

唐家山堰塞湖应急除险技术实践

刘 宁¹, 杨启贵²

(1. 中华人民共和国水利部, 北京 100053; 2. 长江水利委员会设计院, 武汉 430010)

[摘要] 简要介绍了唐家山堰塞湖应急除险工程概况, 归纳了堰塞湖有关地形地质、水情等资料的快速获取与应用技术, 从形成条件、形成过程等方面对堰塞坝形成机制进行了分析, 对堰塞坝做了安全性分析评估, 并对溃坝洪水进行了分析计算; 概要论述了唐家山堰塞湖应急除险总体方案、开槽引流方案及除险效果。

[关键词] 地震; 唐家山堰塞湖; 滑坡; 溃坝

[中图分类号] P231.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)06-0074-08

1 前言

唐家山堰塞湖位于通口河四川省北川县城上游 3.2 km、苦竹坝电站库区内, 是汶川大地震形成的一座极高危险级的堰塞湖, 严重威胁着下游绵阳、遂宁 130 多万人民的生命和宝成铁路、兰成渝输油管道等重要基础设施的安全。

唐家山河段河谷深切, 谷坡陡峻, 震前枯水期水位 665 m。堰塞坝平面形态为长条形, 顺河长约 803 m, 横河宽约 611 m, 平面面积约 $30 \times 10^4 \text{ m}^2$, 坝高 82 ~ 124 m, 体积 $2\ 037 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坝顶地形起伏较大, 横河方向左高右低, 左侧最高点高程 793.9 m, 右侧最高点高程 775 m。右侧顺河方向有一弓形沟槽贯通上下游, 底宽 20 ~ 40 m, 中部最高点高程 752.2 m。堰塞湖最大可蓄水量 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 坝前湖底高程约为 663 m。

2008 年 5 月 14 日, 唐家山堰塞湖在地震后的航拍影像上被发现, 自此, 工程技术人员进行了大量的技术准备工作。5 月 21 日, 在解放军陆航部队的帮助下, 工程技术专家乘直升机首次降落唐家山坝顶, 经过实地查勘堰塞坝现场认为: 堰塞湖险情危急, 但湖内水情基本具备实施工程除险的时间可能^[1]。

2 资料的快速获取与应用技术^[2~4]

2.1 地形资料的快速获取与应用

唐家山堰塞湖属突发性灾害, 堰塞坝的库区、坝区和下游影响区无完整、满足精度要求的地形资料, 急需总库容、存湖水量、影响区范围等重要的数据, 这是一切技术工作的基础。为此, 坝区范围进行了实测, 库区和下游影响区多渠道收集地形和影像资料进行综合辨识拟定, 局部应用遥感技术进行了补测。

1) 多种资料的系统化处理。对收集到的多种地形资料, 经数字化处理、不同时期座标系统校正、遥感影像资料云层数据删除和插值重构等多种技术处理后作为基本资料。

2) 堰塞湖水位容积曲线辨识与确定。堰塞湖水位容积曲线是进行溃坝洪水分析、调洪演算以及制定除险方案的重要资料。多家单位分别依据 1:50 000 航拍地形图、1:50 000 DEM 数据、漩坪电站库容曲线加漩坪至唐家山 1:2 000 地形图, 提出了不同的水位容积曲线。经综合比对分析, 确认工程抢险方案制定和水情预测预报均统一采用漩坪电站库容曲线加漩坪至唐家山 1:2 000 地形图量算的成果。虽然这一成果来自地震前的资料, 存在地震后山体滑坡对水位容积曲线的影响, 但作为应急处置需要, 精度是满足要求的。

3) 洪水演进计算断面地形资料提取。按照精

[收稿日期] 2009-04-10

[作者简介] 刘 宁(1962-), 男, 辽宁丹东市人, 教授级高级工程师, 中华人民共和国水利部总工程师; E-mail: liuning@mwr.gov.cn

度优先、相对系统完整的原则,首先直接采用实测大断面资料,然后尽可能在大比例尺地形图上截取断面,最后仍不足部分用 DEM 数据提取。

2.2 高程系统统一方法

2008年5月21日在唐家山堰塞坝上设置了相对高程坐标系,进行了坝体地形测量和坝前水位观测,但与国家高程系统的关系不清,不能直接用于水情预报、洪水演进计算。专家们结合河道比降、堰塞湖水面比降综合分析认为,唐家山上游的治城水位站与唐家山坝前水位在同一时刻水位观测值高差在0.40 m以内,据此建立了坝前水位与国家高程系统之间的关系,并对堰塞坝实测地形图进行了校订。利用相对参照物建立突发灾害体与国家高程系统的关系是应急条件下可以采用的一种方法。

