

三峡库区公路缓倾角岩层边坡崩塌机理及警报系统*

陈洪凯, 唐红梅

(重庆交通大学 岩土与地质工程系, 重庆 400074)

摘要 危岩崩塌是我国山区公路主要病害类型, 具有分布广泛、前兆不明、突变失稳、致灾严重等特征, 防治难度大。以发生在 2007 年 11 月 20 日湖北巴东高阳寨国道 318 线 K1405 并导致 1 辆客车被掩埋和 31 人死亡的特大型崩塌灾害为背景, 分析了三峡库区公路边坡崩塌灾害安全问题, 揭示了缓倾角层状岩体边坡危岩群发性机理。研究发现群发性危岩一般由多层危岩体叠置而成, 当顶部危岩体断裂失稳后, 通常作为荷载直接施加在下部危岩体上, 加速了下部危岩体的破坏过程。国道 318 线 K1405 崩塌源存在 9 个危岩块, 按照 3 层叠置, 其破坏过程符合危岩群发性破坏机理, 已经崩落的第 3 层危岩顶部第 4 层危岩体目前已处于欠稳定状态, 初步构建了公路边坡崩塌灾害警报系统, 包括 4 个部分, 即监测仪、预警仪、警示牌、无线传输和信号解译。最后分析了在公路建设及养护过程中高度重视地质安全的必要性。

关键词 三峡库区; 公路边坡; 危岩; 崩塌灾害; 形成机理; 警报系统

中图分类号 P642.21

文献标识码 A

文章编号 1672-6693(2009)03-0026-04

中国 2/3 的国土面积属于山地丘陵地区, 尤其在西部地区, 地形起伏大、地质构造复杂、岩体破碎、灾害性气象条件显著, 危岩崩塌、滑坡、泥石流等重大地质灾害极为发育^[1], 影响着数十万公里干线公路的交通安全。目前, 中国山区公路建设等级逐渐提高、公路养护管理任务越来越繁重, 边坡地质安全问题日益凸显。在公路边坡地质灾害中, 危岩崩塌具有分布广泛性、失稳突发性、致灾严重性, 灾前迹象通常不明, 因此其防治难度更大。

2007 年 11 月 20 日, 位于三峡库区的湖北省巴东县高阳寨处国道 318 线 K1405 发生巨型崩塌灾害, 1 辆客车被崩塌体掩埋, 车内 31 人全部遇难。该崩塌灾害源距离路面以上 34 m 处, 崩塌体沿陡崖走向的长度约 35 m, 高约 24 m, 厚 5 m 左右, 总体积 4 512 m³, 坠落在路面的残余块体体积 500 m³ 左右, 危岩体由灰岩组成(封三彩图 1, 来源于荆楚网)。类似事件近年来在国内发生频率较高, 如 2005 年 11 月在重庆至涪陵高速公路 K58 发生崩塌灾害, 崩塌体积 600 m³ 左右, 砸坏 1 辆运输车, 公路断道 30 h 左右(封三彩图 2); 2007 年 11 月 25 日 AM6 00, 重庆至涪陵高速公路 K42 + 400 发生特大

型岩崩, 体积近 4 000 m³(封三彩图 3), 中断交通 7 h。2003 年 10 月 12 日在甘肃红古区民门公路体积约 45 000 m³ 的危岩体从山峰顶端崩裂滑落, 掩埋车辆数十辆(封三彩图 4); 2003 年 5 月 11 日 AM1 : 55, 贵州省三穗县台烈镇宏头村三穗至凯里高速公路正在施工的平溪特大桥 3 号墩附近发生山体崩塌, 总崩塌方量约 200 000 m³, 35 人遇难, 而在三峡库区移民公路及西昌至泸沽湖旅游公路沿线则几乎每年均有 30 余起危岩崩落事件发生(封三彩图 5、6), 等等。

