

The image features a technical diagram on the left side, set against a light blue background. It depicts a slope with a dashed vertical line. A series of black triangles represents stones falling from the top of the slope. Below the slope, there are two vertical dashed lines labeled t_0 and t_1 . Further down, there is a horizontal line with a series of small squares, and below that, a series of blue circles and triangles. A vertical dashed line is labeled t_4 . The right side of the cover is a solid dark red color.

斜坡落石研究

章广成 唐辉明 吕庆 高旭 著



科学出版社

斜坡落石研究

章广成 唐辉明 吕庆 高旭 著

国家自然科学基金(No. 41202216, No. 41472265)

岩土钻掘与防护教育部工程研究中心

资助

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书主要介绍斜坡落石灾害碰撞与运动轨迹的理论、试验和数值模拟技术。斜坡落石灾害是常见的山区地质灾害之一,研究落石灾害与地面碰撞过程及运动轨迹对进一步开展落石灾害防护工程设计具有重要的理论和应用价值。本书基于落石灾害运动过程的室内和现场试验,综合运用监测技术、理论分析和数值仿真等方法,在落石形成与诱发因素、落石碰撞理论、落石碰撞特征参量、落石碰撞破碎机制及运动轨迹等方面开展了基础研究。

本书可供一级学科为土木工程、地质工程等专业本科及以上的学生、教师、科研人员和相关专业从业人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

斜坡落石研究/章广成等著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050512-5

I. ①斜… II. ①章… III. ①斜坡-落石-研究 IV. ①P642.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267782 号

责任编辑:闫 陶 何 念/责任校对:邵 娜

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16

2016年11月第 一 版 印张:10

2016年11月第一次印刷 字数:237 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

斜坡落石灾害是山区主要的地质灾害类型之一,具有点多、面广、规模小、暴发性强和致灾严重等特点,且具有极强的随机性,难以准确预测。崩塌落石研究具有很强的应用性,可为落石灾害防护设计提供技术支撑。

崩塌落石启动后,根据落石运动状态特点,可分为两个过程:①与坡面碰撞过程;②落石空中跳跃过程。这两个过程的不断交替直至最终停止构成了落石的完整运动轨迹。其中,落石与坡面碰撞过程是开展落石灾害研究的关键环节,碰撞过程中的关键参量(加速度、速度、冲击力和贯入深度等)的变化规律决定了落石运动轨迹,其与落石初始状态、岩性、形态、尺寸及坡面岩土体性质、宏观地形和微地貌等密切相关,由此导致了碰撞过程的复杂性和运动轨迹的随机性,是目前国内外研究重点和难点。

本书共包括8章,第1章为概论,第2章介绍了落石形成条件与诱发因素,第3章介绍了落石碰撞接触理论,第4章介绍了落石碰撞特征参量,第5章介绍了落石碰撞试验,第6章介绍了落石碰撞破裂机制及其对运动特征的影响,第7章为落石运动轨迹研究,第8章介绍了工程案例。

本书由章广成、唐辉明、吕庆和高旭共同完成,其中,第1章和第3~第5章由章广成、唐辉明、向欣、高旭共同完成,第2章和第7章由章广成、吕庆和高旭共同完成,第6章和第8章由吕庆完成。此外,室内试验和数据处理得到了中国地质大学(武汉)工程学院张成副教授的鼎力相助,现场试验得到了李川鄂、车星的帮助;周春锋参与了滚

石室内碰撞试验、数值模拟的研究；浙江省交通规划设计研究院姜正晖、徐国锋等提供了工程案例的相关资料；图件绘制得到了黄亮、李相慧、郑宇、沈文超、王闯和余清涛等研究生的大力帮助，在此深表感谢。最后，感谢胡新丽教授、吴益平教授、王亮清教授、熊承仁副教授、李长冬教授和向欣博士等团队成员一直以来的支持与帮助。

