

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

### 四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析

张永海,谢武平,罗忠行,翟世斌

Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province

ZHANG Yonghai, XIE Wuping, LUO Zhongxing, and ZHAI Shibin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202045

### 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

### 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

### 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

基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例

\${suggestArticle.titleEn} 何宇航,裴向军,梁靖,谷虎 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 24-33



关注微信公众号,获得更多资讯信息

### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202045

张永海,谢武平,罗忠行,等.四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析 [J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):37-46.

ZHANG Yonghai, XIE Wuping, LUO Zhongxing, *et al.* Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan Country of Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 37-46.

## 四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析

张永海1,谢武平1,罗忠行1,翟世斌2

(1. 湖南省生态地质调查监测所,湖南长沙 410119;

2. 湖南中核建设工程有限公司,湖南长沙 410119)

**摘要:**危岩体是指由结构面切割形成的在一定诱发因素下失稳破坏的岩体,其作为常见的自然地质灾害之一,严重影响 山区人类生命财产安全。对危岩体的勘查、稳定性评价、风险评价是地质灾害预防的研究难题。受人类工程活动影响, 名山县新店镇白马沟内存在多处危岩体。通过对国内外研究文献的查阅分析并结合白马沟危岩体的分布特征、发育特征、 崩塌落石运动特性进行分析与研究,初步总结出了白垩系上统灌口组(K<sub>2</sub>g)危岩体的形成、分布规律及成灾机理,并对该 区4个危岩体利用 Rockfall 进行数值模拟计算,计算其运动速度及运动轨迹,计算岩石弹跳高度及距离等。为此类工程地 质条件下的的危岩体稳定性评价及运动轨迹的分析提供参考,同时对于崩塌危岩体灾害预防与减灾技术研究有积极意义。 关键词:危岩体;结构面;稳定性评价; Rockfall;运动轨迹 中图分类号: P642.21; TU94<sup>+3</sup>.2 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)04-0037-10

# Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province

ZHANG Yonghai<sup>1</sup>, XIE Wuping<sup>1</sup>, LUO Zhongxing<sup>1</sup>, ZHAI Shibin<sup>2</sup>

(1. Hunan Ecological Geological Survey and Monitoring Institute, Changsha, Hunan 410119, China;
2. Hunan Zhonghe Construction Engineering Co. Ltd., Changsha, Hunan 410119, China)

Abstract: Dangerous rock mass refers to the rock mass that is cut by the structural plane and fails under certain inducing factors. As one of the common natural geological disasters, it seriously affects the safety of human life and property in mountainous areas. The exploration, stability evaluation and risk evaluation of dangerous rock mass are difficult problems in the research of geological disaster prevention. Affected by human engineering activities, there are many dangerous rock masses in Baimagou, Xindian Town, Mingshan County. Based on the analysis and Research on the distribution and development characteristics of collapse dangerous rock mass in baimagou, this paper preliminarily summarizes the formation, distribution law and disaster mechanism of dangerous rock mass in Guankou formation ( $K_2g$ ) of Upper Cretaceous system, and carries out numerical simulation calculation for four collapse dangerous rock bodies in this area by using Rockfall, calculates their movement speed and trajectory, and calculates the rock bounce height and distance, It provides a reference for the stability evaluation and motion trajectory analysis of dangerous rock mass under such engineering geological conditions.

Keywords: dangerous rock mass; structural plane; stability evaluation; Rockfall; path of particle

E-mail: 1677089903@qq.com

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-04-02 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

第一作者:张永海(1967-),男,湖南澧县人,学士,高级工程师,主要从事岩土工程、地质灾害防治工程、生态修复工作。

通讯作者: 翟世斌(1984-), 男, 甘肃榆中人, 学士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害防治工程工作。E-mail: 810497913@qq.com

