

危岩崩塌灾害研究现状与趋势*

陈洪凯, 董平, 唐红梅
(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:危岩崩塌是一种全球性泛生型山地灾害,传统地质灾害的3个组成部分之一,严重威胁着山区公路交通运输安全、城镇居民生命财产安全和矿山生产安全。通过对国内外研究文献的查阅分析并结合作者多年在三峡库区的研究实践,将危岩崩塌灾害的研究现状概括为危岩破坏机理与地貌演化、崩塌落石运动特性、危岩崩塌灾害防治技术等3方面,系统梳理了每个方面的研究情况,发现国内外学者多年来一直聚焦崩塌落石运动特性研究,目前逐渐重视对崩塌灾害发生前危岩破坏机理的研究,危岩崩塌灾害治理技术研发问题也得到部分学者的关注,并指出了危岩崩塌灾害进一步研究应予以关注的3个科学问题,即危岩破坏的断裂力学表达、危岩解体力学过程和崩塌灾害应急安全警报。研究成果对于推动危岩崩塌灾害减灾理论与减灾技术研究有积极意义。

关键词:危岩崩塌灾害;研究现状;研究趋势

中图分类号:P931.91;P642.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2015)06-0053-08

危岩崩塌(Perilous rock and collapse)是一种全球性泛生型山地灾害,存在部位具有隐蔽性,失稳破坏具有突发性,致灾后果具有灾难性,严重威胁着山区公路、城镇和矿山安全。不完全统计表明,近十年来我国公路、矿山发生突发性崩塌灾害8000余次,表1给出了10次危岩崩塌灾害典型案例。在2007年出台《中华人民共和国突发事件应对法》、2009年出台《国家突发公共事件总体应急预案》和2009年出台《公路交通突发事件应急预案》背景下,作为一种事关国计民生的突发性地质灾害,危岩崩塌灾害减灾问题得到政府部门及相关学者地高度重视。迄今,在危岩崩塌、滑坡和泥石流3种主要地质灾害中,危岩崩塌是研究最薄弱的领域。基于对国内外相关文献的检索分析及作者多年从事危岩崩塌减灾问题的科学研究与工程实践,可从危岩破坏机理与地貌演化、崩塌落石运动特性和危岩崩塌灾害防治技术三方面进行研究现状分析,据此提出了该领域进一步研究的几个主要方向,研究成果对于推动危岩崩塌灾害减灾理论与减灾技术研究有积极意义。

1 危岩崩塌灾害研究现状

1.1 危岩破坏机理与地貌演化

陡高边坡上危岩体的破坏机理是边坡地貌演化的关键环节之一,属于崩塌灾害源,迄今公开报道的研究成果较少,但是近十年来已经引起国内外学术界的高度关注,如许强等认为重庆武隆鸡尾山特大型山体崩塌在陡崖上存在关键块^[1];王家臣等提出了边坡渐进性破坏的三维随机分析模型^[2];田卿燕等将灰色理论和突变理论相结合,建立了灰色-突变预测模型,据此采用声发射信号预测块裂岩质边坡的崩塌时间^[3];张永兴等研究了边坡中张性地应力和岩腔发育深度对差异风化型危岩形成与破坏的影响^[4];王志强等基于弹性力学提出了一种滑坡失稳的突变模型^[5];Frayssines等分析了灰岩陡高边坡的破坏机制^[6];陈洪凯等探讨了石质山区的崩塌灾害形成机制^[7],运用损伤力学方法建立了危岩主控结构面端部损伤区的即时泊松比和即时弹性模量的计算方法^[8],把危岩主控结构面内的裂隙水压力视为交变荷载,通过计算其对主控结构面应力强度因子的贡献,遵循P-M准则

* 收稿日期:2015-01-28 网络出版时间:2015-9-28 12:19

资助项目:国家自然科学基金(No. 11272185;No. 51378521;No. 50678182);重庆市“两江学者”计划专项;2013年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. KJTD201305);重庆市国土资源和房屋管理局科技项目(No. CQGT-KJ-2014026)

