

319 国道涪陵至彭水沿线滑坡发育特征

白云峰^{1,2}, 周德培¹

(1. 西南交通大学岩土工程系, 四川 成都 610031; 2. 焦作工学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 在涪陵至彭水长约 140 km 范围内, 319 国道沿线发育有滑坡 32 处, 发育密度约为 0.23 个/km, 发育形式以堆积层滑坡和岩石顺层滑坡为主。在现场调查的基础上, 总结和分析了沿线滑坡发育的地质环境和人为环境, 结果表明, 沿线的地质构造、地形地貌以及地层岩性组合是滑坡发育的主要原因, 河流的侧向切蚀作用、暴雨以及人类的工程活动是滑坡形成的重要诱发因素。

关键词: 319 国道; 滑坡; 发育特征

中图分类号: P694

文献标识码: A

1 概述

319 国道西起四川省成都市, 横贯重庆市、湖南省和江西省抵达福建省厦门市, 是连接中西部和福建东南沿海的一条重要交通干线, 也是重庆市东南地区唯一的一条连接贵州和湖南的高等级干线公路。自修建以来, 它为沿线少数民族地区的经济发展和文化交流起到了极大的推动和促进作用。近年来, 随我国经济的持续快速发展, 特别是随着西部大开发战略的实施, 交通量也与日俱增, 其路况已远不能满足经济发展的要求, 对其进行改造已显得十分迫切和必要。

重庆市涪陵区至彭水县城公路是其中关键的一段, 该段公路所处的地质环境条件复杂, 滑坡灾害频繁发生, 是我国滑坡灾害分布较严重的地区之一^[1~3]。沿线频繁发生的滑坡灾害, 严重制约了公路的正常运行, 不仅中断公路交通, 而且还给人民的生命财产造成了重大的损失, 如 1994-04-30 鸡冠岭滑坡^[4] 以及 2001-05-01 武隆县城滑坡都是震惊全国的例子。因此查明该路段的滑坡分布状况, 总结其发育规律, 不仅对公路改扩建方案的确定, 而且对该路段今后的长期正常运行都将具有重要意义。

2 沿线区域地质环境条件概况

2.1 区域地质构造与地震

沿线地质构造以新华夏系为主, 属川东南陷褶皱的一部分, 段内主要而显著的构造是呈大致呈 NNE~NE 向的褶皱构造及伴生断裂构造, 这些褶皱在空间上呈平行交替排列状。涪陵至白马段褶皱较为紧密, 约 50 km 范围内依次发育有梓里场背斜、土地垭向斜、弹子山背斜、金子山向斜和铜麻湾背斜。白马至彭水段内约 90 km 范围内向斜比较宽缓, 而背斜却较为狭窄, 发育有白马向斜、羊角背斜和普子向斜以及老场正断层和火石垭逆断层。在这些大的褶皱构造中又发育有许多小褶曲, 岩体揉皱较为严重, 碳酸盐岩地段多产生层间错动, 而碎屑岩的页岩地段节理裂隙发育, 岩体较为破碎。

线路所经地区的基本地震烈度均 $\leq 6^{\circ}$ 。

2.2 地层岩性

沿线地层均为沉积岩地层, 岩性以碳酸盐岩为主, 页岩为辅, 部分向斜的轴部偶有侏罗系泥岩夹砂岩地层, 第四系冲积层砂粘土主要分布于河床、漫滩及一级阶地上, 坡崩、残积层则主要分布于坡脚。沿线地层岩性见表 1。

收稿日期(Received date): 2002-06-03 改回日期(Accepted): 2003-09-10.

作者简介(Biography): 白云峰(1961-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事岩土工程的教学与研究工作。[Bai Yunfeng: (1961-), Vice-professor Doc., Mainly engaged in the teaching and studying of the Geotechnical Engineering.]

