

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0714-11

塔柱状岩体崩塌灾害研究现状

贺 凯^{1,2}, 陈春利³, 冯 振^{1,2}, 李 滨^{1,2}, 潘利宾⁴

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

4. 重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队, 重庆 401120)

摘 要: 通过系统梳理国内外塔柱状岩体崩塌的相关研究资料, 对长江经济带及其周边地区塔柱状岩体形成与稳定性影响因素、崩塌失稳模式以及损伤理论应用 3 个方面进行总结论述, 并据此对塔柱状岩体崩塌灾害的发展趋势与问题热点进行了探讨, 为长江经济带下一阶段的地质调查与研究提供理论准备与参考。

关键词: 塔柱状岩体; 长江经济带; 崩塌灾害; 损伤; 压裂溃屈

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

1 塔柱状岩体崩塌灾害特征

受构造运动以及河流侵蚀影响, 我国长江流域历来是地质灾害高发区, 尤其是长江经济带中上游, 即川渝、滇黔、湘鄂等西南部山区, 多呈现高陡的厚层—巨厚层陡崖地貌, 在岩体结构面和岩体强度的控制下, 加之降水、风化等外力作用, 发生过多起重大灾难性岩质崩塌事件 (见图 1), 给山区城镇人居安全与国家重大工程安全带来巨大威胁^[1-5]。其中大型危岩体在长期自重荷载与多因素耦合作用下, 底部岩体应力集中压裂溃屈而引发危岩整体崩塌失稳的灾害时有发生。这种崩塌类型多发于塔柱状、板状等具有较大高径比形态的灰岩山体中, 广泛分布在长江经济带及周边地区, 灾害突发性强、影响范围大、致灾性高、成灾机理复杂。如: 2004 年 8 月 12 日重庆市南川区金佛山甑子岩发生特大型危岩崩塌, 崩塌体体积达 $56 \times 10^4 \text{ m}^3$, 受威胁人口达 400 余人, 目前该地区仍有两块体积均超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高陡危岩体矗于陡崖边缘 (见图 2), 成为下方金佛山水利工程的重大威胁; 位于三峡库区巫峡左岸的箭穿洞危岩 (见图 3), 扼守黄金水道, 受库水位波动影响, 底部岩体强度降低, 危岩体变形明显加剧, 一旦失稳将引发高度超过 30 m 的涌浪灾害, 成为长江航道和上下游城镇的重大安全隐患并造成巨大经济损失^[6-7]。

调查发现, 大型塔柱状岩体崩塌灾害不仅可导致重大人员伤亡和财产损失, 而且易于转化为高速远程碎屑流, 形成灾害链, 成为城镇化建设与重要交通通道、水电工程建设等的巨

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160268-4); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费专项经费资助项目 (DZLXJK201610); 国家自然科学基金项目 (41302246、41472295)

作者简介: 贺凯 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地质灾害等方面的研究工作。E-mail: hekai2005@163.com

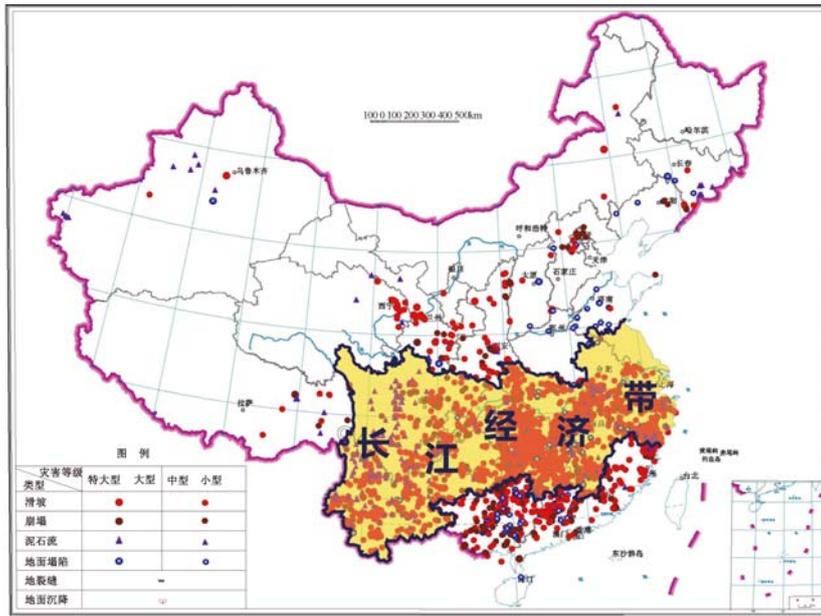


图1 2015年度长江经济带地质灾害分布图(据文献[4]修编)

Fig.1 Distribution of geological disasters in the Yangtze River Economic Zone in 2015

