

草坪上滑坡形成机制及其稳定性评价

孙瑜, 曾四和, 曹树波

(四川省核工业地质调查院, 成都 610061)

摘要: 位于九寨沟双河乡的草坪上滑坡属高烈度大型滑坡, 一旦失稳, 危害严重。通过对滑坡地质背景、结构特征和变形破坏特征的分析, 确定该滑坡变形属重力蠕滑型。结合试验资料, 通过参数反演确定计算参数, 利用传递系数法对滑坡稳定性进行定量评价。评价表明, 在天然、地震或暴雨工况下, 滑体整体处于稳定状态。暴雨条件下, 其前缘稳定性迅速降低, 可能失稳。

关键词: 草坪上滑坡; 地质特征; 形成机制; 稳定性; 评价

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

草坪上滑坡位于九寨沟县双河乡草坪上村, 白水江左岸的斜坡地带, 坡脚有双河乡水泥厂, 对岸为双河乡集镇和中和村, 205省道从双河乡通过。双河乡距离九寨沟县城约8 km。该滑坡纵向总长约850 m, 后缘稍窄, 横向宽约110 m, 中前部较宽, 宽约550 m, 平面面积约 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^2$, 据钻探揭露, 滑体平均厚30 m。滑坡总体积约 $1\ 000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属大型滑坡(图1)。

“5.12”地震使得草坪上滑坡体滑动加剧, 造成多处沉陷、裂缝和前缘垮塌, 致使草坪上村村民86户共467人被迫搬迁, 所幸无人员伤亡。

目前该滑坡危害对象主要为堵塞白水江、损毁坡下水泥厂, 其次为白水江对岸的双河乡、中和村村民及205省道。据不完全统计, 受该滑坡有直接或间接威胁较大的人数约2 000人。

1 滑坡区地质环境条件

草坪上滑坡前缘为第四系松散台阶式陡坎, 剪出口之下为基岩陡坡, 坡度在 $45^\circ \sim 55^\circ$ 之间, 植被覆盖率较差, 冲沟发育, 斜坡形态上完整性差; 中部为一小型台塬, 原草坪上村位于其上, 地形较平坦, 平均坡度 $5^\circ \sim 10^\circ$, “5.12”地震后, 村民已陆续搬迁到别处, 现主要为耕地, 其间亦有陡坎发育, 高5~6 m, 延伸10~30 m不等, 近垂直于主滑方向; 后缘为

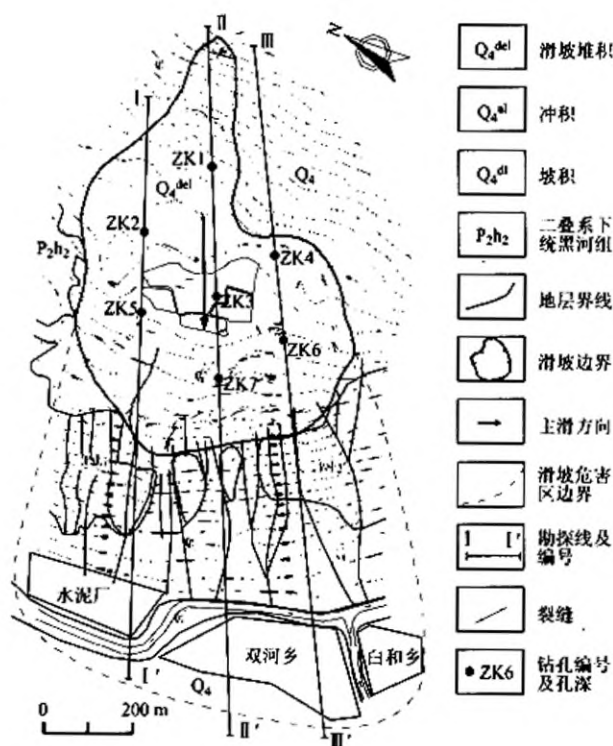


图1 草坪上滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Geological engineering plan of the landslide

斜坡地形, 坡度 $40^\circ \sim 50^\circ$, 植被较发育, 也有多级台坎发育。滑坡后壁为一高约8 m、长15 m的陡坎。滑坡体后缘之上山顶较浑圆, 为一山原地貌, 土地肥沃, 有大量耕地分布。

