

2018年度重庆市出版专项基金资助项目

DOI:10.11721/cqnuj20190411

三峡地区资源环境生态研究

三峡库区陡高边坡落石运动特性数值模拟分析*

唐红梅, 李 阳, 王林峰

(重庆交通大学 山区公路水运地质减灾重点实验室, 重庆 400074)

摘要:【目的】探究三峡库区陡高边坡落石运动规律和落石灾害的影响,为工程防治提供依据。【方法】以重庆市万州区天生城危岩落石为研究对象,基于概率统计、能量损失、碰撞回弹等理论,运用 Rocfall 危岩落石轨迹模拟软件,建立该危岩落石的二维数值模型,通过对已经发生的单体落石的数值模拟运动路径与理论计算的运动路径进行对比分析,确定有关数值模拟参数取值的合理性。【结果】通过数值模拟获得了落石运动特性的落石弹跳高度、平移速度、总动能图及不同质量落石停积位置概率;落石对坡脚公路和学校影响概率为 100%。【结论】研究结果对三峡库区危岩落石防治工程中被动防治位置的确定以及落石的拦截高度、能量大小等参数的预测提供了重要依据。

关键词:陡高边坡;落石;运动特性;数值模拟;三峡库区

中图分类号:U458.3

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2019)04-0049-06

陡坡落石指岩块从母岩体分离出来,经过与垫面的弹跳、碰撞、飞跃、滑动等运动过程,顺着陡高山坡面快速向下运动,最后在平缓处或者障碍物附近停止运动的过程^[1]。基于失稳模式不同,国内学界将危岩将分为坠落式危岩、滑塌式危岩和倾倒式危岩^[2]。目前国内外对落石运动特性的研究方法主要有理论分析、现场实验和数值模拟实验,而大部分研究方法都基于 Hertz 弹性碰撞理论和碰撞恢复系数,例如:唐红梅等人^[3]通过对危岩落石各阶段的运动状态建立轨迹方程,根据危岩破坏模式的不同,对危岩运动状态进行了理论分析;熊剑等人^[4]运用 Rocfall 软件,并结合 Hertz 弹性碰撞理论,分析了落石对山坡下行车的最小冲击力;黄润秋等人^[5]基于正交设计的落石现场实验研究,得出影响落石碰撞恢复系数的主要因素有斜坡下垫面特性和植被特性;何思明等人^[6]根据 Hertz 接触理论和 Cattaneo & Mindin 切向接触理论,在考虑材料弹塑性特性的基础上研究了滚石碰撞恢复系数的计算模式,并给出了计算公式;杨海清等人^[7]基于接触力学和运动力学理论,提出了落石运动轨迹预测新的计算公式;Pichler 等人^[8]通过模拟落石对砂砾土质垫层的冲击力,得到一种半经验法的冲击力计算公式;黄雨等人^[9]对 STONE, CPSP, ROCFALL 等 3 种滚石运动路径模拟软件进行了对比,探究的落石的数值模拟研究现状和发展趋势;袁进科等人^[10]基于冲击力物理模拟实验,从讨论冲击力的影响因素出发,通过建立的一套冲击力测试系统,分析冲击力的变化规律。冯晓等基于概率统计理论,对落石落点分布进行了统计,并给出落石防治措施^[11];周爱红等人^[12]基于 SVM 预测模型和正交实验,得出正交实验方法可以确定影响落石运动特征参数的主次因素及较不利因素水平组合,并基于支持量机(SVM)的预测系统不需要进行 Rocfall 软件的建模计算过程,就可以估算出岩质边坡落石的运动特征参数;以上研究无论是对落石运动的理论探讨,或是通过数值模拟来进行危岩落石防治工程设计,都存在局限性。由于危岩落石具有突发性、难预测性、高破坏性、随机性等特点,因此有关防治工程的精准设计难度很大。为此,本研究以重庆市万州区天生城危岩落石为研究对象,基于概率统计、能量损失、碰撞回弹等理论,运用 Rocfall 危岩落石轨迹模拟软件,建立了该危岩落石的二维数值模型,通过对已经发生的单体落石的数值模拟运动路径与理论计算的运动路径进行对比分析,确定了有关数值模拟参数取值的合理性。同时,本研究通过数值模拟获得了落石运动特性的落石弹跳高度、平移速度、总动能图及不同质量落石停积位置概率。本研究结果有望为三峡库区危岩落石防治工程中被动防治位置的确定以及落石的拦截高度、能量大小等参数的预测提供重要依据。

