

地震引发滚石灾害及其基本特征研究^{*}

秋仁东^{1,2}, 石玉成^{1,2}, 李 罡³, 陈永明^{1,2}, 孙军杰^{1,2}, 胡明清^{1,2}, 徐舜华^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000;
3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 通过对已有地震资料的搜集、整理和综合分析, 研究了地震滚石灾害的致灾方式、诱发环境条件及发生模式, 总结得出地震引发滚石灾害的基本特征, 提出了解决地震滚石灾害的可行性方法和思路, 以期能为相关研究工作提供参考。

关键词: 地震; 滚石; 基本特征

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)02-0198-06

0 引言

从20世纪50年代起, 国内外学者开始针对滚石灾害开展相关研究工作。已有研究主要集中于不考虑地震因素下的滚石运动轨迹、公路沿线遭遇滚石灾害风险性分析、滚石致灾距离、滚石灾害防护系统等问题(张路青, 2004; 赵旭, 刘汉东, 2005)。震害调查研究结果表明, 地震引发的滚石灾害不容忽视, 它可堵塞道路、妨碍地震应急救援工作顺利开展, 甚至会危及到人民的生命财产安全。这类震害在邢台地震、通海地震、炉霍地震、昭通地震、松潘地震、澜沧—耿马地震、民乐地震、岷县地震、昆仑山口西8.1级地震、普洱地震、大姚地震中都有震例可考(国家地震局兰州地震研究所, 1976, 1980、1985; 宋瑞祥等, 2003; 非明伦等, 2006; 付正新等, 2005)。对这样严重的地震滚石灾害, 我们目前的相关研究还不够。

目前, 对地震动荷载作用下高危岩质边坡稳定性的研究多关注于边坡整体稳定性、坡体失稳防治等方面(薄景山, 2005)。对此类边坡在地震动荷载作用下大块岩石滚落造成的道路交通设施瘫痪、人身伤亡以及其它次生灾害皆尚未引起学界的足够重视, 地震引发滚石的块体运动规律、滚落岩体的防护措施等极具针对性的研究依然欠缺。系统阐述地震滚石灾害的危害作用, 加大地

震动荷载引发滚石灾害的动力机制以及相应整治、防护措施等方面的研究工作, 是有效解决地震滚石灾害的根本途径。

我国西部山区强震较多, 加之地质构造复杂、地形地貌多样, 地震灾害在该区的表现形式多样复杂, 地震滚石灾害就是其中的一类典型震害。在西部山区加快经济发展、加大基础设施投入的时期, 这种地震灾害将使该地区的基础设施安全性、正常社会秩序、经济发展进度等面临更为严峻的挑战。因此, 开展地震动荷载作用下滚石灾害基本特征研究, 对减缓西部山区防震减灾工作的潜在压力具有现实意义, 为地震滚石灾害的动力机制、防护措施等研究的深入开展起到铺垫作用。

1 地震滚石灾害

地震滚石灾害的潜在危害巨大, 该类震害多会造成较大经济损失。1966年3月8日和22日, 河北隆尧分别发生6.8级和7.2级地震, 邢台、石家庄、邯郸、保定4个地区发生山石崩塌361处, 山崩飞石撞击引起火灾22处, 烧山3000亩。1970年1月5日云南通海7.7级地震, 致使曲江河谷发生滚石灾害数十处, 河道阻塞, 道路损毁。1973年2月6日四川炉霍县7.9级地震, 使公路沿线的边坡出现不同规模的滚石灾害, 严重影响了公路交通的顺畅。1974年5月11日云南昭通地

^{*} 收稿日期: 2007-12-11.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项和地震科学联合基金(A07122)联合资助。