上述灾害事件昭示中国公路特别是三峡库区一带的山区公路目前存在严重地质安全问题, 同时提醒人们应重视自然灾害频发时公路交通安全问题^[2], 并更应重视具有潜在地质安全隐患路段的监控预警及工程治理。迄今, Bertran 已从地质学角度详细分析了阿尔卑斯山 Claix 岩崩的形成机理^[3]; Braathen 等^[4]从构造地质学角度分析了挪威境内岩石边坡的破坏机制; 孙云志^[5]运用极限平衡方法分析了奉节李子垭危岩体的稳定性; 谢全敏等^[6]运用模糊数学等非线性方法探讨了危岩块体的稳定性问题; 陈洪凯等^[1]以三峡库区危岩为对象, 详细辨识了

* 收稿日期 2009-03-23 修回日期 2009-04-05

资助项目 国家自然科学基金(No. 50678182) 重庆市重点自然科学基金项目(No. 2008BA0015)

作者简介 陈洪凯, 男, 教授, 博士后, 博士生导师, 新世纪百千万人才工程国家级人选, 重庆市杰出专业技术人才, 研究方向为动力地貌学、山地灾害演变、安全警报与减灾技术。

“危岩”、“崩塌”和“落石”等术语之间的协同性,把危岩分为滑塌式危岩、倾倒式危岩和坠落式危岩3类,探索了危岩破坏机理^[7-10]、稳定性分析^[1,11]、承载寿命^[12-13]等关键问题,唐红梅等^[14]建立了危岩主控结构面应力强度因子计算方法。上述研究对于揭示公路岩体边坡崩塌灾害形成机制奠定了重要理论依据。本文重点对公路岩体边坡崩塌灾害的形成机理及安全警报进行较全面分析。

1 岩体边坡危岩链式机理

国道318线K1405崩塌体恢复模式见图7。该崩塌灾害源于3层危岩体崩落,每层危岩体共3个,则崩塌灾害发生前在陡崖上存在9个危岩体,每个危岩体平均尺寸11.6 m×5.2 m×8.3 m(沿陡崖走向×垂直于陡崖临空面×垂直距离)。危岩体被4条与陡崖近于垂直的陡倾角岩体结构面切割,间距11 m左右,尤其是左右两侧结构面临空,表明左右两侧危岩体在此之前已经崩落。3层危岩体后部主控结构面与陡崖临空面平行,应属于山体陡倾角的卸荷结构面,宽度5~6 m左右,陡崖内目前发育2~3条类似的卸荷结构面。每层危岩体之间的界面为岩层层面,近似水平,且贯通度较好,其粘结强度可以忽略不计。因此,卸荷结构面控制着危岩体的稳定性态。现场崩落形迹表明,第3层危岩体主控结构面贯通度较好,其失稳破坏加速了第2层和第1层危岩体的破坏过程。该危岩体破坏失稳与地下水关系不密切,主要属于危岩体长期处于拉应力状态,第3层危岩体主控结构面端部岩体连续损伤、突然断裂,诱发下面2层危岩体在第3层危岩体加荷作用下主控结构面的加速断裂过程。

研究发现^[15],危岩群发性机理可以浓缩为5个阶段,即河流下切阶段(阶段1)、差异风化或河流侧蚀阶段(阶段2)、危岩体形成阶段(阶段3)、单一危岩体崩落阶段(阶段4)和多个危岩块形成及崩落阶段(阶段5)(图8)。陡崖坡脚的岩腔因差异风化或河流侧蚀形成以后,可把岩腔顶部危岩体逐渐形成、崩落的过程定义为危岩发育的微观链,而从陡崖或陡坡向其后方山体的阶段性后退过程定义为危岩发育的宏观链,如A→B→C……。微观链中,每一个危岩块体均经历主控结构面逐渐形成与断裂扩展、临界失稳状态,如三峡库区万州太白岩东段某一危岩体,主控结构面中部尚存在部分未贯通(封三彩图9),封三彩图10则显示处于破坏过程中的危岩体。将危岩发育宏观链和微观链组合即为危岩群发

