

汶川地震唐家山堰塞引流除险工程及溃坝洪水演进过程

刘宁*, 张建新, 林伟, 陈五一, 陈祖煜

中华人民共和国水利部, 北京 100053

* E-mail: liuning@mwr.gov.cn

收稿日期: 2008-12-12; 接受日期: 2009-02-19

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(批准号: 2007CB714102)

摘要 本文介绍由汶川地震诱发的唐家山堰塞湖的风险分析、抢险工程措施以及除险效果. 该堰塞体平均坝高 105 m, 库容 3.2 亿 m^3 , 估计溃坝洪水洪峰至少可达 48000 m^3/s 以上, 会对下游造成巨大灾难. 为此, 开挖了深 13 m、底宽 8 m 的明渠, 成功地实施了一次泄流除险工程. 大坝以洪峰流量为 6500 m^3/s 的一次洪水过程下泄了 1.6 亿 m^3 水量, 残留库容仅 0.897 亿 m^3 , 堰塞体形成了底宽平均大于 100 m 新河道, 可以安全下泄 200 年一遇的洪水. 唐家山堰塞湖除险工程的成功实施为今后处理同类自然灾害积累了宝贵的经验和科学资料.

关键词

地震
堰塞湖
溃坝
滑坡
冲刷
明渠水力学

1 前言

2008 年 5 月 12 日, 四川汶川发生 8.0 级大地震. 受汶川地震影响, 位于四川省通口河(也称湔江)右岸、距北川县城上游 6 km 的唐家山发生大规模高速滑坡. 快速下滑的山体冲向左岸, 掩埋了元河坝村. 滑坡体形成的堰塞体导致通口河被堵(图 1 和图 2).

唐家山堰塞湖严重威胁下游绵阳市区及其他村镇的安全. 为此, 自 5 月 22 日开始, 实施了一次人工开挖明渠泄流除险的工程. 本文介绍这一工程的设计、施工及大坝溃决洪水演进过程, 并简要评论了其除险效果.

2 滑坡堵江段地形地貌特征

2.1 滑坡地形地貌

滑坡段内河道弯曲, 通口河以 $\text{S}70^\circ\text{E}\sim\text{N}40^\circ\text{E}$ 流经

该区, 枯水期水面高程 664.8 m 左右, 水面宽 100~130 m, 水深 0.5~2 m. 为不对称的 V 型河谷, 右岸为唐家山, 下部基岩裸露, 上部地形较缓, 坡度 30° 左右,

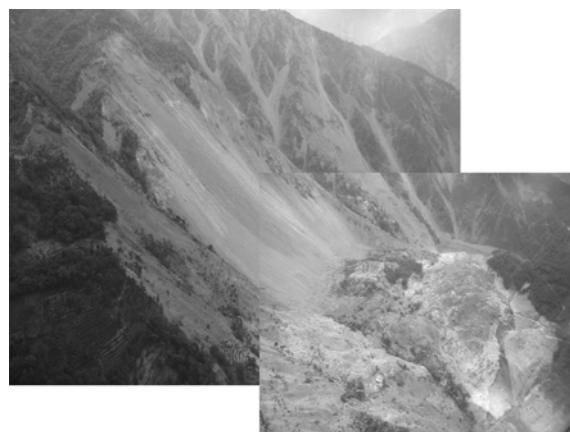


图 1 唐家山滑坡

引用格式: 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. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(8): 1359—1366
Liu N, Zhang J X, Lin W, et al. Draining Tangjiashan Barrier Lake after Wenchuan Earthquake and the flood propagation after the dam break. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(4): 801—809, doi: 10.1007/s11431-009-0118-0