### 0 引言

危岩体是指斜坡上受多组结构面切割,临空条件 好,在重力、地应力等作用下与母岩逐渐脱离,发生坠 落式、倾倒式、滑移式崩塌的岩体[1]。20世纪以来,国 外学者对崩塌危岩破坏以后的运动特征以及形成的灾 害做了一定程度的研究, Manzella 等<sup>[2]</sup>发现崩塌体冲出 距离决定于初始体积大小; Zambrano 等<sup>[3]</sup>基于落石动 能、势能和摩擦能的变化提出了大块落石运动速度的 计算公式; Dorren 等[4]通过现场观测与数值模拟相结合 提出预测崩塌源、落石路径及冲出区域的综合分析法; Crosta 等<sup>[5]</sup>利用空间分布方法研究了崩塌滚石到达的概 率和崩塌的密度,为崩塌危险性评估和分区奠立了良好 的基础。何宇航等<sup>[6]</sup>利用 Rockfall 软件对滚石的运动路 径、速度、落石终点进行模拟计算;程宇等<sup>[7]</sup>为了确定落 石失稳后的运动距离划定安全避险区域,采用 Rockfall 模拟落石运动,为使模拟过程更加接近现场实际,通过 反演分析,得到岩块与坡面碰撞后的速度衰减法向阻尼 系数 Rn 和切向阻尼系数 Rt。因此研究斜坡危岩体的 目的主要是查明斜坡的孕灾地质条件,预测斜坡失稳破 坏的成灾模式、易发性、易损性、风险性,并进行斜坡 地质灾害风险评价以及风险管控等,从而减轻或者消除 危害,正确评价斜坡稳定性、提供安全可行的治理方 案。危岩体治理对于公路的路堑边坡来说是一项重要 的工程技术问题,对于危岩体进行准确的稳定性计算和 落石轨迹分析可以确保公路施工安全、降低公路运营 成本、最大程度消除地质灾害隐患,杜绝人员伤亡等具 有重大意义。

白马沟危岩体位于四川省雅安市名山县新店镇境 内,微地貌上表现为陡崖,光面高 15~34 m(图 1)。光 面上存在 4 处危岩体(图 2),在暴雨或地震工况时,危 岩体处于欠稳定状态,对下部车辆、行人威胁较大,危 害性较大。随着社会进步及经济发展,切坡建房、新 建公路、铁路也随之增加,人类工程活动不断向山区、 丘陵区、高阶地台塬地带延伸,危岩体的结构面由发 育到引发斜坡地质灾害具有明显的加速趋势,危岩体 的防治和监管工作任务十分艰巨。为此,通过对 4 处危 岩体稳定性计算和落石轨迹模拟预测,分别计算出了危 岩体在天然、暴雨及地震三种工况下的稳定性,并采用 Rockfall软件模拟预测了危岩体掉落后的运动轨迹,研 究结论可为类似危岩体的分析评价和轨迹分析提供一 定基础数据和资料,为该处危岩体防灾减灾提供了理论 支撑。



图 1 危岩带分布全貌照片 Fig. 1 Overall picture of dangerous rock mass distribution



图 2 各危岩体形态照片 Fig. 2 Morphological photos of each dangerous rock body

### 1 危岩体特征及稳定性分析

1.1 工程地质条件

危岩体地处名山县新店镇白马沟,该区呈间断的

"U"字型陡崖地形,为川西南台状丘陵地区之一,属于 中丘坪岗地貌。危岩体的微地貌以陡崖为主,坡度大 于 80°,局部呈直立状,植被不发育,基岩裸露。公路下 部堆砌有修建公路时的弃渣,地形坡度 27°~33°。由于 受地震、暴雨及修路爆破影响,公路内侧陡崖多处发生 过掉块以及剥坠落现象,在Ⅱ#危岩带形成了岩腔。危 岩区出露地层主要为白垩系上统灌口组(K<sub>2</sub>g)紫红色 泥质粉砂岩,薄-中厚状构造,主要矿物成分为黏土矿 物、长石及石英等,受节理裂隙影响,岩体局部较破碎, 岩层产状为 304°∠22°。

### 1.2 危岩体分布及形态特征

根据地形地貌形态,分布有4个危岩带(图1)。泥

质粉砂岩岩体受岩性、气候、风化作用、节理裂隙的影响,危岩带上又发育有4处危岩体(图3),4处危岩体编号为W2-1、W3-1、W4-1、W4-2。危岩体分布于2~4号危岩带上,W2-1危岩体形态上以悬空的板状为主、W3-1危岩体形态上以帽檐状为主、W4-1危岩体形态上以临空的块状为主、W4-2危岩体形态上以块状为主。



Fig. 3 Elevation diagram of dangerous rock zone distribution

受开挖爆破、气候、风化作用、植物根劈、裂隙面 切割以及地震影响,岩体局部呈破碎状,整体呈层状碎 裂结构,裂隙较为发育,岩层产状为 304°∠22°。主要发 育 2 组节理裂隙(图 4)。





L1:产状 37°~46°∠66°~85°,线密度 2~4条,间距 0.3~0.5 m,闭合,延伸长约 5 m,裂隙面较为平直光滑。

L2: 产状 113°~128°∠82°~89°, 间距 0.4~0.8 m, 闭合, 延伸长 1~2 m, 该组裂隙走向基本与陡崖走向垂 直。裂隙主要作用是与层理面共同作用, 将岩体切割成 块体。

