

落石运动模式与运动特征现场试验研究

叶四桥^{1,2}, 陈洪凯², 许江¹

(1 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:落石试验是寻找落石运动敏感因素、探求运动规律和获取运动参数的较好方法。为厘清落石形状、块度大小和运动模式对其运动特征的影响规律,进行了112块落石现场试验;以落石形状、质量和运动弹跳次数为变量,统计分析了水平运动距离、运动速度的变动规律。试验结果表明:不管何种形状落石,运动模式均为滚动和弹跳,无明显滑动段;切坡平台和公路内侧沟槽拦截了59%的试验落石,显示出了良好的拦截能力,可考虑作为被动拦截措施;近球形、方形和短柱状落石水平运动距离、运动速度等均较大,且运动特征类似,而长方形、片状落石运动能力较差,且同长柱状落石运动特征相似,综合而言落石圆柱状假定较球形假定更符合实际;落石质量越小则运动能力越差,但随机性越大;落石以滚动模式为主时动能损耗大,弹跳为主时则水平运动距离和运动速度较大,落石同坡表的碰撞会急剧改变落石的运动参数与方向。

关键词:落石; 运动特征; 运动模式; 试验研究

中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)02-0018-06

Rockfalls Movement mode and Movement Features by Field Tests

YE Si-qiao^{1,2}, CHEN Hong-kai², XU Jiang¹

(1. Key Lab. for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, China, Chongqing 400044; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

Abstract: Field test is a better way to find sensitive factors, explore movement law and get movement parameters in rockfall study. To analyze the influence of rockfall shape, size and movement patterns on its movement law, 112 rockfall field tests are implemented. Statistics of horizontal movement distance and velocity under the influence of rockfall shape, size, and rebound time are conducted. The results show that no matter what shape rockfall is, its movement mode are limited to rolling and bouncing, and there is no apparent sliding section. And about 59% test rockfalls are intercepted by the platform of slope and roadside trench which can be selected as passive mitigation measures. The spherical, square and short cylinder rockfalls have longer horizontal movement distance, bigger faster velocity, and the same movement features. But the rectangular and sheet rockfalls have poor movement capacity, and their movement features are similar to that of the long cylinder rockfall. To sum up, the cylinder assumption for rockfall movement calculation is more realistic. The rockfalls with smaller quality have the worse movement capacity but the greater randomness. When the rockfalls roll mainly, the kinetic energy loss is serious, and both horizontal movement distance and velocity are greater when it bounces mainly. Furthermore, when

收稿日期:2010-11-05

基金项目:国家自然科学基金(50678182);重庆市自然科学基金(CSCT, 2010BB4265);重庆交通大学青年科学基金(2006-016)

作者简介:叶四桥(1978-),男,博士,副教授,主要从事岩土及地质灾害防治有关研究工作,(E-Mail) yesiqiao@gmail.com。

rockfall collides with the slope surface, its movement parameters and direction will change dramatically.

Key words: rockfall; movement features; movement mode; field test

落(滚)石是山区 3 大地质灾害之一^[1],其被动防治有赖于对其运动行为的准确掌握^[2-5]。落石试验常用来寻找影响其运动特征的敏感因子^[6-7],考察各影响因素下的运动特性规律,反算运动计算所需敏感参数^[8],从而为落石运动计算奠定基础或检验有关算法的可靠性,并最终为拦石网、拦石墙、明洞等被动防治措施布设提供依据^[9-12]。如黄润秋等^[13]通过现场试验研究了落石运动斜坡特征、落石形状等对运动过程加速度和恢复系数的影响;以及通过试验研究了斜坡平台对落石的停积作用^[14]。Azzoni 等^[15]通过落石试验确定了其横向偏移比为 10%; Chau 等^[16-17]通过现场、室内试验研究了落石运动有关恢复系数的变化规律等等。

试验方法由于其可重复性,相对可控性和便于设定斜坡、落石和初始运动条件,在落石运动特性敏感性研究、参数获取等方面显出了充分的优越性。为考察落石形状和块度大小等因素对其运动特征的影响规律,寻找敏感因素,进而为建立落石计算方法提供试验依据,进行了现场试验研究。

