

四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析

陈锡锐, 刘虹强, 杨剑红, 艾其凯, 钟波, 蔡国军

Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province

CHEN Xirui, LIU Hongqiang, YANG Jianhong, AI Qikai, ZHONG Bo, and CAI Guojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价

Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model

郭松, 郭广礼, 李怀展, 杨向升 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 116-121

基于贝叶斯-粒子群算法的溜砂坡稳定性评价

Stability evaluation of sand slopes based on the Bayesian-PSO algorithm

娄超华, 田荣燕, 旺久, 孙威宇, 罗进 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 53-59

基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model

何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126-134

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209043

陈锡锐, 刘虹强, 杨剑红, 等. 四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 81-89.

CHEN Xirui, LIU Hongqiang, YANG Jianhong, et al. Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 81-89.

四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析

陈锡锐^{1,2}, 刘虹强¹, 杨剑红¹, 艾其凯³, 钟波³, 蔡国军²

(1. 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 四川成都 610213; 2. 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; 3. 中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队 302 分队, 四川乐山 614299)

摘要: 张家沟危岩体在 2022 年“6·1”芦山地震后被发现, 稳定性差, 严重威胁下方居民生命财产安全。基于稳定性计算及离散元数值分析方法对危岩体进行评价, 选取稳定性最差的地震工况进行运动学分析, 在上述研究基础上结合解析解与数值解成果设计相应防护措施。主要结论有: (1) 张家沟危岩体结构破碎, 顺坡向控制性结构面发育, 破坏模式为滑移式; (2) 稳定性计算与数值模拟结果皆表明张家沟危岩体在天然、暴雨、地震工况下均会失稳, 其中地震工况下运动距离最长; (3) 地震工况下危岩体的破坏模式为震裂—滑移式, 运动过程中块石以滑移为主, 跳高较小, 同时坡面形态显著影响着落石运动特征; (4) 落石间相互碰撞挤压会改变其运动特征及冲击动能大小, 在一定程度上可增加致灾范围。成果可为类似灾害防治提供参考。

关键词: 滑移式崩塌; 稳定性评价; 离散元; 运动特征; 防治措施

中图分类号: P642.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)02-0081-09

Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province

CHEN Xirui^{1,2}, LIU Hongqiang¹, YANG Jianhong¹, AI Qikai³, ZHONG Bo³, CAI Guojun²

(1. Regional Geological Survey Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chengdu, Sichuan 610213, China; 2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Sichuan Brigade 302 Branch, China Construction Material Industry Geological Exploration Center, Leshan, Sichuan 614299, China)

Abstract: After the “6·1” Lushan earthquake, unstable rock mass was discovered in Zhangjiagou, posing a severe threat to the safety of the residents and their property below. The dangerous rock mass was evaluated using stability calculation and the discrete element numerical analysis method, and the seismic condition with the highest threat level was selected for kinematic analysis. Based on this research, a combination of analytical solution and numerical solution was used to design corresponding protective measures. The main conclusions are as follows: (1) The structure of the unstable rock mass in Zhangjiagou is broken, and a controlling structural plane is developed along the slope. (2) The stability calculations and numerical simulations show that the Zhangjiagou unstable rock mass will become unstable under natural, rainstorm and seismic conditions, with the longest

收稿日期: 2022-09-27; 修订日期: 2023-01-31

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点实验室自主课题(SKLG2019Z017); 四川省科技计划项目(2019YJ0403)

第一作者: 陈锡锐(1997—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事地质工程与岩土工程方面研究工作。E-mail: 719039252@qq.com

通讯作者: 刘虹强(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事区域地质、水工环地质调查相关工作。E-mail: 93053219@qq.com

movement distance occurring during an earthquake. (3) The failure mode of the dangerous rock mass under seismic conditions is a shatter-slip type, where the rock mainly slips during movement, and the jump height is small. Additionally, the slope shape significantly affects the characteristics of rockfall movement. (4) The collision and extrusion between rockfalls can change their motion characteristics and impact kinetic energy, potentially increasing the scope of the disaster. The research results can provide a reference for similar disaster prevention and control efforts.

Keywords: sliding collapse; stability evaluation; discrete element; movement characteristics; prevention method

0 引言

崩塌落石是一种严重的地质灾害,具有突发、难以预测、冲击能量大等特点^[1-3],使得该类灾害的防治工作较为困难。随着全球气候变暖、人类工程活动的加剧,崩塌落石发生概率大幅上升^[4]。中国西南山区因其地质构造复杂,雨量充沛、地震活动频发^[5]等原因使得地质灾害防治任务艰巨,因此如何科学有效地对崩塌落石进行防治成了亟待解决的问题。

定性与定量分析是危岩稳定性分析的主要手段,定性分析方面:Maerz^[6]提出了 MRFHRS 评价系统,Budetta^[7]提出了 ROMA 评价方法。中国主要采用赤平投影法及一些稳定性计算公式^[8-12],随着新技术新方法的产生,危岩体稳定性评价得到了进一步发展。陈宙翔等^[13]在上述方法的基础上,结合无人机倾斜摄影对强震区危岩体进行了稳定性评价。马显东等^[14]对点云数据聚类分析,提取了危岩体的结构特征信息,对危岩区进行了稳定性评价,最后通过赤平投影法分析了其失稳模式。刘宝臣等^[15]运用离散元软件 3DEC 做了危岩体稳定性评价分析。可见基于极限平衡法并辅以定量分析手段已成为危岩稳定性评价的主流方法,稳定性评价工作完毕后,便应开展相应防治措施设计,而研究崩塌运动学特征则是防护结构设计的理论依据。