* 收稿日期:2019-01-03 修回日期:2019-03-04 网络出版时间:2019-07-15 12:30

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521;No. 51678097)

第一作者简介:唐红梅,女,研究员,博士生导师,研究方向为岩土工程与地质工程,E-mail:hmtang6778@sina.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20190715.1230.018.html>

1 Rocfall 模型建立与参数选取

1.1 基本假设

Rocfall 是一款基于概率统计理论的危岩落石滚落路径模拟软件。由于影响落石运动特性的因素众多,且具有复杂性特征,因此本研究在运用 Rocfall 软件进行有关模拟时作出如下假定:1) 危岩体边坡坡面由若干折线段组成,不考虑坡面的突出和凹陷,忽略坡面物体微小差异对落石的影响;2) 落石为质量均质的球体,忽略形状对落石的影响;3) 不考虑落石之间相互碰撞的影响,忽略微小障碍物的影响;4) 落石在滚落过程中不考虑破碎解体,保持完整,且落石与坡面均为各向同性体;5) 不考虑空气阻力和升力对落石的影响。

1.2 参数选取

由于落石运动以自由落体、碰撞弹跳、滚动、滑动等形式存在,因此落石运动过程中下垫面参数的选取十分关键。以实地勘查资料与危岩落石运动的断面图为依据,基于不同下垫面性质,危岩落石与不同下垫面碰撞时的恢复系数、摩擦系数均存在明显差异,从而导致危岩落石的运动特性如运动速度、弹跳高度、能量大小及停积位置不同,由此可见参数取值十分重要。

在 Rocfall 数值模拟软件中,选取碰撞恢复系数和摩擦系数作为危岩边坡特性的参考系数。恢复系数即两物体碰撞后分离速度与碰撞前接近速度的比值,两者成正比关系^[13]。落石与下垫面碰撞后的恢复系数分为单恢复系数和两恢复系数,并且落石与下垫面发生碰撞反弹属于弹塑性碰撞,碰撞反弹必然伴随一定的能量损失,恢复系数介于 0 到 1 之间。恢复系数能够反映落石碰撞行为,因此恢复系数的选取是十分关键而敏感的参数,它的取值直接决定落石运动路径,有关具体取值参见表 1^[14-15]。

表 1 不同下垫面的恢复系数

Tab.1 Recovery coefficient of different underlying surfaces

山坡岩石与表层覆盖物	法向恢复系数	切向恢复系数
光滑硬岩面、铺砌面、喷射混凝土表面、圪工表面	0.25~0.75	0.88~0.98
软岩面、强风化硬岩表面	0.15~0.37	0.75~0.95
块石堆积坡面	0.15~0.37	0.75~0.95
密实碎石堆积坡面、硬土坡面,植被发育,以灌木为主	0.12~0.33	0.30~0.95
密实碎石堆积坡面、硬土坡面,无植被或少量杂草	0.12~0.32	0.65~0.95
松散碎石坡面、软土坡面,植被以灌木为主	0.10~0.25	0.30~0.80
软土坡面,无植被或少量杂草	0.10~0.30	0.50~0.80

注:表中硬岩和软岩区别以锤击反应为界;锤击现白点,声音清脆与具有反弹特性为硬岩,反之锤击凹坑,声音沉闷与不反弹为软岩;碎石土坡面密实和疏松可通过标准贯入实验判别;硬土以拇指难以压入,软土以拇指可压出凹坑或可贯入判别^[15]

表 2 滚动摩擦系数取值

Tab.2 Values of rolling friction coefficient

序号	山坡坡角 $\alpha/(\circ)$	滚动摩擦系数计算式
1	0~30	$0.41+0.0043\alpha$
2	>30~60	$0.543-0.0048\alpha+0.000162\alpha^2$
3	>60~90	$1.05-0.0125\alpha+0.0000025\alpha^2$

危岩落石在坡角较小的斜坡中发生滚动,但实际上发生滚动状态的概率较低。滚动阶段发生时,落石与坡面的滚动摩擦系数的取值与坡面岩石出露情况,植被覆盖情况及斜坡的坡度按有关。滚动摩擦系数的取值如表 2^[16]所示。

