

文章编号:0559-9350(2019)05-0650-11

美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示

周兴波¹, 周建平², 杜效鹄¹

(1. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 2. 中国电力建设股份有限公司, 北京 100048)

摘要: 奥罗维尔坝溢洪道事故为美国大坝安全管理敲响了警钟, 也提醒世界各国应足够重视大坝安全管理。在全面梳理奥罗维尔坝历次重大风险事件的基础上, 系统阐述了2017年美国奥罗维尔坝主溢洪道、应急溢洪道事故的详细过程, 深入分析事故发生的原因。分析表明, 此次事故的发生是工程设计、施工建设、运行管理多方面长期积累的系统性问题, 其中设计与施工缺陷是先天不足, 运行维护和应急管理及其相关机制的缺陷是后天隐患。本文由此次事故反映的问题获得启示, 从设计、建设、运行及应急管理方面对我国大坝安全管理提出了建议, 呼吁相关部门加快建立贯穿大坝全生命周期的风险管理体系。

关键词: 奥罗维尔坝; 溢洪道事故; 大坝安全; 应急响应; 安全管理

中图分类号: TV641

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20181009

1 研究背景

2017年2月7—14日, 受融雪、持续降水和暴风雨等因素影响, 位于加利福尼亚州菲泽河(Feather River)上的美国最高大坝——奥罗维尔坝(Oroville Dam)主溢洪道泄洪时出现严重损坏。由于奥罗维尔水库水位急剧上升, 工作人员停止泄洪并查明损坏部位和损坏情况后, 再次启用主溢洪道继续泄洪, 虽已控制下泄流量, 但也使得冲刷破坏进一步扩大^[1-3]。因为入库流量大, 库水位于2月11日8:00达到应急溢洪道堰顶高程, 奥罗维尔坝建成以来应急溢洪道首次自流漫顶。加利福尼亚州水资源部(Department of Water Resources, DWR)和比尤特县(Butte County)治安官均通过官方媒体发布紧急疏散令, 大坝下游区域约18.8万人紧急转移^[4]。这一重大事件再一次唤醒世界各国政府管理机构、专家学者和工程师等相关人员对大坝安全管理的重视。随着运行龄期增长, 高坝大库及泄水建筑物的安全问题至关重要。

截至2017年底, 我国已建成各类水库98 795座, 大坝数量位居世界第一, 其中大中型水库4666座^[5]。目前, 全球已建在建200 m及以上特高坝77座, 我国占有23座; 250 m以上特高坝22座, 我国占有10座。建设高坝大库, 增强河川径流调节能力, 提高河流水资源利用率, 可在防洪抗旱、水力发电和生态环境保护等方面发挥更大的作用^[6-9]。与此同时, 奥罗维尔坝溢洪道事故也使得人们更清醒地认识到, 极端气候、超强降水、破坏性地震、不良地质灾害等风险频发, 加之受限于人类的认知水平导致设计、施工质量先天不足和运行维护管理疏忽等, 使得水库大坝尤其是高坝大库的安全管理面临更大的挑战。因此, 系统研究奥罗维尔坝溢洪道事故过程, 深入分析事故原因, 吸取经验教训, 对我国水库大坝安全管理和风险防控具有重要的现实意义。

收稿日期: 2018-11-12; 网络首发时间: 2019-05-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190520.1703.005.html>

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-201717); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036403)

作者简介: 周兴波(1988-), 博士, 主要从事水电工程设计研究。E-mail: zhou_xingbo@126.com

通讯作者: 周建平(1962-), 教授级高级工程师, 主要从事水电工程设计研究。E-mail: zjp@powerchina.com

2.2 大坝建成后的历次重大事件

2.2.1 1975年地震 1975年8月1日, 距离奥罗维尔坝西南方向12 km处发生5.7级地震, 除Hyatt电厂停止运行45 min外, 奥罗维尔坝未受太大影响, 一些设施受到局部或微小破坏, 但都得到及时修复^[16]。地震中, 奥罗维尔坝地震加速计测得垂直于河流方向的峰值加速度为 $0.09g$, 顺河流方向的峰值加速度为 $0.13g$ 。在经受5.7级地震后, 大坝按6.5级地震重新进行了安全评估。

2.2.2 1986年洪水 1986年2月中旬, 加州冬季出现持久而强烈的暖湿气流, 并伴随较大范围的强降雨。据加州DWR记录, 共有187个水文站报告了10 d内有记录以来的最大降水量, 其中有10个水文站2月17日24 h的降水量超过254 mm, Brush Creek水文站2月16—18日3日累计降水达458.47 mm。这次降水导致菲泽河出现奥罗维尔坝建成以来的最大洪水记录, 主溢洪道泄流量首次达到 $4250 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大入库流量达 $7545 \text{ m}^3/\text{s}$, 2月19日3:00库水位达到269.01 m, 库水位变化过程见图3^[17]。

