

川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征

孔纪名, 张小刚, 强 巴

(1. 中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 西藏自治区交通厅公路科学研究所, 西藏 拉萨 850001)

摘 要: 拉月滑坡位于东久河左岸, 为典型的高位岩质滑坡。1967—08—29 拉月一带山体突然发生特大型滑坡, 体积超过千万立方米, 是川藏公路上著名的“拉月大塌方”灾害。文章应用块状岩体稳定性分析方法, 对同结构岩石块体相互嵌合、形成具不同稳定状况的岩体结构, 控制了滑坡的发生的特点进行了分析, 证明该方法判别岩质滑坡的稳定性是非常有效的。岩质滑坡在西藏与西南地区都十分普遍, 因此, 通过对拉月滑坡块状破坏过程的分析, 对其它岩质滑坡的稳定性判别具有很好的借鉴作用。

关键词: 川藏公路; 拉月滑坡; 块状破坏

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

拉月滑坡位于东久河左岸。1967—08—29 拉月一带山体突然发生特大型滑坡, 坡体从相对高差 400~700 m 的斜坡中部剪出下滑, 体积超过千万立方米, 滑坡下滑后堵断东久河, 在河中堆积成高达 70~90 m 的堆石坝, 形成堰塞湖, 回水淹没河边公路近 3.0 km, 形成川藏公路上著名的“拉月大塌方”灾害^[1]。拉月滑坡为典型的高位岩质滑坡, 受构造活动的影响岩体中节理裂隙十分发育, 由于节理、裂隙组合特征的不同, 形成具不同特征的岩体块状结构, 特别是不同结构特征的岩石块体相互嵌合, 形成具不同稳定状况的岩体结构, 控制了滑坡的发生。应用块状岩体稳定性分析方法对岩质滑坡进行分析, 判别岩质滑坡的稳定性是非常有效的判别方法。拉月滑坡是一个典型的岩质滑坡, 这类滑坡在西藏与整个西南地区都十分普遍, 因此, 通过对拉月滑坡的分析, 对以后岩质滑坡的稳定性分析具有很好的借鉴作用, 对滑坡灾害大的防治也有较大的帮助。

1 拉月滑坡基本特征

拉月滑坡为高位岩质滑坡。滑坡发生时, 滑体

均长 450 m, 最长可达 500 m, 均宽 500 m, 最宽可达 600 m, 平面上呈横向展布; 滑坡后壁海拔 2 700~2 800 m, 后壁坡度 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 高约 50 m; 从坡体地貌形态及坡体地层结构分析, 滑坡的剪出口位置较高, 位于坡体中部, 即海拔 2 450 m 左右(图 1); 滑坡均厚约 50 m, 滑体体积 $1.0\times 10^7\text{ m}^3$ 左右。拉月滑坡在运动过程中逐渐解体并演变为碎石流, 若按 1.2 的松散系数计算, 其松散物质体积可达 $1.2\times 10^7\text{ m}^3$ 。拉月湖经过多次溃决, 在流水的侵蚀作用下, 现在其堆积坝已被切穿, 东久河拉月大塌方段河床已基岩出露。在滑坡发生前, 此段基岩河床亦控制着局部的侵蚀基准, 使其上游河谷呈宽谷形态, 而下游河谷为深切峡谷。滑坡发生后, 在河中堆积成高达 70~90 m 的堆石坝, 形成堰塞湖, 回水淹没河边公路近 3.0 km, 溃决后呈干涸的湖盆地貌。此段河床宽达 200 m 以上, 河床物质粒径均匀, 层理清晰, 河流纵比降仅 $3\text{‰}\sim 4\text{‰}$; 下游河谷仍为峡谷地貌, 河谷中块石林立, 大的块石随处可见, 河水湍急, 河流纵比降达 $50\text{‰}\sim 65\text{‰}$ 。斜坡平均坡度超过 45° , 根据滑坡发生前地形恢复的结果, 拉月大塌方发生前, 此段边坡上部坡度达 47° , 下部坡度为 42° , 呈上

收稿日期(Received date): 2002—08—20; 改回日期(Accepted): 2003—02—28。

基金项目(Foundation item): (中国科学院知识创新工程重要方向项目—“山体滑坡灾害防治中的关键力学问题研究项目”资助。

[Supported by The knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences on mechanics of landslide calamity prevention.]

