

川藏公路拉月滑坡破坏过程模型试验研究

孔纪名

(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)

摘 要:拉月滑坡是川藏公路上典型的岩质滑坡。拉月一带斜坡岩体中节理裂隙十分发育,节理、裂隙间相互切割、组合,形成具不同块状结构特征的岩体,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。拉月滑坡的发生机理是因块状破坏而引发的滑坡,拉月滑坡破坏过程模型试验就是从机理上分析滑坡的发生过程。拉月滑坡模型试验采用了相似材料模型试验方法,建立相似的试验模型,重现滑坡体的受力状态、变形和破坏过程。

关键词:拉月滑坡;破坏过程;模型试验

中图分类号:P964.22

文献标识码:A

1 引言

拉月滑坡是川藏公路上典型的岩质滑坡,1967年8月29日拉月一带山体突然发生滑动,坡体从相对高差400~700m的斜坡中部剪出下滑,体积超过千万立方米。受构造活动的影响,拉月一带斜坡岩体中节理裂隙十分发育,节理、裂隙间相互切割、组合,形成具不同块状结构特征的岩体,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。因此,对拉月滑坡发生机理一直存在不同的认识。部分学者认为,拉月滑坡是一个典型的崩塌性岩质滑坡,即处于高位岩体发生崩塌带动坡面的物质一起滑动,崩塌性岩质滑坡。而另一部分学者认为,拉月斜坡为具块状结构岩体,岩体的块状破坏与滑动是控制滑坡发生的主要原因,拉月滑坡应是一个典型的岩体滑坡。通过大量的野外工作和室内实验,笔者认为拉月滑坡是由块状破坏而引发的岩质滑坡,拉月滑坡破坏过程模型试验就是从机理上分析滑坡的发生过程,提高对岩质滑坡发生规律的认识,更好的预防滑坡灾害。

目前滑坡模型试验大体有定性模型、光弹模型、离心模型和相似材料模型四种,其中的相似材料模型试验是一种常用而十分有效的研究方法。这种实验,只要相似条件得到满足,原型上的各种性状,如应力应变分布、弹性及非弹性的变形和破裂、破坏、边坡岩体结构面的空间位置及力学特性等都能重现于模型。拉月滑坡模型试验即采用了相似材料模型实验方法。

2 拉月滑坡模型试验的目的与相似准则

2.1 拉月滑坡模型试验目的

据野外调查,拉月滑坡的发育前后共经历了5年时间,规模已超过千万立方米,通过模型试验研究,了解拉月滑坡的形成机制及变形机制,弄清其发育过程和发育规律,就成为拉月滑坡模型试验研究的主要目的。

模型试验是滑坡研究中的一种重要手段。一些大型崩塌滑坡由于其空间尺度很大,地质条件复杂,各种影响因素相互制约,且其发生发展过程相对较长,使这类崩塌滑坡的研究受到诸多限制。模型试

收稿日期(Received date):2003-11-30。

基金项目(Foundation item):中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-SW-L1-6)——“山体滑坡灾害防治中的关键力学问题研究项目”资助[The knowledge innovation important direction project of Chinese Academy of Sciences(KJCX2-SW-L1-6)-Research on mechanics problem in landslide calamity prevention]

作者简介(Biography):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 Jiming(1956),man(chinese),Professor,Work on research of slide destroy regularity]

验可以通过在室内建立模型,提取影响崩塌滑坡发育的一个或数个主要因素,忽略次要因素,在短时间内重现滑坡的发育过程及其发展趋势。

2.2 拉月滑坡模型试验相似准则

根据相似准则,在通过模型试验进行滑坡的物理过程或力学性质的研究时,物理量的相似主要是指一般几何相似、动力学相似以及运动学相似三类(其中一般几何相似即初等几何学相似,它的物理量纲通常只取长度单位)。结合物理系统各类相似的特点,三者的地位、意义可以这样加以描述:即任二系统,如果在几何学、动力学和运动学上都达到了相似,则该二系统的性能相似。其中,几何学相似较易通过人为的努力实现,而运动学相似又是随着几何学相似和动力学相似而得到表现的。因此,三类相似中动力学相似是关键。凡是在几何相似条件下由动力学相似获得的解,理应满足运动学相似。

根据相似理论和模型试验研究的目的,在拉月大塌方(滑坡)模型试验中,主要采用材料的结构及力学(含动力学)特征相似为基本条件,并取拉月滑坡轴线 0.5m 宽的条带为研究对象,其坡长、坡度及坡形等几何条件基本相似。

