

文章编号: 1674—8247(2022)03—0024—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.03.005

瓦厂特大桥陡崖落石运动特性分析及危险性分区评估

程 云 郑六益 莫 默 王 亮

(中铁二院贵阳勘察设计研究院有限责任公司, 贵阳 550002)

摘 要:本文采用 RFA 落石分析软件对瓦厂特大桥陡崖落石进行模拟分析,得出如下结论:(1)当落石直径一定时,落石对桥墩的冲击高度、落石最大冲击能量、最大旋转能量、最大平移速度随落石落点高度上升而增高,落石最大旋转速度与落石高度无明显规律;(2)落石高度一定时,落石对桥墩的冲击高度、落石最大冲击能量随落石直径增大而增高,落石最大旋转能量跟落石直径变化无明显变化规律,落石最大旋转速度随落石直径减小而增大,落石的最大平移速度与落石直径大小无关。最后根据落石动量、动能将陡崖落石分为 5 个危险区,并分区提出了陡崖防护治理措施。

关键词:陡崖落石;模拟分析;运动特性;危险性分区

中图分类号:TU457

文献标志码:A

Analysis of Cliff Rockfall Motion Characteristics and Hazard Zoning Assessment of Wachang Super Major Bridge

CHENG Yun ZHENG Liuyi MO Mo WANG Liang

(Guiyang Branch of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: In this paper, RFA rockfall analysis software is used to simulate and analyze the cliff rockfall of Wachang Super Major Bridge, and the following conclusions are drawn: (1) When the diameter of the rockfall is certain, the impact height of the rockfall on the pier, and the maximum impact energy, the maximum rotation energy and the maximum translational velocity of the rockfall increase with the increase of the height of the falling point, but there is no obvious relationship between the maximum rotation speed of the rockfall and the rockfall height. (2) When the height of the rockfall is certain, the impact height of the rockfall on the pier and the maximum impact energy of the rockfall increase with the increase of the rockfall diameter, while the maximum rotation speed of the rockfall increases with the decrease of the rockfall diameter; the maximum rotation energy of the rockfall has no obvious relationship with the change of the rockfall diameter, and the maximum translational velocity of the rockfall is unrelated to the rockfall diameter. Finally, 5 hazard zones are proposed according to the momentum and kinetic energy of the rockfall, and respective cliff protection measures for each zone are put forward.

Key words: cliff rockfall; simulation analysis; motion characteristics; hazard zoning

危岩落石是贵州地区常见的一种地质灾害,随着山区工程建设的快速发展,落石灾害事件屡见不鲜,其

特有的高发性、突发性、不可预见性及灾害性等特点,严重危害区域内基础设施及人民生命财产安全。

收稿日期:2021-02-05

作者简介:程云(1980-),男,高级工程师。

引文格式:程云,郑六益,莫默,等.瓦厂特大桥陡崖落石运动特性分析及危险性分区评估[J].高速铁路技术,2022,13(3):24-29.

CHENG Yun, ZHENG Liuyi, MO Mo, et al. Analysis of Cliff Rockfall Motion Characteristics and Hazard Zoning Assessment of Wachang Super Major Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3):24-29.

近年来,国内外学者对围岩落石开展了多方面的研究分析。杨智翔等^[1]利用可靠度理论建立了偏心滑移式孤石稳定性可靠度指标计算方法,计算得到孤石的可靠度敏感性由高到低为:孤石倾角、单位长度孤石重力、孤石内摩擦角、黏聚力;朱雪峰^[2]利用地面激光雷达技术高效精确地实现了危岩落石的识别与信息提取;王剑锋^[3]等采用贡献率法分析灾害分布规律;刘伟鹏^[4]等利用 AHP 方法计算危岩落石发生的综合评分指标,通过发生概率等级和致灾等级划分危岩落石综合风险等级;沈位刚^[5]等运用离散单元方法建立落石与地面的数值模型,研究了不同冲击加载率作用下落石的冲击破碎特征,得到破碎程度与冲击加载率呈线性正相关,破碎产生块体的数量与冲击加载率呈幂函数关系;梅雪峰^[6]等利用经典接触理论,研究了以初始入射速度和入射角为变参量下的恢复系数和冲击力之间的变化规律,得到当入射速度相同时,恢复系数与入射角呈正相关;当冲击入射角相同时,恢复系数与速度呈负相关,而冲击力与速度呈线性正相关;崔廉明^[7]等综合采用试验和数值计算方法研究了引导式落石缓冲系统的防护性能,得到多位置分布配重能有效约束了落石运动轨迹衰减了落石能量;王星^[8]等采用软件 LS-DYNA 研究得到了滚石冲击过程中的冲击力及侵彻深度随冲击时间的变化规律,给出了最终塑性冲击坑的形状,并和多种算法对比分析验证了其适用性。

