

# 甘孜州色达县典型牵引式滑坡地质灾害形成机理分析

——以甘孜州甲学乡甲热滑坡为例

罗雲丰, 魏良帅

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

**摘要:**甲热滑坡位于甘孜州色达县甲学乡境内,属于典型的牵引式滑坡,滑坡体平均坡度约 35°,主要由碎石土组成,滑坡长约 195 m,宽约 280 m,平均厚约 15 m,滑坡体总方量约 60 万 m<sup>3</sup>,属中型滑坡。滑坡坡体中上部变形现象较明显,若发生滑动,将直接威胁当地 41 户 160 人居民的生命财产安全。本文在进行野外现场基础地质调查后,对滑坡体的变形破坏机制进行了定性分析,并利用三位有限元数值模拟进行了定量分析,对以后研究同类滑坡的稳定性具有重要意义。

**关键词:**牵引式滑坡;变形破坏机制;数值模拟;甲热滑坡

**中图分类号:**P642 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0093-05

**Analysis on Formation Mechanism of Geological Hazards of Typical Traction Landslide in Seda County of Ganzi Prefecture: An Example from the Jiare Landslide/LUO Yun-feng, WEI Liang-shuai** (Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Jiare landslide is located in Jiaxue Township of Seda County in Ganzi Prefecture and it is a typical traction landslide with average slope of the landslide body about 35°, it is mainly composed of gravel soil. The landslide is about 195m in length, 280m in width and 15m in average thickness. The total mass of the landslide body is about 600,000m<sup>3</sup>, which is a medium-sized landslide. At present, the deformation of the upper and middle parts of the landslide mass is obvious. Once the landslide occurs, it will directly threaten the safety of the life and property of 160 people in 41 local families. Based on the field geological survey, this paper makes a qualitative analysis on the deformation and failure mechanism of the landslide body and makes a quantitative analysis by using 3-dimensional finite element numerical simulation, which is of great significance for the study on the stability of the same kind of landslide.

**Key words:** traction landslide; deformation and failure mechanism; numerical simulation; Jiare landslide

## 0 引言

牵引式滑坡往往是滑坡前缘由于侵蚀或人工削坡,造成坡面变陡以致失稳,在后缘引起裂缝,随着变形的发展,后缘以后的斜坡体也产生变形失稳,出现新的滑动,从而导致滑坡体向后向上发展,最终形成一个面积较大且相对稳定的坡面<sup>[1-3]</sup>。牵引式滑坡一般发生在断裂带、堆积层、风化带及岩土体的软弱夹层所组成的斜坡地带,自下而上发展,规模不断扩大。影响牵引式滑坡的主要因素有地层岩性、地貌特征、气象与水文条件以及人类工程活动等<sup>[4]</sup>。

张俊瑞<sup>[5]</sup>以一典型的牵引式滑坡为例,在对其地质环境特征进行详细调查后,分析了其出现滑动的原因及影响因素;宋东日等<sup>[6]</sup>认为牵引式滑坡一般有着独特的工程与坡体的位置组合关系、地层条件、空

间和时间特征,这 4 个因素对牵引式滑坡的早期识别和规模预测可以起到很好的指示性作用;周跃峰等<sup>[7]</sup>通过离心模型试验与应力路径试验相结合的手段,分析了地下水位抬升条件下牵引式滑坡的变形破坏过程;丁秀丽等<sup>[8]</sup>、唐晓松等<sup>[9]</sup>采用数值模拟手段研究了库水位变化对库岸边坡稳定性的影响。

甲热滑坡位于四川省甘孜藏族自治州色达县甲学乡,地理坐标 31°54′45.3″N,100°50′11.6″E。甲热滑坡位于色达县甲学乡二加其村,地处色曲河左岸构造侵蚀高山区,位于角科沟左岸,地形相对高差大,前缘切割强烈。滑坡前缘高程 3395 m,后缘高程 3490 m,相对高差 95 m,平均坡度约 35°。滑坡体主要由碎石土组成,碎石含量约 38%。滑坡长约 195 m,宽约 280 m,平均厚约 15 m,滑坡体总方量

