

四川宣汉特大型滑坡特征及形成机制分析

赵松江, 孙书勤

(四川省华地建设工程有限责任公司, 成都 610081)

摘要: 2004 年 9 月 5 日四川省宣汉县天台乡发生了震惊中外的特大型滑坡, 滑坡摧毁了一个自然村并严重堵塞河道, 形成库容 5 800 万 m^3 的一座滑坡堰塞湖, 淹没上游的五宝镇及沿河 8 个村庄, 致使 19 360 人失去家园, 造成直接经济损失约 2 亿元, 特别严重的灾情一度成为中央领导及中外新闻媒体关注的焦点。天台滑坡面积达 1.2 km^2 , 总体积 2 500 $\times 10^4 m^3$, 河道中堆积物 210 $\times 10^4 m^3$, 属特大型后退式岩质滑坡^[1], 是 300 年一遇特大暴雨诱发的自然地质灾害, 是四川盆地红层丘陵区发生的规模最大、财产损失巨大的特大型滑坡灾害。由于预报及时、群测群防措施得当、抢险救灾组织有力, 该滑坡没有造成任何人员伤亡, 创造了四川省地质灾害减灾防灾的一个奇迹。

关键词: 特大型; 后退式; 滑坡灾害; 形成机制

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)02-0168-03

Forming Mechanism Analysis and Characteristic of Especial-huge Rock Landslide at Tiantai Village of Xuanhan County in Sichuan Province

ZHAO Song-jiang, SUN Shu-qin

(Sichuan Huadi Construction Engineering Co., LTD., Chengdu 610081, China)

Abstract: Huge landslide which had astounded China and foreign countries had taken place in Tiantai countryside of Xuanhan county in Sichuan Province on Sept. 5, in 2004. The landslide destroyed a village, jammed a river way, formed a barrier lake which had 58 $\times 10^6 m^3$ in reservoir cubage and flooded upriver Wubao town and 8 villages along the river, resulted in losing homes for 19.36 thousands peoples and economic damage of 200 million yuan. Tiantai landslide which is 1.2 km^2 in acreage, 2 500 $\times 10^4 m^3$ in all cubage, has 210 $\times 10^4 m^3$ accumulations in river way and belongs to especial huge and retrograde style rock landslide, is a national geological disaster which has been induced by huge rainstorm in 300 years and is an oversize landslide disaster which scope and possession losing is the largest at the red stratum in Sichuan basin. The landslide had not made any casualty because of forecasting betimes, measuring suitable and advantageous organizing. The landslide governance had created a miracle of decreasing and preventing geological disaster in Sichuan Province.

Key words: especial huge; retrograde style; landslide disaster; forming mechanism

1 概述

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。由成都至达州有高速公路、铁路相通, 达州至宣汉县、宣汉县至天台乡为公路相连, 成都至天台乡约 580 km。

滑坡区属中等切割的构造剥蚀中山区, 山顶的绝对高程一般为 1 000~1 100 m, 山体由侏罗系中统遂宁组和蓬莱镇组砂、泥岩构成。砂岩形成陡壁, 泥岩形成缓坡。滑坡岩土体主要为第四系的坡积、残积的黏土夹块碎石土及侏罗系中统遂宁组(J_{2s})的棕、紫红色砂质泥岩、泥质粉砂岩组成。滑坡位于五宝场背斜东翼和平楼山向斜之间(图 1)。滑坡所处的单斜地带, 岩层倾向为 95°~110°, 倾角为 8°~10°。