当然,由于对原型物质特性认识程度的限制,包括原型物质特性参数值的选用标准问题等,模型材料与原型物质之间实现完全相似是困难的甚至是不可能的,试验要求模型用材料具有高容重、低强度和低弹模的特性。这一认识出发,在进行拉月滑坡模型试验研究中,针对原型物质,配制了不同配比的试验材料,选出了其物理力学性质参数基本满足相似准则的模型材料。

此外,岩体是由岩块和各种结构面组成,并处于不同应力状态下。因此,岩体具有显著的结构力学效应。在不同的岩体结构类型和不同的应力状态下,其岩体结构力学效应不同,从而对岩体工程稳定性有显著的不同影响。岩体结构是岩体工程稳定性主要控制因素之一,因此,模型必须按照原型的岩体结构建立,不能仅注意岩块特性的相似性。

3 拉月滑坡的地质模型特征

拉月滑坡为高位岩质滑坡。滑坡发生时,滑体均长 450m,最长可达 500m,均宽 500m,最宽可达 600m,平面上呈横向展布;滑坡后壁海拔 2 700~2 800m,后壁坡度 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,高约 50m;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 2450m 左右(图 1);滑坡均厚约 50m,滑体体积 $1.0\times 10^7\text{m}^3$ 左右。滑坡体在运动过程中解体并演变为碎屑滑动。

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° 。

拉月滑坡启动时,其主滑方向为 159° ,滑坡启动后坡体逐渐解体,受滑坡中下部基岩梁子的阻隔,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。

拉月斜坡一带岩体结构可分似层结构和块体结构。

(1) 似层结构

斜坡出露的花岗片麻岩和流纹状花岗岩一般具有似层状结构,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,在应力集中的部位,岩层较薄,在受力较小的部位,岩层较厚。滑坡体位于拉月断层北侧,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,滑坡发育利用了岩体中的似层面。

(2) 块体结构

受构造活动的影响,拉月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	发育密集度	节理特征
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/10m	坡脚

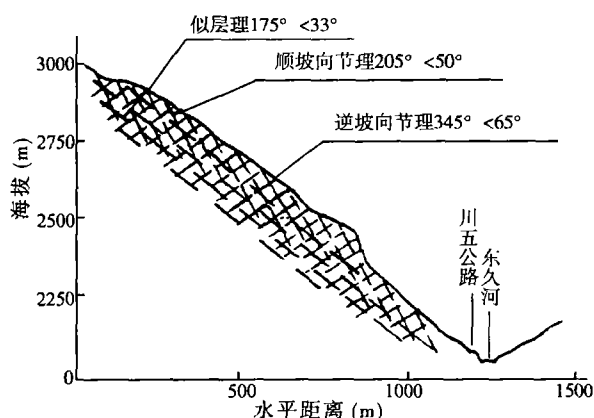


图1 拉月滑坡岩体结构剖面示意图

Fig.1 The sections diagram of body structure of Layue landslide

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。

在这些结构面中,岩体中的似层理和顺坡向的第3组节理是控制滑坡形成的主要结构面。

4 拉月滑坡模型试验相似材料及模型制作

4.1 相似材料的力学性质

拉月滑坡的岩石类型为一套混杂岩(花岗片麻岩),受构造活动的强烈影响。构成滑坡的岩体破碎,节理裂隙发育,特别是节理面上的岩石强度较低,使坡体形成松动的块体结构。取样测试表明,坡体上各类结构面上花岗片麻岩在饱水条件下的极限抗压强度为20.39~25.43Mpa。拉月滑坡模型是模拟在重力条件下块状结构岩体的破坏过程,因此,试验除了考虑坡体结构的相似外,选择高容重、低强度的相似材料是保障试验成功的重要条件。

(1)模型试验相似材料的选取

根据不同试验材料的力学性质,选择石英砂、重晶石粉、粘土、石膏、碳酸钙颗粒为试验材料,配制成4组不同成份和比例的试验材料(表2),通过对其力学性质的试验比较,其中由重晶石、石英砂、碳酸岩

颗粒、乳胶组合构成的相似材料第4组能较好的满足模型试验的要求。因此,将这组材料作为模型用基本材料。

(2)相似材料的力学性质

为了使相似材料达到最佳的试验效果,对第4组材料进行不同配合比的力学试验。试验结果表明(表3),在相同的测试条件下,3号样品单轴抗压强度最小、容重较高,在自然条件干燥固结60小时后,具有岩体的性质。因此,将3号样品作为模型试验的试验材料。

