

# 滚石灾害研究现状及发展趋势<sup>\*</sup>

沈均, 何思明, 吴永

(中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041;  
中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041)

**摘要:** 滚石是我国西部山区常见的一种地质灾害, 它分布范围极广, 发生突然, 频率高, 严重威胁其周围的人类以及各种构筑物。目前, 国内外有关滚石的理论研究比较薄弱, 以致滚石灾害的防治工作受到严重的影响。基于对国内外大量滚石灾害研究资料的分析, 将其研究现状概化为滚石风险分析、滚石运动轨迹、滚石冲击力以及滚石防护等4个方面。据此对滚石研究的发展趋势进行了探讨, 以便为滚石灾害的机理研究和治理提供参考依据。

**关键词:** 滚石; 滚石灾害; 研究现状; 发展趋势

**中图分类号:** TD164    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0122-04

## 0 引言

滚石, 是指个别块石因某种原因从边坡和陡崖表面失稳后经下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种的组合沿着坡面向下快速运动, 最后在较平缓的地带或障碍物附近静止下来的一个动力学过程。当滚石运动范围内有人类活动或人类构筑的设施并引起一定的损失时, 就构成了滚石灾害。特殊的地质地貌条件以及频繁的地震活动、特殊的气候条件、人类活动等直接或间接地成为滚石事件的触发因素。

滚石是我国山区常发生的一种自然灾害, 特别是西部山区交通干线、输油(气)管线沿线、山区城镇、输变电路、水电站场址等地随处可见, 分布范围极广, 发生突然, 频率高, 防不胜防, 对其危害范围内的各种构筑物、人类活动构成了严重的威胁。如: 宝(鸡)-成(都)铁路大滩-一军师庙之间仅1.6 km范围内, 从1961~1981年的20年间就发生了46次滚石灾害, 砸坏铁轨、车辆, 造成多次停车事故。在川藏公路然乌-八宿段修建的一处钢筋混凝土滚石防护结构, 在竣工仅1年后, 就有多处被滚石砸坏, 丧失了滚石防护功能。而在“5.12”汶川大地震中, 有关滚石砸坏桥梁、

隧道、砸毁房屋的事件更是不计其数。

20世纪50年代以来欧美许多国家对滚石灾害的防护措施进行了系统的研究。而我国滚石防治工作较好的部门主要是铁路交通系统, 铁路部门在长期实践的基础上总结出滚石灾害治理的一系列经验和方法。但总体来说, 我国对滚石灾害的研究和防治技术的开发都重视不足, 致使相应的防治技术较为落后。

基于上述情况, 目前有关滚石灾害研究现状可以综合概化为4个方面: ①滚石灾害风险评价; ②滚石运动轨迹研究; ③滚石冲击力研究; ④滚石防护。随后对滚石研究的发展趋势进行了探讨。

## 1 滚石灾害风险分析

灾害风险是指在给定灾害环境下发生某种程度损失的可能性。而滚石灾害的风险, 则是指客观存在的滚石灾害条件下人类活动或设施遭受某种损失的可能性。目前对滚石灾害进行风险分析的方法有如下两种:

(1) 由受灾对象的数量和易损性来获得可能的相对损失, 该损失与相对危险性的乘积即为相对的风险水平<sup>[1]</sup>。如: ROFRAQ<sup>[2]</sup> (rockfall risk assessment for Quarries) 一种基于统计理论的经验方

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572158)

作者简介: 沈均(1981-), 男, 四川广元人, 在读硕士, 主要从事山地灾害形成机理及防治技术研究。

E-mail: shenjun585@163.com

法, 该方法假定滚石发生是一系列事件的结果, 通过收集资料将各自事件发生的概率相乘再用修正系数进行修正, 从而得到滚石灾害风险评估指标。章照宏<sup>[3]</sup>在美国俄勒冈州公路局 1990 年提出的最广泛应用“落石灾害评价系统”(RHRS)基础上, 引入目前国际上较为认可的边坡岩体分类指标(SMR), 以公路边坡为例, 建立了系统化的边坡落石综合评价方法和主要针对关键因素的单因素风险分析方法。这种方法比较适合我国工程应用。

(2) 直接由滚石发生的频率来计算公路上行人、车辆等遭遇滚石的概率及伤亡的概率<sup>[4,5]</sup>。采用该方法, 可对公路上行人或车辆的分布特征进行统计或适当假定, 然后直接利用滚石发生的频率来计算公路上的行人、车辆等遭遇滚石的概率, 并可进一步结合承灾体的易损性来获得经过不同滚石区时的风险水平。