作者简介(Biography): 作者简介: 孔纪名(1956—), 男(汉族), 四川重庆人, 研究员, 主要从事斜坡变形破坏规律研究[Kong Ji-ming(1956—), man, Professor, work on research of slide destroy regularity.]

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

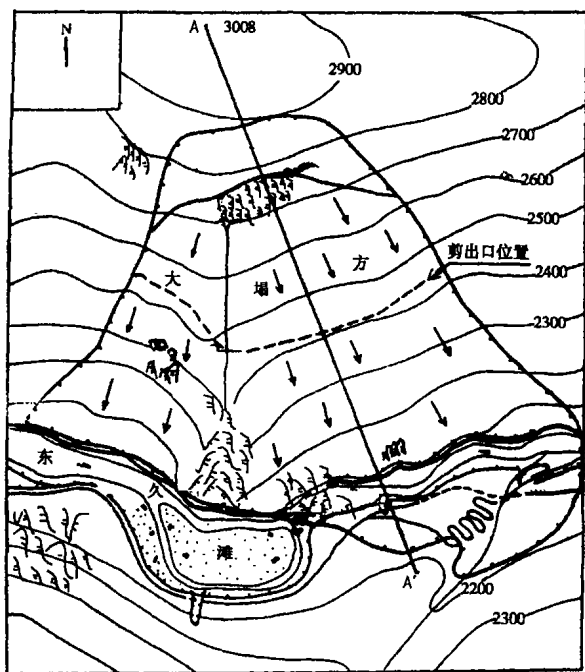


图1 拉月滑坡平面示意图

Fig. 1 Sketch map of Layue landslide

陡下缓的坡形, 滑坡发生后, 此段边坡上部坡度为 44° , 下部坡度为 35° , 斜坡平均坡度 40° 。

拉月塌方(滑坡)起动时, 其主滑方向为 159° , 起动后, 塌方(滑坡)逐渐解体。受塌方(滑坡)中下部基岩梁子的阻隔影响, 滑体被分为东西两部分, 东滑块为拉月塌方(滑坡)的主体。在滑动过程中, 滑动方向由 159° 逐渐转为 140° , 而西滑块的滑动方向则转为 200° 。东滑块的运动速度和运动距离远较西滑块大, 其松散堆积体不仅停留在坡体中下部, 部分物质还冲过东久河堆积在对岸 300m 的范围内, 而东滑块的大部分物质则停留在坡体的中下部。

2 研究区域应力场及斜坡结构特征

2.1 拉月滑坡区域应力场特征

拉月一带在区域构造上位于喜马拉雅构造带东久断裂东段延伸部位, 主要断裂构造是近东西向延伸的拉月断层, 是东久断裂向东延伸的次级构造, 并向东延伸与北东向的林芝至通麦断裂相交。由于受到印度洋板块的挤压和南加巴瓦构造结的限制, 东久断裂在拉月一带表现为顺时针压扭性的受力特点。

拉月断层沿东久河展布, 在东久河谷两侧陡岩处, 出露有该断层的次级断层, 产状近于直立, 断层

面上可见顺时针扭动的水平擦痕。东久河一带出露的岩性主要为一套混杂岩, 在断层两侧分布有部分片麻状花岗岩, 流纹状花岗岩、花岗片麻岩。

新生代以来, 拉月一带的新构造运动十分强烈, 为地壳强烈隆升区, 且抬升速率呈明显加快的趋势。地壳的强烈隆起, 引起河流的深幅下切侵蚀, 形成山高谷深、边坡陡峻的景观。新构造强烈活动的另一个表现是该区域地震活动十分频繁, 1954~1995 年间, 拉月及周围地区共发生 $M \geq 3.0$ 级地震 33 次。强烈的构造活动使得东久河一带变形强烈、岩体破碎、节理裂隙等结构面发育, 反映出该区域为高地应力集中区。

1. 区域应力场

从东久河一带节理、裂隙受力方式解析结果可以看出, 新生代以来该区域最大主应力(σ_1)方向为南北向, 反映出印度洋板块由南向北挤压, 发育的主要断裂为近东西向延伸的东久断裂和拉月断层, 混杂岩中似层理走向也为近东西向; 北东向的断层由于受南北向最大主应力(σ_1)作用, 表现为逆时针压扭性受力特点。同时因受南迦巴瓦构造结的限制^[2], 该区域还迭加了一组水平剪应力, 最大剪应力(τ_1)为顺时针方向运动, 主要断裂构造表现为顺时针压扭性的受力状态。在拉月塌方(滑坡)下部出露的岩体节理而上, 普遍可见一组近水平延伸的构造擦痕, 扭动方向为顺时针向。