著作者能力和时间有限，书中不足之处，尚请读者批评指正，并欢迎大家针对本书中涉及的学术问题开展交流，联系邮箱：zhangguangc@foxmail.com。

章广成
2016年7月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 落石定义及相关概念	2
1.1.1 落石的定义	2
1.1.2 落石与崩塌的关系	4
1.1.3 落石与危岩的关系	4
1.1.4 落石与坠石的关系	4
1.2 斜坡落石基本特征	5
1.3 本书主要内容	6
第 2 章 落石形成条件与诱发因素	8
2.1 落石形成条件	8
2.1.1 地形地貌	9
2.1.2 地质构造	12
2.1.3 地层岩性	12
2.1.4 岩体结构	14
2.2 落石形成诱发因素	14
2.2.1 地震	15
2.2.2 气候	15
2.2.3 动植物作用	16
2.2.4 风化作用	17
2.2.5 卸荷作用	18
2.2.6 人类活动	19
2.2.7 其他触发因素	20
第 3 章 落石碰撞接触理论	21
3.1 落石与地面碰撞过程	21
3.1.1 落石碰撞过程中基本特征	22

3.1.2	碰撞分类	23
3.1.3	落石碰撞过程中应力波的传播	23
3.2	落石碰撞接触理论	24
3.2.1	Hertz 弹性接触理论	24
3.2.2	Thornton 弹塑性接触理论	24
3.2.3	BIMPAM 流变接触理论	25
第 4 章	落石碰撞特征参量	33
4.1	落石碰撞过程特征	33
4.2	落石碰撞恢复系数	34
4.2.1	碰撞恢复系数定义	35
4.2.2	碰撞恢复系数影响因素	37
4.3	落石碰撞时间	41
4.4	基于 Logistic 函数的落石碰撞特征参量	42
4.4.1	正碰撞	42
4.4.2	斜碰撞	44
4.4.3	速度与加速度时程函数论证	46
4.5	落石冲击力	49
4.5.1	日本道路公团算法(简称 JRA 法)	50
4.5.2	瑞士联邦政府规范(简称 ASTRA 法)	51
4.5.3	公路路基规范方法(简称 JTJ013 法)	51
4.5.4	冲击力计算公式对比分析	51
第 5 章	落石碰撞试验	53
5.1	落石自由落体室内试验	53
5.1.1	加速度时程曲线	55
5.1.2	速度时程曲线	59
5.1.3	加速度-贯入深度曲线	62
5.2	落石碰撞现场试验	72
5.2.1	试验现场情况	72
5.2.2	试验过程	75
5.2.3	试验结果解析	76
5.2.4	试验结果整理与分析	78
第 6 章	落石碰撞破裂机制及其对运动特征的影响	82
6.1	落石碰撞破裂研究	82
6.2	落石碰撞破裂的室内试验研究	84
6.2.1	试验装置	84
6.2.2	落石试样制备与加工	84
6.2.3	试验方案	87

6.3 落石碰撞破裂机理	88
6.3.1 落石破裂和运动特征定量描述	88
6.3.2 碰撞破裂对落石运动特征的影响	92
6.4 落石碰撞数值模拟	94
6.4.1 落石碰撞数值模拟方法	94
6.4.2 计算模型和计算参数	95
6.4.3 数值模拟结果分析	98
第7章 落石运动轨迹研究	107
7.1 落石运动模式	107
7.1.1 启动阶段	107
7.1.2 碰撞阶段	110
7.1.3 跳跃阶段	111
7.1.4 滚滑阶段	113
7.2 落石运动轨迹预测	114
7.2.1 落石运动轨迹预测的理论模型	115
7.2.2 边坡落石运动的研究方法	117
7.2.3 落石的运动方程及参数确定	118
第8章 工程案例	125
8.1 工程概况	125
8.2 危岩体基本形态及分布	127
8.3 危岩体特征及形成机制分析	128
8.4 危岩体稳定性分析	129
8.5 典型落石运动特征分析	130
8.5.1 危岩 W16 运动特征模拟	131
8.5.2 危岩 W25 运动特征模拟	133
8.5.3 危岩 W32 运动特征模拟	135
8.6 防治措施	136
8.6.1 爆破清除	138
8.6.2 主动支挡	138
8.6.3 被动防护	139
参考文献	141