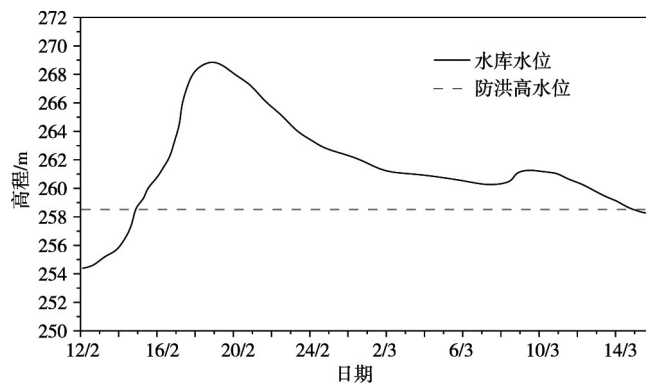


图3 1986年2月12日至3月16日库水位变化过程

2.2.3 1997年洪水 1996年12月至1997年1月, 暴风雨现象再次引发降水过程^[18]。USC00041159水文站和BRS水文站两周降水量分别达到541.1和965 mm, 这是菲泽河流域有记录以来的最大降水量, 再叠加积雪融化的洪水, 奥罗维尔水库遭受极大威胁。据加州DWR资料^[19], 此次洪水过程于1997年1月1日达最大入库流量 $7766 \text{ m}^3/\text{s}$, 1月2日达最大出库流量 $3660 \text{ m}^3/\text{s}$, 入库和出库流量过程见图4。1996年12月31日5:00库水位超过防洪高水位, 1月3日库水位上涨至最高水位270.42 m, 超过1986年的最高水位269.01 m, 刷新了奥罗维尔水库的运行最高水位记录, 水库库容达到41.2亿 m^3 ; 1月11日库水位回落至防洪高水位, 库水位变化过程见图5。

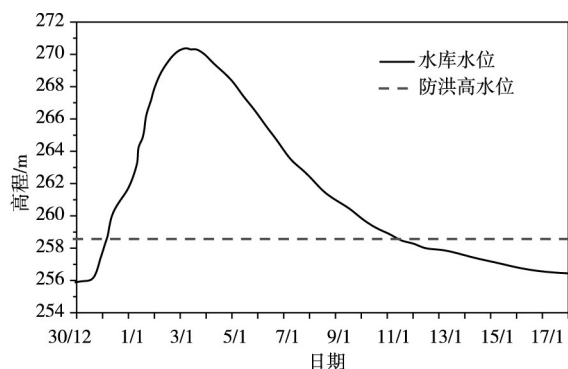
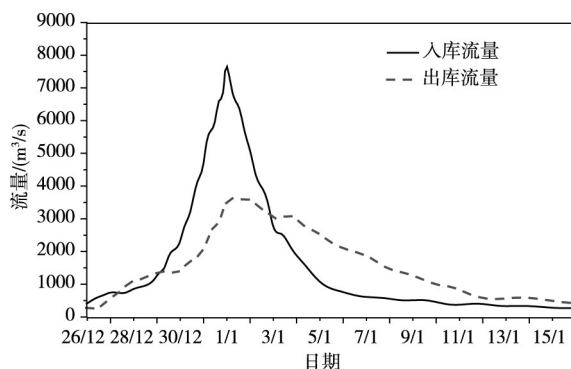


图4 1996年12月26日至1997年1月16日入库出库流量变化过程 图5 1996年12月30日至1997年1月18日库水位变化过程

2.2.4 2005年FERC的再次许可 经美国联邦能源监管委员会(FERC)批准, 自2003年起, 加州DWR对大型水利水电基础设施进行升级加固, 奥罗维尔水电工程在列。在完成此项工作的同时, 还开展了环境影响评价、水质认证和洪水管理等大量的技术研究, 最重要的是采用HEC-RAS模型反演了1986和1997年的洪水过程, 划定了泛洪区, 研究改进了应急行动计划, 更新了奥罗维尔水库的可能最大洪水^[20]。2005年1月26日, 加州DWR正式向FERC重新申请许可, 2007年2月1日, FERC授权加州DWR继续运行奥罗维尔工程至2008年1月31日^[21], 但再次授权许可并未获得全票通过。2005

年10月17日，河流之友(the Friends of the River)、南尤巴河流公民联盟(the South Yuba River Citizens League)和塞拉俱乐部(the Sierra Club)三个独立民间组织认为，应急溢洪道不能满足1970洪水控制手册中设计泄洪流量的要求，并于2006年12月18日向FERC书面报告，提出应急溢洪道下游山坡没有任何防护设施，这与FERC《工程导则》(Engineering Guidelines)中关于辅助性溢洪道建设的相关规定不一致^[22]，存在缺陷和安全隐患。

