

# 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析

胡卸文<sup>1,2</sup>, 黄润秋<sup>2</sup>, 施裕兵<sup>3</sup>, 吕小平<sup>1</sup>, 朱海勇<sup>1</sup>, 汪雪瑞<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;  
3. 中国水电工程顾问集团公司 成都勘测设计研究院地质工程分院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 在对唐家山滑坡及其堰塞坝现场进行详尽地质调查结果基础上, 结合早期(地震前)资料开展研究, 结果表明, 该滑坡形成及堵江过程可概括为: 顺层岸坡结构地震诱发→滑坡体前缘剪切、后缘拉裂→高速下滑、形成气浪、前缘刨蚀河床、对岸阻化隆起→后缘边坡坐落下滑→堰塞堵江。对堰塞坝体地质结构、不同水位条件下堰塞坝整体及上下游部位不同工况稳定性分析表明, 堰塞坝以沟槽部位表层松散体水流逐级淘刷的“溢流破坏”方式特点, 整体溃坝可能性小。

**关键词:** 工程地质; 堰塞坝; 高速滑坡; 堵江机制; 溃坝

**中图分类号:** P 642.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)01 - 0181 - 09

## ANALYSIS OF BLOCKING RIVER MECHANISM OF TANGJIASHAN LANDSLIDE AND DAM-BREAKING MODE OF ITS BARRIER DAM

HU Xiewen<sup>1,2</sup>, HUANG Runqiu<sup>2</sup>, SHI Yubing<sup>3</sup>, LU Xiaoping<sup>1</sup>, ZHU Haiyong<sup>1</sup>, WANG Xuerui<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** On the basis of the detailed geologic investigation results which were gained on the location of the barrier dam, combining the early information before earthquake, the forming process and blocking river mechanism of the landslide can be summarized as follows: (1) there were shearing surface in forward edge of the landslide on dip slope which was caused by earthquake and drawing open in back edge; (2) the air wave was formed by the high speed sliding, and the riverbed was ploughed by its forward edge, and the thither slope was uplifted for inhibition; (3) the back edge of the landslide stood and glided; and (4) then it dammed and blocked river. Meanwhile, according to the geological structure and different water levels of the barrier dam, the barrier dam's stabilities in upstream and downstream are studied. It is shown that the scouring mode of the barrier dam is overflow breakdown mechanism which stepwise scours the surface layer of loose media on the groove position, and the possibility of dam-breaking is small.

**Key words:** engineering geology; barrier dam; high speed landslide; blocking river mechanism; dam-breaking

**收稿日期:** 2008 - 07 - 17; **修回日期:** 2008 - 10 - 22

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40772175, 40841025); 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室“科技减灾、重建家园”开放基金项目(DZKJ - 08012); 西南交通大学科学研究基金项目(2008 - A01)

**作者简介:** 胡卸文(1963 -), 男, 博士, 1985年毕业于成都地质学院水文系, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究。E-mail: huxiewen@163.com

# 1 引言

汶川“5.12”大地震不仅在地震影响区内产生大量的崩塌、滑坡等地质灾害，而且在整个核心区内形成了 104 处滑坡堵江形成的堰塞湖(截止到 2008 年 8 月 22 日资料)，其中堵塞规模最大、潜在危害最高、也最容易再次诱发堰塞湖内次生灾害的当属位于北川县通口河的唐家山大型滑坡堵江堰塞湖。调查资料显示，地震前唐家山地形坡度为 40°，且属于中陡倾角顺向岸坡结构，边坡稳定(见图 1)；在地震触发下形成高速滑坡，整个滑坡下滑时间约在 0.5 min 左右，滑移相对位移 900 m，推测最大下滑速度约为 30 m/s，快速下滑堵江而形成的堰塞坝顺河向长 803.4 m，横河向最大宽度 611.8 m，坝高 82~124 m，平均面积约  $3 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，推测体积为  $20.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ (见图 2, 3)。截止到 2008 年 6 月 9 日，堰塞湖蓄水已达  $2.425 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，相应蓄水位高程 740 m，而堰塞体上游集雨面积为 3 550  $\text{km}^2$ ，2008 年 6 月 10 日通过已开挖泄流槽逐级坍塌后成功泄洪(见图 4)，堰塞坝未发生整体溃坝，整体基本稳定，并确保了下游人民生命财产的安全。



图 1 震前唐家山原貌(面朝下游)  
Fig.1 Initial form in Tangjiashan before earthquake(facing downstream)



图 2 震后唐家山形成高速滑坡并堵江(面朝下游)  
Fig.2 High-speed landslide formed in Tangjiashan which blocks river after earthquake(facing downstream)



图 3 唐家山高速滑坡堵江形成的堰塞坝(面朝上游)  
Fig.3 Barrier dam formed by Tangjiashan high-speed landslide(facing upstream)



图 4 堰塞坝“6.10”正常泄水后形成的泄流渠(面朝上游)  
Fig.4 Discharge channel formed after barrier dam overflowing on June 10(facing upstream)

