

“第三极”科技文库

岩质边坡滚石机理 与非连续变形分析

李俊杰 刘国阳◎著



西南交通大学出版社



李俊杰

1963年11月生，吉林四平人，河海大学教授，博士生导师。1991年12月大连理工大学博士毕业并留校任教；1997年8月晋升教授，2018年12月到河海大学工作；主要从事高坝静动力数值分析、边坡稳定与可靠度分析、工程结构物健康诊断与监测、计算智能及其工程应用等方向研究工作；2016年8月—2019年7月作为中组部、教育部第八批援藏干部赴西藏大学，在藏期间开展山地灾害调查与防灾减灾研究工作。



刘国阳

1989年12月生，辽宁葫芦岛人，工学博士，沈阳工业大学副教授，硕士生导师；主要从事岩质边坡非连续变形分析方法与试验研究。近年来，主持和参与国家重点研发计划、国家自然科学基金等国家级项目5项，省部级科研项目4项；发表学术论文20余篇，大会及分会场报告6次；获软件著作权2项，授权专利6项；获省部级一等奖1项。

“第三极”科技文库

岩质边坡滚石机理 与非连续变形分析

李俊杰 刘国阳 ◎ 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

岩质边坡滚石机理与非连续变形分析 / 李俊杰, 刘国阳著. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.2

(“第三极”科技文库)

ISBN 978-7-5643-8603-0

I. ①岩… II. ①李… ②刘… III. ①岩质 - 边坡稳定性 - 研究 IV. ①TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 021377 号

“第三极”科技文库

Yanzhi Bianpo Gunshi Jili yu Feilianxu Bianxing Fenxi

岩质边坡滚石机理与非连续变形分析

李俊杰 刘国阳 著

责任编辑 王同晓

封面设计 曹天擎

出版发行 西南交通大学出版社

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号

西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都金雅迪彩色印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 240 mm

印张 15.75

字数 296 千

版次 2022 年 2 月第 1 版

印次 2022 年 2 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8603-0

定价 120.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

“第三极”科技文库序言

青藏高原是中国最大、世界海拔最高的高原，也是中华民族的源头地之一和中华文明的发祥地之一，占我国国土面积的约四分之一。青藏高原南起喜马拉雅山脉南缘，北至昆仑山、阿尔金山和祁连山北缘，平均海拔 4 000 m 以上，被誉为“世界屋脊”“世界第三极”；青藏高原南部和东南部河网密集，为亚洲许多著名大河如长江、黄河、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江、恒河、印度河等的发源地，素有“亚洲水塔”之称；青藏高原土地资源地域分布明显，但数量构成极不平衡，宜牧土地占总土地面积的一半以上，暂不宜利用的土地面积超过三分之一；青藏高原动植物品种丰富，但因其所处的地理环境，生态极其脆弱，在已列出的中国濒危及受威胁的 1 009 种高等植物中，青藏高原有 170 种以上，高原上濒危及受威胁的陆栖脊椎动物已知的有 95 种；青藏高原地域广阔，有着漫长而复杂的地质历史，各种环境下形成了丰富的物质；青藏高原光照资源丰富，年太阳总辐射量为 5 000 ~ 8 500 MJ/m²，多数地区在 6 500 MJ/m² 以上；青藏高原的地热资源丰富，热田多、分布广、热储量高。

青藏高原被喻为“世界屋脊”，一向以其独特的人文和自然景观闻名于世，其生态环境与发展问题举世瞩目。高原区域的可持续发展是国家全面进入小康社会、实施西部大开发战略的重要组成部分，而青藏高原地区形形色色的自然保护区，又是世界屋脊上生态环境最奇特、生物资源最丰富的自然资源宝库，具有极高的科学价值。青藏高原因其高海拔使得气候极端且多变，自然灾害频发、多样，生态系统极其脆弱，易受外界因素干扰破坏。深入研究青藏高原的形成机理、生态系统的保护与开发，是贯彻落实党中央关于新时代推进西部大开发形成新格局、推动共建“一带一路”高质量发展的战略部署，主动对接长江经济带发展、黄河流域生态保护和

