



崩塌滚石灾害形成 演化机理与减灾关键技术

何思明 王东坡 吴 永 欧阳朝军 著
沈 均 李新坡 罗 渝



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

崩塌滚石灾害形成演化机理 与减灾关键技术

何思明 王东坡 吴 永 欧阳朝军 著
沈 均 李新坡 罗 渝

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

“5·12”汶川地震、“9·07”彝良地震及“4·20”雅安地震诱发大规模的崩塌滚石灾害为本书的撰写提供了丰富的背景资料,灾后重建过程中大量的崩塌滚石灾害防治又为本书研究成果的推广应用提供了现实的社会需求。本书共计三篇,分为21章,其中第一篇详细阐述崩塌滚石灾害形成演化机理,共计9章;第二篇重点介绍崩塌滚石灾害防治关键技术,共计8章;第三篇为崩塌滚石灾害工程防治实例分析,共计4章。本书系统阐述崩塌滚石灾害形成演化机理、崩塌滚石与结构物动力相互作用机理及崩塌滚石防治关键技术。本书的研究成果已广泛应用于地震灾后重建中的崩塌滚石灾害防治,取得了良好的经济效益及社会影响。

本书适用于一级学科为土木工程专业、地质工程专业、力学专业本科及以上的学生、教师以及科研院所研究人员或地质灾害、土木工程等相关专业从业人员。

图书在版编目(CIP)数据

崩塌滚石灾害形成演化机理与减灾关键技术 / 何思明等著. —北京:科学出版社, 2015. 5

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-044233-8

I. ①崩… II. ①何… III. ①山崩-地质-自然灾害-形成机制②山崩-地质-自然灾害-灾害防治 IV. ①P642. 21②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 090107 号

责任编辑:韦 沁 韩 鹏 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:320 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

崩塌滚石灾害是我国山区一种常见的地质灾害，具有突发性、可预见性差、速度快、能量高、运动距离远、影响范围大、监测预警困难、危害严重等特点，是山区地质灾害减灾的难点和重点。据全国 290 个县市地质灾害的调查显示，崩塌滚石灾害在地质灾害中所占的比例高达 17%，是除滑坡外的第二大地质灾害类型（三峡库区、川藏公路、地震灾区等都是崩塌滚石灾害的高发区）。在崩塌滚石灾害的诱发因素中，人类工程活动、降雨、地震是主要因素。近年来，我国崩塌滚石灾害频发并造成重大的人员伤亡和财产损失，如 2007 年 11 月 23 日，宜万铁路巴东木龙河段一隧道进口发生岩体崩塌，造成 30 余人死亡的重大事故；2009 年 6 月 5 日下午 15 时许，重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山山体发生了大规模的岩体崩塌，高速运动的崩塌体堵塞铁匠沟，形成厚约 30m，纵向长度约 2200m 的堆积区，掩埋了 12 户民房和铁矿矿井入口，造成 10 人死亡、64 人失踪、8 人受伤的重大损失；2009 年 8 月 6 日四川汉源猴子岩发生大型岩崩堵塞大渡河并造成多人死亡；2008 年“5·12”汶川地震更是引发了数以万计的崩塌滚石灾害，造成的人员伤亡和财产损失难以估量，并成为灾后恢复重建的难点问题。

随着全球气候变暖，地震活动渐强，人类工程活动加剧，我国崩塌滚石灾害的活动性、发生频率与规模都将大幅上升，未来我国崩塌滚石灾害减灾形势将异常严峻。然而，目前我国崩塌滚石灾害研究基础还比较薄弱，防灾减灾能力还难以满足国家经济建设和公共安全的需要。科学地认识崩塌滚石灾害的形成演化规律，发展有效的减灾关键技术，是我们面临的一个重大课题。为此，作者近年来针对崩塌滚石灾害基础研究与减灾技术方面存在的问题开展了大量基础研究工作，借此“十二五”国家重点图书出版规划项目专著出版之际，将部分阶段性成果整理成稿，为提升我国崩塌滚石灾害防灾减灾技术水平作出贡献。