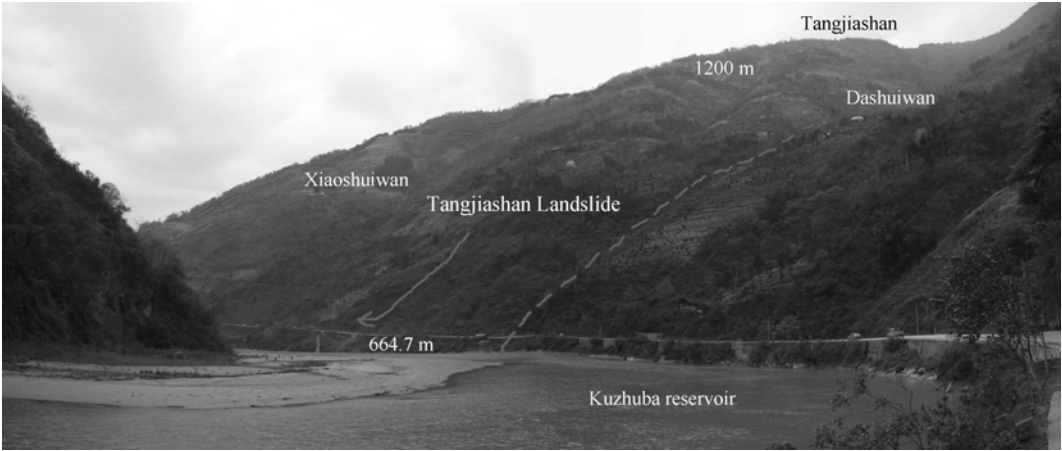


图 2 唐家山滑坡前地貌

分布较厚的残坡积碎石土层, 植被茂盛, 上下游各分布 1 条小型浅冲沟; 左岸为元河坝, 山体基岩多裸露, 地形较陡, 自然坡度一般 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 坡体顶部为一宽近 20~50 m 长条形的缓平台. 滑坡堆积体呈左岸高、右岸低的堵江地貌特征. 滑坡发生后, 曾采用高时空分辨率的机载、星载光学测量和干涉雷达、激光遥感等手段获取堰塞湖的地形地貌信息, 为抢险工程提供基本的资料. 图 3 为国土资源部提供的唐家山遥感图像^[1].

通过遥感信息推测滑坡堆积体顺河向长 803.4 m, 横河向最大宽度 611.8 m, 坝高 82.65 m, 滑坡体覆盖面积约为 $30.72\times 10^4\text{ m}^2$, 估算体积为 2437 万 m^3 . 堰塞体坝顶左、右侧高程分别为 785 和 755 m. 由此估算

坝高为 90~120 m.

2.2 工程地质

唐家山高速滑坡是一个典型的发生中陡倾角层面中的顺层高速滑坡. 滑坡所在边坡基岩由寒武下统清平组薄层硅质岩、砂岩、以及千枚岩组成. 岩层软硬相间, 产状为 $N60^{\circ}E/NW\angle 60^{\circ}$. 左岸为逆向坡, 右岸为顺向坡. 基岩裂隙较发育, 岩体较破碎, 强风化带厚度 5~10 m, 其下为弱风化.

岩体层间挤压错动带较发育, 由黑色片岩、糜棱岩组成. 错动带挤压紧密; 性状软弱, 遇水泥化. 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. 岩体较破碎, 强风化强卸荷带

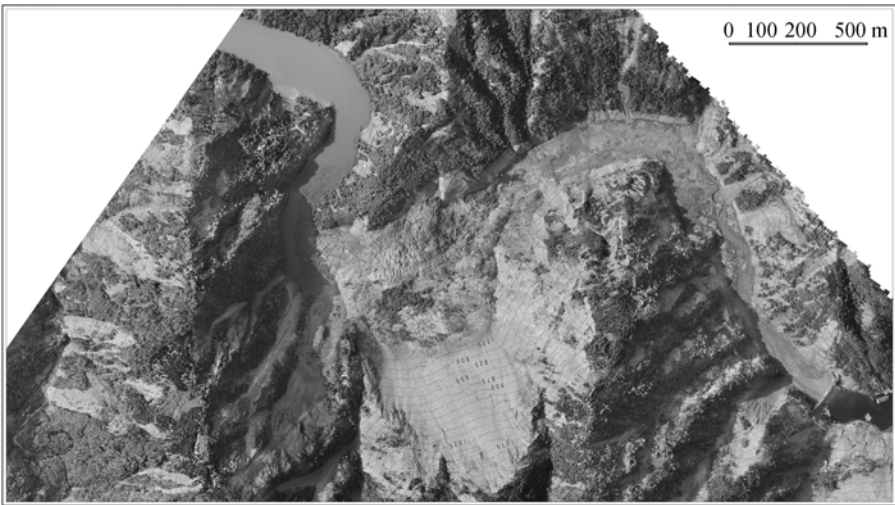


图 3 国土资源部遥感图像^[1]

厚度约 10~30 m.

第四系堆积物主要有冲积、残坡积, 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. 其中河床为苦竹坝库区厚约 20 m 的含泥粉细砂; 左岸碎石土层推测厚 5~10 m, 右岸碎石土层推测厚 5~20 m^[2].

3 溃坝风险分析

3.1 堰塞湖风险评价

堰塞体和下游基本情况如下.

(1) 堰塞体

堰体的基本形状为宽顶堰, 上游坝坡 18°~22°, 下游坝坡 35°~40°. 顺河向堰顶宽度 150 m 左右. 堰塞体除表部少量为碎石土外, 主体为基岩滑坡形成的巨石、孤块石. 其中下部为弱风化~微风化, 仍保持原地层层序关系, 部分解体破裂岩体, 结构密实, 强度高, 其下游平均坡比为 1:1.28. 由于坝体体积庞大, 分析其下覆较多块石体, 因此, 在不发生坝顶溢流和管涌的情况下, 坝体结构基本上是稳定的.