2 滑坡体地质特征

2.1 滑体

滑体总体积 2 500 $\times 10^4 m^3$, 其中河道中堆积物约 210 $\times 10^4 m^3$ 。

滑体后部由侏罗系中统遂宁组紫红色碎裂泥岩及碎块石土夹粉质黏土构成, 前部以粉质黏土为主。黏土多呈可塑状态。

滑坡区内发育 3 条较大冲沟, 其切割深度多在 5~10 m。受冲沟切割, 在横向上地面岭谷相间。滑坡在形成时由前向后逐渐分级滑动解体形成, 每一级滑块除了向前水平运移外, 还有垂向上的运动, 形成滑块间的相对错动。在空间上, 滑体厚度变化大, 特别是在滑块后部形成相对下降的凹地以及相对上升的脊地。据物探资料, 滑体厚度为 7~49.28 m, 总体为后部厚(35~45 m), 前部薄(20 m 左右)。在横向上, 滑体厚度是中部厚, 北部次之, 南侧薄。在前缘, 中段的滑体厚度为 20 m 左右, 北段的厚度在 10 m 左右, 南段则不足 10 m(图 2)。

在滑坡体前部裂隙密集, 裂隙间距一般为 1~5 m, 宽度大多为 0.2~1 m。裂隙切割和错动后, 滑体呈迭瓦式分布。发育的大量裂隙降低了滑体的总体重量, 大量的裂隙也有利于大气降水的入渗, 从而增加滑体的含水量。根据重度试

* 收稿日期: 2006-03-16

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: 赵松江(1963-), 男, 四川省华地建设工程有限责任公司总工程师, 在职硕士, 主要从事生态地质、环境地质、灾害地质调查、科研和工程设计等工作。

验, 滑体土的天然重度平均为 19.35 kN/m^3 。

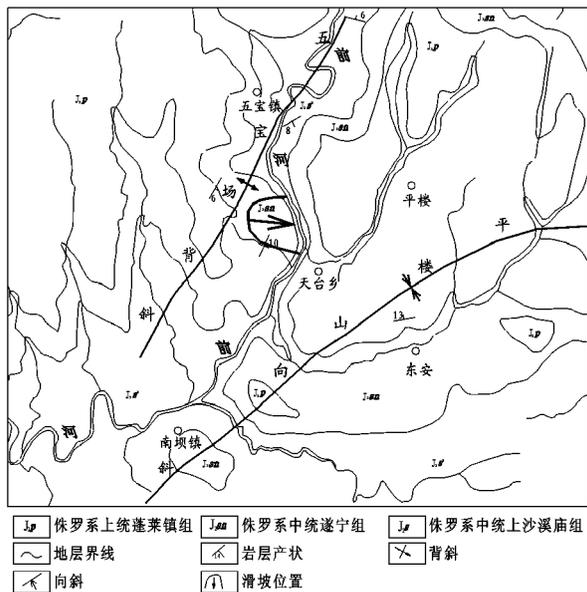


图 1 构造纲要图



图 2 天台乡滑坡三维影像图(据刘心季)

2.2 滑带

多数钻孔揭露滑体沿泥岩强风化带与中风化接触带附近滑动形成明显的滑带土。6 个控制性钻孔(深度 60 m 以上)穿过滑床以下所揭露的岩心完整, 未见基岩中存在滑动面, 结合滑坡前缘基岩露头区岩层结构分析, 滑坡不存在更深层的基岩滑动。

根据钻孔和竖井揭露, 滑带的厚度大多介于 $0.20 \sim 1.20 \text{ m}$ 之间, 平均值 0.62 m 。滑带土为棕红色黏土或粉质黏土含角砾, 现场鉴定角砾的含量大多在 $10\% \sim 30\%$, 室内筛分为 $17.2\% \sim 54.9\%$ 。其中的角砾大多具有擦痕及磨圆现象。X 射线衍射分析矿物成分主要由伊利石 ($71\% \sim 75\%$) 和绿泥石 ($25\% \sim 29\%$)。滑带土的湿度较大, 一般为湿- 很湿, 呈可塑- 软塑状态, 甚至呈流塑状态。