滑坡区内地层主要有第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})、残坡积层(Q_4^{cl+dl})和二叠系下统黑河组上段(P_2h_2)基岩地层。滑坡区在区域上位于昆仑-秦岭纬向构造带的西延段,属该断块内的陵江-青龙背斜西南翼,处于相对稳定的地段。滑坡区内勘探钻孔未揭露到地下水位,说明地下水位埋深大,但滑坡前缘剪出口附近发现4处下降泉,据调查访问,泉水不存在断流,雨季流量较大。

2 滑坡基本地质特征

滑坡体的两侧边界主要受地形及地质特征的控制,南北两侧以山脊为界,后缘最高处在陡壁的中部,前缘边界在临空面中部的基岩与松散层接触带

附近;在平面上呈现为中前部宽、顶上部窄的“扇”形体,剖面上上部地形表现为前缘、后缘陡,中部相对平缓的“座椅形”。

滑坡为大型土质牵引式滑坡,主滑方向为 245° 。草坪上滑坡又是一古滑坡。从地貌形态上,发现其具有上小下大的塔式外貌,浅表层的错台、陡坎发育,横向裂隙也分布密集,可以推断古滑坡属于牵引式滑坡。因早期滑坡体上下各段滑动速率的差异,在微地貌上表现为台阶状,从下至上可分为5个台阶(图2)。第一台阶:剪出口至草坪上村平台外侧坡体上部;第二台阶:外侧坡体上部至村庄里侧坎脚,即村庄所在平台;第三台阶:村庄里侧至后缘坡脚部位;第四台阶:后缘坡脚至后缘中上部陡坎;第五台阶:后缘中上部陡坎到后缘滑壁。

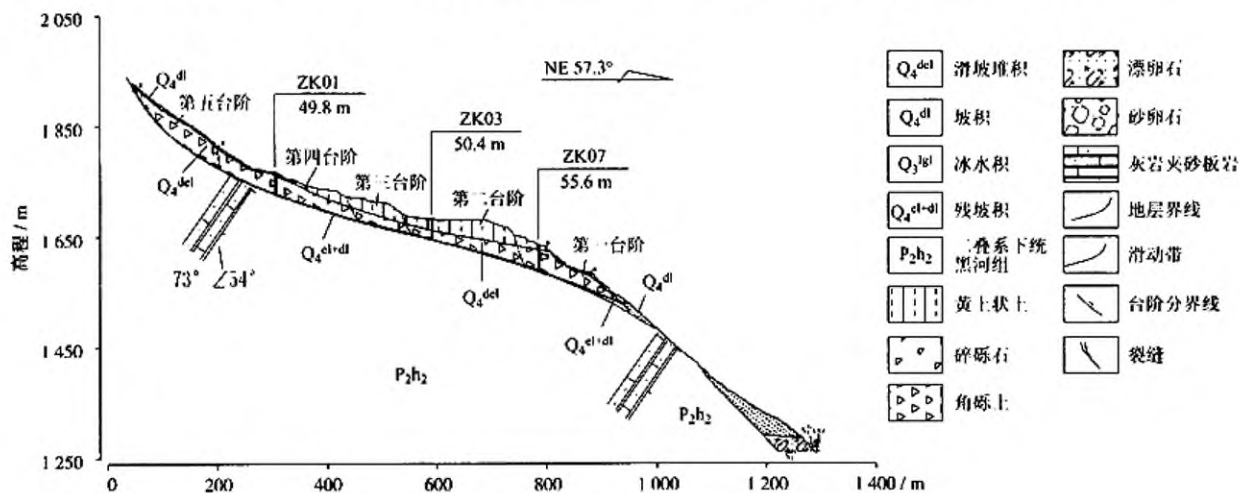


图2 草坪上滑坡纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of the landslide

滑坡体由第四系松散堆积层沿与基岩接触面附近的残坡积层(滑带土)发生滑动而形成,据钻孔和露头断面揭露,其主要物质成分从地表至下依次为黄土、含碎石的角砾土、残坡积层(滑带土)等,局部夹块石透镜体。