本文根据瓦厂特大桥陡崖危岩体的分布情况,分析了不同落石直径和不同落石高度的落石运动特性,并根据落石相关特性对落石影响范围进行分区,为落石防护设计提供参考。

1 瓦厂特大桥陡崖地质概况与基本特征

1.1 地质概况

场区地层上覆第四系破残积层黏土、冲洪积层块石土、第四系崩坡积层,下伏基岩为二叠系 P1m+q 茅口、栖霞组、P1l 梁山组、S₁₋₂ln 韩家店组、S_{1s} 石牛栏组地层。测区主要发育有断层 F64、断层 F65 及瓦厂断层 F1,切割岩体较严重,陡崖顶部沿断层带发育有卸荷裂隙。桥梁横跨河流,桥址区地面标高介于 846.2 ~ 1 053.21 m 之间,相对高差 207.01 m,桥址区内地形起伏大,桐梓岸陡崖险峻,基岩裸露。

1.2 陡崖基本特征

陡崖发育方向与线路近于垂直,陡崖呈直立状,坡度 75°~90°,在线路附近局部因危岩落石形成倒悬状,陡崖沿地形展布,地形为左高右低,在线路左侧陡

崖长度大于 300 m,高约 70 ~ 110 m,在线路处陡崖高约 110 m。在线路右侧陡崖长度大于 310 m,高约 50 ~ 100 m,远离线路方向陡崖高度逐渐降低至尖灭。陡崖脚至顶部均为厚层状夹薄层的灰岩夹泥质灰岩,陡崖脚斜坡上为页岩夹煤层、灰岩地层,形成上硬下软分布地层结构,同时陡崖上岩层陡倾节理、裂隙较发育,切割岩体较严重。在初勘方案线路中心倒悬陡崖上见有新近落石迹象,危岩体对工程影响大,陡崖典型剖面如图 1 所示。

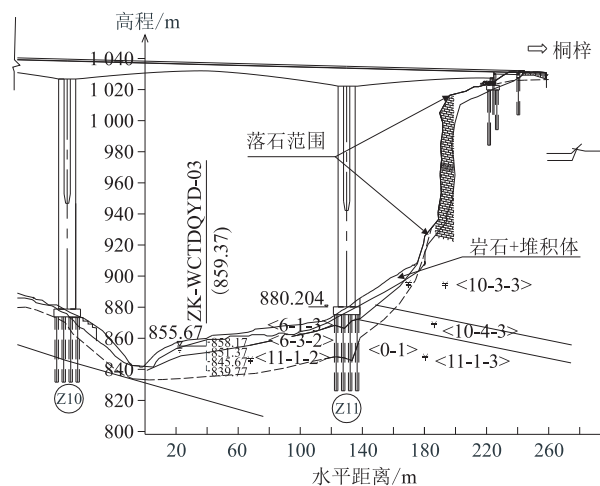


图1 线路左中线处陡崖剖面图

2 陡崖落石运动特性研究分析

2.1 陡崖危岩体划分

瓦厂特大桥陡崖危岩体发育,分布面积广,危岩体方量约 20 196 m³,落石范围高差大,落差高度 40 ~ 150 m。对危岩体进行划分,2 ~ 5 号危岩体、11 ~ 14 号危岩体原岩以二叠系 P1m+q 茅口、栖霞组灰岩为主,斜节理裂隙发育,危岩体呈倒悬状,在重力及其它外界因素作用下易产生危岩体失稳;15 号危岩体原岩为二叠系 P1m+q 茅口、栖霞组灰岩,表面为裸露的巨厚层灰岩,有少量植被覆盖,危岩带顶部有卸荷裂隙发育,表面岩块被节理切割,不连续,易发生零星掉块,危岩带底部薄层泥质灰岩被风化剥蚀,悬空,在地震暴雨施工等状态下易发生崩塌;以上危岩体落石对 Z11 号及 Y12 号桥墩影响大,根据不同危岩体的分布情况,选取典型剖面,研究陡崖落石在不同落石高度、不同落石大小下的运动路径、弹跳高度、冲击能量、平移及旋转速度,对落石风险进行分析。