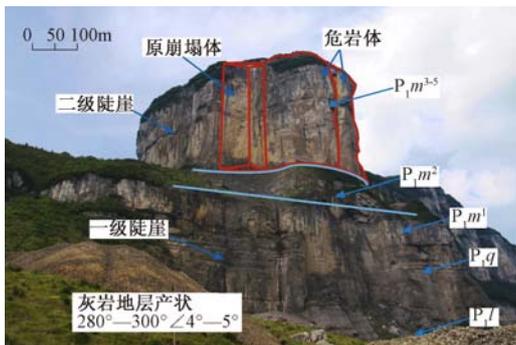


图2 重庆市南川区甄子岩崩塌

Fig.2 Zengziyan collapse in Nanchuan, Chongqing



图3 重庆巫峡箭穿洞危岩体

Fig.3 Jianchuandong unstable rock mass in Wuxia, Chongqing

大威胁。长江经济带及周边地区的塔柱状岩体崩塌灾害通常具有以下4种特征：①地层岩性以厚层脆性硬质岩层为主，底部岩体长期受压应力作用呈现碎裂状；②节理裂隙普遍发育，陡倾节理与卸荷裂隙尤为常见；③差异风化、岩溶作用等外动力作用较为强烈，岩体结构强度降低；④受采空等人类工程活动影响危岩崩塌灾害频发。这些因素相互耦合作用，使得该类崩塌灾害破坏机制更加复杂，突发性强，早期识别难度大。本文通过系统梳理国内外塔柱状岩体崩塌的相关资料，从崩塌体形成与关键影响因素、崩塌失稳模式及损伤理论应用3个方面论述其研究现状，并据此对塔柱状岩体崩塌灾害研究的发展趋势进行探讨，为长江经济带下一阶段的地质调查与研究提供理论准备与参考。

2 研究现状及发展动态

2.1 塔柱状崩塌体形成与关键影响因素

塔柱状是底部压裂溃屈型崩塌最为常见的岩体形态,其成因机理与影响因素对研究同类灾害体具有重要参考价值。在可查证文献中,涉及塔柱状岩体的研究可追溯至19世纪。1875年Powell^[8]在对美国科罗拉多河及其支流流域的探索调查中,发现该地区广泛分布有灯塔状、碑状(light-house rock、island monument rock)等塔柱状岩体,并从地貌学角度分析了其形成过程,认为这些塔柱状岩体是由灰岩或砂岩经长期水流冲蚀与风化作用而形成。Terzaghi^[9]围绕发生于阿尔卑斯山脉Pulverhörn的塔状灰岩崩塌灾害开展了分析,认为这一案例是由于基底软弱岩体的渐进式破坏导致上覆塔柱状灰岩崩塌,约 $2.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩解体撞击并刮铲软弱页岩层,最终形成约千万方的崩滑碎屑流。Poisel等^[10-12]对塔柱状、板状岩体崩塌灾害做了较详细的论述,认为这类灾害体主要发育于下伏软弱层的硬岩地层中,突出特点就是“上硬下软(hard on soft)”的岩性结构以及节理切割,下伏软岩的挤出导致上部硬岩块体变形是其主要失稳原因。Susan等^[13]对大型孤立塔柱状灰岩倾倒崩塌开展了研究,认为控制性节理对该类危岩体的失稳起关键作用。Peisser^[14]认为灰岩陡崖因常发育3组近垂直节理且由于灰岩与下伏页岩的差异风化作用,因此易于发生塔柱状块体的倾倒。Glastonbury等^[15]对多位学者关于崩塌的研究成果进行了归纳,认为岩质崩塌诱发因素主要包括地下采空扰动、坡脚软弱岩层的压剪作用、深大结构面切割等。

国内对塔柱状岩体的专门研究较少,一般认为板状、墙柱状等岩体均具有较大高径比的形态特征。陈洪凯等^[16]采用突变理论和功能原理等研究方法,对板柱状危岩突发性破坏机理进行了研究。Liu Q等^[17]以贵州施秉云台山石峰、石塔为例,分析了岩石矿物成分和结构等微观特性与风化作用对塔柱状岩体形成所起到的控制性作用。胡厚田等^[18]、李广杰等^[19]分别从陡倾构造的切割和岩体质量评价角度研究了这类问题。此外,还有学者利用运动学理论以及数值模拟技术对这类岩体的破坏模式与稳定性进行了研究^[20-21]。

综上所述,目前国内外学者对塔柱状岩体的研究主要有以下共识:①认为节理裂隙的切割、软硬岩层的差异风化、基底(潜在)软弱层以及外力作用是致使塔柱状岩体崩塌失稳的主要因素(见图4);②失稳模式分析仍以常规的整体性假设为主,未考虑崩塌体的自身差异性;③主要从地貌、岩性、结构等对灾害体的成因机理、失稳模式、稳定性等方面开展研究。但现有研究成果未考虑灾害体内在力学特性的差异与变化。