区 7.1 级地震，在极震区和 VIII 度区诱发较多滚石灾害，砸毁农田、房屋，击伤人畜。1976 年 8 月 16 日和 23 日四川省北部松潘、平武之间 7.2 级地震，由于震区岩石破碎、风化严重，加之震后连续暴雨，滚石灾害严重，使得交通阻塞、河流壅塞、房屋被毁、大量农田受损。1988 年 11 月 6 日云南澜沧—耿马 7.6 级地震，国防公路遭受地震滚石掩埋长度达 10 km，并使路过的汽车和行人受害。

历史上，甘肃地区的地震滚石灾害也十分严重（表 1）（兰州地震研究所，1985，1987，1989；国家地震局震害防御司，1995）。

表 1 地震引发滚石灾害历史资料（甘肃地区）

Tab. 1 Historical records about rockfall hazards induced by earthquake in the region of Gansu province

发震日期	地点	资料原文	资料来源
公元前 186 年 2 月 25 日	羌道、武都	春正月乙卯地震，羌道、武都道山崩	《汉书》卷 3《高后纪》96 页
839 年	岷县一带	自是国中地震裂，水泉涌，岷山崩……	《新唐书·吐番传》册二十九卷 210 页
1542 年 12 月	天水	明嘉靖二十一年十一月，秦州属县地震，山崖崩坠，尘飞蔽野	乾隆《直隶秦州新志》卷 7 页
	徽县	明嘉靖二十一年十一月，徽州地震，山崩	民国《徽县新志》卷 1 页
1581 年 7 月	文县	明万历九年地震，山岩多崩。	康熙《文县志》卷 7 杂述志灾变 7 页
1879 年 7 月 1 日	武都	阶州城中突起土阜周二里许，各处山石飞走，……	《宣统新通志》
	武都	地震，南山崩裂，冲倒南门楼一座……	《史念祖随录》甘南地震
	武都	甘肃阶州地方，局山忽崩	《益闻录》13 卷 75 页
	文县	五年五月初十日地震，十二日寅刻大震，山崩……	《益闻录》13 卷 75 页
	广元一带	地动情形甚重，被沟上山岩坠塌，将河身壅塞……	《故宫档案》；光绪五年十一月初三日《申报》
1880 年 6 月 22 日	文县	关家山崩，压毙男三丁，女一口……	《史念祖随录》
1881 年 7 月 20 日	武都文县一带	查阶文自前年地震以后，至今两年有余，迄未大定，其中或数日一震，十数日一震，或一日数震，震时其生如雷，山石乱滚……	《故宫档案》
1920 年 12 月 16 日	兰州（青石关）	房子动，山上有土石下掉	《兰青线地震调查》
	兰州（达家川）	山上有桌子般大石块滚下，河水左右摇摆，泼上岸 1 尺左右	《兰青线地震调查》
	兰州（马回子）	山上陡峭沟壁石块掉下	《兰青线地震调查》
	兰州（二房台）	南石山上石头滑下，山上开口，最长者 3 米	《兰青线地震调查》
	兰州（青土坡）	山上掉石块……	《兰青线地震调查》
	兰州（新庄子）	声如雷鸣，山上掉石块，最大者约一间房子大，堵塞了人行道。	《兰青线地震调查》
	兰州（水车湾村）	山上有土石掉下	《兰青线地震调查》
1932 年 12 月 25 日	嘉峪关（黑窖门）	山上乱石滚下，二个柜子大的石头滚到羊厰，直径约 30 多厘米的石头滚到羊厰很多……	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一 4 页
	嘉峪关（白杨树沟）	山上塌石头，最大者一人抱不住	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（王子沟）	山上不稳巨石滚下	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（小青羊）	一约 2 立方米的巨石由山上滚下，碰成数块	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（干沟口）	山上 2 直径约 80 厘米的悬石滚下	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（红沙柳）	山上滚石很多，最大像房子一样大	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（格里木）	两岸石头下落，最大 5 - 8 立方米，并打死牦牛一头，打伤一头	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一
	嘉峪关（二道沟）	山上巨石滚下，尘土飞扬，一头牛被砸伤。行人乔老四，肩上背的一个馍包被滚石打掉	1965 年西北地震考察队《嘉峪关工作资料》之一

