

文章编号: 1000-7598(2012)01-0191-06

石经山藏经洞坡体滚石灾害危险性分析

王学良^{1,2}, 张路青¹, 张中俭^{1,2}, 张爱民³, 云桂荣³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 房山云居寺文物管理处, 北京 102407)

摘 要: 对影响滚石的岩性、地形坡高和地质结构等因素进行现场地质调查和分析, 初步确定存在潜在滚石的坡体。借助 BJS-2B 型激光断面仪, 选取上述坡体的 4 个典型剖面进行坡形测量。结合数值分析结果, 确定块石 A~F 发生滚石的可能性较大。现场测量确定 A~F 块石的体积。在此基础上, 利用 Rocfall 模拟软件对 6 块块石滚落的运动特征(运动距离、弹跳高度、动能和运动速度)进行预测和分析。结果表明: 块石 D 的失稳对游客的生命安全威胁相对较小, 但会直接导致 7 号洞洞室发生严重破坏; 其余 5 块块石的失稳均会对游人的生命安全造成重大威胁, 但不会严重影响到相应洞室的稳定。建议对上述 6 块块石所在坡体的关键部位及时采取工程措施进行加固。

关 键 词: 石经山藏经洞; 滚石灾害; 数值模拟

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Rockfall hazard analysis of slope at sutra caves of Shijing Mountain

WANG Xue-liang^{1,2}, ZHANG Lu-qing¹, ZHANG Zhong-jian^{1,2}, ZHANG Ai-min³, YUN Gui-rong³

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Administration of Cultural Relics of Yunju Temple in Fangshan District, Beijing 102407, China)

Abstract: For the sutra caves of Shijing Mountain based on the investigation in site, the lithology, terrain and the geologic structure are analyzed. The potential slopes with rockfall are confirmed initially. Four typical profiles are selected on the slopes and surveyed by BJS-2B laser profiler. With the results of the numerical simulation, the locations A~F on the profiles are confirmed as the potential rockfall sources with the bigger possibility to fall. The volumes of blocks situated at A~F are gained in site. On the basis above, the kinetic characters(run-out distances, bounce height, kinetic energy and the translational velocities) of the six blocks are predicted and analyzed by the help of the rocfall software. The simulation results show that the rockfall of the block D threatened the life safety of the tourists less than other blocks, but it could destroy the sutra cave No.7 greatly. Oppositely, the rockfall of the other five blocks would threaten the life safety of the tourists greatly, but they wouldn't destroy the relevant caves. The suggestion that the key locations and blocks should be reinforced as quickly as possible is given.

Key words: sutra caves of Shijing Mountain; rockfall hazards; numerical simulation

1 引 言

石经山位于北京西南郊的房山区境内, 作为房山云居寺石刻佛教大藏经刊刻起源地, 石经山洞藏的 4 196 块隋唐以来的佛教石经被视为国之重宝。这些石经不仅是我国佛教史上的一宗重要文物, 也是世界文化史的宝贵遗产。为了保存这些石经, 隋唐时期的古人在石经山开挖了数个藏经洞。目前, 发现的共 9 个藏经洞。因长期风化、结构面切割等

内外动力地质作用, 石经山洞室群所在坡体存在诸多稳定性问题。其中, 以滚石为主。这些潜在滚石不仅对洞室群的稳定性产生影响, 在目前主要旅游路线多围绕洞室群的情况下, 对游览此地游人的安全更是存在潜在重大威胁。

对于滚石灾害的调查与分析, 国内起步较晚。社会的巨大需要必将推动边坡滚石的研究向前发展^[1]。如张路青等^[2-4]对公路沿线滚石的风险等进行了系列研究。何思明^[5]、黄润秋^[6]等也进行了相关

收稿日期: 2010-04-16

基金项目: 国家科技支撑项目(No. 2008BAK50B04); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-YW-Q03-02); 国家自然科学基金资助项目(No. 40502027)。

第一作者简介: 王学良, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事地质工程与岩石力学方面的研究工作。E-mail: wxljlu@163.com

理论和试验研究。本文主要采用现场调查和数值模拟等方法,对石经山 9 个藏经洞周边坡体的潜在滚石灾害的危险性进行调查与分析。本文的分析方法与结论等可为滚石灾害危险性分析和防治等提供参考。

