

四川省宣汉县天台乡特大型滑坡分析

乔建平¹, 吴彩燕^{1,2}, 李秀珍¹, 樊晓^{1,2}, 何思明¹, 田宏岭^{1,2}, 徐创禄³

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 西藏自治区国土资源厅, 西藏 拉萨 850001)

摘 要: 2004-09-05 四川省宣汉县天台乡发生一处特大型暴雨滑坡。滑坡体体积约 $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 造成严重灾害, 堵河形成堰塞湖, 使上游集镇被淹没。对滑坡特征、形成机理及发展趋势进行了分析, 提出了防治措施。

关键词: 宣汉县; 暴雨; 特大型滑坡

中图分类号: P964.22

文献标识码: A

宣汉县位于大巴山南麓, 四川盆地东部边缘, 全县平均海拔 780 m, 其中丘陵占全县面积的 9.8%, 山地占 89.4%。区域地貌具有平行岭谷的特征, 滑坡区属于低山丘陵河谷地貌。滑坡位于前河右岸, 平均坡度 15° , 坡体前缘临空面高 30~40 m, 坡角 $55^\circ \sim 70^\circ$; 滑坡体后缘高程 600 m, 前缘前河河床高程 375 m。滑坡对岸河谷上部为相对陡峻斜坡中部为平缓宽展滩地, 下游逐渐变陡。滑坡体上覆第四系坡积的粘土、粉质粘土, 厚度 $> 20 \text{ m}$; 中间为侏罗系中统遂宁组 (J_{2sn}) 的紫红色砂岩和泥岩互层; 底部为厚层状砂岩。产状 $133^\circ \angle 10^\circ$, 平均约为 20 m。滑坡区域没有大型断裂带和次级断层通过; 新构造运动不强烈, 不属地震活动区。滑坡体所处地质构造部位是一个缓倾向斜的扬起端。滑坡前缘为渠江的二级支流前河, 前河于滑坡前缘形成约 120° 的拐弯。该区属亚热带季风气候, 年平均降雨量 1 230 mm。滑坡发生前 2 d 的降雨量达 400 mm 以上。

1 滑坡灾害

受 09-03~05 特大暴雨的影响, 从 09-05T14:00 开始, 宣汉县天台乡距场镇上游 1 km 处的义和村发生特大型滑坡, 造成巨大损失。天台

乡、五宝镇沿前河 14 个村、1 个场镇、9 270 余户受灾, 直接经济损失达 2.5 亿元。滑坡体物质沿前河形成 1 200 m 的坝体, 形成堰塞湖, 抬高上游水位 23 m, 河水断流约 17 h。

2 滑坡特征

2.1 规模

滑坡整体形态近似扇形, 沿河平均宽处约 1.5 km, 顺坡平均长处约 1 km, 平均厚度约 20 m, 滑坡体体积约 $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 形态

滑坡发育处现代河床有异常弯道。滑坡发生前的斜坡为一自然平台(图 1), 平均坡度仅 15° , 斜坡上有大面积水田。在低山丘陵区能够形成如此平缓的大型平台, 而且区域范围内无类似海拔高度的夷平面存在, 推测历史上曾可能发生过滑坡。整体滑动后基本解体, 表面十分破碎。滑坡大体上分为三部分, 中部为主滑体, 北侧 I 和南侧 II 方向为次滑体, 滑动方向和分布特点如表 1。

为典型的整体推移式滑动, 前沿局部发生牵引, 其特征如表 2。由于滑坡体积巨大, 推移到前沿的滑体受到有效临空面的影响, 部分转化牵引滑动。所以在主滑部分保留大量推移式滑动迹象的同

收稿日期 (Received date): 2004-11-15; 改回日期 (Accepted): 2005-05-08.

基金项目 (Foundation item): 科学院所前沿创新项目 [Supported by the innovative item of institute, CAS]

作者简介 (Biography): 乔建平 (1953-), 男, 研究员, 主要从事滑坡危险度区划与区域滑坡规律研究。 [Qiao Jianping (1953-), male, Professor, main research field: Zoning of landslide danger degree and the law of regional landslide.]