收稿日期:2018-07-01

作者简介:罗雲丰,男,汉族,1989 年生,硕士,从事水文地质、工程地质、环境地质专业研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,173595939@qq.com。

约 60 万  $m^3$ , 属中型滑坡。滑坡总体呈圈椅状, 主滑方向  $240^\circ$ 。坡体左侧局部基岩出露, 岩性为三叠系上统侏罗组变质砂岩、板岩互层。

## 1 滑坡工程地质条件

甲热滑坡位于甘孜州色达县甲学乡, 色达县境

地处巴颜喀拉山的南麓, 主要山脉河流呈北北西—南南东方向展布, 西南部的牟尼芒起山为主体山脉, 自北北西向南南东绵展布, 是泥曲与色曲的分水岭, 研究区属于县域东南部扬各—色尔坝—歌乐沱一线以北与壤塘县交界地区, 属构造侵蚀高山地貌, 滑坡工程地质平面图见图 1。



图 1 甲热滑坡工程地质平面图

滑坡体附近出露的地层情况比较单一, 主要为第四系松散堆积层(Q)及中生界三叠系上统侏罗组( $T_3zh$ )地层, 甲热滑坡基岩岩性主要为灰白色薄—中层状石英砂岩与绢云母板岩互层, 岩层产状约  $210^\circ \angle 70^\circ$ , 滑坡工程地质剖面图见图 2。

色达县境内的大地构造属昆仑—秦岭地槽褶皱区, 松潘—甘孜地槽褶皱系, 甘孜—雅江冒地槽褶皱带的东北部。褶皱和段层较发育, 主要构造线呈北西—南东方向延展, 甲热滑坡研究区构造单一, 未见明显断裂通过。

甲热滑坡中部为二加其村农户聚集点, 见图 3, 一旦发生滑动, 将直接威胁 41 户 160 人的生命财产安全。此外, 由于滑坡所处的角科沟, 沟道狭窄, 呈 V 字形, 常年流水, 一旦发生局部或整体滑动, 将堵塞沟道, 形成堰塞湖, 溃坝后影响沟下游农户的生命财产安全及国道 G317 线的畅通。

## 2 滑坡基本特征及成因机制

### 2.1 滑坡基本特征

甲热滑坡区属构造剥蚀高山斜坡地形, 滑坡平面上呈圈椅状, 剖面呈折线形, 呈上陡, 中间缓, 下陡形态地形坡度  $33^\circ \sim 42^\circ$ 。

滑体呈舌状, 前缘厚, 后缘较薄。滑坡前缘高程 3395 m, 后缘高程 3490 m, 相对高差 95 m, 平均坡度约  $35^\circ$ , 主滑方向  $240^\circ$ , 见图 4。滑坡斜长约 195 m, 宽 200~280 m, 平均厚约 15 m, 滑坡体总方量约  $60 \times 10^4 m^3$ , 属中型土质滑坡。滑坡体主要由碎石土组成, 碎石含量约 38%。

