

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.007

江坪河水电站高陡边坡落石运动分析及防护措施

王盛年^{1,2}, 石 崇^{1,2}, 陈鸿杰^{1,2}, 黄 玮^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对江坪河水电站厂房后边坡陡岩临空面倾角接近垂直、节理裂隙发育, 可能发生崩塌落石灾害以至于威胁河谷部位地表厂房安全问题, 在进行地质勘察的基础上, 选取典型剖面建立落石运动分析模型, 采用经验计算法定量分析落石运动特征, 并以基于概率的运动学原理对落石进行数值仿真, 探讨落石的落点分布、弹跳高度、运动速度及动能分布问题。计算结果表明, 陡岩发生崩塌落石对电站厂房安全威胁巨大, 需采取必要的落石防护措施。

关键词: 陡岩边坡崩塌; 落石运动分析; 落石防护措施; 江坪河水电站高陡边坡

中图分类号: TV74; TU45 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1980(2012)02-0162-06

Analysis of movement of rockfall from high and steep slopes at Jiangping River Hydropower Station and protective measures

WANG Sheng-nian^{1,2}, SHI Chong^{1,2}, CHEN Hong-jie^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The high and steep rock slopes behind the workshops of the Jiangping River Hydropower Station have developed joints and fissures, and a nearly vertical free surface angle, and are thus likely to pose rockfall hazards, threatening the safety of workshops in the river valley area. To solve this problem, typical sections of slopes were selected and a rockfall movement analysis model was established based on geological exploration. The experiential formulas were used for quantitative analysis of the characteristics of rockfall movement, and the kinematics formulas based on probability were used for numerical simulation. The rockfall placement distribution, bounce height, movement velocity, and kinetic energy distribution were analyzed. The calculated results show that the rockfall from high and steep rock slopes significantly threaten the safety of workshops of the hydropower station and protective measures should be taken.

Key words: rockfall of steep rock slope; rockfall movement analysis; rockfall protective measures; high and steep slope of Jiangping River Hydropower Station

高陡边坡落石是一种常见山地灾害, 指个别岩块因外部荷载从地质体表面失稳后经过下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种组合沿着坡面快速运动, 最后在较平缓的地带或障碍物附近静止下来的动力演化过程^[1]。高陡边坡落石具有突发性、不确定性、高频发性等特点, 工程防治困难。落石本质上为岩体结构面、临空面及地面构成的稳定性较低的结构体, 是多因子诱发的必然结果^[2]。

落石运动过程受其自身性质、坡形、坡地表面物质组成及植被情况等诸多要素的作用, 是一种复杂的非线性动力问题^[3]。Ritchie^[4]按坡率比提出了适用于直线形边坡的落石模式, 胡厚田^[5]给出了单一坡度山坡、折线型山坡等 3 种落石速度的经验计算公式, 并对崩落距离和弹跳高度等进行了研究; 叶四桥等^[6-7]通过现场试验统计分析了落石形状、大小、运动模式对运动特征的影响规律, 并对其威胁区域进行了预测。上述研究

收稿日期: 2011-02-21

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划(2008BAB29B01); 国家自然科学基金(50911130366); 河海大学新教师基金(20090094120017)

作者简介: 王盛年(1987—)男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: myresort@126.com

都局限在现场试验和模型试验等方面,依赖参数单一的经验公式、忽略落石在运动过程中的转动及其质量变化等因素,研究结果与实际情况存在较大差异.近年来,随着计算机技术的迅速发展,以运动学原理为基础的数值模拟方法已成为落石运动的主流研究手段,可更真实地反映落石的运动过程.笔者针对江坪河水电站厂房后边坡陡岩的特点,考虑厂房安全问题,在进行地质勘察的基础上选取典型剖面建立落石运动分析模型,分析落石运动特征,基于概率的运动学原理对落石进行数值仿真,探讨落石的落点分布、弹跳高度、运动速度及动能分布问题,并提出相应的落石防护措施.