1 试验方案

1.1 试验场地

试验场地选择在重庆交通大学 E 区建筑工地斜坡地带,场地地质和地形条件为重庆地域常见的公路、房屋建筑后岩质切坡。该斜坡总体上陡下缓,总体高度 57.3 m,斜坡段水平长度 53.7 m,总体平均坡度略缓于 45°。斜坡上部为盘山公路修建时形成的切坡,共 3 级台阶,中间平台为盘山碎石公路,下部为缓斜坡,底部有宽阔空旷地带,便于落石安全停止。试验斜坡特征见图 1。斜坡从上至下划分为 AB、BC……IJ 命名的共 9 段,试验坡段坡表特征及几何参数见表 1。

1.2 试验岩块特征

验所选落石块体为打制砂岩块体,岩块重度 26.3 kN/m³,落石质量在 3~150 kg 之间。将其修

整成不同大小、不同形状的块体,堆积于试验断面坡顶备用,详细测量块体尺寸及形状指标并编号。完成试验的共 112 块,其中立方体块体 25 块(图 2),长方形块体 25 块(图 3),近球形块体 22 块(图 4),片状块体 25 块(图 5),圆柱状块体 15 块(图 6)。

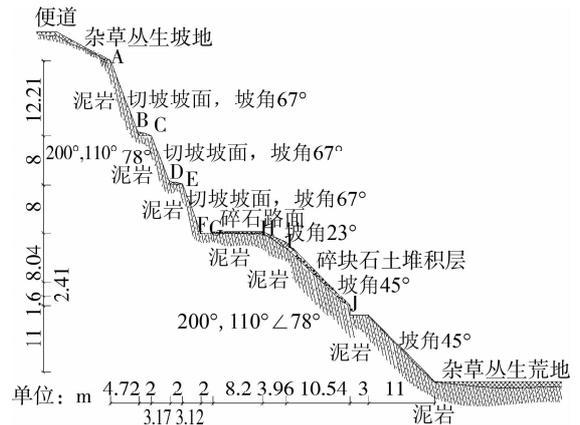


图 1 试验坡段剖面图

表 1 试验坡段特征表

坡段编号	坡度/(°)	坡长/m	覆盖层及植被状况
AB	67	13.26	基岩裸露,强风化泥岩,坡表起伏在 10 cm 左右。
BC	9	2.02	风化剥落碎石堆积,厚 0.03~0.2 m 许,少量枯草。
CD	67	8.69	基岩裸露,强风化泥岩,坡表起伏在 8 cm 左右。
DE	11	2.04	风化剥落碎石堆积,厚 0.1~0.3 m 许,少量枯草。
EF	67	8.69	基岩裸露,强风化泥岩,坡表起伏在 15 cm 左右。
FG	0	2.0	强风化泥岩裸露,为公路内侧水沟,深 20 cm。
GH	0	8.20	碎石路面,硬结情况良好。
HI	23	4.31	块石、碎石堆积层,坡表起伏 10~40 cm 以内。
IJ	45	14.93	碎块石堆积层,坡表起伏 10~30 cm 以内。



图 2 立方体块体



图 3 长方形块体



图 4 近球形块体



图 5 片状块体



图 6 圆柱状块体

1.3 试验方法与步骤

测量试验坡段地质和几何特征,选定落石试验断面,并自公路内侧边沟处开始垂直于试验断面间隔 2m 打网格,以控制水平坐标变化。定好测量网格并做好有关准备、安全防护工作后,记录落石编号和试验顺序号,将落石置于试验断面坡顶,放开后让其自由下落,实际为起始运动速度为 0 的坡表滚动和滑动。同时在侧向和坡顶竖向 2 个方向摄像记录落石运动过程与轨迹,保留相关影像资料,便于回放分析,以及为后续提取落石运动参数提供影像截图。同时记录和描述落石运动模态,包括轨迹转换点、碰撞点、最终停止点等,落石停止后测量落石最终运动水平距离等并做好记录。对每块落石重复进行以上工作。

2 形状对落石运动模式的影响

2.1 共性特征

各种形状落石坡表运动状态均以滚动和弹跳下落为主,除少数落石起始运动段有滑动情形外,不管何种形状落石在运动全过程无明显滑动段。落石沿坡表的滚动是相对试验断面有一定偏移的滚动,且滚动过程中以绕长轴滚动为主,有个别绕短轴翻转情形。每次碰撞均会急剧改变落石运动模式及方向,碰撞弹跳次数在 1~4 次之间,弹跳次数多的基本没有滚动段,反之则滚动段占比较大。