2.2 岩质崩塌破坏模式

崩塌破坏模式是对崩塌事件的基本定性,是研究岩质崩塌需要解答的基本问题之一。自1875年Baltzer^[22]在阿尔卑斯山地区岩质崩滑灾害研究中将不同灾害类型分为坠落、滑移和流动3大类之后,其他学者基于此逐步深入并不断细化岩质崩塌破坏模式。Heim^[23]将岩质崩滑分为3类:孤立块体的自由运动、与层面相关的崩滑以及与层面无关的崩滑。Sharpe^[24]根据研究对象的运动、材料、运动速度引入了三维分类系统。Varnes^[25-26]在Sharpe^[24]的研究基础上系统提出了滑坡崩塌等灾害类型和滑动方式的分类与定义,被大多数学者所接受,其中将崩塌灾害分为崩落和倾倒。此后,多位学者对崩塌破坏模式类型进行了系统修正和补充完善,使之进一步规范,标志着人们对崩塌灾害的理论认知水平逐步提高^[27-32]。Hungry等^[33]在2014年对Varnes分类进行了全面的总结、整理和升级,根据不同运动模型将之分为

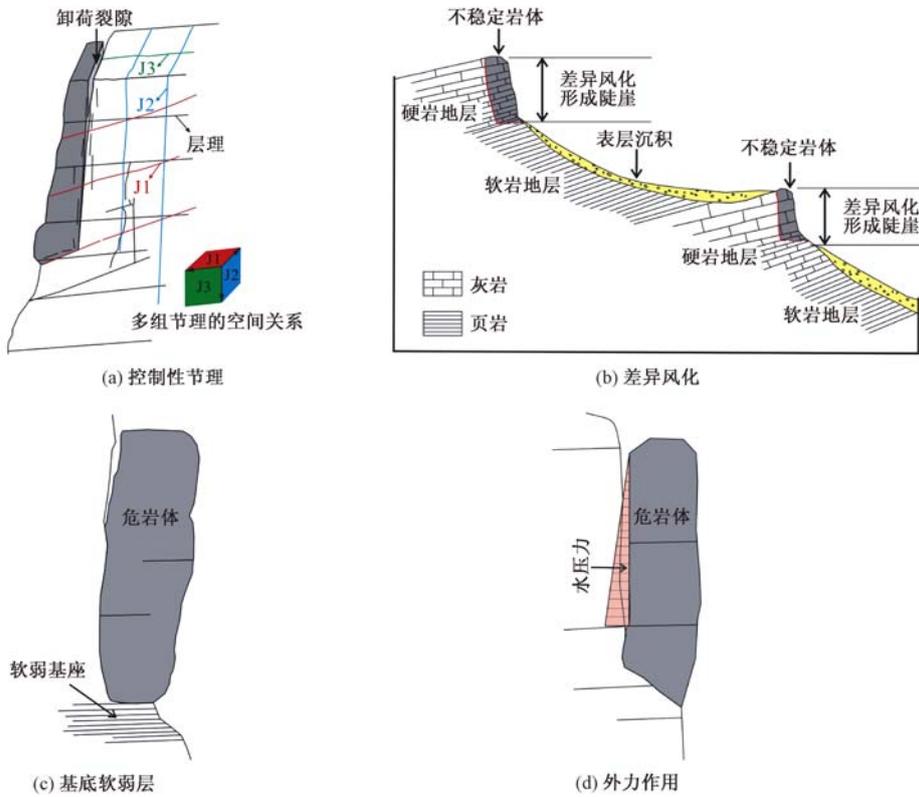


图 4 塔柱状岩体形成与失稳影响因素

Fig. 4 The influence factors of the tower-shaped rock's formation and destroy

6 大类, 即坠落、倾倒、滑移、扩离、流动和坡体变形 (见表 1), 并根据岩土介质以及失稳模式进一步细分出 12 个具体破坏类型。其中, 塔柱状等高陡岩体常见的底部压裂溃屈崩塌可以看作是岩崩-碎屑流的一种初始失稳破坏模式。

表 1 岩质崩滑模式分类^[33]

Table 1 The model classification of rock collapse and slide

基本类型	细分类型
坠落	岩块坠落
倾倒	块石倾倒
	岩体弯折倾倒
滑移	旋转滑移
	平面滑移
	楔状滑移
	复合滑移
	不规则滑移
扩离	岩质边坡扩离
流动	岩崩-碎屑流
坡体变形	陡坡山体重力变形
	岩质坡体深层蠕滑