张路青<sup>[6]</sup>等在工程地质力学综合集成方法论(EGMS)的指导下, 根据现场调查、专家经验、理论分析并结合滚石区范围内的人类活动和潜在滚石在时间和空间上均匀分布的假定, 利用贝努力公式和泊松分布给出了静止车辆、移动车辆、行人等情况下遭遇滚石的概率计算方法, 并由遭遇滚石的概率及承灾体的易损性分析, 进一步得到公路上车辆和行人经过不同滚石区时受滚石冲击而致命的风险水平  $R$ :

$$R = HV, \quad (1)$$

式中:  $H$  为滚石危险性, 取决于滚石发生的频率和滚石事件的强度;  $V$  为承灾体的易损性, 由滚石事件的强度和承灾体的特征来决定。

虽然如此, 由于缺乏资料, 要进行完全定量或绝对的风险评价是不可能的。但是, 如果风险分析的目的仅用于滚石灾害的分区或将来防护对策实施时的资金配置, 进行半定量和相对的风险评价是可以满足相应要求的。

## 2 滚石运动轨迹研究

作为山区基本建设中常遇到的一种工程地质灾害, 滚石灾害防治结构的设计依据主要是边坡滚石的运动轨迹。由此可见, 要对滚石灾害进行防治, 首先要做的是确定滚石的运动轨迹, 以现场调查为基础估算滚石的飞行距离, 飞行高度和撞击速度以及对防护结构的撞击能量大小等参数, 从而为滚石防护设计提供可靠的依据。

目前, 关于边坡滚石运动问题的研究分析方法可以归纳为两类, 即以试验研究为主的经验方法和以理论推导为主的方法。前者主要包括现场试验研究以及室内比尺模型试验研究, 试验研究的数据具有准确、客观、综合的特点, 试验研究的方法也是确定基本物理力学参数, 深入理解边坡滚石问题的重要方法, 而一定数量的试验数据是研究滚石问题不可或缺的, 也是正确理解滚石问题的基础, 但是试验研究的数据缺乏系统性, 并且具有区域局限性强的特点, 这使得试验方法的结果不具备广泛的工程意义。理论推导的方法主要是以运动学和动力学理论为基础, 建立合理的数学计算模型。

由于影响滚石运动的参数本身就具有不确定性, 使得滚石运动轨迹的计算变得非常复杂, 为此国外学者采用概率的方法, 引入概率分布函数来反映模型输入参数的不确定性<sup>[7-8]</sup>。针对滚石不同的运动方式, 如滚石滑动、腾跃、碰撞弹跳以及滚动等, 国内许多学者对此也进行了相关研究<sup>[9-15]</sup>, 得到了各种运动模式的运动轨迹计算方法。

## 3 滚石冲击力研究

在实施滚石灾害的防治工程时, 关键的问题是如何量化滚石施加在防护结构上的冲击力, 它直接关系到防治结构的选用、防治结构尺寸拟定和结构设计等。因此, 长期以来国内外许多学者都致力于滚石冲击力的研究<sup>[16-23]</sup>, 但都不尽完善。目前有关滚石冲击力的计算主要有如下方法。

### (1) 悬臂梁、简支梁冲击力计算公式

这类方法以材料力学为基础, 将滚石防护结构看成是梁板结构。工程应用结果表明: 按照此法计算的滚石冲击力非常大, 根本无法应用于实际工程结构设计。其原因在于, 一方面将滚石、防护结构看成是完全弹性材料, 没有考虑到冲击过程中材料可能产生的塑性变形; 另一方面计算模型过于简单, 与滚石对防护结构的冲击过程不符。

### (2) 弹性球的冲击理论

以 Hertz 接触理论为基础, 将滚石的冲击看成是两个球体的对心碰撞, 并通过修正系数综合考虑冲击过程中接触面可能发生的断裂、摩擦、微小凹凸破坏等因素对滚石冲击力的影响。这类方法的重大缺陷在于: 修正系数没有明确的物理含

义,要通过野外试验或经验确定。

### (3) 塑性体与刚性球冲击力计算公式

将滚石看成是刚性球体,而防护结构为完全塑性体,推导了相应的滚石冲击力计算公式。结果表明:按照本方法所确定的冲击力要远小于滚石的实际冲击力。究其原因在于计算模型本身,因为滚石不是刚体而是弹塑性材料;防护结构更不是塑性体,也是典型的弹塑性材料,在冲击过程中,滚石、防护结构等均要产生弹塑性变形。

