

## 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究

殷跃平<sup>①</sup> 朱建良<sup>①</sup> 杨胜元<sup>②</sup>

(①中国地质调查局 北京 100035)

(②贵州省地质环境研究院 贵阳 550004)

**摘 要** 2010年6月28日,贵州关岭因强降雨而发生高速远程滑坡,滑程约1.5km,体积约174.9万m<sup>3</sup>,两个村庄被毁,99人遇难。滑坡区位于西南地区常见的煤系地层区,上部为页岩、白云岩,中部为相对较厚的砂岩地层,下部为页岩、泥岩地层,局部含煤,具有上硬下软的山体地质结构和上部富水下部隔水的水文地质结构,极易形成顺坡地质灾害。从地形上看,斜坡上陡下缓,形成“靴状地形”,上部陡峻地形导致山体易于失稳,而中下部开阔平缓良好的内容提供了远程的运动条件,较大的势能向动能的转化,容易形成高速远程滑移—碎屑流。6月27日和28日的降雨是触发此次特大灾害的主要原因,其24h降雨量达310mm,超过了当地近60a来的气象记录,分析表明,降雨产生的沟谷径流量是平时强降雨(100~150mm·d<sup>-1</sup>)的沟谷径流的2倍以上,一是使滑覆区砂岩裂隙带体中形成静水压力和渗透压力,致使坡体的失稳下降;二是向沟谷中产生地表径流,为冲刷远程滑动形成地下水势能,导致了碎屑流滑动距离和速度的显著增加。近年来随着极端强降雨等灾害性天气的频繁期来临,高速远程滑移造成的群死群伤特大地质灾害在我国呈逐渐增加趋势,应加强对这种灾害类型的调查与防范,特别是制定行旅安全避让范围和疏散速度的研究。

关键词 滑坡 碎屑流 高速远程 关岭

中图分类号:TP42.22 文献标识码:A

## INVESTIGATION OF A HIGH SPEED AND LONG RUN-OUT ROCKSLIDE-DEBRIS FLOW AT DAZHAI IN GUANLING OF GUIZHOU PROVINCE

YIN Yaoping<sup>①</sup> ZHU Jiliang<sup>①</sup> YANG Shengyuan<sup>②</sup>

(①China Geological Survey, Beijing 100035)

(②Guizhou Geo-environmental Institution, Guiyang 550004)

**Abstract** On June 28, 2010, due to sudden heavy rainfall, a high speed and long run-out rockslide-debris flow occurred at Dazhai in Guanding of Guizhou Province. Its run-out distance was about 1.5km. Its rock debris volume was about 1.749 M m<sup>3</sup>. It destroyed two villages and resulted 99 fatalities. The landslide was located at the coal-related sedimentary rock strata area. This rock system commonly presents in southwestern China. The upper strata are limestone and dolomite. The middle strata are sandstone with gentle dip-angles. The lower strata are mainly shale and mudstone and have coal seams in local regions. The strata forming the mountains have a special geological structure with hard rocks at upper portion and soft rocks at lower portion and a hydro-geological structure with upper rich groundwater aquifer and lower impermeable beds, which can easily form landslide hazards. From the site topography, the hillside slopes are steeper at the upper portion and gentler in the lower portion. The topography looks like a shoe-shaped ge-

① 收稿日期:2010-08-08;收到修改稿日期:2010-08-25。

第一作者简介:殷跃平,主要从事工程地质与地质灾害研究工作。Email: yinyaping@mail.ccge.cn

asymetry. The upper steep slopes can easily occur slope instability and the middle and lower gentle and wide slope valleys offer the kinematic conditions for landslide debris to flow long distance. Transformation of the larger potential energy into kinetic energy can easily form rockslide-debris flows with high speed and long run-out distance.

The heavy rainfall on June 27 and 28 were the main factor triggering the major disaster. The rainfall was up to 310mm and exceeded the records over the last 60 years. Analysis indicates that the runoff in valley stream were two times more than those during usual rainfall at the region. The large runoff water formed static groundwater pressure and seepage pressure in joints and fossils of the sandstones at the landslide source zone, which led the landslide to occur. Secondly, the runoff was formed in stream valleys, which became a layer of saturated water bed for the rock debris to flow long distance. As a result, the run-out distance and speed of the rock debris flow was evidently increased. The findings of this investigation are useful to reduce and mitigate the disasters of such high speed and long run-out rockslides and debris flows, the occurrences of which seem to have been increasing in recent years in China due to extremely heavy rainfall events.