2.2 陡崖落石参数选取

将落石简化为刚性球体,忽略形状对落石的影响,不考虑落石运动过程破裂解体及空气阻力,落石密度 $\rho = 2\ 600\text{ kg/m}^3$ 。选取落石直径 $R = 1\text{ m}$, $R = 0.8\text{ m}$,

$R=0.6\text{ m}$ 、 $R=0.4\text{ m}$,对应质量分别为 $M_{R=1}=1\,361\text{ kg}$ 、 $M_{R=0.8}=697\text{ kg}$ 、 $M_{R=0.6}=294\text{ kg}$ 、 $M_{R=0.4}=87\text{ kg}$ 。其中,15号危岩体选取直径为 $R=0.4\text{ m}$ 的小粒径,其它2~14号危岩体选取 $R\geq 0.8\text{ m}$ 的大粒径;落石高程范围42 m,分别为高程 $GC=960\text{ m}$ 、 $GC=980\text{ m}$ 、 $GC=1\,002\text{ m}$ 和 $GC=1\,012\text{ m}$,详细位置如图2所示。

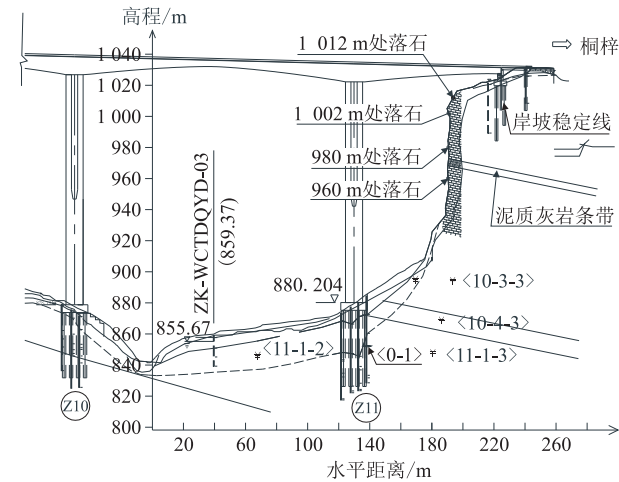


图2 落石位置图

采用 RFA 软件,对落石路径进行模拟分析,落石碰撞恢复系数 R_n 和 R_t 是正确估算落石运动轨迹的两个重要的参数,与边坡的坡度、边坡坡面覆盖层的地质力学性质、落石自身的大小等因素有关,恢复系数 R_n 和 R_t 反应了落石的碰撞行为,决定了落石的运动途径,根据各种实践研究,其取值如表1和表2所示^[9-11]。

表1 法向恢复系数表

法向恢复系数 R_n	坡面特征
0.37~0.42	光滑而坚硬的表面和铺砌面,如人行道或者光滑的基岩面
0.33~0.37	多数为有基岩和砾岩区的斜坡面
0.30~0.33	硬土边坡
0.28~0.30	软土边坡

表2 切向恢复系数

法向恢复系数 R_t	坡面特征
0.87~0.92	光滑而坚硬的表面和铺砌面,如人行道或者光滑的基岩面
0.83~0.87	多数为基岩和无植被的斜坡面
0.82~0.85	多数为有少量植被的斜坡面
0.80~0.83	植被覆盖的斜坡和有稀少植被的土质边坡
0.78~0.82	灌木覆盖的土质边坡

2.3 取陡崖落石运动特性模拟及结果分析

根据4种落石直径对应的4处落石高度,共建立16种落石工况,模拟计算过程中,考虑落石转动速度,

落石分布形式为随机正态分布,每种工况落石计算次数为100次,选取 $R=1\text{ m}$ 时,4个不同落石高度计算过程如图3~图6所示;落石对桥墩的冲击高度如表3所示。