1 工程概况

江坪河水电站位于湖北省鹤峰县走马镇阳河乡水干流上.厂房布置于河床左侧陡岩下游Ⅰ级阶地上,厂区地面高程为 307.40 m.厂房后边坡从厂区高程至山顶高约 370 m.陡岩边坡大致从高程 380.00 m 至陡岩顶部,高约 120 m.陡岩岩性主要为强风化和中风化的厚层灰岩、泥灰岩和白云质灰岩.临空面倾角接近垂直,存在数条成规模发育的风化卸荷裂隙,卸荷裂隙以陡倾角切割岩体,岩体层面发育,倾角较小或接近水平.据现场调查,坡脚存在体积 0.3~0.8 m³ 的岩块,陡岩顶部有断层且分布着规模不大的临空悬挂岩体,分布位置较高,如图 1 所示.陡岩在雨水冲蚀浸泡、裂隙水压力作用、季节变化产生的热胀冷缩、边坡塑性区的扩展及边坡应力的自我调整等多种因素的耦合作用下,可能发生倾倒和崩塌落石灾害.

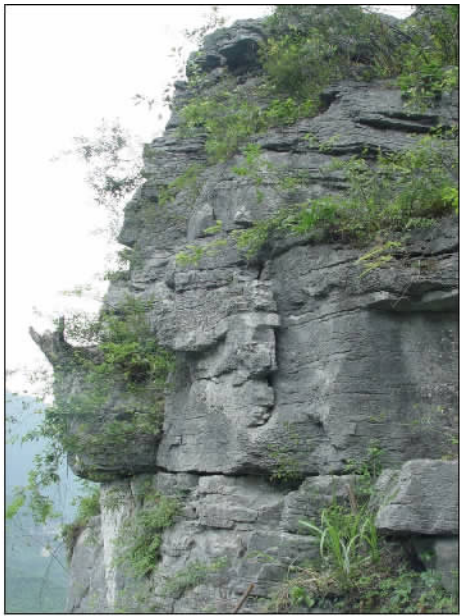


图 1 江坪河水电站厂房后边坡陡岩
Fig. 1 High and steep rock slope behind workshops of Jiangping River Hydropower Station

2 落石计算理论

2.1 经验分析法

根据前苏联尼米罗依尼什维里教授在大量野外现场试验基础上提出的落石运动速度的经验分析方法,落石从边坡较高处向下崩落,其运动形式与岩块形状、山坡坡度等诸多因素有关,边坡依据不同坡度坡面的组合形式分为单一坡度山坡、折线型山坡(Ⅰ型/Ⅱ型)等情况^[2,5].对于单一坡度和Ⅰ型折线型山坡,落石速度计算采用落石运动所受有关因素综合影响的阻力特性进行折减;Ⅱ型折线型山坡上陡下缓,落石冲击坡面后发生碰撞,由于坡面起伏、覆盖层及植被等对落石弹跳速度影响大,故采用瞬时摩擦系数对落石速度进行折减.

理论上落石运动路径可用质点或球体 $R(x,y)$ 以相对坡面角度为 φ 的速度 v_R 撞击坡面 O 点(图 2),然后以跳跃速度 v_t 反弹的运动轨迹曲线来表示.若斜坡坡角为 α , v_t 与纵坐标轴间的夹角为 β ,则落石运动轨迹方程可表示为

$$y = \frac{gx^2}{2v_t^2 \sin^2 \beta} + x \cot \beta \tag{1}$$

落石在水平方向对斜坡面的最大偏离 $l_{\max}$ 为

$$l_{\max} = \frac{v_t^2 (\tan \alpha - \cot \beta)^2}{2g \tan \alpha (1 - \cot^2 \beta)} \tag{2}$$

