

卡马水库应急除险工作的启示

刘 宁¹, 黄金池², 张启义²

(1. 中华人民共和国水利部, 北京 100053; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 2009 年汛期, 广西河池卡马水库右岸溢洪道附近发生垮塌, 大坝安全风险骤然增加。在应急除险实践中, 同时对大坝不同状态进行了有限元渗流分析及采用非线性指标进行边坡稳定分析, 初步确定出险位置可能处于放空洞中段, 在此基础上, 对水库溃决风险进行了分析, 得出了风险决策依据, 从而提出减灾措施, 有效降低了水库溃决的风险。从卡马水库的应急处置出发, 探讨了中国水库应急除险的关键技术, 并提出了中国水库安全管理相关的一些重要问题。

关键词: 卡马水库; 应急处置; 渗流; 稳定分析; 风险评估

中图分类号: TV 697.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)06-0742-06

位于广西罗城仫佬族自治县的卡马水库是一座兼具灌溉、防洪、发电等多功能综合效益的小(I)型水利工程, 距罗城县城 54 km, 距怀群镇政府所在地仅 3 km, 水库集雨面积 52.3 km², 库区多年平均降雨量 1520mm, 大坝坝型为面板干砌堆石坝, 水库总库容 930 万 m³, 最大坝高 38.7 m, 坝顶长 250.3 m, 坝顶高程 224.6 m, 水库正常蓄水位 220.1 m。水库按 50 年一遇标准设计, 设计水位 222.49 m, 设计洪峰流量 466 m³/s, 按 500 年一遇标准校核, 校核水位 223.89 m, 校核洪峰流量 767 m³/s。溢流消能设施为开敞式侧槽溢洪道, 堰顶高程 220.1 m, 最大泄流能力 702 m³/s。大坝底部 193.3 m 处留有一设计泄流能力仅为 2.26 m³/s 的放空洞, 一般情况下处于封闭状态。2009 年 6 月 24 日大坝工作人员发现放空洞大量漏水, 水库 211 m 水位时目测流量达到 10 m³/s。2009 年 7 月库区普降大雨, 库水位持续上升, 此时放空洞流量估计达到 20 m³/s 以上, 其间放空洞出水口附近可见明显洞内冲刷物(图 1), 按照放空洞过水面积计算, 洞内流速达 10 m/s 以上, 当洞体坍塌流路突然堵塞时, 粗略估计形成的水击瞬时压力水头达 500 m 以上, 其强大的瞬时震动波

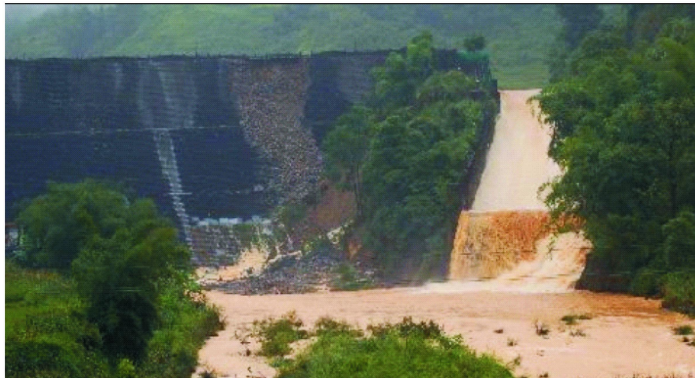


图 1 水库溢洪道右端坝体上部垮塌

Fig 1 Damage on the right side of the Kama reservoir

收稿日期: 2009-07-03

基金项目: 水利部重大项目“水库溃坝风险与减灾技术研究”

作者简介: 刘 宁(1962-), 男, 辽宁丹东人, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电规划、设计与管理研究。

E-mail: liuning@mwr.gov.cn

引起坝体上部坍塌和坝体局部结构破坏。从图 1 可以看出, 大坝靠近右岸溢洪道附近坝体发生垮塌, 在持续高水位作用下, 大坝安全风险骤然增加。一旦大坝发生溃决, 大坝下游仅 3 km 左右的怀群镇将遭受灭顶之灾, 受到直接影响区域的人口达到 1 万多人, 采取应急处置措施迅速降低风险迫在眉睫。