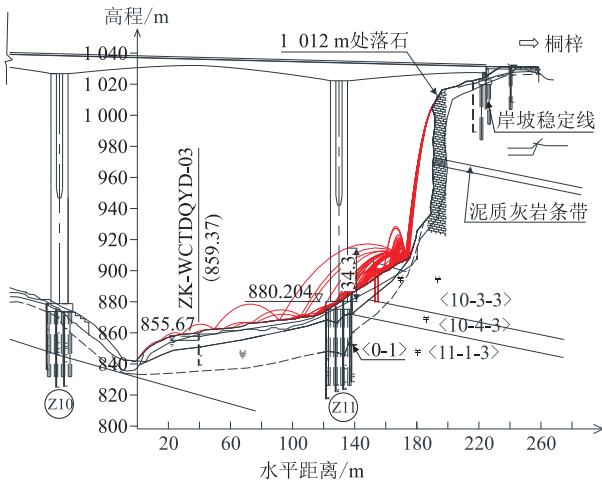


图3 落石运动路径图($R=1\text{ m}$, $GC=1\,012\text{ m}$)

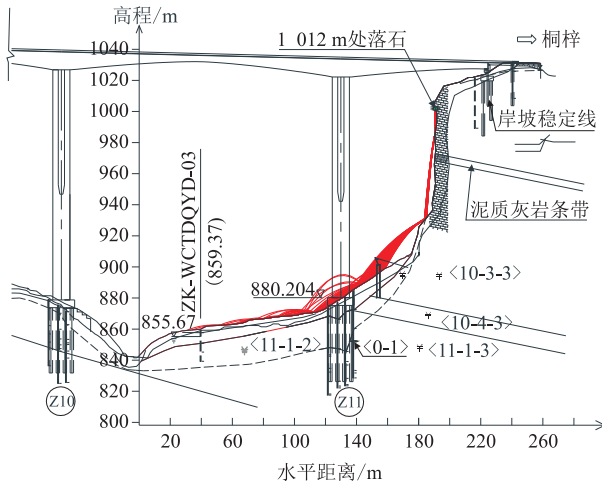


图4 落石运动路径图($R=1\text{ m}$, $GC=1\,002\text{ m}$)

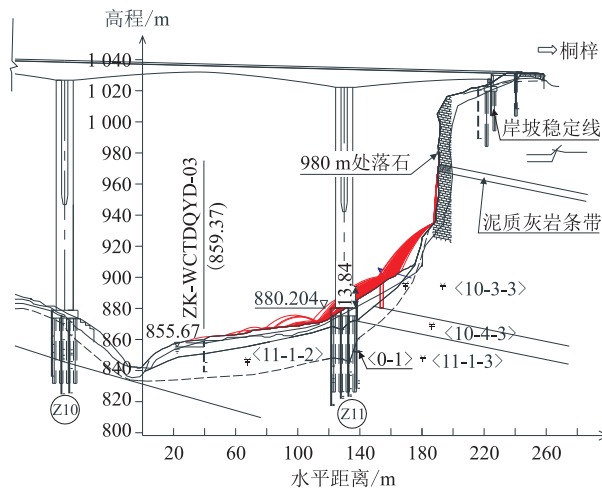


图5 落石运动路径图($R=1\text{ m}$, $GC=980\text{ m}$)

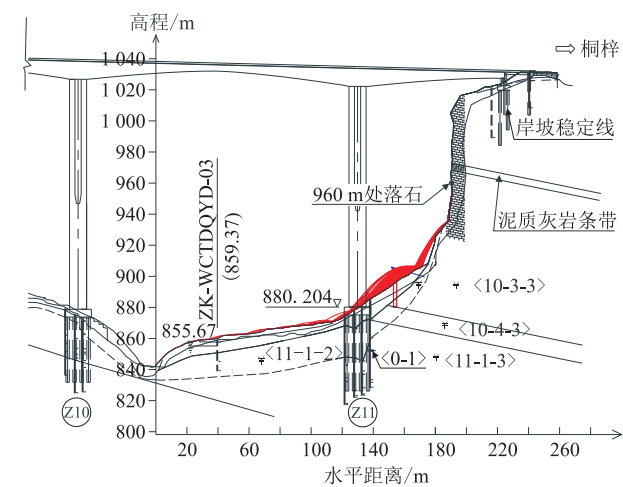


图 6 落石运动路径图 ($R=1\text{ m}$, $GC=960\text{ m}$)