本书总体思路和框架结构如下：

第一篇 崩塌滚石灾害形成演化机理研究

第一篇由第 1~9 章组成，在对地震灾区崩塌滚石灾害调查的基础上，分析静、动荷载及降雨条件下岩体裂隙扩展-贯通的宏细观力学机理，构建危岩失稳的宏细观判据。进一步研究滚石对坡面土体法向冲击的动力响应，建立滚石法向碰撞恢复系数和切向碰撞恢复系数的计算模式，揭示了滚石在坡面上的运动特征。本篇是关于崩塌滚石灾害的理论基础研究工作，是以下各篇的基础。

第二篇 崩塌滚石灾害防治关键技术研究

第二篇由第10~17章组成。分布于崩塌滚石多发区的各种构筑物与崩塌滚石灾害防护工程常常遭受崩塌体的高速冲击,导致结构损伤和破坏。为此,首先建立崩塌滚石灾害动力过程的数学力学模型,搭建崩塌滚石灾害动力过程数值仿真平台,研究崩塌滚石灾害与承灾体的动力相互作用机理,探索崩塌体规模、冲击能量对承灾体变形破坏的定量影响,揭示崩塌滚石灾害对承灾体的冲击破坏机理;进一步开展崩塌滚石灾害工程防治的有效措施,研发新型缓冲垫层结构及耗能减震崩塌滚石防护工程。通过技术研发、系统集成,构建崩塌滚石灾害工程防治关键技术体系。

第三篇 崩塌滚石灾害工程防治实例分析

第三篇由第18~21章组成,重点介绍崩塌滚石防护示范工程应用:丽江—攀枝花高速公路跨运煤缆车棚洞工程、都(江堰)—汶(川)高速公路桃关隧道出口滚石灾害防护工程、芦山震后S210线应急轻钢棚洞动力响应、都—汶公路彻底关大桥桥墩抗滚石冲击防护工程。目前,示范工程已经历多次滚石冲击考验,在西部山区交通道路及灾后重建中发挥了重要作用。

本书是项目组的共同研究成果。全书由何思明统稿,王东坡协助及整理书稿。第1、2、17章由何思明和王东坡执笔;第3、4、7、13章由何思明和吴永执笔,第5、11章由何思明和李新坡执笔;第6、14章由何思明和沈均执笔;第8、10、21章由何思明执笔;第9章由何思明和罗渝执笔;第12章由欧阳朝军和何思明执笔;第15、16、18、19、20章由王坡东和何思明执笔。

近年来,伴随地震频发,地壳处于活跃期,由于地震及余震多次往复作用,造成大部分山体稳定性降低,这些不稳定山体在外界因素诱导下,极易失稳,形成更多的崩塌、滚石灾害。因此,在未来几年甚至几十年,崩塌滚石灾害将进入频发期,本书中的一些理论还有待实践的进一步检验,虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善,但书中难免有欠妥之处,作者衷心希望得到广大读者的批评、指正,共同深入崩塌滚石灾害形成演化机理与减灾关键技术的研究。

本书是在国家自然科学基金项目“大型地震滑坡碎屑化动力学机理与定量风险研究”(41272346)、“十二五”国家科技支撑计划课题“地震扰动区重大滑坡泥石流等地质灾害防范与生态修复”(2011BAK12B03)以及中国科学院STS项目“川藏铁路山地灾害分布规律、风险分析与防治试验示范”的资助下完成的。在示范工程建设中得到了四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院庄卫林、程强、向波,中交第一公路勘察设计院有限公司(简称“中交一公院”)翟敏刚以及西藏自治区公路局张正波的鼎力相助,在此深表谢意。