2 研究区工程地质条件

石经山地处华北克拉通东部,位于华北平原和太行山的交接处,所在区域的地质构造单元以房山花岗岩体最为典型。在石经山南侧约 2 km 处,发育有沈家庵一下村褶皱带。在石经山东北侧约 10 km 处,发育有中上元古界的黄山店推覆构造,分布范围约 40 km²。总体而言,石经山所在区域的构造运动较为活跃。

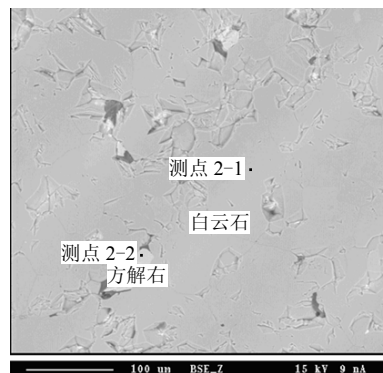
石经山在地貌上属山地类型,区内最高海拔约 410 m。景区内的山脉走向大致为南北,地势北高南低,西侧地形较为平缓,东侧地形较为陡峻。

为获取石经山洞室群所在地质层的岩性方面的地质资料,作者对洞室群附近的岩石进行取样,并利用中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室 Cameca SX51 型电子探针仪对岩性进行了室内测试。测定结果表明,石经山景区地层的岩性主要为大理岩(图 1(a)),基质为他形晶的细腻白云石,均无风化现象。另外,还含有颗粒状方解石,颗粒大小为 10~50 μm,局部有风化现象。局部地层(如 5 号洞洞口附近)夹有石英岩岩脉(图 1(b)),基质以他形石英为主,方解石和钾长石交生,颗粒大小为 25~55 μm,长石有蚀变,方解石风化较严重,局部有空洞。

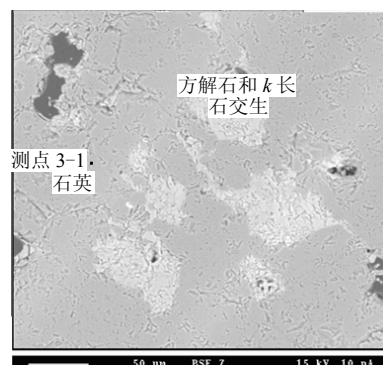
石经山景区出露的地层较为单一(图 2),主要为大理岩地层,局部夹有燧石条带(厚 0.5~2.0 cm)和石英岩脉。大理岩地层呈缓倾状产出,岩层厚度多为 0.5~8.0 m。

洞室群所在坡体节理较发育。按规模来看,节

理级别多为 III~V 级^[8]。为了了解节理的产状情况,作者对所研究洞室群附近的 42 条主要节理进行了统计(图 3)。统计结果表明,1~9 号洞所在坡体附近出露的节理倾向以偏东向居多,其中倾角多在 30°~39°。节理倾向基本与山体坡向一致,初步判断多为卸荷节理。这些卸荷节理和水平层理的存在将完整岩体切割出多块危岩块石。在风化作用下,这些岩体结构面的强度不断降低,由此造成所切割出的危岩块石很容易在重力作用下发生失稳坠落,如图 4 所示。



(a) 大理岩岩样



(b) 石英岩脉岩样

图 1 岩样中矿物的背散射电子像
Fig.1 Back scattered electron image of the mineral of rock



(a)



(b)