2.3 坝址水情资料快速拟定

唐家山堰塞坝地处龙门山暴雨区,集水面积3 550 km²,多年平均年降水量1 355.4 mm,多年平均流量92.3 m³/s。依靠我国系统的水文测验站网资料,专家们快速拟定了通口河唐家山断面降雨与径流关系;利用唐家山堰塞坝集水面积与漩坪水电站集水面积相近的有利特点,采用水文比拟法快速推算出了唐家山坝址各频率设计洪水流量、典型设计洪水过程线和各频率洪水对应的面降水量。经推算,百年和两百年一遇洪峰流量分别为6 040 m³/s和6 970 m³/s。

2.4 堰塞坝工程地质速判

工程技术专家于2008年5月21日从空中登陆唐家山堰塞坝,进行了现场调查和地表地质测绘,依靠专家丰富的经验对坝体物质组成进行了地表分区和物理力学参数拟定。

参考同类地层地质资料,结合专家经验现场研判认为,唐家山堰塞坝体由原右岸山坡的残坡积碎石土和基岩经下滑、挤压、破碎形成,坝体物质主要由挤压破碎的碎裂岩组成,在坝体右侧上部覆盖有原山坡上的残坡积碎石土。坝体物质碎石土约占14%,碎裂岩约占86%。结合坝体形态分析认为,坝体总体稳定性较好,整体溃滑可能性不大。

现场观察和地质分析认为,由于滑坡下滑时的巨大冲力,苦竹坝库区沉积的含泥粉细砂隆起并堆积在上游坝坡,起到了一定的防渗作用,坝体渗透稳定性较好,坝体出现整体渗透破坏的可能性小,但不排除碎裂岩局部存在架空现象,当水位上涨到一定高程时存在集中漏水的可能,并可能造成下游坝坡

局部发生坍塌。

堰塞坝右侧地势低,坝体上部为原坡顶残坡积碎石土,天然状态下湖水上涨后将首先从堰塞坝中部偏右侧过流,右侧上部的碎石土和强风化碎裂岩极易被水流冲刷,右侧沟槽可能会快速下切。但若在右侧开槽引流,开挖方量少,碎石土也方便施工,且引流渠出口段分布的碎裂岩在泄水的过程中将延缓水流下切速度,有利于减轻下泄洪水对下游的影响。

3 堰塞坝形成机制分析^[5~7]

3.1 形成条件

1)地形地貌条件。河谷切割程度和地形坡度是滑坡堵江的两个主要控制指标。河谷切割深浅决定了斜坡的失稳体积和所具有能量的大小;坡体陡缓决定滑坡稳定。一般地,易发生滑坡堵江的斜坡坡度在30°~45°之间,当坡度大于45°后,发生滑坡堵江的概率更高。通口河唐家山河段为不对称的V型河谷,右岸较陡,坡度约60°,属于高概率的滑坡堵江地形。同时唐家山河段切割深、河谷地形较窄,使得唐家山滑坡体失稳时具有较大的滑动体积和能量。

2)地层条件。滑坡堵江的发生与区域内存在的易滑地层有关。一般来说,粘土、泥岩、页岩、泥灰岩及其变质岩、软硬岩互层或易风化岩石构成的地层容易发生滑坡堵江。调查表明,唐家山坝址区两岸基岩为寒武系下统清平组薄层硅质岩、砂岩、泥灰岩和泥岩,岩层软硬相间,产状N60°E/NW∠60°。右岸为顺向坡,基岩裂隙较发育。因此,顺向坡及岩层节理裂隙发育,为遭遇诱发因素时的岩体滑动提供了物质基础。

3)河床水动力条件。滑坡堵江不一定形成堰塞湖,尚需满足一定的河床水动力条件。一是到达河床的土体不因水流作用产生流动,形成泥石流带走;二是河流具有较大的来水量,能在坝前蓄积成湖。据多年统计资料,唐家山堰塞坝坝址5月中旬、下旬多年平均日来水量为650×10⁴ m³,692×10⁴ m³,6月上旬、中旬、下旬多年平均日来水量为712×10⁴ m³,750×10⁴ m³和665×10⁴ m³。通口河为滑坡堵江形成堰塞湖提供了水动力条件。

4)诱发条件。降水和地震是形成堰塞湖的两个主要诱发因素,特别是强震,容易导致大量堰塞湖的产生。根据2008年5月16日中国地震局编制的《汶川地震初步确定的等烈度线》,唐家山坝址区地

震烈度在 10 度以上,当地震发生时,唐家山右岸岩质斜坡受到地震横波和纵波的作用,导致岩质斜坡突然滑动,高速入江形成堰塞湖。

3.2 形成过程

唐家山堰塞坝是由基岩顺层滑坡堆积形成,滑坡壁高约 634 m,滑床为基岩层面。滑坡高速下滑冲向左岸,顺坡爬高约 140 m,原坡体下部基岩形成的碎裂岩主要堆积在左侧,上部基岩形成的碎裂岩和残坡积碎石土堆积在右侧,形成左高右低的堰塞坝体(见图 1)。