高质量发展等区域重大战略的必然要求，也是“牢固树立绿水青山就是金山银山理念，切实保护好地球第三极生态”、全面贯彻新时代党的治藏方略的必然要求。

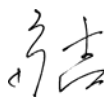
以青藏高原为核心的“泛第三极地区”与“丝绸之路经济带”高度重合，在“一带一路”背景下，既要实现区域发展又要“守护好世界上最后一方净土”，前提是必须以科学研究为基础，从多学科角度深入认识青藏高原的自然、生态和人文。习近平总书记指出，保护好青藏高原生态就是对中华民族生存和发展的最大贡献。新中国成立后，通过自 20 世纪 50 年代以来国家对青藏高原进行的较大规模考察，60—80 年代对部分问题进行的专题性和区域性研究，90 年代以来国家通过专项计划聚集国际科学前沿或国家重大战略需求开展的研究，极大地推动了青藏高原的科学研究水平，也培养了一大批扎根雪域高原的科技工作者，他们克服高原恶劣的自然环境，经过数十年的不断努力，取得了许多具有重要理论和应用价值的阶段性成果。改革开放后的四十余年，国家持续推进援藏工作，大批内地科技人员勇挑重担，深入青藏高原腹地，为雪域高原带来了最新的科研理论及手段的同时，也极大地推进了青藏高原各学科领域的深入研究。

在西藏和平解放 70 周年之际，由西南交通大学出版社推出的“第三极”科技文库丛书，是广大西藏科技工作者和援藏干部在藏期间的科研成果的汇集，集中体现了广大科研人员在各自的学科领域不断探索、勇于创新的精神，广大科研人员扎根雪域高原、努力建设边疆的报国情怀与各个学科领域学术研究的最新进展。

习近平总书记指出，做好西藏工作，“必须坚持治国必治边、治边先稳藏的战略思想”，“必须坚持依法治藏、富民兴藏、长期建藏、凝聚人心、夯实基础的重要原则”。青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔，是地球“第三极”，是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地，是中华民族特色文化的重要保护地。广大科技工作者

一如既往地坚持科技自立自强的精神，按照习近平总书记提出的“在高原上工作，最稀缺的是氧气，最宝贵的是精神”号召，积极投身祖国边疆建设，为青藏高原的科学技术发展、为治边稳藏国家战略的实施、为青藏高原地区社会经济进步，不断作出自己的贡献！

相信本丛书的出版，一定能为继续做好青藏高原科学研究工作，推动青藏高原可持续发展、推进国家生态文明建设、促进全人类科学技术发展贡献中国智慧和
中国方案。

中国工程院院士：

2021年7月26日

岩质边坡滚石问题是土木工程、水利工程和交通工程中一个十分重要的问题，国内外一直重视对它的研究。这不仅具有重要的学术意义，也因其其在土木、水利与交通等工程建设中的危害较大，有重大的现实意义，特别是在我国西部广大地区，地质灾害十分频繁，在大型土木工程设计、施工和运营管理中都会遇到边坡滚石问题，因此，岩质边坡滚石机理研究是解决工程实际问题的前提。边坡崩塌滚石是仅次于滑坡的地质灾害。边坡上危岩体受三维空间结构面切割，在重力、风化、地震、渗透压力等外力作用下从母岩分离，形成滚石。同时边坡的变形失稳、运动、发展、破坏，又是一种典型的非连续块体系统大位移和大变形动力问题，存在着复杂形状块体与复杂地形坡面间的接触变换。因此，准确描述滚石运动过程，掌握滚石运动规律和控制方法，是研究人员近年十分专注的工作。