2.2.5 溢洪道检查情况 根据要求，FERC每5年必须组织对奥罗维尔坝及其相关设施进行独立核查，分析其潜在的失事模式(the Potential Failure Mode Analysis, PFMA)。2009年的PFMA报告中^[23]，明确指出应急溢洪道存在大量植被，几棵大树树根已伸入泄槽区域，如遇暴风雨将可能连根拔起，引发泥石流，影响溢洪道正常运行。2014年PFMA报告指出^[24]，加州DWR对主溢洪道泄槽进行了补强加固和修复。此外，加州DWR大坝安全司也分别于2013年1月、2013年7月、2015年8月和2016年8月对溢洪道进行了现场检查。以上几次检查报告均表示主溢洪道和应急溢洪道安全性较好，未发现突出的安全隐患。

3 2017年溢洪道事故过程

3.1 暴风雨过程及水库水量变化 2017年1月初，奥罗维尔发生两场小范围暴风雨。根据加州DWR Brush Creek水文站记录，第一场降雨从1月1—4日，1月3日达最大降水量90 mm。第二场暴风雨从1月7—12日，1月10日达最大降水量136 mm。这两场降水导致奥罗维尔湖水位上涨，1月8日21:00和1月10日22:00入库洪峰流量分别为4839和3097 m³/s，出入库洪水和库水位变化过程分别见图6和图7。

由图7可知，1月12日17:00奥罗维尔水库水位首次超过防洪高水位258.62 m。为确保水库水位不再急剧上涨，此时奥罗维尔坝主溢洪道泄洪流量逐渐增大，使得出库流量大于入库流量。出入库流量过程和库水位变化过程分别见图8和图9。由图9可知，2月3日17:00奥罗维尔库水位再次降低至防洪高水位258.62 m，这也为即将到来的2月暴风雨预留了一定安全裕度。