由于堰塞坝下部地质结构相对较好，目前泄洪槽入口下切缓慢，仍保持 710 m 水位高程，较地震前河水水位 660 m 还抬高近 50 m 水头，库内还储集约近  $8 \times 10^7 \text{ m}^3$  水量。

堰塞坝(湖)作为一种自然地质现象，90%以上均与地震诱发形成的高速滑坡堵江有关<sup>[1~8]</sup>。震后地质调查及访问显示，唐家山堰塞坝的形成过程大致可概括为：滑坡体前缘剪切、后缘拉裂→高速下滑、形成气浪、前缘刨蚀河床、对岸阻化隆起→后缘边坡坐落下滑→堰塞堵江。显然，因滑坡下滑速度快、前缘临空滑移距离短(原河道宽约 100 m)，顺层高速下滑坡体尽管受到解体、但层状结构并未完全破坏，堰塞坝体地质结构总体表现出似层状结构，块体粗大，性状良好，“6.10”正常泄水以及泄水后揭露的堰塞体结构证实了上述分析。因此，与国内在近几十年内发生的著名西藏易贡、云南昭通头寨沟等<sup>[8~14]</sup>高速滑坡属于“远程”和“碎屑流体”特点不同，唐家山高速滑坡则属于“中陡倾角顺层岩质高速短程滑坡”，从地质学角度看，这也是一个非常特殊的“滑坡堵江”案例，正是由于“岩质”和“短程”，才会导致堰塞坝体具备良好的“似层状结构”，

整体性较好, 相应为何发生整体溃坝可能性小的根本原因。

## 2 唐家山堰塞坝形成的地质环境条件

### 2.1 区域地质背景

唐家山在区域构造上位于北部雪山和虎牙断裂, 西部的岷江断裂和东南部的龙门山断裂带所围限的块体的南缘, 并夹持在龙门山中央断裂和后山断裂之间。其中, 龙门山前山断裂距该区以南约 17 km, 龙门山中央断裂(北川附近, 又称“北川—映秀断裂”)距该区以南直线约 2.3 km(见图 5), 唐家山堰塞体位于龙门山中央断裂带上盘, 龙门山后山断裂距该区以北 20~30 km。

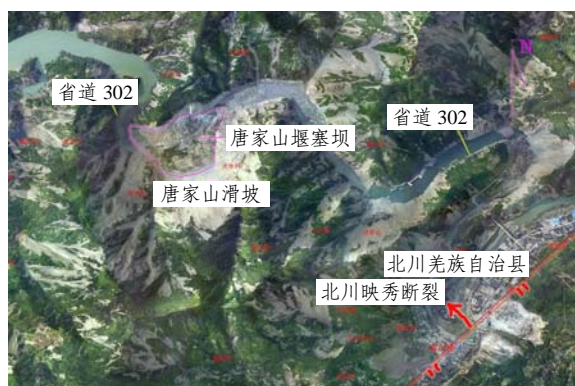


图 5 唐家山堰塞坝与龙门山中央断裂(北川—映秀断裂)的位置关系

Fig.5 Location relation between Tangjiashan barrier dam and Longmenshan middle fracture zone(Beichuan—Yingxiu fracture)

### 2.2 震前唐家山基本地质概况

#### (1) 地形地貌

汶川“5.12”大地震形成的唐家山堰塞坝位于北川县城上游 6.5 km 的通口河上, 通口河以  $S70^{\circ}E \sim N40^{\circ}E$  流经本区, 区内河道弯曲; 震前枯水期水面高程 664.8~664.7 m, 水面宽 100~130 m, 水深 0.5~4.0 m。唐家山部位为不对称的 V 型河谷, 右岸较陡, 坡度  $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ; 左岸坡较缓, 坡度约为  $30^{\circ}$ , 上、下游各分布 1 条小型浅冲沟, 分别命名为大、小水沟(见图 1)。

#### (2) 地层岩性

唐家山部位出露寒武系下统清平组( $\epsilon 1c$ )灰黑色薄~中厚层硅质岩、砂岩、泥灰岩、泥岩, 岩层软硬相间。第四系堆积物主要由冲积、残坡积物组

成, 主要分布于河床、两岸坡体顶部、坡脚、小型冲沟及局部地形斜缓部位。其中河床为下游苦竹坝库区厚约 21 m 的含泥粉细砂, 左右岸表部坡残积碎石土层推测厚为 5~20 m。

#### (3) 地质构造及岸坡结构

唐家山位于青林口倒转复背斜核部附近, 背斜轴线为  $NE45^{\circ}$  延伸, 轴面倾向 NW, 倾角  $70^{\circ}$  左右。受北川~映秀逆冲断层影响, 区内褶皱断裂很多, 地层产状比较零乱, 岩层总体产状为  $N70^{\circ} \sim 80^{\circ}E/NW \angle 50^{\circ} \sim 85^{\circ}$ , 层间挤压错动带较发育, 由黑色片岩、糜棱岩等组成, 挤压紧密, 性状软弱, 遇水泥化、软化。原生结构面主要为层面, 构造性节理裂隙发育, 具一定区段性, 多密集短小, 导致岩体完整性一般。