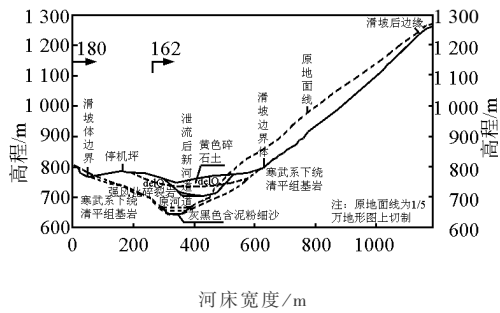


图 1 唐家山堰塞坝工程地质横剖面简图

Fig. 1 The project geologic transverse section brief figure of Tangjiashan barrier dam

现场判断滑坡为高速滑坡,平均滑速大于 10 m/s。为直观再现唐家山堰塞坝形成过程,同时也为验证现场专家的判断,在应急除险工作完成后,采用 DDA 方法对堰塞坝形成过程进行了数值仿真模拟,结果表明,滑坡滑动持续时间约 40 s,最大滑速达 29 m/s,平均滑速 15~16.5 m/s。图 2 和图 3 分别为滑动速度和滑距随时间变化过程曲线。

图 4 为滑坡形成堰塞坝后,坝体主应力分布图。图中应力分布规律显示,堰塞坝中下部因滑坡运动过程挤压产生与滑坡运动方向较为一致的挤压应力,主应力方向在河床底部与河床边界近于平行。主应力量值一般 2~4 MPa,最大主应力值 6~7 MPa。在滑体前缘与后缘一定范围,滑体被解体,应力较小。

4 堰塞湖安全性分析评估^[8~11]

堰塞湖是一种天然形成的蓄水体,不同于经过专门设计的水利工程设施,坝体材料没有经过人工选择和施工碾压,可能存在架空、内部物质组成和结构差异明显等现象,易产生渗透变形、沉降变形和稳定性等诸多工程问题,直接影响和决定着堰塞坝的溃决模式和过程。

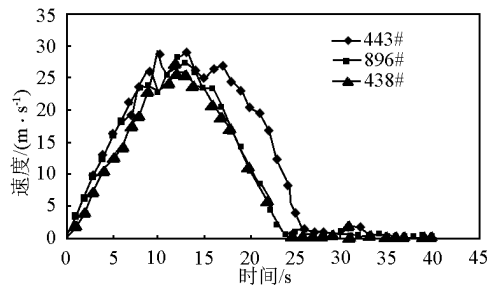


图 2 滑动速度随时间过程曲线

Fig. 2 The slide speed curve along with time

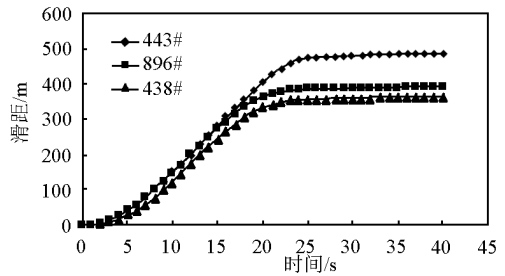


图 3 滑动距离随时间过程曲线

Fig. 3 The slide distance curve along with time

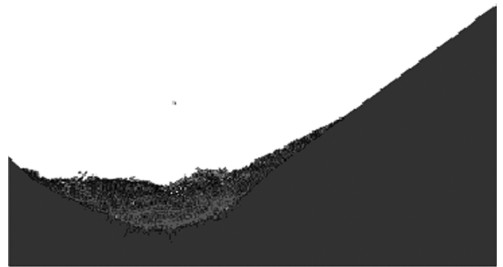


图 4 滑坡形成堰塞坝后主应力分布图

Fig. 4 The primary stress distributing figure of barrier lake caused by landslide

4.1 堰塞坝长期安全性评估

由于堰塞坝的复杂性,目前国内外尚无权威的堰塞坝长期安全性评估方法。地貌无量纲堆积体指数法(DBI)是一种常用的经验估算方法,在发现唐家山堰塞坝的初期,用该方法进行了堰塞坝长期安全性评估。

$$DBI = \log \left[\frac{A_b \times H_d}{V_d} \right] \quad (1)$$

式(1)中, V_d 为坝体体积; A_b 为流域面积; H_d 为坝高。安全性判断标准为:DBI < 2.75,稳定;2.75 < DBI < 3.08,介于稳定与不稳定之间;DBI > 3.08,不稳定。经计算,DBI为4.26~4.16,均大于3.08,处于不稳定域,存在溃坝风险。