作者简介:陈洪凯,男,教授,博士后,博士生导师,研究方向为动力地貌学、地质安全理论及工程结构健康,E-mail:chk99@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20150928.1219.050.html>

运用 Paris 疲劳方程建立了处于临界状态下危岩主控结构面的疲劳断裂寿命计算方法^[9],探讨了缓倾角层状岩体边坡危岩后退演化的力学机制^[10],唐红梅等对危岩聚集体的崩落序列问题进行了初步研究^[11];陈洪凯等从危岩稳定性评价标准、荷载组合、稳定系数计算方法等方面构建了危岩稳定性分析方法^[12]。

表 1 危岩崩塌灾害典型案例

Tab. 1 Typical cases for perilous rocks and collapses

序号	名称	爆发时间	灾害事件描述	灾 情
1	重庆武隆鸡尾山崩塌	2009-06-05	300 多万 m ³ 的崩塌体快速涌进山谷,沿沟向前高速运动近 1 000 m	86 人死亡
2	重庆武隆县城高切坡崩塌	2001-05-01	武隆县城北西段城区道路开挖造成高度 30~40 m 的岩体边坡突然崩塌	79 人死亡
3	贵州纳雍山体崩塌	2004-12-03	贵州纳雍县鬃岭镇左家营村位于半山坡,四周全是煤矿,陡崖突然崩塌	65 人死亡
4	云南威信山体崩塌	2009-04-26	威信县麟凤乡麟凤村和扎西镇小坝村公路岩体边坡发生突发性山体崩塌	36 人死亡
5	贵州三穗平溪特大桥山体崩塌	2003-05-11	平溪特大桥施工过程中 3# 墩附近发生山体崩塌,体积约 200 000 m ³	35 人死亡
6	国道 318 线高阳寨崩塌	2007-11-20	崩塌体体积 4 512 m ³ ,车牌号为鄂 Q20684 客车被崩塌体掩埋	车内 31 人全部遇难
7	山西中阳县茅火梁煤矿崩塌	2009-11-16	崩塌山体底部因茅火梁煤矿开采挖空,地表裂缝发育,导致地表黄土坐落式崩塌	23 人死亡
8	国道 319 重庆彭水山体崩塌	2007-04-04	造成三十多米缺口,5 000 余吨巨石将公路路面连同路基全部砸到了下面的陡坡和奔流的乌江	交通及国防光缆中断 1 个月,损失约 1 亿元
9	四川甘孜时桥头东岸崩塌	2006-06-18	凌晨 1:50 四川甘孜州康定县时乡时桥头东岸,约 120 m ³ 岩石塌落	死亡 11 人,损失 2 000 万元
10	甘肃红古民门公路山体崩塌	2003-10-12	体积约 45 000 m ³ 危岩从山顶崩裂滑落	掩埋数十辆汽车

危岩破坏的本质是主控结构面端部岩石的破裂问题,唐春安等运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,研究了材料非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响,发现岩石的非均匀性对含裂纹试样的变形、破裂过程及其破坏模式有很大的影响^[13];钱七虎等研究了岩石变形与破坏之间的时间响应特性,给出了考虑强度对于应变率依赖关系的 Mohr-Coulomb 准则^[14];Ostrovsky 等分析了岩石在动荷载作用下的非线性动力滞后效应,认为在高频率荷载作用下,岩体滞后的应力-应变特性更为明显,得到了与非线性特性有关力学模型^[15];陈洪凯等分析了危岩底部岩腔内泥岩的压裂风化问题^[16],提出了确定主控结构面抗剪强度参数的贯通率法^[17];唐红梅等对危岩主控结构面孔隙水压力进行了修正^[18]。

此外,危岩破坏也属于一个动力学问题,唐红梅等发现危岩破坏存在激振效应^[19-20],建立了激振应力计算方法^[21];陈洪凯等分析了激振信号的频域特性^[22],提出了危岩破坏瞬间的弹冲加速度和弹冲速度计算式^[23];程谦恭等提出了二维应力状态下逆向层状岩体岩质滑坡破坏启程速度计算方法^[24]。