国内对岩质崩塌灾害的系统研究始于 20 世纪 80 年代末。胡厚田^[34]以崩塌体初始运动

方式和受力状态作为主要分类依据将崩塌分为倾倒式、滑移式、鼓胀式、拉裂式、错断式 5 种基本模式。旷镇国^[35]根据危岩的失稳破坏机制建立力学模式对崩塌开展研究。黄润秋^[36]从控制条件和失稳机理角度对崩塌危岩体进行分类研究。伍法权等^[37]重点围绕三峡库区软硬互层高边坡的崩塌破坏提出了有针对性的多种破坏模式。陈洪凯等^[38-41]以崩落式危岩研究为主,集中开展危岩崩塌演化机理与防治研究,基于危岩主控结构面抗剪强度、损伤及断裂机制,揭示了崩塌链式演化规律,分析了崩塌落石的运动及突变特性。殷跃平等^[42-45]、刘传正^[46]、张永双等^[47]对大型崩塌灾害的机理以及引发高速远程碎屑流的崩塌灾害做了深入研究。

通过文献分析可知,国内外对岩体崩塌的研究虽然已较为全面,但更多是从地质方法入手定性分析,且并无专门针对塔柱状岩体崩塌破坏模式的系统研究成果。

2.3 岩体损伤力学研究与应用

对塔柱状岩体崩塌开展力学解析是深入研究成灾机理与稳定性分析的基础与关键。由于塔柱状、板状等岩体均具有较大高径比的形态结构,其顶部与底部可呈现出显著的差异化力学行为特性,加之岩体材料作为自然地质体,其结构及环境因素极为复杂,内部存在各种节理、裂隙和微缺陷,因此损伤力学理论的发展为合理考虑岩体材料内各种分布缺陷的研究提供了有力手段。

Kachanov^[48-49]于 20 世纪 50 年代首先提出损伤的概念并用一个定义为损伤变量的标量分析了一维蠕变破坏问题。在 Rabotnov^[50]进一步引入“损伤因子”的概念后,众多学者采用连续介质力学方法,把损伤因子推广为一种场变量,初步形成了“连续介质损伤力学”(CDM)这一学科^[51-56]。Dougil^[57]最早开展了岩石类材料损伤力学研究,认为对于脆性岩石而言理想脆性行为并不适用,岩石类材料中可能包含许多潜在缺陷点,可以用连续介质理论描述非均质固体的稳定破裂过程效应。随后 Dragou 等^[58]应用损伤概念提出了能反映应变软化的岩石与混凝土的弹性本构关系。Kyoya 等^[59]、Kawamoto 等^[60]于 1985 年将二阶损伤张量引入岩体损伤的研究,提出了节理岩体的损伤模型,最终实现了节理岩体各向异性损伤的有限元分析。Ashby 等^[61]在 1990 年提出了细观损伤力学概念,给出了含初始损伤分布的裂纹成核、发育以及相互作用的模型,分析了多种脆性岩石受压下微裂纹损伤的发展。此后,随着损伤检测技术的进步,损伤理论在岩体工程中的应用迅速发展。Shah 等^[62]、Nejat 等^[63]利用声发射(AE)技术研究了岩体的损伤问题; Cerrolaza 等^[64]将损伤理论结合边界元方法应用在地下工程岩体开挖中; Mihaly 等^[65]研究了岩体的动态损伤。

20 世纪 80 年代,损伤力学在岩石力学领域的应用在国内也受到极大关注。周维垣等^[66]、谢和平^[67]、李新平等^[68]、凌建明等^[69]、李宁等^[70]主要围绕不同损伤本构模型开展了研究。杨更社等^[71]、葛修润等^[72]、朱珍德等^[73]利用 CT 扫描技术或 SEM 技术对岩石损伤开展了定量分析。冯夏庭等^[74]、杨圣奇^[75]对岩石破裂过程的多场耦合效应与流变特性,从孔隙度演化、宏细观试验等方面进行了深入研究。何满潮^[76]介绍了基于声波测试法的工程地质体物性参数的最新研究进展。赵明阶等^[77]、尤明庆等^[78]、朱杰兵等^[79]分别利用声波测试技术对岩石损伤开展了相关研究工作。

可以看出,对于岩体这种具有先存损伤的材料,损伤理论无疑能够更好地反映岩体的真实属性。应用损伤力学理论研究岩体问题从 20 世纪末才开始起步,研究内容主要集中在损伤本构模型、加卸载下损伤演化、冻融循环下损伤演化、动载及爆破荷载下损伤特性、损伤试验检测、地下工程中损伤理论应用、多场耦合条件下的损伤研究等方向。随着检测、计