图 2 石经山景区地层
Fig.2 Stratum of the Shijing Mountain

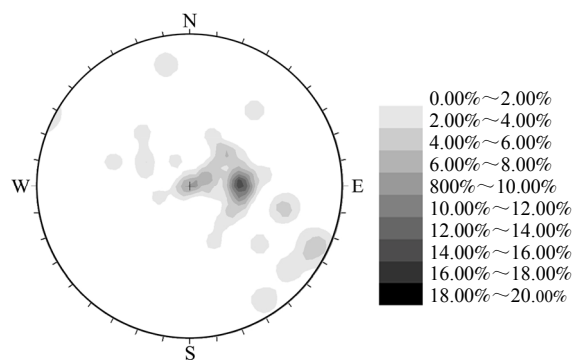


图3 节理统计图

Fig.3 Chart diagrams of joints

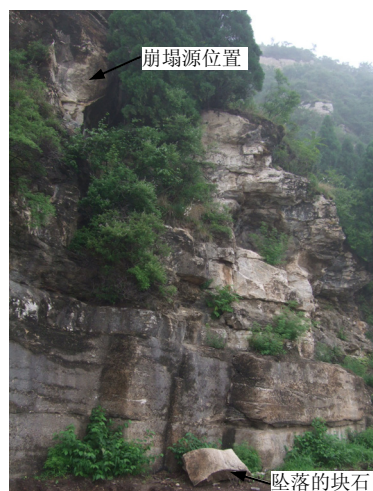


图4 2008年6月发生的坠石事件

Fig.4 Rockfall happened in June, 2008

石经山景区的地表水和地下水主要有大气降水、裂隙水、凝结水等。大气降水中一部分沿沟谷流向山脚,一部分渗入岩体裂隙形成裂隙水。大气降水和裂隙水对岩体结构面强度的弱化作用和冻胀等作用威胁着坡体的稳定。凝结水主要存在于藏经洞内岩壁表面,对坡体稳定性影响相对较小。

3 洞室群坡体滚石灾害危险性分析

在石经山景区内已知的藏经洞有9个,大多具有千年的历史。这些洞室群作为不可移动文物具有重要的文物价值。石经山景区现有主要的旅游景点多分布在洞室群附近。目前,受长期风化、结构面切割等内外动力地质的作用,石经山洞室群所在坡体稳定性问题较多。如在2008年6月,在9号洞附近坡体即发生一次坠石事件(图4),幸未造成洞室破坏及人员伤亡。现场调查发现,藏经洞所在坡体的失稳形式主要为滚石。本文着重就潜在滚石的位置、体积、影响范围等进行现场调查和数值分析。

3.1 确定滚石物源区

主要通过现场调查滚石的影响因素,初步分析

并确定潜在滚石所在坡体。在此基础上,借助坡体稳定性模拟软件,确定坡体上发生滚石可能性较大的部位,即物源区的位置。

3.1.1 现场地质调查

滚石灾害的发生是多种因素综合作用的结果,确定这些因素的发育程度是滚石危险性分析的重要内容。影响因素的选取受现场地质条件、诱发条件、易于获取程度及专家经验等影响。结合现场条件,本文主要对石经山景区的岩性、地形坡高和地质结构等因素进行调查分析。

(1) 岩性

岩土体的特性决定斜坡岩土体强度和受力变形破坏特征等,同时也是滚石等地质灾害发生、发展和演化的重要条件。不同的工程地质岩组往往控制着斜坡体不同的破坏方式,也一定程度上控制着不同地质灾害的类型和规模。大量的滚石资料表明^[9]:滚石灾害的发生受硬脆性岩石的控制性作用明显,如在石灰岩、大理岩、花岗岩、砂岩、砾岩等的岩石中较易发生。经实验室测定,石经山景区的地层岩性基本为大理岩,局部夹有石英岩脉,属于易于发生滚石的岩石类型。

(2) 地形地貌

统计资料表明^[10],多数滚石都发生在坡度大于50°、相对高度大于20 m的斜坡上。坡度愈陡、高差愈大,滚石发生的机率愈大,规模也愈大。洞室群周边坡体的坡度统计如表3所示。

(3) 地质结构(岩体质量)

按照岩体结构控制论^[8],滚石等地质灾害的发生受到地质结构的控制。岩体的完整程度反映了结构面的发育程度、结合程度及主要的结构面类型等信息。岩石的坚硬程度则反映了是坚硬岩还是软岩及其不同的风化情况^[11]。本文参照由岩体完整程度和坚硬程度确定的工程岩体分级标准对洞室群附近的岩体质量情况进行了分级^[11]。级别越高(Q值越小)的岩体越有可能成为潜在滚石源。

在分级中主要参照岩体基本质量指标Q,其计算公式为

$$Q = 93 + 3R_c + 250K_v \quad (1)$$

式中: R_c 为岩石饱和单轴抗压强度,根据现场调查和表1确定; K_v 为岩体完整系数,根据现场调查和表2确定。

限制条件: 当 $R_c > 82K_v + 30$ 时, $R_c = 82K_v + 30$ 和 K_v 代入公式计算Q值; 当 $K_v > 0.0382R_c + 0.4$ 时,应以 $K_v = 0.0382R_c + 0.4$ 和 R_c 代入公式计算Q值。