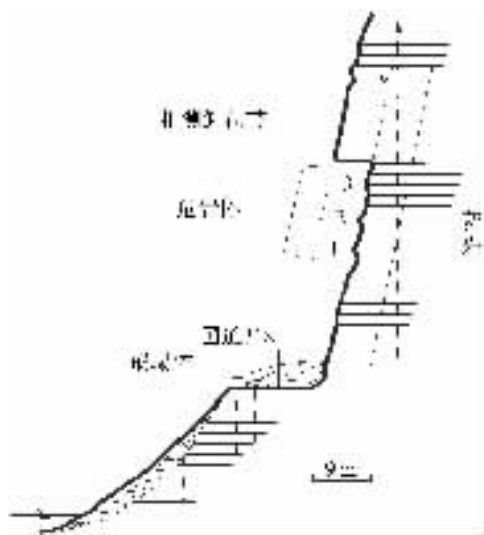


图7 国道318线K1405危岩地质断面与危岩体复原
Fig. 7 The geological section and the rehabilitation of the perilous rock at the K1405 of No. 318 National highways

性机理,可以分为简单模式(图11a)和复合嵌套模式(图11b)。简单模式是指在陡崖坡高度小于20 m时,仅表现为一个宏观链,该宏观链内的微观链逐渐发育,直到所有微观链结束后进入下一个宏观链,而当陡崖高度超过20 m时,危岩群发性机理便体现为复合嵌套模式,即表现为2个以上的宏观链同时发育,陡崖高度越大,同时发育的宏观链数量越多。

显然可见,国道318线K1405崩塌灾害事件的发生符合群发性危岩破坏模式,可以推断,在目前崩塌源第3层危岩体顶部尚存在多个微观链处于不断发育过程中。尤其当目前的宏观链中只剩下最后1~2个危岩体时,可能会出现整体崩落,其原因可能与顶部危岩块体相比较其下部的危岩块体尚受到裂隙水压力的共同作用而易于断裂失稳,并对下部危岩体顶层危岩体加载而加速破坏,该现象已经在重庆南川甑子崖和江津四面山的大型危岩崩落事件中予以充分显现。

2 公路边坡崩塌灾害安全警报系统

研究发现,群发性危岩体在大规模崩塌前由于局部小型或微型块石以落石形式从危岩体表面崩落,可视为宏观前兆,如甘肃红古区民门公路崩塌灾害,在大规模崩塌前约30~40 min,公路内边坡脚采石工人先后发现山顶的小石块轻轻滑落。但是,相比于大型滑坡及泥石流灾害而言,危岩崩塌灾害总体而言的宏观前兆不明显,如图3显示的重庆至涪

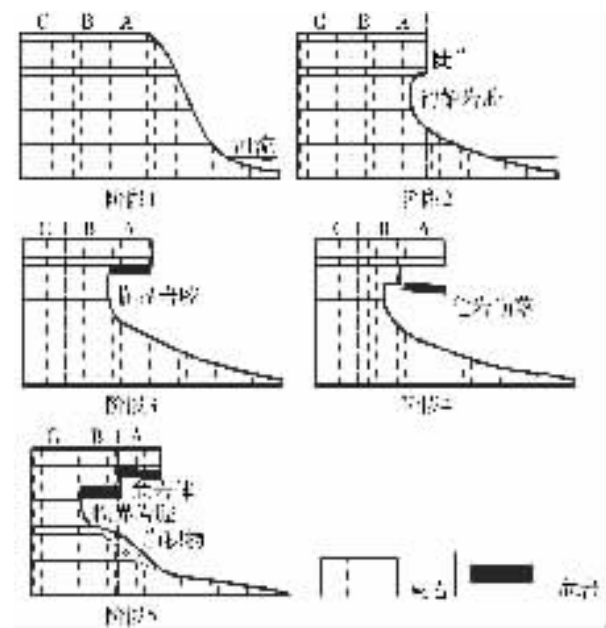


图 8 缓倾角层状岩层危岩群发性机理

Fig. 8 The perilous rock 's group incident mechanism for rock slope with gentledip