危岩带内节理裂隙较发育,其中Ⅳ#危岩带存在— 组产状 125°∠84°的闭合状节理裂隙,裂隙走向与坡面 走向呈 35°相交,在公路开挖陡壁形成后,在长期应力 释放、重力及地震等综合因素作用下,裂隙不断扩张、 组合并向临空方向卸荷回弹,最终形成新的表生结构 面——卸荷裂隙。调查发现危岩带内的卸荷裂隙平面 分布不连续,主要在陡崖突出部位发育。危岩带内主要 受节理组合和层理面共同切割,形成局部的剥坠落现 象。受开挖爆破影响,在 II #危岩带坡底下部形成高6~8m 的岩腔,岩腔顶部临空,受节理裂隙及卸荷裂隙影响,极 易形成新的危岩体。

1.3 危岩体稳定性分析与评价

危岩现状整体欠稳定,局部在"5·12"和"4·20"地 震、暴雨等不利工况下下发生了不同程度的剥落、掉块 现象,掉块单体体积为 0.04~0.72 m<sup>3</sup>,主要掉落在下部 公路,崩落距离为 2~6 m。对危岩体的稳定性计算以 静力计算为主(利用陈洪凯等<sup>[8-9]</sup>、唐红梅等<sup>[10]</sup>、王在泉 等<sup>[11]</sup>依据危岩体主控结构面和切割裂隙对危岩失稳破 坏模式、静力计算公式进行了分析)。对于白马沟危岩 体灾害,通常具有点状分布的特点,危岩体发育特征及 稳定性与泥质粉砂岩的节理裂隙发育情况、延伸长度、 填充程度等有密切联系<sup>[12-13]</sup>,文中通过定性和定量进 行危岩体的稳定性分析。

1.3.1 各危岩带及危岩体的定性分析

各危岩带整体完整性较好,表现形态主要为陡崖, 受风化作用,主要发育两组裂隙,在层理面的共同切割 下,岩体表面被切割成较小的岩石块体,失稳形式主要 为剥坠落。利用岩体结构面赤平投影图进行定性分析, 对区内的4个危岩体的定性分析结果见表1。

表 1 危岩体稳定性定性评价统计表 Table 1 Statistical table for qualitative evaluation of stability of dangerous rock mass

始早	休和/m <sup>3</sup>	破坏棋士	稳定性评价					
细石	74-173/111	吸州铁八	天然工况	地震工况				
W2-1危岩体	250.8	坠落	基本稳定	欠稳定	欠稳定			
W3-1危岩体	37.3	坠落	基本稳定	欠稳定	欠稳定			
W4-1危岩体	270.3	坠落	基本稳定	欠稳定	欠稳定			
W4-2危岩体	53.9	倾倒	基本稳定	欠稳定	欠稳定			

(1) I #危岩带,高 25.7 m,宽约 48.1 m,平均厚度 0.5 m,体积约 618 m<sup>3</sup>。主要受两组裂隙和层面切割,岩 体呈层状碎裂结构,局部呈镶嵌碎裂状。切割成的单体 危岩呈块状、板状,且其临空面为陡崖,节理 L1 外倾, 局部已贯通。上部部分岩体已基本脱离母体,靠下部岩 体支撑。危岩出露为薄层-中厚层褐红色泥质粉砂岩, 微地貌上为陡崖,泥质粉砂岩属于软岩,抗风化能力弱, 岩体裸露,呈块状-板状结构,岩层产状:304°∠22°,主要 节理 L1:332°∠80°,间距 0.3~1.0 m,张开,延伸长 1~2 m; L2:128°∠87°,间距 0.4~0.8 m,张开,延伸长 1~2 m; 部分结构面已经贯通,使局部岩体已基本脱离母体,天 然工况下危岩体整体基本稳定,但在重力作用下易向临 空面发生剥落式掉块现象。在暴雨或地震工况时,危岩 体处于欠稳定状态,易形成局部滑移式崩塌和块石坠 落。预计最大单体体积 1.5 m<sup>3</sup>,潜在体积 187.05 m<sup>3</sup>。