崩塌落石的运动学特征可服务于致灾范围的圈定及防治措施的选取,是治理过程中至关重要的一部分^[16-18]。王栋等^[19]利用 Rockfall Analyst 软件研究了不同尺寸危岩体运动轨迹特征,认为落石质量与冲击能成正比。李源亮等^[20]基于数值模拟方法分析了某高位山体落石的运动规律,并提供了防治建议。柳万里等^[21]采用 Rockfall 软件对落石运动特征的影响因素进行了分析,并与现场试验进行对比,得到了一定成果。黎尤等^[22]通过 RocPro3D 得到了岩土体表面特征参数,并对危岩区破坏范围及能量进行了预测。可以看出目前运用数值模拟研究落石运动特征已较为广泛,然而崩塌发生后其间复杂的能量转化、冲击破碎等复杂因素使前人的研究成果不能完全适用,需要具体分析。

张家沟危岩体位于雅安市宝兴县顺江村居民安置点后方山坡,隐蔽性高,稳定性差,结构破碎,受“6·1”芦山地震影响稳定性进一步下降,威胁下方居民 457 人。所在山体坡脚距居民区仅约 15 m,缓冲距离短,科学布置防护措施至关重要。综上,在现场勘察、资料收集的基础上,结合前人研究成果,对危岩体进行稳定性评价分析后,结合离散元数值模拟方法开展危岩体运动学特征研究,最后基于研究结论设计了相应防护措施并进行验证。成果可为类似灾害防治提供参考。

1 张家沟危岩体概况

2022 年 6 月 1 日雅安芦山县发生 6.1 级地震,受地震影响,四川省宝兴县穆坪镇顺江村大河坝组张家沟发生崩塌,导致下方聚居区部分村民房屋受损,局部既有工程损毁,崩滑体沿坡面刮铲损毁林地约 $4 \times 10^4 \text{ m}^2$,造成经济损失约 200 万元。目前该隐患点威胁坡脚聚居区 109 户 457 人,潜在经济损失 3 450 万元。经现场踏勘发现,崩源区现有 1 处较大规模危岩体(图 1),需立刻开展相关治理工程。



图 1 张家沟危岩体全貌图

Fig. 1 Overview map of the Zhangjiagou dangerous rock mass

张家沟危岩体距地面高度约 165 m, 体积约 2 328 m³ (长 30.1 m×宽 8.6 m×厚 9.2 m)。岩体破碎, 顶部有宽约 19 cm 的拉张裂缝, 出露岩性为新元古代南华纪二长花岗岩(Pt₃γ), 主要受 3 组结构面控制: L1(311°∠50°) 顺坡向发育, 为控制性结构面, 张开度 0.6~0.8 m, 宽度 2~3 cm, 节理面可见光滑擦痕; L2(98°∠74°) 沿崩源区侧向发育, 较为密集, 张开度 0.2~0.6 m, 与坡体走向平

行, 受竖向地震力影响发生开裂, 切割岩体。崩源区附近部分岩体沿着 L2 发育较大裂缝, 切割深度达 3 m 以上; L3(214°∠86°) 陡倾坡外发育, 少量泥质填充或无填充。危岩体受节理切割完整性较差, 后缘裂缝两侧岩体有明显错动, 坡表受落石铲刮影响植被稀疏, 崩塌碎石堆积。剖面图见图 2。

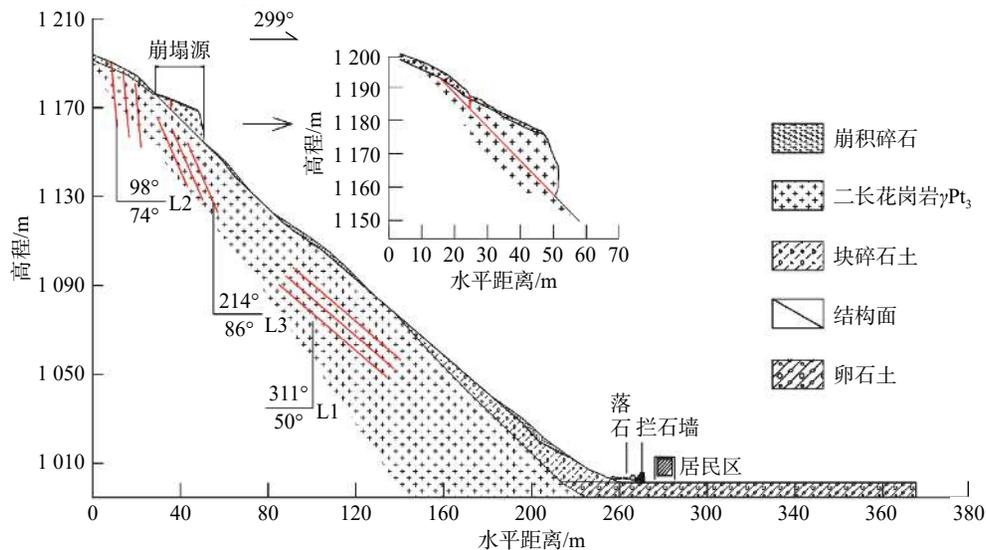


图 2 张家沟危岩体剖面图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of the Zhangjiagou dangerous rock mass