唐家山所在部位的寒武系下统清平组基岩地层产状为  $N60^{\circ}E/NW \angle 60^{\circ}$ , 表现为左岸逆向坡, 右岸中陡倾向向坡的岸坡结构特点。

## 3 唐家山堰塞坝形态特征及地质结构特点

### 3.1 形态特征

如上所述, 因汶川“5.12”大地震诱发通口河右岸唐家山部位形成高速滑坡并堵江, 形成的堰塞坝平面形态为长条形, 顺河向长 803.4 m, 横河向最大宽度 611.8 m, 与原河床高程相比, 堰塞坝高 82~124 m, 堵塞河道面积约为  $3 \times 10^5 m^2$ , 推测体积为  $20.37 \times 10^6 m^3$ (见图 3, 6~8)。

堰体的基本形状为宽顶堰, 由于下滑滑距达 900 m, 高速下滑形成的堰塞坝, 总体起伏差较大, 明显表现出前缘受阻堵江部分堆积体爬坡至对岸而高程最高(最高点高程 793.9 m), 而后缘座落体则相对平缓且高程较低(负地形最低高程 752.2 m), 故在两者之间形成了明显的负地形, 即贯通上下游的凹槽, 该槽呈“右弓形”分布特点, 宽 20~40 m。

此外, 在滑坡高速下滑过程中, 靠上下游侧也明显因能量释放完全而表现堆积体结构更破碎一些, 因而上下游侧坝坡坡度有所差异。具体表现为堰塞坝上游坡水上长约 200 m, 坡较缓, 坡度约  $20^{\circ}$ (坡比约 1:4); 下游坝坡长 300 m, 坡脚高程 669.5 m, 上部陡坡长约 50 m, 坡度约  $55^{\circ}$ , 中部缓坡长约 230 m, 坡度约  $32^{\circ}$ , 下部陡坡长约 20 m, 坡度约  $64^{\circ}$ , 平均坡比 1:2.4。

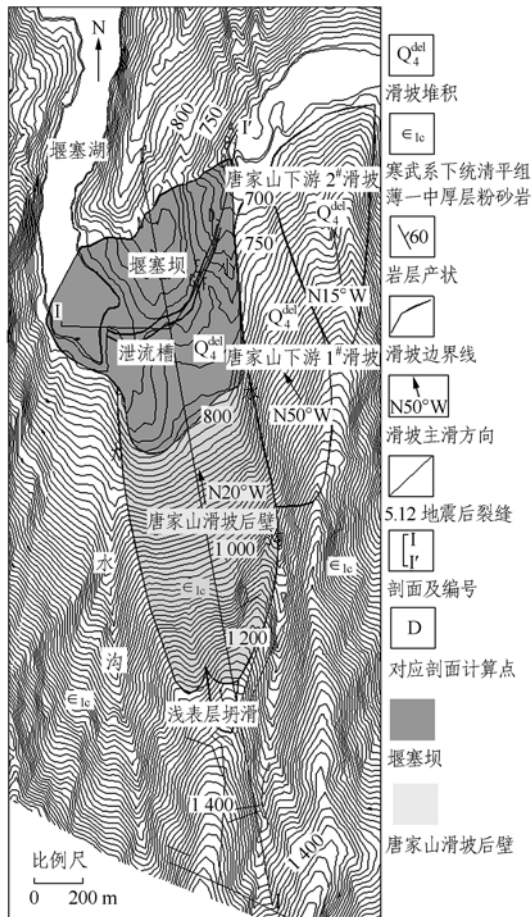


图6 唐家山滑坡堵江堰塞坝工程地质平面图

Fig.6 Engineering geological plane of Tangjiashan landslide and its barrier dam

### 3.2 地质结构特点

现场地质调查表明，平面上堰塞坝体除在后缘及上游侧表层明显分布黄褐色坡残积碎石土外，其余部位基本上均为块碎石，尤其在前缘部位因对岸受阻而分布具有与原产状倾向相反的“似层状结构”

大块石(见图9)。同时，在堰塞坝体前缘表层大部、上下游侧表层可见明显的河床粉砂层，这说明高速滑坡堵江过程中对河床部位粉砂层的“铲锅刨地”及其气浪效应是非常显著的(见图3)。

通过对高速滑坡形成的地质环境条件分析，在滑坡相对高差540 m、斜坡滑移900 m、所在通口河河宽约100 m的临空条件下，在短短的0.5 min内快速下滑并堵江要让滑坡体原始坡体结构完全解体并破碎的可能性不大，因此分析认为除堰塞坝体前缘及上下游侧解体破碎强烈外，其余部位在很大程度上仍将保持原坡体地质结构特点，即堰塞坝剖面垂直方向上，从地表到底部依次为原黄褐色坡残积碎石土(推测5~15 m)、原强风化岩体破碎后的块砾石层(推测10~15 m)和原弱风化岩体解体后的似层状碎裂岩体(见图7, 8)。2008年6月10日成功泄洪溢流后淘刷出的断面也验证了上述分析的合理和正确(见图10)。