表 3 落石对桥墩最大冲击高度表 (m)				
落石工况	$GC=1\ 012$	$GC=1\ 002$	$GC=980$	$GC=960$
$R=1\text{ m}$	34.3	14.15	13.84	13.15
$R=0.8\text{ m}$	25.77	13.29	12.96	12.91
$R=0.6\text{ m}$	24.34	11.83	13.27	9.88
$R=0.4\text{ m}$	22.68	9.99	12.02	9.38

由图 3 ~ 图 6 及表 3 可知,落石对桥墩的冲击高度随落石直径的增大而增高;落石直径一定时,落石对桥墩的冲击高度随落石落点高度上升而增高,最大冲击高度达到 34.3 m。

16 种模拟工况中,各点落石冲击能量如图 7 所示,落石最大冲击能量如图 8 所示,落石最大旋转能量如图 9 所示。

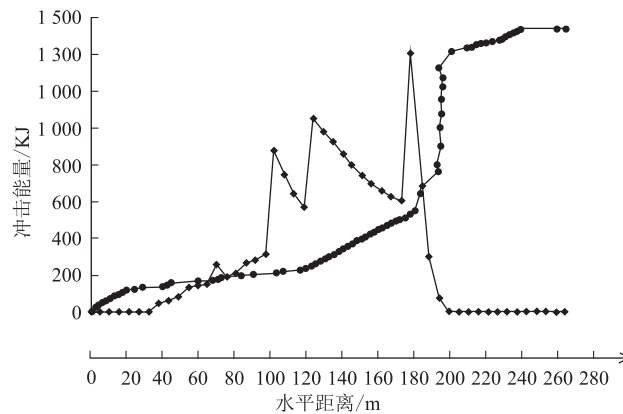


图 7 落石各点冲击能示意图

由图 7 ~ 图 9 可知,落石冲击能量随落石下落急剧增加,与地面撞击瞬间,能量达到峰顶,经过地面能量耗损,剩余能量致使落石产生二次弹跳,依次反复,直到落石能量为 0,落石停止运动。落石直径一定时,落石最大冲击能量和最大旋转能量跟落石高度呈正相关,且落石高度越高时,两者增加幅度越大;落石高度

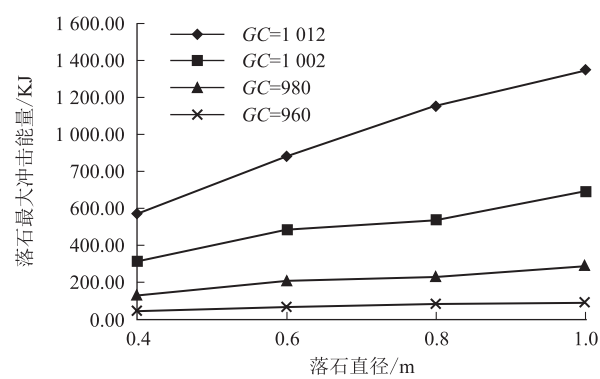


图 8 落石最大冲击能量图

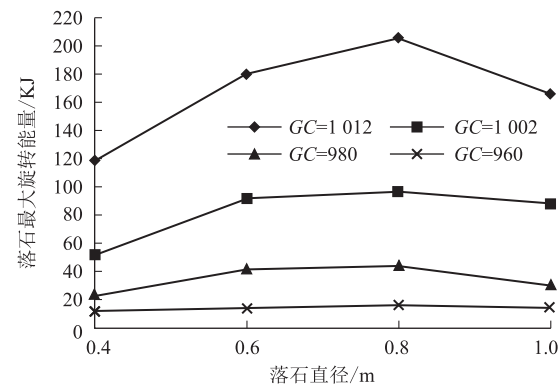


图 9 落石最大旋转能量图

一定时,落石最大冲击能量随落石直径增大而增高,且随落石高度的增高增加趋势越明显,落石最大旋转能量跟落石直径变化无明显规律。

16 种模拟工况中,落石最大平移速度和最大旋转速度如表 4 和表 5 所示。

表 4 落石最大平移速度表 (m/s)				
落石工况	$GC=1\ 012$	$GC=1\ 002$	$GC=980$	$GC=960$
$R=1\text{ m}$	44.468	38.555	34.415	27.643
$R=0.8\text{ m}$	44.456	37.058	35.277	28.288
$R=0.6\text{ m}$	44.118	37.141	35.414	27.628
$R=0.4\text{ m}$	44.447	39.458	35.383	29.147