(2) 下游人口和城镇情况

唐家山堰塞体下游 6 km 北川县城在地震中已被彻底摧毁, 若作为地震博物馆被永久保留, 极具史料价值. 沿通口河分布有江油等中小城市. 其中绵阳市是四川省以科技产品为主的重要城市, 人口约 120 万. 绵阳市距唐家山直线距离约 80 km, 涪江桥水文站高程为 570.8 m.

(3) 唐家山以下堰塞湖情况

汶川地震中, 在唐家山堰塞体下游, 也同时形成了 4 个堰塞湖, 一旦唐家山堰塞湖溃决, 这些堰塞湖也会相继溃决, 对下游城镇的安全构成巨大的威胁. 图 4 显示这些堰塞湖的地理位置.

3.2 溃坝洪水分析

溃坝洪水计算精度受多项水文、地形条件影响, 成果与实际情况出入可能较大. 抢险期间国内多个科研设计单位曾用多种计算方法开展了模拟分析研究工作, 现摘录文献[3]的计算成果.

(1) 溃坝最大流量

溃口洪水可按宽顶堰流量计算公式:

$$Q = \delta mb \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}, \tag{1}$$

式中溃口 b 为宽度, H_0 为溃口发生最大流量时的有效水位, m 和 δ 分别为流量系数和侧向收缩系数. 初步核算溃口最大流量为 46000 m³/s.

(2) 洪水演进过程估算成果

对唐家山堰塞湖溃决后可能产生的最大溃坝流量以及洪水演进过程做出分析计算.

下游距坝址 L 处的溃坝洪水最大流量的计算公式为^[4]

$$Q = \frac{W}{\frac{W}{Q_{\max}} + \frac{L}{V_{\max} K}}, \tag{2}$$

其中 Q 为距坝址 L (m)控制断面溃坝最大流量(m³/s), W 为水库总库容(m³), $Q_{\max}$ 为坝址最大流量(m³/s), L

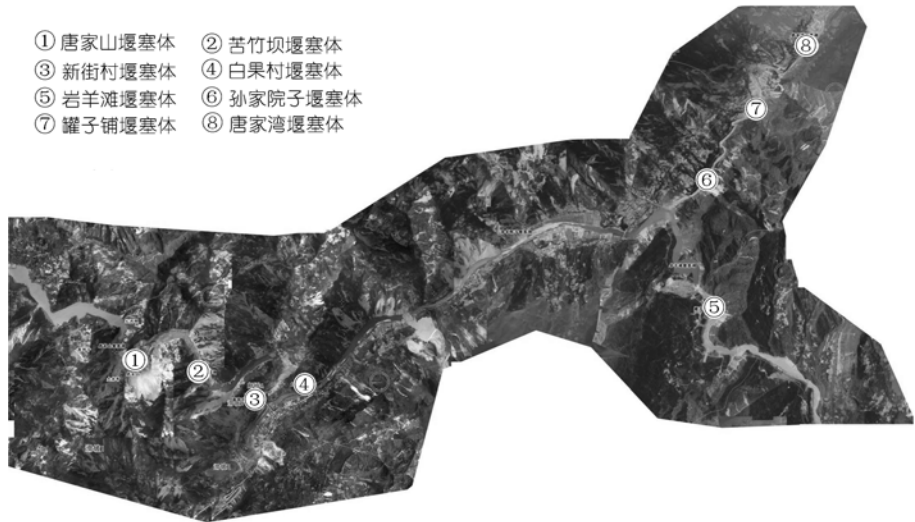


图 4 唐家山以下堰塞湖情况

为控制断面距水库坝址的距离(m), $V_{\max}$ 为特大洪水的最大流速. K 为经验系数(山区取 1.1~1.5, 丘陵区取 1.0, 平原区取 0.8~0.9). 根据上式推算, 演进至北川县城、下游 45 km 的青莲镇和下游 52 km 涪江的最大流量分别为 40000, 24000 和 22000 m^3/s .

4 引流除险工程

4.1 应急处置的影响因素

(1) 时值雨季, 遇较大洪水或降雨, 溃决概率非常大

北川县气象站 1961~1990 年资料统计, 本地区多年平均年降水量为 1355.4 mm, 降雨主要集中在 5~9 月, 占全年降水的 86.3%, 历年一日最大降水量为 323.4 mm. 经实际测算这一时间段入库流量平均为 90 m^3/s 左右. 因此, 唐家山堰塞湖面临风险极大.