2 危岩稳定性影响因素分析及危岩失稳模式

2.1 影响因素分析

宝兴县地处四川盆地与青藏高原东南缘的过渡地带, 山峦纵横交错为地质灾害的发生提供了基础。通过资料收集和现场勘察将影响危岩体稳定性的主要因素分为主要因素(气象、水文、地震、植物根劈、人类活动)和控制因素(岩体结构)。

(1) 岩体结构

张家沟危岩体主要受结构面 L1 控制, 该节理贯通性较好, 易形成滑移软弱面, 有利于岩体滑出。L2 陡倾坡内发育, 在长期降雨及重力作用下不断向深部发展, 和 L1 组合下将危岩体切割利于危岩体形成。L3 与 L1 近似正交, 使 3 组节理围限下使危岩体完整性进一步下降。

(2) 气象条件

据宝兴气象站资料可知, 多年平均降水量 1 101.5 mm, 最大年降水量为 1 279.0 mm, 最大日降水量达 123.5 mm, 最大 3 h 降水量 80.0 mm 以上; 由此可见, 丰富集中的

降水、较多的局地大雨和暴雨、较大的暴雨强度为山洪泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害形成提供了充足的水源条件。

(3) 水文条件

研究区内水系属岷江支流青衣江水系, 宝兴河是区内最主要的河流(图 3), 由发源于县境北部夹金山的东、西两河汇合而成, 最大年径流量达 3.4×10^{10} m³/s, 最大洪峰流量 1 490 m³/s, 相应水位 996.67 m。东河为宝兴河一支流, 主流及其支流沟床比降大, 流量随季节变化显著, 对地表进行了强烈的切割, 形成大量的稳定性较差的河岸边坡, 西河、东河及支流的凹岸河段多为滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害强烈发育的地段。

(4) 地震作用

近年来, 连续遭受 2008 年“5·12”汶川特大地震、2013 年“4·20”大地震和 2022 年“6·1”芦山地震等的叠加影响, 山体疏松, 坡体稳定性差, 崩塌灾害活跃; 同时, 地震动作用荷载对崩塌的诱发作用十分明显。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015) 国家标

准,调查区地震动峰值加速度为 0.20 g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,地震设防基本烈度为Ⅷ度。



图 3 斜坡前部东河

Fig. 3 Aerial view of the East River area at the front of the slope

(5)植物根劈作用

现场勘察可以发现坡表植被覆盖茂密,以灌木为主,根系沿着裂隙生长将进一步降低岩体稳定性,岩体完整性下降,在外部扰动条件下极易失稳。

(6)人类活动作用

斜坡坡脚为居民区及耕地,人类工程对坡脚施加的荷载会降低斜坡稳定性,进而影响到危岩体稳定性。

2.2 危岩失稳模式分析及稳定性评价

(1)失稳模式分析

危岩体所在斜坡高约 165 m,总体坡度 40°~60°。岩性为花岗岩,裂隙发育有 311°∠50°(L1)、98°∠74°(L2)和 214°∠86°(L3)3 组,结构面间距 0.5~6.0 m 不等;坡面产状为 299°∠50°,取平均坡度。根据图 4 可知,L1 顺坡向发育且二者倾角相近,利于岩体滑出,L2 倾向与坡向相反并使岩体沿其开裂,L3 与坡向近似

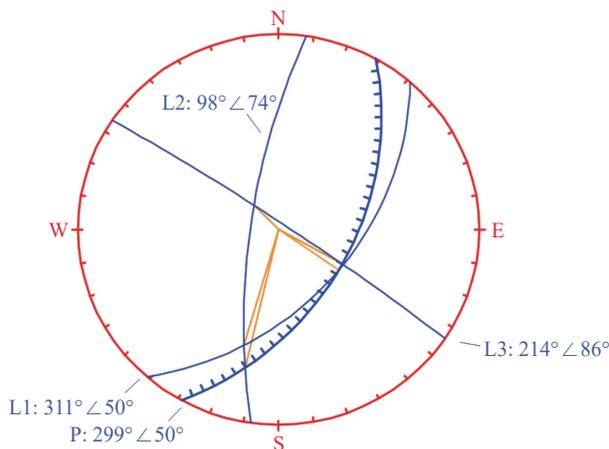


图 4 危岩体赤平投影

Fig. 4 Stereographic projection of the Zhangjiagou dangerous rock mass

正交进一步降低其稳定性,故推测其主要破坏模式为滑移式。据现场调查,曾于 2008 年 5 月、2013 年 4 月、2022 年 6 月地震后发生崩塌落石,停于坡脚缓坡处。危岩带受高倾角节理裂隙切割,临空条件较好,加之暴雨、地震及根劈作用加速裂隙扩张,是形成危岩体的主要原因。

(2)稳定性评价

考虑到研究区工程地质概况,设置天然、暴雨、地震 3 种计算工况。由于该危岩体破坏模式为滑移式,后缘有拉张裂隙,故根据《地质灾害防治工程勘察规范》(DB50/T 143—2018)采用式(1)计算稳定性:

$$K = \frac{(W\cos\theta - Q\sin\theta - V\sin\theta - V)\tan\phi + cl}{W\sin\theta + Q\cos\theta + V\cos\theta} \quad (1)$$