第 1 章 概 论

落石(rockfall)是山区三大地质灾害之一,亦称为崩塌落石、崩塌、滚石和危岩等。落石灾害具有点多、面广、暴发突然等特点,尽管规模一般较小,但致灾严重等特点(图 1.1、图 1.2),且具有极强的随机性,难以准确预测。



图1.1 小体积落石击毁车辆(来源于新华网)



图 1.2 大体积落石灾害(来源于四川新闻网)

我国落石灾害类型和分布具有明显的区域特性,西南地区及其邻近地区为其主要的发育分布区域。该地区落石灾害的类型多、规模较大、发生频繁、分布广泛、危害严重。近年来各地发生了多起由于落石引起的致灾事件。例如,2004年9月19日,四川省广安市广安区发生一起崩塌灾害,巨石砸坏民房,并致5人死亡;2005年6月10日,四川省绵阳市安县高川乡发生一起大规模的山体崩塌,造成多人死亡;2007年7月28日,四川省北川羌族自治县白什乡后山发生大规模崩塌,崩塌山体体积达 40万 m^3 ,后持续崩塌,累计崩塌方量超过 150万 m^3 ,造成河流堵塞,并造成三个自然村1700多名村民外出困难;2007年11月20日,宜万铁路湖北省境内巴东县木龙河段高阳寨隧道进口处发生岩体崩塌,顺坡而下的巨石堆积于318国道,造成该公路交通干线中断,并将一辆过往客车掩埋,造成至少31人死亡,为一起特大的地质灾害;2008年6月8日大雨引发山体崩塌落石,导致达成铁路一辆货运列车车厢脱轨,造成1死1伤,达成线中断行车,约2000多名旅客被滞留;2012年6月6日重庆市江北区郭家沱铜锣峡突发落石灾害(图1.2),导致两辆轿车被砸扁,一辆货车受损;2015年3月9日广西壮族自治区桂林市叠彩山景区内发生落石,造成7人遇难、19人受伤的重大事故,同年8月21日湖北省恩施土家族苗族自治州利川腾龙洞景区发生落石,导致1人遇难;2016年7月24日峨眉山景区公路因暴雨突发落石灾害,西南交通大学地质学1名学生被落石击中受伤。崩塌落石灾害已经成为制约国民经济发展和威胁人民生命财产安全的重要因素。

1.1 落石定义及相关概念

在有关落石的研究中,总是不可避免地涉及崩塌、危岩和坠石等相关概念,这些概念之间可能存在一定差异也存在一定联系。向欣(2010)在总结和比较了不同学者关于崩塌和落石的定义后,对落石提出如下定义:较陡边坡上的单个或者局部岩体,在地质作用及外界作用的综合影响下,失稳脱离边坡,以自由落体(或飞跃)、滑动、滚动和回弹等运动方式中的一种或几种组合模式快速向下运动。结合该定义,可以分析得到落石与崩塌、危岩、落石和坠石之间的联系与区别。

1.1.1 落石的定义

给出“落石”(也称坠石、滚石)明确清晰的定义是研究其形成机理和运动特性的先决条件。目前对落石的研究往往和崩塌和危岩体紧密相连,然而,对于危岩、崩塌、落石的定义以及相互之间的关系,不同学者之间尚有较大差

异。起初,人们认为落石就是小规模的山崩,或者单个岩块从陡坡上的突然脱落。

例如,1960年铁道部工务局编的《铁路路基养护》中认为山崩和落石的差异唯在规模的大小不同。山崩是巨大的岩土体在震动作用或者长期风化侵蚀作用下,脱离山体,在重力作用下突然而猛烈地从高陡处翻滚运动至较低的地方。如果山崩的规模较小,仅有个别或少数石块,则称为落石。即落石定义是山区的斜坡岩层上小型岩块的坠落,其现象与山崩相似,唯规模较小。