时, 前沿也出现局部牵引滑动的台坎。

3 2 斜坡有效结构

斜坡上覆盖松散坡积层、下伏侏罗系红层基岩, 形成上软下硬的二元结构。从滑坡后壁滑动后暴露的基岩面可见, 砂岩有两组垂直岩层层面的破

2 3 滑速

滑坡自 09—05T14 :00 启动, 至 09—06T3 :00 左右滑动结束, 历时 13 h, 滑距约 50 ~ 80 m, 最大滑距 (前沿部分) 150 m。平均滑动速度约 10 m/h, 属于慢速滑坡。因此滑体上的住户能在滑动过程中安全撤离, 无人伤亡。

3 滑坡形成机理

3. 1 有效临空面

天台乡斜坡坡度较平缓, 平均 15°, 坡面长约 1 500 m, 仅这样的地形条件是难以形成滑坡的。但从剖面图上可见, 斜坡前沿坡度 70°、高差 30 ~ 40 m, 形成高陡临空面。沿河约 2. 5 km 的斜坡前沿都具有同等的临空条件, 可以为滑坡无抗阻滑动提供良好的空间。

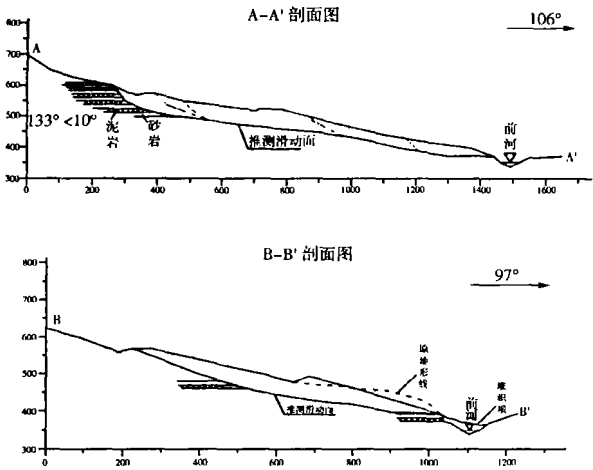


图 1 天台乡滑坡剖面图
Fig. 1 Section plot of Tiantai landslide

表 1 天台乡滑坡形态特征
Table 1 The shape characteristics of Tiantai landslide

滑动方向分类	形态特点	稳定性分析
主滑方向 (100°~110°) A—A'	位于滑坡中间部位, 滑坡体直接进入河床, 改变河流方向, 将河道推向左岸, 滑坡前沿渐缓, 约 20°~30°, 延伸长度约 100 m, 宽约 300 m, 滑坡完全解体, 斜坡前沿及基岩面完全被覆盖, 形成趋于稳定的斜坡。	主滑方向重心降低, 斜坡变缓, 上、中、下构成连续缓坡, 主滑方向趋于稳定。
次滑方向 I (80°) B—B'	位于滑坡北侧方向, 滑坡前沿堆积体部分坠入河中形成堰塞湖龙口, 堵断上游河床, 堆积坝高约 20 m, 前沿堆积物并未完全进入河床, 仍然堆积在相对高差约 30 m 的陡岸之上, 岸坡可见完整基岩出露, 无破坏迹象, 具有良好的滑动临空面。	次滑方向 I 的滑坡堆积物中心尚未降低, 前沿还有良好的临空面, 目前仍处于不稳定状态, 有再次部分复活的可能, 危险性较高。
次滑方向 II (140°)	与次滑方向 I 类似, 仅部分前沿滑坡物质掉入河床, 前沿陡岸高差约 30 m, 基岩出露完整, 具有良好的滑动临空面。	同上, 目前仍处于不稳定状态, 有再次部分复活的可能, 危险性较高。

表 2 推移滑动状况
Table 2 Slip situation of Tiantai landslide

分布范围	迹象特征	力学特征
滑坡前缘南侧南樊路段	鼓丘、隆升、鼓胀裂缝密布	挤压、鼓胀变形
滑坡前部、中部、后部	地表挤压反翘现象随处可见, 推挤后在田间、地头形成若干土体“小尖山”, 可见挤压擦痕。	挤压受阻 局部反向剪出
滑坡体上、中、下部	形成统一滑坡反方向“马刀树”, 倾角 40°~50°	推移反方向倾倒
滑坡后缘	海拔 570~600 m 处的后缘形成平均高差 20 m 的滑移后壁, 并保留拉张破坏的后缘滑坡凹槽, 槽谷深 15~20 m, 宽 30~40 m, 局部还有积水。	拉张变形 形成槽谷地形。