通过对拉月一带岩体中共轭节理解析, 拉月一带最大主应力(σ_1)方向近于南北向, 并且顺时针扭动的特点。虽然在节理形成后期受构造活动的影响, 产状有所变化, 但这与该区域内断裂构造相互关系组合所表现的应力作用方式相一致。

2. 拉月斜坡动力作用

随着拉月一带地壳的逐渐抬升, 河流下切, 处于临空条件下的坡体其受力状态也逐渐发生了变化, 坡面上最大主应力方向(σ_1)由水平方向转变为近于垂直方向。同时临空面的形成, 使坡体中聚积的弹性应变能得以释放, 在坡体表面发生卸荷作用, 斜坡受到水平拉张应力的作用。其结果, 一是使坡体中原有的节理或断层受力性质发生变化, 受力方式由原来的水平作用力为主, 逐渐转变为以重力作用为主, 使原节理裂隙扩张, 特别是坡体中的顺坡向节理在张力作用扩展连通, 形成不稳定的坡体结构, 发育为滑坡的潜在滑面, 如拉月塌方(滑坡)下部的断层。该断层为追踪岩体中的一组节理面发育而成, 断层

具压扭性的受力特点,断面上可明显见一组水平方向的擦痕。随着坡体受力条件的变化,断层的受力状态逐渐变为张性。二是由于弹性应变能的释放,在斜坡表层形成卸荷裂隙,这些卸荷裂隙与坡体中原有裂隙叠加,形成坡体表层中密集的裂隙带,导致坡体结构松散。这种岩体结构正是构成塌方(滑坡)形成有利的坡体结构条件。

2.2 拉月滑坡区的岩体结构

拉月斜坡一带岩体结构可分两类:似层结构和块体结构,这两类结构岩体对斜坡稳定性的贡献各不相同,这与岩体不同的结构类型及相互组合有关。

1. 似层结构

出露的花岗片麻岩和流纹状花岗岩一般具有似层状结构。一般说来,岩石似层理的走向与构造带的走向基本一致,岩层厚度与受构造作用力大小有关,在受力集中的部位,岩层较薄,在受力较小的部位,岩层较厚。在拉月塌方(滑坡)一带,由于受构造活动的影响,拉月断层两侧的似层产状明显不同,断层北侧(拉月滑坡体)似层理产状为 $170^{\circ} \sim 180^{\circ} \angle 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,岩层倾向与坡向近于一致,这种顺坡向的层状结构对斜坡的稳定性极为不利,塌方(滑坡)的发育往往利用了似层面。在断层南侧,岩层倾向近于直立,在地貌上形成陡岩。

2. 块体结构

受构造活动的影响,拉月一带斜坡中节理裂隙发育,这些区域性的节理将岩体分割成不同的块体,这些块体所构成的不同岩体结构类型,是导致塌方(滑坡)形成的主要原因。据实地调查,拉月斜坡主要发育有 4 组节理(表 1)。

表 1 拉月斜坡节理统计

Table 1 Statistics of failure surface of Layue slope

节理组	产状	节理发育密集度	发育情况
1	$60^{\circ} \sim 70^{\circ} \angle 65^{\circ} \sim 60^{\circ}$	6 条/m	与坡面斜交
2	$340^{\circ} \sim 345^{\circ} \angle 64^{\circ} \sim 76^{\circ}$	1.2 条/m	与坡面斜交
3	$155^{\circ} \sim 205^{\circ} \angle 30^{\circ} \sim 50^{\circ}$	2 条/m	顺坡向
4	$12^{\circ} \sim 25^{\circ} \angle 70^{\circ}$	3 条/m	坡脚

第 1 组和第 2 组是共轭发育的“X”型节理,节理走向与坡面斜交,最大受力方向为南北向挤压,同时还迭加了顺时针扭力。因此,节理的力学性质第 1 组为张扭性,第 2 组为压扭性,第 1 组节理发育的密集程度大于第 2 组。