(2) 堰塞体较高, 库容较大, 极具危险性

堰塞体 90 至 120 m 高, 在水位到达坝顶时, 库容将达 3.2 亿 m^3 . 根据 3.2 节分析的成果可见, 如不进行抢救处理, 洪水可能破坏沿江的各中小城市, 并超过绵阳市百年一遇的设防标准.

(3) 堰塞体组成物质结构复杂

构成唐家山堰塞体的岩土体结构复杂, 一部分坝体依然保持原有岩体结构, 大部分坝体材料为石夹土和土夹石, 还有少量夹有植被残体的全风化土体. 鉴于时间紧迫, 难以采用传统的勘测手段查清堰塞体的结构. 这种复杂性将导致堰塞体可能存在薄弱环节造成塌陷甚至部分溃决, 如 5 月 29 日在坝体下游侧高程 700 m 处出现管涌渗水点、渗漏量一直不断扩大; 图 5 显示 6 月 3 日中午所摄渗水点情况.

当时渗口流量 1.35 m^3/s , 在下游总下渗流量为 4.93 m^3/s . 这一管涌口的出现, 为抢险工作增加了新的不确定因素.

(4) 上游流域面积大, 水位上涨快

通口河流域位于四川盆地西北边缘山区地带, 系涪江一级支流, 控制集水面积 4520 km^2 , 主河长 173 km, 唐家山堰塞体以上集水面积 3550 km^2 (此段与前有重复); 根据监测资料 5 月下旬水库水位平均以 1.0~1.8 m 的速率上升.

(5) 堰塞体还在遭遇强余震影响

截至 7 月 1 日 08 时, 汶川震区内共记录到余震 14867 次, 其中 5.0~5.9 级余震 28 次, 6 级余震 5 次, 最大余震为 5 月 25 日 16 时 21 分青川 6.4 级地震. 地震时序分布见图 6. 强余震可能诱发新的滑坡, 给抢救工作带来风险.

(6) 地面交通全部受阻

地震发生后, 从北川到唐家山的道路全部阻塞, 无法打通. 堰塞体上游形成的湖泊淤积物和孤石较



图 5 5 月 29 日发现的管涌渗水点(6 月 3 日拍摄)

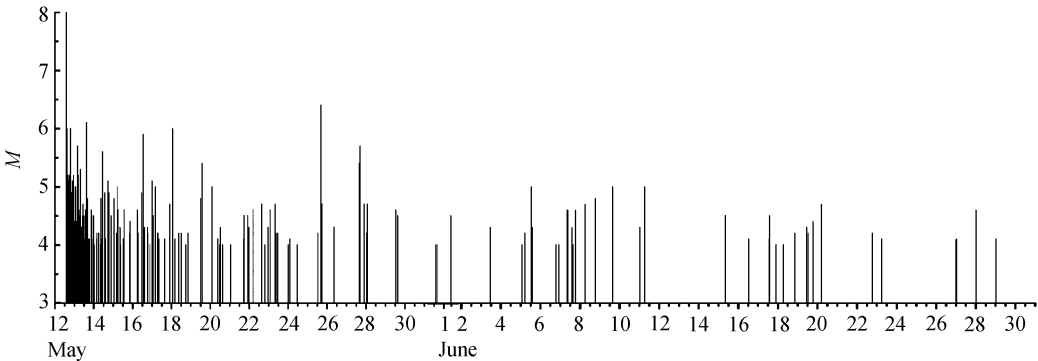


图 6 截至 2008 年 7 月 1 日 08 时震区 4.0 级以上地震时序分布

多, 水下状况复杂, 大型船只无法通航和靠岸, 不具备水上运输条件. 因此, 施工人员、设备、材料及给养等只能选择空中运输.

4.2 应急方案决策

减轻堰塞湖溃决可能导致的灾害的方式包括虹吸导流, 人员撤离, 加强监测等, 但最为有效的是在堰体内开挖泄流渠, 促使堰塞体在较低水位较小库容的情况下提前溃决. 根据记载, 早在 500 年前, 法国 Monte Blomc 区 Servoz 村民就曾经用开挖泄流渠的方法疏通 Massif de Plate 湖^[5]. 1974 年在秘鲁发生的 Mayunmarca 滑坡形成一个 150 m 的高的坝, 水量达 6.7 亿 m^3 , 采用了开挖 3 m 深的引渠方案, 溃坝洪峰达 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[6,7]. 我国易贡滑坡的泄流渠深 24.1 m, 溃坝时洪峰达 $110000 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[8].