算、模拟等技术的进步,岩体损伤理论逐步成为国内外研究热点,最初应用在采掘工程中,后逐渐扩展到水利水电工程、地下工程,近年来开始有人尝试将其引入地质灾害研究。损伤力学理论在岩体领域虽已经取得了较为丰富的成果,但由于应用方向较窄,研究程度不一,实际应用亟需加强,因此仍面临诸多挑战。

3 问题与展望

通过对国内外塔柱状岩体崩塌的研究现状进行总结,以长江流域、西南山区等今后一段时期内重点调查与工作区的实际情况和亟待解决的实际问题为指引,综合考虑现有研究成果以及国内外研究热点,认为以下4方面问题值得开展深入研究:

①塔柱状等大型高陡岩体广泛分布于长江经济带及周边地区,尤其是中上游碳酸盐岩山区,受内外动力综合作用,这一地区大型危岩体的崩塌诱发因素十分复杂,关键因素的诱发机理又会影响到对灾害体早期识别特征的建立与甄别,而不同的特征因素会对灾害体致灾范围产生直接影响。因此在多因素作用与多场耦合下的灾害体致灾影响范围分析仍有待进一步开展研究。

②岩体是天然的不均匀和易受损材料,岩质崩塌破坏实质上是损伤演化诱致的突变,即塔柱状岩体崩塌失稳往往是典型的非线性动力学过程。特别需要指出的是,如何能够利用现有技术获取岩体损伤分析所需参数,是损伤力学理论能否合理应用于岩体崩塌研究的关键,而如何能够将理论层面研究转化为实际应用研究也仍将是需要大力攻关的重点研究方向。

③塔柱状岩体常会发生底部压裂溃屈型崩塌,传统地质力学模型目前并不能满足其成因机理分析需求,利用常规方法得到的稳定性分析与灾害体实际性状差别较大,可通过引入损伤力学理论开展研究。但对于具有较大高径比的灾害体,如何进行力学解析才能不忽略其自身差异性,灾害体底部荷载应力集中区的岩体损伤劣化过程对灾害体整体稳定性如何产生影响,这些问题均是今后研究中的重点与难点。

④塔柱状岩体崩塌灾害突发性强,破坏范围大,易形成远程碎屑流,灾害早期识别与监测预警难度大,应在考虑崩塌体损伤演化的前提下构建适用于塔柱状岩体崩塌的稳定性评价方法,在全面调查基础上,通过综合性计算分析对危岩体稳定性进行科学合理的预判,以避免或降低突发灾害事件带来的重大损失。

围绕上述问题与研究方向,应立足受崩塌灾害影响较为严重的地区,开展有针对性的、系统的调查研究工作。从崩塌体形成的地质环境背景出发,综合采用试验测试以及数值模拟等技术手段,揭示塔柱状岩体崩塌失稳机制,建立岩体崩塌与活动构造以及地表稳定性之间的联系,探索崩塌灾害研究的新思路与新方法,为我国尤其是长江经济带及其周边地区地质灾害减灾防灾提供科学理论依据与创新技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京:科学出版社,2008.
HUANG Run-qiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究 [J]. 工程地质学报, 2005, 13 (2): 145 ~ 154.
YIN Yue-ping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13 (2): 145 ~ 154.