该滑坡的边界特征较明显, 后缘为居民区后部陡缓交接处, 前缘至角科沟, 左侧以基岩为界, 基岩区域未发生明显变形, 右侧以地形小山梁转向处为界。

### 2.2 滑坡变形特征

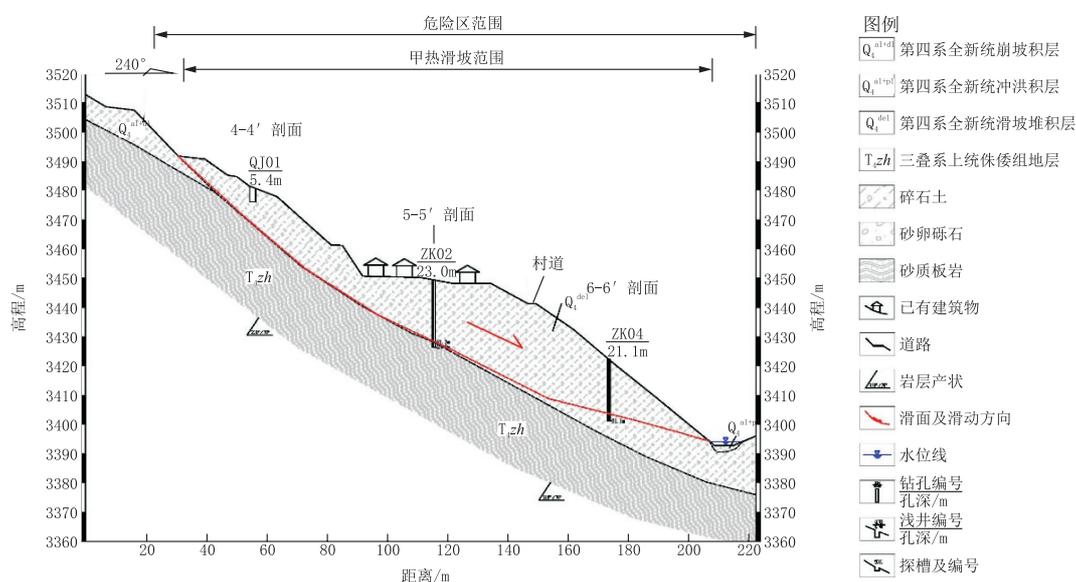


图 2 甲热滑坡典型工程地质剖面图



图 3 甲热滑坡全貌



图 4 甲热滑坡前缘边界

根据调查,受斜坡“陡坡—平台—陡坡”地形控制,变形迹象可分为中前部强变形区、后缘弱变形区。

中前部强变形区,主要表现在滑坡前缘的第一级台地底部,强变形区的纵长约有 120 m,宽达 200 m,面积共约 24000 m<sup>2</sup>,潜在滑体平均厚度约为 15 m。目前,滑坡中前部产生明显的变形破坏现象,坡体产生大量裂缝,其中长大裂缝发育 4 条,其基本特征见表 1。

表 1 滑坡体裂缝分布特征

序号	特征	性质	位置
L1	走向约 124°,延伸长度 21.42 m,裂缝宽约 5 cm,可见深度约 8~10 cm	拉张裂缝	滑坡中部
L2	走向约 158°,延伸长度 24.2 m,裂缝宽约 8 cm,可见深度约 15 cm	拉张裂缝	滑坡中部
L3	走向约 136°,延伸长度 21 m,裂缝宽约 10 cm,可见深度约 20 cm	拉张裂缝	滑坡前部
L4	走向约 83°,延伸长度 34.6 m,裂缝宽约 10 cm,可见深度约 8~10 cm	拉张裂缝	滑坡前部

滑坡后部弱变形区,主要分布在后缘居民区的局部耕地,纵长 80 m,宽约 150 m,面积约 12000 m<sup>2</sup>,潜在滑体平均厚度约 10 m。弱变形区后缘局部产生小规模溜滑破坏,地面上出现多条延伸 0.3~1.2 m 拉裂缝、断续发育,张开无充填,雨水极易渗入。

### 2.3 滑坡变形破坏机制

组成甲热滑坡的斜坡主体是下伏基岩地层,岩石地层的出现与地质构造等关系极大,而在自然条件下,斜坡自身重力作用的结果使其结构一般处于相对平衡状态,如果外部的动力条件发生改变,将打破其平衡空间,新的平衡状态急需建立。甲热滑坡受暴雨的浸润作用,斜坡岩土体及堆积物的平衡状态被打破,在斜坡土体沿崩坡积与基岩接触部位首先发生变形,产生局部的横向拉裂缝,下部斜坡体进一步发生位移,牵引上部斜坡体继续产生变形,最后沿基覆界面形成贯通的滑动带,发生滑坡。总体上该滑坡为牵引式滑坡。