近年来边坡破坏研究的一个主要方向逐渐演化为非连续变形数值分析问题，在散粒体单元、接触单元逐步深入的基础上，研究人员相继提出了离散单元法、DDA法和数值流形法等，这些分析方法有力地推动了边坡稳定分析研究工作。其中，研究岩质边坡破坏的DDA法自提出以来，由于其在方程求解、接触问题和可视化等方面具有优势，得到了一些研究者的深入开发与模拟，用其模拟多质点岩体的滚动、碰撞、倾倒和滑移更加符合试验和现场观测现象。

作者及其团队成员，充分利用援藏的机会，结合青藏高原，尤其是藏东南地区多滚石灾害特征开展系列研究工作。本书较系统地介绍了作者团队的新的研究成果，包括边坡失稳和崩塌滚石运动特征、能量转化、冲击破坏能力及致灾方量理论等，揭示边坡失稳和崩塌滚石运动机理及规律。本书分为四部分：第一部分介绍边坡滚石研究现状、3D DDA基本原理及接触模型改进；第二部分基于3D DDA方法

开展岩质边坡破坏机理、滚石平台防护作用及树木阻挡效应研究；第三部分开展边坡块体系统失稳室内试验与滚石运动特征室外试验；第四部分分析西藏自治区 G318 国道 K4580 典型工程滑坡和崩塌滚石的全过程及现象。

本书是在国家自然科学基金项目“高陡岩质边坡破坏接触模型与三维 DDA 数值模拟研究”“大型节理岩质边坡失稳破坏机理三维 DDA 方法与试验研究”和西藏大学学科建设项目“高原重大基础设施与环境实时在线监测技术、安全评价及环境工程控制”资助下完成的。作者的研究工作得到大连理工大学和西藏大学的大力支持。作者要特别感谢石根华教授、彭校初教授级高级工程师对作者的研究工作给予的十分具体的指导和把关；感谢康飞副教授、叶唐进副教授和薄雾讲师，他们对研究工作的推进给予有力支持；感谢研究生赵鹏辉、王壮壮、杨富豪、李光、靳远成等，他们身体力行地在高原缺氧环境下进行现场试验各环节；最后感谢同批援藏的西南交通大学出版社党支部覃维书记，他策划和实施了此项“第三极科技文库”项目，为援藏的科技工作者提供了发表成果的机会。

作 者

2021 年 9 月

1	绪 论	001
	1.1 引 言	002
	1.2 滚石成因机制及失稳启动模式	007
	1.3 滚石运动特征及研究方法	009
	1.4 滚石灾害评价及防护方法	013
	1.5 非连续变形分析 (DDA) 方法研究	015
	1.6 本书主要特色	026
2	三维非连续变形分析方法	029
	2.1 块体位移和变形	030
	2.2 总体平衡方程	031
	2.3 三维单纯形积分	032
	2.4 三维接触处理	035
	2.5 三维 DDA 数值实现	044
3	三维接触模型	047
	3.1 块体大转动模型	048
	3.2 块体临界滑动模型	056
	3.3 块体碰撞接触模型分析	064
	3.4 块体基本运动三维 DDA 验证分析	068

4

岩质边坡破坏机理	077
4.1 岩质边坡破坏模式	078
4.2 考虑惯性分量的失稳模型	080
4.3 倾倒分析的进一步工作	086
4.4 边坡失稳模型与力学机理	087
4.5 山坡岩体失稳破坏分析	093
4.6 工程实例	096

5

边坡滚石平台防护作用	101
5.1 边坡滚石重要研究指标	102
5.2 滚石动能与轨迹验证分析	104
5.3 滚石平台防护作用算例分析	107
5.4 工程实例	114

6

边坡滚石树木阻挡效应	117
6.1 考虑树木阻挡效应的滚石运动	118
6.2 树木阻挡滚石模型输出	120
6.3 树木阻挡滚石算例分析	123
6.4 工程实例	134