再如,张倬元等(1994)认为,较陡或者极陡斜坡上,大块岩体突然山崩或者滑落,顺山坡猛烈翻滚跳跃,岩块相互撞击破碎,最后堆积于坡脚,这一过程即为山崩,个别巨石崩落则成为坠石。Varnes(1984)则认为,不论岩块尺寸和质量大小,脱落于陡坡或者悬崖,没有横向位移或者伴随少量横向位移地沿着陡坡表面以坠落、弹跳或滚动的形式向下运动的都是落石;Nichol 和 Waters(1983)则将落石的体积限制于不大于 1.5 m^3 。Bourrier(2008)则认为,单个块石从陡坡上脱落即为落石,并认为落石的体积一般不超过 1.3 m^3 。胡厚田(1989)认为,落石是指陡峻斜坡上的个别岩石块体在重力和其他外力作用下,突然向下滚落的现象,落石的形成条件比山崩简单,更容易形成。

从上述定义来看,落石与山崩的差异主要在于规模大小,但没有一个公认的值可以将落石和山崩区分开来。落石的形成机理乃至运动模式与山崩都是极为接近甚至相同的。在随后研究中,人们逐渐淡化了对落石定义中体积和质量大小的限制。Guzzetti 等(2002)认为落石是岩质滑坡快速破坏的形式之一,落石在尺寸上可以是很小的砾石,也可以是几百立方米的大块石,其运动速度可以很小也可以高达每秒数十米。梁伯仁(1989)认为,危岩是落石前的准备岩体,处于不稳定状态但尚未坠落,落石则是危岩产生的现象和过程,其活动块体可能是一块,也可能是多块。张路青(2003)专门撰文讨论落石的定义,认为落石是指个别块石因某种原因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演化过程。陈洪凯等(2005)在研究三峡库区危岩的过程中,提出了危岩、山崩和落石的定义。认为危岩是为由多组岩体结构面切割并位于陡坡或者陡崖上稳定性较差的危岩体;山崩是危岩失稳的瞬间行为;落石则是危岩失稳后的体态。王坛华等(2008)将落石概括为山坡上的表层岩块在各种自然或人为因素的扰动下从坡体表面开始向下运动,岩石在经过滑动、碰撞、斜抛或翻滚的一种或多种运动方式组合后,最终在相对低势地方因动能消失而静止下来的过程。当其运动引起人类生命财产的直接或间接损失即构成落石灾害。黄润秋和刘卫华(2009)则将落石的定义简化为危岩体与母岩分离,以某种形式向下运动。

从上述定义可见,落石是危岩失稳后的动态过程,而山崩和落石的差异

则主要在于失稳物质的体积大小。

综合分析比较上述定义,可以发现落石定义的复杂性。然而,可以通过定义落石的关键词来使其简化,因此定义落石的关键词为较陡或极陡边坡、单个或少量岩石块体、快速运动。因此,结合本书的研究内容,定义落石为,较陡边坡上的单个或者局部岩体,在地质作用以及外界作用的综合影响下,失稳脱离边坡,以坠落、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种的组合快速向下运动即成落石。其中既包括岩石块体在地质作用等因素影响下,遵循一定的破坏机理而脱离母岩向下运动,也包括坡面上的已经脱离母岩而孤立于坡表之上的岩块在外界作用(如降雨冲刷、生物作用)下沿坡面向下运动,落石主要是单个或少量岩块零星地发生,总体上缺乏明显周期。

1.1.2 落石与崩塌的关系

一般认为,崩塌即指陡坡上的巨大岩体或土体,在重力和其他外力作用下,突然向下崩落的现象。在失稳后的运动过程中岩体(或土体)顺坡猛烈地翻滚、跳跃、相互撞击,最后堆于坡脚。落石是指陡峻斜坡上的个别岩石块体在重力和其他外力的作用下,突然向下滚落的现象。从其形成条件和产生原因来看,和崩塌不完全一致,落石的形成条件更简单,更容易,还包括个别岩块的滚落。