### 3 甲热滑坡稳定性三维数值模拟研究

#### 3.1 模型的构建及计算参数的选取

##### 3.1.1 模型的构建

模型为三维地质模型, X 轴长 302 m, Y 轴长 224 m, 模型左右范围为滑坡左右两侧边界, 前后范围为滑坡底部及后缘部分; Z 轴向上从高程 3380~3530 m。

该模型在两边的 X 方向和前后的 Y 方向上施加了水平方向约束, 在底面 Z 方向上施加了垂直方向的约束, 地表面自由。基于上述原则建立了甲热滑坡 FLAC3D 三维数值模拟计算模型(见图 5)。

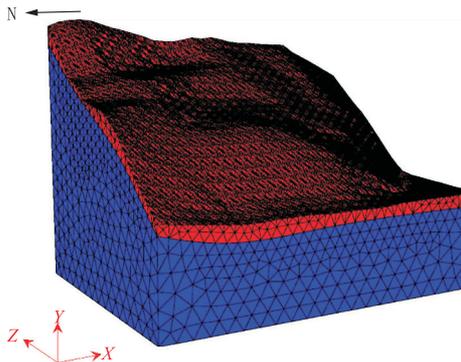


图 5 甲热滑坡 FLAC3D 计算模型

##### 3.1.2 参数的选取(参见表 2)

表 2 甲热滑坡岩土体参数取值

地层	压缩模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
变质石英砂岩夹板岩	3.40	0.27	2630	0.88	33	0.42
碎石土	2.55	0.28	2100	0.80	19	0.38

#### 3.2 计算结果分析

##### 3.2.1 应力场分析

在天然工况下, 模型计算收敛后, 边坡最大主应力的分布较为均匀, 主要受重力场控制。最大应力大小与地层埋深成正比, 局部岩性应力较低。没有产生拉应力的现象, 甲热滑坡的坡脚, 部分由于公路施工开挖, 形成了较陡的斜坡, 应力相对较为集中, 见图 6。

最小主应力的分布特征跟不同埋深的岩体重力场投影在水平方向上的分力有直接关系, 另外甲热滑坡表面坡体碎块石分布范围较广, 特别是滑坡体中上部分(见图 7 红色部分), 坡表在水平方向上有拉应力出现。拉应力的出现也直接导致滑坡体在暴雨工况下可能会产生沿坡体横向上的拉裂缝。

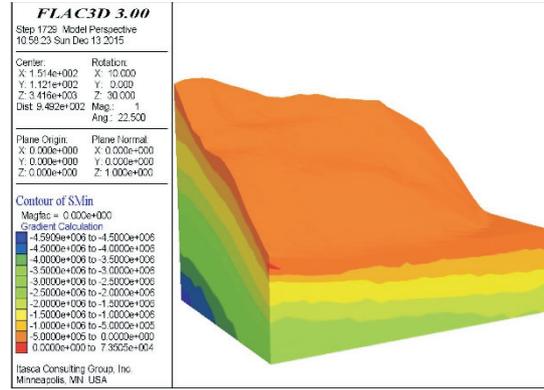


图 6 最大主应力分布特征

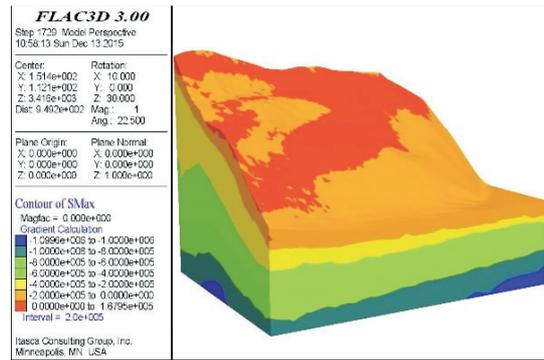


图 7 最小主应力分布特征

图 8 为滑坡在天然状态下的主应力矢量图, 可以看出滑坡体内部以压应力为主(图中蓝色部分), 矢量方向主要表现为竖直向下; 拉应力主要分布在滑坡表面部分区域(图中红色部分), 矢量方向主要表现为沿斜坡平行向下。