式中:W——危岩体自重/(kN·m⁻³);

θ——软弱结构面倾角/(°),外倾取正,内倾取负;

Q——地震力/(kN·m⁻¹);

V——裂隙水压/(kN·m⁻¹);

φ——后缘裂隙内摩擦角标准值/(°),当裂隙未贯通时,取贯通段和未贯通段内摩擦角标准值按长度加权和加权平均值,未贯通段内摩擦角标准值取岩石内摩擦角标准值的 0.95 倍;

c——后缘裂隙黏聚力标准值/kPa;

l——滑面长度/m。

岩体力学参数通过室内试验及类比同类型地区相关规范获得,为稳定性计算及后续数值模拟研究提供参数依据^[23],岩体力学参数见表 1。在稳定性计算中:地震力按公式 $Q = \xi_e \cdot W$ 确定,式中地震水平作用系数八级烈度地区 ξ_e 取 0.16(参照《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010),稳定性计算参数选取见表 2。

表 1 岩体力学基本参数取值(天然)
Table 1 Fundamental mechanical parameters of rock mass (natural)

岩性	密度/(kg·m ⁻³)	节理刚度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
花岗岩	2 750		47.5	11.2
基岩	2 960		58.2	15.7
L1		2.2	30.5	0.8
L2		2.2	24.9	0.6
L3		2.2	25.3	0.7

将表 2 数据代入式(1)中计算得到结果见表 3,计算结果按照《滑坡防治工程勘察规范》(GB/T 32864—2016)中危岩体稳定程度等级划分表进行划分。计算结果表明 3 种工况下该危岩体均欠稳定,急需治理。

表 2 稳定性计算参数选取

Table 2 Selection of calculation parameters for stability analysis

计算工况	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	后缘陡倾裂隙 深度/m	裂隙或滑面充水 高度/m	滑面长度/ m	裂隙水压力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	软弱结构面 倾角/($^{\circ}$)	地震水平 系数	结构面综合 黏聚力/MPa	结构面综合 内摩擦角/($^{\circ}$)
天然	26.95	6.68	1.96	25.32	19.2	45	0	0.65	31
暴雨	27.45	6.68	2.25	25.32	25.3	45	0	0.61	27
地震	26.95	6.68	1.96	25.32	19.2	45	0.16	0.65	31

表 3 稳定性计算结果

Table 3 Stability analysis calculation results

计算工况	破坏模式	稳定性系数	稳定状态
天然	滑移式	1.18	欠稳定
暴雨	滑移式	1.00	欠稳定
地震	滑移式	0.93	欠稳定

3 危岩体运动特征数值模拟分析

3.1 模型建立

该危岩体受 3 组结构面控制, 位于高陡山坡之上, 发生破坏后将发生解体, 因此研究在不同工况下的运动特征可为防治措施提供理论依据。采用 UDEC 软件建立数值计算模型(图 5), 该软件遵循牛顿第二定理, 允许块体沿着结构面产生滑移翻滚, 可模拟落石碰撞后的速度及能量损失, 适合做落石碰撞运动分析。

数值模型 X 方向长 375.18 m, Y 方向左侧高 198.43 m, 右侧高 6.85 m。计算单元为三角形网格, 数量为 3 568

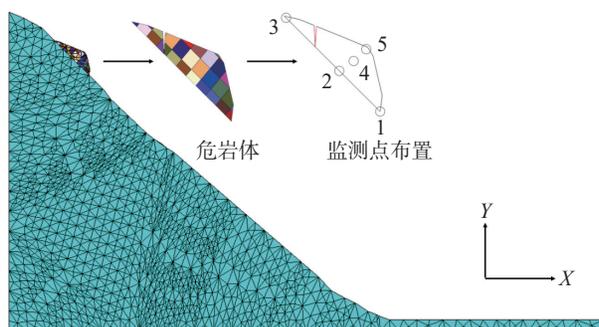


图 5 张家沟危岩体数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model of the Zhangjiagou dangerous rock mass

个, 网格尺寸设置满足地震波传播精度要求。天然工况: 采用速度约束边界条件, 岩体本构模型选取 Mohr-Coulomb, 节理滑动采用库伦滑移准则, 计算参数选取见表 1。暴雨工况: 边界条件及相关本构模型同天然工况, 岩土力学参数选取饱和状态下, 计算参数有不同程度的降低。地震工况: 为满足地震波输入模型底部设为黏滞边界以减少地震波能量损失, 两侧设为自由场边界模拟地震波向四周发散。输入波选取正弦波, 参照《中国地震动反应谱特征周期区划图》将振幅调整为 $0.2g$ 。最后, 在危岩体内布置系列监测点, 以此定量分析其运动特征, 至此数值模拟准备工作完毕。

3.2 运动特征分析

危岩体分别在 3 种工况下进行模拟, 分析其运动变化特征, 为防治措施提供参考。由图 6 可知, 3 种工况下危岩体均失稳产生滑移。天然工况下, 落石最大位移约 64.13 m, 并最终停积在坡体中部, 在后续降雨或地震条件下将继续下滑, 需及时清理坡表落石; 暴雨工况下, 落石最大位移 264.67 m, 已超过既有拦石墙处, 坡表仍残留部分块石; 地震工况下落石位移最大距离达 283.46 m, 已超过居民区。地震工况下危岩体破坏特征与现场观测到的崩塌特征一致, 危害程度最高, 故选取地震工况具体研究。