着眼于陡高边坡危岩破坏崩落问题,陈洪凯等分析了岩体边坡的地貌演化问题,揭示了缓倾角岩体边坡危岩链式演化规律^[25],提高了崩塌源危岩的勘察认知水平。

1.2 崩塌落石运动特性

从 20 世纪中叶以来,国外学者高度重视危岩破坏以后的崩塌过程及崩塌灾害研究,如 Strom 和 Korup 认为危岩破坏失稳及其运动致灾过程是岩石边坡演化的动力学过程^[26];Cox 等^[27-28]认为崩塌落石是山坡地貌演化的主要侵蚀过程;Manzella 等发现崩塌体冲出距离决定于初始体积大小^[29];Zambrano 基于落石动能、势能和摩擦能的变化提出了大块落石运动速度的计算公式^[30];Tommasi 等指出崩塌体的动能通过与下垫面的摩擦、对障碍物的冲击以及块石碎裂而耗散^[31];Pirulli 等提出了一种用于分析崩塌堆积物现场形成过程的反分析法^[32];Blasio 认为崩塌堆积物底部的流变特性可从库仑摩擦体转变为非牛顿体^[33];Dorren 等通过现场观测与数值模拟

相结合提出预测崩塌源、落石路径及冲出区域的综合分析法^[34],并于 2006 年提出了用于估算下垫面森林减少落石冲击能量的计算公式^[35];Crosta 等发现斜坡表面落石运动轨迹的侧向扩散敏感性决定于地形的宏微特性^[36];Stoffel 等通过树木年轮从树木生长障碍出发研究历史时期落石的活动性^[37]。

国内学者从崩塌灾害防治角度,尤其是根据落石运动路径确定拦挡治理位置、根据落石冲击力确定拦挡结构尺寸大小,通过室内及现场落石运动特性试验,积极开展落石运动路径和落石冲击力研究,如唐红梅等分析了下垫面落石动力恢复系数取值问题^[39],从落石初始崩落、后继弹跳、空中飞行等阶段的划分及组合建立了落石运动路径计算新方法^[40];如黄润秋和刘卫华基于现场试验提出了落石运动路径计算方法^[34];叶四桥等分析了落石的形状、质量大小等对运动特性的影响^[41-42],并提出了基于冲量定律的落石冲击力计算方法^[43]。

1.3 危岩崩塌灾害防治技术

多年来,从事地质灾害研究的多数学者进入一个误区,认为危岩崩塌灾害治理技术仅仅属于工程问题,重视机理研究,轻视技术研发。在三峡库区二期地质灾害防治工作启动中,陈洪凯等重视对危岩崩塌灾害治理新技术的研发及实践应用,将危岩崩塌灾害治理技术分成主动防治技术、被动防护技术和主动-被动联合防治技术 3 类^[44],系统建立了危岩支撑、锚固及支撑-锚固联合支护技术的工程计算及工程设计方法^[45-47],为三峡库区的危岩崩塌灾害治理起到重要技术支持作用。

2 危岩崩塌灾害研究趋势

从科学揭示危岩崩塌灾害形成及其演变机理、满足崩塌灾害现场应急安全警报需求出发,在进一步的研究中应高度重视对危岩破坏的断裂力学表达、危岩解体力学过程和崩塌灾害应急安全警报等科学问题的研究,尤其要重视对灰岩地区危岩崩塌形成、演变、监测预警等科学问题的研究。

2.1 危岩破坏的断裂力学表达

从危岩破坏的本质特征可以推断,断裂力学在研究危岩破坏机理方面有较强的可能性与生命力,属于断裂力学在宏观领域的应用实践问题,如 Tutluoglu 和 Keles 采用改进直切口磁盘弯曲方法测试岩芯的 I 型断裂韧度^[48];Alfredsson 和 Stigh 提出了一个简单公式用于确定材料的临界裂纹长度^[49];程玉民等利用裂纹尖端解析解将复变量移动最小二乘法的基函数进行扩展,推导了相应的逼近函数,从最小势能原理出发提出了断裂力学复变量无网格方法^[50];唐红梅等初步分析了危岩主控结构面的应力强度因子求解问题^[51];陈洪凯等采用断裂力学方法探讨了危岩稳定性问题^[52]。以倾倒式危岩为例,其破坏属于主控结构面拉剪断裂问题,采用断裂力学方法研究危岩破坏机理的断裂力学表达,基本思路可概括为 4 步:

首先,根据危岩的地质模型,如图 1 所示,构建力学模型,如图 2 表述的危岩体重心 C 在基座支撑点 B 外侧的情况;

其次,计算危岩力学模型中的所有荷载,并将这些荷载凝聚到主控结构面,得到沿着主控结构面延伸方向的剪切应力 τ 和垂直于主控结构面的法向应力 σ 及围绕主控结构面端部的弯矩 M ;

第三,借鉴断裂力学边裂纹模型,着眼于危岩主控结构面,建立如图 3 所示的危岩断裂模型,并将其分解为仅受 τ 、 σ 和 M 作用的简单断裂力学模型(图 4);

第四,采用断裂力学方法可得到 3 种简单断裂力学模型的经典解答,据此通过组合可得到倾倒式危岩拉剪破坏联合断裂应力强度因子。

显然,不同类型危岩的断裂破坏问题均可按照倾倒式危岩破坏的断裂分析思路进行研究。由于断裂力学是基于材料的微观裂纹扩展机制建立起来的应用力学学科,其在危岩破坏机理研究中的适用性问题应予以高度重

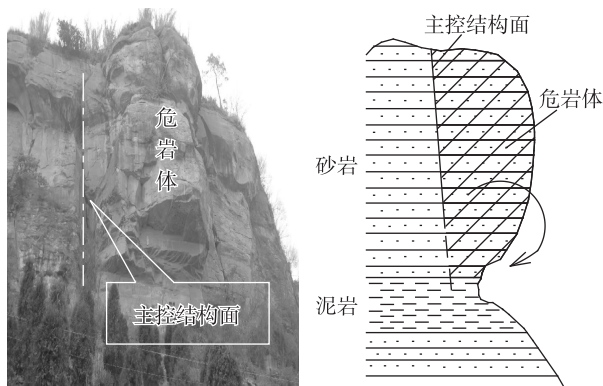


图 1 江津四面山红岩山的倾倒式危岩
Fig. 1 Perilous rocks at Mt. Hongyan,
Simianshan, Jiangjin

视,换言之,危岩断裂破坏属于宏观断裂力学问题,现有断裂力学经典解答在宏观尺度的适用性值得深入研究。

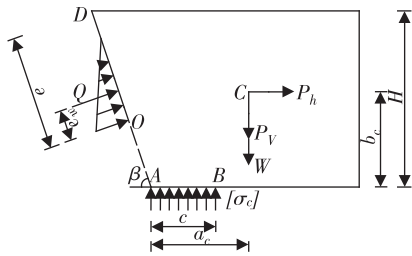


图 2 倾倒式危岩力学模型

Fig. 2 Mechanic model of toppling peilous rock

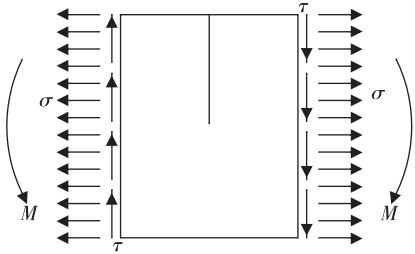


图 3 倾倒式危岩拉剪破坏模式

Fig. 3 Tensile shear rupture model of toppling peilous rock

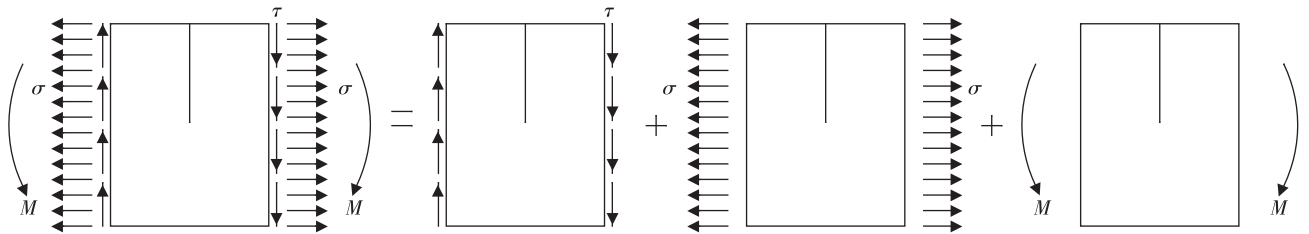


图 4 倾倒式危岩拉剪破坏模式分解

Fig. 4 Disintegration of tensile shear rupture model for toppling perilous rock

2.2 危岩解体力学过程