表 5 落石最大旋转速度表 (m/s)				
落石工况	$GC=1\ 012$	$GC=1\ 002$	$GC=980$	$GC=960$
$R=1\text{ m}$	51.043	49.680	48.157	51.862
$R=0.8\text{ m}$	61.849	72.757	73.137	57.446
$R=0.6\text{ m}$	81.180	90.482	91.797	70.422
$R=0.4\text{ m}$	117.527	148.688	110.745	108.151

由表 4 和表 5 可知,落石最大平移速度随落石高度降低而减小,同一高度落石的最大平移速度不变,与落石直径大小无关。落石高度一定,落石最大旋转速度随落石直径减小而增大,直径一定时,落石最大旋转速度与落石高度无明显规律。

综上,2 ~ 14 号危岩体由于为倒悬型,一旦落石发

生,携带冲击能量较大,对桥墩安全危害极高,15号为小型崩塌,零星掉块对桥梁危害较小,但起弹跳距离较远,对下方结构和施工人员安全仍存在较大的潜在危害。

3 陡崖落石危险性分区评估

上述研究了陡崖落石在不同落石高度、不同落石大小下的运动路径、弹跳高度、冲击能量、平移及旋转速度的变化规律。考虑桥墩后陡崖较高,斜节理裂隙发育,多数危岩体呈倒悬状,在重力及其它外界因素作用下易产生危岩体失稳,大块落石发生的可能性较高,选取16种工况中尺寸最大、下落高度最高的落石($R=1\text{ m}$, $GC=1\,012\text{ m}$)作为研究对象,落石参数如表6所示;结合落石的落点统计(如图10所示),以落石动量、动能^[12]作为陡崖危险性分区的依据,详细分区如表7所示。

表6 落石参数表

水平距离/m	速度/(m/s)	动量/(kgm/s)	动能/kJ
20	0	0	0.0
40	0	0	0.0
45	0.3	476.35	0.1
50	0.7	952.7	0.3
60	9.2	12 521.2	57.6
70	9.5	12 929.5	61.4
80	13	17 693	115.0
100	19.3	26 267.3	253.5
120	24.8	33 752.8	418.5
140	32.6	44 368.6	723.2
150	32	43 552	696.8
160	27.9	37 971.9	529.7
173	25	34 025	425.3
175	38	51 718	982.6
180	42	57 162	1 200.4
185	35.6	48 451.6	862.4
190	24.6	33 480.6	411.8
195	12.1	16 468.1	99.6
200	5.2	7 077.2	18.4

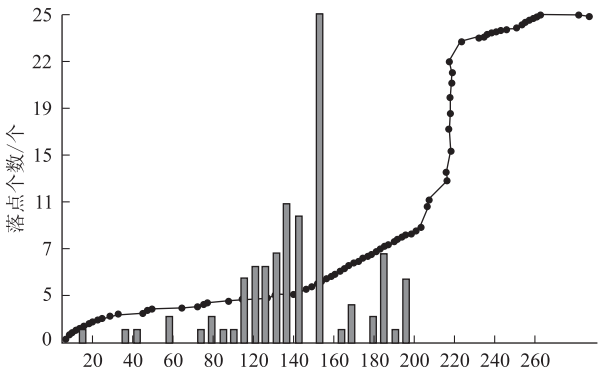


图10 落石落点统计图

表7 落石危险性分区表

危险性分区	危险性评估	动量范围/(kgm/s)	动能范围/kJ
I	危险性极大	>20 000	>400
II	危险性大	7 000~20 000	100~400
III	危险性一般	1 000~7 000	10~100
IV	危险性小	100~1 000	2~10
V	无危害	<100	<2