通过现场调查和式(1)计算,确定各洞室群所在坡体的岩体质量级别,如表3所示。

表 1 R_c 与定性划分的岩石坚硬程度的对应关系表
Table 1 Correspondence relationship between R_c and the degree of rock hardness

R_c /MPa	>60	60~30	30~15	15~5	<5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

表 2 J_v 与 K_v 对照表
Table 2 Correspondence relationship between J_v and K_v

J_v /(条/ m^3)	K_v	完整程度	J_v /(条/ m^3)	K_v	完整程度
<3	>0.75	完整	20~35	0.35~0.15	破碎
3~10	0.75~0.55	较完整	>35	<0.15	极破碎
10~20	0.55~0.35	较破碎			

注： J_v 为岩体体积节理数。

在上述地质调查的基础上，对具有潜在滚石的坡体进行了初步划分和归类，如表 3 所示。在归类的坡体上选取 4 个典型剖面（图 5），并利用 BJSD—2B 型激光断面仪（理想精度为 1 mm）对这 4 个典型剖面的坡形进行了测量。

表 3 现场调查分析结果
Table 3 Results based on investigation in site

坡体	岩性	地形坡度 /($^{\circ}$)	岩体质量级别	Q
1~2 号洞坡体	大理岩	35~50	II	463
3~7 号洞坡体	大理岩夹石英岩脉	近直立	III	407
8、9 号洞坡体	大理岩夹石英岩脉	近直立	III	364

3.1.2 数值分析

Cundall 于 1971 年提出离散元方法用于分析非连续性岩体的稳定性^[12]，随后该方法得到迅速发展。本文拟采用二维离散元方法针对上述 4 个典型剖面（见图 5）的稳定性进行数值分析。模拟基于弹塑性模型和摩尔-库仑准则，考虑地层的近水平层理及近平行坡面的卸荷节理。通过设定岩体某一风化状态下的物理力学指标（表 4^[13]），并假定只在重力作用下，分析坡体的稳定性参数（位移、应力、应变等），找出相对容易失稳的部位。

表 4 UDEC 数值模拟中岩石和结构面的物理力学参数
Table 4 Physico-mechanical parameters of rock and structural surface used in numerical simulation of UDEC

岩体	密度 /(g/cm^3)	内聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	泊松比	法向刚度 /(MPa/m)	切向刚度 /(MPa/m)
岩石	2.65	10.0	45	26	10	0.25		
水平层理		1.0	20				280	280
卸荷节理		0.1	15				28	28

模拟发现，潜在不稳定块体与卸荷节理密切相关，较明显受结构面切割。A~F 被确定为发生滚

石可能性较大的部位（见图 5）。

3.2 潜在滚石块石体积

在滚石灾害危险性评估中，滚石的体积是一基本参数。滚石运移的距离和能量等也需要在确定滚石体体积的基础上进行分析^[14]。对块石 A~F 体积的确定主要依靠现场测量和根据节理发育的密集程度^[14]进行估测。测定结果如表 5 所示。