长期以来,国内外学者都忽视了对危岩整体破坏导致危岩解体问题的研究,但是,危岩破坏以后的解体行为直接关系到危岩崩塌灾害危险区的科学划分问题,尤其是灰岩地区的危岩,属于由若干小尺寸岩块组合而成的类砌体结构(Quasi-masonry structure),其解体特征更为明显。如作者对重庆市金佛山国家级风景名胜区甄子岩的现场监测结果发现,危岩下座破坏过程中从危岩体底部向上快速解体,直至整个危岩均解体,封二彩图 5 显示的甄子岩 W12# 危岩实际破坏过程证实了前述推断的合理性,危岩解体过程持续 25 s。因此,采用断裂力学、突变理论、能量分析、冲击振动力学等方法,研究危岩解体力学过程,科学解译危岩解体过程,具有重要科学价值和工程实用性。

2.3 崩塌灾害应急安全警报

由于危岩破坏主要属于脆性破坏,通过监测危岩体的变形进行灾害预测预报效果较差,并且不能实现崩塌灾害的应急安全警报。洪洪凯等研究发现,危岩破坏过程中主控结构面端部应力变化非常敏感,研发了采集危岩主控结构面端部应力的传感设备^[53-54],研发了依据所采集的危岩应力进行崩塌灾害应急安全警报的警报仪^[55]。由于所研发的危岩应力采集传感器可以间隔 0.05 s 采集数据,由此进行灾害安全警报便具有实时性,该方法已经在实验室条件下得以实现,但现场实用性仍然未得到科学检验。所以,优化危岩主控结构面端部应力采集方法,加强崩塌灾害安全警报方法研究及警报专用设备研发制造,对于实现山区公路、城镇、矿山崩塌灾害重灾点的应急安全警报有重要现实意义。

3 结论

1) 危岩破坏的本质是主控结构面端部岩石的破裂问题,危岩破坏也是一个具有激振效应的动力学问题,危岩破坏过程属于岩体边坡地貌演化的局部信息,目前国内外学者逐渐重视对危岩破坏机理与地貌演化问题的研究。

2) 危岩破坏后产生崩塌落石,崩塌落石的运动与冲击属于运动学和动力学问题,直接影响着崩塌灾害的工程防治和崩塌灾害危险区的科学识别,国内外学者长期重视对该科学问题的研究,建立了有关落石运动路径及落石冲击力的多个经验半经验公式。

3) 对于危岩崩塌灾害防灾减灾问题,国内外学者存在重视机理研究、轻视技术研发的现象,但是迫于减灾工程迫切需求,近年来部分学者开始重视对该问题的研究,并取得了初步成效。

4) 探讨了危岩崩塌灾害的研究趋势,指出进一步研究应高度关注的3个科学问题,即危岩破坏的断裂力学表达、危岩解体力学过程和崩塌灾害应急安全警报。

参考文献:

- [1] 许强,黄润秋,殷跃平,等. 2009年6.5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2009,17(4):433-444.
Xu Q, Huang R Q, Yin Y P, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(4):433-444.
- [2] 王家臣,谭文辉. 边坡渐进破坏三维随机分析[J]. 煤炭学报, 1997,22(1):27-31.
Wang J C, Tan W H. Three dimensional stochastic analysis of slope progressive failure [J]. Journal of China Coal Society, 1997,22(1):27-31.
- [3] 田卿燕,傅鹤林. 基于灰色突变理论的块裂岩质边坡崩塌时间预测[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(12):122-126.
Tian Q Y, Fu H L. Failure time prediction of slope collapse of block rockmass based on gray and catastrophic theories [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009,37(12):122-126.
- [4] 张永兴,卢黎,张四平,等. 差异风化型危岩形成和破坏机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2010,32(2):1-6.
Zhang Y X, Lu L, Zhang S P, et al. Development and failure principle of differential weathering overhanging rock [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010,32(2):1-6.
- [5] 王志强,吴敏应,潘岳. 斜坡失稳及其启程速度的折迭突变模型[J]. 中国矿业大学学报, 2009,38(2):175-181.
Wang Z Q, Wu M Y, Pan Y. Fold catastrophe model of slope destabilization and its starting velocity [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009,38(2):175-181.
- [6] Frayssines M, Hantz D. Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(7):1115-1123.
- [7] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅. 石质山区崩塌灾害形成机制—以四面山国家级风景名胜红岩山为例[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010,42(3):1-6.
Chen H K, Xian X F, Tang H M. Developing mechanism for collapse disaster in rocky mountain area—taking Mt. Hongyan in the National Scenic Spots of Simianshan as an example [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010,42(3):1-6.
- [8] Chen H K, Tang H M, Ye S Q. Damage model of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006,27(7):967-974.
- [9] Chen H K, Tang H M. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007,28(5):643-649.
- [10] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等. 缓倾角岩质陡坡后退演化的力学机制[J]. 岩土工程学报, 2010,32(3):468-473.
Chen H K, Tang H M, Wang L F, et al. Mechanical mechanism for retreat evolution of steep rock slopes with gentle dip [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(3):468-473.
- [11] 唐红梅,王林峰,陈洪凯,等. 软弱基座陡崖危岩上崩落序列[J]. 岩土工程学报, 2010,32(2):205-210.
Tang H M, Wang L F, Chen H K, et al. Collapse sequence of perilous rock on cliffs with soft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(2):205-210.
- [12] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等. 危岩稳定性分析方法[J]. 应用力学学报, 2009,26(2):278-282.
Chen H K, Xian X F, Tang H M, et al. Dangerous rock stability analysis method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009,26(2):278-282.
- [13] 唐春安,刘红元,秦四清,等. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响[J]. 地球物理学报, 2000,43(1):116-121.
Tang C A, Liu H Y, Qin S Q, et al. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000,43(1):116-121.
- [14] 钱七虎,戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008,36(12):1599-1605.
Qian Q H, Qi C Z. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008,36(12):1599-1605.
- [15] Ostrovsky L A, Johnson P A. Nonlinear dynamics of rock: hysteretic behavior [J]. Radiophysics and Quantum

Electronics, 2001, 44(5-6): 450-464.