切坡平台是主要的碰撞弹跳位置,仅极少落石沿平台滚落。由于平台表面有一定厚度的风化剥落碎屑堆积物,每次于平台上的碰撞,均造成落石动能明显损耗,甚至有 14 块落石停止于下级台阶上,说明对于落石灾害威胁地区,于切坡台阶上设置适当的缓冲层对于防治落石灾害是有利的,停止于台阶上的落石以长方形和片状为主。

有 52 块最终停止点位于坡脚公路内侧的水沟沟槽内,尽管仅 2 m 宽,20 cm 深但拦截了超过 46% 的落石,显示公路内侧设置缓冲沟槽对落石防护极有利,若能适当加深、加宽沟槽,在槽底填筑缓冲材料,会是比较理想的拦截工程措施。加上前述 14 块停止于台阶上的落石,未能冲出公路内侧沟槽的落石占 59%,说明切坡段设置缓冲台阶以及落石槽对落石有较好拦截效果,值得予以重视。

2.2 不同形状落石的运动模式

近球形落石自启动始即为滚动下落,同坡表接触较少,后续运动以滚动和弹跳为主,弹跳飞行时自身也在不停转动,无滑动段。

方形落石运动模式同近球形类似,以滚动和弹跳为主,下落过程中不断翻转,无明显滑动段。

长方形落石运动模式多为绕长轴的滚动,后续运动个别块体、少数时刻绕短轴转动,以及碰撞和弹跳,无明显滑动段。同方形和近球形落石相比其滚动坡段占比较大。

片状落石后续运动状态同其初始运动特征关系较大,若起始运动为贴坡表的滑动,则 AB 坡段运动有极短滑动区段,但多数中途会转为滚动,以及后续弹跳,若起始运动为竖向圆盘状滚动,则会迅即滚动下落,以及后续弹跳,同起始运动为滑动情形相比,其运动速度和运动距离均较大。

圆柱状落石起始运动为滚动,后续运动滚动、翻转和弹跳均有,并非单纯圆筒状的滚动,总体而言运动速度较快、运动距离较远。当柱体长度显著大于直径时,滚动模式表现较突出,类似于长方形落石,当柱体长度和直径相当时其运动模式同近球形和方形落石类似。

3 形状、块度大小对运动距离的影响

形状是影响落石运动模式、运动参数的主要因素之一,也是计算模型中必须给予合理假定的关键因素之一。为使试验结果得以直观化,便于找出敏感因素,统计了各运动参数的平均值、最大值、最小值和变动区间,平均值可反映样本的均值,便于不同影响因素之间的比较,变动区间反映某统计量的变动范围,区间越大说明随机性也越强。

3.1 形状对落石水平运动距离的影响

落石最终停止点离起始点的水平距离可反映落石在坡表的运动能力,代表了落石纵向威胁范围,也是落石防治与否及被动防治工程布设的依据。试验结果表明,在坡段和试验条件相同的情况下,落石的运动能力以近球形最大,圆柱状和方形次之,以长方形和片状最小(图 7)。其中近球形落石平均水平运动距离达 19.7 m,圆柱状落石为 19.3 m,方形落石

为 18.3 m,而长方形落石仅 16.8 m,片状落石为 16.3 m,对于片状落石若不考虑如 B6 类似的圆盘滚动起始运动情形,相应平均运动距离会更小。也就是说,形状不同的落石可达威胁范围是不同的,越近球形威胁范围越大,试验结果也说明现有落石计算模型中通常将落石形状假定为球形是偏保守的,也是基本可以接受的。但自然界球形落石是很少见的,而是以方形、长方形和片状为常见,试验中圆柱状落石水平运动距离平均值较近球形小,但较其它形状大,结合长、短柱状落石运动模式分别同长方形、方形落石运动模式类似的特征,理论计算模型采用圆柱假设应该更合理。