2 已崩单体落石数值模拟

2.1 研究对象概况

重庆市万州区天生城福建小学危岩位于台阶状地貌周边的陡崖地带,基岩以砂岩与泥岩软硬互层,落石坡面呈现折线型。陡崖由砂岩组成,崖高 10~33 m,坡角 $60^\circ\sim 80^\circ$,部分段直立,甚至反倾;陡崖间为缓坡地形,多土层植被覆盖;陡崖坡脚是滨江路,公路外侧为福建小学(图 1),公路与福建小学处于危岩带下方。2000 年 7 月,一处危岩体脱离母岩后坠落。其中一块 300 kg 较大危岩体经过多次弹跳、滚动后,经过一系列运动后冲入水泥路面,撞破坡下福建小学围墙,冲进学校,并经反弹后撞破 32 cm 厚的教学楼墙体,形成一个 7 cm 深的冲击坑,大量碎石堆积在坡下公路上,阻碍交通。2000 年 10 月该处再次发生危岩体坠落事件,一块直径 4.3 m 的落石冲进坡下的名亨小区^[17]。

2.2 数值模拟

采用 Rockfall 软件,对 2000 年 7 月重庆万州区天生城的危岩带一块直径为 0.6 m、质量约为 300 kg 的落石

进行数值模拟。如图 1 所示, A 点处为危岩体起崩点, 相对高程 149.64 m。落石经过一系列的滚落、飞行、碰撞等运动, 最终穿墙冲入福建小学。模拟实验坡面分成 7 段, 其中 FG 段为公路与学校, 混凝土下垫面(图 1)。依据下垫面特征不同, 各段下垫面恢复系数与滚动摩擦系数取值也有所不同(表 3)。依据实际情况, 取落石起始速度与角速度为 0, 建立了天生城山坡坡面数值模型图。通过对 Rockfall 数值软件赋值获得了已崩落危岩落石的运动路径、弹跳高度、运动平移速度及能量包络线图。

2.3 模拟结果分析

2.3.1 落石的运动路径 从图 1 中显示的落石的理论计算路径图^[3]与 Rockfall 软件数值模拟的路径图可见: 落石从 AB 段的滑落到 BC 段的滚落, 理论计算路径与 Rockfall 软件数值模拟结果十分相似。落石过 C 点后, 数值模拟的路径为直接到达下坡段的 EH 中段, 并直接加速滚落到公路混凝土路面上, 碰撞弹跳至福建小学操场。而理论计算需要判断落石达到 C 点后是下抛或上抛, 这在 Rockfall 软件中直接视为下落, 故由数值软件计算得到的速度偏大、偏安全。落石通过 EH 段后到达 F 点后, 理论计算值与 Rockfall 软件计算的运动路径十分接近, 且后者得出的计算值略微偏大。总体上看, 理论计算和数值模拟的落石运动路径与实际情况十分吻合, 可见本研究数值模拟参数取值合理。