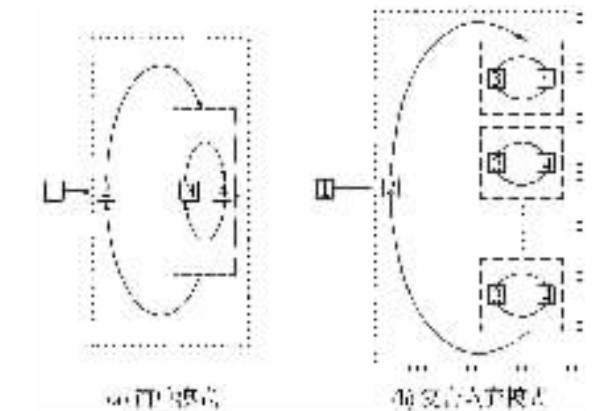


图 11 危岩群发性机理的两种模式

Fig. 11 2 models of the perilous rock 's group incident mechanism

陵高速公路 K42 + 400 特大型岩崩 2007 年 11 月 25 日 AM6 00 发生,但就在 11 月 24 日 PM4 00 左右该高速公路管理部门两位技术人员为排查公路沿线地质灾害特地步行到崩塌源顶部却未发现任何变形迹象,附近两户居民近段时间也未见任何反常现象。因此,预防公路边坡崩塌灾害具有更大难度。

公路边坡危岩崩塌灾害的工程防治,最关键的问题是正确认识危岩,包括危岩体所处位置、范围大小、目前的稳定性态、失稳机理,据此可采用相应的工程治理技术予以根治^[1]。但是,由于我国公路沿线危岩体广泛分布、潜在崩塌灾害防治任务繁重,并且目前国家财力毕竟尚不能满足,全面实施我国公路沿线危岩崩塌灾害治理所要求。因此,加强对

潜在灾害严重、危岩安全性较差的危岩块体或群体实施监控预警,对于确保公路交通运输安全具有重要作用。针对一个危岩体或危岩群体,研究确定其破坏关键部位,并在此安置见微型监测仪,并根据危岩失稳可能发生的崩塌范围预设警戒区域,标识警示牌,在公路外侧的两个警示牌顶部安置微型预警仪,通过无线传输接受来自危岩体监测仪的监控数据,通过危岩稳定寿命预测程序快速解译,当危岩体处于危险状态时,预警仪显示红灯并发出刺耳鸣声,处于安全状态时预警仪显示绿灯(封三彩图 12)。该监控警报系统包括 4 个部分,监测仪、预警仪、警示牌、无线传输和信号解译,作者已经申报国家发明专利,可望在适当时候投入使用。该系统维护期间,公路管理部门应定期检查、广泛宣传,避免人为破坏,且在进入预警区域 1 km 以上分段警示“前方 × × 米进入崩塌灾害区域”等相关字样,字体大小适中、光彩、醒目。

3 结论与讨论

1) 危岩崩塌是我国山区公路主要病害类型,具有分布广泛、前兆不明、突变失稳、致灾严重等特征,因此,崩塌灾害防治难度大,是公路建设及养护过程中迄今尚未解决的重大关键技术。

2) 本文揭示了缓倾角层状岩体边坡危岩群发性机理,认为层状岩体结构和陡峻的地貌形态是产生危岩的基本条件,边坡岩体卸荷结构面一般是危岩主控结构面,危岩安全性随着主控结构面逐渐贯通而减弱。多层危岩体叠置出现时,构成群发性危岩,当顶部危岩体断裂失稳后,通常作为荷载直接施加在下部危岩体上,加速了下部危岩体的破坏过程,国道 318 线 K1405 崩塌灾害事件便符合该机理,第 3 层危岩(注:已崩落)顶部第 4 层危岩体目前已处于欠稳定状态,应加强安全监控。

3) 本文初步构建了公路边坡崩塌灾害警报系统,包括 4 个部分,即监测仪、预警仪、警示牌、无线传输和信号解译,对于公路崩塌灾害的防灾减灾,确保公路交通运输安全具有重要作用。