坏控制节理裂隙：① $130^{\circ} \angle 75^{\circ}$ ，② $55^{\circ} \angle 72^{\circ}$ 。尤其是第①组节理裂隙面可能构成天台乡滑坡的有效斜坡破坏结构面，坡体物质可以沿此面滑动形成滑坡。

3.3 易滑地层

滑坡区分布的侏罗系中统遂宁组（ J_{2sn} ）地层，岩性为紫红色砂泥岩互层，属盆周山区的易滑地层。宣汉县于1982年和上世纪90年代初发生的暴雨滑坡基本上均分布在此套地层中。厚层砂岩中的节理裂隙成为良好的地下水通道和富水层，静水压力得以产生。

3.4 触发因素

在盆周山区，当连日累积降雨量超过200 mm时，就有大面积滑坡发生的可能。09—03~05的2 d内宣汉县境内连续降雨量达到400 mm以上，成为百年一遇的强降水过程。天台乡滑坡大致在暴雨过程中开始启动，累积降雨量是滑动触发的主要因素。此外，滑坡体上原有的26个水塘、约 7 hm^2 水田的常年地表水渗漏已经使斜坡物质处于饱和状态，所以强降雨可以即刻触发滑坡发生。

3.5 破坏模式

据访问，09—03~05的强降雨过程中，坡体上的4条大冲沟全部充满水无法排泄。斜坡的自身排水作用已丧失，使坡体物质已处于超饱和状态。可以认为该滑坡的定性破坏模式为：地表水转换地下水坡体物质软化沿基岩面的地下水托浮斜坡物质发生滑动。

4 稳定性分析及发展趋势预测

4.1 稳定性分析

采用同类岩土参数对该滑坡发生前的稳定性状况进行定量分析计算。计算采用极限平衡理论的传递系数法，同时考虑两种不同的工况条件，即天然状况及暴雨过后滑体饱水情况（表3）。

计算结果表明，滑坡体A—A'剖面在天然状态下的稳定性系数为1.29，稳定性较好；B—B'剖面

表3 天台乡滑坡稳定性计算

Table 3 Calculating of the stability of Tiantai landslide

工况条件	滑坡体参数			稳定性系数	
	γ (kN/m ³)	C (kPa)	φ (°)	A—A'剖面	B—B'剖面
天然状态	21.6	40	29	1.29	1.04
饱和状态	23.6	35	22	0.99	0.80

在天然状态下的稳定性系数为1.04，处于临界状态。在饱和状态下，A—A'剖面的稳定性系数为0.99；B—B'剖面的稳定性系数为0.80，均 <1 。

4.2 整体滑动趋势

天台乡滑坡滑动后滑坡体已完全解体，坡体上物质已分解成大小不等的若干块体，已不存在连续坡面。其中，主滑段（A—A'剖面）解体性最强，除前沿直接进入河床外，整体重心高度有所降低。北侧和南侧滑坡体推力明显小于主滑段，尤其是南侧滑坡的解体性较主滑段和北侧滑体差。北侧滑体的滑距比主滑段小，未完全解体。滑坡的三大部分已构不成整体滑动。根据滑坡发生规律，在外界触发因素作用下，大型、特大型滑坡的第一次启动能量最大，滑动后的重心下移，完整性变差，再次整体复活的可能性极小。滑坡天然状态下稳定性极好，稳定性系数 >1.2 。但在宣汉县有记载以来的最大一次降雨过程中发生滑动，说明斜坡基本具备滑坡的内部条件，但需要非常特殊的触发条件才可能滑动。