第 3 组节理为顺坡向节理,与斜坡中的顺坡向层理近于一致,发育程度为 2 条/m。

第 4 组节理为发育在坡脚的构造节理,节理倾向与拉月斜坡相反,发育数量较少。

拉月斜坡不同节理和岩层似层理将岩体分割成不同的块体,不同块体的组合构成了斜坡的岩体结构,其中可动性块体是控制塌方(滑坡)形成的主要原因。

3 岩体可动块体的判别方法

拉月滑坡的发生机理是块体结构岩石在重力作用下失稳下滑。因此,探讨拉月滑坡的发生过程,必须首先分析镶嵌块体的可动性,然后讨论块状结构岩体的破坏。

可动性块体的判别方法是利用全空间赤平投影,以一个结构面的全空间赤平投影为大园,其圆内域相当于结构面上盘岩体,园外域相当于下盘岩体。各结构面所组合成的块体就可以在赤平投影园上得到直观反映,代表各结构面的大园相交将全空间赤平投影圈划分成若干区域,每个区域各代表一个非空块体。

设 kt 为被结构面分割的块体,且块体为有限的; kp 为以临空面为界的岩体半空间所构成的块体,即块体完全由临空面切割而成; SP 为以临空面为界的没有岩体一侧的半空间,即为 kp 以外的空间。

块体可动的充分必要条件是

$$kt \neq \Phi$$

Φ 是空集,为结构面构成块体的投影未落在投影大园内。

且

$$kt \cap kp = \Phi$$

kt 和 kp 构成的块体为空集。

拉月斜坡上共发育有 3 组典型的区域性节理(表 2),这 3 组节理将斜岩体分割成不同的块体。3 组节理在赤平面上的投影为:先将 B_1 投影在大园上, B_1 在园内的两个区域标上“0”,表示该节理面的上盘,在园外的两个区域标上“1”,表示该节理面的下盘。用同样的方法,再将 B_2 和 B_3 投影在园上,分别标出各区域的编号:000、001、010、011、100、110、101、111(图 2)。由于 B_3 结构面是一组与坡面近于平行的介面,且在拉月斜坡上部坡度大于结构面 B_3

表 2 拉月斜坡典型节理
Table 2 Layue slope typical failure surface

节理	倾向 (°)	倾角 (°)	性质
1 组(B ₁)	65	70	与坡面斜交
2 组(B ₂)	345	68	与坡面斜交
3 组(B ₃)	175	35	顺坡向

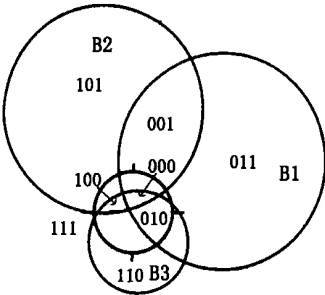


图 2 各块体赤平投影图
Fig. 2 Stenographic projection

倾角。因此, 包含在结构面 B₃ 中, 并位于投影大园内域的 000、100、010 等地体都为不稳定的块体, 其稳定性主要依靠块体之间的摩擦力获得。另外, 节理 B₁、B₂ 都为平行发育的两组结构面, 块体之间不能形成相互嵌合的结构, 一般说来, 只要斜坡的临空条件存在, 结构面的粘结力足够小, 块体都可能活动(图 3)。

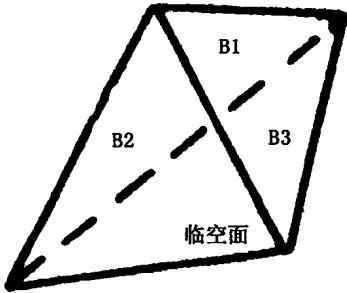


图 3 裂面分割块体三维示意图
Fig. 3 Stenographic map of rock mass
of rock failure surface

拉月斜坡中的结构面 B₃ 与坡面近于平行, 为顺坡向结构面。一般说来, 具备这类结构面的块体, 其上部岩体都具有可能活动的条件。依据块体可动性判别的赤平投影方法, 绘出拉月斜坡中各结构面(B)和块体(kt)。由于拉月塌方(滑坡)主滑体部分的坡面倾向为 180°, 倾角 37°, 令坡面为 B₄, 在投影大园内绘出 B₄ 投影园(图 4), kp 为 B₄ 的下盘, 故赤

平投影图上 SP 为 B₄ 园的內域。根据块体可动性原理, 若 $kt \neq \Phi$, 且 $kt \cap kp$, 则相应的块体可动, 故图 2 中包括在 SP 域內的 JP110、010、100 为可动块体。