- [16] 陈洪凯, 王全才, 唐红梅. 岩腔内泥岩压裂风化特性研究[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 51-54.
Chen H K, Wang Q C, Tang H M. Study on weathering and fracturing features of mud stone in rock cell[J]. Yangtze River, 2010, 41(21): 51-54.
- [17] 陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 37-41.
Chen H K, Tang H M. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 37-41.
- [18] 唐红梅, 陈洪凯. 危岩裂隙水压力修正计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 86-90.
Tang H M, Chen H K. Revised method of water pressure in control fissure of perilous rockmass[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 86-90.
- [19] 唐红梅, 陈洪凯, 王智, 等. 危岩破坏激振效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2117-2122.
Tang H M, Chen H K, Wang Z, et al. Experimental study on excitation effect for unstable rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2117-2122.
- [20] 唐红梅, 王智, 鲜学福, 等. 坠落式危岩刷动式崩落与激振效应[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2011, 34(10): 39-45.
Tang H M, Wang Z, Xian X F, et al. Violent-slide rock avalanche and excitation effect of perilous rock[J]. Journal of Chongqing University, Natural Science Edition, 2011, 34(10): 39-45.
- [21] 唐红梅, 王智, 陈洪凯, 等. 坠落式危岩崩落的激振效应与求解[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 32-37.
Tang H M, Wang Z, Chen H K, et al. Contribution ratio of excitation action triggered by collapse of perilous rock to stability of perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 32-37.
- [22] 陈洪凯, 唐红梅, 王智, 等. 危岩破坏激振信号频域特征研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 64-68.
Chen H K, Tang H M, Wang Z, et al. Study on frequency domain characteristics of excitation signals at rupture of perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 64-68.
- [23] 陈洪凯, 张瑞刚, 唐红梅, 等. 压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 30-33.
Chen H K, Zhang R G, Tang H M, et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 30-33.
- [24] 程谦恭, 胡厚田, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡临床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173-176.
Cheng Q G, Hu H T, Hu G T, et al. A study of complex accelerated dynamics mechanism of highspeed landslide by elastic rocky impulse and peak-residual strength drop[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 173-176.
- [25] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福. 缓倾角层状岩体边坡链式演化规律[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 20-25.
Chen H K, Tang H M, Xian X F. Chained developing pattern for rock slopes with gentle dip strata[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2009, 45(1): 20-25.
- [26] Strom A L, Korup O. Extremely large rockslides and rock avalanches in the Tien Shan mountains, Kyrgyzstan [J]. Landslides, 2006, 3(2): 125-136.
- [27] Cox S C, Allen S K. Vampire rock avalanches of January 2008 and 2003, Southern Alps, New Zealand [J]. Landslides, 2009, 6(2): 161-166.
- [28] McSaveney M J. Recent rockfalls and rock avalanches in Mount Cook National Park, New Zealand, in: S. G. Evans, J. V. DeGraff (Eds.), Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms [J]. Geol Soc Amer Rev Eng Geol, 2002, 15: 35-70.
- [29] Manzella I, Labiouse V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 133-151.
- [30] Zambrano O M. Large rock avalanches: a kinematic model [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(3): 283-287.
- [31] Tommasi P, Campedel P, Consorti C, et al. A discontinuous approach to the numerical modelling of rock avalanches [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 37-58.
- [32] Pirulli M, Mangeney A. Results of back-analysis of the propagation of rock avalanches as a function of the assumed rheology [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 59-84.
- [33] De Blasio F V. Rheology of a wet, fragmenting granular flow and the riddle of the anomalous friction of large rock avalanches [J]. Granular Matter, 2009, 11(3): 179-184.
- [34] Dorren L K A, Maier B, Putters U S, et al. Combining field and modeling techniques to assess rockfall dynamics on a