4.2 堰塞坝物质抗冲能力分析

根据堰塞坝物质组成,按照下列经验公式进行了坝体物质冲刷能力初步分析。

泥沙起动流速—沙莫夫公式:

$$U_c = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (2)$$

泥沙起动流速—唐存本公式:

$$U_c = 1.53 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (3)$$

泥沙起动流速—张瑞谨公式:

$$U_c = 1.34 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{7}}} \quad (4)$$

基岩抗冲流速公式:

$$V = (5 \sim 7) \sqrt{d} \quad (5)$$

起动流速—伊兹巴斯公式:

$$U_c = K \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} 2gd} \quad (6)$$

式(2)~(6)中: γ_s 为泥沙颗粒(或块的石容重); γ 为水的容重; d 为泥沙颗粒(或块石)粒径; g 为重力加速度; h 为水深。

计算结果见表1和表2。由初步分析成果可见,松散介质当流速达2 m/s左右,严重碎裂岩介质当流速达4 m/s左右,完整碎裂岩介质当流速达8 m/s左右,将出现明显的冲刷。

表1 坝体物质抗冲能力分析(粒径:20~200 mm)

Table 1 The anti-erode ability analysis of dam material(diameter: 20~200 mm)

计算公式	粒径/mm	水深/m	起动流速/(m·s ⁻¹)
沙莫夫公式	20	1	1.24
唐存本公式	20	1	1.67
张瑞谨公式	20	1	1.33
沙莫夫公式	20	2	1.40
唐存本公式	20	2	1.87
张瑞谨公式	20	2	1.47
沙莫夫公式	20	3	1.49
唐存本公式	20	3	2.01
张瑞谨公式	20	3	1.56
沙莫夫公式	200	1	2.68
唐存本公式	200	1	3.60
张瑞谨公式	200	1	3.03
沙莫夫公式	200	2	3.01
唐存本公式	200	2	4.04
张瑞谨公式	200	2	3.35
沙莫夫公式	200	3	3.22
唐存本公式	200	3	4.32
张瑞谨公式	200	3	3.55

表2 坝体物质抗冲能力分析(粒径:1.0~2.0 m)

Table 2 The anti-erode ability analysis of dam material(diameter:1.0~2.0 m)

计算公式	粒径/m	抗冲(起动)流速/(m·s ⁻¹)
基岩抗冲流速公式	1.0	7.00
伊兹巴斯起动流速公式	1.0	7.51
基岩抗冲流速公式	1.5	8.57
伊兹巴斯起动流速公式	1.5	9.20
基岩抗冲流速公式	2.0	9.90
伊兹巴斯起动流速公式	2.0	10.63

4.3 可能溃决方式分析

堰塞坝溃决方式大体分为3种。一是坝体失稳导致坝体溃决,二是坝体渗透破坏导致坝体溃决,三是湖水漫顶导致坝体溃决。坝顶漫溢是导致坝体溃决破坏最常见的形式。

对于主要由土石料堆积物形成的天然坝而言,不论是何种原因导致大坝溃决,其溃决破坏通常分为瞬间溃(突然溃)和逐渐溃两种形式,主要取决于天然坝的体型、物质组成和溃坝诱因。

1)冲刷破坏将是主要破坏形式。唐家山堰塞坝物质组成大致可分为以碎石土为主体的右侧上部区和以碎裂岩为主的其他部位区。对以碎石土为主体的部位,其溃坝过程与人工土石坝的溃决有相似的特征。

土石坝漫顶冲刷过程可以用“陡坎”冲刷机理来描述。“陡坎”是指地面(河床面)在高程上突降,类似于瀑布状的地貌形态(见图5)。水流流过“陡坎”时,溢流水舌向下冲击河床面并产生反向漩流。漩流在垂直或者近似垂直的跌水面上施加剪应力,垂直向冲刷床面并掏蚀垂直跌水面的基础,造成跌水面失稳坍塌,整个“陡坎”就不断向上游发展。

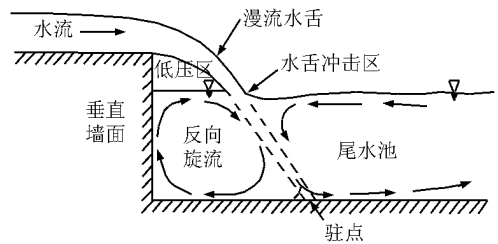


图5 “陡坎”示意图

Fig. 5 Sketch map of headcut

土石坝漫顶水流在坝下游坡面产生细冲沟似的冲刷。冲刷不断发展,形成一个细冲沟网,并最终发展成一个较大的沟壑。沟壑最初包含多个阶梯状的小“陡坎”,并随时间不断向上游后退,同时不断扩