本书是项目部分研究成果的结晶,汇聚了全体作者的共同心血,在此特向他们致以衷心的感谢。

目 录

前言

第一篇 崩塌滚石灾害形成演化机理研究

第1章 危岩调查与崩塌滚石灾害防治技术概述	3
1.1 高陡斜坡危岩调查	3
1.2 崩塌滚石灾害形成条件分析	5
1.3 崩塌滚石灾害防治技术概述	6
1.3.1 主动防护	6
1.3.2 被动防护	10
1.4 滚石防护工程措施作用原理及适用范围	16
第2章 岩体裂隙开挖卸荷扩展与失稳机理	20
2.1 基本假设及模型	20
2.2 临界裂纹扩展分析	21
2.2.1 压剪状态下裂隙扩展分析	21
2.2.2 主应力 σ_1 不变, 减小围压 σ_3 引发岩体裂隙扩展分析	23
2.2.3 主应力 σ_1 、围压 σ_3 同时减小引发裂隙扩展机理	24
2.2.4 σ_1 、 σ_3 保持不变, 主应力方向发生旋转引发裂隙扩展分析	25
2.3 算例	26
2.4 本章小结	27
第3章 强震荷载诱发岩体崩塌的力学机理	28
3.1 震波特征与岩体裂缝的扩展形态	28
3.1.1 地震波特征及作用模式	28
3.1.2 震波作用下后缘裂缝的拉剪破坏	29
3.1.3 危岩裂缝扩展的临界加速度	30
3.1.4 裂缝岩体的扩展量计算	32
3.1.5 岩体裂缝扩展的累积及其失稳破坏	33
3.2 算例	34
3.3 本章小结	36
第4章 震后暴雨型岩质滑坡启动机理	37
4.1 降雨作用下裂缝的扩展贯通机理	37

4.2	基于上限定理的暴雨型岩质滑坡稳定性分析	39
4.2.1	极限分析上限定理	39
4.2.2	岩质滑坡体启动过程中的内外力功率分析	40
4.2.3	基于上限定理的岩质坡体稳定性分析	41
4.3	算例	41
4.4	本章小结	43
第5章	滚石冲击荷载作用下土体屈服特性研究	44
5.1	研究现状	44
5.2	Hertz 接触力学	44
5.3	滚石冲击荷载下土体初始屈服压力	45
5.4	滚石对地面的冲击	47
5.5	算例	48
5.6	本章小结	49
第6章	滚石坡面法向冲击动力响应特性研究	50
6.1	基于接触理论的滚石坡面法向冲击特性研究	50
6.1.1	基于完全弹性接触理论的冲击响应分析	51
6.1.2	基于弹塑性接触理论的冲击响应分析	51
6.2	滚石对坡面法向冲击的数值计算	52
6.3	计算结果与敏感度的对比分析	55
6.3.1	冲击速度对滚石冲击特性的影响	55
6.3.2	滚石半径对冲击特性的影响	58
6.4	本章小结	60
第7章	滚石冲击碰撞恢复系数研究	61
7.1	问题的提出	61
7.2	滚石法向碰撞恢复系数	62
7.3	滚石切向碰撞恢复系数	63
7.4	算例	65
7.5	本章小结	66
第8章	滚石坡面运动预测	67
8.1	滚石的坡面运动	67
8.1.1	滚石与坡面初次冲击回弹	67
8.1.2	滚石与坡面任意次冲击回弹分析	69
8.2	滚石碰撞恢复系数	70
8.2.1	滚石法向碰撞恢复系数	70
8.2.2	滚石切向碰撞恢复系数	71
8.3	算例	71
8.4	本章小结	73
第9章	地震诱发滑坡的危险性区划研究	74