- protection forest hillslope in the European Alps[J]. *Geomorphology*, 2004, 57(3/4): 151-167.
- [35] 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.
- [36] Crosta G B, Agliardi F. Parametric calculation of 3D dispersion of rockfall trajectories [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, 4(4): 583-598.
- [37] Stoffel M, Schneuwly D, Bollschweiler M, et al. Analyzing rockfall activity (1600—2002) in a protection forest—a case study using dendrogemorphology [J]. *Geomorphology*, 2005, 68(3-4): 224-241.
- [38] 唐红梅, 鲜学福, 王林峰, 等. 基于小波变换的碎石土垫层落石冲击回弹系数试验 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(7): 1278-1282.
Tang H M, Xian X F, Wang L F, et al. Coefficient of resilience for rock fall onto gravel soil cushion based on wavelet transform theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7): 1278-1282.
- [39] Tang H M, Chen H K, Wu R J. A new method to estimate routine based on the motion modes of rockfall [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 249/250: 1001-1007.
- [40] 黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 8(5): 882-891.
Huang R Q, Liu W H. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 8(5): 882-891.
- [41] 叶四桥, 陈洪凯, 许江. 落石运动模式与运动特征现场试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(2): 18-23/44.
Ye S Q, Chen H K, Xu J. Rockfalls movement mode and movement features by field tests [J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(2): 18-23/44.
- [42] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石运动过程偏移与随机特性的试验研究 [J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(3): 74-79.
Ye S Q, Chen H K, Tang H M. Research on the offset and random characteristics of the rockfall during the falling process by field tests [J]. *China Railway Science*, 2011, 32(3): 74-79.
- [43] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法 [J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(6): 56-62.
Ye S Q, Chen H K, Tang H M. The calculation method for the impact force of the rockfall [J]. *China Railway Science*, 2010, 31(6): 56-62.
- [44] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡水库区危岩防治技术 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2): 105-110.
Chen H K, Tang H M. Research on control techniques to unstable dangerous rock mass in the three gorges reservoir area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 105-110.
- [45] 陈洪凯, 唐红梅, 胡明, 等. 危岩锚固计算方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(8): 1321-1327.
Chen H K, Tang H M, Hu M, et al. Research on anchorage calculation method for unstable rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1321-1327.
- [46] Chen H K, Tang H M. Study on the support-anchor combined technique to control perilous rock at the source of avalanche by fracture mechanics [J]. *International Applied Mechanics*, 2013, 49(3): 135-144.
- [47] 陈洪凯, 唐红梅, 刘光华, 等. 危岩支撑及支撑-锚固联合计算方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(3): 383-388.
Chen H K, Tang H M, Liu G H, et al. Researches on calculation method of support and support-anchorage union to unstable rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(3): 383-388.
- [48] Tutluoglu L, Keles C. Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(8): 1248-1261.
- [49] Alfredsson K S, Stigh U. Stability of beam-like fracture mechanics specimens [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 89: 98-113.
- [50] 程玉民, 李九红. 断裂力学的复变量无网格方法 [J]. *中国科学: G 辑*, 2005, 35(5): 548-560.
Cheng Y M, Li J H. Fracture mechanics of complex variables meshless method [J]. *Science in China Ser G*, 2005, 35(5): 548-560.
- [51] 唐红梅, 叶四桥, 陈洪凯. 危岩主控结构面应力强度因子求解分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(3): 393-397.
Tang H M, Ye S Q, Chen H K. Analysis oil solution of stress strength factor of control fissure in unstable rock [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(3): 393-397.
- [52] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法 [J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(4): 434-437.
Chen H K, Xian X F, Tang H M. Stability analysis method for perilous rock by fracture mechanics [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2009, 32(4): 434-437.

[53] 陈洪凯,唐红梅. 钻孔应力传感器及其钻孔应力监测方法:中国,ZL200910103038.0[P]. 2009-07-29.

Chen H K, Tang H M. Borehole stress sensor and method of borehole stress monitoring; China, ZL 200910103038.0 [P]. 2009-07-29.

[54] 陈洪凯,陈雪诺,唐红梅. 压电型钻孔应力传感器及其边坡应力监测方法:中国,ZL201110223881.x[P]. 2012-04-11.

Chen H K, Chen X N, Tang H M. Piezoelectric sensors and slope drilling stress stress monitoring method; China, ZL201110223881.x[P] 2012-04-11.

[55] 陈洪凯,唐红梅. 危岩体崩塌灾害预警仪及其预警方法:中国,ZL200810069475.0[P]. 2008-08-20.

Chen H K, Tang H M. Hazard warning device and method warning of dangerous rock mass collapse; China, ZL200810069475.0[P]. 2008-08-20.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

The Status Quo and Trends of Perilous Rock and Collapse Disaster

CHEN Hongkai, DONG Ping, TANG Hongmei

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Perilous rock and collapse is a global generic mountain hazards. It is one of the three traditional geological disasters which has seriously threatened to the safety of transportation in mountains area, mine production, people lives and property. Through the analysis to the existing research literatures on abroad and at home, combined with practice works, the writer did in the Three Gorges reservoir area for many years. The research about perilous rock and collapse can be summarized as three aspects such as perilous rock failure mechanism and landform evolution, rockfalls movement characteristics and perilous rock prevention and control technology. With systematic study, the article found that the scholars around the world have been focusing on the research of rockfalls movement characteristics over the years, but at the moment they are turning to the study of failure mechanism of perilous rock before it collapsed, so does the control technology of perilous rock and collapse. What else, the writer also put forward three scientific issues for the further study of perilous rock and collapse namely fracture and damage mechanics formula of perilous rock, the mechanical theory of perilous rock disintegration and emergency security alert for collapse disaster. It has great importance for the achievements to promote the research of theory and technology for perilous rock and collapse disaster reduction.

Key words: perilous rock and collapse disaster; research status; research trends

(责任编辑 陈 琴)