(1) 地震工况危岩体运动特征分析

由图 7 可知, 地震工况下危岩体首先在纵波作用下产生拉裂破坏, 随后横波到达剪切岩体, 当潜在滑移面贯通后崩塌发生, 并迅速向坡脚运移。崩塌发生后, 岩块脱离坡表不再受地震力的影响^[24], 下滑过程

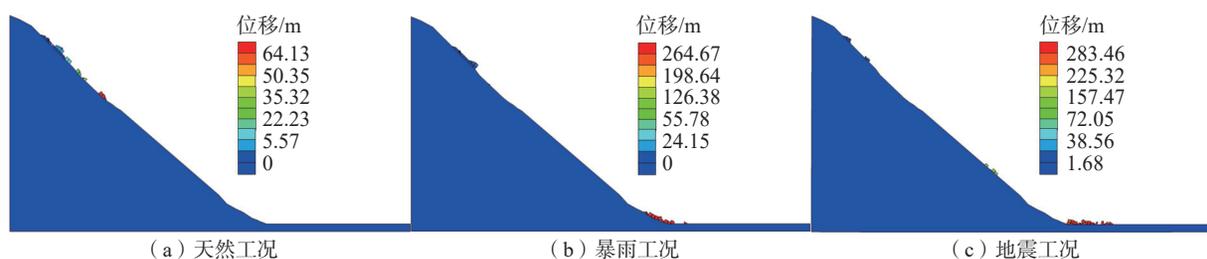


图 6 3 种工况下危岩体总位移云图

Fig. 6 Total displacement nephogram of the dangerous rock mass under three working conditions

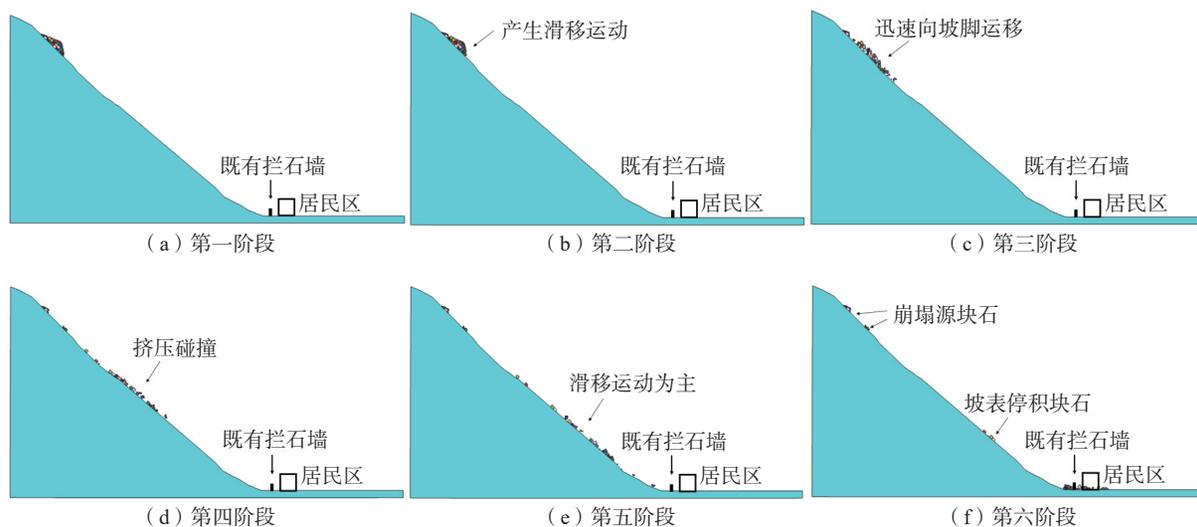


图 7 地震工况下张家沟危岩体运动特征

Fig. 7 Movement characteristics of the Zhangjiagou dangerous rock mass under seismic working condition

中,速度差异使得岩体相互挤压碰撞,铲刮坡表。受到坡表形态的影响,岩块运移特征受到一定影响(坡表中部起伏),部分落石弹起。落石到达坡脚仍继续向前翻滚,可以看出无拦石墙情况下落石可运动至居民区,因此需要针对该种情况进行防治。此外地震工况下危岩体运动以滑移为主,破坏模式为震裂-滑移式崩塌。危岩体下滑过程中跳高较小(图 8),天然及暴雨工况下亦是如此,这也接近现场实际观测,进一步说明了本次数值模拟的合理性,也为防治措施设置提供了依据。