9.1 Newmark 滑坡永久位移计算模型	74
9.1.1 地震诱发滑坡危险性区划	74
9.1.2 地震诱发滑坡危险性区划结果分析	76
9.2 本章小结	77

第二篇 崩塌滚石灾害防治关键技术研究

第 10 章 滚石对防护结构的冲击压力计算	81
10.1 问题的提出	81
10.2 滚石法向冲击接触理论	83
10.2.1 基本假设	83
10.2.2 球形压模压入半空间问题	83
10.2.3 考虑垫层材料弹塑性效应的接触力学修正	84
10.3 滚石荷载下垫层材料的冲击特性研究	85
10.3.1 完全弹性条件下的冲击特性	85
10.3.2 弹塑性条件下的冲击特性	86
10.4 作用在滚石防护结构上的冲击压力	86
10.5 算例	87
10.6 本章小结	88
第 11 章 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算	90
11.1 引言	90
11.2 Hertz 接触力学	91
11.3 Hertz 接触应力的弹塑性修正	92
11.4 大块石对构筑物的非弹性冲击	92
11.5 大块石对构筑物的冲击压力计算	94
11.6 算例	95
11.7 本章小结	96
第 12 章 轻钢结构棚洞动力仿真及其优化设计研究	98
12.1 计算条件及要求	98
12.1.1 棚洞钢结构基本尺寸	98
12.1.2 棚洞所受荷载	98
12.1.3 材料参数	98
12.2 计算模型	99
12.2.1 几何模型	99
12.2.2 有限元模型	100
12.2.3 边界条件	100
12.2.4 载荷情况	100
12.3 计算结果分析	100

12.3.1	静力学分析	100
12.3.2	滚石冲击作用下棚洞钢结构的动力学响应	102
12.4	本章小结	111
第 13 章	新型耗能减震滚石棚洞作用机制研究	113
13.1	金属耗能减震器 (SDR) 的动塑性特性	114
13.1.1	平均压跨荷载	114
13.1.2	金属耗能减震器的简化本构模型	115
13.2	滚石冲击特性与棚洞板弯曲变形	116
13.2.1	基本假设	116
13.2.2	滚石对棚洞板的弹性冲击	116
13.2.3	棚洞板弯曲弹性变形	117
13.3	耗能减震滚石棚洞结构动力响应	117
13.3.1	耗能减震器未发生褶皱屈服时的冲击耗能特性	118
13.3.2	耗能减震器进入褶皱屈服后的冲击耗能特性	119
13.4	算例	120
13.5	本章小结	122
第 14 章	滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应	123
14.1	滚石对棚洞结构冲击的数值模拟	123
14.1.1	问题描述	123
14.1.2	模型材料参数及本构模型	124
14.1.3	数值计算模型	125
14.2	棚洞动力响应数值计算成果	126
14.2.1	冲击压力与时间的关系	126
14.2.2	冲击位移与时间的关系	127
14.2.3	滚石冲击弹坑形状	128
14.2.4	滚石冲击接触压力分布	130
14.2.5	滚石冲击角度对冲击特性的影响	132
14.3	本章小结	133
第 15 章	滚石冲击钢筋混凝土棚洞板动力响应理论研究	135
15.1	冲击荷载下钢筋混凝土板动力控制方程	135
15.2	基于静力压痕试验的滚石-钢筋混凝土板接触特性研究	136
15.2.1	问题描述	137
15.2.2	静力压痕数值试验	138
15.2.3	滚石冲击荷载下钢筋混凝土棚洞板的动力响应	139
15.3	本章小结	141
第 16 章	滚石防护棚洞 EPS 垫层结构缓冲作用研究	143
16.1	滚石冲击 EPS 垫层模型	143
16.2	静力压痕试验及结果分析	145

16.3	基于本章方法的滚石冲击棚洞动力响应	146
16.3.1	冲击力与时间的关系	147
16.3.2	冲击位移与时间的关系	148
16.3.3	本章方法与动力有限元解的比较	148
16.4	本章小结	150
第17章	混凝土路面在滚石冲击下的动力响应研究	151
17.1	滚石对棚洞结构冲击的数值模拟	152
17.1.1	问题描述	152
17.1.2	模型材料参数及本构模型	153
17.1.3	数值计算模型	153
17.2	棚洞动力响应数值计算成果	155
17.2.1	冲击压力与时间关系	155
17.2.2	冲击深度与时间关系	156
17.2.3	混凝土路面弹坑及应力云图	156
17.2.4	压应力分布	158
17.2.5	冲击速度及回弹	160
17.2.6	冲击速度与冲击压力及冲击深度的关系	161
17.3	本章小结	162