其运动轨迹在垂直方向对斜坡面的最大偏离 $h_{\max}$ 为

$$h_{\max} = l_{\max} \tan \alpha \tag{3}$$

2.2 运动学分析方法

落石运动学分析方法^[8-12]是对落石局部过程运动状态的描述,其结果比经验分析方法更多地考虑边坡所特有的性质,此外还结合概率分析手段,因此能更真实地反映落石的运动过程.对落石进行路径和运动分

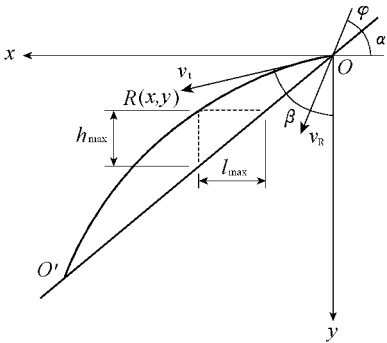


图 2 落石运动轨迹曲线
Fig. 2 Trajectory of rockfall movement

析时假定坡面为连续直线段且落石运动轨迹与边坡断面在同一平面内,同时视落石为无限小球形刚体,与边坡碰撞为非完全弹性碰撞且在运动过程中不发生解体,此外,亦不考虑空气阻力和升力的影响。

落石运动过程可分为坠落、碰撞、滑动和滚动4个阶段。坠落是岩体在自重作用下不受阻挡失稳的自由落体运动;滑动时岩块沿着某一斜面运动,碰撞和滚动是最常见的落石运动形式。落石的最大弹跳高度为弹跳高度最大处的落石轨迹纵坐标与其正下方坡面纵坐标的差值。

2.2.1 碰撞阶段

落石碰撞为斜抛运动。若岩块触地前瞬时速度分量为 v_{bx} 和 v_{by} , 将其分解为垂直于坡面的分量 v_{bn} 和沿坡面的分量 v_{bt} , 则

$$\begin{cases} v_{bn} = v_{by}\cos\alpha - v_{bx}\sin\alpha \\ v_{bt} = v_{bx}\cos\alpha + v_{by}\sin\alpha \end{cases} \quad (4)$$

由于碰撞是落石运动特性急剧改变的过程,必然伴随着能量损失,若以法向和切向恢复系数 e_n 和 e_t 反映落石碰撞行为,则落石触地弹跳初始速度垂直于坡面分量 v_{an} 和沿坡面分量 v_{at} 为

$$\begin{cases} v_{an} = (v_{by}\cos\alpha - v_{bx}\sin\alpha)e_n \\ v_{at} = (v_{bx}\cos\alpha + v_{by}\sin\alpha)e_t \end{cases} \quad (5)$$

进行一次坐标旋转,碰撞后的水平速度分量 v_{ax} 和垂直速度分量 v_{ay} 为

$$\begin{cases} v_{ax} = v_{an}\sin\alpha + v_{at}\cos\alpha \\ v_{ay} = v_{at}\sin\alpha - v_{bn}\cos\alpha \end{cases} \quad (6)$$

则碰撞后的速度 v_a 为

$$v_a = \sqrt{v_{ax}^2 + v_{ay}^2} \quad (7)$$

2.2.2 滑动和滚动阶段

落石在下滑过程中如果遇到陡坡,且其自重下滑分力大于摩擦力时落石将沿斜面滑动。根据运动学原理,落石滑动速度为

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gH(\sin\alpha - k\cos\alpha)} \quad (8)$$

式中: k ——落石与斜坡的滑动摩擦系数; v_0 ——落石滑动运动初速度, m/s; H ——滑动起点至计算点垂直高度, m。

落石运动后期,由于坡角较小,落石在初速度和加速度的作用下,会发生滚动。滚动发生的条件为

$$mg\sin\alpha < \frac{kmg\cos\alpha}{r} \quad (9)$$

根据机械能守恒定律,落石运动速度为

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g\frac{r^2H}{r^2 + R^2}\left(1 - \frac{k}{r}\cos\alpha\right)} \quad (10)$$

