

川藏公路茶树山滑坡特征及成因机制分析*

白永健^① 郑万模^① 李明辉^① 易志坚^② 王东辉^①

(^①中国地质调查局成都地质调查中心 成都 610081)

(^②成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

摘要 通过对川藏公路茶树山滑坡地质环境条件的系统调查研究,分析了滑坡岩土体结构、边界条件、变形特征、影响因素,并结合3DEC数值模拟,对其变形破坏机制进行了深入的探讨。综合分析表明,滑坡位于活动断裂带内,后缘斜坡陡峭,岩体破碎,同时前缘为较厚的松散堆积体斜坡,在地震活动、降雨等影响因素的诱发作用下,滑坡成因机制主要表现为以下3个阶段:(1)倾倒拉裂阶段,滑坡受后缘地形及岩体结构控制作用较为明显,在坡体浅表层一定深度范围内出现较为强烈的倾倒拉裂变形带,产生倾倒-拉裂滑动;(2)蠕滑变形阶段,前缘松散堆积体在强大的自重推力作用下发生蠕滑变形;(3)前部“锁骨段”剪断,整体失稳阶段,滑坡前部锁骨段在自重推力及断层活动的持续影响下,发生剪断,控制后缘倾倒拉裂体稳定性的潜在滑面与前缘松散堆积体体内的剪切滑动面贯通,滑坡整体失稳。

关键词 反倾滑坡 活动断裂 成因机制 倾倒拉裂—蠕滑 3DEC

中图分类号:TU457 文献标识码:A

CHARACTERISTICS AND FORMATION MECHANISM OF CHA-SHU-SHAN LANDSLIDE ON SICHUAN-TIBET HIGHWAY

BAI Yongjian^① ZHENG Wanmo^① LI Minghui^① YI Zhijian^② WANG Donghui^①

(^①Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081)

(^②Station Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu 610059)

Abstract Based on the systematic investigation of cha-shu-shan landslide on Chuan-Zang highway, this paper analyzes the landslide' rock and soil structures, boundary conditions, deformation characteristics, influence factors and formation mechanism, and makes a in-depth discussions combined with 3DEC numerical simulation. The comprehensive analysis shows that the landslide is located in an active fault. The back edge rock is poor, and the front loose accumulation is thick. Under seismic activity, rainfall and other factors eliciting, the failure mechanism of landslide can be divided into the following 3 stages: (1) stage of toppling and pull-splitting, the back edge landslides stability is controlled by the topography and structure of rock mass, where forms a rather strong dumped rupture deformation belt. Then generates slippage. (2) stage of creep deformation, the front loose accumulation body occurs creep deformation in a powerful gravity thrust. (3) stage of failing, clavicle segment are cutted in the weight thrust and the continuing effects of fault activity. Then the backedge potential slide plane and front shear slip plane are linked the whole landslide fails.

Key words Counter-inclined slope, Active fault, Formation mechanism, Toppling-pull splitting-creep, 3DEC

* 收稿日期: 2009-12-12; 收到修改稿日期: 2010-01-04.

基金项目: 地调项目: 中国地质调查局项目甘孜地区地质灾害详细调查(1212010114020).

第一作者简介: 白永健, 主要从事工程岩土体稳定性及地质灾害调查等研究工作. Email byj209@126.com

1 引言

我国西南地区位于青藏高原东侧,在青藏高原持续隆升影响下,青藏高原与云贵高原和四川盆地之间形成了总体呈南北走向的巨大的大陆地形坡降带;发育于青藏高原的金沙江(长江),在这个巨大的大陆地形坡降带上形成了典型的高山峡谷地貌。由于受高地应力、强断裂活动及强震的特殊动力、深切峡谷的强卸荷改造、复杂岩(土)体结构、复杂水文地质和特殊的河床深厚覆盖层等环境因素影响下,在这些复杂和特殊的地质环境条件下,西南地区发育有大量的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害^[1]。茶树山滑坡位于金沙江右岸支流巴曲左岸山脊中部,川藏公路巴塘(K+337)段,滑坡具有规模大、机理复杂、危害大、防治难度高等特点,本文基于工程地质环境条件详细调查,在滑坡灾害结构特征、边界分析的基础上,结合3DEC数值模拟分析滑坡的形成机理,做出防护措施建议。