续表 1

发震日期	地点	资料原文	资料来源
1936 年 2 月 7 日	康乐（结来沟）	石头翻滚，大的石头有二三间房大	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	康乐（尚家沟）	河坝滩地裂开口子，山石滚落	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	临潭（上寨）	山崖崩落，石头乱滚	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	卓尼（上加岭一带）	上加岭石头崩落，大者比一间房子还大。上寺坝有一人被滚石砸死，牲口也有被砸死的	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	卓尼（土房大庄）	山崖崩落，几间房大的石头滚落……	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	卓尼（当江克）	周围山上的石头大量滚落，砸坏房子	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
	卓尼（威当山）	威当山石崩，有好几间房子大的石头纷纷滚落……	《1936 年临潭—康乐地震考察报告》
1936 年 8 月 1 日	秦安	山中悬崖亦有颓崩……	1953 年《甘肃省地震研究资料》
	礼县	西区一带山崩地裂……	1953 年《甘肃省地震研究资料》
1960 年 2 月 2 日	舟曲	宕昌山上石头乱滚，房屋发响，人惊逃户外……	《1960 年 2 月 2 日甘肃龙叠（舟曲）地震调查报告》

2 地震滚石灾害表现方式

地震诱发的滚石包含一个或多个块石不等。一般地，当地震引发的滚石在运动过程中对人、交通设施或工具、建（构）筑物或人类依存的环境等造成伤害、破坏或影响时即可称之为地震滚石灾害。