由于室内试验条件的限制, 试验中去除了部分小角砾。天然密度 ρ 为 $1.88 \sim 2.10 \text{ g/cm}^3$, 天然孔隙比 e_0 为 $0.495 \sim 0.975$, 天然峰值抗剪强度: $j = 5.0 \sim 17.5^\circ$, $C = 6.0 \sim 25.0 \text{ kPa}$; 天然残余抗剪强度: $j = 4.0 \sim 14.1^\circ$, $C = 3 \sim 14.8 \text{ kPa}$ 。饱和残余抗剪强度: $j = 2.5 \sim 9.5^\circ$, $C = 5 \sim 13 \text{ kPa}$ 。

2.3 滑床

根据钻探及物探揭露, 滑床埋深一般为滑体厚度 ($7 \sim 49.28 \text{ m}$), 平均埋深 23 m 。滑床面较平坦, 总体上为一向东倾斜的平面。滑床由基岩构成, 为侏罗系中统遂宁组 (J_2sn) 的暗紫红色砂质泥岩和浅灰色泥质砂岩。滑床岩石风化较

强烈, 在滑面附近泥岩多为强风化, 而砂岩则以中风化为主。据统计滑床基岩的强风化带厚度一般小于 5 m , 自中风化层岩体较完整 (RQD 指数 $75\% \sim 95\%$), 力学强度较高。基岩 (泥岩、砂岩) 的天然抗压强度 R 为 $39.9 \sim 42.6 \text{ MPa}$ 。其中, 砂岩的天然抗压强度 R 一般大于 25 MPa , 软化系数 $0.56 \sim 0.87$; 砂质泥岩和泥质砂岩的力学强度相对较低, 天然抗压强度 R 为 $7.83 \sim 8.61 \text{ MPa}$ 。

2.4 滑坡体水文地质特征

据钻孔揭露, 滑坡区存在上下两层含水系统。以滑床为界, 滑坡松散堆积层中赋存孔隙潜水、滑床砂岩中赋存基岩裂隙水。滑坡前斜坡上部为泥岩及块碎石夹粉质黏土使坡积层构成相对隔水层, 下部砂岩裂隙为相对富水的承压含水层。滑坡后, 由于滑坡解体, 上部泥岩及块碎石夹粉质黏土使坡积层强烈滑移破坏形成大量的裂缝, 成为相对富水的含水层, 赋存潜水; 而下部砂岩裂隙受滑带土的阻隔成为相对不富水层。

滑坡区地下水受斜坡地形控制, 总的运动方向仍向前河流动, 但受滑坡后地形、滑面坡度、滑坡体裂缝发育密度和渗透性等差异的影响, 在滑坡体后部地下水水力梯度较大, 流速较快, 水位埋深大; 而滑坡体前部则相反, 出现积水和湿地, 前缘剪出口一线是地下水的排泄带。

大气降水是滑坡松散堆积层中地下水的主要补给源, 积水洼地 (目前残留 4 个较大的积水塘) 和冲沟中地表水的侧向补给 (图 3) 也是地下水的补给源之一。滑坡体上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 3), 它们的南侧支沟呈“双沟同源”发育, 在滑坡体后部分水岭 (中大坪) 汇聚。4 条沟总集雨面积 2.08 km^2 , 各沟道的纵比降 $153 \sim 197\%$ 。

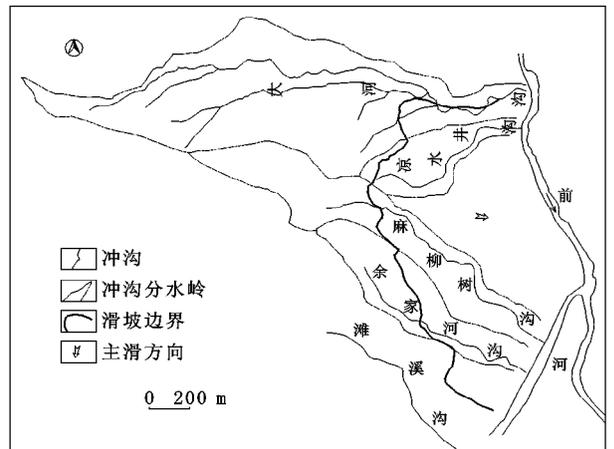


图 3 滑坡区水系图

滑体堆积层内赋存的地下水为潜水, 由于滑带土均为黏性土, 饱水而不透水, 滑带土构成其隔水下界。在目前条件下, 潜水主要通过滑动松弛、扩张形成的大量裂缝系统渗流运移, 然后在滑坡前缘剪出口附近以泉水或渗水的形式排泄到地表。