## 4 唐家山滑坡堵江机制分析

### 4.1 形成条件

从震前唐家山所在边坡地形地貌、地层岩性、地质构造、岸坡结构特点，该边坡与北川—映秀断裂的位置关系以及受汶川“5.12”大地震的影响等内在因素和外在触发条件分析，唐家山高速滑坡的形成条件为：

(1) 特定的地形地貌类型。震前右岸唐家山部位滑坡前地形总体坡度约40°，坡脚高程约665 m，坡顶分水岭部位高程近1500 m，相对高差达835 m，潜在势能大，再加之唐家山边坡坡体上下游有大水沟、小水沟切割，形成三面临空的地貌条件。同

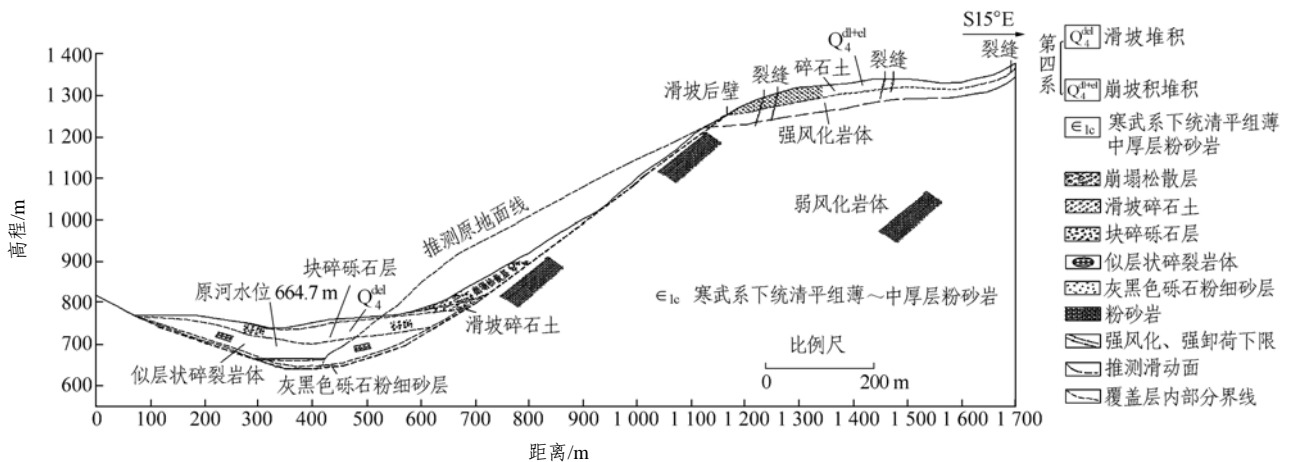


图7 唐家山滑坡及堵江堰塞坝工程地质横剖面图(横河方向)

Fig.7 Engineering geological cross-section of Tangjiashan landslide and its barrier dam(crossing Tongkou River)



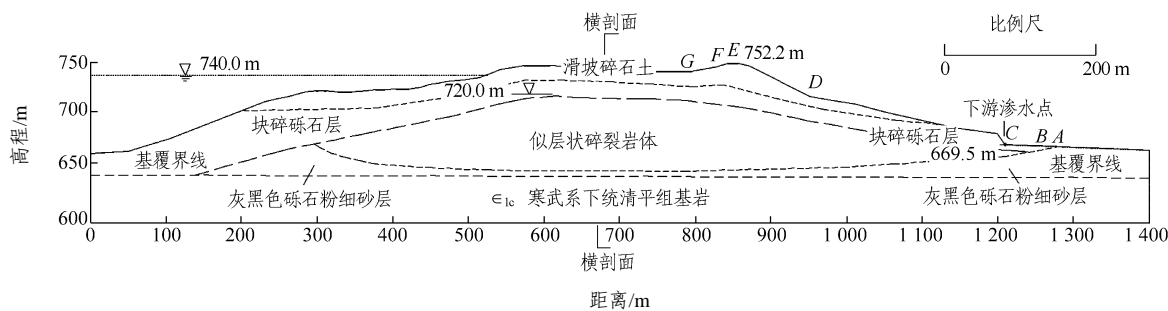


图 8 唐家山堰塞坝工程地质纵剖面图(顺河方向)

Fig.8 Engineering geological longitudinal section of Tangjiashan barrier dam(along Tongkou River)



(a) 反倾似层状结构(面朝通口河上游)



(b) 面朝通口河下游(泄流槽左岸堰塞坝似层状结构)



(b) 破碎大块石(面朝滑坡体后壁方向)

图 9 堰塞坝前缘(通口河左岸)部位因阻挡挤压而成反倾似层状结构及破碎大块石

Fig.9 Antidip similar lamellar structure and block rock in the front of barrier dam formed by holding up and extrusion



(a) 面朝滑坡体后壁方向(泄流槽底部似层状结构)

图 10 堰塞坝中、后缘(原通口河河道)部位仍保持较完整的似层状结构(溢流冲刷后)

Fig.10 Relatively unabridged similar lamellar structure in the middle-behind of barrier dam after flooding and washing