1 卡马水库应急除险实践

1.1 工程稳定性分析

从卡马水库的出险经过可以看出: 位于坝体内部的放空洞, 实际上已存在局部破坏段; 放空洞上部的坝体, 由于水击震动出现局部滑塌, 说明大坝经过多年运行, 某些部位的稳定性可能已趋于临界状态。由于放空洞局部破坏段的存在, 使得库内水流可以绕过上游面板而渗入干砌石坝体内, 从而顶高坝体内的浸润线。考虑到大坝在水击震动下已出现局部滑塌, 而大坝在浸润线较高时, 其边坡稳定性将会更低, 因此, 在对卡马水库进行应急风险决策时, 坝坡的稳定性将是一项重要依据, 而渗流分析则是边坡稳定分析之前必须做的一项工作。

在进行渗流分析时, 暂时将干砌石的渗透系数考虑为面板的 1000 倍。原则上, 放空洞发生局部破坏后, 坝体内的渗流为复杂的三维渗流, 对其进行真实模拟较为复杂, 而且三维渗流分析的边界条件也不明确, 因此, 即使进行三维渗流分析也难以得到准确结果。为了快速评估卡马水库坝坡的稳定性并简化起见, 本文仅对过放空洞轴线的坝体剖面进行二维渗流分析(采用该简化模型计算的浸润线可能会比实际浸润线高)和边坡稳定分析。经过计算, 水库正常运行时坝体内的渗流场如图 2 所示, 从图中可以看出, 正常情况下, 由于面板有较好的防渗作用, 坝体内的浸润线较低。考虑放空洞不同部位破坏时的渗流场如图 3 所示, 从图中可以看出, 破坏位置越靠近下游, 坝体尾部边坡所受扬压力将越大。

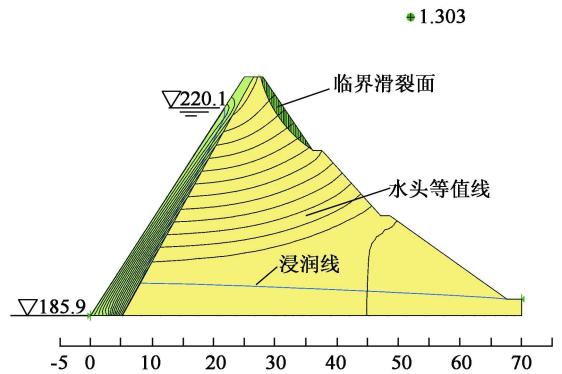


图 2 正常情况下的边坡稳定分析

Fig. 2 Slope stability analysis with a normal situation

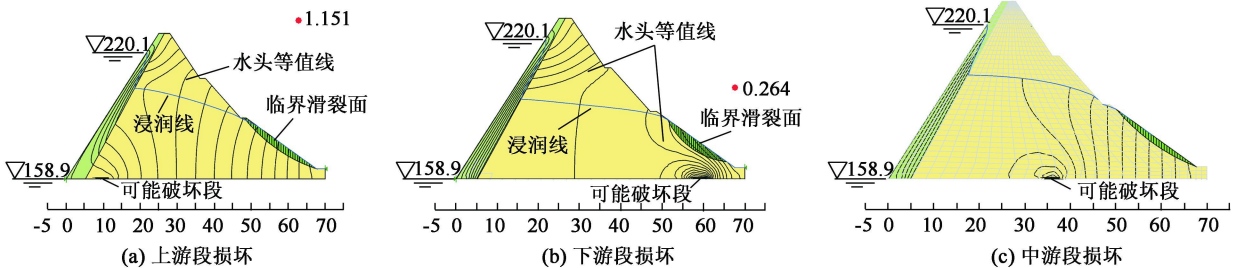


图 3 放空洞损坏后的坝内浸润线及边坡稳定分析

Fig. 3 Seepage and slope stability analysis with the damage

进行边坡稳定分析时, 考虑到卡马水库坝体主要为干砌石, 可设其粘聚力为 0, 但计算边坡稳定的指标不能简单套用土质边坡的计算方法^[3-5]。根据 Duncan 等提出的双曲线应力应变模式, 对无粘聚力土的强度包线采用以下关系式计算^[4]:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p) \tag{1}$$

式中 σ_3 为小主应力, 即进行三轴试验时的周围应力, P_a p 为大气压力, P_a φ_0 $\Delta\varphi$ 为材料参数, 参见文献 [6]。