地震滚石灾害的表现方式，可概括如下：

（1）滚石以直接冲击的方式损坏运输线路并对附近活动的人员、车辆、生活设施及建筑物的安全构成威胁（非明伦等，2006）；

（2）地震滚石以在路面上停留或堆积的方式影响来往车辆的安全运行或阻碍交通；

（3）山区城市的地震滚石活动会威胁到人们的生产、生活及相应的设施（国家地震局兰州地震研究所，1985，1987，1989；国家地震局震害防御司，1995）；

（4）水电站建设、采石场、露天矿山等的开挖活动可形成人工高边坡，而这些边坡上发生的地震滚石会严重影响施工人员和有关设施的安全（赵旭，刘汉东，2005）；

（5）很多旅游资源位于高山、峻岭、峡谷等滚石易发区，地震滚石活动会对游客的安全造成威胁（张路青，2004）；

（6）在山区地表附近布置的重要管线、油罐、有害物质隔离层等有可能受到地震滚石冲击的影响（张路青，2004）；

（7）地震诱发的大量滚石堆积会堵塞河道，致使鱼类回游困难，造成鱼类繁殖障碍，从而引发渔业经济损失。

3 地震滚石的主要类型及发生的条件因素

3.1 地震滚石的主要发生模式

在综合分析前人针对危岩分类的基础上，结合整治危岩积累的实践经验，把危岩按其失稳和开始运动的方式分为坠落式、倾倒式、滑塌式和滚动式等 4 种类型（图 1）：

（1）坠落式：高悬于陡崖上端或岩腔顶部的危岩体，受裂隙切割脱离母岩，因其底界临空条件良好，在地震力和重力共同作用下失稳产生坠落（图 1a）；

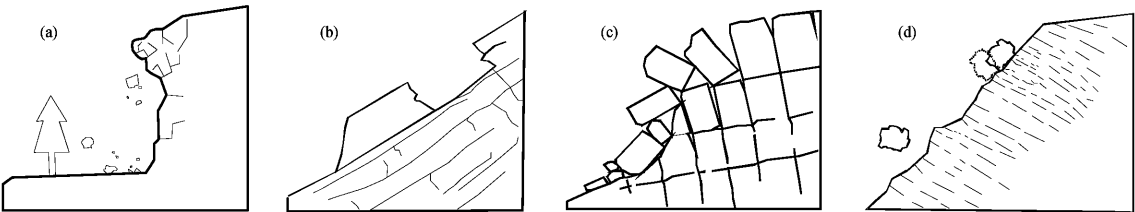


图 1 地震引发滚石的主要发生模式

Fig. 1 Various modes of rockfalls induced by earthquake

（a）坠落式；（b）倾倒式；（c）滑塌式；（d）滚动式

(2) 倾倒式：危岩体在变形破坏时，其顶部先脱离母岩，然后沿基座支点转动，最终产生倾倒式破坏（图1b）；

(3) 滑塌式：岩体附着于母岩上，与某一层面或结构面相接，危岩体在地震力和其它因素作用下，沿母岩（或基座）发生剪切滑移破坏（图1c）；

(4) 滚动式：脱离母体的岩石块体静止停留在边坡体上，地震发生时边坡产生水平向和竖向振动，岩石块体在地震力和重力双重作用下沿坡体向下滚动（图1d）。

3.2 地震引发滚石灾害的环境条件

地震滚石灾害主要受内在条件与外部条件制约，具体阐述如下。

3.2.1 内在条件

(1) 岩性：滚石多发于岩性坚硬的岩石地段，如灰岩、砂岩、页岩、闪长岩、花岗岩、辉长岩、辉绿岩等。在软硬相间的地层中，由于岩层间抗风化能力的不同，厚层常形成陡坎，薄层灰岩及泥质灰岩一般形成缓坡。这种陡缓相间的台阶状地形，为滚石的形成提供了良好的悬空条件。在这种岩性条件下，发生滚石的频率高，规模较大。与此相反，在较均质的柔性岩石中，如千枚岩、页岩等，发生滚石的频率较低，规模也较小。

(2) 构造条件：断层交汇处、断层破碎带、背斜轴部、遭强烈挤压的向斜轴部、火成岩岩脉侵入界面、高陡边坡卸荷带等岩体结构破碎、断层节理构造面发育部位等都是滚石多发区域。构造条件是形成滚石的决定性因素，也是控制滚石分布的重要因素。各种地质构造作用使岩层遭受不同程度的破坏，完整的岩体被切割成大小不同的碎裂体，这是边坡滚石的必要条件；另外，不同地质构造作用对滚石的影响也不同，各类构造节理不断导致岩体破碎，这为后期地表水作用、风化作用、热胀冷缩作用等外部营力提供了便利，一旦结构面倾向坡体临空面，地震条件下就易发生滚石。

3.2.2 外部条件

(1) 水文因素：包括降雨、地表水、地下水等水体活动。水体对危岩稳定性的影响主要体现在产生不利于岩体稳定的浮托力、静（动）孔隙水压力、软化结构面裂隙中的充填物、带走细颗粒物质等方面。水体的介入，常给危岩稳定带来灾难性后果。雨季是危岩失稳的多发季节，降雨强度越大、历时越长，滚石越易发生。地表河湖、水库等岸坡

受水流、波浪冲刷也易产生崩塌，尤其在岩层软硬相间时，这种现象更为明显。

(2) 风化因素：边坡岩体在温度场、水、日照、风等因素的长期作用下发生风化，导致岩体更加破碎、削弱岩体强度，不利于危岩的稳定。风化越强烈，岩体越破碎，危岩越易失稳。边坡不同岩层的差异性风化，也会使崩塌易于发生。

(3) 植被因素：植物根系对危岩的根劈作用不利岩体稳定。随着植物根部不断增长变粗，岩石裂隙、节理和软弱层面不断扩展，会加速崩塌事件的发生。另外，植物根系分泌的有机酸会分解岩石矿物，也对危岩稳定不利。