- [3] 杨达源, 李徐生, 冯立梅, 等. 长江三峡库区崩塌滑坡的初步研究 [J]. 地质力学学报, 2002, 8 (2): 173 ~ 178.
YANG Dy-yuan, LI Xu-sheng, FENG Li-mei, et al. Pilot study on the collapses and landslides of the three gorge reservoir of the Changjiang river [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8 (2): 173 ~ 178.
- [4] 国土资源部. 全国地质灾害通报 (2006 - 2015 年) [R]. 2015.
Ministry of Land and Resources. The geological disasters of China [R]. 2015.
- [5] 张春山, 张业成, 张立海. 中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 2004, 10 (1): 27 ~ 32.
ZHANG Chun-shan, ZHANG Ye-cheng, ZHANG Li-hai. Danger assessment of collapses, landslides and debris flows of geological hazards in China [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10 (1): 27 ~ 32.
- [6] 黄波林, 陈小婷, 殷跃平. 基于蒙特卡罗法的崩塌涌浪分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (6): 1215 ~ 1221.
HUANG Bo-lin, CHEN Xiao-ting, YIN Yue-ping. Rockfall impulse wave analysis method based on Monte Carlo method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (6): 1215 ~ 1221.
- [7] 陈立德, 黄波林, 陈州丰, 等. 长江三峡高陡岩质岸坡与危岩体 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
CHEN Li-de, HUANG Bo-lin, CHEN Zhou-feng. High-steep rock slope and dangerous rockmass in Three Gorges of Yangtze River [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.
- [8] Powell J W. Exploration of the Colorado River of the west and its tributaries [M]. Washington: Government Printing Office, 1875.
- [9] Terzaghi K. Mechanism of landslides [M]. Berkey: The Geological Society of America, Engineering Geology, 1950.
- [10] Poisel R, Eppensteiner W. A contribution to the systematics of rock mass movements [C] //The 5th International Symposium on Landslides, 1988: 1353 ~ 1357.
- [11] Poisel R, Hans Angerer. Mechanics and velocity of the Lärchberg-Galgenwald landslide (Austria) [J]. Engineering Geology, 2009, 109 (1): 57 ~ 66.
- [12] Rainer Poisel, Alexander Preh. Rock fall detachment mechanisms [C] //Interdisciplinary Rockfall Workshop, 2011: 1 ~ 2.
- [13] Nichol S L, Hungr O, Evans S G. Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39 (4): 773 ~ 788.
- [14] Dussauge-Peisser C, Helmstetter A, Grasso J R, et al. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: Potential of historical data analysis [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2002, 2 (1): 15 ~ 26.
- [15] Glastonbury J, Fell R. Report on the analysis of "Rapid" Natural Rock Slope Failures [M]. Sydney Australia: The University of New South Wales, 2000.
- [16] 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 Hong-kai, ZHANG Rui-gang, TANG Hong-mei, et al. Elastic and impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (24): 30 ~ 33.
- [17] Liu Q, Gu Z, Lu Y, et al. Weathering processes of the dolomite in Shibing (Guizhou) and formation of collapse and stone peaks [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (2): 1 ~ 9.
- [18] 胡厚田, 赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (6): 689 ~ 694.
HU Hou-tian, ZHAO Xiao-yan. Studies on rockmass structure in slope of red bed in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (6): 689 ~ 694.
- [19] 李明. 长白山龙门峰高陡边坡岩体质量评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
LI Ming. Rock mass quality evaluation of high-steep slope in Longmenfeng, Changbai Mountains [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [20] 贺凯, 殷跃平, 李滨, 等. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析 [J]. 工程地质学报, 2015, 23 (1): 86 ~ 92.
HE Kai, YIN Yue-ping, LI Bin, et al. Video imaged based analysis of motion characteristic for tower rock collapse [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (1): 86 ~ 92.

- [21] 张晓科, 秦四清, 李志刚, 等. 西龙池抽水蓄能电站下水库 BW2 危岩稳定性分析 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (2): 174~178.
ZHANG Xiao-ke, QIN Si-qing, LI Zhi-gang, et al. Stability analysis of an unstable rock block at the site of Xilongchi pumped storage power station [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15 (2): 174~178.
- [22] Baltzer A. Über bergstürze in den Alpen [J]. Verlag der Schabelitz' schen Buchhandlung (C. Schmidt), Zurich, 1875: 50.
- [23] Heim A. Landslides and human lives (Bergsturz and Menschenleben) [M]. Vancouver: Bi-Tech Publishers, 1932: 1~196.
- [24] Sharpe C F S. Landslides and related phenomena [J]. Soil Science, 1938, 46 (5): 421.
- [25] Varnes D J. Landslide types and processes [C] //Eckel E B. Landslides and engineering practice (special report 28). Washington D C: Highway Research Board, National Academy of Sciences, 1954: 20~47.
- [26] Varnes D J. Slope movement types and processes [C] //Schuster R L, Krizek R J. Landslides, analysis and control (special report 176). Washington D C: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1978: 11~33.
- [27] Hutchinson J N. Chalk flows from the coastal cliffs of north-west Europe [C] //Catastrophic Landslides, Evans S G, DeGraff J V. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology XV, 2002: 257~312.
- [28] Cruden D M, Varnes D J. Landslide types and processes [C] //Turner A K, Schuster R L. Landslides investigation and mitigation. Washington D C: Transportation Research Board, US National Research Council, 1996: 36~75.
- [29] Hungr O. Dynamics of rock avalanches and other types of slope movements [D]. Edmonton: University of Alberta, 1981.
- [30] Hungr O, Evans S G, Bovis M, et al. Review of the classification of landslides of the flow type [J]. Environ Eng Geosci, 2001, 7 (3): 221~238.
- [31] Hungr O, Evans S G. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. Felsbau, Vienna, Austria 2004, (22): 16~23.
- [32] STROM A L, KORUP O. Extremely large rockslides and rock avalanches in the Tianshan Mountains, Kyrgyzstan [J]. Landslides, 2006, 3 (2): 125~136.
- [33] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The Varnes classification of landslide types: An update [J]. Landslides, 2014, 11 (2): 167~194.
- [34] 胡厚田. 崩塌与落石 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
HU Hou-tian. Collpase and rockfall [M]. Beijing: China Railway Press, 1989.
- [35] 旷镇国. 重庆市中区危岩崩塌特征、形成机制及防治研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, (3): 51~56.
KUANG Zhen-guo. Study on characteristics deformation mechanisms and control of dangerous rock and rock fall in central area of Chongqing city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, (3): 51~56.
- [36] 刘卫华, 黄润秋, 裴向军, 等. 危岩体调查及稳定性工程地质分类方法探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3 (S1): 1269~1273.
LIU Wei-hua, HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, et al. Discussion on survey and stability engineering geology classification method for potential unstable rock masses [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (S1): 1269~1273.
- [37] 伍法权. 三峡库区高切坡变形破坏机制 [M]. 北京: 中国三峡出版社, 2010.
WU Fa-quan. Mechanism of deformation and failure for high cutting slope in Three Gorges Reservoir Region [M]. Beijing: China Three Gorges Press, 2010.
- [38] 陈洪凯, 唐红梅. 长江三峡水库区危岩分类及宏观判据研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16 (4): 57~61, 82.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Classification and identify of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16 (4): 57~61, 82.
- [39] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区危岩发育规律研究 [C] //第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 2006: 847~852.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Regularity of perilous rock in the area of the Three-gorges Reservoir [C]. Proceedings