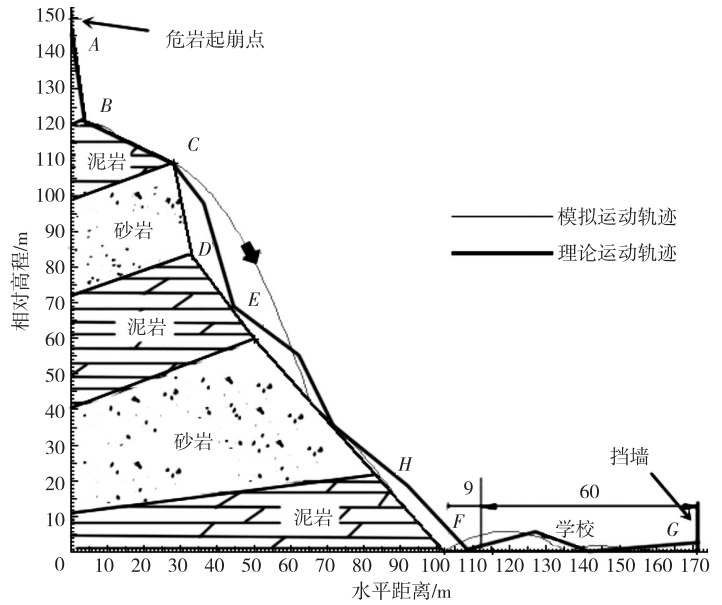


图 1 天生城山坡坡面剖面图与落石运动轨迹

Fig. 1 Profile of Tianshengcheng mountain slope and rockfall trajectory

表 3 落石下垫面各段的参数取值

Tab. 3 Parameters of each section of the falling stone underlying surface

坡段	下垫面特征	法向恢复系数	切向恢复系数	滚动摩擦系数	标准差
AB	强风化砂岩, 岩体裸露, 基本无植被覆盖, 坡度为 84°	0.55	0.93	0.41	0.03
BC	强风化泥岩, 少量植被和碎屑堆积物, 坡度为 25°	0.28	0.87	0.48	0.03
CD	强风化砂岩, 少许植被覆盖, 坡度 62°	0.55	0.93	0.41	0.03
DE	强风化泥岩, 坡度小少量植被和碎屑堆积物, 坡度 50°	0.28	0.87	0.48	0.03
EH	强风化砂岩, 崩坡堆积层, 少量块石和突出基岩, 植被以杂草为主, 少量灌木, 坡度为 48°	0.24	0.83	0.59	0.03
HF	强风化泥岩, 有崩坡堆积层, 植被以杂草为主, 少量的灌木, 坡度为 48°	0.24	0.83	0.59	0.03
FG	水泥混凝土路面, 坡度略为 3°	0.55	0.93	0.41	0.03

2.3.2 落石的弹跳高度 由图 2 可见, 数值模拟的已崩天生城落石的弹跳高度有两个明显的峰值, 大概在 C 点左右和 F 点之后一段距离。落石在 AB 段经历了一段滑动, 由于坡度较大, 滑移速度增加。在 B 点后坡度变缓, 落石运动状态变成了滚动。到达 C 点后, 由于落石水平速度较大, 而此时坡面突然变陡(CD 段坡度接近 80°), 因而落石同时在自重的作用下加速飞跃向下, 最大弹跳高度达 25 m。落石在 EF 段的中段撞击下垫面, 而此段植被覆盖较好, 落石沿着坡面发生再次滚落到达 F 点。由于 F 点位于公路混凝土路面, 此处下垫面恢复系数较大, 滚落时能量较大, 落石产生第 2 个明显的弹跳, 高度为 6 m。第 2 次弹跳与第 1 次弹跳相比, 高度降低很多。

2.3.3 落石的平移速度 对于初始阶段危岩失稳脱离母岩形成的落石, 本研究假设危岩临空面良好, 不受其他物体阻挡, 危岩落石在自重的作用下崩落, 初始速度为 0。图 3 为危岩落石的平移速度包络线图, 该图显示: 由于势能转化成动能的影响, 落石在下落至 B 点过程中速度呈线性增加; 落石在撞击到坡面后, 一部分动能转化成内能, 速度也随之降低; 之后经过一段时间的滚动后, 落石经过 C 点后飞离下垫面, 呈飞跃状运动, 速度也随势能的减小而不断增加, 在 EF 段速度达到最大值, 为 38 m · s⁻¹; 最后经过不断地碰撞和滚动摩擦, 落石速度不断减

小,直到撞击学校围墙后停止。由于假定落石和坡面都是各向同性的均质体,所以在每次撞击过程中速度都会呈线性减小。研究认为,考虑瞬间摩擦耗能的作用,落石的切向速度在碰撞过程中损失 10%^[10]。

2.3.4 落石的总动能 图 4 显示,落石坠落过程中,动能在重力作用下呈线性增加,直到落石撞击到边坡后动能会有所损失。在碰撞中,一部分动能会转化为内能。从图 4 中可以看出,落石每次撞击坡面后能量呈线性减少的那一段即为落石动能转化为内能损失的能量。之后落石反弹,在上升过程中,总动能也会持续减小;在弹跳高度达到峰值时,由于落石开始下落,总动能又会持续增加,直到下一次碰撞。在落石撞击到坡面后,根据速度的大小,可以把落石撞击后的运动分为两种状态:一种是进入新的飞行状态,即回弹;另一种状态是进入滚动状态。在进入滚动状态后,由于坡面摩擦的影响,落石动能的增加速率会持续降低,甚至动能会停止增加,并反而降低。由于假定落石和坡面都是各向同性的均质体,所以在每次撞击过程中落石总动能都会呈线性减小,且落石会运动一定距离。图 4 还显示,落石总动能在下垫面的 DEF 段迅速增长又迅速降低,由峰值 230 kJ 降到 50 kJ。综合图 2~4 可知,危岩落石的被动防治位置选取在下垫面 EH 段靠 H 点位置较为合适。