根据表7对瓦厂特大桥陡崖落石运动危险性分区如下:0~40 m范围为V区,无危害,该区远离崖体,各类落石经过多次弹跳消能后几乎不会到达此区域,落石对此区域桥墩无危害;40~50 m范围为IV区,危险性小,部分落石运动经过多次弹跳消能后到达此区域,主要以小粒径 $R\leq 0.4\text{ m}$ 落石为主,对桥墩可能产生局部损伤;50~80 m范围为III区,危险性一般,该区域落石主要以 $R\leq 0.6\text{ m}$ 为主,部分较大粒径落石弹跳到此区域能量较大,对该区域桥墩可能产生较大破坏,危及主体结构安全;80~100 m、190~200 m范围为II区,危险性大,该区域为落石二次弹跳冲击区,靠近崖体内II区落石主要以 $R<0.8\text{ m}$ 为主,部分落石能量大,对桥梁二次冲击破坏较强,侵彻损伤影响明显,远离崖体外II区落石主要以 $R\leq 0.6\text{ m}$ 为主,部分落石能量大,对桥梁冲击破坏较强;100~190 m范围为I区,危险性极大,该区域为各种落石必经之地,落石直接冲击桥墩或在经过崖面及地面弹跳后冲击桥梁,落石直径以 $R\geq 0.8\text{ m}$ 为主,对桥墩冲击破坏严重,严重影响桥梁安全稳定。

4 陡崖落石防护治理

根据以上研究分析,桥墩主要处于I区、II区范围内,危岩体失稳产生落石对桥墩危险极大,应主要对桥墩后方I区、II区进行防护治理,危岩体防治遵循危岩体发育规律,采用主动防护和被动防护相结合,对陡崖危岩体采取治理措施如下:陡崖上的危岩体3号、4号、5号、11号、12号(部分)、15号(部分)危岩体倒悬,节理发育,切割深度大,潜在危害极高,采用控制爆破措施进行清方处理,清除方量为 $13\,498\text{ m}^3$;2号、13号、14号危岩体节理较发育,切割深度较浅,且清除难度较大,清除工作危险性较高,采用预应力锚索(点锚)进行加固,锚索长16 m,锚固段长8 m,共设置64孔;围岩清除和锚索施工完成后,对落石范围影响线以内I区、II区的陡崖挂柔性帘式消能网进行加强防护,在陡崖下方落石范围影响线以内I区设置桩板拦石墙,如图11所示。

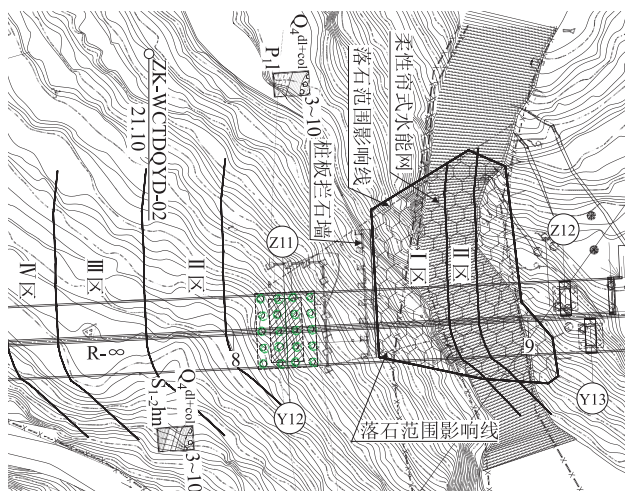


图11 陡崖落石治理图

5 结论

根据瓦厂特大桥陡崖危岩体的基本特征及划分情况,选取典型剖面,建立16种工况研究不同落石直径、不同落石高度的落石运动特征,得到以下结论:

(1)采用RFA落石分析软件,研究分析了落石的弹跳高度、冲击能量、旋转能量、平移及旋转速度与落石直径、下落高度之间的关系。

(2)根据落石的运动特征,选取典型落石($R = 1\text{ m}$, $GC = 1\ 012\text{ m}$)为研究对象,结合落石的落点统计,以落石动量、动能作为陡崖危险性分区的依据。按最危险法则将瓦厂特大桥陡崖落石分为5个危险区:Ⅰ区,危险性极大;Ⅱ区,危险性大;Ⅲ区,危险性一般;Ⅳ区,危险性小;Ⅴ区,无危害。