- of the Second Geological and Engineering Academic Conference. 2006: 847 ~ 852.
- [40] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 等. 危岩崩塌演化理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, Wang Lin-feng. Evolutionary theory and application of dangerous rock collapse [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [41] 陈洪凯, 董平, 唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2015, (6): 53 ~ 60 + 2.
CHEN Hong-kai, DONG Ping, TANG Hong-mei. The status quo and trends of perilous rock and collapse disaster [J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2015, (6): 53 ~ 60 + 2.
- [42] 殷跃平, 康宏达, 张颖. 链子崖危岩体稳定性分析及锚固工程优化设计 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (5): 599 ~ 603.
YIN Yue-ping, KANG Hong-da, ZHANG Ying. Stability analysis and optimal anchoring design on Lianziya dangerous rockmass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (5): 599 ~ 603.
- [43] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (2): 217 ~ 226.
YIN Yue-ping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (2): 217 ~ 226.
- [44] Yin Y, Sun P, Zhu J, et al. Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China [J]. Landslides, 2011, 8 (4): 517 ~ 525.
- [45] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (4): 445 ~ 454.
YIN Yue-ping, ZHU Ji-liang, YANG Sheng-yuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (4): 445 ~ 454.
- [46] 刘传正. 贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (5): 623 ~ 630.
LIU Chuan-zheng. Preliminary findings on Dazhai landslide-debris flow disaster in Guizhou Province of June 28, 2010 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (5): 623 ~ 630.
- [47] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake induced geohazards in Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- [48] Kachanov L M. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie tekhnicheskich nauk, 1958, (8): 26 ~ 31.
- [49] Kachanov L M. Introduction to continuum damage mechanics [M]. M. Nijhoff, 1986.
- [50] Rabotnov Y N. On the equation of state of creep [J]. 1963, 178 (31): 117 ~ 122.
- [51] Lemaitre J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80 (2): 233 ~ 245.
- [52] Lemaitre J, Dufailly J. Damage measurements [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28 (s5/6): 643 ~ 661.
- [53] Krajcinovic D. Continuous damage mechanics revisited; basic concepts and definitions [J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 52 (4): 829 ~ 834.
- [54] Murakami S, Ohno N. A Continuum Theory of Creep and Creep Damage [M]. International Union of Theoretical and Applied Mechanics, 1981: 422 ~ 444.
- [55] Murakami S. Notion of continuum damage mechanics and its application to anisotropic creep damage theory [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1983, 105 (2): 99 ~ 105.
- [56] Janson J, Hult J. Fracture mechanics and damage mechanics: A combined approach [J]. Journal de Mecanique Appliquee, 1977, 1 (1): 69 ~ 84.
- [57] Dougill J W. On stable progressive fracturing solids [J]. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik Zamp, 1976, 27 (4): 423 ~ 437.
- [58] Dragon. A, Mroz. Z. A Continuum Model for Plastic-Brittle Behaviour of Rock and Concrete [J]. International Journal of Engineering Science, 1979, 1 (17): 121 ~ 137.
- [59] Kyoya T, Ichikawa Y, Kawamoto T. A damage mechanics theory for discontinuous rock mass. [C]. Proc 5th Int Conf Num