4.3 局部继承性滑动

从滑坡的形态分析，主压应力方向位于中部主滑段，南北两侧不是主要受力方向。在此次滑坡中，两侧为侧压应力方向，因此受力的状态不同，破坏的效果也不一样。从滑坡体上建筑物的破坏程度可见，主滑部分的建筑物全毁，而南北两侧的建筑还未全毁。然而，南北两侧滑体在09—05的大规模滑动后没有完全推入河床，形成了新的松散堆积体陡坎。在大到暴雨的情况下，南北两侧滑体可能发生局部滑塌，其中北侧滑体的危险性大于南侧滑体。

5 防治对策与措施

5.1 应急措施

（1）查明主滑体前沿部分的结构及稳定状态

① 斜坡结构的破坏深度，原基岩面的位置是否保留，滑舌牵动基岩与否？② 分析评价滑动体的稳定状态，坡面的连续完整性如何？如果开挖会产生什么不利后果？

（2）对南北两侧滑坡进行地表详查

① 查明地表变形、裂缝的类型、方向、规模；② 分析潜在危险性，提出临时处理方案。

（3）为输浚河道增加泄洪能力提供依据

目前五宝镇仍处于淹没状态之下, 输浚河道增加泄洪能力是当务之急。应急措施的关键是开挖被滑坡淤塞的河道, 开挖时是否会引发新的局部滑坡是输浚工程关注的重点。滑坡专业技术人员通过上述两项勘查工作提供可靠的施工依据, 防止出现新的隐患。

(4) 拟定分步实施及时调整方案的措施

滑坡段约 2.5 km 的河床已被滑坡淤填整体抬高 5~10 m, 龙口处达 20 m, 降低坡前的河床比降十分困难。河床比降减缓, 河水冲刷能力减弱, 输浚施工困难, 效果不明显。在此情况下, 应该采取分步实施及时调整的救灾防治方案: ① 输浚工作边施工边监测, 观测是否有引起新的斜坡不稳定现象; ② 根据观测结果, 效果不理想可考虑采取五宝镇拟定部分搬迁的方案, 避免今后雨季再次淹没; ③ 保留堰塞湖景观, 利用其开发新的有价值资源。

(5) 搬迁南侧滑坡体上的危险住户

5.2 工程措施

(1) 及时输干滑坡体上的残留水, 防止地表水继续下渗; (2) 统一规划将滑坡体破碎表面改造成相对比较缓的几级台地, 结合水土保持工程坡改梯, 恢复斜坡耕地; (3) 采用排水沟, 集水井工程输排地表水和地下水; (4) 如果需要恢复南樊公路可采用适度抗挡工程在滑坡前沿护坡, 但不宜采用大型抗滑桩支挡; (5) 工程完工后继续加强滑坡监测, 暂不考虑修建新的居民住宅。

5.3 非工程措施

(1) 加强滑坡等山地灾害的基本知识宣传, 培育懂知识、会应用的县乡村技术人员; (2) 建议上级主管部门建立农村专项滑坡等山地灾害观测经费, 保证防灾减灾工作落到实处; (3) 增加气象观测点, 准确发布山区小气候天气预报; (4) 建立宣汉县滑坡等山地灾害数据库, 提高县级专业部门的业务管理能力和预警水平。

Analysis on Super Large-scale Landslide in Tiantai, Xuanhan, Sichuan

QIAO Jianping¹, WU Caiyan^{1, 2}, LI Xiuzhen¹, FAN Xiaoyi^{1, 2},
HE Siming¹, TIAN Hongling^{1, 2}, XU Chuanglu³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Tibet Municipality Department of Land and Resources, Lhasa 850001, China)

Abstract: On September 5, 2004, a super large-scale landslide occurred because of an extremely heavy rainstorm in Tiantai township of Xuanhan county, Sichuan province. The accumulative rainfall in 48 hours was up to 400 mm. The volume of the landslide is about 30 million stere and it severely destroyed the ground buildings and the farmland on the landslide. Besides these damages, it blocked river in front and formed a barrier lake which submerged the market town in upper reaches. Fortunately, because of the slow velocity of the sliding, people here could move away before the disaster coming with no life lost. The characteristics and the forming mechanism of, the stability and the developing trend of the landslide were analyzed. The triggering factor is rainfall, the bedrock lithology and land use features on the slope body is important factors, as well. Authors put forward the prevention countermeasure of the landslide.

Key words: Xuanhan county; rainstorm; super large-scale landslide