表2 不同组分材料单轴抗压强度

Table 2 The uniaxially compressive strength of the different component materials

编号	材料组合	单轴抗压强度(kg/cm ²)
第1组	石膏、水	11.000
第2组	碳酸钙颗粒、粘土、石英砂、水	9.750
第3组	石膏、重晶石粉、石英砂、甘油	1.000
第4组	重晶石粉、石英砂、碳酸钙颗粒	0.576

表3 不同配合比材料强度对比表

Table 3 The contrast of the intensity among the materials with the different mix

编号	不同配合比材料	单轴抗压强度(kg/cm ²)
1	重晶石粉、石英砂、碳酸钙颗粒、乳胶	0.5762
2	重晶石粉、石英砂、碳酸钙颗粒、乳胶	0.5762
3	重晶石粉、石英砂、碳酸钙颗粒、乳胶	0.4802
4	重晶石粉、石英砂、碳酸钙颗粒、乳胶	0.6722

4.2 拉月滑坡模型制作

(1)拉月滑坡模型体的制作

模型试验装置为槽型试验台,试验台长3.5m,高1.0m,宽0.5m。模型制作选取滑坡体轴部主滑地段0.5m宽的岩体条块作为模拟试验对象,模型不考虑两侧摩阻力。根据对拉月滑坡特征的分析,滑面前部和中部设计为直线型,后部略成弧型,受力条件为重力,即在自然状态下模拟坡体下滑。模型结构面考虑对坡体稳定性影响最大的顺坡向和北东向、北西向的三组节理。

由于拉月滑坡为岩石块体破坏,破坏过程具有变形累计时间长、破坏突然的特点。因此,拉月滑坡模型试验是依据滑坡的岩石力学性质、岩体结构条件和受力方式,模拟滑坡的发生及破坏过程,通过对具有相似结构条件和受力方式的模型进行试验,重

现滑坡的变形破坏过程。因此,拉月滑坡模型试验是进行滑坡发生机理模型试验,在模型制作上不考虑模型的大小和比例,只考虑模型的试验材料、结

构、受力方式、破坏发生条件的相似性。试验将区域性的三组节理归纳为两组(表 4),顺坡向结构面的平行出现在模型上制作为顺坡向层状结构。

表 4 地质模型与试验模型结构面对比

Table 4 The contrast of constructional surface between geologic model and test model

编号	原结构面	性质	模型结构面	性质
1	$175^{\circ}\angle 33^{\circ}$	顺坡向节理	顺坡向结构面,倾角 30°	顺层
2	$345^{\circ}\angle 65^{\circ}$	区域内共轭出现的节理	逆坡向结构面,倾角 60°	逆坡向
3	$65^{\circ}\angle 70^{\circ}$			坡面斜交

模型上下可分为两部分(图 2)。

模型下部为垫层,厚 5~10cm,模拟滑坡下部的稳定岩体。

模型上部为滑坡模型体,厚 76cm。模型体分为四层,各层的层面为岩体中顺坡向结构面,坡度小于 5° 。下部 3 层的各层厚 15cm,坡面一层厚 31cm。同时,在模型体各层中每隔 10cm 制作一条逆坡向结构面(当试验平台抬升 30° 后,其结构面变为逆坡向 60°)。

为有效观测模型变形特点,分别在模型的前、中、后布设观测点。

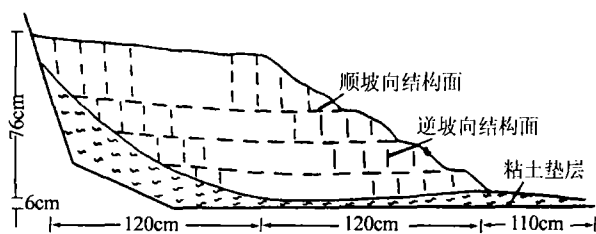


图 2 模型结构示意图

Fig. 2 The diagram of model structure

5 拉月滑坡模型试验研究

5.1 变形过程与裂缝发育

模型制作完成后,将滑坡模型试验平台抬升到设计坡度 25° 后,模型体开始发生变形,这种变形在模型直观的表现是裂隙开始出现。随着变形加剧,裂隙增多,裂隙发展追踪了模型体中的结构面。裂隙出现的规律为:

(1)模型变形的初期,首先在模型体后部出现细小裂隙,裂缝沿逆坡向结构面发生;