时, 唐家山边坡本身地处通口河凹岸部位, 长期的水流冲刷边坡坡脚, 导致边坡潜在稳定性一般, 已经具备滑坡形成的所有地形条件。

(2) 特定的岸坡结构。唐家山边坡坡体为寒武系清平组硅质岩夹泥岩, 岩层倾向左岸, 倾角 50°~85°, 为典型的中陡倾顺向坡。同时位于青林口倒转复背斜的核部一带, 受北川—映秀早期逆冲断层影响, 坡体中褶皱、断层较多, 边坡岩体完整性总体较差, 而其中的顺向坡地层中又随机夹有泥岩等软弱夹层, 受构造影响多显示顺层挤压、破碎带发育, 厚度 5~20 cm, 遇水易泥化和软化, 因此很容易构成潜在滑面。

因此, 上述地形组合及顺向岸坡结构是产生滑坡的内在条件<sup>[15]</sup>。

(3) 汶川“5.12”大地震触发。从唐家山滑坡体与北川—映秀断裂的位置关系分析, 此边坡距北川—映秀断裂直线距离约 2.3 km, 并位于断裂带的上盘, 基本靠近发震断裂部位, 受强大地震力作

用, 导致唐家山顺层基岩边坡高速下滑。显然汶川“5.12”大地震是唐家山边坡失稳的触发因素和必要条件。

#### 4.2 堵江机制

一般而言, 滑坡能否堵江主要取决于以下3个方面因素:

(1) 滑坡下滑速度。如上所述, 唐家山滑坡相对高差 540 m、斜坡滑移 900 m, 据当地老乡介绍, 地震触发下滑形成气浪不到 0.5 min, 据此可得出斜坡下滑速度平均达 30 m/s, 属典型超高速滑坡。

(2) 主河道水流流量和速度。根据通口河在唐家山附近上游 4 km 漩坪部位计算获得的多年水文径流资料, 丰水期(5~10月)平均流量为 80.9 m<sup>3</sup>/s、相应流速约 4 m/s; 枯水期(1~4, 11, 12月)平均流量为 37.7 m<sup>3</sup>/s、相应流速约 2 m/s。发生地震时的 2008年5月12日代表的5月中旬日平均流量为 75.2 m<sup>3</sup>/s。由此可见, 上述流量和流速相对于规模数千万方的高速滑坡而言, 要短时间内冲刷带走的可能性很小。

(3) 主河道宽度。唐家山部位通口河在枯水期水面高程约 665 m 时对应的河宽 100~130 m, 水深 0.5~4.0 m; 同时, 唐家山对岸元河坝原貌山坡总体坡度 25°~40°(见图 11), 临空条件非常有限, 高速下滑滑坡在河床部位快速剪切后很快会被对岸受阻而堵江。



图 11 震前左岸元河坝原貌(面朝上游)

Fig.11 Natural topography and geomorphology of Yuanheba in the left bank of Tongkou River before earthquake(facing upstream)

因此, 唐家山高速滑坡形成及堵江机制大致可概括为以下 5 个阶段: 顺向岸坡结构地震诱发→滑坡体前缘剪切、后缘拉裂→高速下滑、形成气浪、

前缘刨蚀河床、对岸受阻隆起→后缘边坡坐落下滑→堰塞堵江。

## 5 唐家山堰塞坝稳定性及可能溃坝模式分析

### 5.1 定性分析

根据堰塞坝体形态、地质结构特点、规模及所处的地形条件等因素综合分析表明, 堰塞坝整体稳定, 上下游局部可能存在失稳, 但发生整体溃坝的可能性极小。

#### (1) 堰塞坝整体稳定

堰塞坝整体稳定的理由如下:

① 坝体平面形态为长条形, 顺河长度达 803.4 m, 横河向最大宽度 611.8 m(平均宽度 550 m), 一般长短轴比达到 0.7~1.3, 坝体规模巨大。

② 上下游坡比分别为 1:4 和 1:2.4, 与常规土石坝规范设计坡比相比<sup>[16]</sup>, 即: 心墙堆石坝: 上下游坡一般为 1:1.8~1:2.5(极端为 1:1.3); 面板堆石坝: 上下游坡一般为 1:1.4~1:1.6。由此可见, 该堰塞坝上下游坡比均比 2 种不同类型的土石坝设计坡比要缓得多, 均属稳定坡比。

③ 堰塞坝体绝大部分仍保持较完整的似层状地质结构, 尤其是坝体中部和底部整体性良好。

④ 堰塞坝体本身处在通口河凹岸大拐弯部位, 堰塞湖水位升高形成的压力会因河流弯道而分解, 作用在堰塞坝上的动水压力会大大减小。因此, 随着堰塞湖水位的抬升, 尽管会产生巨大的水平推力, 不过坝体因上述几方面因素的综合效应, 整体稳定, 发生整体溃坝的可能性不大。

#### (2) 堰塞坝局部稳定性较差

根据堰塞坝地质结构特点, 其上下游部位边坡由于滑坡解体破碎强烈, 结构松散而稳定性稍差。分析表明:

① 上游侧坡面会因堰塞湖水位抬升并叠加余震影响, 而形成部分坍岸, 坍岸范围预计在靠上游侧明显破碎的块碎石部分。

② 下游侧坡面会因坝体渗漏出现局部小规模坍滑, 但随着湖水过坝溢流逐渐形成自下游往上游的溯源侵蚀或淘刷, 靠溢流槽附近会逐级坍岸。不过上下游坡面的局部失稳并不影响堰塞坝整体稳定。

(3) 堰塞坝以浅表层“溢流溃决破坏”的方式为主



唐家山属于中陡倾角顺层岩质高速滑坡, 下滑剪切位移空间有限, 形成的堰塞坝具有中下部保持似层状岩体结构, 颗粒粗大, 而浅表层以解体的块碎砾石及碎石土的下粗上细结构为特点, 这种堰塞体结构在湖内水位上涨过程中, 要发生管涌(渗漏)破坏的可能性极小, 2008 年 6 月 5 日在堰塞坝下游坡脚部位形成的清水渗漏(见图 12), 总渗水量达  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , 且堰塞体稳定, 也再次说明其颗粒粗大。不过随着堰塞湖水位的抬升, 会形成过坝溢流, 并表现出浅表层块碎石土被逐级淘刷的“溢流破坏”方式为特点。

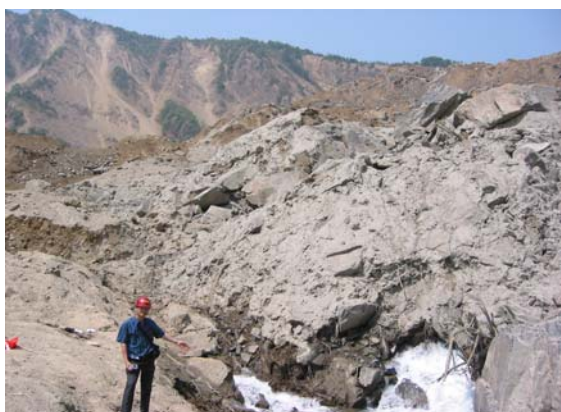


图 12 堰塞坝下游坡脚附近沿似层状结构岩体形成清水渗漏(面朝上游)

Fig.12 Filtered water leakage from similar lamellar structure rock mass near the downstream at barrier dam(facing upstream)

因此, 唐家山堰塞坝的溃决模式将会以浅表层块碎石土逐级淘刷的溢流破坏方式进行, 不会发生管涌(渗漏)破坏模式并导致整体溃坝。

### 5.2 定量分析

根据上述定性分析结果, 本次研究结合图 8 所示的堰塞坝工程地质纵剖面, 有针对性地对堰塞坝体在高水位条件下, 对下游侧边坡进行了稳定性计算。考虑堰塞坝体中部凹槽最低高程为  $752.2 \text{ m}$ , 在未对其采取任何工程措施情况下, 当堰塞体上游库水位达到  $752.2 \text{ m}$  最高高程, 同时下游无水, 且堰塞坝处于饱和状态, 此工况应为堰塞坝未采取任何工程措施下的稳定性最差状况。针对该假设, 采用堰塞坝凹槽部位典型纵断面对其上下游边坡分别进行稳定性分析, 计算原理为基于刚体极限平衡法的简化毕肖普法<sup>[17]</sup>, 潜在滑动面采用圆弧滑动面模式, 边坡稳定分析示意图见图 13。其中的点 A, B, C 为预测可能潜在剪出口部位, 而点 D, E, F 和 G 则为预测可能潜在滑移后缘边界, 均属于随机确定。

根据堰塞坝土体组成物质、唐家山部位已有实验成果和经验判断, 提出堰塞坝体物理力学参数建议值(见表 1)。同时考虑余震影响, 地震烈度分别考虑 VII 度(水平地震加速度取  $0.1 \text{ g}$ )、VIII 度(水平地震加速度取  $0.2 \text{ g}$ )。因堰塞体位于谷底并为堆积散体, 故地震综合影响系数取  $0.25$ 。不同工况条件下稳定性分析成果见表 2。

稳定性分析计算表明, 当堰塞湖水位达到  $752 \text{ m}$  高程时, 堰塞坝下游侧边坡总体稳定, 其中稳定性最小的潜在滑面为 BF, 天然状态稳定系数  $K = 1.105$ , 处于基本稳定状态; 当叠加 VII 度地震,  $K = 1.022$ , 处于欠稳定状态; 当叠加 VIII 度地震,  $K = 0.950$ , 处在不稳定状态。当堰塞湖水位达到  $740 \text{ m}$  高程时, 堰塞坝下游侧部位整体及局部均稳定, 均不会发生下滑溃决的可能。这一结果与前面定性分