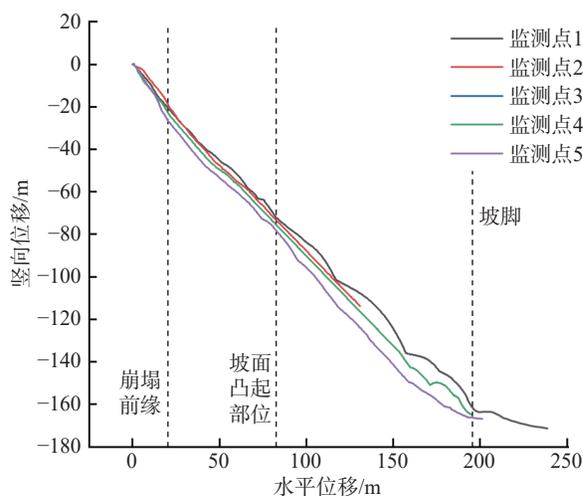


图 8 监测点水平与竖直位移曲线

Fig. 8 Horizontal and vertical displacement curves of the monitoring points

(2) 监测数据分析

为定量分析崩塌块体的运动特征,绘制了监测点速

度与水平向位移关系曲线(图 9)。对于该类震裂滑移式崩塌而言,水平位移量:监测点 1(241 m)>监测点 5(195 m)>监测点 4(189 m)>监测点 2(131 m)>监测点 3(0.8 m),表明崩塌体中前部的岩块水平向位移量最大,可依此指标选取防护措施位置。崩塌体底部及后部的岩块位移距离未达坡脚,表明此处岩块是坡表堆积物的主要来源。

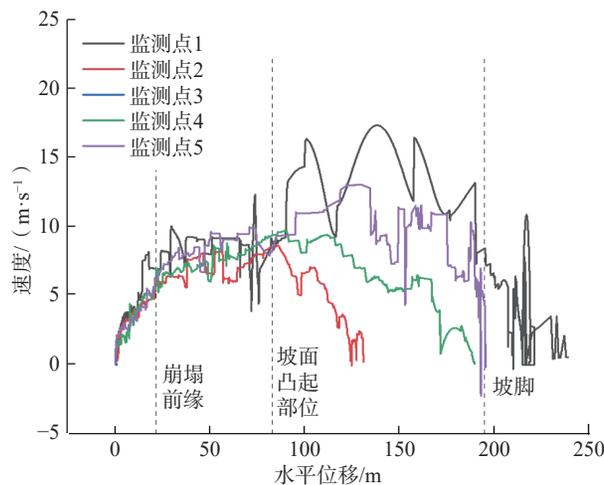


图 9 监测点速度与水平位移曲线图

Fig. 9 Monitoring point velocity and horizontal displacement curve

除 3 号监测点外,块体在黏滞阶段的速度曲线均呈非线性增加趋势,崩塌前缘至坡面凸起部位,块体速度平稳增加。1 号监测点下滑过程中受到了后续块体的碰撞,重力势能及碰撞能转换成动能,故速度迅速增加。块石运移至坡面凸起部位后,崩塌体表面中前部块体速度迅速增加,表明坡面形态对落石运动特征有显著

影响^[25],应在类似灾害风险评价指标中予以考虑。2号监测点由于在底部滑移时消耗了大量能量,故到达坡面凸起部位时速度逐渐降低。由1号监测点可以看出,前缘块体停积后受到后续落石冲击仍会产生一定位移。

4 防治措施建议

现场调查可知坡脚处堆积最大块石(121 472 kg)体积约 41.6 m³,故在模拟中选取典型的相同岩块分析其运动过程中的动能变化,同时通过动力学原理得解析解^[26]进行对比(图 10)。结合上文可知,崩塌体下滑过程中不断解体成大小不一的岩块,运动过程中重力势能及相互碰撞产生的能量转换成冲击动能,当岩块逐渐下滑至坡脚后其动能便逐渐转化为内能。数值解与解析解结果趋势相似,数值解得落石最大冲击动能(20 152 kJ)>解析解(18 679 kJ),这是由于解析解所运用经验公式未考虑到岩块间相互挤压碰撞,仅考虑单个块体。岩体运动至既有拦石墙处时动能有数值解(3 276 kJ)>解析解(2 546 kJ),可见后续到达落石对停积块石有较大冲击作用,在一定程度上可增加其致灾范围,这在相应防治工作中需注意^[27-28]。

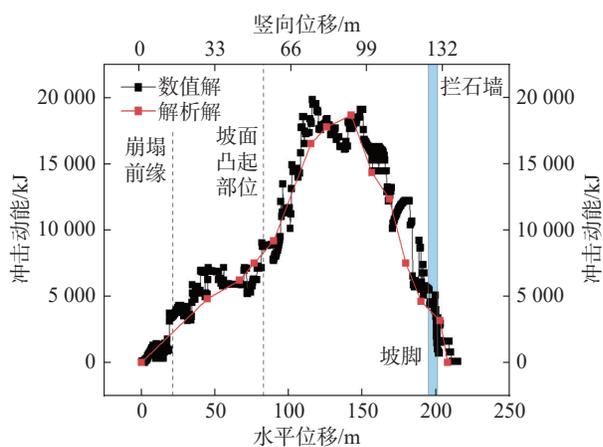


图 10 落石冲击动能与水平位移关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between the kinetic energy of rockfall impact and horizontal displacement

危岩体下方为顺江村居民安置点,聚集区人数 457 人,且坡脚距居民区仅约 15 m,缓冲距离短,威胁程度高,故本文在其运动特征的基础上针对性防治。该处既有设置的被动防护网及拦石墙在“6·1”芦山地震后受到不同程度破坏,需要进行修复,部分区域未设防护措施(图 11)。