(2) II #危岩带,高 34.6 m,宽约 45.2 m,平均厚度 2.1 m,体积约 3 284 m<sup>3</sup>。危岩下部基座为崩塌后形成的 岩腔,顶部受外倾裂隙切割,危岩呈悬空的柱状,节理 L1 和 L2 均外倾,局部已贯通,且其临空面为陡崖,部分 岩体被切割呈块状单体危岩。危岩出露为薄层-中厚层 褐红色泥质粉砂岩,微地貌上为陡崖,泥质粉砂岩属于 软岩,抗风化能力弱,岩体裸露,呈块状结构,其基座由 于崩塌已形成 5.2 m×4.0 m×8.1 m 的岩腔,岩层产状: 304°  $\angle 22^\circ$ ,主要节理 L1:46°  $\angle 88^\circ$ ,间距 0.2~0.4 m,张开,延 伸长 1~3 m; L2:340°  $\angle 85^\circ$ ,间距 0.2~0.3 m,张开,延伸 长 1~3 m。部分结构面已经贯通,使局部岩体已基本 脱离母体,天然工况下危岩体整体基本稳定,但在重力 作用下易向临空面发生剥落式掉块现象。在暴雨或地 震工况时,危岩体处于欠稳定状态,易形成局部滑移式 崩塌和块石坠落。预计最大单体体积 3.7 m,潜在总体 积为 521.7 m。危岩带下方出现 2个凹腔(图 3),II-1 凹腔长 6.2 m、深 4 m、高 8.1 m;II-2 凹腔长 31 m、深 1.1~2.5 m、高 6~8 m。W2-1 危岩体顶部受外倾裂隙 切割,危岩呈悬空的板状,岩体后部、下部已经形成拉 张裂缝,危岩体长 1.9 m、宽 0.84 m、高 3.5 m,纵向裂隙 与节理基本贯通,随着张裂隙的进一步切割加剧,上部 岩体形成坠落式破坏。该危岩相对高度约 8 m,为低位 危岩。赤平投影见图 5(a)。

(3)Ⅲ#危岩带,高23.9 m,宽约36.7 m,平均厚度 1.3 m,体积约1140 m3。危岩下部基座为崩塌后形成的 岩腔,顶部受外倾裂隙切割,危岩呈悬空的块状,节理 L1 和 L2 均外倾,局部已贯通,且其临空面为陡崖,部分 岩体被切割呈块状单体危岩。危岩出露为薄层-中厚层 褐红色泥质粉砂岩,微地貌上为陡崖,泥质粉砂岩属于 软岩,抗风化能力弱,岩体裸露,呈层状碎裂结构,基座 由于崩塌已形成 3 m×1.75 m×6.31 m 的岩腔, 主要节理 L1: 10°∠85°, 间距 0.3~0.5 m, 张开, 延伸长 2~7 m; L2:113°∠89°, 间距 0.6~1.0 m, 张开, 延伸长 4~25 m。 部分结构面已经贯通,使局部岩体已基本脱离母体,天 然工况下危岩体整体基本稳定,但在重力作用下易向临 空面发生剥落式掉块。在暴雨或地震工况时,危岩体处 于欠稳定状态,易形成局部滑移式崩塌和块石坠落。预 计最大单体体积 2.15 m<sup>3</sup>, 潜在总体积为 467.7 m<sup>3</sup>。W3-1 危岩体顶部受外倾裂隙切割, 危岩呈悬空的帽檐状, 岩体下部已经形成拉张裂缝,危岩体长 1.2 m、宽 0.57 m、 高 1.3 m, 纵向裂隙与节理基本贯通, 易形成坠落式破 坏。该危岩相对高度约 10.2 m, 为低位危岩。赤平投影 见图 5(b)。

(4) Ⅳ#危岩带,高 34.6 m,宽约 115.3 m,平均厚度 0.5 m,体积约 585 m<sup>3</sup>。主要受两组裂隙和层面切割,岩 体呈碎裂状-块体状,局部呈镶嵌碎裂状。切割成的单 体危岩呈块状,且其临空面为陡崖,两组节理均外倾,与 层面形共同切割岩体。上部部分岩体已基本脱离母体, 靠下部岩体支撑。危岩出露为薄层-中厚层褐红色泥质 粉砂岩,微地貌上为陡崖,泥质粉砂岩属于软岩,抗风化 能力弱,岩体裸露,呈块状结构,主要节理 L1: 37°∠66°,



Fig. 5 Stereographic projection of each dangerous rock body

间距 0.3~0.5 m, 张开, 延伸长约 5 m; L2:125°∠84°, 间 距 0.4~0.6 m, 张开, 延伸长 3~5 m。部分结构面已经 贯通,使局部岩体已基本脱离母体,天然工况下危岩体 基本稳定,但在重力作用下易向临空面发生剥落式掉 块。在暴雨或地震工况时,危岩体处于欠稳定状态,易 形成局部滑移式崩塌和块石坠落。预计最大单体体积 1.37 m, 潜在总体积为 585.2 m。W4-1 危岩体呈块状, 且其下部临空,在结构面与层面形共同切割下,岩体下 部已经形成拉张裂缝,危岩体长 2.5 m、宽 0.5 m、高 2.94 m, 纵向裂隙与节理基本贯通, 随着裂隙切割的进 一步加剧,岩体发生坠落式破坏。该危岩相对高度约 9.1 m, 为低位危岩。W4-2 危岩体切割成的单体危岩呈 块状,且其临空面为陡崖,目前上部已见明显张拉裂缝, 下部有明显压制破碎迹象,岩体后部已经形成拉张裂 缝, 危岩体长 2.2 m、宽 0.5 m、高 3.5 m, 纵向裂隙与节 理基本贯通,岩体可能发生倾倒式破坏。该危岩相对高 度约 7.9 m, 为低位危岩。赤平投影见图 5(c)、(d)。 1.3.2 各危岩带的定量分析及评价