3 不同质量落石运动特性

为了更好地寻找重庆万州区天生城危岩落石的运动特性规律,采用 Rockfall 软件对不同质量的落石质量沿着图 1 剖面进行了模拟实验。在该实验中,选取 50,100,200,300 和 500 kg 共 5 种不同质量的落石进行随机下落,且相同质量的落石各 50 个,同时不考虑彼此之间碰撞的影响。具体实验结果如下:

1) 落石质量对弹跳高度影响不明显,落石碰撞地面后的弹跳高度随着落石质量的增加而略为减小(图 5)。2) 落石碰撞地面后,平移速度随质量的增加基本呈减小状态(图 6)。3) 随着落石质量增加,落石总动量也随之增加(图 7);特别是当落石质量大于 200 kg 时,落石总动量在通过坡面 C 点后动

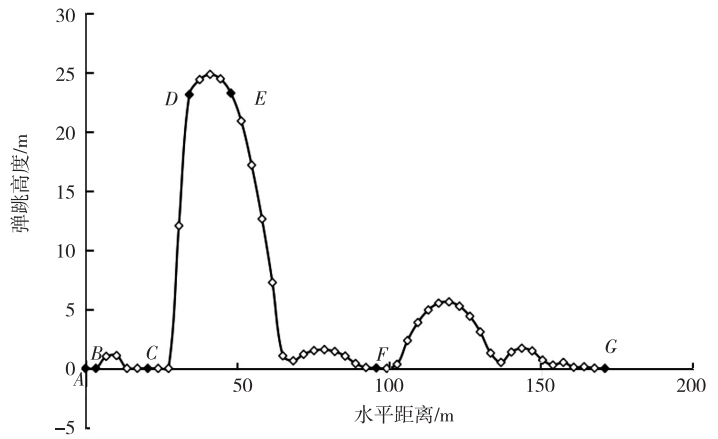


图 2 落石各点弹跳高度包络图

Fig. 2 Envelope diagram of bouncing height of falling stones

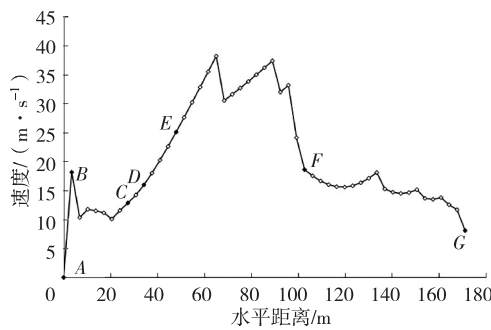


图 3 落石平移速度包络图

Fig. 3 The envelope of the translation velocity of falling rocks

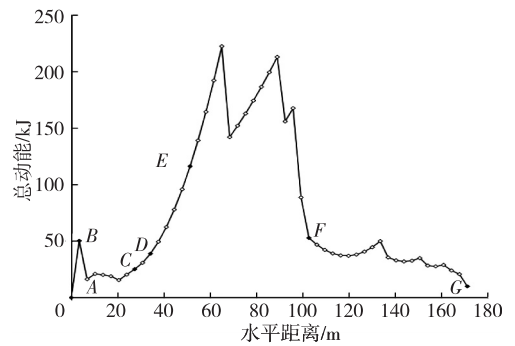


图 4 落石总动能包络图

Fig. 4 The envelope of total kinetic energy of falling rocks

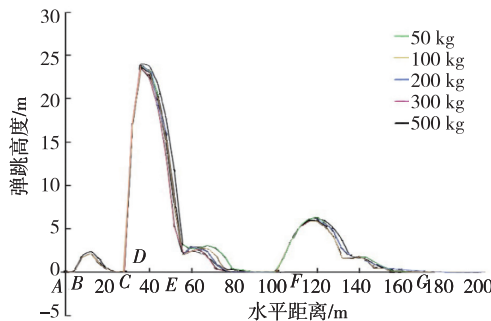


图 5 不同质量落石弹跳高度包络图

Fig. 5 The envelope diagram of

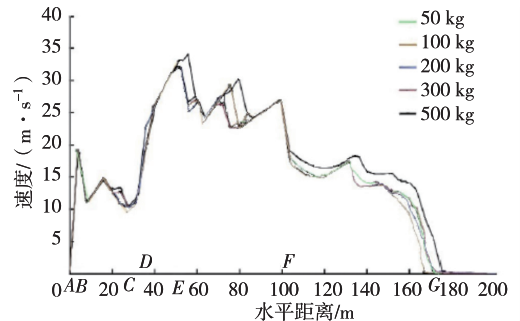


图 6 不同质量落石平移速度包络图

Fig. 6 The envelope diagram of

bouncing height of rockfall with different mass translation velocity of rockfall with different mass