**Key words** Landslide; Rock-debris flow; High speed; Long runout; Guarding

## 1 引言

2010年6月28日下午,贵州关岭因突降暴雨发生特大滑坡灾害,致使岗乌镇大寨村2个村民组37户99名村民遇难。地质灾害呈现高速远程滑动特征,约 $115\text{万}\text{m}^3$ 的崩塌体向北东下滑约500m后,剧烈撞击并铲刮对面小山坡,致使大寨村永窝村民组21户村民遇难,偏转约 $90^\circ$ 后转化为高速冲河流直角形高速下滑约1000m,撞击并铲刮了大寨村民组一带的表层堆积体,致使大寨村大寨村民组16户村民遇难,最终形成了这起在贵州极为罕见的特大滑坡—冲河流灾害。总滑程约1.5km,体积约 $174.9\text{万}\text{m}^3$ (图1)。降雨是触发此起特大灾害的主要原因,6月27日至28日,降雨量达310mm,其中,27日晚8时至28日11时约15h内(滑坡临滑前3h),降雨量就达到237mm,超过了当地近60a来的气象记录。

作者等全程参与了国家专家组是灾区查明滑坡的形成原因和指导抢险。在此基础上,提出了滑坡启动及高速远程滑动的初步认识。作者认为,近年来随着极端强降雨等灾害性天气的重视期缩短,高速远程滑坡造成的群死群伤特大地质灾害在我国呈逐渐增加趋势<sup>[1-3]</sup>。因此,应加强对这种灾害类型的调查与防范,特别是要进行滑坡安全避让范围和逃逸速度的研究。

## 2 地质环境条件

### 2.1 地形地貌

在区域上位于云贵高原东部褶皱斜坡南面向广西丘陵倾斜的斜坡地带,总体地势为西北高、东南低。区内一般海拔在800~1500m之间,为溶蚀—侵蚀地貌,此类地形为地壳强烈上升和河流侵蚀、溶蚀综合作用所致,地貌组合类型为中切峰丛峡谷,出露地层为中、下三叠统。河流切割深度一般500~1000m,河谷形态呈峡谷、隘谷。谷坡上距现代河水位约300m高度处,常见有一级阶平台面,为早期宽谷面。谷坡上缘近分水岭地带则保留古岩溶面的残余,谷坡山体内多发育垂直岩溶形态。

### 2.2 降雨特征

滑坡所在区域雨量充沛,年降雨量1205.1~1636.8mm,年最大降雨量1686.2mm(1993年),年最小降雨量691.3mm(1988年)。降雨受地势及季风气影响,在空间上分配不均匀,由北部向东南部呈舌状递减;中、北部为多雨区,年降雨量在1400mm,占全区面积的1/3;东南部年降雨量为1200~1400mm。在时间上,降雨的月份分配不均匀,多年平均降雨量1342.37mm,4~9月为雨季,降雨量占全年的83.7%,其中6、7月的雨量占全年的44.54%,10月至次年3月的雨量占16.69%(图2)。



图1 贵州关岭大寨滑坡—碎屑流遥感影像

Fig. 1 Aerial image of Rockslide-debris at Dabai, Guanding, Guizhou

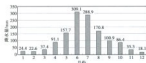


图2 1996—2005年贵州关岭地区月平均降水量图

Fig. 2 Diagram of mean month precipitation in Guanding, Guizhou(1996—2005)

## 2.3 地层结构

关岭地区地层除侏罗系、白垩系及第三系缺失外,从二叠系下统至第四系均有出露,累计厚度7000余米。其中以三叠系地层发育最全,出露面积最广,约占区内总面积的90%,其次为二叠系地层,其余地层出露不多,分布面积较小。

滑坡区地处扬子准地台黔北台隆背斜构造变形区,地质构造复杂多样,构造线呈北西—南东向展布,主要由一东大体平行的较紧密褶皱和逆断层组成。区内岩石主要为浅海相碳酸盐岩沉积,次为陆相碎屑沉积,二叠系上统为海陆交互沉积。碳酸盐岩及夹层状碳酸盐岩分布面积最广(表1)。