(4) 其它因素：人类活动中的开挖、爆破等。

4 地震引发滚石发生的基本特征

4.1 数量多、规模大

我国西部山区，地震诱发的滚石灾害较为频繁，在强震发生后的高烈度区引发的滚石灾害往往非常密集，有时甚至成群连片。

4.2 原始地形坡度角较小、坡角变化范围大

地震引发滚石的过程是岩石块体沿崖体坠落或沿坡体滚动、平动的过程，其造成的灾害是地震力、崖体、坡体和岩石块体重共同作用的产物。斜坡的原始坡角是地震滚石灾害发生的重要参数。综合分析已有地震滚石灾害资料可见，灾害发生的坡角范围为 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，优势坡角为 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

4.3 滚动速度快、距离远、危害性强

强震引发的滚石往往会在顷刻间大范围冲击公路、村落，具有规模大、速度快、距离远、危害性强的特点。

4.4 滚石展布与等震线不完全一致

受大地构造单元、基底岩层结构、地形地貌条件、地震烈度、断裂构造等诸多因素的影响，地震滚石的展布形态较为复杂，并非与等震线一致。滚石灾害规模差别也很大：有的地区发生强震，滚石灾害并不严重，而有的地区即使发生中强地震，也能引发严重的滚石灾害。如1879年武都南地震诱发了大量的滚石灾害，行成滚石灾害的区域比较分散（图2a），有三个位于Ⅷ度区内；一个位于Ⅶ度区内；两个位于Ⅵ度区内（国家地震局震害防御司，1995）。

