

# 天台乡滑坡特征及稳定性的 FLAC<sup>3D</sup> 分析

孙书勤, 黄润秋, 丁秀美

(成都理工大学地质灾害防治国家专业实验室, 成都 610059)

**摘要:**四川宣汉县天台乡滑坡为一大型顺层滑坡。文章阐明了滑坡发育的地质环境条件及基本特征。为了评价预测滑坡体在暴雨、前缘河道疏浚开挖影响下变形的发展趋势和稳定程度, 采取了 FLAC - 3D 方法对滑坡体的变形状况进行三维数值模拟分析。结果表明, 天然状态下坡体整体上是稳定的, 仅前缘可能会发生局部失稳; 暴雨条件下坡体发生整体失稳的可能性不大, 但局部范围将极有可能发生坍塌进而发生牵引式滑坡。

**关键词:**顺层滑坡; 堰塞湖; 三维数值模拟; 滑坡稳定性; 四川宣汉县

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)05-0030-03

## Tiantai Landslide and Its Stability Analysis With FLAC<sup>3D</sup>

SUN Shu-qin, HUANG Run-qiu, DING Xiu-mei

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The basic characteristic of Tiantai landslide in Xuanhan county, Sichuan province is described based on engineering geological survey carried out after landsliding. In order to get a better understanding to the deformation trend and stability state of the landslide debris under extraordinary rainstorm, FLAC<sup>3D</sup> is used to make a numerical simulation. The results show that the landslide is stable in natural state as a whole, but there appears some small-scale failure at the rear part of the landslide. Under the condition of rainstorm, the whole landslide is stable also, but in the front part of the debris, some local collapse and retrogressive sliding will occur.

**Key words:** Tiantai landslide; retrogressive sliding; FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation; stabilization of landslide; Xuanhan county

### 1 前言

天台滑坡位于四川省宣汉县天台乡义和村, 处在渠江支流前河的右岸, 南距天台乡 0.4~2.3 km。2004 年 9 月 5 日, 宣汉县连降暴雨, 导致该滑坡滑动, 由于滑坡体上部住户及时搬迁, 未造成该地住户的任何人员伤亡。但滑坡推移体堵塞河道, 淹没了上游五宝镇, 造成巨大财产损失, 上万群众受灾。

根据监测资料表明, 若不采取积极的治理措施, 不排除在一定的强降雨条件或其他因素的诱发下, 该滑坡产生局部或整体复活的可能性。其原因是: 滑坡前缘表层松散堆积体不稳定, 处于蠕滑阶段; 剪出口位置仍高于堆积抬高后的前河河道, 且滑带已完全贯通; 滑坡解体较完全, 滑体上有大量横张裂缝, 成为地表水入渗通道; 滑体后缘由于滑动产生了多个反向台阶, 形成汇水洼地; 滑坡体上的纵向冲沟阻塞雍水, 滑体内地表水排泄不畅, 今后再次遭遇一定的强降雨, 地表水很容易渗入滑体极易饱水。

本文为了进一步证明上述宏观判断, 在前人依据极限平衡理论<sup>[2]</sup>对稳定性进行评价预测的基础上, 进一步采用 FLAC - 3D 对滑坡体在暴雨条件下的变形趋势进行了数值模拟研究。

### 2 滑坡区地质条件及滑坡特征

滑坡区属中等切割的构造剥蚀中山区, 山顶的绝对高程 1 100 m 左右, 前河河谷高程为 356 m, 宽度 80~100 m, 地形相对高差 800 m。山体由侏罗系中统遂宁组 and 蓬莱镇组砂、泥岩构成。砂岩形成陡壁, 泥岩形成缓坡。构成台阶状斜坡地形。

滑坡区位于轴线方向 NE30 的五宝场背斜东翼和平楼山向斜之间, 两翼产状对称, 倾角约在 10°。区内基岩的构造节理和风化裂隙发育, 主要有两组, 一组倾向 40°, 另一组倾向 110°, 裂隙较为平直, 倾角较陡, 为 70~80°。岩石多切割成块体, 斜坡的完整性较差。

滑坡区基岩为侏罗系中统遂宁组 (J2sn) 的紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主, 夹数层灰色细粒石英砂岩。粉砂质泥岩及泥质粉砂岩岩质软弱、易风化, 是构成滑坡体的主要物质, 细粒石英砂岩岩质坚硬, 抗风化能力强, 是构成滑床的主要岩层。岩层总体产状 110~120° 5~10°, 走向与坡向总体平行, 属顺层滑坡。

滑坡区由南向北发育余家河沟、麻柳树沟、凉水井沟、大河沟等 4 条较大的天然冲沟 (图 1), 是滑坡区地表主要天然排水沟, 沟道纵比降 153‰~197‰。余家河沟、麻柳树沟、凉水井沟与大河沟的南侧支沟呈“多沟同源”状发育, 在滑坡