1.1.3 落石与危岩的关系

危岩是指尚未完全脱离母岩,但处于欠稳定状态的岩体。虽然尚未失稳坠落,但具有潜在的危險性。危石则是悬崖或陡坡上的已经完全脱离母岩的不稳定岩块,可能是孤石,其体积一般比危岩小。危岩和危石都是落石最主要的物质来源,因此,危岩和危石都可被视为潜在的落石。除已脱离母岩而孤立于坡面之上的岩块,落石的形成机理和分类都较大程度上等同于危岩的发育机理和分类。

1.1.4 落石与坠石的关系

落石是指单个块石因某种原因从边坡和陡坡表面失稳后经下落、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的一个动力学过程或动力演化过程。

对比学者们关于落石和坠石的定义和描述,二者的定义几乎相同,几乎没有差异。国内外鲜有学者论述二者之间的差别。张路青(2003)从落石发

生的物源角度出发,认为落石是坠石的物源之一;何思明等(2015)从落石和坠石发生的最佳坡形出发,认为落石发生的最佳坡度是 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,而坠石发生的最佳坡形为 70° 以上(牛立飞,2014)。可以看出,落石和坠石之间还是有一定的差别的,主要反映在两者的启动上。

综合比较三者之间的联系与区别,本书认为坠石是落石的一种运动形式,或者坠石运动是落石运动的一部分,而坠石则应为落石的一种启动方式。

1.2 斜坡落石基本特征

斜坡落石问题(国内有学者称为落石问题)是一类重要的斜坡工程问题。一直以来,边坡落石问题与边坡的崩塌被归为一类边坡破坏类型,但实际上两者是有差别的。崩塌是指陡坡上的巨大岩体或土体,在重力和其他外力作用下,突然向下崩落的现象。而斜坡落石是指陡峭斜坡上的个别岩石块体在重力和其他外力作用下,突然向下滚落的现象。其特点有人认为落石就是小型崩塌,但其形成的条件和产生的原因,却与崩塌有很大区别。陈喜昌和陈莉(2002)提出斜坡落石单独作为一种斜坡破坏的基本形式,称为剥落与扩离破坏。指出这种破坏类型专指坡肩或坡面上的某些凸出部位,在卸荷应力和差异性风化剥蚀作用下引起相对坚硬的岩体向临空方向外移,继而在重力、裂隙中的水或泥楔作用下产生坠落的现象。这种现象一般是单个或少量岩块零星的发生,总体上缺乏明显周期,随机性很大。

作为一种典型的斜坡浅表部破坏方式,落石与滑坡有显著的不同。一般认为,落石即指陡坡上的个别岩石块体,在重力和其他外力作用下,突然向下崩落的现象。在失稳后的运动过程中岩体顺坡猛烈地翻滚、跳跃、相互撞击,最后停留于坡脚。由于危岩多分布于高陡斜坡上,要想完全防止崩塌落石发生非常困难,因此研究斜坡落石的运动特征和坡面碰撞过程,对制定经济、有效的落石灾害防护措施,具有重要的理论和工程应用价值,也有利于保护人民生命财产安全和维护社会安全稳定。

斜坡落石灾害的分布十分广泛,一直以来,对于斜坡问题的研究主要是以滑坡、崩塌这类斜坡整体性的稳定问题为主,斜坡落石因其单次规模小,发展相对缓慢而未得到应有的重视。实际上斜坡落石是一种十分常见的地质灾害。按长江三峡工程库岸的相关统计资料,至少有66.87%的岸坡存在着斜坡落石现象(陈喜昌和陈莉,2002),在我国其他山区也有广泛的分布。随着山区工程建设的加快以及山区旅游观光开发的快速发展,斜坡落石问题也必然突出(杨志法等,2002)。高速公路边坡上的一块落石造成的灾害损失,