滑带物质为含砾粘土,呈灰-黄褐色,中密。角砾、碎石的主要成分为强风化灰岩,砾石含量为20%,粘土含量为80%。钻孔岩芯中土体揉皱现象明显,泥质含量高,部分细颗粒呈定向排列,遇水呈软塑状态,力学性质极差。滑动带底部为松散层与基岩的接触带,揭露的残坡积层厚度为1.5~3.1 m,其中的滑带土厚度为0.2~0.5 m。

滑面主要依据地质测绘、钻探、槽探等综合确定。滑面大致在基覆界面附近,为折线和锯齿形的组合,滑面外倾,具有前缘陡、中部缓、后缘陡等特征。在纵向上呈近似圆弧的折线型,横向上为凹形

弧面,形态总体与原自然地形相似。在滑面上,据现场开挖揭露,多处可见清晰的擦痕。在外侧坡体中部滑面附近有少量潜水渗出。

滑床为二叠系下统黑河组上段的灰岩夹砂岩、板岩组成。滑床岩层层理和板理发育,层间结合力较差,层面上可见擦痕与摩擦镜面。在构造作用下,岩层中节理裂隙发育,裂隙面多平直光滑,张开1~5 mm,裂面多铁质,部分为紫红-黄褐色风化次生物和粘土充填。滑床岩体完整性较差,局部呈碎块状。滑坡体的剪出口位于前缘强风化灰岩内部。

3 滑坡变形特征及形成机制分析

3.1 变形特征

滑坡在先后所经历的多期滑动中多表现为错动、垮塌,形成陡壁、裂缝,并由裂缝发展演变成塌陷

坑。据现场不完全统计,滑坡体上共发现72条裂缝,28个塌陷坑。

在滑坡体的前缘,即第一台阶所在区域,边坡高陡,坡顶与白水江水面最大高差在350 m以上,顺坡面坡角 $38^{\circ}\sim 48^{\circ}$,见垮塌解体后形成的10 m以上的陡坎错台。张裂缝的可见延伸长度10~30 m不等,可见深度1~2 m,缝宽一般10~30 cm,最宽可达50 cm,局部宽度近1 m;裂缝是在前缘松散土体崩解后向临空面垮塌形成的,多为拉张裂缝。

第二、三台阶所在区域,即滑坡体的中部,地形较平缓,为原草坪上村居民的住宅、林地和耕地分布区。在搬迁后原有村民房屋旧址的墙上,仍可看见规模不等的裂缝。分布在平台上林地里的裂缝性质为拉张裂缝,可见长度10~15 m不等,宽度20~40 cm不等,可见深度30~40 cm,见9个大小不等的塌陷坑。据调查走访,在靠近滑坡体较平缓段后部坡脚部位,前、后高,中部低的凹陷沟,沟底宽30~50 m,为古滑坡形成,现为耕地。

第四、五台阶所在区域,即滑坡体的后缘,坡角 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$,最顶部见滑面陡壁,坡面中部见错动后形成的陡坎,高度一般为3~5 m,局部8~15 m,将后缘坡体分割成2个台阶。坡脚和坡体中部有拉张裂缝数条,裂缝的可见延伸长度10~20 m,可见深度1~2 m,缝宽30~50 cm。

滑坡体近南北两侧,可见规模相对较小的裂缝数条,缝宽3~10 cm,可见延伸长度大于10 m。主要为剪切裂缝,由中部向下整体滑动后形成,在两侧侧面以剪切破坏为主,裂缝未张开,为规模较小的错动,局部可见两条呈“X”形分布。同时也存在一些顺主滑方向的剪切裂缝。

3.2 滑坡形成因素分析

草坪上滑坡的滑动与环境因素和人为因素是不可分的。

自然条件和环境因素具体又可分为:

地形地貌条件:滑坡前缘和后壁陡且临空,中部较缓。

物质组成条件:表层大部分为垂直节理发育的黄土,遇水崩解湿陷;下部为碎石土或角砾土,结构较松散,未胶结;底部含粘粒的角砾土中泥质含量高遇水呈软塑状态,力学性质极差。

气象条件:滑坡区地处川西高原气候的暖温带干湿河谷气候区,每年降雨多集中在雨季(5~9月),这必然导致夏、秋两季坡体内空隙水压力的激增。

地震条件:滑坡所在的九寨沟县所处地质构造

单元具有较强构造活动性,据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001,2008年版),九寨沟县抗震设防烈度达8度。