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2 3 地形地貌

涪陵至彭水为深切割的强侵蚀岩溶化中低山峡谷地形,海拔高程多在 200~1 500 m,相对高差 200~1 100 m。乌江河谷深切狭窄,岸坡陡峻,局部悬崖绝壁,大多地段为“V”型谷,岸坡角度为 30°~50°。河床纵坡降大,达 4‰~8‰。地形起伏大,一般变化率达 50~100 m/km,阶地不发育。

2 4 水文地质与气象

沿线地下水可分为岩溶水、裂隙水和孔隙水三大类型。碳酸盐岩分布广泛,溶洞、岩溶管道较为发育,岩溶水极为丰富,为该线地下水的主体,受大气降水补给,主要沿岩溶管道径流,在乌江等河谷处以暗河、泉的形式排泄。地下水循环快,雨季流量很大。裂隙水主要分布于碎屑岩地段。孔隙水主要分布于河流阶地及谷地堆积层中。后两种类型水水量有限。

沿线属亚热带温湿气候,多年平均降雨量在 1 070~1 240 mm 间,多集中在 5~8 月份。日最大降雨量平均在 110~220 mm。沿线各地区无论降雨量还是降雨强度均较大,对边(斜)坡的稳定性有较大的影响。

3 沿线滑坡发育特征

3. 1 滑坡发育的形式与规模特征

调查发现,在沿线 140 km 范围内,发育有滑坡 32 个,总体积 $3\,573\times 10^4\text{ m}^3$ 。发育密度为 0.23 个/km,发育模数为 $25.52\times 10^4\text{ m}^3/\text{km}$ 。根据沿线滑坡体发育的规模特征,可将其划分为三类^[5],即大型滑坡($V>100\times 10^4\text{ m}^3$)、中型滑坡($V=10\sim 100\times 10^4\text{ m}^3$)、和小型滑坡($V<10\times 10^4\text{ m}^3$)。又根据滑坡滑动面和滑坡体物质组成特征,也可将滑坡形式分为三类,即以基岩为主的沿岩层层理面滑动的顺层滑坡,切岩层层理面滑动的切层滑坡和以坡崩、残积层的块石土及强、全风化的页岩为主的堆积层滑坡。沿线滑坡发育的形式与规模特征见表 2。

表 2 的统计资料表明,从滑坡体规模数量上看,沿线各类滑坡均较为发育。从滑坡体形式上看,则堆积层滑坡和岩石顺层滑坡是沿线滑坡发育的主要形式。

3. 2 沿线滑坡发育特征

3. 2. 1 地质构造条件对滑坡发育的影响

表 1 沿线地层岩性统计
Table 1 Stratum lithology along Fuling City to Pengshui Town

系	统、组	岩 性	分布地段
侏罗系	中统上沙溪庙组 J _{2s}	厚层紫红色泥岩夹粉砂岩	武隆县城附近
三叠系	上统须家河组 T _{3xj}	薄~中厚层砂岩夹泥岩、页岩互层	涪陵~武隆
	中统雷口坡组 T _{2l}	厚层灰岩、泥质灰岩、页岩夹砂岩	涪陵~彭水
	下统嘉陵江组 T _{1j}	薄~中厚层灰岩白云岩夹岩溶角砾岩、泥岩	
二叠系	上、下统各组 P _{2c} 、P _{2w} 、P _{3l} 、P _{1m} 、P _{1q}	中厚~厚层、块状灰岩夹薄层碳质页岩及煤线	白涛~龙池
志留系	下统罗惹坪组 S _{1lr} 、小河坝组 S _{1x} 、龙马溪群 S _{1ln}	页岩、粉砂岩夹碳质页岩	白涛~彭水
奥陶系	中、上统各组 O ₂₊₃ 下组各组 O _{1d} 、O _{1m} 等	上部厚层灰岩夹薄层泥灰岩,中部页岩、下部厚层瘤状灰岩、白云岩夹薄层页岩	武隆~彭水

表 2 沿线滑坡发育规模与形式统计
Table 2 Development scales and forms of landslide along Fuling City to Pengshui Town

统计值	滑 坡 规 模			滑 坡 形 式		
	大 型	中 型	小 型	顺 层	堆 积 层	切 层
个数/ 占总个数(%)	12/ 40.6	8/ 25.0	12/ 37.5	13/ 40.6	15/ 46.9	4/ 12.5
体积(10 ⁴ m ³)/ 占总体积(%)	3230.0/ 90.4	317.0/ 8.9	26.0/ 7.3	2128/ 59.5	781.0/ 21.9	664/ 18.6