在综合分析唐家山堰塞湖溃坝可能造成的巨大风险、各种确定和不确定的制约因素以及施工设备、工期等可行性条件基础上, 决定采用开挖导流明渠对堰塞体进行人工溃决除险的方案.

4.3 泄流渠的设计与施工

根据上述研究, 在应急处理过程中采用泄流渠断面形状为梯形, 两侧边坡为 1:1.5. 泄流渠堰顶高程 740.4 m, 底宽 8 m, 深 13 m, 总长 695 m, 上游平缓段纵坡为 0.6%, 下游陡坡段纵坡分别为 24% 和 16%, 参见图 7.

泄流渠的施工的基本原则是: 挖爆结合, 以挖为主; 深挖平爆, 以爆助挖.

利用堰塞体地势条件, 采用挖掘机开挖、自卸卡车运输的方式开挖引渠, 必要时辅以爆破方式加快开挖进度. 共投入施工人员 1142 人, 推土机 26 台, 挖掘机 16 台, 自卸车 6 台. 采用电台, 卫星电话和移动电话等手段为施工提供通信保障.

经过 7 天 6 夜的施工, 于 6 月 1 日结束, 坝顶自 753 降至 740.4 m 左右, 较原计划多挖深了 3 m. 完成土石方开挖 13.55 万 m^3 , 形成了长 475 m, 底宽 8 m, 深 13 m 的泄流渠.

5 堰塞体溃决水文、水力学过程

5.1 堰塞体溃决过程

6 月 8 日 7 点始, 堰塞湖水位超过泄流渠底高程,

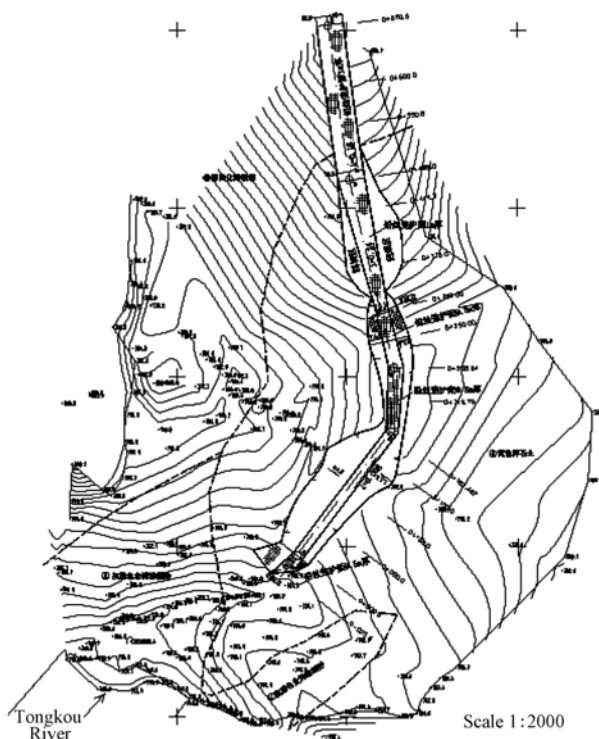


图 7 泄流渠的布置平面图

有少量的水量从渠道流向下河道, 根据唐家山渠道从 6 月 8 日至 9 日的实测渠道出库流量成果计算, 从 6 月 8 日至 9 日共出库水量 538 万 m^3 .

6 月 10 日 1:30 唐家山坝前水位达到最高值 743.10 m, 相应蓄水量为 2.474 亿 m^3 . 之后下泄流量增大较快, 至 6:00 下泄流量 $574 \text{ m}^3/\text{s}$, 12:30 时下泄流量达到最大值 $6500 \text{ m}^3/\text{s}$, 此后开始减小. 20:00, 水流对坝体冲刷过程基本结束. 至 6 月 11 日 8:45, 渠道下泄流量仅为 $79.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 基本达到平衡状态. 根据流量测验资料, 唐家山堰塞湖的下泄水量 1.7 亿 m^3 . 唐家山下泄流量和库水位随时间变化过程见图 8. 图中左右竖直虚线示坝体冲刷起始和结束时刻.

5.2 堰塞湖下游洪水演进过程

图 9 示下游河道坡降以及北川、通口河、涪江桥水文站位置. 图 10~12 示下游水文站实测水位和洪水流量过程线. 可以看出, 北川、通口及涪江桥的洪峰流分别为 6540 , 6210 及 $6100 \text{ m}^3/\text{s}$.