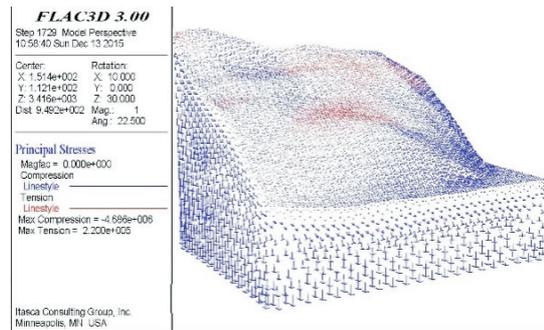


图 8 主应力矢量图

##### 3.2.2 天然状态下滑坡变形特性分析

图 9、10 分别表示的天然状态下滑坡总位移及 X=100 m 处剖面上总位移云图。从总位移云图可看出, 变形主要集中在滑坡南侧顶部以及中部地形突起的部位, 从地表向坡内, 变形的数值逐步递减, 坡体北东向顶部位移最大, 为 19.7 cm, 中部突出部

分变形量值达 18 cm。

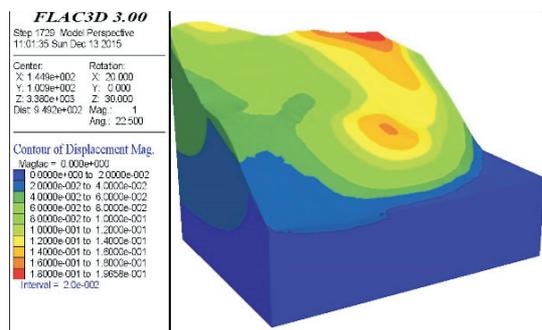


图 9 天然状态下滑坡总位移图

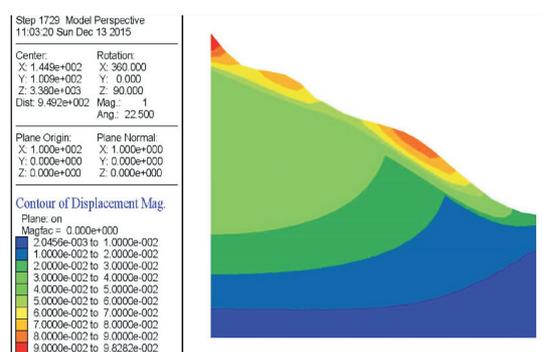


图 10 天然状态下滑坡  $X=100$  m 处剖面总位移图

通过数值模拟计算,滑坡首先发生变形的地方为斜坡土体沿崩坡积与基岩接触部位。而由于地形缘故,在滑坡南侧中上部突起部位,变形有所集中,随着变形的不断发展,受中上部变形牵引,后缘斜坡体也产生了局部形变,从而导致变形继续向上发展,最终形成一个面积较大且相对稳定的滑移面,滑坡发生,这也符合之前滑坡的变形破坏机制分析结果。

#### 4 结论

(1)甲热滑坡位于甘孜州色达县甲学乡,属构造侵蚀高山地貌。甲热滑坡属于牵引式滑坡。

(2)滑坡主要出露地层为第四系松散堆积层(Q)及中生界三叠系上统侏罗组( $T_3zh$ )地层,甲热滑坡基岩岩性主要为灰白色薄—中层状石英砂岩与绢云母板岩互层,岩层产状约  $210^\circ \angle 70^\circ$ 。