由于坝体材料缺乏实测资料, 因此, 在进行边坡稳定分析时, φ 和 $\Delta\varphi$ 采用根据西北口等工程资料整理

的对数模式非线性指标^[6], 即 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 分别取为 54.4° 和 10.4° , 假定水库正常水位 220 m 时分析了 4 种典型情况的坝体稳定特性, 分析结果如图 2、图 3 及表 1 所示。表 1 给出了采用 Morgenstern-Price 法、bishop 法和 Janbu 法 3 种方法计算的结果。bishop 法是中国规范推荐使用的方法, 而其它两种方法的计算结果相对精确一些, 在国外边坡稳定计算中使用得较多。

表 1 卡马水库稳定性分析

Table 1 Stability analysis of Kam a R eservoir

序号	工况	Morgenstern-Price法	bishop法	Janbu法
1	正常情况	1.303	1.323	1.233
2	放空洞上游段损坏	1.151	1.145	1.112
3	放空洞中游段损坏	1.053	1.054	1.025
4	放空洞下游段损坏	0.264	0.266	0.270

从计算结果可以看出:

(1) 水库正常运行 坝内浸润线比较低, 坝下游侧边坡失稳的主要影响因素是坝体材料自身的重力, 因此, 临界滑裂面出现在二级马道以上的边坡(图 2), 此时坝坡在不受扰动情况下, 基本可以维持稳定, 该分析结果与实际观察到的破坏位置相附(大坝受到震动, 首先在最不稳定位置滑塌, 如图 1 所示)。

(2) 放空洞上游段损坏 放空洞上游段发生破坏后, 坝内浸润线升高, 坝下游边坡的稳定显然受到坝内孔隙水压力影响, 临界滑弧位置明显下移, 相应边坡稳定安全系数降低。

(3) 放空洞下游段损坏 放空洞下游段发生破坏时, 下游坝脚处将承受较大扬压力, 此时, 大坝已不能维持稳定。

以上各图标示的边坡稳定分析成果均是采用 Morgenstern-Price法计算的结果, 表 1 统计了对各种工况采用不同分析方法求得的边坡稳定安全系数。从表 1 可以看出, 根据放空洞破坏位置的不同, 其坝体稳定性差异较大, 其中放空洞下游段遭受破坏是最不利的情况, 此时, 当水位达到 220 m 时大坝稳定安全系数已远小于 1。考虑到卡马水库放空洞出险后, 库内水位曾一度超过 215 m, 因此, 出险位置应在坝体中部。

图 4 表示了放空洞典型部位发生破坏时, 大坝在不同水位下的安全系数, 从图中可以看出, 放空洞的破坏位置越靠近上游, 水库运行的水位越低, 对大坝的安全运行越有利。

即使经过上述计算分析, 仍然难以判断放空洞破坏的确切位置, 但可以定性地得出结论, 卡马水库放空洞破坏后, 大坝局部的稳定性将急剧下降, 此时, 若水库仍然保持高水位运行, 将是非常危险的, 因此, 必须迅速降低水位以确保下游安全。

1.2 风险快速评估

按照坝体剖面结构分析(图 5), 大坝坝体为散粒堆积物组成, 迎水面边坡 1:0.85, 背水面边坡分为 3 部分, 最上部二级马道以上坝体高 12 m, 背水面边坡 1:0.55, 由于坡度较陡, 坝体失去稳定后极易垮塌出险;

一级马道高程 202.20 m 以上至二级马道坝体高约 13.01 m, 背水面边坡 1:0.9, 一级马道以下至河床高程部分坝高不到 10 m, 背水面边坡 1:1.4, 该部分坝体沿河道流向底宽达 70 m 以上。从图 5 所示的坝体平面布置情况看, 坝轴线附近河道断面形态呈近似梯形, 坝顶高程对应的河道宽度约为 250 m, 河床高程 193 m 处河宽约 60 m。根据上述基本信息, 假定不同水位分析溃坝风险分布。

所谓溃决流量是指大坝遭到破坏而产生的流量快速增加过程, 这个过程表现在坝体泄流口门有一个较大的流量变化梯度, 如果没有这样的过程, 即使大坝遭到破坏, 但流量变化过程缓慢, 则不成其为溃坝流量过程。对于水库应急除险阶段的风险评估, 人们关心的是不同水位条件下可能发生的溃坝风险特性, 也就是要了解一些较为不利情况下发生溃决的可能性和最大流量的可能级别。卡马水库出险后, 设计泄流条件基本完