\* 收稿日期: 2005-12-26

基金项目: 四川省国土资源厅, 川国土资函[2004]1167 号文

作者简介: 孙书勤 (1961 - ), 女, 工程地质专业, 成都理工大学环境与土木工程学院副研究员, 在职博士研究生。

体后部分水岭(中大坪)汇聚。

滑坡体平面上总体呈“圈椅”状,滑坡后壁一般高度 2.0~5.7 m,局部可达 10~25 m。滑坡体纵向(EW 向)长 950~1 200 m,横向(SN 向)宽 1 400~1 600 m。滑坡主滑方向 97°~107°。滑体厚度 7~49.28 m,体积 2 500 万 m<sup>3</sup>(图 1)。

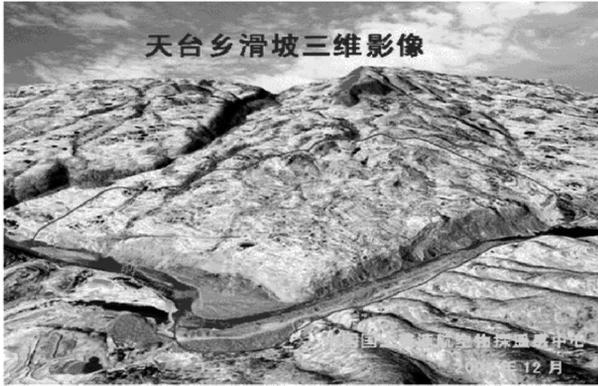


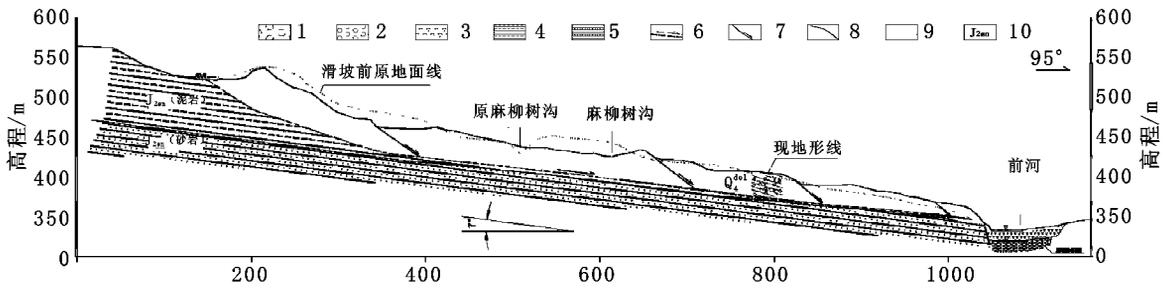
图 1 天台乡滑坡三维影像图(据刘心季)

滑坡区地面自西向东倾斜,滑动前地形一般坡度为 6~20°。地形陡缓相间,形成缓坡台阶。在地形低缓处或冲沟

中常有水塘分布。横向冲沟发育,冲沟间距 30~50 m,冲沟在中部有较大转折,有时甚至突然转向,两侧的主要冲沟具有双沟同源的特征。

滑坡发生后地形变得更加复杂,滑动块体所构成的地面支离破碎,滑壁、裂缝比比皆是。总体上地形坡度比滑动前减缓,为 12~15°,但局部地形起伏增大。滑坡体由于滑移速度快,位移量大(50~140 m),造成滑坡体解体严重,形成众多错落有致的滑块。滑坡体上地表变形严重,地面上分布大量的张裂缝,其贯通长度 30~70 m,可见深度达 2 m,宽度 0.20~1.2 m。滑体后部主要为侏罗系中统遂宁组(J2sn)紫红色泥岩形成的碎裂岩体及块碎石土夹粉质黏土,前部则以粉质黏土为主。滑带土为棕红色粉质黏土,呈可塑~软塑状态,甚至呈流塑状态。滑带土的厚度一般 20~30 cm。

概括起来天台乡滑坡具有如下特征<sup>[3]</sup>:(1)滑面倾角缓,只有 7~10°;(2)厚度不大,两侧 10~20 m,中部 20~30 m;(3)分块特征很明显;(4)变形和破裂过程(“前奏”)较长(9月 5 日 15~23 时),但下滑时间很短;(5)滑后原始地形坡度变化不大;(6)运动方式特殊,虽然总体方向具有一致性,但各块的速度、方向差异性较别的滑坡更为明显<sup>[4]</sup>; (7)具有波浪式推进的特征<sup>[5]</sup>(图 2)。



1. 粉质黏土夹碎块石;2. 碎块石土;3. 滑坡河道堆积碎块石土;4. 泥岩;5. 砂岩;  
6. 主滑动面及滑动方向;7. 次级滑动面及滑动方向;8. 现地形线;9. 原始地形线;10. 侏罗系遂宁组