方形、近球形和短柱状落石在水平距离最大、最小值和变动区间上均极其接近(图 7-8),同前述两类落石运动模式类似相印证;片状和长方形落石水平运动距离不管是最大值还是最小值,均较小,说明运动能力相对较差;但长柱状和长方形落石水平运动距离近似(图 9);从变动区间反映的随机特性来看,圆柱状落石最大,可覆盖其它形状落石对应随机区间。从以上各方面来看,也说明圆柱状落石能够代表各种形状落石的水平运动特征。

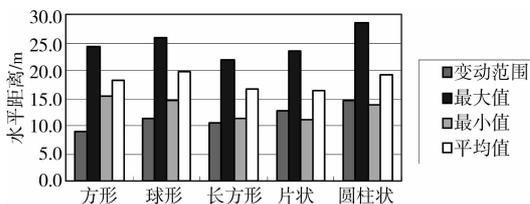


图 7 不同形状落石水平运动距离对比

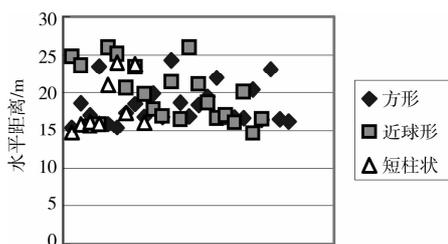


图 8 短柱状与近球形、方形落石水平距离的比较图

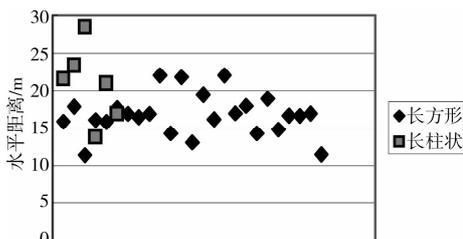


图 9 长柱状与长方形落石水平距离的比较

3.2 块度大小对落石水平运动距离的影响

落石质量也是影响落石运动特征参数的因素之

一,在岩块重度相同的情况下实际上反映的是落石块度大小的影响。一般而言,落石体积越大,运动过程中受植被、坡表起伏阻尼的影响相对越小,从而有相对较大的加速度、速度、动能、运动距离及威胁范围。试验结果也反映了这个规律,从平均值来看质量越大的落石水平运动距离越大(图 10)。从单个大质量落石水平运动距离来看,100 kg 以上的大质量落石并没有出现较大的水平运动距离,分析原因可能有 2 个方面:1) 限于试验条件最大落石仅约 150 kg,对于试验坡段而言还没有大到可忽略坡表糙率影响的程度;2) 从试验现象来看,大体积落石在台阶处碰撞后,台阶上原松散堆积的风化碎屑四溅,同时落石速度明显折减,显示有较大的动能损失,堆积物的消能作用反而更加明显。另外,尽管 20 kg 以下小质量落石水平运动距离相对较小,但其变动区间较大(图 10),说明小质量落石确实受枯草、坡表起伏等影响较大,导致变化范围加大,而大质量落石表现出较强的“抗干扰能力”。

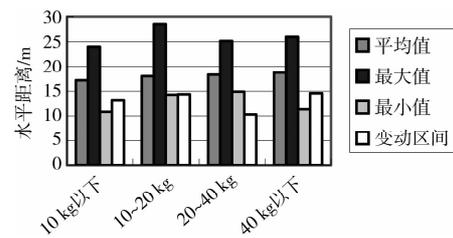


图 10 落石质量对水平运动距离的影响

试验过程中特地以坡表碎屑物质在同样条件下使其自坡顶滚落,小颗粒碎屑也会以滚动、弹跳等模式下落,但几乎均被第 1 台阶拦截,由于质量过小,在坡表运动上段其动能便被耗尽而停止,也反映了质量越小,水平运动能力越小的规律。

3.3 运动模式对落石水平运动距离的影响

试验表明落石运动模式主要为弹跳和滚动,相应的弹跳段占比越高则滚滑段占比则低,且运动模式会极大的影响其运动路径与参数。弹跳次数越多则以弹跳为主,反之则以滚动为主,所以分析弹跳次数的影响可反映其运动模式的影响。

当落石运动以滚动下落为主时(弹跳 1 次),落石水平运动距离不管是平均值,还是最大值、最小值均较小,说明滚动模式沿程动能损耗较大,能够威胁的范围有限;而弹跳次数为 2 次、3 次和 4 次的水平运动距离平均值逐渐增大,弹跳次数较多时,如 4 次弹跳的平均距离最大,也反映了以弹跳运动为主时运动距离会较远,也就是说弹跳运动动能损失相对较小(图 11);2 次弹跳情形变动区间明显最大,说明运动模式的转换会造成动能较大突变。也说明弹跳过程是落石