第三篇 崩塌滚石灾害工程防治实例分析

第18章	攀枝花宝鼎特大桥滚石棚洞工程实例	167
18.1	棚洞结构冲击过程的数值模拟	167
18.1.1	问题描述	167
18.1.2	棚洞动力响应数值计算结果	171
18.2	本章小结	176
第19章	桃关隧道柔性钢结构棚洞	177
19.1	工程背景	177
19.2	有限元模型及材料参数	179
19.3	滚石冲击下柔性钢结构棚洞动力响应结果	180
19.3.1	不同冲击位置下棚洞钢结构动力响应分析	180
19.3.2	不同截面尺寸棚洞钢结构的动力响应分析	182
19.4	本章小结	184
第20章	芦山震后 S210 线应急轻钢棚洞动力响应	185
20.1	工程背景	185
20.2	新型轻钢结构棚洞构造	187
20.3	滚石冲击荷载下轻钢结构棚洞动力响应与优化计算	188
20.3.1	轻钢结构棚洞动力有限元模型构建	188

20.3.2	材料参数及计算工况	189
20.3.3	滚石冲击荷载下轻钢结构棚洞动力响应	190
20.4	本章小结	194
第 21 章	都汶公路彻底关大桥桥墩抗滚石冲击防护研究	195
21.1	问题提出	195
21.1.1	灾情描述	195
21.1.2	崩塌体地层岩性及其稳定性评价	197
21.2	大桥桥墩抗滚石冲击防护垫层设计	199
21.3	桥墩防护垫层结构动力限元模型	200
21.4	计算结果与讨论	201
21.5	本章小结	204
参考文献		205

第一篇 崩塌滚石灾害形成演化机理研究

本篇由第1~9章组成，在对地震灾区崩塌滚石灾害调查的基础上，分析了静、动荷载，降雨条件下岩体裂隙扩展-贯通的宏细观力学机理，构建了危岩失稳的宏细观判据。进一步研究了滚石对坡面土体法向冲击的动力响应，建立了滚石法向碰撞恢复系数和切向碰撞恢复系数的计算模式，揭示了滚石在坡面上的运动特征。该篇是关于崩塌滚石灾害的理论基础研究工作，是以下各篇的基础。

第 1 章 危岩调查与崩塌滚石灾害防治技术概述

1.1 高陡斜坡危岩调查

高陡斜坡式危岩是滚石灾害形成的基础，通过对高陡斜坡危岩的调查，查清滚石灾害的结构特征，为危岩稳定性判识提供基础。斜坡危岩调查主要包括以下内容。

1. 斜坡地形地貌特征

(1) 斜坡高度：对于稳定性主要受主控结构面控制的斜坡，主控结构面的贯通程度越好，坡高临空条件越好，对斜坡稳定性越不利，产生崩塌的规模也越大。

(2) 斜坡坡度：坡度越陡，发生崩塌的可能性越大。对稳定性受结构面控制的斜坡，主要受主控结构面与临空面的组合情况影响，坡越陡、临空条件越好，越易发生向临空面的失稳。

2. 结构面特征

1) 结构面方位

(1) 结构面方位主要包括倾向、倾角和结构面组数三个要素。其按照结构面的倾向与斜坡临空面倾向的组合情况，可以分为顺倾、反倾、斜交和横交四类。

顺坡向的结构面往往是控制斜坡失稳变形的主控结构面。当主控结构面倾角大于斜坡坡度时，倾角越大斜坡越不稳定。现场调查表明，当倾角较缓时，岩体沿着主控结构面滑移式或溃屈式运动，主控结构面成为斜坡失稳变形的溃滑界面。结构面走向与边坡走向小角度相交时，往往规模较大。主控结构面陡倾坡外，变形体底部不悬空时，失稳模式以倾倒为主；底部悬空时，失稳模式以错落为主。主控结构面反倾坡外时，主控结构面构成变形体的后缘、顶部边界，失稳模式主要以倾倒、折断式为主。对于主控结构面斜交或横交类坡体，当发育两组或多组结构面时，结构面相互切割可形成楔形块体。主控结构面倾角小于坡角时，被结构面切割的块体发生滑动失稳的可能性较大。因此，主控结构面陡倾对危岩体的稳定性极为不利。