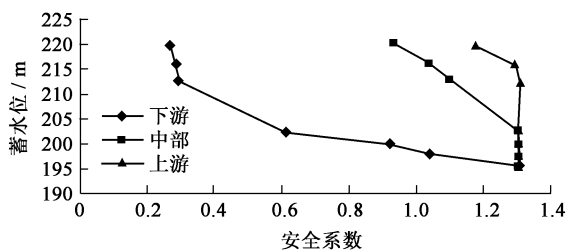


图 4 放空洞不同部位破坏对坝体稳定的影响

Fig. 4 Impacts of different damage positions on the dam stability

好, 但坝体稳定性已经显著低于设计水平, 当遭遇较大洪水时很可能在没有达到坝水位之前就会发生溃坝事故。由于坝体为散粒体, 按照力矩平衡分析坝前水压力与坝体抗倾覆力, 坝体旋转轴心大约在 $2/3$ 坝高 202m 高程处, 此处也正好是二级马道高程, 该高程以上为坝体坡度较陡、稳定性较差的部分, 因此, 发生倾覆溃决的残留坝高可假定维持在该高程处, 前述稳定性分析成果也大致符合这一结论。

根据上述分析结果, 结合现场查勘情况判断, 可能性较大的溃坝模式为瞬间局部溃 (包括横向上的部分宽度和垂向上的部分坝高), 溃决的最大流量发生在瞬间倾覆的时刻。由于溃坝位置应发生在靠近原河道主流线位置, 结合图 6 所示的坝址位置地形资料和溃坝水位情况, 溃坝宽度应不大于 60~80m。采用国内外多种经验公式和理论公式分析, 得到的溃坝最大流量在 $2600\sim 2800\text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 结合溃决后泄流时间和水量平衡的合理性分析, 并考虑一定安全余地, 推荐 $2800\text{ m}^3/\text{s}$ 作为风险决策依据。

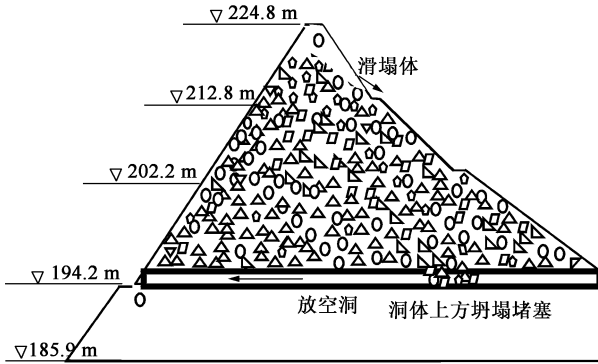


图 5 不同水位溃坝风险水平示意图

Fig. 5 Different damage risk with different water levels

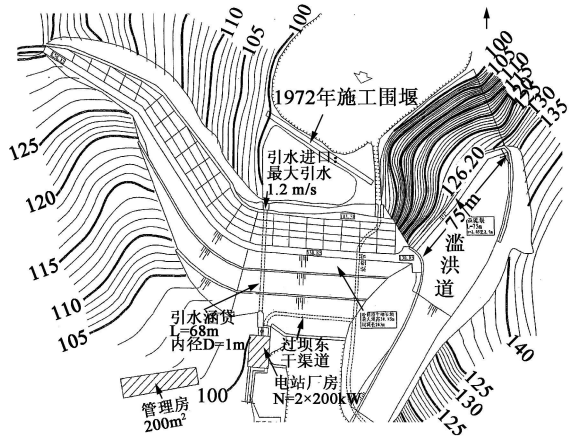


图 6 卡马水库大坝平面示意图

Fig. 6 Plan view of the reservoir

根据计算得到的溃口最大流量和下游河谷地形条件, 采用简易方法估计下游不同位置的溃坝最大流量如表 2, 如按照下游河道具有 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 的泄洪能力, 则溃坝洪水在传播 50 km 后已基本不再具有实质性致灾可能性, 可考虑以下游 50 km 以内距离作为应急处置阶段预警转移的主要控制范围。