(1)参数确定

强风化泥质粉砂岩的各项力学指标(表 2)。

(2)各危岩体稳定性分析及评价

1) 倾倒式计算

W4-2 危岩体为倾倒式破坏的危岩体,危岩体重心





均在倾覆点之内时,采用式(1)进行计算。倾倒式计算 模型见图 6。

$$F = \frac{\frac{1}{2}f_{lk} \cdot \frac{(H-h)}{\sin\beta} \left(\frac{2}{3}\frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{b}{\cos\alpha}\cos(\beta-\alpha)\right) + W \cdot a}{V\left(\frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{h_{w}}{3\sin\beta} + \frac{b}{\cos a}\cos(\beta-\alpha)\right)}$$
(1)

式中:F——危岩稳定系数;

 Table 2
 Mechanical property indexes of rocks in the exploration area

岩土名称	天然容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	天然抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	黏聚力(饱和) /MPa	内摩擦角(饱和) /(°)	承载力特征值 /kPa	基底摩擦系数
强风化泥质粉砂岩	22.0*	14.3*	0.20*	3.5*	35.0*	450	0.40

注:上述表中\*根据地方经验取值。

H——后缘裂隙上端到未贯通段的垂直距离/m;

h——后缘裂隙深度/m;

W——危岩体自重/(kN·m<sup>-1</sup>);

- b——后缘裂隙未贯通段下端到倾覆点之间的水 平距离/m;
- *α*——危岩体重心到倾覆点的水平距离/m;
- *β*——后缘裂隙倾角/(°);

*V*——裂隙水压力/(kN·m<sup>-1</sup>), *V* =  $0.5\gamma \cdot W \cdot h_w^2$ ;

- h<sub>w</sub>——后缘裂隙充水高度/m,天然时取 0,暴雨 时取 0.5 h;
- h<sub>0</sub>—危岩体重心到倾覆点的垂直距离/m,由底 部岩体抗拉强度控制时使用,本文危岩体 重心在倾覆点之内不涉及到此变量。
- 2)坠落式计算

危岩体 W2-1、W3-1、W4-1 为坠落式破坏的危岩体, 坠落式危岩计算模型见图 7。

发生坠落式崩塌的危岩其后缘均有陡倾裂隙,对于 后缘有陡倾裂隙的悬挑式危岩按式(2)计算:

$$F = \frac{c(H-h) - Q\tan\varphi}{W}$$
(2)

$$F = \frac{\zeta \cdot f_{lk} \cdot (H-h)^2}{Wa_0 + Qb_0} \tag{3}$$

式中:F----危岩稳定系数;

- c——危岩体黏聚力标准值;
- H——后缘裂隙上端到未贯通段的垂直距离/m;
- h——后缘裂隙深度/m;
- Q——地震力/(kN·m), 地震水平作用系数取 0.05;
   φ——危岩体内摩擦角标准值/(°);
- W——危岩体自重/(kN·m<sup>-1</sup>);



图 7 坠落式危岩计算模型(后缘有陡倾裂隙)<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Calculation model of falling dangerous rock (with steep cracks at the trailing edge)<sup>[15]</sup>

ζ——危岩抗弯力矩计算系数;

- f<sub>lk</sub>——抗拉强度标准值/kPa,根据岩石抗拉强度 标准值乘以 0.20 的折减系数确定;
- a0——重心到潜在破坏面的水平距离/m;
- *b*<sub>0</sub>——重心到过潜在破坏面形心的铅垂距离/m。 (3)计算结果

根据上述倾倒式和坠落式的计算模型、计算公式、 计算工况结合各危岩体剖面分别对4处危岩体进行稳 定性计算,计算结果结果见表3。

1.4 综合稳定性分析评价

通过对危岩带及危岩体的定性、定量分析,可知, W2-1、W3-1、W4-1危岩体在天然状态下处于基本稳定

	表 3 各危岩单体稳定性计算统计表
Table 3	Stability calculation statistics of each dangerous rock mass