7

边坡块体系统失稳室内试验	143
7.1 室内试验材料	144
7.2 室内试验平台系统	144
7.3 室内试验工况及结果分析	147

8

边坡滚石运动特征室外试验	167
8.1 室外试验场地与滚石选择	168
8.2 双目立体视觉滚石试验系统	170
8.3 校园边坡试验工况及结果分析	177
8.4 现场边坡试验工况及结果分析	185

9

西藏 G318 国道 K4580 典型边坡滑坡及 崩塌滚石分析	199
9.1 工程概况	200
9.2 边坡三维 DDA 模型	202
9.3 大型滑坡分析	204
9.4 巨石崩塌分析	206
9.5 大型崩塌分析	213
主要参考文献	219

CHAPTER



绪

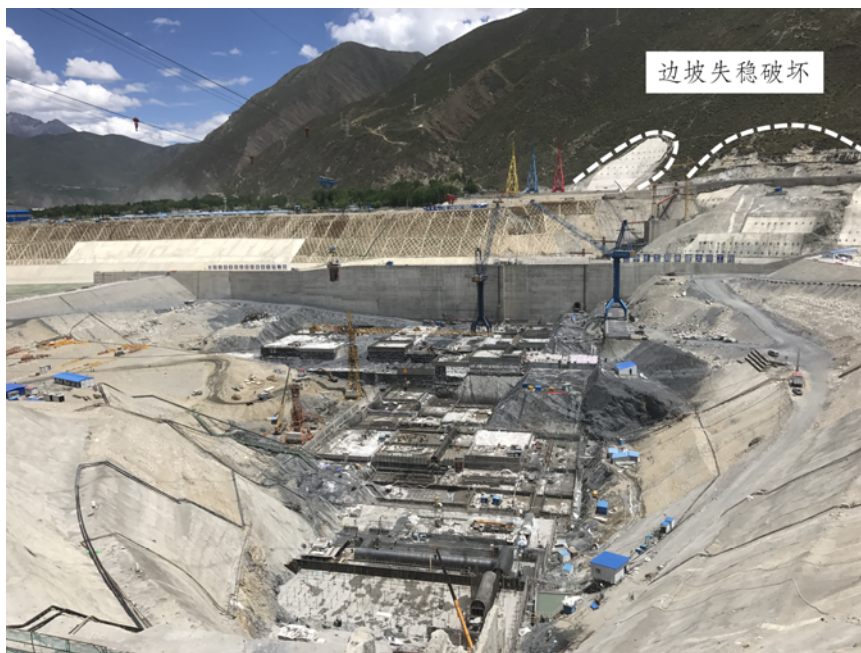
论

1.1 引言

边坡是被赋予一定工程和环境意义的天然或人工斜坡,是人类工程活动中最基本的地质环境之一,也是工程建设中最常见的工程形式^[1]。水利水电、道路交通、露天矿山、城镇地质环境等工程建设均涉及边坡工程。特别是随着我国国民经济蓬勃发展,西部大开发战略和“一带一路”倡议稳步推进,交通基础设施、水电能源和矿产资源开发等一大批重大工程在西部山区和丘陵地区得以实施。在此期间,遇到或形成了大量的岩质边坡,且其开挖和填筑的数量越来越多,高度也越来越高。

岩质边坡是根据边坡介质材料划分的,是与土质边坡相对应的一种斜坡形式。岩质边坡整个坡体均由岩体构成,按岩体结构可分为整体状(巨块状)边坡、层状边坡、块状边坡、碎裂状边坡和散体状边坡等,按岩体的强度可分为硬岩边坡、软岩边坡和风化岩边坡等。也可按岩质边坡的高度分类,一般而言,岩质边坡总高度在 30 m 以下为一般边坡;总高度在 30 m 以上为高边坡,如其坡角大于或等于 45°,则为高陡边坡。高陡边坡易于发生变形破坏。但高陡边坡在不同领域还有着不同的定义,例如:在交通领域,坡高大于 30 m 且坡角大于 30°的边坡即为高陡边坡;在矿山领域,坡高大于 300 m 且坡角大于 45°的边坡才称为高陡边坡。