## 2.4 水文地质条件

根据滑坡区及邻近区域出露的地层岩性、含水介质及地下水动力条件,区内地下水类型可划分为碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水和第四系松散岩类孔隙水3类。

表1 大寨滑坡区及邻近区域地层表

Table 1 Stratum in and adjacent the Dabai rockslide

系	组	代号	厚度/m	岩性描述	出露区
二叠系	关岭组	T <sub>1g</sub>	868—1117	上部为灰岩、暗灰岩、细晶灰岩、灰岩,下部为泥质灰岩、夹粉砂岩	滑坡后缘、外围山前
	永宁镇组	T <sub>1n</sub>	552—847	灰岩、泥质灰岩、白云岩、夹粉砂岩	滑坡后缘、外围山前
三叠系	夜郎组	T <sub>2y</sub>	148—804	细砂岩、泥质灰岩、灰岩,底部为粉砂岩、夹粉砂岩、夹泥岩	滑坡前缘区
	长岗组	P <sub>3c</sub>	10—170	粉砂岩、粉砂岩、灰岩、灰岩、泥岩	在滑坡区、缺失
二叠系	龙里组	P <sub>2l</sub>	215—382	粉砂岩、砂质泥岩、粉砂岩、夹粉砂岩、灰岩、灰岩、泥岩	滑坡前缘区
	峨眉山玄武岩组	P <sub>2b</sub>	10—271	火山角砾岩、柱状玄武岩、杏仁状玄武岩、流纹岩	滑坡区外围
	茅口组	P <sub>2m</sub>	267—296	灰岩、夹粉砂岩、灰岩、灰岩	滑坡区外围

碳酸盐岩岩溶水主要赋存于滑坡后缘外围山前二叠系关岭组和永宁镇组灰岩、白云岩地层中,形成管道流,主要在与下伏夜郎组地层接触带处以泉水形式排泄。动态变化大,特别是雨季将形成较大泉水。

基岩裂隙水主要赋存在夜郎组碎屑岩和峨眉山玄武岩构造裂隙或风化裂隙中,区内侵蚀低中山发育的冲沟内出露的小流量泉水较多,多数泉水枯季干涸,含水贫乏。

松散岩类孔隙水主要赋存在河谷两侧的老崩滑堆积体中,在谷地或洼地等土层较厚处有部分季节性泉水出露,流量小,动态变化大。

这样,在这类山体中,形成了较为典型又复杂的

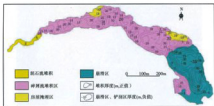


图3 贵州关岭大寨滑坡—碎屑流堆积等厚线图

Fig. 3 Contour map of accumulation of Rockslide-debris at Dushui, Guanding, Guizhou

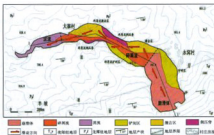


图4 贵州关岭大寨滑坡—碎屑流运动分区图

Fig. 4 Map of rockslide-debris dynamic zoning at Dushui, Guanding, Guizhou

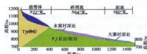


图5 贵州关岭大寨滑坡—碎屑流剖面图

Fig. 5 Profile map of rockslide-debris at Dushui, Guanding, Guizhou

地下水流系统,由于区内地下水动态变化较大,泉水流量、地下水位受大气降雨等因素控制,变化与大气降水的变化规律基本同步。每年5~9月降水高峰

期,泉水流量处于丰水期,1~3月降水量少,地下水属枯水期,泉水流量变小,甚至干枯。泉水流量变幅一般5~10倍,最大100~200倍,水位变幅2~30m,因此,在雨季,降雨对斜坡的失稳起了非常重要的触发作用

坡顶集中补给区:大气降水是滑坡区地下水主要补给来源。受分水岭、隔水层及地质构造的控制,形成了复杂的地下水网络,并在局部形成地下水富集带。在坡顶碳酸盐岩裸露的地区,大气降水通过岩溶管道与溶蚀裂隙、落水洞、漏斗迅速进入地下,补给地下水。从泉水流量的动态变化显示了地下水与大气降水的密切关系。