(3)根据桥墩所处的危险区,对陡崖提出防护措施,为瓦厂特大桥陡崖危岩体落石治理提供了重要技术支撑,本文研究结果可为其他类似工程落石治理提供参考。

参考文献:

- [1] 杨智翔,裴向军,袁进科. 基于可靠度理论对滑移式落石的稳定性及敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(1): 285 - 290.
YANG Zhixiang, PEI Xiangjun, YUAN Jinke. The Reliability Theory to Slippage of Rockfall Stability and Sensitivity Analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 285 - 290.
- [2] 朱雪峰. 基于地面激光雷达技术的危岩落石调查方法[J]. 铁道勘察, 2017, 43(3): 7 - 10.
ZHU Xuefeng. Unstable Rock and Rockfall Investigate Method Based on Ground Three-Dimensional Laser Scanning [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(3): 7 - 10.
- [3] 王剑锋,李天斌,曾鹏,等. 瓦斯沟至康定段铁路崩塌落石灾害发育分布规律研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 25 - 30,.

WANG Jianfeng, LI Tianbin, ZENG Peng, et al. Research on Development and Distribution Rules of Railway Collapse and Rockfall Disasters in Vasigou-Kangding Section [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 25 - 30.

- [4] 刘伟鹏,毛邦燕. 基于发生概率和致灾性的危岩落石灾害风险评估[J]. 铁道勘察, 2018, 44(6): 47 - 53.
LIU Weipeng, MAO Bangyan. Risk Assessment of Rockfall Disaster Based on Probability of Occurrence and Catastrophic Characteristics [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(6): 47 - 53.
- [5] 沈位刚,赵涛,唐川,等. 落石冲击破碎特征的加载率相关性研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 43 - 50.
SHEN Weigang, ZHAO Tao, TANG Chuan, et al. Loading Rate Dependency of Impact Induced Rock Fragmentation during Rockfall [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(1): 43 - 50.
- [6] 梅雪峰,胡卸文,罗刚,等. 基于弹塑性理论的落石碰撞恢复系数和峰值冲击力研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 14 - 20.
MEI Xuefeng, HU Xiewen, LUO Gang, et al. A Study on the Coefficient of Restitution and Peak Impact of Rockfall Based on the Elastic-Plastic Theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8): 14 - 20.
- [7] 崔廉明,石少卿,汪敏,等. 多位置分布配重下引导式落石缓冲系统冲击防护性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 332 - 342.
CUI Lianming, SHI Shaoqing, WANG Min, et al. Research on the Impact Protection Performance of the Rockfall Attenuator System under Multiposition Distributed Counterweights Conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 332 - 342.
- [8] 王星,周天跃,师江涛,等. 基于自由落体的落石冲击土层的理论及LS-DYNA模拟研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4): 9 - 17.
WANG Xing, ZHOU Tianyue, SHI Jiangtao, et al. Theoretical and LS-DYNA Simulation Study of Based on the Theory of Free-Fall Rockfall's Impact on Soil Layer [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(4): 9 - 17.
- [9] 唐红梅,李阳,王林峰. 三峡库区陡高边坡落石运动特性数值模拟分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 49 - 54.
TANG Hongmei, LI Yang, WANG Linfeng. Numerical Simulation Analysis of Rock Movement Characteristics of Steep High Slope in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2019, 36(4): 49 - 54.
- [10] 叶四桥,巩尚卿,王林峰,等. 落石碰撞切向恢复系数的取值研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 8 - 15.
YE Siqiao, GONG Shangqing, WANG Linfeng, et al. Research on Value of Tangential Restitution Coefficient for Rockfall Collision [J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 8 - 15.
- [11] 叶四桥,巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 13 - 19.
YE Siqiao, GONG Shangqing. Research on Normal Restitution Coefficient of Rockfall Collision by Model Tests [J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 13 - 19.
- [12] 孙敬辉,石豫川. 重庆甄子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 6 - 11.
SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and Hazard Zoning of Collapse and Rockfall in Zengziyan, Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 6 - 11.