日本道路协会<sup>[24]</sup>在滚石防护结构设计中,建议按照如下公式计算滚石的冲击力:

$$P = 2.108(mg)^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{2}{3}}H^{\frac{3}{5}}, \quad (2)$$

式中:  $P$  为滚石冲击力(kN);  $m$  为滚石质量(t);  $g$  为重力加速度;  $\lambda$  为拉梅常数,一般为  $1\,000\text{ kN/m}^2$ ,而实际取值在  $1\,000\text{ kN/m}^2 \sim 10\,000\text{ kN/m}^2$  之间;  $H$  为滚石下落高度(m)。

上述公式是将滚石作为刚性球体,通过弹性 Hertz 接触理论获得的。该公式最大的问题是关于拉梅参数的确定,可根据防护结构上不同的垫层材料在  $1\,000\text{ kN/m}^2 \sim 10\,000\text{ kN/m}^2$  之间取值,这个值变化幅度非常大,很难掌握。

## 4 滚石防治

随着人类活动的广度和力度不断加大,多山地带的滚石问题越来越突出,有关滚石灾害及其防治方法的研究也将逐步得到重视。尤其是在“5.12”汶川大地震之后,许多岩体在地震力的作用下已经变成了危岩体,而雨季即将到来,静水压力以及动水压力将对危岩体的稳定性产生重大影响。因此,滚石的防治工作迫在眉睫。目前,滚石灾害的防治方法可分为主动防护和被动防护两大类,可应用于不同的滚石灾害环境。张中俭、张路青<sup>[25,26]</sup>等对现有的滚石灾害防治方法进行了分类总结,如图1所示。

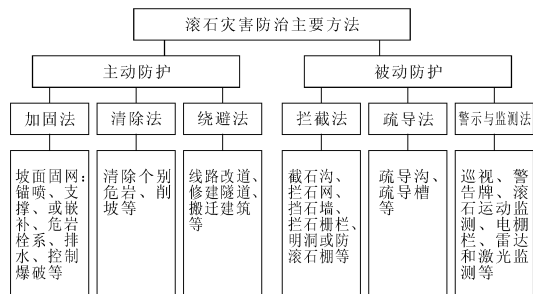


图1 滚石灾害防治方法及分类

## 5 滚石研究发展趋势

综上所述,目前在滚石研究方面总体水平不高,尚未构建一套比较成熟的研究体系。随着山区经济建设快速发展的需要,尤其是满足山区城镇建设、铁路建设以及高等级公路等建设的需求,存在的滚石灾害必须加以治理,而滚石的治理必然要求理论研究水平与之相适应。因此,必须加强滚石灾害的基础研究,从而建立一套完整的滚石研究理论体系以及强有力的滚石灾害防治措施。滚石灾害研究的发展趋势可概括为下述6个方面。

### 5.1 滚石发生机理

滚石的形成和发育是外因与内因耦合破坏作用的结果,而内因以及外因是如何影响滚石发育以及两者之间是如何耦合等有待进一步的研究。

### 5.2 滚石灾害风险评价以及灾害评估

通过现场调查,利用GIS等遥感技术对滚石灾害影响区域的工程地质进行分区,绘制危险性区划图,然后利用危险性区划图、数理统计以及数值模拟等手段建立合理的滚石灾害风险评价方法以及滚石灾害评估系统。

### 5.3 滚石失稳判据

从大多数滚石资料可以看出,滚石的发育是从卸荷裂隙开始的。岩体内的初始应力由于外界作用使之释放,而产生与临空面大致平行的裂隙,同时卸荷带的岩体由于围压的降低导致强度降低,加上风化、暴雨及地震作用,使危岩体逐渐发育成形。危岩体所在的地貌部位的卸荷作用发展过程,可以构建滚石的雏形,雏形滚石主控结构面的断裂、扩张、追踪控制着滚石的稳定态势。在合理确定影响失稳因素以及荷载组合影响之后,结合数值计算、模型试验等,按照二维或者三维问题进行滚石稳定计算,虽然实施起来存在相当难度,但是由于实际需要而成为必然的发展方向,因而建立滚石失稳评价标准也是迫切的。

### 5.4 滚石运动轨迹

(1)块石的形状和尺寸对其运动特征(包括平动速度、转动速度、弹射高度、最大运移距离、散落范围等)的影响;

(2)滚石运动所涉及参数的确定,包括:滑动摩擦系数和滚动摩擦系数的确定以及滚石撞击弹跳时的回弹系数的确定;