(2)随着变形发展,在模型体前部出现挤压裂缝,前端向前位移,同时后部的裂隙开始扩大。这表明模型体在重力作用前部坡体受挤压形成挤压裂缝,后部受拉力作用形成拉张裂缝(图 3a);

(3)模型前部的单条挤压裂缝开始沿模型体中的结构面扩展,模型体形成块状结构,随着前部块体的位移,原结构面出现偏转,裂缝开始扩大连通(图 3b);

(4)当变形积累到一定程度后,模型体前部的块体变形加快,后部出现拉张裂缝,顺坡向结构面追踪发育成滑动面(图 3c);

(5)变形进一步发展,模型体前部块体沿滑动面快速下滑,导致整个滑坡模型破坏(图 4,图 3d)。

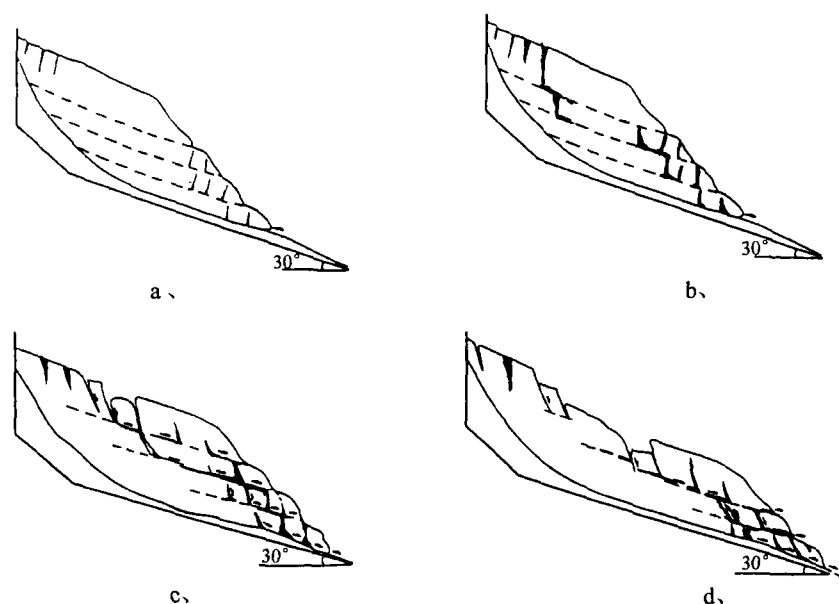
5.2 滑动面的形成与模型体位移

试验中观测到活动面以上块体随着变形发展而发生位移,活动面在发展过程中位移速率的变化表明了滑面抗剪强度的变化。模型试验位移与时间关系曲线表明,在剪应力不变的条件下,模型体变形过程与蠕变有如下关系。

①在最初的蠕变阶段,模型中裂缝开始出现,裂缝利用了模型体中的节理;②在蠕滑阶段,变形稳定发展,滑面追踪顺坡向节理逐渐连通;

③在加速变形阶段变形加速发展,滑面贯通形成,块体进入滑动阶段,抗剪强度降到残余强度。

以模型体在重力作用下发生变形至滑面上的形成,表明了剪应力作用分布的变化。在滑面形成以前,剪应力明显作用于一定厚度的变形带上。随着变形的发展,使变形带成为剪应力集中带,变形逐渐集中到滑面。当锁固段被破坏后,滑面的抗剪强度降低到最低强度或残余强度,模型体前部块体剪出,引起后部地体快速滑动,形成滑坡。



- a 模型体裂缝发育成块体结构 (the cracks of model develop into massif structure)
 b 模型体前部关键块体发生位移,引起后部模型体变形 (the cracks of model begin to enlarge and connect)
 c 模型前部关键块体变形加快,顺坡向结构面追踪发育成滑动面 (the key massif in front of model occurs displacement and result in the deformation of the rear massif)
 d 前部块体滑动,导致滑坡发生 (the fore massif slides and results in landslide occurrence)

图3 滑坡模型试验破坏过程示意图

Fig.3 The diagram of the breakdown process in the landslide model test

6 模型破坏与拉月滑坡的发生机理

模型体的破坏过程可分为5个阶段:①模型在重力作用下发生变形;②在模型体的前部出现挤压裂缝,后部出现拉张裂缝;③裂缝发展使模型体形成块体结构,裂缝发展追踪利用了模型体中的结构面;④模型体前部临空面上的关键性可动块体首先向前滑动,带动了模型前部的变形和滑动;⑤当滑面贯通,前部关键块体失稳,导致整个模型体的下滑。