2 滑坡区地质环境条件

滑坡区位于横断山脉,北段金沙江东岸河谷地带,构造侵蚀高山峡谷区,山势陡峻,地形复杂,岩土体裸露;巴曲位于滑坡脚下,深切河谷呈“V”字形。

滑坡由二叠系冰峰组(P_1b)灰岩、片岩和第四系(Q_4^{col+dl})松散堆积物组成,为一逆向结构斜坡,岩层产状为 $32^\circ \sim 50^\circ \angle 60^\circ \sim 72^\circ$,上覆第四系崩坡积物、残坡积物,结构松散零乱,胶结度差,碎块石含量高,孔隙率大。

滑坡区属三江构造区,金沙江结合带,区内地质构造复杂,新构造运动强烈,滑坡位于巴塘—莫西强烈活动断裂带内,地震频繁发生,历史上曾发生30多次中强地震($M_s > 4.0$),如1989年6.7级小巴地震,现代微震活动比较频繁。根据《中国地震动峰值加速度区划图》(2001年,1:400万),本区地震动峰值加速度为0.15g。受区域上NE-SE向构造应力影响,研究区NE向小断层较为发育。

滑坡区属青藏高原亚湿润气候区,干湿季节交替明显,年平均降雨量为470mm,最大年降水量为828.8mm(1998年)。降雨多集中在6~9月份,其中8、9月为全年的集中强降雨期,占全年降雨的58.8%,日最大降雨量151.7mm。滑坡区地下水类型主要为表层松散覆盖层的孔隙水、基岩裂隙水、风化裂隙水。补给来源主要是大气降雨,前缘中部有泉水出露,岩土湿润,植被发育。

3 滑坡发育特征

滑坡体平面上总体呈“圈椅”状(图1),后缘陡

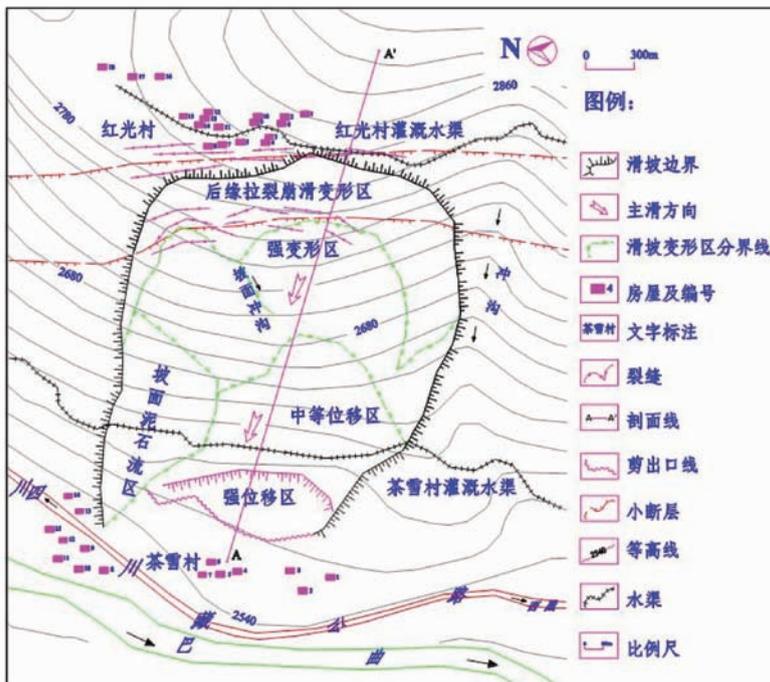


图1 茶树山滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Plan geological sketch of Chashushan landslide