坡顶弱径流和强排泄区:由于岩性条件的差异,



图6 崩滑体沿沟谷右侧壁侧升并摧毁村庄

Fig. 6 the Dabai rockslide moved upward and destroyed the Tongqin village



图7 碎屑流流动和结构特征

Fig. 7 Features of the flow and accumulation structure of the debris, Dabai

a. 碎屑流保护区两侧加修, b. 碎屑流在冲击区形成多层结构, c. 碎屑流具多次管道流动特征, d. 碎屑流流动时形成的侧压脊

而使地下水的径流方式差别较大。由于坡体地带多为较为缓倾的泥岩、页岩、砂岩等非岩溶的夜郎组地层,因此,上部厚层灰岩区岩溶管道发育,地下水多集中于岩溶管道中径流,并以岩溶大象的形式在碳

酸盐岩陡壁与砂页岩缓坡地形转折处给与非可溶性岩的接触带挤出地表。同时,由于在非可溶岩分布区多细裂隙裂隙的存在,地下水主要赋存于基岩裂隙中,并沿斜坡体侧流运动,形成裂隙地下水集中带



图8 大寨滑坡前缘泥石流结构特征

Fig. 8 Features of the front accumulation structure of the north flow, Dazhai

a. 前缘堆积块石层置于前缘之上; b. 后缘堆积块石层置于前缘之上

图9 典型滑坡推挤、高度与等效摩擦角示意图  
(Scheidegger, A. E., 1973)

Fig. 9 Geometry of a landslide (Scheidegger, A. E., 1973)

流带。

坡脚弱排带区:由于下部地层主要为砂页岩互层,间夹煤层的龙潭组地层,因此,属于相对隔水地层,地下水的活动相对较差,往往在地层变化地带形成接触弱排带。

### 3 滑坡-碎屑流堆积特征

滑坡灾害发生后,国土资源部航空遥感中心立即开展对滑坡区的航空遥感工作,遥感影像分辨率达6m。根据地面调查与遥感影像分析,可将滑坡区分成崩滑堆积、碎屑流堆积和泥石流堆积三部分。与滑坡前该区1:1万的数字高程模型DEM地形图对比计算,作出了滑坡堆积体等厚线图(图3)。这样,推算出滑坡区启动的崩滑体体积约为117.6万 $m^3$ ,滑坡面积7.25万 $m^2$ ,上部高程降低最大35m。由于滑坡铲削斜坡表层残坡积土及崩落岩体解体松散等因素,滑坡-碎屑流堆积体体积约为174.7万 $m^3$ ,堆积区面积11.4万 $m^2$ ,最大堆积厚度40m。滑坡后缘壁高程约1180m,前出口高程980m,前缘堆

积体最低高程约为760m。

崩滑区:主要为夜郎组砂岩,残留堆积以块石为主,块径一般为数十厘米,最大块径约1m。岩体铲削区深度约35m,后缘壁陡峭,坡度达70°~80°,高差达35m。

碎屑流堆积区:由崩滑体撞击粉碎后形成,块石为主,块径一般为数厘米,最大块径小于30cm。堆积厚度约5~20m,最厚达30m。

泥石流堆积区:由老残坡积土搬运形成,黏土为主。由历史上多期泥石流形成,板结程度较好。表层为此次形成的泥石流堆积,厚度一般为5m。

### 4 滑坡-碎屑流运动特征

根据现场调查和航空影像分析,滑坡最初启动于高程950~1180m山腰上,坡顶高程约1500m。滑动方向总体为N22°W,滑动距离大约为380m;撞击对面河谷侧壁并摧毁水窝村21户民居后,方向总体偏转为N64°W,转化为碎屑流,流动距离约800m;在碎屑流前锋,为历史时期和初期形成的泥流堆积。上部为碎屑流,方向总体为S80°W(图4、图5)。

#### 4.1 滑坡-碎屑流运动分区

大寨滑坡的运动特征与2009年6月5日发生在重庆武陵鸡尾山的滑坡高速远程运动特征较为相似<sup>[2]</sup>可以分为如下几个区:

(1)崩滑源区:现残留堆积的体积约35万 $m^3$ 。从原始地形上看,崩滑源区总体地势位于上部陡峭碳酸盐岩地层(坡度大于80°)和下部较为平缓的龙潭组砂页岩地层(坡度约15°~25°)过渡地带,地形坡度约30°~60°。崩滑体东、西两侧被沟谷切割分