滑坡发育与地质构造的关系极为密切, 在褶皱构造较为紧密的涪陵至白马段内, 约 50 km 范围内共发育有滑坡 20 个, 体积 $2\,881.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 分别占沿线滑坡总数的约 62.2% 和总体积的约 81%, 发育线密度为 0.4 个/km, 模数为 $57.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 。而在褶皱较为宽缓的白马至彭水段内, 约 90 km 范围内其对应的数字分别为: 滑坡 12 个, 占总数的 37.2%, 体积 $691.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占总体积的 19%, 发育密度 0.13 个/km, 模数 $7.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 。由此可知, 地质构造条件对滑坡的发育有重要的影响。

在现场调查过程中发现, 在构造变动的影响下, 沿线的岩体中发育有 3~4 组优势节理, 这些节理延伸长、贯穿深, 常构成滑坡滑动的侧向及后缘边界。

此外, 在强烈的构造变动过程中, 岩层受力弯曲时, 硬岩夹软岩岩层易在其接触带处产生层间错动, 形成优势面, 这是沿线多顺层滑坡的一个主要原因。而在页岩层中, 受构造运动影响, 易产生密集且贯穿性良好的节理裂隙, 当坡脚被切割时, 则形成堆积体滑坡。

3.2.2 地形地貌条件对滑坡发育的影响

乌江流域正处于中国自然地势三大阶梯的第二阶梯东部边缘, 受新构造运动的影响, 地壳抬升强烈, 地形切割严重, 地质构造复杂, 断裂、褶皱极为发育, 其轴线走向大致呈 NNE~NE 向, 说明最大主应力多近 EW 向与 NW 向, 与大致呈南北向的乌江近与直交, 斜坡带的残余应力向临空方向回弹, 使斜坡应力失衡, 是沿线滑坡发育严重的一个重要原因。

地形地貌条件对滑坡发育的影响主要表现在不同的斜坡形态其变形程度和变形方式不同。较平缓的斜坡不易变形, 而较陡的斜坡就容易变形。其根本原因在于不同的斜坡形态, 坡体临空面附近的应力场的变化不同。斜坡体的临空面侧, 因有弹性应变能释放而产生卸荷回弹, 引起斜坡体的应力重分布和应力集中效应。愈靠近临空面, 最大主应力愈接近平行于临空面, 最小主应力则与之直交, 随坡高增大, 最小主应力明显降低乃至为零, 甚至转为拉应力, 形成一最大剪应力增高带, 坡缘附近, 坡面的径向应力和坡顶面的切向应力可转为拉应力, 形成一张力带, 且随坡角的变陡, 张力带的范围也有所扩大, 最大拉应力区通常出现在离坡脚三分之二的坡高处及斜坡上缘, 在坡脚处形成剪应力集中, 坡体的这些部位易被拉裂形成与坡面近于平行的拉裂面, 进而形成滑坡。由前述的区域地形地貌条件可知,

乌江峡谷区的斜坡形态, 有利于斜坡的变形和滑坡的产生。

3.2.3 地层岩性组合条件对滑坡发育的影响

地层岩性是滑坡成生的物质基础, 滑坡体总是在抗滑力极低的软弱层或软弱面上滑动, 不同地层岩性组合构成的斜坡, 各有其自身的变形特征和常见的变形破坏方式。沿线滑坡主要发育在以下两组岩层组合中:

1. 厚层硬岩夹薄层软岩岩组。此类岩组组成的坡体中, 软弱层对应力传播起着明显的阻隔作用, 成为应力相对集中带, 软弱夹层易风化和泥化而成为滑带。此外, 在构造变动过程中, 岩体受力弯曲时, 易在软硬岩接触带处产生层间错动, 错动带处的 c 值可降为零, 错动带还为地下水的入渗创造了条件, 使接触带强度进一步降低而成为潜在的滑带。此类坡体, 其变形破坏形式以基岩顺层滑坡为主。沿线属于此类岩组的坡体有三叠系嘉陵江组和奥陶系中、上统各组, 各自发育的顺层滑坡数分别为 8 个和 2 个。其他 3 个则发育在志留系页岩岩组中。