根据水文地质观测及抽 (注) 水试验得出, 滑体中地下水分布不均匀。整个滑坡区表现为滑坡后部漏水强, 水位低, 基本不积水; 而前部透水性差, 水位浅, 积水较严重, 地表多呈湿地, 有泉出露。滑体和滑床地下水的水力联系主要通过滑体解体形成的裂隙系统与砂岩裂隙系统局部连通形成。

地下水水质类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca}$ 型水。pH 值为 $7.1 \sim 7.2$, SO_4^{2-} 含量为 $143.16 \sim 150.37 \text{ mg/L}$, Mg^{2+} 含量为 $25.90 \sim 27.60 \text{ mg/L}$, NH_4^+ 含量为 0.00 mg/L , OH^- 含量为 0.00 mg/L , 总矿化度为 $710.20 \sim 724.15 \text{ mg/L}$, 侵蚀性 CO_2 为 $5.7 \sim 8.4 \text{ mg/L}$, HCO_3^- 为 $5.95 \sim 6.12 \text{ mg/L}$ 。对混凝土无腐蚀性, 对钢结构具有弱腐蚀性。

3 滑坡形成机制分析

3.1 滑坡发生过程

2004 年 9 月 3 日宣汉县开始普降暴雨, 据宣汉县气象台数据, 3 日降雨量为 15.9 mm、4 日为 122.6 mm、5 日为 257.0 mm。5 日下午 15:00 陈家院子附近南樊公路出现开裂, 随后路边房屋开始垮塌坠入河中。当晚 22:00~23:00 滑坡体前部的主滑块体首先启动冲入前河, 后部滑块紧紧跟进连接开始滑动。余家河沟与凉水井沟围成的主滑块体前部滑入河道, 堆积物彻底堵断前河, 形成堰塞坝, 致使坝后洪水水位迅速抬高。至 6 日凌晨 2:00 左右洪水将五宝镇全部淹没, 此时五宝镇最高水位 390.5 m。

6 日清晨 7:00 雨一直未停。约 10:00 上涨的洪水从滑坡堆积物上向下溢流, 在堰塞坝下游端由于地形陡降洪水加速, 迅猛的洪水向后拉槽下切堆积物形成目前的新河道, 洪水夹裹大量的泥沙、块石冲入丁家坝河口形成泥石流堆积扇, 摧毁并掩埋了丁家坝河口的石拱桥。随后主河道向右归入前河古道, 龙口水位降至 380 m。

3.2 滑坡启动和运动机制分析

(1) 特定的地质构造是滑坡形成的主控因素^[2]。滑坡区位于五宝场背斜东翼和平楼山向斜之间, 五宝场背斜轴线北东 30°, 轴部的最老地层为侏罗系中统上沙溪庙组第二段 (J_{2sn}), 两翼产状对称, 大约在 10°。滑坡体所处地质构造部位为五宝背斜东南翼。滑床基岩倾向与五宝场背斜 ES 翼岩层倾向一致, 总的产状为 110°, 前部倾角 8~10°, 后部倾角 10~15°。岩层呈向前河倾斜的“平板”状, 构成易滑的块体, 易产生顺层滑坡。

受构造作用影响, 斜坡岩层的节理和风化裂隙发育。特别是组成滑体的泥岩风化裂隙发育, 钻孔揭露的风化带深度达几十米接近砂岩顶板, 岩层已呈碎块状、块状, 地表水易渗入。泥岩浸水后极易软化, 成为含水而透水性差的相对隔水层。砂岩裂隙总体不发育, 岩层主要呈厚层状或巨厚层状。钻孔揭露 60 m 以下的砂岩体完整, 岩心长度可达 2 m 以上, 已属中-微风化带, 岩石多切割成块体, 呈块状结构, 砂岩裂隙系统是斜坡深部地下水的主要运移通道, 赋存承压裂隙水。