壁明显,壁高 10~30m。滑坡体纵向(南北方向)长 1100~1500m,横向宽 350~800m。前缘高程 2560m,后缘高程 2834m,高差 274m,滑坡纵向平均坡度 32°,前缘和后缘较陡,中部较缓,较滑前降低 2°~5°,滑坡主滑方向 290°,平均厚 30m 左右,体积约 $8.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

滑坡边界明显(图 2、图 3),北西侧临空,坡高 250m 左右,自然坡度 40°~55°,滑坡后缘陡壁有基岩出露;浅表层松散堆积体及风化卸荷岩体在降水作用下,形成坡面泥石流,堆积于斜坡下部川藏公路及农田上,威胁川藏公路行车、行人及茶雪村 28 户村民生命财产安全;东南侧发育一深切冲沟,沟宽 3~6m,沟底出露灰白色大理岩,冲沟延伸 120~140m,两侧沟岸发生小规模崩滑破坏,降雨时沟中有少量水流,冲沟纵坡降 320‰~400‰;滑坡后壁呈 85°近直立的陡坎,有清晰的滑动擦痕,似圈椅

状,断续发育,延伸 80~140m,高 10~15m,滑壁下形成 3~6m 的凹槽,以及反倾台地,坡度 22°~28°,滑坡后缘受牵引作用影响,产生大量的走向与坡面近平行的拉张裂缝,裂缝宽 10~30cm,下错位移 30~100cm,最远的一组牵引拉张裂缝离后缘壁约 150m,破坏红光村的农田、房屋等建筑物,房屋上拉裂缝宽 5~25cm,局部地基发生严重的沉降现象。滑坡体分为三级,每级之间由错落陡坎,拉张裂缝分隔,滑坡体第一级中部岩土体由于受挤压作用,形成鼓丘,以及中下部横穿整个滑坡体的灌溉水渠大部分发生坍塌、拉裂、填塞等变形破坏;前缘为高 15m 左右的陡坎,为滑坡提供了良好的临空条件。滑体物质在后部主要为灰白色大理岩形成的碎裂岩体及块碎石土,在滑坡的前部则以碎石土为主。块石的直径一般 1~3m。碎石土为灰白色碎块石夹粉质黏土,多呈硬塑状态。滑床倾角较陡, 8°~10°,横向往起伏不大。滑带土为棕红色粉质黏土,呈可塑状态。滑带土的厚度一般 2m,滑床地层为 P_1b ,上部滑床表面为强风化,向下渐变为中风化,岩体较破碎,上部呈碎裂岩体。地层产状为 43°∠68°。

4 滑坡成因机制分析

4.1 滑坡形成因素分析

(1) 地层岩性,滑坡后缘为高陡岩质斜坡,主要为较软弱的大理岩、灰岩,绢云母片岩,且岩层中陡倾角反倾坡内,浅表层岩土体裸露,岩体破碎。滑坡前缘上覆巨厚第四系松散物,主要由残坡积、崩坡积组成。这些破碎、松散的崩坡积体黏聚力低,稳定性差,是滑坡形成的内在影响因素。

(2) 地质构造与地震影响,滑坡位于巴塘—莫西活动断裂构造破碎带内,拉玛多结断层西盘,并有两级次一级的断层通过坡体。岩层总体呈单斜产出,产状一般为 128°∠48°,局部次级褶皱发育。受三条断层的影响,基岩节理、裂隙很发育。地震活动较为活跃,地震设防烈度为 VIII 度。

(3) 降雨作用,暴雨或长时间降雨所形成的沟流、坡面流对滑坡直接作用。坡面流顺坡而下,形成面蚀或流入拉张裂缝中,导致裂缝扩大,雨水下渗增加坡体容重,并沿拉张裂缝渗入基岩节理、裂隙和滑动带中,软化滑动带土体,降低其物理力学性质,使其抗滑能力降低,无法支撑斜坡自重产生的下滑力,从而形成滑面,产生滑坡^[3]。