- Meth in Geomach. Nagoya, 1985: 460~480.
- [60] Kawamoto T, Ichikawa, Kyoya T. Deformation and fracture behaviour of dis continuous rock mass and damage mechanics theory [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12 (1): 1~30.
- [61] Ashby M F, Sammis C G. The damage mechanics of brittle solids in compression [J]. Pure and Applied Geophysics, 1990, 133 (3): 489~521.
- [62] Shah K R, Labuz J F. Damage mechanisms in stressed rock from acoustic emission [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1995, 100 (B8): 15527~15539.
- [63] Nejati H R, Ghazvinian A. Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2014, 47 (5): 1839~1848.
- [64] Cerrolaza M, Garcia R. Boundary elements and damage mechanics to analyze excavations in rock mass [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1997, 20 (1): 1~16.
- [65] Mihaly J M, Bhat H S, Sammis C G, et al. A Dynamic Damage Mechanics Source Model for Explosions in Crystalline Rock [C] //AGU Fall Meeting Abstracts. 2011, 1: 2215.
- [66] 周维垣, 吴澎, 杨若琼. 节理岩体的损伤模型 [C] //岩石力学新进展. 1989: 18.
ZHOU Wei-yuan, WU Peng, YANG Ruo-qiong. Damage model of jointed rock mass [C] //New progress in rock mechanics. 1989: 18.
- [67] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
XIE He-ping. Damage mechanics of rock and concrete [M]. Xuzhou: China Mining University Press, 1990.
- [68] 李新平, 朱维申. 多裂隙岩体的损伤断裂分析及工程应用 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (4): 1~8.
LI Xin-ping, ZHU Wei-shen. The damage-fracture analysis of jointed rock mass and its application in engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (4): 1~8.
- [69] 凌建明, 孙钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12 (4): 304~312.
LING Jian-ming, SUN Jun. On mesocrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12 (4): 304~312.
- [70] 李宁, 张平, 段庆伟, 等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (11): 1579~1584.
LI Ning, ZHANG Ping, DUAN Qing-wei, et al. Dynamic meso-damage model of jointed rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (11): 1579~1584.
- [71] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤特性的CT识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15 (1): 48~54.
YANG Geng-she, XIE Ding-yi, ZHANG Chang-qing, et al. CT identification of rock damage properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15 (1): 48~54.
- [72] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏观细观试验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. Study on damage mechanics in macro and micro experiment [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [73] 朱珍德, 黄强, 王剑波, 等. 岩石变形劣化全过程细观试验与细观损伤力学模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (6): 1167~1175.
ZHU Zhen-de, HUANG Qiang, WANG Jian-bo, et al. Mesoscopic experiment on degradation evolution of rock Deformation and its meso-damage mechanical model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (6): 1167~1175.
- [74] 冯夏庭, 丁梧秀, 姚华彦, 等. 岩土破裂过程的化学-应力耦合效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
FENG Xia-ting, DING Wu-xiu, YAO Hua-yan. Coupled Chemical-Stress Effect on Rock Freacturing Process [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [75] 杨圣奇. 裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
YANG Sheng-qi. Analyze of mechanical property and time effect for Jointed rock [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [76] 何满潮. 工程地质力学的挑战与未来 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (4): 543~555.
HE Man-chao. The challenges and future of engineering geomechanics [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22 (4): 543~555.

- [77] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (6): 720 ~ 722.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (6): 720 ~ 722.
- [78] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (3): 458 ~ 467.
YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, LI Xiao-shuang. Study on relation between mechanical properties and Longitudinal wave velocities for damaged rock samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (3): 458 ~ 467.
- [79] 朱杰兵, 韩军, 程良奎, 等. 三峡永久船闸预应力锚索加固对周边岩体力学性状影响的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (6): 853 ~ 857.
ZHU Jie-bing, HAN Jun, CHENG Liang-kui, et al. Research on rock mass properties near anchor with prestressing for TGP permanent shiplock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (6): 853 ~ 857.

A REVIEW ON THE COLLAPSE HAZARDS OF TOWER-SHAPED ROCK

HE Kai^{1,2}, CHEN Chun-li³, FENG Zhen^{1,2}, LI Bin^{1,2}, Pan Li-bin⁴

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic and Geohazard, Ministry of Land Resources, Beijing 100081, China;

3. China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

4. The 107 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Chongqing City, Chongqing 401120, China)

Abstract: Through systematically sorting out the relative data of the collapse hazards of tower-shaped rock at home and abroad, we summarized three aspects of the tower-shaped rock (the influence factors of formation and stability, failure mode of collapse and application of damage theory) in Yangtze River Economic Belt and surrounding areas. Then we discussed the trend and hotspot issues of the collapse hazards of tower-shaped rock, offering theoretical preparation and reference for the next stages of the geological survey and research.

Key words: tower-shaped rock; the Yangtze River Economic Belt; collapse hazard; damage; collapse triggered by pressured breakdown