(2) 结构面的空间组合情况对斜坡的崩塌失稳模式的影响不同。当斜坡受一组主控结构面控制时，坡体危岩沿主控结构面以整体滑移式失稳运动。这类崩塌规模大、破

坏性强。当岩体被两组或多组结构面切割时，多组结构面的空间组合分布构成局部的可动块体，切割块体以空间滑移模式失稳的可能性大大增加，同时也提高了斜坡整体失稳的可能性。

(3) 主控结构面的组数和数量、分布间距直接影响边坡的岩体结构单元类型，同时外界干扰因素比如降雨、地震等条件，对结构面的强度也有损伤，同时也影响斜坡的变形失稳模式。

2) 结构面组合

结构面组合特征反映了结构面之间的组合关系、发育程度，决定了崩塌体发育的规模，构成变形体的主控结构面和边界，从而影响斜坡的整体稳定性。结构面组合特征对斜坡的稳定性影响显著，主要表现在以下方面：

(1) 主控结构面的组合分布决定斜坡的稳定性。主控结构面越发育、倾角越大、延伸长度越好，斜坡越容易变形失稳。

(2) 主控结构面的空间组合、间距和延展特征，决定了斜坡危岩的分布区域，从而影响崩塌的发育规模。

(3) 主控结构面受到的地震力影响程度较高。地震力在结构面产生的拉裂效应使得岩体沿结构面被震裂拉开。当斜坡发育多组主控结构面时，地震波在结构面处的折射、反射作用加剧结构面的拉裂效应，影响斜坡稳定性。

3) 结构面特性

结构面的特性主要包括结构面的延伸情况、壁面的起伏程度、张开程度和充填特征等。

3. 岩体性质特征

1) 地层岩性及组合特征

(1) 软硬地层相同的岩体，由于岩体强度不同，硬岩底部的软弱夹层强度大小对岩体的稳定性有直接影响。在坚硬的岩层中，如灰岩、砂岩层中夹杂软弱的泥灰岩、页岩、板岩等软岩，在构造运动和水下渗侵蚀作用下，易产生泥化，强度降低导致上部岩体失稳变形。

(2) 一些岩体下部被震裂严重的部分，结构破碎、强度低，且往往裂隙发育。这类被震裂的岩体遇到震动、雨水的下渗，结构变得更为松散，强度也逐渐降低。这层震裂岩体当支撑力小于上覆岩体的重力时将发生变形从而导致上部岩体的崩落。岩体的基底越软，越容易变形，残留体与母岩分离的可能性越大，稳定性越差。

2) 凹腔发育情况

调查区内地形陡峭，多为高陡状或阶梯状斜坡，为震后崩塌的形成提供了有利的地形条件。受地质构造作用和不同差异风化、卸荷的作用，在岩体的局部位置极易形成众

多深浅不一的凹腔。斜坡岩体由于在地震时受到损伤,坡体存在的凹腔随时间逐渐发展和变大,凹腔上覆岩体的稳定性变差,并在降雨、震动等诱发因素下失稳崩落。分析得出凹腔的深度越大,上覆岩体的稳定性越差。

4. 岩体结构特征

(1) 整体状、块状结构的岩体,其岩层完整性好,块体平均粒径较大,整体结构简单。这些岩体结构斜坡的失稳主要为块体沿结构面失稳变形,以倾倒或整体滑移式为主。根据现场调查,块状结构斜坡岩性以岩浆岩类岩石为主,稳定性普遍由控制性结构面控制。

(2) 层状结构斜坡主要以沉积岩、变质岩类为主。震裂岩体沿着层面以折断-倾倒、整体滑移失稳模式为主,层状结构的斜坡整体性较好,通过调查震后发生的崩塌规模较小。

(3) 在地震区内块状结构、层状结构、碎裂状结构为主的斜坡中,均有崩塌分布。经过汶川震后崩塌的调查,这三大类岩体结构斜坡占震后崩塌数量的绝大多数,在花岗岩、灰岩、千枚岩等地层中均有发育,散体状结构斜坡分布数量较少。由于这些斜坡岩体结构受到地震力的破坏变差,发生的崩塌具有突发性、规模大、破坏性强等特点。