运动模式、运动能力发生急剧改变的阶段,需要在落石研究如路径、运动特性参数计算中予以重点关注。

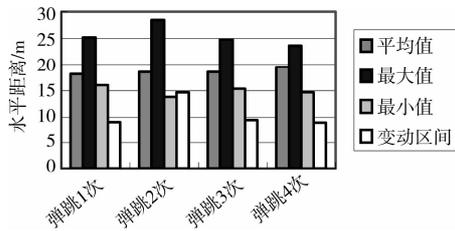


图 11 弹跳次数对落石水平运动距离的影响

4 形状、块度大小对运动速度的影响

落石从坡顶以初始速度为 0 滚落,达到坡底(碎石公路路面)的时间可由试验测定,由于运动剖面相同,走过的坡面长度、下落高差相同,设等效坡表长度为 S ,则有如下关系成立

$$S = \frac{1}{2}at^2 \quad (1)$$

式中 a 为落石运动过程平均加速度, t 为落石从起动至到达公路路面处所耗时间。假设为匀加速运动,则运动末端相应落石运动速度,可视为运动过程近似最大速度为

$$v = at = \frac{2S}{t} \quad (2)$$

通过式(2)可将所测得运动时间折算成近似最大速度(简称落地速度),并分析形状、块度大小等对落地速度的影响,实际也反映了运动加速度、最大动能等运动参数的变动规律。

通过试验测得时间估算落石运动过程平均加速度为 $2.3 \sim 4.3 \text{ m/s}^2$,平均速度则为 $6.3 \sim 8.7 \text{ m/s}$,若假定落石为匀加速运动,则相应到达公路路面速度为平均速度的 2 倍,即 $12.6 \sim 17.4 \text{ m/s}$ 。

4.1 形状对落石运动速度的影响

试验表明落地速度平均值近球形落石最大 (14.27 m/s),圆柱状 (13.89 m/s)、方形 (13.49 m/s) 次之,片状 (12.85 m/s) 最小,长方形 (11.56 m/s) 落石居中(图 12),说明同样条件下近球形、圆柱状、方形落石有较大的运动速度、加速度和动能,片状落石则最小。方形、片状和近球形落石落地速度变动区间分别达 6.92 m/s 、 5.76 m/s 和 5.63 m/s ,显出较强随机性,方形落石可能和碰撞因素有关,而片状落石同其初始运动状态关联较大,若排除初始圆盘滚动情形,片状落石运动会更慢;反观长方形和圆柱状落石其落地速度变动区间仅约 3.0 m/s 。综合而言,对于当前落石运动计算而言,从运动速度、加速度、动能等参数来看,球形落石假定是可以接受的,但过于保守。

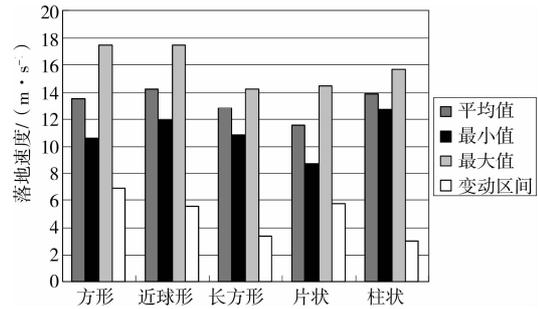


图 12 落石形状对落地速度的影响

4.2 块度大小对落石运动速度的影响

从试验结果来看,对于试验坡表, 20 kg 以下落石落地速度不管是平均值、最大值、最小值还是变动区间均差不多,而 20 kg 以上落石相应参数类似,若以 20 kg 为界,质量小则落地速度小,大则相应有较大的落地速度(图 13),如 20 kg 以下落石落地速度平均值约为 12.9 m/s , 20 kg 以上约为 13.5 m/s ,尽管质量影响明显,但没有形状影响显著。 40 kg 以上个别落石落地速度倒要小一些,如某 112 kg 的落石落地速度仅为 8.72 m/s ,前已述及,限于试验条件大质量落石规律可能未完全反映。