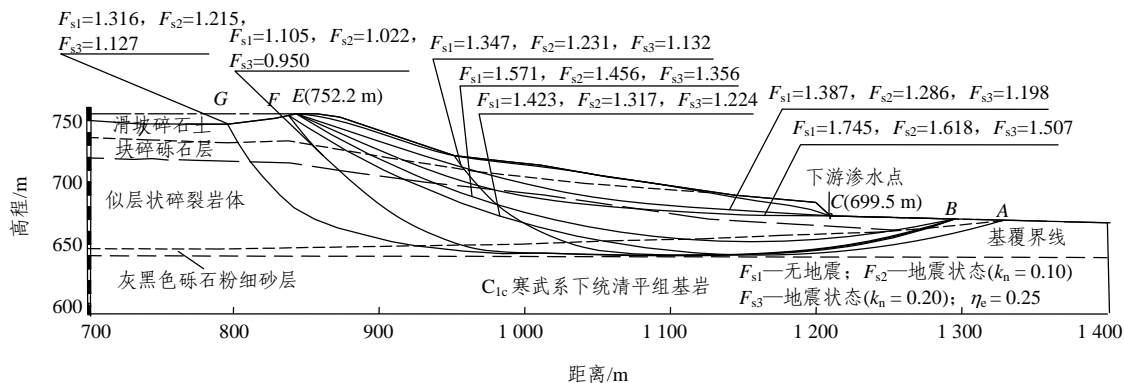


图 13 堰塞湖水位 752 m 时堰塞坝下游侧边坡稳定分析示意图

Fig.13 Sketch of slope stability analysis in the downstream of barrier dam with water level of 752 m

表1 堰塞坝体物理力学参数建议值表

Table 1 Proposal physico-mechanical parameters of barrier dam

| 层位       | 密度 $\rho$<br>/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |     | 内摩擦角<br>$\varphi(^{\circ})$ |    | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ |    | 渗透系数<br>$k$<br>/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 允许<br>坡降<br>$J$ |
|----------|---|-----|-----------------------------|----|-----------------------|----|---|-----------------|
|          | 天然  | 饱水  | 天然                          | 饱水 | 天然                    | 饱水 |   |                 |
|          | 碎石土   | 1.8 | 1.9                         | 22 | 16                    | 10 |   |                 |
| 块碎砾石     | 2.0   | 2.1 | 35                          | 30 | 30                    | 10 | $5 \times 10^{-2}$                                  | 0.40~0.60       |
| 似层状碎裂岩体  | 2.1   | 2.2 | 45                          | 36 | 60                    | 30 | $5 \times 10^{-3}$                                  | 0.70            |
| 灰黑色含泥粉细砂 | 1.8   | 1.9 | 18                          | 15 | 10                    | 0  | $1 \times 10^{-5}$                                  | 0.50            |

表2 堰塞坝体下游侧在不同工况条件下稳定性分析成果表

Table 2 Results of stability analysis in downstream barrier dam under different conditions

| 潜在滑面  | 上游水位 752 m 高程 |         |          | 上游水位 740 m 高程 |         |          |
|-------|---------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
|       | 无地震           | VII 度地震 | VIII 度地震 | 无地震           | VII 度地震 | VIII 度地震 |
|       | CE(上)         | 1.387   | 1.286    | 1.198         | 1.745   | 1.595    |
| CE(下) | 1.745         | 1.618   | 1.507    | 1.947         | 1.787   | 1.650    |
| BD    | 1.347         | 1.231   | 1.132    | 1.446         | 1.314   | 1.203    |
| BE    | 1.571         | 1.456   | 1.356    | 1.679         | 1.547   | 1.433    |
| AF    | 1.423         | 1.317   | 1.224    | 1.473         | 1.357   | 1.256    |
| BF    | 1.105         | 1.022   | 0.950    | 1.228         | 1.130   | 1.046    |
| BG    | 1.316         | 1.215   | 1.127    | 1.534         | 1.401   | 1.287    |

析结果完全相符。

由于堰塞坝上游边坡部分主要为块碎石土，其坡度较缓，所以在假设的上游水位达到 752 m 高程，在堰塞湖水浸泡并叠加 VII, VIII 度余震下，发生坍塌的可能性大，但也仅局限在前缘松散块碎石土中。考虑通过溢流槽泄洪后，水位下降较快，在极端水位骤降 40 m 条件下，沿松散堆积体发生坍塌的可能性更大，不过上述各工况形成的坍塌最大影响宽度约 100 m，不会影响到堰塞坝整体稳定。

2008年6月10日13时通过人工泄流槽谷成功泄流，形成宽度平均 100 m、槽深平均 40 m 的溢流槽，将整个堰塞坝靠溢流槽附近冲刷带走近  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，占整个堰塞坝总量的 24.5%，除靠溢流槽部位因水流淘刷以及堰塞坝上游侧边坡发生坍塌外，整个堰塞坝整体稳定，实践证明上述分析是合

理的正确。

## 6 结 论

(1) 唐家山高速滑坡是在震前地形总体坡度较陡，三面临空且地处通口河凹岸等特定地形部位，以及典型的中陡倾顺向岸坡结构组合基础上，因北川—映秀断裂(直线距离约 2.3 km、并位于断裂带的上盘)复活、受汶川“5.12”大地震(高烈度 XI 度)触发而形成的。

(2) 作为高烈度地震诱发下形成的唐家山中陡倾角顺层高速大型滑坡，在地震触发下整个下滑时间约 0.5 min，前后缘相对高差 540 m，相对斜坡滑动位移 900 m，推测最大下滑速度约为 30 m/s，快速下滑堵江而形成的堰塞坝顺河向长 803.4 m，横河向最大宽度 611.8 m，坝高 82~124 m，平均面积约  $3 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，推测体积为  $20.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，在平面上呈“长条形”。