1.2 崩塌滚石灾害形成条件分析

1. 崩塌滚石灾害形成的地形地貌特征

崩塌滚石灾害多发生在 45° 以上的急陡坡和陡崖上。据大面积的调查统计,崩塌滚石发生的最佳地形坡度是 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$; 70° 以上的陡崖则是落石(坠落)发生的最佳坡形。陡坡上突出的陡崖和山脊上“凸”出的山嘴(又称探头崖)是崩塌和滚石发生的最佳微地貌形态。

滚石则是坡面的单块近球状形态的块石,沿坡面向下的滚动现象。发生的地形坡度在 40° 以上。当陡坡面上的孤立近球状岩块,在地震和长期降雨作用下,岩块的自重下滑分力,大于岩块与坡面岩土的摩擦力时,岩块便立即滑移启动→滚动。滚动的速度和距离可通过第9章介绍的公式进行计算。滚石可由崩塌石中的近球状岩块运动转换形成。

2. 崩塌滚石形成的地层岩性特征

软岩类岩、土(黏性土)是滑坡形成的主要物质,而较坚硬的脆性岩石则是崩塌形成的主要物质,如砂岩、石灰岩、花岗岩、玄武岩、白云岩、白云质灰岩、板岩等,这些岩体岩性较坚硬,抗风化能力较强,易形成陡崖、山嘴,但性脆。在重力和振动作用下,陡崖边、山嘴上,易发生沿节理裂隙的张裂和岩体卸荷碎裂。这为崩塌滚石灾害的发生提供了条件。

3. 崩塌滚石形成的结构面条件

控制滑坡形成边界（滑动面）的结构面（优势结构面）一般有 2~3 组，滑坡启动滑移后在结构面上留下擦痕。而崩塌的形成不具备这个特征，崩塌滚石灾害的形成只需两组陡倾节理，构成“X”型，再加上一组近水平的缓倾节理，即可使崩塌岩体与母岩脱离。

崩塌体边界结构面上没有滑移摩擦，所以没有滑移擦痕留下，结构面上呈“凸、凹”不平的锯齿状。

4. 地震对崩塌滚石形成的作用

地震对崩塌滚石的形成作用与对滑坡的形成作用有所不同。地震对滑坡的形成作用体现在增大滑坡的下滑力和减小滑坡的抗滑力上；而地震对崩塌滚石的形成作用表现在地震上、下振动时，将可能发生崩塌的岩体振松；左右剧烈晃动时，将可能崩塌岩体折断，并向临空方向推举、抛出。

5. 水对崩塌滚石灾害的形成作用

水对崩塌滚石灾害的形成作用比水对滑坡的形成作用简单多了，水对崩塌滚石灾害的形成作用主要体现在地表水、河水对坡脚的冲刷作用，使坡脚悬空产生崩塌；水渗入可能崩塌体的裂缝中，有较大的水劈和冰劈作用（冬天裂缝中的水产生冻结，体积增大，使岩体裂缝增大加深）。

6. 人类活动对崩塌滚石灾害形成的作用

人类工程活动也是崩塌滚石灾害形成的主要诱发因素，如工程施工扰动下，岩体中原有的平衡状态被打破。引起岩体内的应力重分布，促使岩体内裂隙不断累积和发展，进而产生宏观断裂，导致岩体发生破坏失稳。

1.3 崩塌滚石灾害防治技术概述

崩塌滚石是山区常见的地质灾害之一。为了防治滚石灾害，通过长期的工程实践，建立了以看（预警报装置，设点看守）、清（清除危石）、支（支挡加固，护坡护墙）、接（墙接同拦）、固（锚固，喷锚封闭）为主的主动防护措施以及遮拦（明洞、棚洞）、防护（SNS 网防护）、绕避（改线绕行）为主的被动工程防治措施。滚石灾害防治方法可分为主动防护和被动防护（图 1.1），下面将对其具体防治方法进行论述。

1.3.1 主动防护

1. 加固法

利用一种或多种手段将危岩体或个别危石变得稳定，从而避免滚石的发生。加固法