宽,最后发展成一个大的“陡坎”。在水流的作用下,“陡坎”逐渐向上游发展,直到坝顶的上游边缘。此后一旦“陡坎”继续向上游发展将引起溃口处坝顶的降低,溃口流量也将迅速增加,最终导致大坝完全溃决。溃坝过程中沟壑的扩宽和“陡坎”向上游的发展是由“陡坎”下游射流冲击区周围的水流紊动和水流剪应力造成的。水流不断掏蚀“陡坎”底部,引起垂直面的失稳,从而导致溃口的扩宽和“陡坎”向上游不断发展。

相关专家在现场对唐家山堰塞坝瞬间溃与逐渐溃可能性进行了多次会商,认为唐家山堰塞坝主要由碎裂岩组成,不同于土层滑坡形成的堰塞坝,不会发生流土破坏。坝体中下部上游面被苦竹坝库内的含泥粉细砂形成的铺盖覆盖,防渗性较好,加之高速滑坡强烈的夯实作用,坝体下部结构密实,也不容易发生管涌破坏。因此,鉴于唐家山堰塞坝体积巨大,且上游坝坡较缓、上部为土质覆盖层,下部结构较密实,基本不存在整体瞬溃的危险。唐家山堰塞坝可能的破坏形式是在大流量水流作用下的冲刷破坏。实际情况也证实,初期仅在坝下游坡脚 669 m 高程一带发现几处出水点,随着坝前水位上升,在坝坡 700 m 高程左右发现一处新的出水点,流量 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$,流量稳定,水质清澈,无浑浊现象,说明坝体没有出现管涌破坏。

2) 坝体物质结构有利于避免全溃。现场估算唐家山堰塞坝上部约有 $700 \times 10^4 \sim 750 \times 10^4 \text{ m}^3$ 残坡积物和强风化岩体,属易被冲刷物质,而堰塞坝下部存在约 $1300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的碎裂岩。碎裂岩是堰塞坝的主体,它与一般的泥石流、土质滑坡堆积体有本质的不同,只要不出现高水头巨大流量冲刷等极端情况,不易出现快速整体全溃情况。

3) 引流渠沿线两处可见的碎裂岩有利于延缓溃决速度。现场地质调查并经开挖揭露证实,在引流渠沿线有两处碎裂岩,一处在引流渠出口段,一处在引流渠中部,虽然破碎较严重,但地层的层位关系尚在,抗冲刷能力相对较强,将对溃决速度起到延缓作用。

4) 部分高度范围将出现快速渐溃。唐家山堰塞坝上部的物质主要是由风化碎石土组成,一旦过流,必会下切侧刷。在右侧开槽引流后,由于堰塞坝体形及物质成分布特征,相对较破碎的碎裂岩在引流渠出口段外露,而坝体下部存在较厚的相对较完整的碎裂岩体,抗冲刷能力相对较强,由此判断唐

家山堰塞坝的溃决为受引流渠诱导的局部高度溃决,且沿程冲刷与溯源冲刷并存,在水能作用下拓宽冲深引流渠,溃决过程是一个渐进的过程。但这一渐进过程只是相对瞬间溃而言的,由于坝体上部物质为松散物,其渐溃过程仍是非常快的,过程也仅在数小时内。

4.4 溃口参数分析

溃口形态是决定溃坝洪水的关键参数。现场采用经验公式法并结合地质调查分析进行了综合研判。

1) 溃口宽度分析。现场用下列经验公式对堰塞坝可能的溃口宽度进行了估算。

铁道部科学研究院公式:

$$b_m = K(W^{1/2}B^{1/2}H_0)^{1/2} \quad (7)$$

黄河水利委员会公式:

$$b_m = K(W^{1/2}B^{1/2}H_0)^{1/2} \quad (8)$$

谢任之公式:

$$b_m = KWH_0/(3E) \quad (9)$$

式(7)~(9)中: K 为与坝体土质有关的系数; W 为水库蓄水量; B 为坝顶宽度; H_0 为坝前水深; E 为坝址横断面面积。通过以上3个经验公式估算得出的溃口宽度分别为200 m,400 m和120 m。

根据坝体物质组成及分布结构分析认为,自坝体中部向右侧,以碎裂岩为主的坝体在冲刷过程中可形成相对稳定的坝坡。据此量算,溃口的最大开口宽度为340 m。

现场综合分析确定,在752.2 m水面线的溃坝宽度取为340 m,口门形态左侧较陡,右岸较缓,形状呈梯形。

2) 溃口底高程分析。根据现场调查、附近区域地质勘察资料及参考类似地层岩体风化状况,推测右岸一般区域地表有20 m左右残坡积物(覆盖层),岩体有10 m左右全风化带,再考虑碎裂岩面不可能规则和碎裂岩的抗冲刷能力,强风化底板高程720 m左右是可能性最大的溃口底高程。按坝高计,该高度约为坝高的1/3。