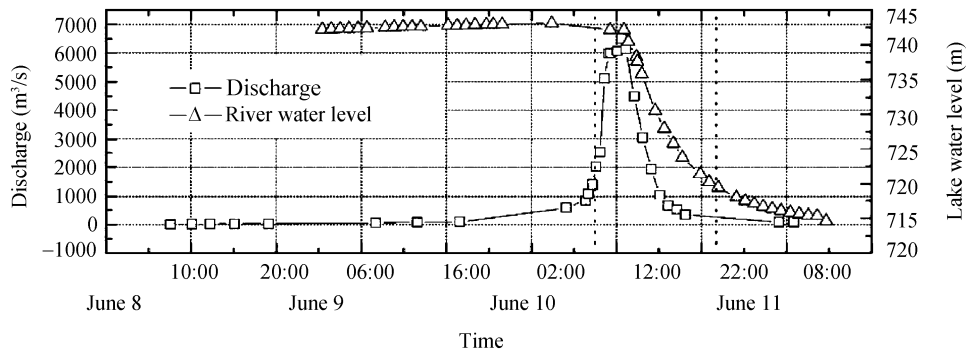


图 8 唐家山实测泄流、坝前水位过程

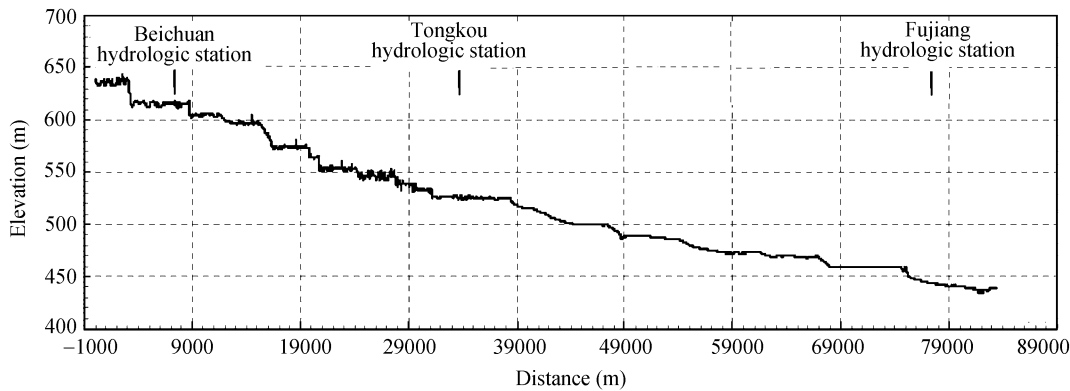


图 9 唐家山下游河道纵坡及水文站位置

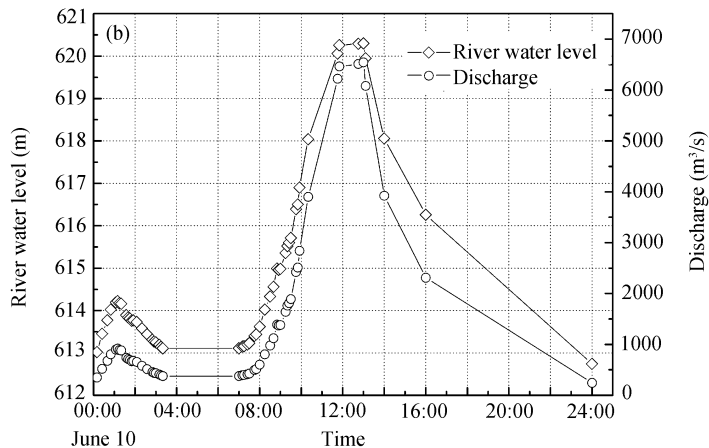
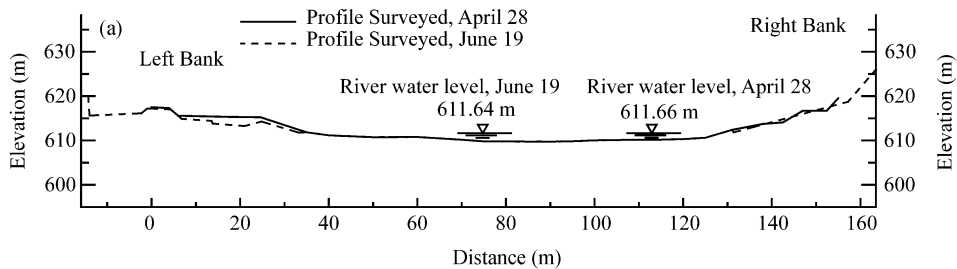