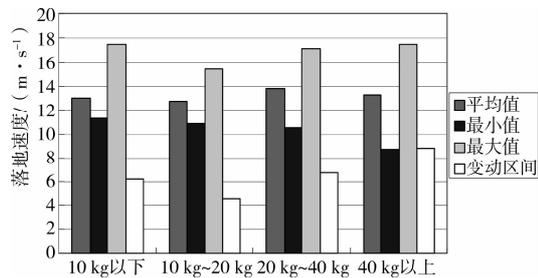


图 13 落石质量对到达时间的影响

4.3 运动模式对落石运动速度的影响

试验表明落石弹跳次数为 2 次、3 次和 4 次时,落石落地速度的平均值、最大值、最小值和变动区间均相近(图 14),落石弹跳下落过程中弹跳为主,或者弹跳间或滚动的运动模式其运动速度和动能变化规律相差不大,但弹跳次数为 1 次时,落石运动模式以坡面滚动为主,则相应落地速度平均值、最大值和变动区间均显著减小,显示坡面运动能量损耗较大,难以出现较大的运动速度和加速度。

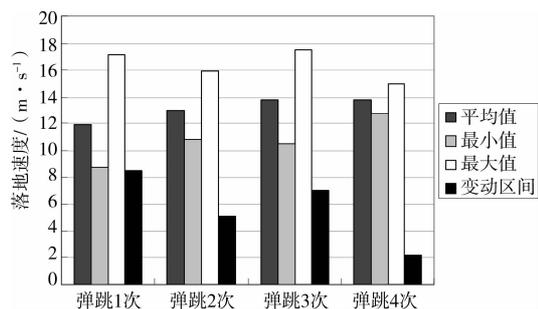


图 14 落石弹跳次数对到达时间的影响

5 结 论

1)从运动模式来看,不管何种形状落石基本均为滚动和弹跳下落,无明显滑动段,说明许多计算模型中引入滑动模式是值得商榷的;总体而言长柱状落石同长方形落石,短柱状落石同方形、近球形运动模式类似。

2)切坡平台缓冲效果明显,加之公路内侧水沟的拦截能力,共拦截了59%的试验落石,在有关落石被动防治工程中,做好切坡平台缓冲,适当设置拦截沟槽是值得考虑的被动防治措施。

3)从水平距离、落地速度等方面统计结果来看,形状是敏感因素,总体而言,近球形、方形和短柱状落石有相对较大的水平运动距离和落地速度,且越近球形越大;而长方形、片状落石则相反,但片状落石受初始运动模式影响较大。鉴于自然界极少球形落石,计算模型中常用的落石球体假定是保守的。鉴于短柱状落石基本能够反映方形、近球形落石运动特征,而长柱状落石运动特征与长方形落石相仿,圆柱状假定应更能反映实际落石运动特征。

4)从落石块度大小上看,不管是水平距离还是落地速度,落石越小一般显示运动能力也越差,且运动参数离散性越大,说明小质量落石受坡表起伏和植被等偶然因素的干扰越大,而对于大质量落石运动参数变动范围相对较小。

5)落石运动模式是以弹跳为主还是以滚动为主对落石运动参数影响较大,对于滚动模式占主导地位时落石运动能力较弱,而以弹跳模式占主导地位时往往运动距离较远、动能和速度较大,当滚动和弹跳模式多有转换时,则运动特征参数离散性较大,显示弹跳过程会急剧改变落石运动行为。