当遭遇强余震、强降雨、库内 $1650 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的马铃薯古滑坡入江涌浪等恶劣和极端条件,导致高水头巨大流量漫坝,也可能出现坝体全高度或一半高度溃坝。

4.5 堰塞坝稳定性计算分析

唐家山堰塞坝稳定性受到各方面的高度关注,除险期间,水利部组织多家单位进行了多方案的稳

定性分析。部分高校和科研单位还自发进行了稳定性分析。

综合各方面的计算成果,多数成果认为坝体整体稳定性较好;也有部分成果认为高水位时遭遇恶劣工况存在局部垮坝的可能;还有成果认为当上游水位达到 745 m 时,下游坝坡处于滑动的临界状态,当上游水位达到 752 m 高程时,坝体达到极限平衡状态。

5 溃坝洪水分析^[12,13]

溃坝洪水分析目前仍处于探索阶段。对水流下泄的模拟,主要有堰流公式法和水动力学方法;对溃口床面冲刷的模拟,主要有基于泥沙输移方程和冲刷率方程的方法;溃口发展过程的模拟主要有机理法(使用基于水力学、泥沙运动学和土力学方法的冲刷模型,预测溃口的发展过程和出流过程)、参数法(估算出溃口形成历时、最终的溃口形状和溃口尺寸,假定溃口的发展过程,再由水力学方程计算溃口的出流过程)、预测方程法(建立经验公式计算洪峰流量、溃决历时和溃口宽度等溃决参数,并假定一个近似合理的发展过程)和对比分析法(基于尺寸和构造类似的已失事坝,应用对比分析的方法估算被研究坝的溃坝出流过程及其他溃决参数)。

为满足确定人员避险影响范围需要,评估对沿途基础设施的影响,多家单位共进行了近 200 个方案的溃坝洪水计算,分析了溃坝洪水从坝下至北川、绵阳、重庆的演进过程。部分计算还考虑了下游水利设施滞洪作用,及与涪江、长江不同洪水遭遇的工

况。

溃坝洪水计算分全溃、1/2 溃决和 1/3 溃决 3 种典型模式和不同的二次溃决方式。典型模式的溃口概化为梯形,顶部宽度均为 340 m,溃口底部高程分别为 663 m,695 m 和 720 m,溃口底部宽度分别为 100 m,35 m 和 35 m,溃口深度分别为 89 m,57 m 和 32 m,起溃水位均设定为 752 m。溃决时间从 0.5 h 到 24 h。

表 3 为 3 种典型溃坝模式下游洪峰流量及洪峰到达时间。在全溃、持续时间为 1 h 情况下,溃口最大洪峰流量可达 117 200 m³/s,到达绵阳市流量为 26 800 m³/s,超过防洪设计流量;在 1/3 溃决、持续时间为 3 h 情况下,溃口最大洪峰流量可达 21 100 m³/s,到达绵阳市流量为 11 800 m³/s。

计算分析表明,溃坝洪峰流量取决于起溃水位、溃坝历时和溃口形状及其发展过程等,起溃水位越高、溃决历时越短、溃口宽度和深度发展越快,坝址洪峰流量越大。因此,通过开挖引流槽等措施有效降低起溃水位,减少可泄水量,可以明显降低坝址洪峰流量,减轻溃坝洪水对下游的威胁。

计算结果同时表明,1/3 溃坝、1/2 溃坝、全溃坝的短时溃决方案,通口河河口以上洪峰流量均超出河道安全泄量,通口河以下亦接近或超出河道安全泄量。因此,在采取工程措施除险的同时,需制定坝下游人员转移预案,规避潜在的溃坝风险,且通口河河口以上地区人员需首先转移避险。

表 3 典型溃坝模式下坝下游洪峰流量及到达时间表

Table 3 The dam downstream flood peak runoff and arrival time table in typical dam break model

溃坝模式	溃决时间/h	溃口洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	北川(坝下游 4.6 km)		通口镇 (坝下游 24.0 km)	铁路桥 (坝下游 48.0 km)	绵阳市 (坝下游 68.9 km)	
			洪峰流量	到达时间/h	洪峰流量	洪峰流量	洪峰流量	到达时间/h
			/(m ³ ·s ⁻¹)		/(m ³ ·s ⁻¹)	/(m ³ ·s ⁻¹)	/(m ³ ·s ⁻¹)	
1/3 溃 决	1	43 200	38 700	1.08	28 400	23 500	12 800	5.88
	2	29 600	28 900	2.08	24 800	21 800	12 900	6.67
	3	21 100	21 050	2.97	19 900	18 300	11 800	7.47
1/2 溃 决	1	80 500	75 300	1.03	53 500	43 500	20 000	5.00
	2	47 200	46 800	2.03	42 400	38 100	19 400	5.75
	3	32 600	31 700	2.90	32 200	31 000	18 000	6.50
全 溃	1	117 200	115 200	1.00	70 000	48 700	26 800	4.38
	2	63 100	62 000	1.80	55 000	45 200	26 600	5.08
	3	43 200	42 400	2.17	41 300	38 000	25 600	5.75