图 10 北川水文站洪水过程
(a) 剖面图; (b) 洪水流量和水位过程

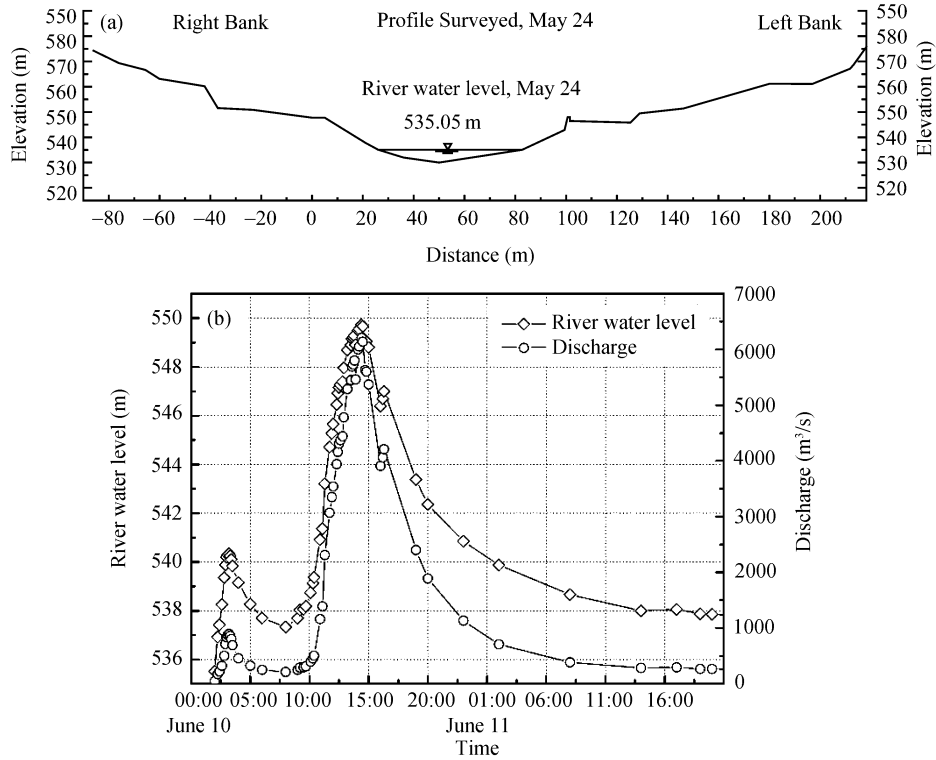


图 11 通口水文站洪水过程
(a) 剖面图; (b) 洪水流量和水位过程

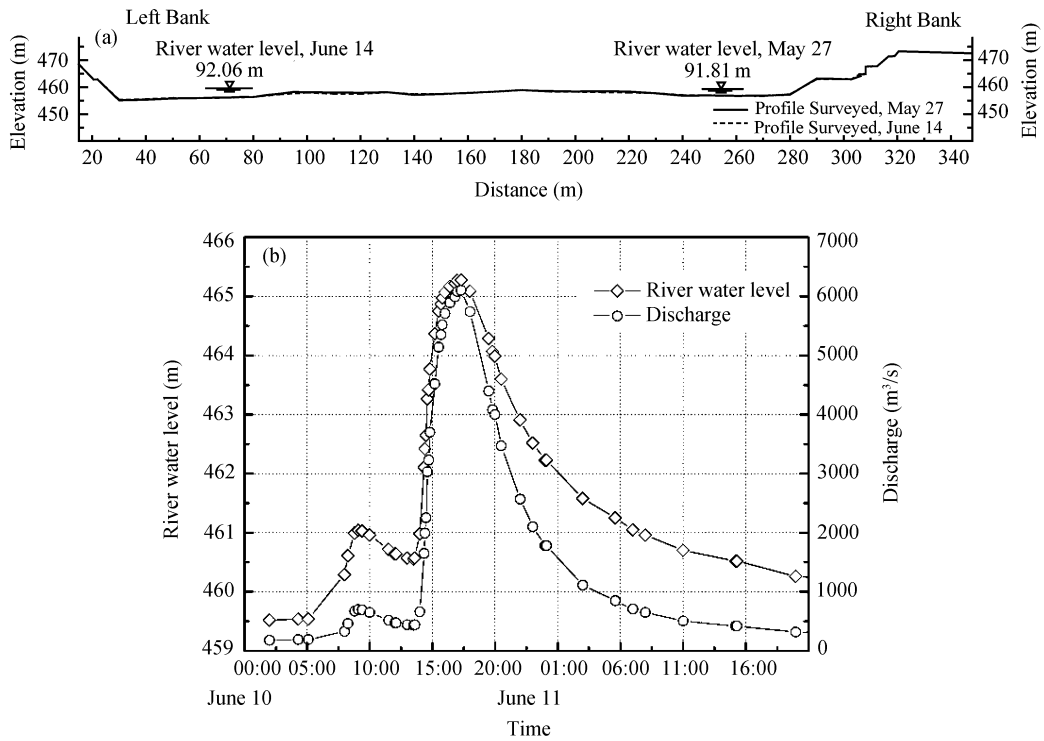


图 12 涪江桥水文站洪水过程
(a) 剖面图; (b) 洪水流量和水位过程

6 引流除险效果评价

堰塞体过流后已形成较宽畅的新河道, 平面上呈向右岸凸出的弧形, 中心线长度约 890 m. 泄洪槽在断面形态上, 呈上宽下窄的“倒梯形”, 其开口宽 145~225 m, 底宽 100~145 m, 左侧坡度 35°~50°, 右侧坡度 45°~60°, 坡高 10~60 m.

新河道左、右侧坡呈上、下游较低、中部较高的特征, 最大冲刷深度约 60 m. 其物质组成在左、右岸相对对称, 上部厚 20~40 m 为黄色碎石土, 中部 10~20 m 为孤块碎石, 坡脚和河道出露灰黑色硅质岩巨石和孤块碎石, 局部保留原岩层状结构, 6 月 21 日堰塞湖坝前水位为 713.54 m, 水库的蓄水量从泄流工程前的 2.474 减少为 0.897 亿 m^3 . 堰塞体至苦竹坝电站闸坝的下游 1 km 河道冲刷后的碎砾石砂层所淤积, 坝趾处河床高程从原来的 665 提升至 695 m, 河道平缓, 水头差小, 参见图 13.

泄洪后形成的新河道底宽平均大于 100 m, 开口宽度大于 150 m, 深度 40~60 m, 经历 6500 m^3/s 流量泄洪的考验, 可以下泄 200 年一遇的洪水.

7 结论

“5.12 地震”形成的唐家山堰塞湖库容达 3.2 亿 m^3 ,

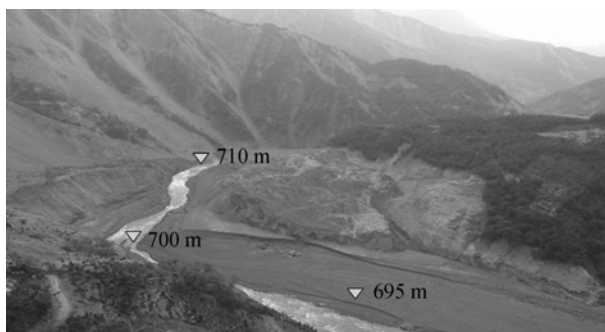


图 13 泄流后的坝体河道

为消除溃坝洪水对下游的威胁, 在右岸开挖泄流渠提前泄洪, 成功地通过受控制的溃坝洪水消除了危险.

通过泄流渠引流消除唐家山堰塞湖溃决引发的洪水灾害, 这是我国处理大型堰塞湖的又一次成功实践. 在应对自然灾害时, 引导、诱发自然界本身蕴藏的巨大能量消除其潜在的灾害性因素, 这一思想为成功实施这一次减灾行动起了重要指导作用.