图 2 宣汉县天台乡滑坡工程地质剖面图

### 3 滑坡变形及稳定性的 FLAC<sup>3D</sup>分析

滑坡后形成的堆积体变形及稳定性是一个复杂的空间问题。其影响因素除滑坡体本身结构条件(如岩性结构、滑面形态等)以外,还与进行中的疏浚工程、滑坡体平面及空间分布形态有关<sup>[6]</sup>。为更深入认识滑体变形破坏机理,进一步评价和预测在不同工况下的变形及稳定性特征和规律,采用 FLAC-3D 方法对滑坡体的变形模式进行三维数值模拟。该方法可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至有限大变形,尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独到的优点。

#### 3.1 模型的建立

计算模型如图 3 所示,模型顺河方向长 1 560 m,宽 1 780 m,模型底板高程取至 320 m;侧缘及底面边界均采用单向约束边界;采用较常用的弹塑性模型,屈服准则为莫尔-库仑准则,岩土物理学参数根据试验值选取。根据滑坡体特征及计算方案考虑,建立 FLAC-3D 计算模型(图 3~4),并进行离散化,共划分出 99 397 个单元,124 582 个节点。

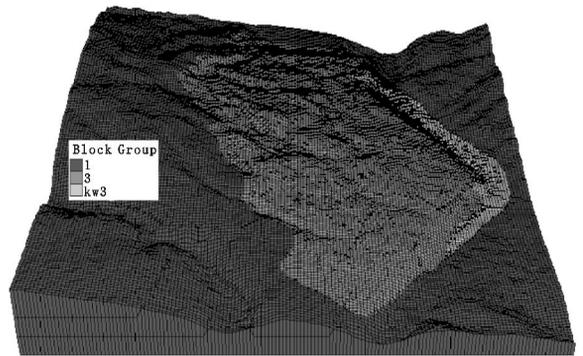
为真实反映滑坡形成过程和形成后的应力调整过程,本次计算主要考虑天然工况、1/2 饱水工况。

#### 3.2 天然状态下变形及稳定性分析

(1)图 4、5 的计算结果表明,总体上,滑坡体北侧位移较大,且位移高值区主要集中在两个部位: NW 和 NWW 部

位的滑坡后缘,且以重力作用下的压缩变形为主,表现为竖向位移分量较大,最大值约 22 cm。

(2)向坡外方向(x 方向)位移分布规律与总位移分布规律大体一致,位移主要集中在坡体的 NNW 区域,最大值约 8.4 cm。竖直方向的位移则主要分布在滑坡中后部。



1—基岩,2—滑带,3—滑坡体,kw<sup>3</sup>—开挖单元

图 3 计算模型

(3)从剖面上看,变形主要集中在 30 m 深度以内。NWW-SSE 剖面上位移模式上可分两种:后缘及前缘堆积区,位移以向坡外方向位移为主,最大位移 12.7 cm,坡体中部、中后部以竖向位移为主,最大位移 10 cm。而 NW-SE 剖面上则以竖向位移为主(最大位移 7.6 cm),仅前缘堆积

区位移表现为与原地形近乎平行。

(4) 从各监测点位移跟踪曲线看, 滑坡发生后, 位移迅速增大, 但随着迭代的进行位移增长速率逐渐减小, 但最终均

趋于稳定状态, 其中, J1、J2、J5、J7、J9 等跟踪点的位移稳值分别约为 7.2 cm、1.6 cm、0.3 cm、5.4 cm、8.5 cm(图 6), 该位移变化趋势和结果与目前位移监测结果大体一致。

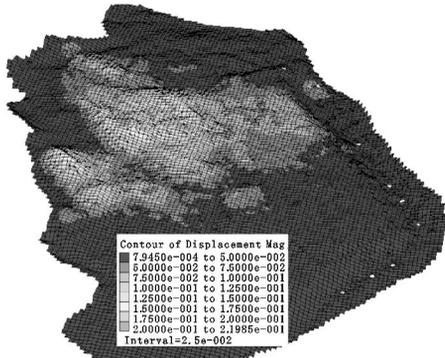


图 4 总位移等值线图(天然状态下)

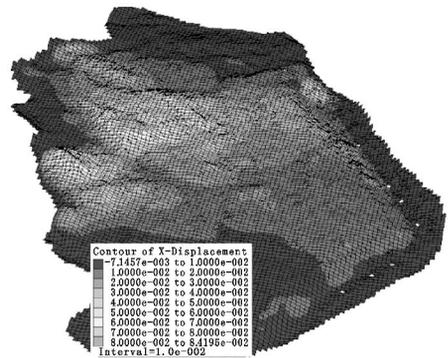


图 5 X 方向位移等值线图(天然状态下)