表 2 下游流量传播过程

Table 2 Migration process of the downstream discharge

距坝址距离 /km	1	3	5	10	50
最大流量 /(m^3/s)	2800	2000	1500	1050	260

1.3 风险应急处置措施

按照上述稳定分析与风险评估结果, 现场专家组制定了卡马水库应急处置方案, 包括工程措施和非工程措施两部分。非工程措施方面主要是及时启动应急响应预案, 迅速形成高效的应急指挥机构, 第一时间转移安置受到直接风险威胁的当地群众, 确保风险区人员安全, 同时, 积极组织有关专业人员组成专家开展必要的预报预警与险情观测, 保证信息畅通。工程除险措施方面主要考虑快速降低水库水位, 在设计降雨条件下维持较大泄流能力, 保证水库低水位运行, 有效降低风险水平。根据现场调研和水库的具体情况, 方案按照 50 年一遇标准洪水设计, 从可操作性和方案的经济性, 特别是实现目标的速度和方案本身的风险水平等几个因素考虑, 分阶段实施降低库水位措施, 首先在坝体右侧新开挖泄洪通道, 快速降低水位, 为左岸溢洪道扩大泄流能力创造条件, 最终将左岸主泄洪通道降至设计高程 206 m, 50 年一遇洪水水位不超过 212 m。实践表明, 该方案是切实可行的, 达到了有效降低风险, 快速结束应急响应的目标。

2 卡马水库应急处置工作的启示

通过各方面的努力,卡马水库成功除险,保证了下游受影响区域广大人民群众生命财产安全,应急处置工作也给今后的工作提供了一些有益的启示。

2.1 病险大坝的拆除技术

卡马水库出险后,应急处置只是解决了如何安全度汛问题,保证病险水库长期安全的后续措施是摆在我们面前的重要挑战。对于水库功能丧失较多的情况,大坝拆除是当前国际上通行的做法之一。如同大坝建设一样,大坝的撤除也是一项技术十分复杂的综合工程,与大坝撤除相关的一系列问题^[1]可能是今后水库安全管理的重要内容:

(1) 被撤除水库原功能的替代方案 中国大多数水库都具有防洪、供水等综合功能,一旦水库撤除,这些功能不复存在,水库上下游相关地区长期以来建立起来的生产生活体系将被打破。

(2) 大坝撤除的环境保护 大坝撤除过程中和撤除后的一段时间,水库长期淤积的大量泥沙以及坝体物质本身都可能对下游河道及相关区域形成一定程度的影响,这种影响表现在河道形态变化及河道行洪能力改变,甚至还可能影响下游生态平衡。大坝撤除对下游环境的影响还表现在流量过程的改变,在水库正常运行过程中,一般都具有一定的调洪滞洪功能,使得汛期洪水过程变缓,非汛期供水流量增加,水库撤除后,河道流量过程恢复到建设水库前的自然状态,下游生态体系要适应新的水流流态,这种新的适应过程能否顺利完成也是大坝废除工程中要特别注意的。

2.2 应急预案的可操作性

卡马水库应急处置工作取得圆满成功与各部门的快速反应和果断决策分不开。但回过头来看现有的应急预案编制与实施则与实际情况有很大出入,重要的问题是可操作性。如在水库出险后,应急程序的启动主要是各级领导和行业主管部门强烈的社会责任,凭着多年的专业工作经验及时地启动应急处置工作,应急处置技术支撑方面缺乏相关的技术规程和快速响应手段,往往直接影响应急处置工作的快速决策,大量资源不能快速服务于应急处置工作。另外,现有的应急预案大多仅考虑特殊洪水的调度问题,对各种应急状态下的不确定性情况应对措施考虑不足,如信息的传递、除险物资的到位、相应工程风险应急评估等,考虑的手段仍以正常状态为基本依据,这大多与实际应急除险工作不符。

2.3 应急处置工作本身的安全风险

由于大坝稳定情况的不确定性,水库应急除险阶段许多信息并不能完全掌握,包括未来降雨预报信息的可靠性、大坝稳定相关因素的可靠性、人员设备的调度是否能够按照预计目标实现等,这些因素都有可能与预期不符而使应急处置工作不能完成既定目标,应急处置工作本身仍然存在很大风险。因此,在考虑应急处置工作时,还要考虑这些不确定性风险可能导致的后果,应急工程设计与各项具体处置措施要留有余地,避免陷于被动,造成新的不必要损失^[2]。