其严重程度并不亚于崩塌、滑坡。因此,研究斜坡落石的发生机理,分析各种影响因素的变化规律,建立评价和估算落石运动轨迹和冲击力的物理力学模型,对于设计经济有效的防护方法和防护结构,提高我国斜坡落石的综合防护技术,减少或消除斜坡落石灾害的损失,都有重要的现实意义。

由于斜坡落石所特有的高速运动、高冲击能量、多发性以及在特定区域发生的时间和位置的随机性或难以预测性及其运动过程的复杂性等特征,使得斜坡落石的防治设计非常困难。至今尚未建立一套完整的设计计算方法。包括落石的速度、动能、运动形式、弹跳高度和运动轨迹在内的落石运动特征是合理设计落石防治结构的前提,其中尤以弹跳高度和冲击能量最为重要。目前这些特征参数还依赖于经验和简单运动学模型计算获得,没有统一的标准可以参考,缺少理论上的系统性和完整性。

1.3 本书主要内容

落石灾害问题由来已久,国内外专家学者对落石的相关问题开展了较为广泛的研究,并取得了显著的成果。但由于落石灾害孕育、发展、成灾的地质过程复杂和影响因素多变,落石运动轨迹预测理论还不完善,导致分析计算结果往往和工程实际情况差异较大,特别是对落石坡面碰撞过程的复杂过程目前还缺少完善、系统的成果,成为制约山区落石灾害防治的重要瓶颈。为此,本书拟从斜坡落石碰撞过程与运动轨迹预测的角度,介绍作者近年来在相关领域取得的最新成果,期望为落石灾害的防控提供参考和借鉴。主要内容包括以下几个方面。

(1) 落石形成条件与诱发因素。讨论了落石的定义,分析了落石的基本特征,归纳了地形地貌、地质构造、地层岩性和岩体结构等落石形成控制条件,总结了落石形成诱发因素。

(2) 落石碰撞接触理论研究。阐述了落石与斜坡碰撞过程中压缩阶段和恢复阶段速度、位移和冲击力演变过程特征,并将碰撞过程分为完全弹性碰撞、完全塑性碰撞和弹塑性碰撞三大类。

(3) 落石碰撞恢复系数。首先归纳了常见碰撞恢复系数的计算模型,并根据碰撞恢复系数大小分布特征,对落石碰撞恢复系数进行了分区。然后分别采用室内试验、现场试验和数值模拟仿真法对不同条件下的落石碰撞恢复系数进行了研究。

(4) 落石碰撞特征参数研究。以 Logistic 函数表征落石碰撞过程中法向速度时程曲线,利用运动学和动量定律,推导了落石与坡面碰撞时的加速度、速度、贯入深度和冲击力随时间变化的理论计算公式。

(5) 落石碰撞破裂机制及影响。自主研发了落石碰撞试验系统,落石的力学性质、撞击速度、尺寸大小以及碰撞入射角对落石的碰撞破裂的影响,同时采用能量恢复系数讨论碰撞破裂对落石运动特征的影响。最后采用数值仿真法与室内试验进行了对比研究,揭示了落石碰撞的碎裂机制。

(6) 落石运动轨迹预测。划分了落石与地面碰撞完整运动过程的阶段,总结了落石运动轨迹预测理论模型,推导了落石运动方程。

第 2 章 落石形成条件与诱发因素

研究落石的形成条件和诱发因素是进行落石灾害防治研究的基础,形成条件决定着落石的发育产生,诱发因素则是落石发生的直接原因。研究落石的形成条件,能有效确定落石的发育规律和分布特征,从而确定落石易发区域;研究落石的诱发因素,能结合落石发育的地质环境条件,进一步确定落石敏感区域。斜坡落石的形成原因是研究落石灾害的基础内容,斜坡落石是在长期的地质环境下内部控制条件和诱发因素共同作用的结果。落石形成条件和诱发因素研究的主要方法为现场调查,由于各影响因素之间的相互作用极为复杂,目前多为定性分析,尚未见文献对其进行定量分析。本章总结了前人关于落石形成条件和诱发因素相关成果。