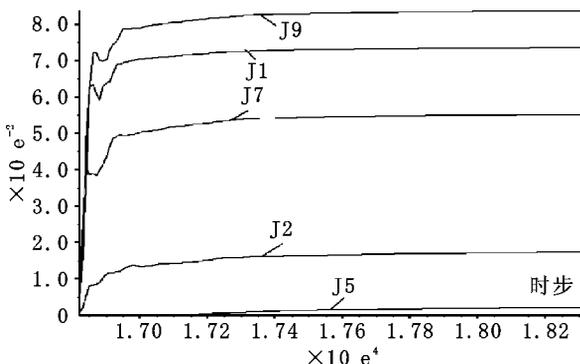


图 6 各监测点位移跟踪曲线

进一步, 我们从图 6 中可看出, 初期, 变形方式变化较大(总位移曲线呈波动性变化), 而后位移逐渐增大, 最终趋于稳定。说明天然状态下, 坡体的变形呈驱于稳定的变化趋势。结合前述位移模式可以得出, 天然状态下, 坡体整体上应该是稳定的, 仅前缘可能会发生局部的失稳。

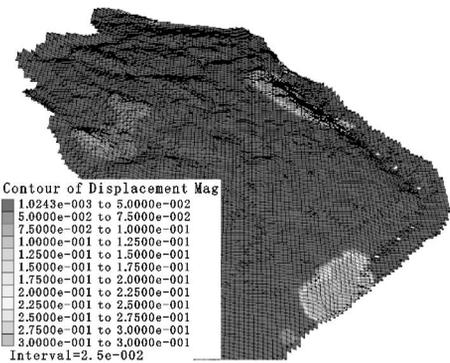


图 7 总位移等值线图(1/2 饱水)

### 3.3 滑体 1/2 饱水工况下变形及稳定性分析

据勘查期间钻孔揭露地下水情况预测坡体在雨季基本

上处于 1/2 饱水状态。该工况下, 迭代 1 000 步后局部位移已达到几十米, 说明局部范围内已经发生了破坏。图 7 的总体位移计算结果表明: 位移较大的区域主要分布在余家沟沟口、NE 方向的滑坡前缘堆积区以及 SE 向的滑坡前缘, 且主要表现向坡外的位移。而顺河向的位移相对较小, 北侧表现为向南的位移(颜色变化在南部明显), 南侧则表现为向北的位移(颜色变化在北部明显)。综合分析可以看出, 上述三个位移较大的区域的位移以向坡外的位移为主。位移速率大于 10 cm/d 的区域也主要分布于上述三个区域。

综合上述分析, 1/2 饱水条件下, 坡体的最危险范围主要分布在余家沟沟口、NE 向的滑坡前缘堆积区以及 SE 向的滑坡前缘<sup>[7]</sup>。暴雨条件下坡体发生整体失稳的可能性不大, 但上述危险范围将极有可能发生局部坍塌进而发生牵引式滑坡。

## 4 结 论

综上所述, 可以得到以下主要结论:

- (1) 天台乡滑坡属特大型顺层基岩滑坡, 是在特大暴雨的诱发下发生的自然灾害。
- (2) 滑坡平面形态总体上呈“圈椅”状。空间上呈向坡外倾斜的“平板”状, 剖面上呈后陡前缓的折线形, 主滑方向 SEE。滑体平均厚度 23 m, 总体积  $2\ 500 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 其中河道中堆积物约  $210 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
- (3) Face - 3D 分析结果表明, 天然状态下北侧位移较大, 且位移高值区主要集中在两个部位: NW 和 NWW 滑坡后缘, 且以重力作用下的压缩变形为主, 表现为竖向位移分量较大。
- (4) 天然状态下, 坡体整体稳定, 仅前缘可能会发生局部失稳。
- (5) 1/2 饱水条件下, 坡体的最危险范围主要分布在余家沟沟口、NE 向的滑坡前缘堆积区以及 SE 向的滑坡前缘。暴雨条件下坡体发生整体失稳的可能性不大, 但上述危险范围将极有可能发生局部坍塌进而发生牵引式滑坡。

### 参考文献:

[1] 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, 1981.

[2] 刘传正. 论滑坡稳定性评价的几个关键问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 55 - 59.

[3] 黄润秋, 赵松江, 宋肖冰. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 13 - 15.

[4] 刘传正. 论地质灾害工程的地质观与工程观[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 368 - 374.

[5] 刘传正, 等. 地质灾害勘察指南[M]. 北京: 地质出版社, 2000. 17 - 120.

[6] (苏) . . . 叶米里扬诺娃. 滑坡作用的基本规律[M]. 重庆出版社, 1986.

[7] 滑坡文集编委会. 滑坡文集第九集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.