结合全文可知,该危岩体在 3 种工况下均欠稳定,

其中在地震工况下稳定性最差。危岩体裂隙发育且位于陡崖之上,故不建议采取主动加固,但需布置监测预警措施。坡面残留块石需及时清理,防止坡面泥石流等灾害发生。通过运动特征分析发现,危岩体运动以滑移为主,跳高较少,且坡面植被较为茂密,坡面可不采取限制跳高措施。落石冲击动能较大,且后续落石作用可能扩大致灾范围,故对既有拦石墙进行修复并进行加高处理,在空缺处修筑拦石墙,最后在墙后设置等高缓冲层。该崩塌防治工程等级为 II 级,需考虑 4.0 m 的安全防护高度,既有拦石墙净高为 3.0 m,需对既有拦石墙加高 1.0 m。墙体加高后顶宽 1.0 m,底宽 1.0 m,高 1.0 m, C20 混凝土浇筑,植筋 $\phi 16$ 长 1.0 m,间距 1.0 m \times 0.5 m 与既有拦石墙连接。墙后背面设置等高 1.0 m 顶宽的缓冲层,充填袋装碎石土,坡面采用厚 30 cm 的 M10 砂浆片石护面。

最后利用 UDEC 软件模拟修复加高后拦石墙的拦挡作用,可见拦截效果良好(图 12),后续工程需对墙体位移变形进行监测并及时清理墙内堆积落石。



图 11 既有拦石墙被摧毁

Fig. 11 Site photo of destroyed existing barricade wall

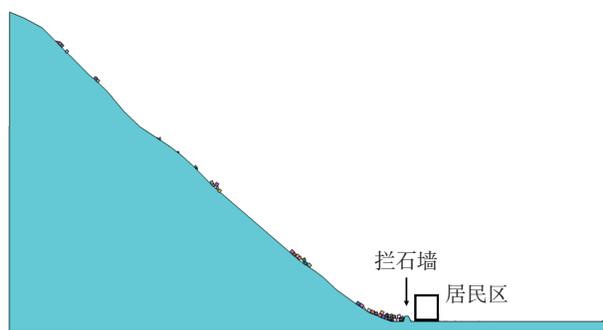


图 12 拦石墙拦挡效果模拟

Fig. 12 Simulation of the blocking effect of the rockfall protection retaining wall

5 结论

(1) 张家沟危岩体受 3 组结构面围限结构较为破碎, 顺坡向控制性结构面发育, 其破坏模式为滑移式。

(2) 稳定性计算与数值模拟结果吻合, 表明张家沟危岩体在天然、暴雨、地震工况下均会失稳, 其中以地震工况威胁程度最高。

(3) 危岩体在地震工况下破坏模式为震裂-滑移式崩塌, 崩解下滑过程中受到坡面起伏影响较大, 运动过程以滑移为主, 跳高较少。

(4) 危岩体裂隙发育, 不建议采取主动加固措施, 但需注意监测预警。结合运动学分析及冲击动能计算结果, 可在空缺处按要求修筑拦石墙, 并对既有拦石墙进行修复及加高处理。

参考文献(References):