本文介绍了抢险过程中对风险的把握要点以及泄流明渠设计, 施工情况. 并记载了溃坝过程中在坝址和下游实测的洪水位和流量过程线. 有关资料可为今后处理类似自然灾害参考. 有关冲刷机理和效果方面的研究成果拟另文介绍.

致谢 感谢参加现场工作的唐训海、饶西平、黄令工程师, 并感谢徐文杰博士在资料整理工作中提供的帮助.

参考文献

- 1 国家汶川地震专家委员会. 汶川地震图册. 北京: 地震出版社, 2008
- 2 黄润秋, 许强. 中国典型灾害性滑坡. 北京: 科学出版社, 2008
- 3 中国水利水电科学研究院. 唐家山堰塞湖溃坝分析及影响评估. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2008
- 4 武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研室. 水力计算手册. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- 5 Bonnard C. Technical and human aspects of historic rockslide dammed lakes and landslide dam breaches. In: NATO Advanced Research Workshop, Extended Abstract Volume. Kyrgyzstan: Bishkek, 2004. 13—19
- 6 Kojean E, Hutchinson J N. Mayunmarca rockslide and debris flow, Peru. In: Voight B, ed. Rockslides and Avalanches, 1, Natural Phenomena. Amsterdam: Elsevier, 1978. 316—361
- 7 Lee K L, Duncan J M. Landslide of April 25, 1974 on the Mantaro River, Peru. In: Committee on Natural Disasters, National Research Council. Washington: National Academy of Sciences, 1975. 72
- 8 刘宁. 科学制定西藏易贡滑坡堵江减灾预案. 中国水利, 2000, 7(1): 37—38