4) 多年来,我国一直存在重视公路兴建而忽视公路养护、重视路面结构与材料而忽视环境地质安全、采用传统方法应对一切复杂地质环境下的公路建设与养护等现象。国道 318 线 K1405 崩塌灾害事件强烈地警示人们,在像位于三峡库区的山区公路建设及养护过程中,公路管理部门及相关广大科技工作者必须高度重视公路地质安全问题。尤其是危岩崩塌灾害,应该防患于未然,立项组织由岩土工程

师和地质工程师协同参与实施的公路边坡危岩调查,必要时投入一定勘探工作量,查明崩塌源处危岩体的规模大小并分析其安全状态,划出可能的致灾区,据此加强灾害监控预警、分步实施工程治理。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥,等. 危岩防治原理[M]. 北京:地震出版社,2006:35-46.
- [2] 熊水湖. 自然灾害频发时如何看护好公路[N]. 中国交通报,2007-08-20(A2).
- [3] Bertran P. The rock-avalanche of february 1995 at claix (french alps) [J]. Geomorphology 2003, 54(3) :339-346.
- [4] Braathen A ,Blikra L H ,Karlsen S S. Rock-slope failure in norway :type ,geometry ,deformation mechanisms and stability[J]. Norwegian Journal of Geology 2004, 84 :67-88.
- [5] 孙云志. 奉节李子垭危岩体稳定性研究[J]. 人民长江,1994,25(9):48-53.
- [6] 谢全敏,夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法[J]. 岩土力学,2002,23(6):777-781.
- [7] Chen H K ,Tang H M ,Ye S Q. Research on damage model of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics 2006, 27(7) :967-974.
- [8] Chen H K ,Tang H M. Chained mechanism and moving routine for perilous rock to avalanche in the area of the three

gorges reservoir of China[M]// Anon. The proceedings of the China association for science and technology (vol. 3 no. 1). Beijing :Science Press. 2006 :501-506.

- [9] 陈洪凯,唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2006,29(6):115-119.
- [10] 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(上). 北京:科学出版社,2006:837-842.
- [11] 陈洪凯,唐红梅,王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):614-619.
- [12] Chen H K ,Tang H M ,Zhu H. Research on duration for perilous rock to form[J]. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics 2006, 1(2) :169-173.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

Developing Mechanism and Hazard Alarming System for Collapse of Rock Slope with Genele Dip Along Highway in Three Gorges Reservoir Region

CHEN Hong-kai , TANG Hong-mei

(Dept. of Geotechnical & Geological Engineering , Chongqing Jiaotong University , Chongqing 400074)

Abstract : As the major hazard along the mountain highways , the characteristics of avalanche are wild distribution , no prognostic , sudden instability , serious disaster-causing trouble , difficult prevention and treatment. The paper takes it for example that the special serious collapse hazard at the K1405 of No. 318 National highways , locating at Gaoyangzhai , Badong county , Hubei province , on November 20 , 2007. It has buried a bus with 31 persons dead. Based on this , it analyzes the safe problem of slope along highway 's collapse hazard in Three Gorges Reservoir region , revealing the perilous rocks are group incident mechanism for the low-angled stratofabric rock slope. It is discovered that the group incident perilous rocks are commonly caused by pile up multilayer perilous rocks. When the top perilous rocks that had been the loads for the nether rock collapsed and the nether rock will be destroyed quickly. The collapse source at the K1405 of No. 318 national highways is 9 perilous rocks in the arrangement of 3 layers. The destructive process is up to the destructive mechanism of perilous rocks group occurrence. At the top of the collapsed perilous rocks of the third layer , perilous rocks of the fourth layer have been not enough stable. The paper tentatively establishes an early warning system of collapse hazard along highway which includes 4 parts : monitoring instrument , an early warning instrument , warning board , wireless transmission and signal translation. In the end the necessity of taking geologic safety seriously during the course of the highway construction and maintenance is analyzed.

Key words : Three Gorges Reservoir region ; slope along highway ; perilous rock ; collapse hazard ; developing mechanism ; alarming system

(责任编辑 方 兴)