高,东侧沟谷较浅,深约 10m,西侧沟谷深达 20~30m,侧壁临空条件较好。崩塌体地层为三叠系下统夜郎组( $T_3$ )砂岩,岩层产状  $N65^\circ-73^\circ E/\angle 30^\circ-35^\circ$ ,通向坡结构。岩体中高角度节理较为发育,其中,分布有一组与斜坡近于平行倾角达  $65^\circ-73^\circ$  的陡倾节理,构成崩塌体的后缘分离面。在崩塌体前缘,夜郎组地层与二叠系龙坪组砂岩岩层为不整合接触,形成上硬下软的岩体结构(图 6)。

崩塌体后缘高程约 1180m,前缘豁出口高程约 930m,前后缘高差达 230m,宽度约 150~200m,崩塌体厚度约 50~70m。底部界面形状不规则,具有崩塌和滑动的复合特征。6 月 29 日,作者等在现场开展调查时,仍发生多次崩塌失稳,说明具有多次失稳的特征。

崩塌体失稳后,主体向  $N22^\circ W$  方向滑动,撞击对岸沟壁后,从高程 932m 的沟谷爬高约 43m 达高程 975m,摧毁了水窝村组 21 户民居。在崩塌体东侧,形成长约 200m,宽约 100m 的铲刮区,将表层梯田和残积表土卷入,增加了物源体积。

(2) 碎屑流区 堆积体积约为 130 万  $m^3$ ,总体流动方向  $N64^\circ W$ ,坡度约  $23^\circ$ ,流动距离 650m,撞击沟谷右侧壁,并摧毁大寨村 16 户民居后,偏转为  $386^\circ W$ ,流动距离 150m,覆盖于泥流值上。碎屑流具有如下特征(图 7):

——铲刮特征。崩塌体撞击位于沟谷右侧壁,并爬高摧毁水窝村后,发生偏转,其中,一部分碎屑流体向西流动,撞击了沟谷左侧壁,并爬升了约 20~30m,铲刮了松软的龙坪组页岩地层及表层残坡积土层,铲刮长度约 250m 长。从堆积物结构上看,上部主要为碎石,形成干碎的碎屑流,块径一般为数十厘米,最大小于 1m,但是,在堆积体下部,黏土含量逐渐增加,可达 30%,夹块径达 1m 以上的大块石,说明了由于碎屑流的铲刮效应形成了下部以残坡积土和老崩塌体物源的堆积特点。

——侧压特征。由于边界摩擦阻力的影响,位于沟谷边缘的碎屑流体与位于中部的碎屑流体剪切差逐渐加大,速度将会减慢。由于侧向压力加大,导致边缘部分逐渐停积,并且堆积高度明显高于中部堆积体,形成了典型的碎屑流运动过程中的侧向堆积特征,即侧压脊。

——叠加堆积特征。碎屑流在原有崩塌体的惯性作用下向下运动,由于地形起伏效应,导致碎屑流将由整体流向漏斗流向管道流转化,这样,流动速度将明显减慢,导致出现明显的叠加分层结构特征。

——撞击特征。碎屑流在沟谷中流动 600m 后,仍具有较高速度。由于沟谷在大寨村一带发生偏转,并且断面由原宽达 150m 缩窄为约 80m,碎屑流在位于凹状沟壁地带汇集,导致大寨村被摧毁。

(3) 泥流区 堆积体积约 10 万  $m^3$ ,厚度约 5m,宽 100m,长约 200m。沿沟谷中间表层被厚达 1m 左右的碎屑流超覆,两侧仍为黏土。碎屑流的堆积具有磨圆特征,并且块度与碎屑流堆积区的明显不同,说明,崩塌体失稳后,在早期的运移中,具有泥石流特征(图 8a)。从后缘开看,下部主要为黏土,夹少量块石,含水性好。在前缘形成塑性泥流(图 8b)。

#### 4.2 滑坡启动速度估计

目前,对于体积为百万~千万立方米的滑坡运动速度和滑移距离的估计,国际上较为通行的计算公式是(图 9)(Schiedegger, A. E., 1973):

$$V = \sqrt{2g(H-f \cdot L)}$$

其中,  $V$  为滑动速度;  $g$  为重力加速度;  $H$  为滑坡后缘顶点至滑移估算点的高度;  $L$  为滑坡后缘顶点至滑移上估算点的水平距离;  $f$  为滑坡后缘顶点至滑移运动最远点的连线至斜率,即等效摩擦系数。