人为因素具体又可分为:

村庄建设:草坪上村位于滑坡中部,村庄规模的不断发展壮大,使得坡体重量不断增加。

人为改变水文地质条件:滑坡区内的农田多为反坡梯田,使得坡体表面粗糙度增加,地表水易于下渗。此外,村民生产生活用水的不合理排放,也导致大量地表水入渗滑坡体中,浸润滑坡体。

植被破坏:随着人类活动加剧,草坪上滑坡所处地区很多植被遭到破坏,使得区内水土流失严重,生态环境日益脆弱。

3.3 滑坡破坏机制分析

滑坡前缘坡陡,坡度达 40° ,有很好的临空条件,致使坡体向坡前临空方向发生剪切蠕变。滑坡体土层结构松散,坡体表层大面积分布的黄土中垂直节理极为发育,加之浅部的块碎石粒径分布不均,级配差,架空现象明显,造成雨季高强度的集中降雨后,大量雨水入渗坡内,使滑坡和滑带土饱水程度增高,滑体容重增大,重力势能增加,滑带土抗剪强度减小,又进一步加速了坡体向下的蠕滑变形。滑坡主滑段和牵引段向前移动共同推挤抗滑段滑体,促使主拉裂缝向滑体两侧延伸并张开加大和下错,滑体中前部出现众多拉裂缝、错台、塌陷坑。滑坡的浅生时效变形进入累进性破坏阶段,一旦潜在剪切面被剪断贯通,则发展为滑坡。加之滑坡区人类活动的影响,加速了蠕滑变形,从而形成蠕滑-拉裂型滑坡。

4 稳定性评价

4.1 计算方法及参数选取

根据滑面的形态,采用以极限平衡理论为依据的折线形滑面条分法和传递系数法来计算滑坡的稳定性系数和剩余下滑力。

通过室内岩土试验、工程类比分析和参数反演,综合确定了滑坡稳定性及推力计算的物理力学参数,具体取值见表1。

4.2 稳定性计算及评价

根据滑坡的地质背景及形成机制,以及九寨沟县所处的特殊地理构造位置,计算中主要考虑降雨和地震等因素,选取工况如下:自重;自重+地震;自重+暴雨。计算剖面如图3,计算结果见表2。

表 1 草坪上滑坡物理力学性质指标建议值

Table 1 Proposed values of physical and mechanical indexes for the landslide

类型	状态	C/kPa	$\varphi/^{\circ}$	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
黄土	天然	60	27	17.2
	饱和	40	14	20
含碎石的	天然	32	34	19.0
角砾土	饱和	25	30	22.5
滑带土	天然	45	25	19.8
	饱和	43	21.2	—

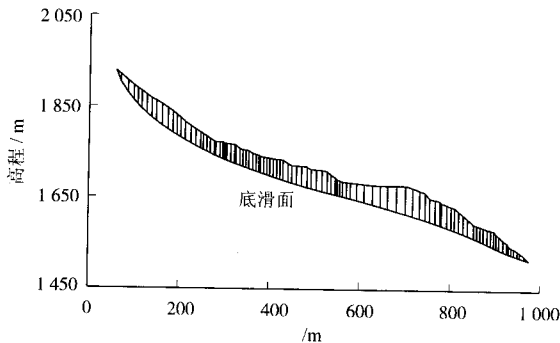


图 3 滑坡体 II-II' 剖面稳定性计算条分图

Fig. 3 Stripe map of stability calculation for Section II-II'

从表 2 的计算发现,由于滑体厚度和滑床形态在横、纵向上的变化较大,各控制性剖面的稳定系数变化较大,这也反映了滑坡稳定性在空间上的变化较大。I-I'、II-II'和III-III'主勘探剖面在 3 种工况下整体均处于稳定状态。而分块计算表明,3 条主勘探剖面的第一台阶在暴雨工况下处于欠稳定-基本稳定状态。正因为如此,该滑坡体在历史上,第一台阶在暴雨等因素的诱发下,强变形区的前缘陡坎产生错动、垮塌,形成错台和坡面碎屑流等,牵引中、后部也产生了规模不等的滑动变形破坏。