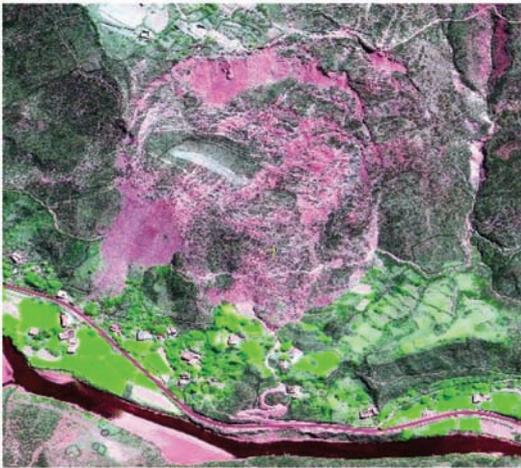


图 2 滑坡遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing image of landslide

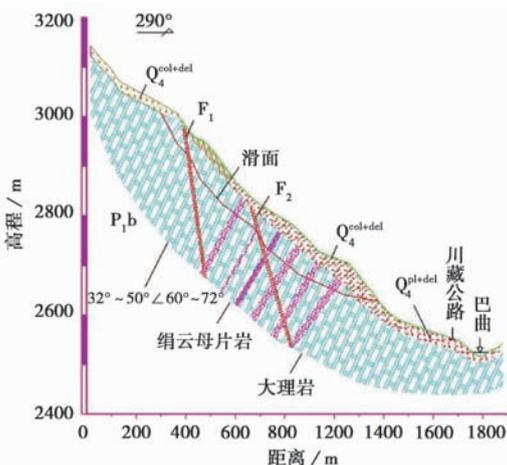


图 3 滑坡工程地质剖面图

Fig. 3 Geological section landslide

(4)人类活动,在滑坡的后缘及滑坡体中部建有灌溉引水渠,由于地区区域构造活动强烈及滑坡的变形破坏水渠,水渠的水下渗入滑体,并且村民继续在滑体中、后部开垦农田,使得坡体的变形进一步加剧。综上所述,该滑坡形成的内在因素是崩坡积体和强风化基岩极差的物理力学性质,外在影响因素按影响大小依次为降雨、地质构造活动和地震、人类工程活动等;降雨是该滑坡最主要的外在诱发因素。

4.2 滑坡形成机制分析

根据前述对滑坡地形地貌、组成物质、稳定性影响因素、变形破坏迹象分析,认为滑坡为倾倒拉裂-蠕滑复合变形破坏机理^[4-5]。滑坡变形破坏机制表现为以下3个阶段:(1)倾倒拉裂初始阶段,由于后部斜坡陡峭,边坡临空条件好,坡体浅表层一定深度范围内出现较为强烈的倾倒拉裂变形带,越靠近临空面这种变形越为明显,对应于边坡的强卸荷松弛区,岩体倾倒后发生了大量的位错、滑移、变位和坠覆,坡体结构呈散体状,并有大量的架空现象,其发育的水平深度为10~30m。边坡的潜在滑动面通常在这个带的顶部出现,并随着变形的发展而逐渐贯通。斜坡表面变形破坏呈现为与坡面走向一致的拉裂缝较为发育,以及断续发育多级的滑坡壁变形破坏现象;(2)推移-剪切蠕滑变形加速阶段,由于后缘变形破坏较为强烈,前缘松散堆积体在强大的自重推力作用下发生变形,形成剪切滑面,以及前缘陡坎较优的临空条件为滑体的变形剪出提供空间,加速变形;(3)最终破坏阶段,随着前缘蠕滑变形的加剧,前缘滑坡锁骨段被剪断后,后缘潜在的倾倒拉裂形成的潜在滑面与前缘松散堆积体体内剪切滑动面贯通,斜坡整体失稳,产生大规模的滑移破坏。