2.4 水库应急除险工作的一般原则

中国有 8 万多座不同类型水库,技术条件、坝体特征、地理环境千差万别,水库出险后面面临的情况十分复杂,应急阶段所面临的很多问题是不可预知的,给应急除险工作带来很多困难。分析卡马水库应急除险工作的成功经验,可提出一些水库应急除险技术工作的一般原则:

(1) 水库出险后,应首先按照较为不利情况假设做好出险水库的稳定特性分析和风险评估,为应急除险工作提供技术支撑;

(2) 明确适度承担风险的基本理念,以风险较小的处置措施降低水库安全风险水平,在确保风险区人民生命安全前提下,尽可能减少经济损失和社会环境影响;

(3) 应急处置与后续处置结合,应急处置不仅需要当前快速解除应急响应需要,还要尽可能考虑应急除险结束后的恢复重建,为后续长远处置创造条件;

(4) 工程措施与非工程措施结合,根据快速风险评估结果,快速有效的实施工程措施,并迅速组织人

员避险转移、险情预警预报等, 将灾害损失降低到最小程度。

3 结 论

卡马水库应急除险工作取得了预期效果, 有效解除了下游受影响区域的巨大安全风险, 避免了人民生命财产损失, 是一次成功的应急除险工作的案例。随着中国社会经济高速发展, 国家财富的增长和人口的增加, 水库工程安全风险水平也随之增加, 水库安全的应急处置工作也可能频繁发生, 人们对应急管理提出了更高的要求。卡马水库的成功除险从工程和非工程措施多个方面积累了很好的经验, 这些经验对于提高应急管理水平, 增强整个社会的抗灾能力都是十分有益的。

参考文献:

- [1] MOLLY M P. Bringing down our dams: Trends in American dam removal rationales [J]. Journal of the American Water 2002, 38 (6): 1511-1519.
- [2] 刘宁. 国内外大坝失事分析研究 [J]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002. (LIU Ning. Analysis and research of dam-failure [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 赵华玮, 张玲, 高芳. 石包头水库大坝结构稳定分析 [J]. 人民黄河, 2008, 30(9): 83-84. (ZHAO Hua-wei, ZHANG Ling, GAO Fang. Analysis on the structure stability of Shitoubao reservoir dam [J]. Yellow River, 2008, 30(9): 83-84. (in Chinese))
- [4] 吴震宇, 陈建康, 许唯临, 等. 高堆石坝非线性强度指标坝坡稳定可靠度分析方法研究及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 130-137. (WU Zhen-yu, CHEN Jian-kang, XU Wei-lin, et al. Research on methodology of reliability analysis of high rockfill dam slope stability using nonlinear strength indexes and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 130-137. (in Chinese))
- [5] 蒙成. 那读水电站大坝优化及稳定分析 [J]. 广西水利水电, 2003(4): 25-28. (MENG Cheng. Scheme optimization and stability analysis of the Nadu hydropower station big dam [J]. GX Water Resources & Hydropower Engineering, 2003(4): 25-28. (in Chinese))
- [6] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学特性 [J]. 水力发电学报, 1997, 58(3): 21-30. (BAI Shu-tian, CUI Yi-hao. The mechanical properties of rockfill [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997, 58(3): 21-30. (in Chinese))

Experience and enlightenment from the emergency risk-elimination practice on the Kama reservoir

LIU Ning¹, HUANG Jin-chi², ZHANG Qirui²

(1. Ministry of Water Resources, PRC, Beijing 100053, China; 2. China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract During the flooding season of 2009, the Kama reservoir of Guangxi Autonomous Region experienced an emergency situation. The dam safety risk was at all time high. While emergency actions were taking place, the state of the dam was studied using the finite element seepage analysis and the slope stability analysis was also conducted using the nonlinear index approach. The study revealed that the damage position was likely located in the mid portion of the diversion tunnel. Such a diagnostic is particularly desirable in the evolution of dam safety risk assessment and in the subsequent decision making. As the result, proper measures to eliminate the risk were determined, and the risk of dam-break was effectively reduced. The experience obtained from the emergency risk-elimination practice on the Kama reservoir and the associated key techniques can serve as a typical case for addressing the important issues in the management of reservoir safety in China.

Key words Kama reservoir; emergency treatment; seepage; stability analysis; risk assessment