(3)甲热滑坡受暴雨的浸润作用,斜坡岩土体及堆积物的平衡状态被打破,在斜坡斜坡土体沿崩坡积与基岩接触部位首先发生变形,产生局部的横向拉裂缝,下部斜坡体进一步发生位移,牵引上部斜坡体继续产生变形,最后沿基覆界面形成贯通的滑动带,发生滑坡。

(4)数值模拟结果表明滑坡首先发生变形的地

方为斜坡土体沿崩坡积与基岩接触的斜坡中部,随着变形的发展,在滑坡南侧中上部突起部位,变形有所集中,随着变形的不断发展,受中上部变形牵引,后缘斜坡体也产生了局部的形变,从而导致变形继续向上发展,最终形成一个面积较大且相对稳定的滑移面,滑坡发生,这也符合之前滑坡的变形破坏机制分析结果。

#### 参考文献:

- [1] 郑静,覃木庆.某高速公路—顺层岩质滑坡的形成及治理[J].路基工程,2005,(5):92—96.
- [2] 刘国民,彭立,黄向东,等.长沙国道绕城公路K42+800滑坡病害分析与整治对策研究[J].中南公路工程,2005,30(2):126—129.
- [3] 白榕.三峡库区丰都名山滑坡稳定分析与防治[J].兰州铁道学院学报(自然科学版),2002,21(4):26—30.
- [4] 袁从华,童志怡,卢海峰.牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J].岩土力学,2008,(10):2853—2858.
- [5] 张俊瑞.某典型牵引式滑坡形成机制分析及稳定性评价[J].土工基础,2010,24(2):45—48,52.
- [6] 宋东日,任伟中,沈波,等.牵引式滑坡的破坏机制及其加固措施探讨——以某高速公路牵引式滑坡为例[J].岩土力学,2013,34(12):3587—3593.
- [7] 周跃峰,龚壁卫,胡波,等.牵引式滑坡演化模式研究[J].岩土工程学报,2014,36(10):1855—1862.
- [8] 丁秀丽,付敬,张奇华.三峡水库水位涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,(17):2913—2919.
- [9] 唐晓松,郑颖人,唐辉明,等.水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究[J].岩土工程学报,2013,35(5):940—947.
- [10] 张明,胡瑞林,殷跃平,等.川东缓倾层中降雨诱发型滑坡机制研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3783—3790.
- [11] 周自梁,涂晓芳,刘海生.滑坡机制与稳定性影响因素分析评价[J].建筑技术开发,2013,40(4):28—30.
- [12] 孙萍,汪发武,殷跃平,等.汶川地震高速远程滑坡机制实验研究[J].地震地质,2010,32(1):98—106.
- [13] 肖诗荣,刘德富,姜福兴,等.三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):1023—1030.
- [14] 卞世俊.降雨诱发滑坡机制研究及防治措施[J].西部探矿工程,2010,22(5):3—5.
- [15] 梁专明,龚道民,贺友锋,等.软质岩顺层边坡非典型溃屈型滑坡机制初探[J].自然灾害学报,2010,19(6):31—39.
- [16] 瞿生军,赵建军,丁秀美,等.降雨诱发缓倾层滑坡机制离散元模拟[J].水文地质工程地质,2016,43(6):120—126.
- [17] 刘雄.新滩大滑坡机制探讨[J].岩土力学,1986,(2):53—60.
- [18] 苏伯苓.酒勒山滑坡机制研究[J].河北地质学院学报,1986,(S1):327—346.
- [19] 张红日,王桂尧,兰素恋,等.坡顶建筑与顺层软岩共同作用的滑坡机制及抢险处治研究[J].中外公路,2018,38(2):25—30.
- [20] 杨志洲.宝鸡黄土梁地区不稳定边坡的滑坡机制及预警[D].陕西西安:长安大学,2017.
- [21] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,(3):433—454.