根据上述公式和图 9,可以建立大寨崩塌体的启动阶段的滑动距离、高差与等效摩擦角之间的几何关系。因此,由上公式,计算出启动阶段到达水窝村时的滑动速度( $V$ ):

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2g(H-f \cdot L)} \\ &= \sqrt{2 \times 9.8 \times (205 - \lg(19^\circ) \times 580)} \\ &= 10.18(\text{m/s}) \end{aligned}$$

相应地,可以推断出崩塌启动到爬升撞击水窝村的速度,其中,在豁出口处,速度达  $44.84\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。滑坡爬升到达沟谷底时,速度处于最高值,达  $45.24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于前方沟壁的阻挡,滑坡体处于爬升减速阶段,在水窝村下降,速度减为  $31.42\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,当从沟谷爬升 43m,到达水窝村并摧毁房屋时,速度为  $10.18\text{m/s}$ (表 2,图 10)。

唐川曾用上述公式对云南昭通头寨滑坡达 3200m 滑程进行了速度全程分析,推断出滑坡在豁出口的速度达到  $64.9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在碎屑流阶段平均速度仍达  $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。根据图 5 的几何关系,该坡一碎屑流的等效摩擦角约为  $16^\circ$ ,亦可估算出碎屑流体抵达大寨村组时,高差  $H=350\text{m}$ ,距离约为  $L=1200\text{m}$ ,速度为  $10.76\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。值得指出的是, Schiedegger, A. E. 推导的公式误差是较大的,由于大寨滑

表2 大寨滑坡滑动及爬升撞击阶段速度值计算  
Table 2 Estimated velocity of run-out under the state of sliding and collision upward

编号	位置	运动状态	H/m	L/m	$\alpha/(^{\circ})$	$v/m \cdot s^{-1}$
1	滑坡口	下滑	230	570	19	44.84
2	沟谷谷底	下滑	258	446	19	45.24
3	永发村下	爬升	227	513	19	31.42
4	永发村后	爬升	205	580	19	18.18

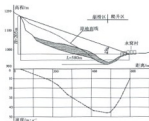


图10 崩落体滑动及爬升撞击阶段几何关系及速度曲线  
Fig. 10 Geometry of the Dabai rockslide and velocity under the state of sliding and collision upward

坡在碎屑流阶段运动特征非常复杂,包括了铲刮、撞击、侧向摩阻、下垫面液(流)化等作用,因此,采用此公式时应加以修正。Sassa(2000)和 Harger(2006)从液化和流化机理,郑爱国(2009)等从空气动力学机理提出了滑坡运动速度的估算方法,可以借鉴。

## 5 滑坡-碎屑流形成条件

关岭大寨滑坡的发生具有较强的隐蔽性。现场调查表明,该区多条冲沟堆积有数十万  $m^3$  的古老崩塌体,母岩主要为山体顶部陡峭的碳酸盐岩地层,位于中部的夜郎组砂岩地层主要以小型的滑坡、崩塌为主,滑动距离较小。这种由滑坡转化为碎屑流,距离达1.5km的复合型灾变模式在贵州是罕见的。

### 5.1 地质地形条件

在地质上,从上部至下部,上部主要为灰岩、白云岩,分布多组节理,裂隙溶洞发育,是地下水的富

水地层,形成管道流,甚至地下河;在与下部砂岩接触地带,形成集中排泄区,裂隙丰富;由于山势陡峭,达70°以上,主要以发生崩塌为主。中部为相对较缓的砂岩地层,坡度一般为30°~60°,分布有数组节理,将岩体切割成层状块体;由于上部岩体水强烈补给,形成裂隙水,在与下部页岩地层接触地带形成泉水出露;由于裂隙的贯通性好,加之裂隙水形成的静水压力和渗透压力作用,岩体稳定性差。下部为页岩、泥岩地层,局部含煤;表层易于风化;岩体透水性差,构成隔水层。这种上硬下软的地质结构,加上接触带往往形成裂隙地下水集中排泄带,极易形成滑坡地质灾害(图11)。

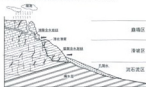


图11 关岭地区山体结构及灾害模式  
Fig. 11 Mountain structure and geologic hazard mode at the Guanling region

从地形上看,斜坡上陡下缓,就像一只靴子,可称为“靴状地形”,上部陡峭地形导致山体易于失稳,而中下部开阔伸展良好的内容提供了远程的运动条件;山顶高程达1500m,山脚高程为700m,相差800m,较大的势能向动能的转化,容易形成高速远程滑坡—碎屑流。