(2) 易于汇水的地形是滑坡形成的促进因素。滑坡区地

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] 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.
 [4] 刘传正, 等. 地质灾害勘察指南[M]. 北京: 地质出版社, 2000. 17-120.
 [5] (苏) E·П·叶米里扬诺娃. 滑坡作用的基本规律[M]. 重庆出版社, 1986.
 [6] 滑坡文集编委会. 滑坡文信第九集[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.

(上接第 167 页)

参考文献:

[1] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
 [2] David G, Tarboton Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 309-319.
 [3] 求是科技. Visual C++ 6.0 程序设计与开发技术大全[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
 [5] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
 [6] 刘光, 李树德, 张亮. 基于 DEM 的沟谷系统提取算法综述[J]. 地理与地理信息科学, 2003, (9): 11-15.
 [7] 费巧玲, 徐向阳. VC 中用 ADO 实现大数据的存取[J]. 计算机工程与应用, 2005, (24): 182-184.
 [8] 李志林, 朱庆. 数字高程模型(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
 [9] 张志. 蔡家川流域景观格局与植被演替模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
 [10] 孙友波, 等. 基于 DEM 的数字河网生成方法的浅议[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 106-111.

形受前河和冲沟切割, 为三面临空的台状斜坡地, 台面坡度 15~30°。前缘为向前河“凸出”的河谷陡坡, 坡度 55~70°, 滑坡体剪出口位置高于原河床约 45~64 m, 滑坡体前方无阻滑段, 临空条件良好。坡面发育 4 条深切大冲沟, 集雨面积 2.08 km²。冲沟深切, 滑坡发生前沟底局部可见基岩(砂岩、泥岩) 出露, 沟水对地下水可以直接补给。坡面分布大量梯田、大小 26 个水塘。在大暴雨条件下, 地表天然排水系统排泄能力不畅时, 极易产生大范围的地面积水成为地下水的补给源。

(3) 特大暴雨是滑坡形成的主要诱发因素。本次暴雨持续时间长、强度大, 是宣汉县有气象记载以来前所未有的。滑坡主要诱发原因是前期降雨使坡体充分饱水, 特大暴雨产生的径流使冲沟产生多处垮塌、沟边树木倒塌堵塞沟道, 致使沟水漫流, 滑坡区农田、水塘大面积积水下渗, 致使坡体风化裂隙发育的泥岩层充水饱和, 迅速降低了泥岩层的抗剪强度^[3]。同时下渗补给砂岩裂隙含水层的地下水不能即时排除使承压水头急剧增高, 在斜坡内部形成“承压水盆”^[4]; 上部厚度不大的隔水盖层(泥岩及坡积层) 被高水头压力“浮托”, 产生“水垫效应”, 造成滑体前部阻滑段正压力大大减小, 从而导致摩阻力急剧降低甚至出现负压力, 滑体与滑床的摩阻力降低临近极限平衡状态。与此同时地下水挤入裂隙, 并在裂隙中形成高压水流, 具有将坡体沿主要的构造裂缝“楔裂”^[5]、“撕开”的趋势。这样滑坡体在砂岩裂隙含水层承压水头产生的浮托力和后部裂隙水压力(水平推力) 共同作用下, 各滑块体先后启动, 从而产生以后退式为主的大规模岩质顺层滑坡^[6]。

4 结 论

- (1) 该滑坡是预报及时、群测群防措施得当, 抢险救灾组织有力, 虽造成直接经济损失约 2 亿元, 但未造成任何人员伤亡的典型事件。
- (2) 该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地质灾害。
- (3) 特定的地质构造是滑坡形成的主控因素。
- (4) 易于汇水的地形是滑坡形成的促进因素。
- (5) 特大暴雨是滑坡形成的主要诱发因素。