分析成果表明,坝体一次溃决至 720 m 后再发生二次溃决,溃坝洪水对绵阳市基本不构成威胁。

6 应急除险总体方案^[11]

鉴于唐家山堰塞湖的特殊复杂性和堰塞坝除险的高风险性,为确保无一人伤亡的目标,最大限度减少湖水下泄造成的损失,争取避免堰塞坝快速溃决这一恶劣工况对下游造成的灾难性损失,按照“安全、科学、快速”的除险原则,在有限的时间内同步实施应急除险工程措施和人员转移避险非工程措施。

应急除险工程措施为开挖引流渠引流冲刷。人员转移避险措施为根据不同溃坝模式演算的洪水过程和风险评估成果,由地方政府制定人员转移避险方案,实行黄、橙、红三级预警机制,下游绵阳和遂宁两市受 1/3 溃坝风险威胁的 27.76 万人全部转移到安全地带,同时制定 1/2 溃坝和全溃坝方案的人员转移预案。

为确保除险方案的实施,需建立可靠的应急保障体系。为此,建立了水雨情预测预报体系、堰塞坝体远程实时视频监控系统、坝区安全监测系统、坝区通信保障系统,以及防溃坝专家会商决策机制。

7 开槽引流方案^[1,11]

1) 方案构想:考虑地势相对较低的坝体右侧表层以碎石土为主,抗冲刷能力低,利用溯源冲刷原理,充分发挥水流的挟带能力,冲深拓宽形成一条新河道,快速泄放湖水,实现除险目的。

2) 引流槽布置:引流槽顺地势布置在堰塞坝右侧,平面上呈向右侧弯曲的弧形。右侧地势低,开挖方量少,施工便捷,且引流槽右侧主要为碎石土,易于冲刷,下泄水流将主要向右岸侧冲刷和下切,同时判断右岸山坡脚均为坚硬且完整的岩体而引流槽左侧主要为碎裂岩,抗冲刷能力较强,边坡总体将保持稳定。

3) 引流槽槽结构:引流槽采用梯形断面,两侧边坡为 1:1.5。为适应天气变化可能出现的不同施工工期,引流槽设计了边坡开口线相同、边坡坡比相同、槽底高程不同的 3 个方案。高标准方案引流槽进口高程 742 m、槽底宽 13 m;中标准方案引流槽进口高程 745 m、槽底宽 22 m;低标准方案引流槽进口高程 747 m、槽底宽 28 m。

4) 施工过程中的动态优化:动态优化是应急除险工程必须遵循的基本原则。引流槽槽施工过程中,

根据实际揭露的地质条件和实际达到的施工能力,对引流槽结构进行了多次优化和调整。依据实际施工能力、堰塞坝土石结构、除险时间要求以及引流水动量与能量等综合因素决定,在接近完成高标准方案时,将进口高程由 742 m 降低为 741 m;在此方案施工临近结束时,又将槽底高程全线降低 1 m。最终实际进口高程 740 m,槽底宽度 7~10 m。实现了引流槽的最优结构。

8 除险效果^[1]

2008 年 5 月 26 日上午,应急除险工程正式开工。2008 年 6 月 1 日凌晨,引流槽施工提前完成,取得了减小库容 10^8 m^3 、降底水头 12 m 的理论效果。6 月 6 日开始,又对引流槽实施了消阻、扩容等工程措施。

6 月 7 日 7 时 08 分,引流槽开始过流;6 月 9 日下午溯源冲刷效果开始明显;6 月 10 日中午下泄流量达到峰值 $6\,500 \text{ m}^3/\text{s}$;至 6 月 11 日 14 时,堰塞湖水位从最高 743.10 m 降至 714.13 m,湖内蓄水量从 $2.466 \times 10^8 \text{ m}^3$ 降至 $0.861 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。唐家山堰塞湖险情解除,泄流过程中无一人伤亡,达到了最佳除险效果。