2. 沿线地形陡峻, 软硬岩相间地层分布广泛, 软质岩因差异风化后内陷, 硬质岩形成倒悬, 在构造裂隙和卸荷裂隙切割后形成崩塌体, 崩塌后大量的块石堆积于坡面低洼处和坡脚; 此外, 页岩、泥岩及泥质砂岩等软岩经风化剥蚀后, 也形成大量的松散堆积物, 这些都为形成堆积层滑坡提供了物质来源。地表及地下水的流动软化基岩表面, 降低岩石强度, 产生动静水压力和浮托力, 河流的侧向切蚀使坡脚失去支撑, 因此, 堆积体常沿基岩表面蠕滑, 进而发育成松散堆积体滑坡。

3. 总厚度较大的页岩岩组。受构造变动的影响, 页岩中节理裂隙极其发育, 岩体较为破碎, 极易风化和剥落, 无论线路与坡体同向、反向还是斜交, 只要切割坡脚, 坡体易追踪节理裂隙变形而发育成各类形式的滑坡。沿线大量出露的此类岩组是志留系罗惹坪组和龙马溪群页岩, 4 个切层滑坡全发育在此岩组内, 此外, 还发育了多个堆积层滑坡。

3.2.4 河流的切蚀作用对滑坡发育的影响

河流的侧向(切)侵蚀作用除为斜坡的滑动创造了有效临空面外, 还暴露坡体中的软弱夹层并造成应力集中, 改变水文地质条件并增大水力坡度, 这是许多滑坡产生的重要原因之一。如从涪陵至小溪河 6 km 范围内, 在乌江岸边的三叠系嘉陵江组灰岩中就发育了 8 个大、中型顺层滑坡。还有 1994—04—

30 鸡冠岭滑坡, 在乌江水的不断切(淘)蚀作用下, 诱发了堆积层滑坡, 坡脚堆积层的滑动又使上部的二叠系岩层失去支撑, 该地的二叠系岩层倾角达 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 在层理和构造节理的作用下, 岩体形成平行于悬崖的卸荷裂隙, 进而又引起了岩体的崩塌性滑坡, 滑坡总体积达 $530 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑体泻入乌江, 堵江断流达 30 min, 造成了 4 死 5 伤 12 人失踪的重大伤亡事故, 直接经济损失上千万元。

3.2.5 人类工程活动对滑坡发育的影响

人类的工程活动也是滑坡成生的重要诱发因素之一。随人类工程活动规模和范围的不断扩大, 人类的工程活动对滑坡成生的影响也越来越大。在斜坡易变形滑动地段, 因采矿、修建公路、铁路、水渠及房屋等人类工程活动, 开挖斜坡坡脚, 改变了斜坡体的应力分布, 坡脚处形成剪应力集中而使坡体失稳滑动。如 319 国道黄草至彭水段, 志留系罗惹坪组页岩广泛出露, 该岩层节理裂隙发育, 极其破碎, 在公路的修建过程中就引发了多处工程滑坡。而且, 在公路建成后运行的几十年中, 该路段仍不时有小滑坡发生, 造成中断交通事故。沿线人类活动诱发滑坡造成重大人员伤亡惨痛教训的是 2001—05—01 发生的武隆县城滑坡, 斜坡体由三叠系须家河组 (T_{3kj}) 砂岩夹泥岩互层组成, 节理裂隙发育, 呈层状碎裂结构, 修建 319 国道时已经切割了坡脚, 当地为了修建一商业楼, 又继续扩大切割的范围, 形成一高十余米, 坡度达 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的陡人工边坡, 且没有采取有效的防护措施。2001—05—01 边坡失稳滑动, 约 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的岩体摧毁了该商业楼, 造成了 79 死 7 伤的震惊全国的重大伤亡事故。

3.2.6 暴雨对滑坡发育的影响

暴雨是斜坡变形产生滑坡的重要诱发因素, 其原因是, 暴雨时, 斜坡中的含水层水量猛增, 地下水位迅速抬高, 增大了静水压力、空隙(或裂隙)水压力和浮托力, 改变了暴雨前斜坡的应力状态, 降低了坡体中软弱层的抗滑力, 增大了下滑力, 进而引起斜坡变形, 产生滑坡。沿线多暴雨久雨天气, 无论降雨量还是降雨强度均较大, 不利于斜坡的稳定。如小溪河 2[#] 滑坡就是在连续 2 d 大雨后于 1996—07—10 产生大规模滑动的。