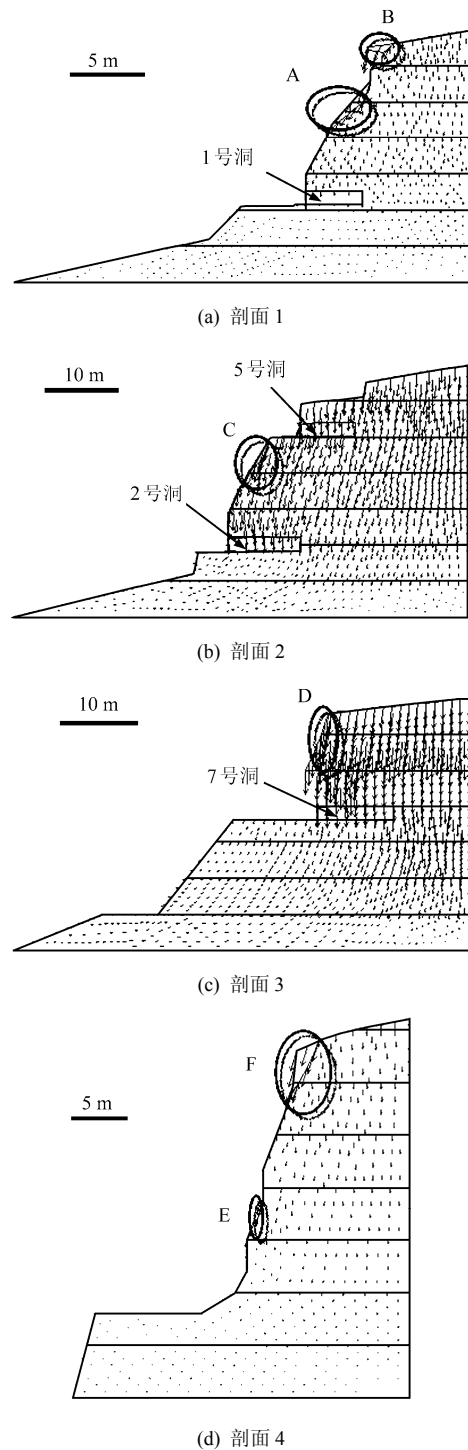


图 5 4 个典型剖面的位移矢量图及潜在滚石部位 A~F
Fig.5 Displacement vectors of the four typical profiles and potential rockfall place of A~F

表 5 模拟各块石滚石中所用的参数

Table 5 Parameters used in simulation of rockfall

块石编号	法向恢复系数	法向恢复系数	摩擦角 ($^{\circ}$)	崩落次数	崩落体质量 /kg	初始水平速度 /(m/s)	初始垂直速度 /(m/s)	初始角速度 /(rad/s)	坡面粗糙 度等级	最小截止速度 /(m/s)
A	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	1 000	0	0	0	2	0.1
B	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	75	2±1	2±1	0	2	0.1
C	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	100	0	0	0	2	0.1
D	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	1 500	0	0	0	2	0.1
E	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	150	2±1	2±1	0	2	0.1
F	0.35±0.02	0.85±0.03	32±0.02	1 000	1 000	0	0	0	2	0.1

3.3 滚石运动特征预测与分析

在滚石灾害预测与防治中，滚石体最大运移距离是一重要参考内容。块石的运移距离受坡体倾角和物理性质等方面的影响。如在坡体表面有植被发育时，块体的滚落将被有效地削弱或阻止。确定滚石运移距离的方法主要有经验数值确定、理论计算和数值模拟等。本文主要以数值模拟进行分析。

Rocfall 数值模拟软件基于统计模型，可以模拟潜在失稳块体从坡体单一点或某一线上滚落的过程，记录运动轨迹中各参数的随机分布等^[7, 15-16]。在计算过程中，确定剖面的几何形态和坡体的恢复系数是其中最为重要的两个方面。对于前者，作者借助 BJSD-2B 型激光断面仪（理想精度为 1 mm）已对剖面的几何形态进行了精确测量。

恢复系数（法向和切向）与边坡的坡度、坡面覆盖层的物理力学性质、滚石自身的大小等因素有关^[15]。相比切向回弹系数，法向回弹系数相对更容易受坡体几何形状的影响^[1]。切向恢复系数的数值则明显受植被发育、坡体物理性质及块石大小的影响^[17]。恢复系数的获取主要通过现场试验或对已有滚落块体进行反分析。而对于名胜景区，尤其是重要文物所在坡体来说，通过现场对块石的滚落试验势必会损坏文物。在此情形下，作者选取与研究对象坡形和植被发育情况等基本相近的已有资料^[15]进行本文的计算。

采用表 5 所示参数及数值，对上述确定的 6 块滚石（块石 A~F）的运动距离、弹跳高度、动能和速度等进行了模拟。由表 6 可以看出，相比其他块石来说，近垂直坠落块石 D 的运移距离最近，在 3.32~5.48 m 之间。块石 D 前方的路线最宽约 10 m，从躲避范围来看，可以适当避开块石滚落范围。而对于其余 5 块而言，其滚落距离在 11.05~37.26 m 之间，最大弹跳高度为 8.87 m，均超越其坡体前方游览路线的范围，且最大能量基本在 8~285 kJ 之间，最大速度在 13~18.3 m/s 之间，极易对游人的生命安全构成严重威胁。

表 6 滚石块石分析结果

Table 6 Results of rockfall analyses

块石编号	运移距离 /m		弹跳高度 /m		总动能 /kJ		水平速度 /(m/s)	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
A	37.26	15.65	5.20	0.02	181.83	11.50	18.20	2.35
B	31.37	13.77	3.14	0.04	8.35	0.59	13.63	1.70
C	23.53	15.17	4.65	0.11	7.96	0.38	12.60	2.74
D	5.48	3.32	6.76	0.18	98.21	6.01	11.40	2.39
E	16.08	11.05	8.87	0.01	18.30	1.52	15.62	2.27
F	20.00	15.90	3.11	0.01	284.60	9.45	17.60	3.55