4.5 触发震级较小、烈度较低

地震滚石灾害的触发震级较小,且该类灾害在低烈度区也较常见。几乎所有发生在山区的 5.0

级以上地震,均曾引起过规模不同的滚石灾害;往往烈度达到 VI 度的山区就可引发滚石灾害,甚至在有些 V 度地区也能引发滚石灾害(图 2b)。

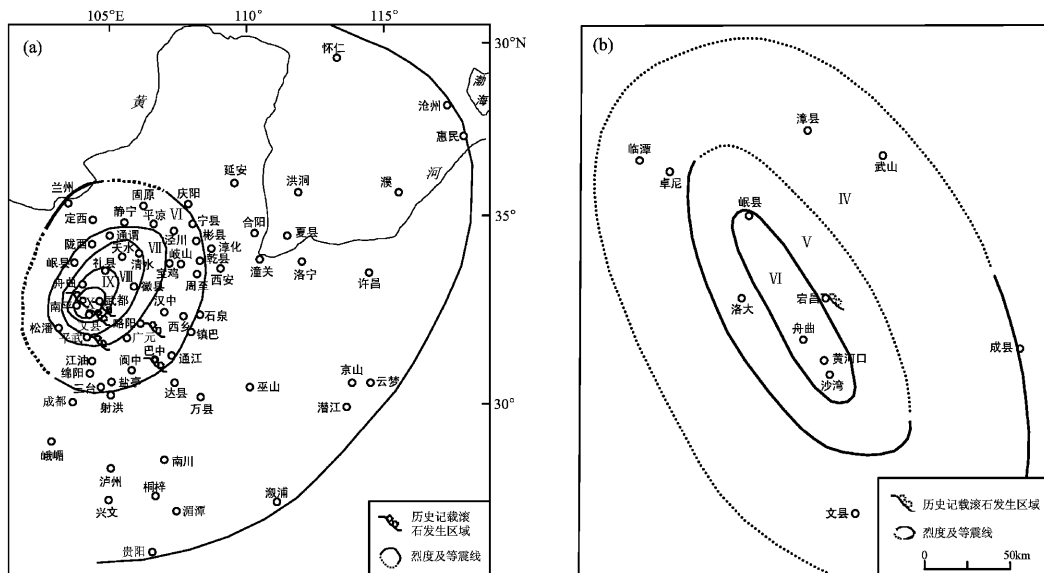


图 2 地震等震线图及滚石发生区域分布图

Fig. 2 The distribution map of the rockfall and the isoseismal line

(a) 1879 年 7 月 1 日甘肃武都南地震等震线图; (b) 1960 年 2 月 3 日甘肃舟曲地震等震线图

5 结论与讨论

(1) 通过综合分析前人的分类方式,结合已有整治滚石灾害积累的实践经验,把滚石按其失稳和开始运动的方式分为坠落式、倾倒式、滑塌式和滚动式等 4 种。

(2) 地震滚石灾害具有规模大、数量多(历史破坏性地震)、滚动速度快、距离远、危害性强和诱发滚石灾害的地震烈度小等特点。

(3) 地震滚石灾害受的形成大地构造单元、基底岩层结构、地形地貌条件、地震烈度、断裂构造等诸多因素的影响,地震引发滚石的展布形态较为复杂,并非与等震线一致。

地震滚石灾害是一个复杂的物理过程。已有震害调查表明,同等条件或者同一震区,滚石灾害往往与地形坡度角、烈度大小成正比。对于地震滚石灾害来说,滚石来源的坡体是滚石的载体,仅考虑地震强度和地形坡角是远远不够的,对滚石来源的坡体的内在结构、整体特征及其形成地震波作用特征进行深入研究应该是一个正确的方向。

参考文献:

- 薄景山,刘红帅,刘德东. 2005. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述 [J]. 地震工程与工程振动, 25 (1): 164 - 170.
- 非明伦,周光全,谢英情,等. 2006. 盐津 5.1 级地震现场调查与烈度分布 [J]. 地震研究, 29 (4): 411 - 417.
- 付正新,非明伦,施伟华,等. 2005. 大姚 6.1 级地震烈度与震害分析 [J]. 地震研究, 28 (2): 197 - 201.
- 国家地震局兰州地震研究所,宁夏地震队. 1980. 1920 年海原大地震 [M]. 北京:地震出版社.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1976. 1974 年 3 月 29 日云南省昭通地震道路建筑物震害影集 [R]. 1 - 28.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 1985 年 6 月 24 日宕昌 5 级地震考察报告 [R]. 1 - 43.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 陕甘宁青四省(区)强震目录(公元前 1177 年 - 公元 1982 年) [M]. 西安:陕西科学技术出版社.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1987. 1987 年甘肃迭部 (5.9) 地震—震前预报地震考察. 现场摄像震后对策与震区工作 [R]. 1 - 149.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1989. 甘肃省地震资料汇编 [M]. 北京:地震出版社.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪 - 公元 1911 年) [M]. 北京:地震出版社.
- 宋瑞祥,陈建民,岳明生,等. 2003. 中国昆仑山口西 8.1 级地震

图集 [M]. 北京：地震出版社.

张路青, 许兵. 2004. 川藏公路南线八宿—林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 23 (9): 1551 – 1557.

张路青, 杨志法, 许兵. 2004. 滚石与滚石灾害 [J]. 工程地质学报, 12 (3): 225 – 231.

赵旭, 刘汉东. 2005. 水电站高边坡滚石防护计算研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 24 (20): 3742 – 3748.

Study on the Basic Characteristics of Rockfall hazard induced by earthquake

QIU Ren-dong^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}, LI Gang³, CHEN Yong-ming^{1,2},
SUN Jun-jie^{1,2}, HU Ming-qing^{1,2}, XU Shun-hua^{1,2}

- (1. Lanzhou Base of Ins titute of Ea rthquake P redic tion, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)
- (2. Lanzhou Ins titute of se ismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)
- (3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract

In this paper, we studied on the disaster inducing ways, initiating environmental conditions and modes of rockfalls based on the collection and general analysis of historical earthquake events. It also analyzed the basic characteristics of earthquake induced rockfall. In addition, the feasibility of methods and ideas on solving the hazard of earthquake induced rockfall was also brought up for the reference to relative researching activities.

Key words: earthquake; rockfall; basic characteristics