5 结论及建议

- (1) 草坪上滑坡为大型牵引式土质滑坡,变形破坏模式为渐进后退式,目前仍处于蠕滑变形中。
- (2) 滑坡从地表形态、物质组成和内部结构等方面都具有分区分段性,这与其发育过程和形成机制密不可分。
- (3) 滑坡形成机制分析和稳定性计算结果表明,滑坡在现今条件下是稳定的,在地震工况下滑坡前缘稳定系数明显下降,偏于基本稳定;在暴雨工况下,滑坡前缘将沿主滑方向发生失稳。
- (4) 建议采取以下措施防止灾害的发生:加强滑坡变形的监测,建立并完善滑坡灾害的预警系统;

完善地表截排水工程;填筑滑坡区内的裂缝和塌陷坑;在滑坡前缘兴建抗滑支挡工程。

表 2 草坪上滑坡稳定性计算成果汇总

Table 2 Results of stability calculation for the landslide

剖面	台阶	计算工况	计算稳定性系数
I-I' 剖面	第一台阶	自重	1.241
		自重+地震	1.103
		自重+暴雨	1.048
	第二台阶	自重	2.853
		自重+地震	2.278
		自重+暴雨	2.459
	第四台阶	自重	3.804
		自重+地震	3.097
		自重+暴雨	2.858
	第二、三台阶	自重	2.315
		自重+地震	1.895
		自重+暴雨	1.976
II-II' 剖面	第二、三、四台阶	自重	2.131
		自重+地震	1.771
		自重+暴雨	1.816
	第一台阶	自重	1.254
		自重+地震	1.116
		自重+暴雨	1.041
	第二台阶	自重	2.621
		自重+地震	2.122
		自重+暴雨	2.195
	第四台阶	自重	2.761
		自重+地震	2.289
		自重+暴雨	2.217
III-III' 剖面	第五台阶	自重	1.631
		自重+地震	1.443
		自重+暴雨	1.335
	第二、三台阶	自重	2.441
		自重+地震	1.993
		自重+暴雨	2.044
	第二、三、四、五台阶	自重	1.742
		自重+地震	1.496
		自重+暴雨	1.459
	第一台阶	自重	1.286
		自重+地震	1.143
		自重+暴雨	1.086
	第二台阶	自重	3.691
		自重+地震	2.805
		自重+暴雨	3.082

参考文献

[1] 孙瑜,等.九寒沟县双河乡草坪上滑坡应急勘查报告[R].核工业西南勘察设计院有限公司,2009,8.

[2] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.

[3] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2007.

[4] 陈万业,董兰凤.某水电站库区一大型滑坡的形成机制与环境影响评价[J].水土保持研究,2006,13(6):282-287.

[5] 李朋丽,等. 永蓝高速公路 K18 + 000~K18 + 350 滑坡成因分析与防治措施研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):19-23.

[6] 聂凤军,张宁. 黑龙江省莲河村滑坡稳定性评价及防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):24-27.

[7] 刘宝臣,等. 藤州中学滑坡特征及稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(1):54-57.

[8] 赵建军,等. 汶川地震诱发罐滩滑坡形成机制初步分析[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(2):92-96.

[9] 刘心彪. 甘肃武都马槽沟滑坡特征及治理对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):22-26.

[10] 王万迁,等. 江油市敬元乡新房村 17 社滑坡稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护,2011,22(2):60-64.

FORMATION MECHANISM OF THE
CAOPINGSHANG LANDSLIDE AND ITS STABILITY EVALUATION

Sun Yu,Zeng Si-he,Cao Shu-bo
(Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610061, China)

Abstract: The landslide, a large-scale landslide of high-intensity located at Shuanghe Township of Jiuzhaogou, will cause serious hazards in case of instability. It is determined as a gravity-creep type through an analysis of its geological background, structural features and deformation-failure characteristics. The transfer coefficient method is applied to assess its stability quantitatively, with experimental data used and calculation parameters determined by the parameter inversion method. It is assessed to be stable as a whole in natural, earthquake or heavy rain conditions, yet with the possibility of its leading edge being unstable in storms.

Key words: Caopingshang Landslide; geological features; formation mechanism; stability; evaluation

作者简介: 孙瑜(1984—),男,助理工程师,2006年毕业于成都理工大学,主要从事水文地质及工程地质研究。