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 4 版. 北京: 地质出版社, 2016: 1 - 5. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principles of engineering geological analysis [M]. 4th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1 - 5. (in Chinese)]
- [2] ASHWOOD W, HUNGR O. Estimating total resisting force in flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(10): 1700 - 1717.
- [3] FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421 - 503.
- [4] 梅雪峰. 落石冲击荷载作用下的桩板拦石墙-缓冲层组合结构动力响应 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022. [MEI Xuefeng. Dynamic response of pile-sheet retaining wall with cushion layer under rockfall impact [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 尹迪, 董培育, 曹建玲, 等. 川滇地区地震危险性数值分析 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(5): 1612 - 1627. [YIN Di, DONG Peiyu, CAO Jianling, et al. Numerical analysis of the seismic hazard in Sichuan-Yunnan region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(5): 1612 - 1627. (in Chinese with English abstract)]
- [6] MAERZ N H. New risk-consequence rockfall hazard rating system for Missouri highways using digital image analysis [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2005, 11(3): 229 - 249.
- [7] P BUDETTA, C DE LUCA, M NAPPI. Quantitative rockfall risk assessment for an important road by means of the rockfall risk management (RO.MA.) method [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(4): 1377 - 1397.
- [8] 杨志法, 尚彦军, 刘英. 关于岩土工程类比法的研究 [J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 299 - 305. [YANG Zhifa, SHANG Yanjun, LIU Ying. Study on the analogism in geotechnical engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1997, 5(4): 299 - 305. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王玉锁, 杨国柱. 隧道洞口段危岩落石风险评估 [J]. 现代隧道技术, 2010, 47(6): 33 - 39. [WANG Yuso, YANG Guozhu. Rockfall risk assessment for a tunnel portal section [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2010, 47(6): 33 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王新民, 康虔, 秦健春, 等. 层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(6): 2455 - 2462. [WANG Xinmin, KANG Qian, QIN Jianchun, et al. Application of AHP-extenics model to safety evaluation of rock slope stability [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(6): 2455 - 2462. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘贺军, 吴玉涛, 李晓乐, 等. 河北阜平县石滩地村危岩体变形破坏模式及稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 50 - 57. [LIU Hejun, WU Yutao, LI Xiaole, et al. Deformation failure mode and stability analysis of dangerous rock mass in Shitandi Village, Fuping County of Hebei Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(4): 50 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 邬爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 1 - 7. [WU Aiqing. Series methods of analyzing rock mass stability based on key block theory and their applications to Three Gorges project [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(2): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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 Zhouxiang, YE Xian, ZHANG Wenbo, 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 with English abstract)]
- [14] 马显东, 周剑, 张路青, 等. 强震区公路沿线崩塌危岩体特征提取及失稳分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 2901 - 2914. [MA Xiandong, ZHOU Jian, ZHANG Luqing, et al. Feature extraction and instability analysis of dangerous rock mass along highway in meizoseismic areas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup 1): 2901 - 2914. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [15] 刘宝臣,王良玉,曾榕,等.桂林翻山危岩稳定性评价的离散元分析 [J] . *科学技术与工程*, 2022, 22(6): 2409 – 2418. [LIU Baochen, WANG Liangyu, ZENG Rong, et al. Discrete element analysis of stability evaluation of Guilin Fanshan dangerous rock [J] . *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(6): 2409 – 2418. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘国阳,孟海怡,宁宝宽,等.基于三维非连续变形分析的巨石崩塌运动研究 [J] . *岩土力学*, 2022, 43(1): 246 – 256. [LIU Guoyang, MENG Haiyi, NING Baokuan, et al. Study on collapse and movement of a boulder based on 3D discontinuous deformation analysis [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 246 – 256. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王朋,贾洪彪,马淑芝,等.梳妆台危岩体稳定性评价及落石运动特征研究 [J] . *安全与环境工程*, 2022, 29(4): 139 – 146. [WANG Peng, JIA Hongbiao, MA Shuzhi, et al. Stability evaluation of dangerous rock mass in dressing table and study on characteristics of rockfall movement [J] . *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(4): 139 – 146. (in Chinese)]
- [18] 张青宇,唐世明,沈军辉.四川麻柳沟地震崩塌落石运动特征分析 [J] . *人民长江*, 2015, 46(13): 39 – 41. [ZHANG Qingyu, TANG Shiming, SHEN Junhui. Analysis of movement characteristics of collapse rockfall in Maliugou earthquake [J] . *Yangtze River*, 2015, 46(13): 39 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王栋,王剑锋,李天斌,等.西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析 [J] . *地质力学学报*, 2021, 27(1): 96 – 104. [WANG Dong, WANG Jianfeng, LI Tianbin, et al. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: A case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China [J] . *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(1): 96 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李源亮,郭阿龙.高风险落石运动分析及边坡防护综合设计 [J] . *长江科学院院报*, 2022, 39(9): 65 – 70. [LI Yuanliang, GUO Along. Analysis of highly risky rockfall movement and comprehensive design of slope protection [J] . *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(9): 65 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 柳万里,晏鄂川,魏鹏飞,等.落石运动特征试验及影响因素敏感性分析 [J] . *山地学报*, 2021, 39(1): 47 – 58. [LIU Wanli, YAN Echuan, WEI Pengfei, et al. Experimental study on rockfall and sensitivity analysis of influencing factors [J] . *Mountain Research*, 2021, 39(1): 47 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黎尤,何坤,胡卸文,等.震裂山体崩塌形成特征及运动学三维模拟——以汶川县三官庙村崩塌为例 [J] . *工程地质学报*, 2022, 30(2): 542 – 552. [LI You, HE Kun, HU Xiewen, et al. Formation characteristics and kinematics 3-D simulation of rockfall evolved from shattered mountain: Case study of Sanguanmiao village rockfall in Wenchuan County [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(2): 542 – 552. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 蔡国军,陈锡锐,尹保国,等.岩体力学参数对反倾边坡稳定性影响的数值模拟研究 [J] . *人民珠江*, 2020, 41(9): 25 – 31. [CAI Guojun, CHEN Xirui, YIN Baoguo, et al. Numerical simulation study on influence of rock mass mechanical parameters on stability of anti-dip slope [J] . *Pearl River*, 2020, 41(9): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ASTERIOU P, SAROGLU H, TSIAMBAOS G. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis [J] . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 103 – 113.
- [25] 蔡国军,陈锡锐,孙文鹏,等.强震作用下斜坡表面放大效应的三维离散元模拟 [J] . *地质科技通报*, 2022, 41(2): 104 – 112. [CAI Guojun, CHEN Xirui, SUN Wenpeng, et al. Three-dimensional discrete element simulation of the amplification effect of the slope surface under the action of strong earthquakes [J] . *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 104 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 唐建辉.隧道洞口坡面落石运动特性及冲击明洞作用机理研究 [D] .成都:西南交通大学, 2022. [TANG Jianhui. Study on movement characteristics of rockfall on the slope of tunnel portal and the mechanism of impacting open cut tunnel [D] . Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 宋德光,吴瑞安,马德芹,等.四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析 [J] . *地质通报*, 2023, 42(12): 2185 – 2197. [SONG Deguang, WU Ruian, MA Deqin, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province [J] . *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(12): 2185 – 2197. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 庞鑫,袁明,卢渊,等.基于无人机LiDAR仿地飞行技术的高陡边坡危岩体快速识别方法 [J] . *地质科技通报*, 2023, 42(6): 21 – 30. [PANG Xin, YUAN Ming, LU Yuan, et al. Rapid identification method for the dangerous rock mass of a high-steep slope based on UAV LiDAR and ground imitation flight [J] . *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 21 – 30. (in Chinese with English abstract)]