4.3 滑坡机制3DEC数值模拟

在上述分析的基础上,建立3DEC数值计算模型进行应力应变分析^[6-9]。

(1)天然状态下,斜坡后缘一定范围内广泛分布拉张应力,其中以后缘部位的拉张应力为最大,最大拉应力可达近300kPa(图4),这是因为后缘斜坡坡度较陡,内部拉张应力的分布更为靠近临空坡面。正是由于后缘部位广泛拉张应力的存在,使得在降雨、昼夜温差、风化、自重等营力的作用下导致斜坡出现破坏而失稳下坠,这也在很大程度上说明了其下方崩塌堆积体的成因及其物质来源。显然这种拉

应力的存在是由于滑体后缘相对较陡,而前缘的松散堆积体强度又相对低得多,因此在重力作用下整个堆积体存在向下运动的趋势,致使其后缘受拉,前缘受强烈的挤压而产生整体失稳。斜坡以下坡体内部存在最大剪应变集中带。边坡的变形特征与拉应力分布范围具有较好的一致性,拉应力区内存在较大的变形量值。

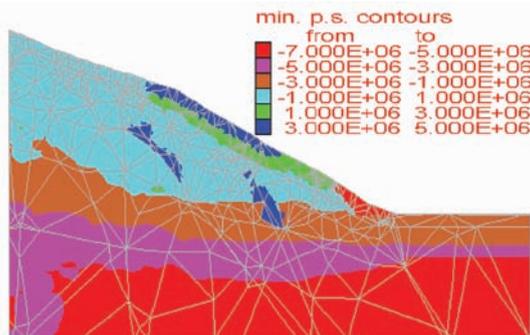


图4 0+480剖面最小主应力分析

Fig. 4 Contours of minimum stress of 0+480(unit: Pa)

(2)滑坡的变形特征表现为:后缘部分竖直方向的变形较水平方向大,水平向坡外的最大位移为50cm(图5),竖直向下的位移最大可达160cm,出现在坡顶部位。中部与前缘受后缘崩滑冲击挤压破坏作用产生加大的水平向坡外的位移变形,最大达到40cm。

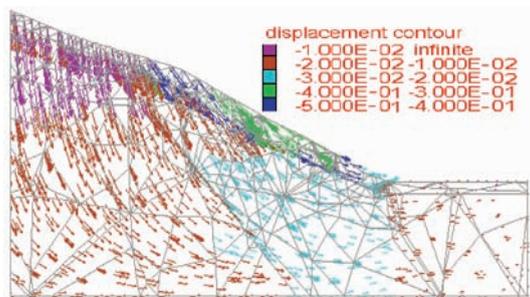


图5 0+480剖面向坡外方向位移分析

Fig. 5 Contours of displacement of 0+480(unit: m)

(3)从滑坡塑性区分布特征来看(图6),由于斜坡后缘拉应力存在,岩土体有向下运动的趋势,因而在其后缘出现一定程度的塑性破坏,但由于在失稳前并未形成连续贯通的塑性区,在各种影响因素作用下将会使得塑性破坏区进一步发展,进而在形成连续贯通的破坏面(带)沿斜坡下部临空面剪出,而产生整体失稳。

综上所述,滑坡的变形机制可以概括为:滑坡后缘浅层及坡顶部位出现大范围拉应力,同时坡脚

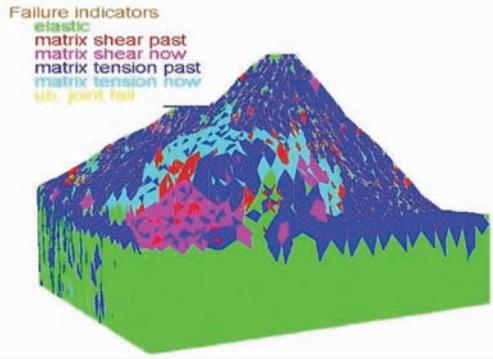


图6 滑坡塑性区分布特征

Fig. 6 The distribution of plastic zone of landslide

部位也出现最大剪应力集中。受拉应力的影响,坡顶部位将首先产生拉张裂隙,在外动力地质作用下,发生大规模的倾倒、崩滑变形破坏;后缘滑坡失稳的过程中产生强大的推力,在最大剪应力控制下,下部斜坡内部产生剪切变形,且不断向下发展,逐渐形成贯通的潜在滑动,滑面一旦与后缘倾倒拉裂缝贯通,滑坡将产生整体失稳。这与定性分析结果吻合。