式中: R ——落石的惯性半径, m; r ——落石的等效半径, m。

2.2.3 动能的计算

落石最后具有的机械能可通过动能公式计算获得,以便为考虑防护强度提供依据。动能计算公式为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (11)$$

式中: m ——落石质量, kg; E_k ——落石所具有的总动能, J; I ——落石的转动惯量, kg·m²; ω ——落石的转动角速度, rad/s。

3 江坪河水电站高陡边坡落石运动分析

3.1 经验算法计算结果及分析

3.1.1 计算模型

经筛选选取典型剖面如图3所示,剖面高程自230.00~673.00 m。将原剖面线尽量简化成与实际坡面相符合的连续直线段,并进行相应的坡段划分,使之作为经验法计算模型。

3.1.2 落石过程

由落石速度及其弹跳高度数据(表 1)可知,岩块从坡顶崩塌后,其速度和弹跳高度逐渐增大,随着坡面变缓,其运动速度继续增大,但弹跳高度反而减小,运动至陡岩顶部区域时,由于落石运动速度很快,与该区域剧烈碰撞,在陡岩顶部区域引起小规模二次崩塌,之后再以斜抛或坠落的形式离开陡岩顶部,在落至陡岩底部缓坡段发生弹跳后,继续加速沿坡面向下运动,最后高速撞向厂房。

3.2 运动学计算结果

3.2.1 计算参数

以剖面下边界为横轴、剖面高程为纵轴建立正交坐标系,剖面左下角坐标取(0.00 m,230.00 m)。从可能产生落石的起点位置 A 点起将坡面按坡度和地质条件分为 AB、BC 等 7 个坡段,如图 4 所示。根据落石运

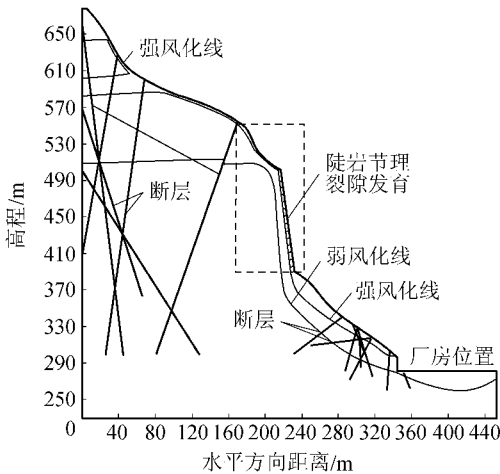


图 3 典型剖面
Fig. 3 Typical section

表 1 经验法计算结果

Table 1 Results of experience method

坡段编号	坡面坡角/(°)	坡段终端高程/m	坡段末端落石速度/(m·s ⁻¹)	可能最大弹跳高度/m	坡段编号	坡面坡角/(°)	坡段终端高程/m	坡段末端落石速度/(m·s ⁻¹)	可能最大弹跳高度/m
1	38.46	673.00	4.40	0.00	14	31.22	501.01	22.70	3.53
2	64.81	667.00	9.08	2.08	15	82.95	390.00	44.45	18.61
3	47.95	660.00	11.31	4.18	16	31.72	381.89	28.13	3.03
4	57.97	642.98	17.11	6.73	17	45.98	371.29	29.42	9.88
5	61.37	626.00	16.79	6.59	18	49.63	357.80	31.18	12.22
6	54.76	615.41	19.33	10.93	19	44.43	349.20	31.95	9.02
7	33.51	594.57	19.63	3.94	20	38.63	341.59	32.37	5.52
8	24.91	582.46	20.09	1.92	21	35.50	330.16	32.98	3.79
9	21.16	567.16	22.14	0.76	22	35.06	320.43	33.50	3.52
10	29.43	559.60	22.30	3.05	23	35.71	310.64	34.06	3.73
11	24.89	552.00	22.61	1.66	24	33.78	305.76	34.26	2.86
12	60.18	524.00	21.64	8.03	25	37.74	297.96	34.78	4.65
13	50.21	511.27	23.58	10.78					