(3) 结合唐家山地质环境条件及地震诱发，其高速滑坡形成及堵江机制大致可概括为 5 个阶段：顺向岸坡结构地震诱发→滑坡体前缘剪切、后缘拉裂→高速下滑、形成气浪、前缘刨蚀河床、对岸受阻隆起→后缘边坡坐落下滑→堰塞堵江。

(4) 根据滑坡形成条件及滑坡下滑速度、主河道水流流量和速度及主河道宽度，与一般的“远程”及“碎屑流体”高速滑坡不同，唐家山高速滑坡属于“岩质高速短程滑坡”，为非常特殊的“滑坡堵江”案例。正是由于“岩质”和“短程”，才会导致堰塞坝体具备良好的似层状结构，整体稳定性较好，具有很强的整体抗溃决能力。

(5) 根据堰塞坝体形态、地质结构特点、规模及所处的地形条件等因素综合分析表明，在堰塞湖水抬升过程中，上下游坡面局部会发生坍塌，但堰塞坝整体稳定。同时因堰塞体地质结构良好，发生管涌(渗漏)破坏的可能性小；在湖水沿中部凹槽溢(泄)流过程中，将会形成逐渐淘刷、拓宽溢流槽谷的溢流破坏方式，但不会形成整体或绝大部分溃坝。

### 参考文献(References):

[1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural



- dams[M]. [S.l.]: Geological Society of America Bulletin, 1988: 1 054 - 1 098.
- [2] PERRIN N D, HANCOX G T. Landslide-dammed lakes in New Zealand—preliminary studies on their distribution causes and effects[J]. *Landslide*, 1990, 22(3): 1 457 - 1 465.
- [3] SCHUSTER R L, COSTA J E. Effects of landslide damming on hydroelectric projects[C]// *Proceedings of the Fifth International Association Engineering Geology*. [S.l.]: [s.n.], 1986: 1 295 - 1 307.
- [4] PICARD M D. Cannon landslide dam, the Abruzzi, East-Central Italy[J]. *Journal of Geological Education*, 1991, 39(5): 428 - 431.
- [5] BROOKS G R, HICKIN E J. Debris-avalanches in poundments of Squamish River Mount Caylaey area, Southwestern British Cohembia[J]. *Canadian of Earth Science*, 1991, 91(2): 129 - 140.
- [6] ASANSA M, NIETO G P, YEPES H. Landslide blockage of the Pisque river, Northern Ecuador[J]. *Landslide News*, 1991, 54(1): 1 899 - 1 934.
- [7] JENNINGS D A, WEBBY M G, PARTIN D T. Tunawaea landslide dam, King Country, New Zealand[J]. *Landslide*, 1991, 23(4): 1 448 - 1 452.
- [8] MORA S, MADRIGAL C, ESTRADA J, et al. The 1992 Rio-Toro landslide dam, Costa Rica landslides section[R]. [S.l.]: Disaster Prevention Research Institute, 1993: 1 183 - 1 128.
- [9] 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, 26(12): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433 - 454.(in Chinese))
- [10] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. *山地学报*, 2007, 25(1): 72 - 84.(CHENG Qiangong, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Ruiqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(1): 72 - 84.(in Chinese))
- [11] 邓建辉, 陈菲, 尹虎, 等. 泸定县四湾村滑坡的地质成因与稳定评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 1 945 - 1 950. (DENG Jianhui, CHEN Fei, YIN Hu, et al. Geological origin and stability evaluation of Siwancun landslide in Luding County[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 1 945 - 1 950.(in Chinese))
- [12] 李守定, 李晓, 吴疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480. (LEE Souting, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480.(in Chinese))
- [13] 李守定, 李晓, 刘艳辉. 清江茅坪滑坡形成演化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 377 - 384.(LEE Souting, LI Xiao, LIU Yanhui. Study on generation and evolution of Maoping landslide on Qingjiang River[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(2): 377 - 384.(in Chinese))
- [14] 邓建辉, 闵弘, 魏进兵, 等. 再论茅坪滑坡的复活机制与治理可行性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 378 - 2 383.(DENG Jianhui, MIN Hong, WEI Jinbing, et al. Further investigation on reactivation of Maoping landslide and its possible control measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 378 - 2 383.(in Chinese))
- [15] 黄润秋, 赵建军, 巨能攀, 等. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 239 - 246.(HUANG Runqiu, ZHAO Jianjun, JU Nengpan, et al. Study on deformation mechanism and control method of bedding rock slope along Tangtun Expressway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 239 - 246.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5395 - 2007 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5395 - 2007 Design specification for rolled earth-rock dams[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.(in Chinese))
- [17] 罗红明, 唐辉明, 胡斌, 等. 考虑地震力的刚体极限平衡法及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 1): 3 591 - 3 595.(LUO Hongming, TANG Huiming, HU Bin, et al. Rigid limit equilibrium method considering seismic force and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.1): 3 591 - 3 595.(in Chinese))