### 5.2 降雨和地表水径流条件

局地强降雨是触发大寨高速远程滑坡—碎屑流的主要因素。据当地气象台站记录,6月27~28日24h累计雨量达310mm,即24h雨力为12.9mm/h,最强降雨时段出现在28日05时至12时,累计达190.9mm,7h内雨力达27.1mm/h。降雨对滑坡—碎屑流的影响可以分为两方面:一是在砂岩裂隙岩体中形成静水压力和渗透压力,使滑坡的失稳下滑;二是在沟谷中产生地表径流,为碎屑流远程流动形成饱水下垫面。由于缺乏实际观察数据,采用了相关手册推荐的经验公式进行流量计算(交通部公路科学研究所,1993)即:



图3 大寨滑坡冲沟典型断面地表径流参数及流量

Table 3 Parameters and current of raining run-off for 4 sections of the gully

断面	参 数					
	河床长度 $L/\text{km}$	河流坡度 $P(\%)$	汇流时间 $T/\text{s}$	雨力 $S_p/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	汇流面积 $F/\text{km}^2$	径流参数 $\mu/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
黄坛口组	0.895	762.8	0.0262	12.92	0.44	23.88
永窝村组	1.11	899.7	0.0315	12.92	0.52	23.92
大寨村组	1.53	416.6	0.0476	12.92	0.94	20.04
内 口	1.78	341.1	0.0570	12.92	1.22	17.85

$$Q_p = 0.278 \left( \frac{S_p}{\sigma} - \mu \right) F$$

式中,  $Q_p$  为洪峰流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $S_p$  为雨力 ( $\text{mm}/\text{h}$ );  $\mu$  为雨头参数 ( $\text{mm}/\text{h}$ );  $\sigma$  为暴雨递减指数;  $\tau$  为汇流时间 ( $\text{h}$ );  $F$  为流域面积 ( $\text{km}^2$ )。

在此,选取了滑坡前出口地段(坡脚)、永窝村组、大寨村组和内口四个典型断面,研究降雨后形成的地表径流特征(表3,图12)。这样,得出了滑坡发生前24h降雨量为317mm,上述断面的平均流量值分别为5.35、5.50、8.89和10.79  $\text{m}^3/\text{s}$ 。



图12 大寨滑坡—碎屑流降雨地表径流平面图

Fig. 12 Map of raining run-off zoning at the Dazhai rockslide-debris

对比图2可知,6月的月平均降雨量为309mm/m,即10  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。若以一般最大降雨强度为100  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 计算,滑坡前出口地段(坡脚)、永窝村组、大寨村组和内口四个典型断面对应的平均流量为1.94、1.90、3.05和3.69  $\text{m}^3/\text{s}$ ;若以一般最大

降雨强度为150  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,滑坡前出口地段(坡脚)、永窝村组、大寨村组和内口四个典型断面对应的平均流量为2.70、2.79、4.48和5.42  $\text{m}^3/\text{s}$ (图13)。可知,6月27日至28日的降雨产生的沟谷径流量是平时强降雨(100~150  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )引起的沟谷径流的2倍之上,导致了碎屑流流动距离和速度的显著增加,同时,由于流量的增加,驱使并搬运了位于滑坡前出口一带起反压护脚作用的老崩塌堆积体(灰岩块石),加剧了滑坡的整体失稳。

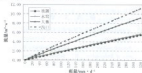


图13 大寨滑坡冲沟各断面不同日降雨量与流量关系图

Fig. 13 Relationship between daily rainfall and current of the gully, the Dazhai rockslide-debris

## 6 结 论

2010年6月28日,贵州关岭因突降雨而发生特大滑坡灾害,99人遇难。该滑坡灾害呈现高速远程滑动特征,约115万  $\text{m}^3$ 的崩塌体向北东下滑约500m后,偏转约90°后转化为高速碎屑流直冲形高速下滑约1000m,总滑程约1.5km,堆积体体积约174.9万  $\text{m}^3$ 。滑坡区上部主要为炭岩、白云岩,中部为相对较缓的砂岩地层,下部为页岩、泥岩地层,局部含煤,具有上硬下软的地质结构,加上接触带上往往形成裂隙地下水的集中排泄带,极易形成滑坡地质灾害。从地形上看,斜坡上陡下缓,称为“靴状地形”,上部陡峭地形导致山体易于失稳,而中下部