4 结 论

(1) 石经山洞室群坡体地层岩性为大理岩，局部夹燧石条带和石英岩脉。岩体结构面类型主要以近水平层理和卸荷节理为主。岩体质量等级为 II~III 级。由于长期风化、结构面切割等内外动力作用，洞室群所在岩体坡体稳定性问题较多，其中以滚石为主。

(2) 通过对岩性、地形坡高和地质结构等因素的现场调查，确定块石 A~F 失稳的可能性较大。对滚石运动特征的预测与分析表明：块石 D 的失稳对游客生命安全威胁较小，但会直接导致 7 号洞洞室的严重破坏。其余 5 块块石的失稳会严重威胁游人的生命安全，但不会严重影响到相关洞室的稳定性。

(3) 建议对上述 6 块块石所在坡体的关键部位及时采取工程措施进行加固，如可采取锚固和设置防护栏等措施。

致谢：现场调查和实验室分析等方面得到了中国科学院地质与地球物理研究所杨志法研究员、陶克捷研究员的指导，也得到了云居寺文管处相关人员的帮助，在此表示感谢！

参 考 文 献

- [1] 杨志法, 张路青, 尚彦军. 两个值得关注的工程地质力学问题[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 10-14.
YANG Zhi-fa, ZHANG Lu-qing, SHANG Yan-jun. Two engineering geomechanics subjects to be worth paying

- close attention[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2002, 10(1): 10—14.
- [2] 张路青. 滚石机理及滚石灾害评价研究[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2003.
- [3] 张路青, 许兵, 尚彦军, 等. 川藏公路南线八宿—林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1551—1557.
- ZHANG Lu-qing, XU Bing, SHANG Yan-jun, et al. Engineering geological investigation and assessment on rockfall hazard along Basu Linzhi section of south line of Sichuan-Tibet highway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1551—1557.
- [4] 张路青, 杨志法. 公路沿线遭遇滚石的风险分析—案例研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3700—3708.
- ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa. Risk analysis of encountering rockfalls on a highway—a case study[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3700—3708.
- [5] 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 Si-ming, WU Yong, LI Xin-po. Research on restitution of rock fall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 623—627.
- [6] 黄润秋, 刘卫华, 周江平, 等. 滚石运动特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1296—1302.
- HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua, ZHOU Jiang-ping, et al. Rolling tests on movement characteristics of rock blocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1296—1302.
- [7] YILMAZ I, YILDIRIM M, KESKIN I. A method for mapping the spatial distribution of RockFall computer program analyses results using ArcGIS software[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2008, 67(4): 547—554.
- [8] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [9] 胡厚田. 滚石与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [10] 柴宗新. 山地灾害概念之我见[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 91—94.
- CHAI Zong-xin. Definition of mountain hazards[J]. **Journal of Mountain Science**, 1999, 17(1): 91—94.
- [11] 张咸恭, 王思敬, 张倬元. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture. Nancy: [s. n.], 1971.
- [13] 胡波, 王思敬, 刘顺桂, 等. 基于精细结构描述及数值试验的节理岩体参数确定与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (12): 2458—2465.
- HU Bo, WANG Si-jing, LIU Shun-gui, et al. Determination and application of jointed rock mass parameters based on fine structure description and numerical experiment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, (12): 2458—2465.
- [14] JORD CORMINAS, RAMON COPONS, JOAN MANUEL VILAPLANA, et al. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra[J]. **Natural Hazards**, 2003, 30(3): 421—435.
- [15] CHOI Y, LEE J Y, LEE J, et al. Engineering geological investigation into rockfall problem: A case study of the Seated Seokgayeorae Image carved on a rock face at the UNESCO World Heritage site in Korea[J]. **Geosciences Journal**, 2009, 13(1): 69—78.
- [16] RocScience Inc. RocFall 4.0 (2000). Software for risk analysis of falling rocks on steep slopes[R]. Toronto: RocScience Inc., 2000.
- [17] DORREN L K A, BERGER F, PUTTERS U S. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes [J]. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2006, 6(1): 145—153.