4 结论

1. 在 319 国道涪陵至彭水县城沿线约 140 km 范

围内, 发育有滑坡 32 个, 总体积 $3\,573 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。发育密度为 0.23 个/km, 发育模数为 $25.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 。发育形式以基岩顺层滑坡堆积体滑坡为主。

2. 沿线滑坡的发育与地质构造的关系密切, 涪陵至白马段约 50 km 范围内, 褶皱构造发育, 岩体较为破碎, 滑坡总数的 62 % 和总体积的 81 % 发育在该段内。延伸长贯穿深的节理裂隙还常构成斜坡滑动的侧向及后缘边界。

3. 沿线顺层滑坡常发育在受构造变动时产生层间错动的厚层硬岩夹薄层软弱岩层组成的斜坡中; 总厚度较大的志留系页岩、粉砂岩岩组组成的斜坡中, 节理裂隙发育, 岩体破碎, 当出露地表时, 易发育为各种规模和形式的滑坡; 沿线广泛分布的坡崩、残积层和坡麓处的岩堆是产生堆积体滑坡的重要物质来源。

4. 河流对坡脚的切蚀作用、人类切割坡脚的工程活动以及当地的多暴雨天气是斜坡失稳滑动的重要诱发因素。

参考文献(References):

- [1] Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Academy of Science & Ministry of Water Conservancy. China Landslides Distribution Map(1:6 000 000). Chengdu: Chengdu Map Press, 1991. [中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国滑坡灾害分布图(1:6 000 000). 成都: 成都地图出版社, 1991.]
- [2] Academy of Science: Southwest Natural Disasters and Control Measures [M]. Beijing: Science Press, 1991, 18~31. [中国科学院西南资源开发考察队. 西南自然灾害及其防治对策[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 18~31.]
- [3] Liu Xinmin. Rock-fall Disasters and Control Measures of Sichuan Province [A]. Proceedings of Landslides, Vol. 9. Beijing: China Railway Press, 1992, 43~49. [刘新民. 四川省山崩灾害及防灾对策[A]. 滑坡文集, 第九集. 北京: 中国铁道出版社, 1992, 43~49.]
- [4] A Hazard-chain of Landslide-Collapse-Debris Flow River Stoppage in Wulong County, Sichuan Province on April 30, 1994 [J]. Mountain Research, 1994, 12(4): 225~229. [陈自生, 张晓刚. 1994—04—30. 四川省武隆县鸡冠岭滑坡→碎屑流→堵江灾害链[J]. 山地学报, 1994, 12(4): 225~229.]
- [5] Qiao Jianping. Theory and Practice about Reducing Landslide Hazards [M]. Beijing: Science Press, 1997. [乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [6] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, et al. Analysis Mechanism of Engineering Geology [M]. Beijing: Geology Press, 1981. [张倬元, 王士天, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.]
- [7] Sun Guangzhong. Rock Mass Structure Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988. [孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [8] Yan Echuan, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan. A Study on the Distribution

Regularity of Landslide in the Minjiang River between Maowen and Wenchuan County[J] . *Mountain Research* . 1998, **16**(2): 109 ~ 113.

[晏鄂川, 刘汉超, 张倬元. 茂汶汶川段岷江两岸滑坡分布规律 [J] . 山地研究, 1998, **16**(2): 109 ~ 113.]

[9 Kong Jiming. The Non-computation Method Differentiate the Stability of Slope[J] . *Journal of Mountain Science* . 2001, **19**(5): 446 ~ 451. [孔纪名. 滑坡稳定性判别的非计算方法 [J] . 山地学报, 2001, **19**(5): 446 ~ 451.]

Development of Landslides from Fuling to Pengshui Section along the No.319 National Road

Bai Yun-feng^{1,2} Zhou De-pei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering , Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031)

(2. Jiaozuo Engineering of Institute, Jiaozuo, Henan, 454000)

Abstract: Occurrence of landslide often brings great damage to human life property and the engineering activities. The No. 319 National Road from Fuling City to Pengshui County is 140 km long and is placed in the Wujiang canyon area, along which the geological environment is complicated. There are 32 landslides in the section, with average density 0.23/km. The stratum rock property and the geological structure and the topographic change are the major reason of developing landslide and that the rainstorm and the erosion action of river and the human activities are the major cause of the occurrence.

Key words: No.319 National Road; landslide; development