2.1 落石形成条件

落石灾害的发生必须具备两个条件:一是要有落石的来源,即边坡上必须存在潜在的危岩或危石,这是发生落石灾害的必要条件,这主要取决于边坡的地质环境特征,包括地形地貌条件,工程地质条件和水文地质条件等;二是具备使这些危岩或危石发生滚落的触发因素,这主要是指一些外部的触发作用,可视作落石灾害发生的充分条件,包括大风、降雨、温度变化、动植物的干扰以及各种原因引起的地震动等(阳友奎等,2005;张路青,2003)。

关于落石的形成条件,国内外学者都曾较多论及。国

外学者 Hoek 和 Bray(1981)认为诱发落石的因素包括降雨入渗引起的孔隙水压力变化、暴风雨引起的岩块侵蚀、冻融循环、岩石的化学降解或风化、植物根系生长或高风速作用时植物根系的杠杆作用等。Chau 等(2003b)调查了香港地区 1984~1996 年发生的 368 起落石事件,认为降雨和落石发生有直接关系,尤其是当日降雨量达 150~200 mm 时。Dorren 和 Seijmonsbergen(2003)从前人文献中总结出诱发落石的主要自然因素包括冻融循环、地震活动、暴风雨和上覆积雪的快速融化等。Paronuzzi(2009)的研究也证明了降雨对落石影响明显。而当有人类工程活动时,工程活动对落石的诱发作用则远远大于上述外界因素的影响。Aref 等(2009)在对也门 AI-Huwayshah 地区的落石进行调查后,认为诱发该地区落石的因素有陡坡条件、断裂构造、节理裂隙、降雨、地震、重力、温度、植被和人类活动。目前关于冻融循环诱发落石的研究较少,Sass(2005)和 Matsuoka(2008)发现潮湿环境下长期深度的季节性冻结作用能直接冻裂完整岩体并引发落石。国内学者胡厚田(1989)收集了我国铁路沿线崩塌落石案例,研究了落石的形成条件和形成机理。陈洪凯等(2005)对三峡库区危岩形成的内外因素进行了分析,提出了危岩发育链式机理,并按照失稳类型将危岩分为滑塌式、坠落式和倾倒式。孙云志等(1994)研究了奉节李子垭危岩体的形成机制和稳定性,分析了底部大规模采空区对危岩的影响。刘凯栋(1993)归纳了贵州崩塌落石灾害的分布特征,提出了相应的防治措施。胡厚田(1996)在调查焦柳线红层边坡崩塌落石后,指出软硬夹层常为崩塌落石的分布点。陈洪凯等(2005)认为危岩落石形成的内因有软硬相间地层组合、陡峻的地形及强烈的卸荷作用,而外因则包括裂隙水压力和地震作用。张路青(2003)认为,滑坡、崩塌、坍塌、溜滑、剥落、差异风化、冻融循环、根劈作用、降水、地震、气温变化、人类活动等都可直接或间接地引起一个或多个块石在重力作用下沿斜坡向下运动。

综上所述,影响落石发生的因素非常之多,主要可分为地形因素、地质因素、气候因素和人为因素四大类,或者分为内部因素和外部因素两大类。内部因素包括结构面、岩石物理力学性质,外部因素包括陡坡条件、降雨入渗、冻融作用、风化作用、温度、根劈作用和生物活动等。由于影响落石发生的因素较多,且其间存在不同程度的相互作用,这给落石问题的理解和研究带来了很大难度。虽然落石也是斜坡重力演化的一种形式,但与滑坡、泥石流等动力地质现象有着明显不同的特点,是另一种类型的地质灾害。分析落石形成的内部控制条件和诱发因素,有助于拟定防治落石防护措施。

2.1.1 地形地貌

地形条件是落石形成的重要原因,是控制斜坡落石发生的关键性控制条件。落石的发生过程实质上是储存在潜在危岩体中的重力势能在重力作用