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 LU-QING, YANG ZHI-FA, XU BING. Rockfalls and rockfall hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 225-231.
- [2] 赵旭,刘汉东. 水电站高边坡滚石防护计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3742-3748.
ZHAO XU, LIU HAN-DONG. Research on protective structures for high slopes rockfall around a hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3742-3748.
- [3] KAWAHARA S, MURO T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43: 329-340.
- [4] 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(S1): 2826-2832.
WU SHUN-CHUAN, GAO YONG-TAO, YANG ZHAN-FENG. Random prediction of rockfall of open-pit mine high-steep slope based on orthogonal experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(S1): 2826-2832.
- [5] DORREN L K A, BERGER F, PUTTERS U S. Real-sized experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6: 145-153.
- [6] SPANG R M. Rockfall barriers-design and practise in europe[C]//Proc. one day seminar on planning, design and Implementation of debris flow and rockfall hazards mitigation measures. Hong Kong, 1998, 91-98.
- [7] AZZONIA BARBERA G L, Zaninetti A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and geomechanics, 1995, 32: 709-724.
- [8] PEILA D, PLIZZA S, SASSUDELLI F. Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(1): 1-24.
- [9] 余军. RX-050型SNS柔性防护网系统拦截落石试验总结报告及应用前景分析[J]. 路基工程, 2002(1): 12-22.
YU JUN. Summary report and application analysis of RX-050 SNS flexible protection net by rockfall intercepting tests[J]. Subgrade Engineering, 2002(1): 12-22.
- [10] LABIOUSE V, HEIDENREICH B. Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, (9): 1981-1993.
- [11] PAOLO PARONUZZI. Field evidence and kinematical back-analysis of block rebounds: the lavone rockfall, northern Italy [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(5): 783-813.
- [12] GIANI G P, GIACOMINI A, Migliazza M, et al. Experimental and theoretical studies to improve rockfall analysis and protection work design [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(5): 369-389.
- [13] 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.

4) 研究成果为水网密集区粘土路基当量回弹模量的合理确定提供了新的视角和途径,具有现实的理论意义和工程实践价值。

参考文献:

- [1] AASHTO Guide for design of pavement structures[S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
- [2] 杨树荣, 拱祥生, 黄伟庆, 等. 非饱和粘性路基土回弹模量之研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 225-229.
YANG SHU-RONG; GONG XIANG-SHENG, HUANG WEI-QING, et al. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 225-229.
- [3] LI T, BAUS R. Use of soil stiffness gauge for evaluating modulus of granular base materials[C]//85th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM), 2006.
- [4] SUNIL SHARMA, ANIMESH DAS. Backcalculation of pavement layer moduli from falling weight deflectometer data using an artificial neural network[J]. Can. J. Civ. Eng., 2008, 35: 57-66.
- [5] BLATZ J, CUI Y, OLDECOP L. Vapour equilibrium and osmotic technique for suction control [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26 (6): 661-673
- [6] 杨明, 余飞. 膨胀土路基毛细水上升规律及处置技术[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 26-30.
YANG MING, YU FEI. Capillary water upward law and treatment technique of expansive soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 26-30.
- [7] 曹长伟. 路基湿度状况及模量调整系数研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [8] BULUT R, LEONG E. Indirect measurement of suction[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(6): 633-644
- [9] SOONKIE N, MARTE G, PANAYIOTIS D, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. Engineering Geology, 2010, 110(1/2): 1-10.
- [10] ZAPATA C, HOUSTON W, HOUSTON S, et al. Soil-water characteristic curve variability [C]// Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000, Advance in Unsaturated Geotechnics. Denver: University of Denver, 2000: 84-124.
- [11] DAEHYEON KIM, JONG RYEOL KIM. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1470-1479.
- [12] AASHTO. T292-91 Resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials [S]. USA: AASHTO Publications Department, 1993.
- [13] 陈声凯, 凌建明, 张世洲. 路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定[J]. 公路, 2006(11): 148-152.
CHEN SHENG-KAI, LING JIAN-MING, ZHANG SHI-ZHOU. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil[J]. Highway, 2006(11): 148-152.
- [14] THOMPSON M, ROBNETT Q. Resilient properties of subgrade soils [J]. Journal of Transportation Engineering, 1979, 105: 71-89.
- [15] HUANG YANG H. Pavement analysis and design (second edition)[M]. USA: Prentice Hall, 2003.

(编辑 王秀玲)

(上接第 23 页)

- HUANG RUN-QIU, LIU WEI-HUA. In situtest study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 882-891.
- [14] 黄润秋, 刘卫华. 平台对滚石停积作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 516-524.
HUANG RUN-QIU, LIU WEI-HUA. In - situ test study of characteristics of rolling rock blocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 516-524.
- [15] AZZONI A, DE FREITAS M H. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1995, 28(2): 111-124.
- [16] CHAU, K T, WONG R H C, LEE C F. Rockfall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1996, 35, Section 4-5. 662-663.
- [17] CHAU, KT, WONG, RHC, WU JJ. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts [J]. International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39: 69-77.

(编辑 胡玲)