通过拉月滑坡模型试验,首先表征了拉月大塌方属滑坡类型。其表层松散物来自后缘基岩被多组节理剪破的岩块随顺坡向裂隙崩塌的岩崩物质,其滑动面为松散物及表层强风化基岩与基岩的顺坡向接触带中顺坡向贯通裂隙。从模型试验数据计算,滑体上部(上部后段)变形率为0.214左右;中部(上部中段、前段)变形最大,变形率达0.877~0.890;下部(下部后段、中段)变形最小,变形率仅为0.032;而前缘部分(下部前段)变形较下部反弹,变形率上升为0.375,这充分表明了力在滑体纵向上,

无论类型、方向和大小都是不同的。在时间上,无论前阶段的缓慢变形,还是裂变前后的快速变形,滑体各部位的相对变形率差异很大(图4)。由于滑坡中部的非均匀性和非连续性牵引张力,导致变形强烈,发育拉张裂缝;而下部则由于中部拉张变形的挤压,发育挤压裂缝;在崩体前缘则受到滑体中部和下部应力的传播和重力的迭加,挤压加剧,其临空面则产生小规模的局部滑塌,以此达到部分应力的释放。

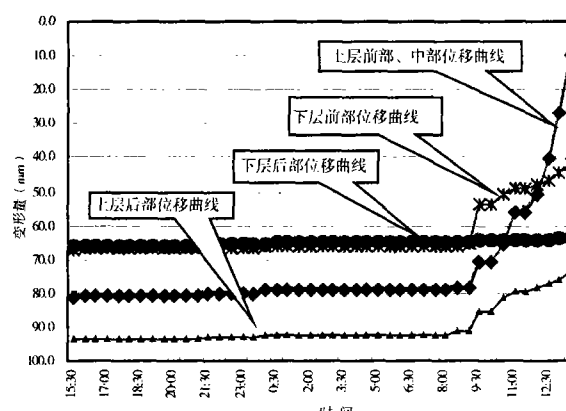


图4 滑体各部位相对变形曲线图

Fig.4 The chart of relative deformation of each part of landslide

整个力的作用过程,以及力的分布和变化,都再现了拉月大塌方经 5 年孕育后的裂变现象。特别是滑体上部 由于拉张力和下部挤压力,以及重力的共同作用,使滑体前缘经常发生小规模滑塌,而滑体中部的张裂吸储了大量的地下水,整个滑体当受力变形到一定极限时,深部的都转化为沿滑动面运动的挤压推力,从而使裂缝中的地下水受力喷出,随后产生快速滑动。

5 结语

模型试验的结果完全证实了对拉月滑坡发生机理的分析。拉月滑坡发生机理是块体结构在坡体重力作用下,前缘可动性关键块体首先发生滑动,最终牵动整个坡体发生滑坡。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,通过对拉月滑坡模型试验,将对岩质滑坡发生机理的分析起到借鉴作用,对滑坡灾害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[M]. 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] Kong Jiming, Rock Lump of Landslide of Layue Destruction Feature Analysis in Sichuan-Xizhang Highway Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 228~233. [孔纪名.川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征 山地学报, 2003, 21(2): 228~233.]
- [3] Kong Jiming, The Non-computation Method to 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 山地学报, 2001, 19(5): 446~451.]
- [4] Chen Yongbo, Wang Chenhua, Differentiating and Forecasting Landslide[J]. 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. 山地学报, 2000, 18(6): 559~562.]
- [5] Lin Lixiang, Reliability Approach to the Analysis of Slope Stability [J], 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. 山地学报, 1999, 17(3): 235~239.]

The Model Test Research of Breakdown Process of Layue Landslide on the Highway From Sichuan to Tibet

KONG Ji-ming

(Institute of Mountain Hazards and Environment,
Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy Chengdu 610041 China)

Abstract: Layue landslide is the typical rocky landslide on the highway from Sichuan to Tibet. The joint fissures developed very full in the slope body near Layue and they cut out and combine each other to form the body with the characteristic of different blochy texture. Especially, the rock block of the different structure feature interlock reciprocally to form the body structure with different stabilization situation. Because of massiveness breakdown, it bring about that Layue landslide has slid. The model test of breakdown process of Layue landslide is to analyze landslide's occurrence process from mechanism. The test adopted the method of equivalent material model test and up build similar test model in order to recur the landslide's force situation, deformation and breakdown process.

Keywords: Layue landslide; breakdown process; model test