(3)通过室内试验以及数值模拟等手段,对滚石运动路径进行概率分析,包括对弹射高度、最

大运移距离、散落范围等的概率分析方法, 从而建立合理的滚石运动轨迹方程。

### 5.5 滚石冲击力反演

如前所述, 以往的滚石冲击力计算都进行了一定的简化。如果不考虑撞击时材料产生的弹塑性变形等等, 而能否通过试验手段, 避开弹塑性响应计算的复杂性, 建立滚石冲击力与压痕之间的函数关系式, 从而反演滚石冲击力? 笔者正在从事这方面的研究。

### 5.6 滚石防护及其优化

(1) 优化现有的滚石防治措施, 使其更强、更经济;

(2) 发展滚石拦挡设施的新型缓冲技术;

(3) 滚石灾害防治中的环保意识、美化方法和技术等。

## 6 结束语

鉴于日益突出的滚石灾害问题, 尤其是“5.12”汶川大地震之后, 崩塌滚石灾害的治理问题将会变得更加严峻。为此, 在广泛搜集国内外资料的基础上, 对滚石灾害研究现状以及发展趋势作了系统的描述, 从而为目前乃至今后滚石灾害的研究和治理提供了一定的参考依据。相信随着我国国民经济建设的快速发展, 滚石灾害及其防治方法的研究将越来越受到重视。

## 参考文献:

- [1] Canuti P, Casagli N, Tarchiani U. Rockfall hazard and risk assessment in coastal cliffs [C] // In: Proceedings of the 8th International IAEG Congress. Rotterdam: A. A. Balkema. 1998: 1585 - 1592.
- [2] L. R. Alejano, H. W. Stockhausen, E. Alonso, F. G. Bastante. ROFRAQ: A statistics - based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2008; 1 - 21.
- [3] 章照宏. 边坡落石灾害评价与风险分析[J]. 路基工程, 2007, (1): 158 - 160.
- [4] 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.
- [5] Hungr O, Beckie R D. Assessment of the hazard from rock fall on a highway: discussion [J]. Can. Geotech. J. 1998, (35): 409.
- [6] 张路青, 杨志法. 公路沿线遭遇滚石的风险分析—方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(80): 5543 - 5548.
- [7] Azzoni A, La Barbera G, Zaninetti A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Abstract. 1995, 32(7): 709 - 724.
- [8] Guzzetti F, Crosta G, Detti R, Agliardi F. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock - falls [J]. Computers&Geosciences. 2002, (28): 1079 - 1093.
- [9] 吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 79 - 84.
- [10] 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.
- [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.
- [12] 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.
- [13] 毛胜光, 曹作忠. 以滚石运动确定冰碛土边坡安全平台宽度初探[J]. 矿业快报, 2007, (4): 48 - 52.
- [14] 何思明, 吴永, 杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(80): 2793 - 2798.
- [15] 赵丽娜, 周科平, 高峰, 等. 露天矿边坡滚石运动特征及控制[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 76 - 79.
- [16] Norman Jones, Post - severance analysis of impulsively loaded beams [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, (41): 6441 - 6463.
- [17] Bibiana Mar?, Luccionia, Mariela Luegeb, Concrete pavement slab under blast loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, (32): 1248 - 1266.
- [18] F. Delhomme, M. Mommessin, J. P. Mougin, P. Perrotin. Behavior of a structurally dissipating rock - shed: experimental analysis and study of punching effects [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, (42): 4204 - 4219.
- [19] N. Kishi, H. Konno, K. Ikeda, K. G. Matsuoka. Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rock - sheds [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, (47): 969 - 985.
- [20] Kwai S. Chan, Yi - der Lee. A fracture mechanics - based model for assessing the mechanical failure of nuclear fuel rods due to rock fall [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, (201): 209 - 226.
- [21] B. Pichler, Ch. Hellmich, H. A. Mang. Impact of rocks onto gravel Design and evaluation of experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, (31): 559 - 578.
- [22] Jean - Pierre Mougin, Pascal Perrotin, Michel Mommessin. Rock fall impact on reinforced concrete slab: an experimental approach [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, (31): 169 - 183.
- [23] 何思明, 李新坡, 吴永. 基于弹塑性理论的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1664 - 1669.
- [24] S. Kawahara, T. Muro, Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall [J]. Journal of Terramechanics, 2006, (43): 329 - 340.
- [25] 张中俭, 张路青. 滚石灾害防治方法浅析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 712 - 717.
- [26] 张路青, 杨志法, 徐兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 225 - 231.