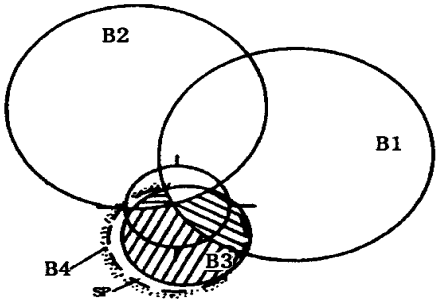


图 4 斜坡坡面以下可动块体赤平投影图
Fig. 4 Stenographic projection of movable
rock mass below slope surface

4 拉月滑坡块体破坏

4.1 岩石斜坡破坏过程中关键块体的判别

位于斜坡和陡岩上的块体可动条件各不相同, 块体间相互嵌合的紧密程度也不相同。因此, 当块体受到重力、地下渗水压力、摩擦力等因素作用时, 必然有一些块体在力作用下首先向外发生位移, 成为块体变形破坏的关键块体^[3]。

由力平衡方程可知, 位于坡面上可动块体的运动方向(D)与各结构面不平行, 则该块体满足平衡方程的充分必要条件是

$$D = R \text{ (即运动方向与主动力合力方向一致)}$$

式中 D 为块体运动方向; R 为块体合力方向。

如前所述, 拉月塌方(滑坡)块体活动主要是沿顺坡向的 B₃ 结构面活动, 所以关键块体的位移方向 D 与 B₃ 结构面平行, 则该块体满足平衡方程的充分必要条件是

$$D = D_{B_3}$$

且

$$e_{B_3} \circ R \leq 0$$

式中 D_{B_3} 为 R 在结构面 B₃ 上的投影; e_B 为结构面 B 指向块体内部的单位法线矢量。

当块体沿结构面 B₃ 发生位移时, 位移方向 D 与主动力合力方向 R 在结构面上的投影方向 D_{B_3} 一致, 即

$$D = D_{B_3}$$
$$D_{B_3} = \frac{n_i}{|n_i|} \frac{R}{|R|} \frac{n_i}{|n_i|}$$

式中 n_i 为结构面 B 的单位法线矢量。

通过上述分析看出, 拉月滑坡破坏过程中的关键块体为受 3 组区域性节理分割的块体, 位移方向为块体受力合力方向 R , 块体沿结构面 B_3 (顺坡向节理) 发生位移。

4.2 岩体滑坡破坏方式

拉月斜坡一带被区域性结构面所分割的块体具可动的条件。同时, 由于结构面都为区域性平行出现, 斜坡中顺坡向结构面(可能形成滑面)以上的岩体都可能发生滑动^[4]。因此, 当拉月斜坡中可动的关键性块体在力的作用下发生活动后, 就能引起后部各块体发生连续滑动, 形成滑坡(图 5)。其破坏过程可归纳为前期块体变形位移, 当关键性块体滑动后, 使斜坡的整个稳定状态被打破, 从而引起整个松散块状结构岩体发生溃散破坏, 形成大规模滑坡^[5, 6]。

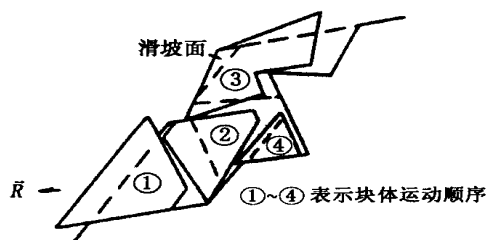


图 5 块体连续破坏示意图

Fig. 5 Sketch map of rock mass continuous damage

拉月滑坡发生的实际情况也证明了这一破坏模式。据野外调查, 1962 年以前, 拉月斜坡上部就有零星的掉块, 时常发生滚石, 表明岩体在自重应力作用下, 山体已开始出现缓慢变形现象。1962 年雨季, 降雨量较大, 引起拉月斜坡上部发生小型崩塌, 表明滑坡前缘的可动性关键岩块已开始出现松动。1962~1966 年, 每年雨季坡体上岩块不断坠落, 小型崩塌增多, 山体已出现大量裂缝。此后, 滑坡前缘的岩块开始出现连续破坏的现象, 小型崩塌及滚石已频繁发生, 新的崩塌在剪出口处普遍出现, 坡体变形已使斜坡上的裂缝不断延伸、扩展, 并出现了明显的垂直位移, 滑坡后部的拉张裂缝已延伸到滑面。1967-08-29 上午, 岩块的连续破坏已引起坡体整体失稳, 崩塌滚石加剧。临近中午时分, 伴随着一声沉闷的隆隆声, 拉月滑坡整体下滑。