开阔伸展良好的沟谷提供了远程的运动条件,较大的势能向动能的转化,容易形成高速远程滑坡—碎屑流。降雨是触发此起特大灾害的主要原因。6月27~28日,降雨量就达310mm,超过了当地近60a来的气象记录。

近年来随着极端强降雨等灾害性天气的重现期缩短,高速远程滑坡造成的群死群伤特大地质灾害在我国呈逐渐增加趋势。目前我国对于地质灾害隐患的调查,主要是采取房屋后群测群防的模式,而多起高速远程滑坡——碎屑流灾害成灾模式,具有突发性、隐蔽性和复杂性等特点,已远超出村民的视线,防范难度很大。因此,应加强对这种灾害类型的调查与防范,特别是要进行滑坡安全避让范围和逃逸速度的研究。

本文得到了张洪涛、朱立军、熊自力、张伟辰、田廷山、刘传正、田稼等的帮助和指导。国土资源部航测中心董立强等提供了遥感影像及分析结果。在此,表示感谢。

## 参考文献

- [1] 交通部科学研究院. 公路桥涵设计手册[M]. 北京:人民交通出版社,1993.  
Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Design Handbook of Bridge and Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 1993.
- [2] 熊元. 昭通头寨沟特大突发性滑坡研究. 云南地理环境研究
- [3] 1991,3(2): 64~71.
- [4] Tang Chun. A study on large-scale catastrophic landslide at Toudai gully of Zhaotong, Yunnan Geographic Environment Research [J]. 1991,3(2): 64~71.
- [5] 廖爱凤,熊跃平. 云南头寨滑坡全流域流体动力学机理分析. 同济大学学报(自然科学版)[J]. 2009,37(4): 481~485.
- [6] Xing Aiguo, Yin Yuesong. Whole course analysis on hydrokinetics mechanism of toudai gully landslide. Journal of Tongji University (Natural Science) [J]. 2009,37(4): 481~485.
- [7] 熊跃平. 汶川8级地震滑坡高速远程特征分析. 工程地质学报 [J]. 2009,17(2): 153~166.
- [8] Yin Y. P. 2009. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 17(2): 153~166.
- [9] 熊跃平. 斜倾厚层山体常规模向滑带机制研究——以重庆武陵坡尾山滑坡为例. 岩石力学与工程学报[J]. 2010,29(2): 217~226.
- [10] Yin Y. P. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—A case study of Jishishan rockslide in Wulong, Chongqing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering [J]. 2010,29(2): 217~226.
- [11] Hung U. Rock avalanche occurrence, process and modelling. In: Evans SG et al (Eds). Landslides from Massive Rock Slope Failure, 2006, 243~286. Springer, Netherlands.
- [12] Schlegelger, A. E. On the prediction of the mass and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics, 1973, 11~40.
- [13] Sassa K. Mechanism of flow in granular soils [C]. Proceedings of an International Conference on Geotechnical and Geological Engineering GeoEng2000. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Co Inc., 2000, 1: 1671~1702.

## 新书介绍



## 内容提要

著者: 尚彦军、杨志法、袁广祥、曾庆利、丁继新 中国铁道出版社出版。

这是一本以图版照片为主要形式, 加以文字说明和图表分析, 反映青藏高原在江大拟考北西部川藏线八宿-林芝路段地质灾害发育和分布的专著。该路段地质灾害主要包括崩塌、滑坡、泥石流、磨砂坡、滚石、雪崩、水毁等多种类型。由于该路段地质灾害具有数量和类型多、规模不等、分布范围广等特点, 被称为“地质灾害博物馆”, 其中包括亚洲最大的冰碛物滑坡——102 滑坡群和我国当代最大规模的易贡高速巨型滑坡。2001 年 12 月国家批准建立以地质灾害为主要特点的“西藏易贡国家地质公园”。本书是著者在 2001 年~2008 年期间多次野外地质考察工作基础上, 收集筛选出比较简洁和便于观赏的照片, 按照从东向西的顺序, 以简要文字介绍分析了公路沿线地质灾害的发生、发育和分布。同时还配有不同工程治理技术措施的简要对比说明。