河谷深切、谷坡陡峻、地应力水平高、结构面弱化等复杂的地质条件,加上人类改造自然的规模越来越大,在很大程度上打破了边坡的自然平衡状态,若施工或控制不当,边坡就会发生变形、失稳、破坏,从而引发地质灾害。例如:如图 1.1(a)所示,正在施工的加查水电站周围山体存在危岩体,如果边坡崩塌破坏,将阻碍施工进度;如图 1.1(b)所示,西藏聂拉木县樟木镇坐落在巨型危岩滑坡体上,边坡变形显著且有继续增大的趋势,对居民生活构成极大威胁。边坡灾害不仅体现在其失稳破坏阶段的人员伤亡、经济损失和工程建设受阻上,也体现在其变形阶段对人民生命财产安全的威胁上。岩质边坡失稳破坏不仅会直接摧毁工程建设本身,也会通过环境灾难给工程 and 人居环境带来直接影响和危害^[2]。



(a) 施工中的加查水电站



(b) 坐落在巨型变形坡体上的樟木镇

图 1.1 边坡变形、失稳及破坏

岩质边坡工程的其中一个重要研究内容是危岩体稳定性分析。危岩体是指陡坡上被多组结构面切割,在重力、风化营力、地震、渗透压力等外力作用下,稳定性较差,具有潜在危险性的岩体^[3]。危岩体从母岩彻底分离后产生的个别岩块或岩块系统经下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种组合沿坡面向下快速运动,最后在较平缓地带或障碍物附近静止下来,此动力演进过程形成滚石或滚石灾害^[4],如图 1.2 所示。实际边坡危岩体崩塌与滚石常常一起出现,二者可以视为因果关系,即崩塌之后可产生滚石灾害。它们在概念上也有着紧密联系,一般认为规模较大时称为崩塌,规模较小时称为滚石。从形成条件和产生原因来看,滚石的形成条件更简单容易,还包括个别岩块的滚落^[5]。滚石小到砾石,大到体积数百立方米的巨石,具有点多、面广、速度快、能量高、爆发突然、随机性大、运动距离远、监测预警难度大、致灾严重等特点,且变形破坏过程复杂多样,已成为山区和基础设施运营的主要地质灾害之一^[6]。



(a) 危岩体崩塌、滚石及灾害清理



(b) 滚石引起交通障碍

图 1.2 G318 国道边坡滚石灾害

通过“全国山区丘陵县(市)地质灾害调查”和“重点地区 1:5 万地质灾害详细调查”两个阶段的调查,中国地质调查局地质环境监测院发布了最新地质灾害调查结果,截至 2015 年 10 月 26 日,共记录崩塌滚石地质灾害及隐患点约 12 万处,分布于全国的 34 个省级行政区,其中:特大型崩塌滚石灾害,全国共发育 55 处;特大型崩塌滚石灾害隐患点,全国共发育 285 处。从数量上来看,最严重的为四川省、江西省、广西壮族自治区、广东省及山西省等 5 个省(自治区),崩塌滚石发育总数都超过 6 000 处,占总数的 41%,尤其以四川省和江西省最为严重,总数都在 1 万处以上。根据 1981 年全国山区铁路沿线崩塌滚石统计资料,除台湾地区外,有 48 条铁路,仅一年内即发生崩塌滚石 3 395 处,累计延长为 412 108 m。国家统计局公布的地质灾害最新数据显示,2009 年以来我国崩塌滚石灾害在地质灾害中所占的比例达 18.37%,见图 1.3,是仅次于滑坡的第二大地质灾害。表 1.1 列举了国内部分地区近些年的滚石灾害,从中可以看出,崩塌滚石灾害往往导致交通系统瘫痪、房屋建筑毁灭性破坏,给人民生命财产带来重大损失。西南山区和地震灾区一直是滚石灾害的高发地带。此外,矿山、水电站也存在