能增长很快,因此在设计落石被动防治装置时,须特别关注对大落石的防治。4) 模拟结果显示:落石最近的水平运动距离为 131.5 m,最远的水平运动距离为 171.8 m,落石主要集中在距离坡脚 F 点水

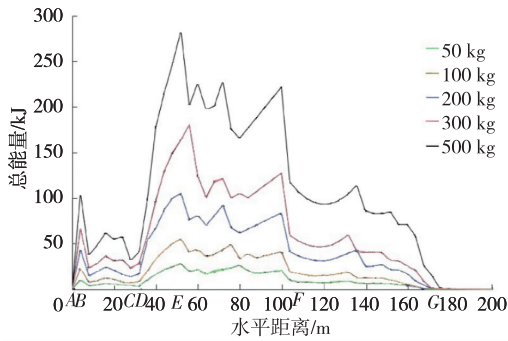


图7 不同质量落石总能量包络图

Fig. 7 The envelope of total energy of rockfall with different mass

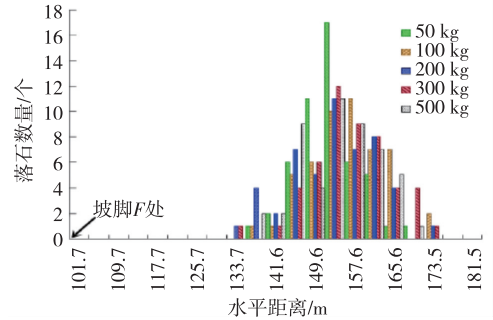


图8 不同质量落石停落位置停积图

Fig. 8 The prediction of stone landing location with different mass

平距离 140~160 m 之间(图 8)。经过概率统计后发现,天生城危岩落石运动轨迹覆盖坡脚下公路和学校的概率为 100%。因此,必须在该处危岩下方公路内侧设置被动防治支挡,支挡的设置位置、拦挡高度及防治有效性可以参考本研究数值模拟得到的位置停积图、高度包络图及能量包络图来进行设计。

4 结论

本研究以重庆市万州区天生城危岩落石为研究对象,通过 Rockfall 软件并结合对下垫面参数的合理选取,对已崩落危岩落石的运动轨迹进行了数值模拟,获得了落石的平移速度、总动能、弹跳高度等特征参数,并对不同质量的落石进行了对比性模拟实验,结果显示:1) 落石的数值模拟运动路径、理论计算值运动路径均与实际情况十分吻合,从而验证了数值模拟参数取值的合理性。2) 在落石经过坡面 C 点以后,落石速度和动能都在快速增加,直到落石撞击到坡面 EH 段软岩之前,落石速度和动能都达到了下落过程的最大值;落石在经过坡面 C 点后发生跳跃高度也达到最大,为 25 m。3) 通过对不同质量落石的运动轨迹的预测,发现坡脚的公路和学校完全处于危岩落石威胁区域内,它们被落石运动轨迹覆盖的概率为 100%。因此,必须在该处危岩下方公路内侧实行被动防治,如拦石墙、拦石网等支挡,它们的设置位置、拦挡高度及防治有效性可参考本研究结果。总之,利用 Rockfall 软件对危岩落石进行数值模拟,为三峡库区危岩落石治理提供了重要技术支撑。

参考文献:

- [1] 张路青,杨志法,许兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004,12(3):225-231.
ZHANG L Q, YANG Z F, XU B. Rock falls and rock fall hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 225-231.
- [2] 陈洪凯,唐红梅,王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(4):614-619.
CHEN H K, TANG H M, WANG R. Calculation method of stability for unstable rock and application to the Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(4):614-619.
- [3] 唐红梅,易朋莹. 危岩落石运动路径研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003,25(1):17-23.
TANG H M, YI P Y. Research dangerous rock movement route[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003,25(1):17-23.
- [4] 熊剑,邓辉. 滚石运动模拟分析与危险性评价[J]. 路基工程, 2015(3):51-54.
XIONG J, DENG H. Simulation analysis and risk assessment of rockfall movement[J]. Subgrade Engineering, 2015(3):51-54.
- [5] 黄润秋,刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(5):882-891.
HUANG R Q, LIU W H. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5):882-891.
- [6] 何思明,吴永,李新坡. 滚石冲击碰撞恢复系数研究[J]. 岩土力学, 2009,30(3):623-627.
HE S M, WU Y, LI X P. Research on restitution coefficient of rock fall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(3):623-627.
- [7] 杨海清,周小平. 边坡落石运动轨迹计算新方法[J]. 岩土力学, 2009,30(11):3411-3416.
YANG H Q, ZHOU X P. A new approach to calculate trajectory of rockfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3411-3416.
- [8] PICHLER B, HELLMICH C H, MANG H A. Impact of

- rocks onto gravel design and evaluation of experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(4): 560-578.
- [9] 黄雨, 孙启登, 许强. 滚石运动特性研究新进展[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 31-35.
HUANG Y, SUN Q D. New development of rockfall kinematics study [J]. *Journal of Vibration and shock*, 2010, 29(10): 31-35.
- [10] 袁进科, 黄润秋, 裴向军. 滚石冲击力测试研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 48-54.
YUAN J K, HUANG R Q, PEI X J. Test research on rockfall impact force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 48-54.
- [11] 冯晓, 郭俊, 刘晶. 基于概率统计理论的滚石运动轨迹数值模拟[J]. *路基工程*, 2013(6): 89-93.
FENG X, GUO J, LIU J. Numerical simulation on rockfall trajectory based on probability and statistics theory[J]. *Subgrade Engineering*, 2013(6): 89-93.
- [12] 周爱红, 王帅伟, 袁颖, 等. 岩质边坡落石运动特征参数分析及 SVM 预测模型[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(3): 20-25.
ZHOU A H, WANG S W, YUAN Y, et al. Analysis on characteristic parameters of rock slope rockfall movement and SVM prediction model[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(3): 20-25.
- [13] MARVIN U B, COSMO M, Domenico Troili(1766): "The true cause of the fall of a stone in Albereto is a subterranean explosion that hurled the stone skyward"[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2002, 37: 1857-1864.
- [14] 章广成, 向欣, 唐辉明. 落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1266-1273.
ZHANG G C, XIANG X, TANG H M. Field Test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1266-1273.
- [15] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 等. 危岩崩塌演化理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009
CHEN H K, TANG H M, WANG L F, et al. Theory and application of evolution of dangerous rock collapse[M]. Beijing: Science Press, 2009
- [16] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
HU H T. Landslip and falling rocks[M]. Beijing: China Railway Press, 1989.
- [17] 陈洪凯, 董平, 唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 32(6): 53-60.
CHEN H K, DONG P, TANG H M. Research status and trend of dangerous rock collapse disaster[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2015, 32(6): 53-60.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Numerical Simulation Analysis of Rock Movement Characteristics of Steep High Slope in Three Gorges Reservoir Area

TANG Hongmei, LI Yang, WANG Linfeng

(Key Laboratory for Geological Disaster Reduction of Highway Waterway Transportation in Mountain Areas, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [Purposes] The law of rockfall movement and the impact of rockfall disasters on steep and high slopes in the Three Gorges reservoir area are explored to provide basis for engineering prevention and control. [Methods] Based on the theory of probability statistics, energy loss and collision rebound, a two-dimensional numerical model of dangerous rock fall in Wanzhou district of Chongqing is established by using rockfall simulation software. By comparing the numerical simulation path of individual rock fall with that of theoretical calculation, the relevant numerical simulation is determined. Rationality of parameter selection. [Findings] The rationality of the numerical simulation parameters is obtained. The bouncing height, translation speed, total kinetic energy diagram and stopping position probability of rockfall with different mass are obtained by numerical simulation. The impact probability of rockfall on slope foot highway and school is 100%. [Conclusions] The research results provide important basis for the determination of passive prevention position, interception height and energy of the prevention and control project of dangerous rock fall.

Keywords: steep high slope; rockfall; motion characteristics; numerical simulation; Three Gorges reservoir area