		•							
4日 4年11月13	破打棋士	稳定系数		空众亥粉	稳定性评价				
细石	74*153/111	吸小侠人	天然	暴雨	地震	女王示奴	天然	暴雨	地震
W2-1	250.8	坠落	1.333	1.198	1.191	1.4	基本稳定	欠稳定	欠稳定
W3-1	37.3	坠落	1.236	1.192	1.196	1.4	基本稳定	欠稳定	欠稳定
W4-1	270.3	坠落	1.336	1.192	1.193	1.4	基本稳定	欠稳定	欠稳定
W4-2	53.9	倾倒	3.326	1.256	1.192	1.3	稳定	欠稳定	欠稳定

状态,在暴雨和地震状态下都处于欠稳定状态,危岩之 所以还未发生失稳崩塌,很大程度上是因为危岩体前缘 有少量物质支撑、结构面裂隙还有部分未贯通、结构面 充填物饱满的原因。在暴雨情况下,裂隙和危岩体前缘 受雨水浸润、冲刷,带走其中的物质,使裂隙进一步贯 通、危岩体前缘临空,随时有可能发生崩塌,而且具有 突然性、不可预测性,对其采用合理可行的治理是非常 必要的和紧迫的。W4-2 危岩体在天然状态下处于稳定 状态,在暴雨和地震工况下都处于欠稳定状态,主要由 于危岩体底部裂隙未贯通,主控裂隙陡直,下部支撑良 好,提供给危岩体倾覆的力主要来自裂隙水压力,力量 小。虽然整体失稳的可能性小,但是边坡高陡,危岩体 上部已与母岩呈分离状态,上部块体的稳定主要由泥质 粉砂岩岩的抗拉强度决定,泥质粉砂岩抗拉强度低,故 不排除在极端情况下局部的可能性。

### 2 危岩破坏后的运动分析

为了更好的评价危岩体的危险性,了解其运动情况,利用 Rockfall 软件进行数值模拟计算,计算其运动 速度及运动轨迹,计算岩石弹跳高度及距离等,数值模 拟软件 Rockfall 将落石运动轨迹分为自由落体运动、第 一次碰撞后的空中抛物线运动、落石与地面撞击后后 的弹跳、直至停止运动 4 个过程分析落石运动轨迹。 在分析前要注意以下 7 点:

(1)制作剖面地形线的时候保证是一条完整的多段 线,同时在画线的过程中保证地面线上的点尽量少,为 落石崩落轨迹模拟计算提供方便;

(2)剖面地形线的方向在软件 Rockfall 计算的时候 分为正负,当剖面方向为 180°~360°时,计算的时候要 输入负值,反之为正值,所以为了方便计算,我们在软件 Rockfall 中计算时将剖面方向调整为 0°~180°进行 计算;

(3) 剖面线的比例尺调整为1:1000;

(4)考虑落石的初始运动速度为0;

(5)4处危岩体的落石质量均为均匀的弹性球体;

(6)忽略 4 处危岩落石运动过程中在空气中的能量 消耗;

(7)落石在地形线上碰撞过程中要保持完整状态, 不能中断。

2.1 计算参数的确定

根据泥质粉砂岩的特性,分别对4处危岩体在 Rockfall软件的 Slope>Material Editor 窗口中赋值。具 体参数取值情况见表4。

Table 4	Values of slope parameters of dangerous rock mass
	表 4 各危岩体坡段参数的取值

危岩体 编号	坡段岩性	法向阻尼 系数 <i>R</i> n	切向阻尼 系数Rt	滚动摩擦 系数	滚动摩擦 角/(°)
W2-1	强风化泥质粉砂岩	0.35	0.85	0.48	35
W3-1	强风化泥质粉砂岩	0.35	0.85	0.48	35
W4-1	强风化泥质粉砂岩	0.35	0.85	0.48	35
W4-2	强风化泥质粉砂岩	0.35	0.85	0.48	35

### 2.2 Rockfall 模拟落石路径

2.2.1 确定落石运动的初始状态

4 处危岩体在各种地质环境条件影响下发生变形, 产生缓慢位移,部分结构面已贯通,局部已基本脱离母 体。当能量累积到一定程度时会沿卸荷裂隙和主控结 构面发生崩塌和坠落,根据 4 处危岩体地形剖面形态, 发生坠落初期,运动速度一般很小,设置为置初速度为 0 的自由落体运动<sup>[16]</sup>,落石的质量取 100 kg。

2.2.2 落石运动路径数值模拟分析

根据已建 W2-1、W3-1、W4-1、W4-2 剖面模型,在 Rock>Add Point Seeder 界面中拟定落石点,拟定 4 处危 岩体的每束落石数量均为 50 块。模拟结果应包含数值 模拟落石运动终点水平位置图、反弹高度包络线图、总 动能分布图、速度分布图以及弹跳高度分布表等,白马 沟危岩体模拟分析只列各危岩体崩落轨迹图、各危岩 体弹跳高度与位置关系曲线图、各危岩体滚落动能与 位置曲线图、各危岩体滚落速度与位置曲线图,结合这 些图表进行各危岩体崩塌时落石轨迹的模拟计算分析, 确定危岩落石最集中区、最大落石弹跳高度、最大弹跳 速速以及最大总动能<sup>[17]</sup>。