过流后形成的新河道平面上呈向右岸凸出的弧形;断面形态呈梯形(见图 6),开口宽 145~235 m,底宽 80~100 m,进口端底高程一般为 715~720 m,右侧深槽达 710 m,断面基本稳定,虽存在局部垮塌和堵塞的可能,但不会影响大流量时的泄洪能力。当发生 200 年一遇洪水时最大下泄流量 $6\,132 \text{ m}^3/\text{s}$,小于历史调查最大洪水洪峰流量,也小于 6 月 10 日泄流的洪峰流量,新河道具有安全通过 200 年一遇洪水的能力。

泄流时水流带走堰塞坝堆积物约 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。左侧剩余堰塞体主要由结构较密实的碎裂岩和巨



图 6 唐家山堰塞坝过流后河道平面形态

Fig. 6 The watercourse plane shape after the draining of Tangjiashan barrier dam

石、孤块碎石组成,抗渗透破坏和抗冲刷能力较强,抗滑稳定性较好,整体稳定。

唐家山应急除险工程的实施,直接减少已蓄水量 $0.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,对应降低堰塞湖水位 9.0 m 且控制溃坝过程按渐进方式发展,使坝址洪峰流量减小了约 $3\,400 \text{ m}^3/\text{s}$,涪江桥断面洪峰流量减小了约 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,坝下游各主要控制断面洪峰流量与原 1/3 溃坝洪水相比减少了约 33.6% ~ 34.6%,有效减轻了对下游人民生命财产安全的威胁。

9 结语^[14]

唐家山堰塞湖从“5·12”大地震形成到 2008 年 6 月 11 日解除险情,历时一个月。应急除险是在非常时期、非常条件下,采取非常规、科学的手段取得的成就,创造了人工排除大型堰塞湖次生灾害的奇迹与范例。唐家山堰塞湖应急处置的除险减灾理念、科学方案和技术实践,对今后处理类似突发性事件具有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 刘宁. 唐家山堰塞湖应急处置与减灾管理工程[J]. 中国工程科学, 2008, 10(12): 67-72
- [2] 杨启贵, 李勤军. 唐家山堰塞湖应急处置技术特点与体会[J].

- 人民长江, 2008, (22): 1-3
- [3] 杨启贵. 唐家山堰塞湖应急疏通工程关键技术[J]. 中国水利, 2008, (16): 8-11
- [4] 张煜, 陈鹏霄, 芦云峰. 堰塞湖特征参数快速获取及影响分析评估区域水文特性分析[J]. 人民长江, 2008, (22): 96-98
- [5] 黄河, 郑家祥, 施裕兵, 等. 唐家山堰塞湖形成机制及应急处置工程措施研究[J]. 中国水利, 2008, (16): 12-16
- [6] 马贵生, 罗小杰. 唐家山滑坡形成机制与堰塞坝工程地质特征[J]. 人民长江, 2008, (22): 46-48
- [7] 邹爱清, 林绍忠, 马贵生. 唐家山堰塞坝形成机制 DDA 模拟研究[J]. 人民长江, 2008, (22): 91-94
- [8] 陈剑池, 范可旭, 李中平. 唐家山堰塞湖区域水文特性分析[J]. 人民长江, 2008, (22): 26-28
- [9] 郭海晋, 张洪刚, 李中平. 唐家山堰塞湖应急除险水文分析计算[J]. 人民长江, 2008, (22): 29-31
- [10] 黄明海, 金峰, 杨文俊. 不同河道状况下的堰塞坝溃坝洪水特性研究[J]. 人民长江, 2008, (22): 66-68
- [11] 长江水利委员会, 等. 唐家山堰塞湖应急除险工程技术总结[R]. 2008. 12
- [12] 刘宁, 张建新, 林伟, 等. 汶川地震唐家山堰塞引流除险工程及溃坝洪水演进过程[J]. 中国科学 E 辑, 2009, (4): 801-809
- [13] 张细兵, 卢金友, 范北林, 等. 唐家山堰塞湖溃坝洪水演进及下泄过程复演[J]. 人民长江, 2008, (22): 76-79
- [14] 刘宁. 巨型滑坡堵江堰塞湖处置的技术认知[J]. 中国水利, 2008, (16): 1-7

The emergency handling technique and practice of Tangjiashan barrier lake

Liu Ning¹, Yang Qigui²

(1. The Ministry of Water Resources of People's Republic of China, Beijing 100053, China;
2. Design Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[Abstract] This thesis briefly introduces the emergency handling of Tangjiashan barrier lake. Combined with practice, it concludes the rapid capture and application technique of the relative landform, geologic and water information for barrier lake. From the form condition and process, the form mechanism of barrier dam is analysed and analyzed. The security of barrier dam is evaluated and analyzed, and the flood propagation after the dam break is calculated. Finally, the emergency handling scheme, digging channel and draining scheme and the handling effects are briefly introduced.

[Key words] earthquake; Tangjiashan barrier lake; landslide; dam break