway geological disasters [J]. Highway, 2018, 63(12): 170-176. (in Chinese)]
- [4] 南天. 无人机倾斜摄影及自动三维建模技术在地质灾害应急测绘中的应用: 以三明市妙元山为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(3): 182-184. [NAN T. Application of unmanned aerial vehicle tilt photography and automatic 3D modeling technology in geological disaster emergency mapping: taking miaoyuan mountain of Sanming City as an example [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(3): 182-184. (in Chinese)]
- [5] 孙杰,谢文寒,白瑞杰. 无人机倾斜摄影技术研究与应用[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 145-150. [SUN J, XIE W H, BAI R J. UAV oblique photogrammetric system and its application [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 145-150. (in Chinese)]
- [6] 郑史芳,黎治坤. 结合倾斜摄影技术的地质灾害监测[J]. 测绘通报, 2018(8): 88-92. [ZHENG S F, LI Z K. Geohazard monitoring based on tilt photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(8): 88-92. (in Chinese)]
- [7] 陈宙翔,叶咸,张文波,等. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价[J]. 地震工程学报, 2019, 41(1): 257-267. [CHEN Z X, YE X, ZHANG W B, et al. Formation mechanism analysis and stability evaluation of dangerous rock collapses based on the oblique photography by unmanned aerial vehicles [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 257-267. (in Chinese)]
- [8] 建筑边坡工程技术规范: GB50330—2013[S]. 重庆: 重庆市城乡建设委员会, 2014. [Technical code for building slope engineering: GB50330—2013 [S]. Chongqing: Chongqing Housing and Urban Rural Development Committee, 2014. (in Chinese)]
- [9] 地质灾害防治工程勘察规范: DB50/43—2018[S]. 重庆: 重庆市质量技术监督局, 2018. [Code for geological disaster prevention and control engineering investigation: DB50/43—2018 [S]. Chongqing: Chongqing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2018. (in Chinese)]
- [10] 曾廉. 崩塌与防治[M]. 峨眉山: 西南交通大学出版社, 1990. [ZENG L. Rock fall and control [M]. Emeishan: Southwest Jiaotong University Press, 1990. (in Chinese)]
- [11] 赵允辉. 危岩崩塌地质灾害调查评价与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(增刊1): 33-38. [ZHAO Y H. Investigation evaluation and control of dangerous-rock slumping geological hazard [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(Suppl): 33-38. (in Chinese)]
- [12] 毕冉,唐晓,刘保健. 基于能量跟踪法的边坡落石运动过程模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 14-19. [BI R, TANG X, LIU B J. An implused-based energy tracking method for the analysis of slope stability of falling rocks [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 14-19. (in Chinese)]