从坠落式和倾倒式两种失稳模式进行模拟分析,依 次对 W2-1、W3-1、W4-1 坠落式破坏和 W4-2 倾倒式破 坏进行数值模拟计算,得到图 8 所示落石危岩体崩落运 动轨迹。以自由落体、贴面滚动、碰撞、弹跳和空中飞 行的方式组合运动,通常落石首先自由下落、贴坡下滑 坠落,然后碰撞反弹或沿坡面滚动下滑,滚动至陡崖 边缘,继续滚落至坡体下部公路停止或做在公路处继续 弹跳做抛物线运动,继而再次碰撞,如此反复,直至 停止<sup>[18]</sup>。

各危岩体的运动路径情况见表 5, 通过表 5 可看 出, 4 处危岩体与公路碰撞后, 弹跳高度分布在 1.2~ 1.5 m,运动至某一距离后, 落石的总动能和速度同时达 到最大值, 之后又表现为同时减小的状态, 直至停止运 动。最大弹跳高度对应的水平距离与最大动能和最大 速度对应的水平距离不同, 最大动能与最大速度所对应 的水平距离稍远一点, 最大弹跳高度相同, 最大动能与



图 8 危岩体崩落轨迹图

Fig. 8 Collapse trajectory of dangerous rock mass

	表 5	各危岩体运动路径与弹跳高度、	总动能、	速度的关系表
--	-----	----------------	------	--------

Table 5 Relationship between movement path of each dangerous rock body and jumping height, total kinetic energy and speed

编号	运动距离/m		弹跳高度(max)/m	总动能(max)/kJ	速度(max)/(m·s <sup>-1</sup> )	备注
W2-1	初始水平运动距离运动终点距离	X=2.7 X=3.5 X=4.1 X=4.5	1.5	1.5	1.7	<b>图</b> 9 (a)(b)(c)
W3-1	初始水平运动距离 运动终点距离	X=3.4 X=3.8 X=4.2 X=4.7	1.5	1.28	1.5	图10(a)(b)(c)
W4-1	初始水平运动距离 运动终点距离	X=3.2 X=4.2 X=5.0 X=5.8	1.2	1.3	1.57	图11(a)(b)(c)
W4-2	初始水平运动距离 运动终点距离	X=2.8 X=3.3 X=3.9 X=4.4	1.5	1.33	1.62	图12(a)(b)(c)

最大速度不一定相同。总结出落石的最大总动能和最 大速度不完全取决于最大弹跳高度(图 9—12)。

### 3 结论

白马沟崩塌以泥质粉砂岩中的危岩体为研究对象, 在先分带,后分危岩体的基础上,分别采用定性分析定 量计算的方法对该区4处典型危岩体进行了稳定性分析,并借助 Rockfall 模拟软件对其进行了运动轨迹预测,主要得出以下结论:

(1)危岩破坏后产生崩塌落石,以坠落式和倾倒式居多,白马沟崩塌4处危岩体中发育有3处坠落式、1处倾倒式。对于崩塌落石的落石运动路径和落石冲



Fig. 9 W2-1 dangerous rock mass



Fig. 12 W4-2 dangerous rock mass

击力,国内外学者做了一定程度的研究,建立了部分关 于落实运动和冲击力的经验公式。

(2)共发育有4个危岩带,危岩带中又发育有4个 危岩体,单体体积为37.3~250.8 m<sup>3</sup>。天然工况下W2-1、W3-1、W4-1号危岩体在天然工况下处于基本稳定状态,在暴雨和地震工况下发生剥坠落现象,处于欠稳定 状态;W4-2号危岩体在天然工况下处于稳定状态,在暴 雨和地震工况下发生倾倒现象,处于欠稳定状态。

(3)4处危岩体与公路碰撞后,弹跳高度分布在 1.2~1.5 m,运动至某一距离后,落石的总动能和速度同 时达到最大值,之后又表现为同时减小的状态,直至停 止运动。最大弹跳高度对应的水平距离与最大动能和 最大速度对应的水平距离不同,最大动能与最大速度所 对应的水平距离稍远一点,最大弹跳高度相同,最大动 能与最大速度不一定相同。总结出落石的最大总动能 和最大速度不完全取决于最大弹跳高度。 (4)通过 Rockfall 软件结合实测剖面线可以对落石 崩落轨迹、运动动能、水平距离、运动速度等进行模拟 计算,并得到危岩体落石崩落距离与弹跳高度的关系、 落石集中区与滚落动能和速度的关系等。通过对危岩 体典型剖面的实测及模拟分析,根据落石运动的最大弹 跳高度、总动能、落石的速度等确定工程布置的方式方 法。Rockfall 软件是一款分析陡峭边坡落石风险的软件, 对于地质设计人员运用落石滚落动能和落石崩落轨迹来 确定拦石装置的位置和保护措施具有很好的参考价值。