5 结论及防治建议

(1)滑坡处于地质构造较为复杂,新构造运动较为强烈区域,巴塘—莫西断活动断裂带内,岩体节理裂隙发育,受构造作用的控制,岩体结构破碎,在岩性、地形地貌、水文地质、风化作用等因素影响下,岩土体空间差异大,为滑坡的失稳提供了边界条件。

(2)通过综合分析,滑坡为倾倒拉裂—蠕滑复合变形破坏机理。变形破坏机制表现为:滑坡中上部岩体受滑坡及岩体结构的控制产生倾倒拉裂变形破坏,产生大量的位错、滑移、变位和坠覆,前缘松散堆积体在强大的推力作用下发生变形,形成剪切滑面后缘潜在的倾倒拉裂形成的潜在滑面与前缘松散堆积体内剪切滑动面贯通,斜坡整体失稳,产生大规模的滑移破坏。

(3)该滑坡稳定性较差,进一步变形可能性大,建议对该滑坡建立地质灾害群测群防网络,加强监测预报工作。①迅速搬迁滑坡区域内茶雪村、红光村的村民;②及时修复水渠防止水渠水渗入坡体、停止对滑坡后缘农田的耕种,填埋裂缝;③加强对滑坡的监测,及在川藏公路上设置警示牌。

(4)对同类滑坡研究中,必须加强滑坡的工程地质环境条件的调查,研究其变形破坏机制,进行基于变形破坏机制分析的稳定性评价,建立行之有效的

防灾减灾方案。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 292~297.
Huang Runqiu. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution. *advances in earth science*. 2005, **20**(3): 292~297.
- [2] 中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会, 中国地质学会工程地质专业委员会编. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Rock Engineering Committee on the ground, China Professional Committee of the Geological Society of Engineering Geology compiled. *Typical slip in China*, Beijing, Science Press, 1988.
- [3] 巨能攀, 黄润秋, 涂国祥. 含水砂层对堆积体稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(4): 476~480.
Ju Nengpan, Huang Runqiu, Tu Guoxiang. FEM analysis of the effect of saturated sand seams on stability of accumulations along upper Min jiang River. *Journal of Engineering Geology*, 2006, **14**(04): 476~480.
- [4] 张倬元, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. *Analysis theory of engineering geology*. Beijing: Geology Press, 1994.
- [5] 黄润秋, 唐世强, 邓辉, 邹正明. 皖南某高速公路四号边坡变形机理及稳定性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版). 2006 **33**(6): 551~556.
Huang Runqiu, et al. Characteristics and mechanism of 4th slope deformation on one expressway in the south of Anhui, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, **33**(6): 551~556.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide[R], 2003.
- [7] Chen Z, Wang X, Haberfield C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods[J]. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, (38): 369~378.
- [8] 白永健, 黄润秋, 巨能攀, 等. 高陡岩质边坡稳定性三维离散元分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(5): 592~597.
Bai Yongjian, Huang Runqiu, Ju Nengpan, et al. 3 dec stability analysis of high and steep rock slope, *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(5): 592~597.
- [9] 肖学沛, 李天斌, 张志龙. 三峡水库区严家坡滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, **16**(1): 39~43.
Xiao Xuepei, Li Tianbin, Zhang Zhilong. Causes analysis and the stability assessment of Yanjiapo Landslide in the Three Gorges Reservoir area. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, **16**(1): 39~43.