动坡段几何及坡表特征(表 2),落石运动学仿真的主要计算参数取值见表 3。

3.2.2 计算结果

运用运动学原理仿真所得的计算结果如图 5 所示。其中,落石弹跳高度是设计防护几何尺寸的主要依据,落石总动能为落石平动动能与落石转动动能之和,亦是落石防护强度的考虑依据。

落石运动至厂房位置时其运动形式为滚动,速度约为 36.5 m/s,冲击总动能达到 68 kJ。此时,落石速度很快,携带动能巨大,对厂房的威胁很大。将仿真结果与经验计算法结果进行对比分析,两者一致性较好,即当落石运动至厂房位置时将达到相当高的速度,具有很大的动能,该动能的破坏性巨大,足以对厂房外墙造成损坏。因此要保证厂房正常运行,必须采取必要的

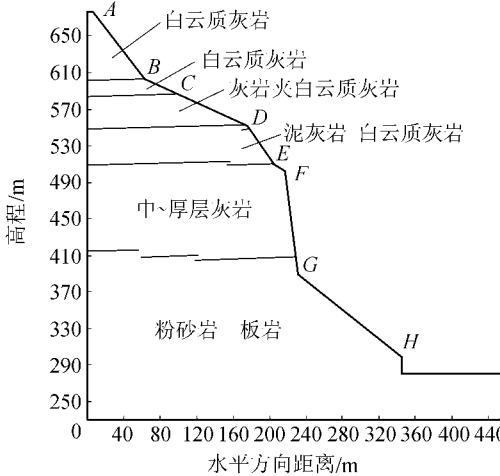


图 4 落石运动坡面按坡度和地质条件划分示意图
Fig. 4 Sketch map of slope sections of rockfall movement classified by gradient and geological conditions

落石防护措施.

表 2 落石运动坡段几何及坡表特征

Table 2 Geometric and surface characteristics of slope sections of rockfall movement			
坡段	坡度/(°)	坡长/m	覆盖层及植被状况
AB	52	93.33	基岩裸露,强风化白云质灰岩,岩质较坚硬,坡表起伏小,无植被或少量杂草
BC	27	36.79	崩塌积层,少量石块和基岩露头,地表植被以杂草为主,少量灌木、碎屑堆积物
CD	24	85.72	崩塌积层,少量石块和基岩露头,地表植被以杂草为主,少量灌木
DE	56	51.00	基岩裸露,强风化泥灰岩、白云质灰岩,岩质较坚硬,坡表起伏小,少量杂草
EF	31	17.28	基岩裸露,强风化中厚层灰岩,岩质较坚硬,坡表有起伏,无植被或少量杂草
FG	83	111.84	基岩裸露,强风化粉砂岩和板岩,岩质较坚硬,坡表起伏小,为陡崖崖壁,无植被
GH	39	146.52	水泥混凝土表面,平整度较好

表 3 计算参数取值

Table 3 Values of calculation parameters									
坡段	取值范围			实际取值					
	滚动 摩擦系数	法向 恢复系数	切线 恢复系数	摩擦角/(°)		法向恢复系数		切线恢复系数	
				均值	方差	均值	方差	均值	方差
AB	0.40~0.60	0.15~0.37	0.75~0.95	22	1	0.35	0.02	0.75	0.02
BC	0.50~0.75	0.12~0.32	0.65~0.95	31	1	0.32	0.02	0.65	0.02
CD	0.50~0.75	0.12~0.32	0.65~0.95	29	1	0.32	0.02	0.68	0.02
DE	0.40~0.60	0.15~0.37	0.75~0.95	31	1	0.16	0.02	0.75	0.02
EF	0.50~0.75	0.12~0.32	0.65~0.95	37	1	0.14	0.02	0.65	0.02
FG	0.40~0.60	0.15~0.37	0.75~0.95	26	1	0.32	0.02	0.87	0.02
GH	0.30~0.60	0.25~0.75	0.88~0.98	22	1	0.36	0.02	0.98	0.02