### 参考文献(References):

[1] 胡显明,晏鄂川,杨建国,等.巫溪南门湾危岩体稳定性分区研究[J].工程地质学报,2011,19(3):397-403.
[HU Xianming, YAN Echuan, YANG Jianguo, et al. Stability assessment of unstable rock blocks at nanmenwan in Wuxi County [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 397-403. (in Chinese with English abstract)]

- [2] MANZELLA I, LABIOUSE V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of nonconstrained gravel flows [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 133 – 151.
- ZAMBRANO O M. Large rock avalanches: A kinematic model [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(3): 283 - 287.
- [4] DORREN L K A, MAIER B, PUTTERS U S, et al. Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps [J]. Geomorphology, 2004, 57(3/4): 151 167.
- [5] CROSTA G B, AGLIARDI F. A methodology for physically based rockfall hazard assessment [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3(5): 407 – 422.
- [6] 何宇航,裴向军,梁靖,等.基于Rockfall的危岩体危险范 围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例
  [J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):24-33.
  [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: A case study of the Xuangou Collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 24-33. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 程宇,张健,陈进,等.贵州纳雍骔岭镇危岩带稳定性及 危害范围分析 [J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(4): 9-15. [CHENG Yu, ZHANG Jian, CHEN Jin, et al. Analysis on stability and hazard zone of dangerous rock mass in Zongling Town, Nayong of Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 9-15. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈洪凯,王蓉,唐红梅.危岩研究现状及趋势综述[J]. 重庆交通学院学报,2003,22(3):18-22. [CHEN Hongkai, WANG Rong, TANG Hongmei. Review of current situation and trend of dangerous rock research [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2003,22(3):18-22. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈洪凯,唐红梅.危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报,2008,16(1):37-41. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stablity [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1):37-41. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王在泉,张黎明,贺俊征.岩石边坡工程块体系统稳定 性预测、监测与控制[J].岩石力学与工程学报,2004, 23(10):1658-1661. [WANG Zaiquan, ZHANG Liming, HE Junzheng. Stability prediction, monitoring and control of key block system in rock slope engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10):1658-1661. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈昌彦, 王思敬, 沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经 网络预测模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 157-

161. [CHEN Changyan, WANG Sijing, SHEN Xiaoke. Predicting models to estimate stability of rock slope based on artificial neural network [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 157 – 161. (in Chinese with English abstract)]

- [12] 董好刚,陈立德,黄长生.三峡库区云阳—江津段危岩 形成的影响因素及稳定性评价[J].工程地质学报,2010, 18(5):645-650. [DONG Haogang, CHEN Lide, HUANG Changsheng. Influence factors and stability assessment of dangerous rocks in Yunyang-Jiangjin on Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 645-650. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘传正.重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报,2010,18(3):297-304. [LIU Chuanzheng. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009 [J]. Journal of Engineering Geology,2010,18(3):297-304. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等.危岩稳定性分析方法[J]. 应用力学学报,2009,26(2):278-282. [CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. Stability analysis method for perilous rock [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009,26(2):278-282. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周根郑.坠落式危岩稳定性计算方法的比较法[J].岩 土工程学报, 2014, 34(5): 122-126;.[ZHOU Gentan. Comparison method of calculation methods of falling dangerous rock stability [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 34(5): 122-126.(in Chinese with English abstract)]
- [16] 张帅,罗永健.基于Rockfall模拟的高陡岩质建筑边坡孤 石滚落防治方法探讨[J].广东土木与建筑, 2019, 26(2): 54-57. [ZHANG Shuai, LUO Yongjian. Discussion on prevention and control method of rockfalling of high and steep rock slope based on Rockfall simulation [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(2): 54-57. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥,等.三峡库区危岩发育链式机理 及失稳运动路径研究[C]//第八次全国岩石力学与工 程学术大会论文集,2004. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei, YE Siqiao, et al. Study on chain mechanism of dangerous rock development and instability movement path in the Three Gorges Reservoir area [C]//Proceedings of the Eighth National Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘卫华.高陡边坡危岩体稳定性、运动特征及防治对策研究[D].成都:成都理工大学,2008. [LIU Weihua. Study on stability, movement characteristics and countermeasures of potential unstable rock mass in high-steep slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)]