5 结语

从以上分析可以看出, 岩质滑坡一般都经历了由关键块体破坏到整体破坏的过程, 拉月滑坡的发生过程也证明了这一破坏规律, 因此, 应用块体稳定性分析方法判别岩质滑坡的稳定性是一种较为有效的方法, 拉月滑坡是一个典型的岩质滑坡, 这类滑坡在西藏与整个西南地区都十分普遍, 因此, 通过对拉月滑坡的分析, 对以后岩质滑坡的稳定性分析具有很好的借鉴作用, 对滑坡灾害大的防治也有较大的帮助。

参考文献(References):

- [1] Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy Chengdu, Institute of the Traffic Science the Traffic Department of the Tibet Autonomous Region, A Study of Typical Mountain Hazards Along Sichuan-Tibet Highway, Chengdu Science and Technology University Publishing House 1999, 172~181 [中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所著. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都: 科技大学出版社, 1999. 172~181.]
- [2] Zhang Xiao-gang, Wang Chen-hua, Kong Ji-ming, Zhu Ping-yi, Analysis on Characteristics of "102" Landslide Group in Sichuan-Tibet Road, *Mountain Research*, 1998, 16(2): 151~155. [张小刚, 王成华, 等. 川藏公路"102"滑坡群的基本特征[J]. 山地研究, 1998, 16(2): 151~155.]
- [3] Kong Jiming, The Non-computation Method to Differentiate the Stability of Slope, *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.]
- [4] Chen Yong-bo, Wang Chen-hua, Differentiating and Forecasting Landslide, *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(6): 559~562. [陈永波, 王成华. 滑坡发生的危险边坡判别及预测预报分析[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 559~562.]
- [5] Lin Li-xiang, Reliability Approach to the Analysis of Slope Stability, *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(3): 235~239. [林立相, 徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 235~239.]
- [6] Ren Guang-ming, Nie De-xin, Han Ai-guo, Application of Strength Restoration Effect on Evaluation of Stability of Large-scale Landslide, *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(Supplement): 60~64. [任光明, 聂德新等. 强度再生效应在大型滑坡稳定性评价中的运用[J]. 山地学报, 2000, 18(增刊): 60~64.]

Rock Lump of Landslide of Layue Destruction Feature Analysis in Sichuan-Xizhang Highway

KONG Jiming; ZHANG Xiao-gang, and Qing Ba

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment,*

Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy Chengdu 610041 China;

2. Institute of the Traffic Science the Traffic Department of the Tibet Autonomous Region Lasa 850001 China)

Abstract: Landslide of layue locates in left bank of Dongjiou river. It's typical rock landslide for the high position. On August 29, 1967, Layue mountain body occur suddenly big type to go down, that volume ten million cubic. Landslide of Layue is famous calamity in Sichuan—Xizhang Highway. The paper used rock mass stability analysis method. To analyzing different structural rock mass inlaid mutually, and formed different stability rock mass structure, and controlled landslide characteristic. It had been proved that analysis method of rock mass stability was very effective. Rock landslide is very universal in Tibet and southwest area. Therefore, To analyzing rock mass destroying for landslide of Layue, it has good affecting for other rock landslide.

Key words: Sichuan-Xizhang highway; lndslide of Layue; rock lump destruction references

《山地学报》告作者、读者

1. 自 2003 年第一期开始,《山地学报》在封二和封三开辟两栏目: 山地研究机构介绍和山地研究学者介绍。有意者请与本刊联系或直接来稿(详情请参看 2003 年第一期和本期封二、封三)。
2. 根据部分读者和作者的建议, 编委会决定, 从 2003 年第二期开始按学科设置栏目。初步决定设置以下主要栏目: 山地环境与生态; 山地地质灾害; 资源与山区发展; 山地研究方法 with 理论; 研究简讯等。以后将根据山地科学发展趋势随时调整栏目。欲投稿本刊的作者务必针对相关栏目要求选题、撰稿。
3. 近期本刊重点征集与青藏高原有关的研究成果。要求: 来稿须是作者第一手资料的原创成果, 学术理论或区域发展现实意义显著, 论点明确, 论据充分, 与前人研究有继承性。选题内容应与上条提出的栏目相符。
4. 欢迎提供与山地科学有关的新书介绍稿。