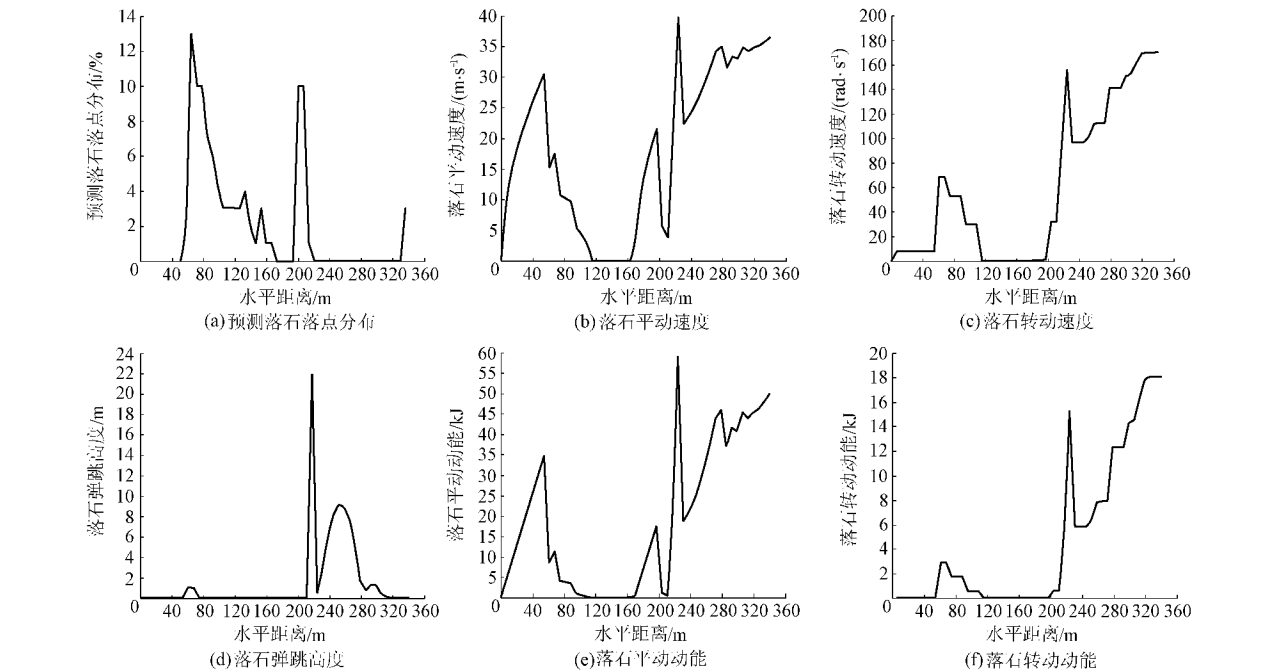


图 5 江坪河水电站陡岩落石计算结果

Fig. 5 Calculated results of rockfall from high and steep rock slopes at Jiangping River Hydropower Station

4 防护措施探讨

江坪河水电站高陡边坡坡顶岩体风化破碎严重,必须清除不稳定岩体,减小斜坡坡角,采用加锚喷浆并修建排水渠的方式降低风化岩体在温度、干湿变化等气候条件及外力触发其脱落掉块的可能性。

对于危岩临空面倾角接近垂直、风化卸荷裂隙发育、卸荷裂隙倾角较小、岩体层面发育的陡岩,可采取喷锚挂网、裂缝灌浆的方式进行加固,但由于危岩悬挂于绝壁上方,具有很大的势能,一旦发生落块,其运动至

厂房位置时速度很快,会对厂房安全造成很大威胁,故还需采用柔性钢绳拦截网系统。根据现场调查,江坪河水电站高陡边坡落石的质量一般小于 100 kg,按落石平均质量 75 kg 计,进行 100 块落石模拟计算的动能分布见图 5(e)(f)。综合经验分析法和运动学分析法所得结果,若要有效地阻挡落石,最经济有效的手段是在陡崖底部和厂房位置附近开挖平台布置拦截网系统,其相应的最小高度为 5.2 m 和 4.7 m。

5 结 论

a. 对陡岩边坡典型剖面进行落石运动分析,经验公式法和运动学仿真两者在结论上具有一致性,即一旦发生高陡边坡崩塌落石,岩块运动至厂房位置时速度会很快,具有破坏性巨大的动能,足以对厂房安全造成很大威胁,必须采取防护措施。

b. 对坡顶采用清除不稳定岩块、减小斜坡坡角、加锚喷浆并修建排水渠的方式可降低落石发生的可能;陡岩危岩除采用喷锚挂网、裂缝灌浆的方式进行加固之外,还须采用柔性钢绳拦截网系统,将其设于陡崖底部和厂房位置附近的平台上,拦截网的抗冲击强度分别为 30 kJ 和 68 kJ,相应的设计最小高度为 5.2 m 和 4.7 m。

参考文献:

[1] 吴顺川,高永涛,杨占峰. 基于正交试验的露天矿高陡边坡落石随机预测[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):2826-2832.(WU Shun-chuan , GAO Yong-tao , YANG Zhan-feng. Random prediction of rock-fall of open-pit mine high-steep slope based on orthogonal experimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(1) 2826-2832.(in Chinese))

[2] 高云河,雷建海,田景富,等. 流杯池小区危岩落石运动特征分析及其防治建议[J]. 地球与环境,2005,33(3):150-154. (GAO Yun-he , LEI Jian-mei , TIAN Jing-fu , et al. Analysis of dangerous rock movement characters and suggestions on hazard prevention in LIUBEICHI distric[J]. Earth and Environment 2005 33(3) :150-154.(in Chinese))

[3] 王念秦,罗东海. 落石灾害空间预测方法研究[J]. 路基工程,2009(3):198-200.(WANG Nian-qin , LUO Dong-hai. Research on forecast of rock-fall disaster space[J]. Subgrade Engineering 2009(3) :198-200.(in Chinese))

[4] RITCHIE A M. Evaluation of rockfall and its contrl[R]. Washington , D. C. :Highway Research Record of USA ,Record 17 ,1963.

[5] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京:中国铁道出版社,1989 :71-105.

[6] 叶四桥,陈洪凯,许江. 落石运动模式与运动特征现场试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(2):18-23. (YE Si-qiao , CHEN Hong-kai , XU Jiang. Rockfalls movement mode and movement features by field test[J]. Journal of Civil ,Architectural & Environmental Engineering 2011 33(2) :18-23.(in Chinese))

[7] 叶四桥,唐红梅,祝辉. 危岩落石威胁区域预测[C]//《第二届全国岩土与工程学术大会论文集》编辑委员会. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集:上册.北京:科学出版社,2006 :570-575.

[8] 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 :119-160.

[9] 梁璋彬. 崩塌落石的运动特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2008.

[10] 韦启珍,雷秀丽. 崩塌落石运动参数的数值模拟研究[J]. 中国水运,2008,8(3):165-166.(WEI Qi-zhen , LEI Xiu-li. The numerical simulation research of motion parameters of collapse and rock-fall[J]. China Water Transport ,2008 ,8(3) :165-166.(in Chinese))

[11] 赵旭,刘汉东. 运动学在边坡落石计算中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2004,25(2):46-50.(ZHAO Xu , LIU Han-dong. Application of kinematics in the calculation of falling rock[J]. Journal of North Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power , 2004 25(2) :46-50.(in Chinese))

[12] 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 Hong-mei , YI Peng-ying. Research on dangerous rock movement route[J]. Journal of Chongqi Jianzhu University 2003 25(1) :17-23.(in Chinese))