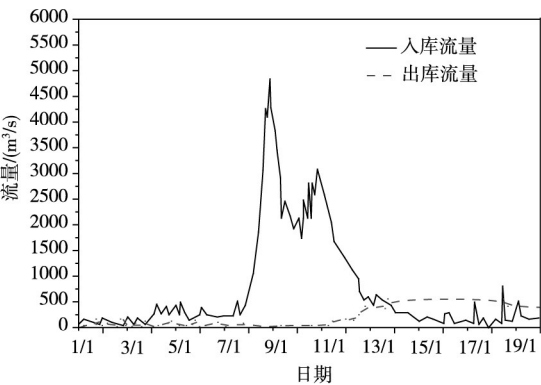


图6 2017年1月1—20日奥罗维尔大坝入库出库流量过程

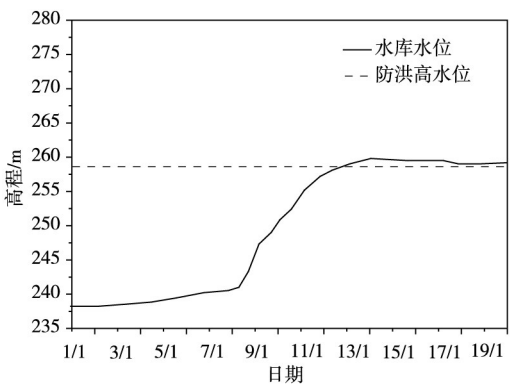


图7 2017年1月1—20日奥罗维尔水库水位变化过程

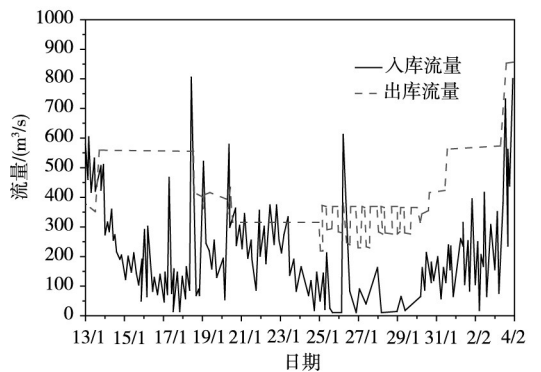


图8 2017年1月13日—2月4日奥罗维尔水库出入库洪水过程

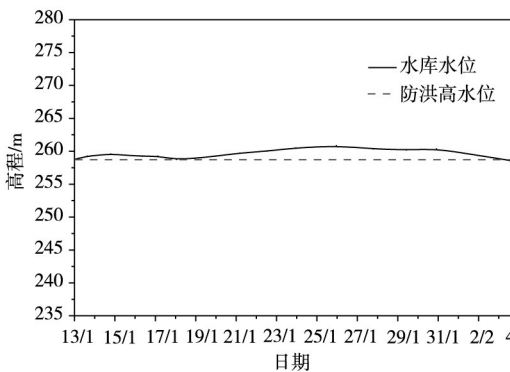


图9 2017年1月13日—2月4日奥罗维尔水库水位变化过程

据加州 DWR 报告，2 月 2—11 日菲泽河流域出现一次持续暴雨，奥罗维尔湖上空暴雨强度最大，BKL 水文站 2 月 7 日降水量达 136 mm 峰值。之后，这场暴风向东转移，ANT 站在 2 月 9 日降水量达到峰值 43 mm，DAV 站 2 月 11 日降水量达到峰值为 61 mm。此次降水过程在奥罗维尔湖附近出现峰值，造成短时间大流量过程。据加州 DWR 的入库流量过程(图 10)，2 月 9 日 19:00 入库流量达到洪峰 5392.52 m³/s，这一数值低于 1986 年和 1997 年的最大洪水记录，与 1955 年和 1964 年的洪水相当。在正常情况下，奥罗维尔水库完全可以应对这一过程洪水。

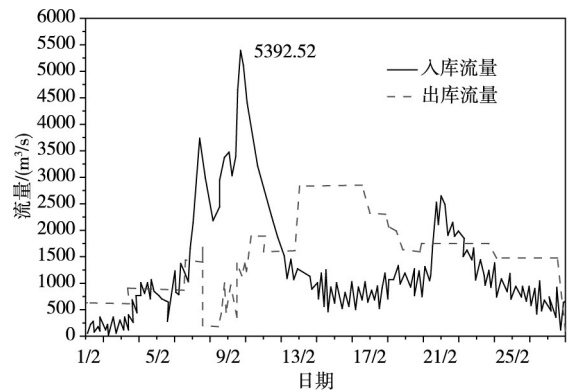


图 10 2017 年 2 月奥罗维尔水库出入库流量过程

3.2 主溢洪道泄流槽破坏 2 月 6 日 13:00，为应对 1500 m³/s 的入库洪水，奥罗维尔溢洪道开始增大泄流量，出库流量由 880 m³/s 增加至 1400 m³/s(图 10)。然而，2 月 7 日 10:00 左右，现场工作人员发现主溢洪道水流变浑浊，为查明原因，主溢洪道立刻暂停泄流，工作人员现场查勘发现在泄槽中上部有一冲坑，主溢洪道已严重损坏，只要泄洪必将导致混凝土泄槽和下游侧墙冲刷塌陷。而此时，水库水位已超过防洪高水位，且 2 月的暴风雨产生的洪水也即将入库，奥罗维尔水库洪水压力极大。

经与各大坝安全机构协商，为避免漫坝，大坝运行单位决定尝试主溢洪道泄洪，并监测其冲刷破坏发展情况。2 月 8 日，泄流量从 300 m³/s 逐渐增至 900 m³/s。2 月 9 日，已形成的冲坑进一步被冲刷扩大，主溢洪道泄槽发展为贯穿性破坏，与最初发现时的破坏情况的对比见图 11。最让人担心的是，已破坏的溢洪道继续掏蚀冲刷向上发展，即典型的溯源侵蚀，见图 12。由于水库库水位上涨速度快，根本没有时间修复主溢洪道。此外，由于 2 月 7 日曾使用发电进水系统泄流，已造成部分控制部件淹没损坏，所以库水又不能通过 Hyatt 电站泄流，位于应急溢洪道下游山坡上的输电线和线塔受到直接威胁。



图 11 2 月 7 日(左)和 2 月 9 日(右)主溢洪道冲刷破坏对比(来源: Kelly M Grow, DWR)

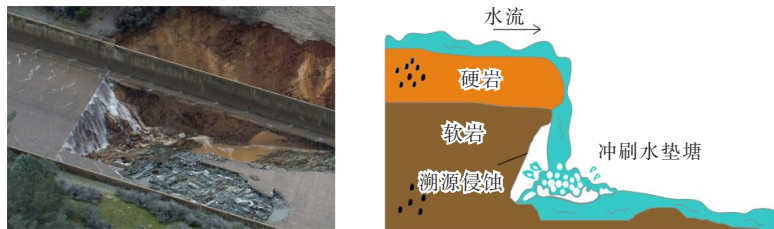


图 12 典型的水头跌落冲刷

因此，大坝运行单位进退两难。既不能使用已破坏的主溢洪道继续泄流，也不能使用存在风险且未经检验的应急溢洪道。但应急溢洪道没有闸门，水库水位一旦超过堰顶高程 274.62 m，将自动漫顶过流。为避免应急溢洪道漫顶冲刷，工作人员对其泄槽区域进行了紧急清理，并对堰体底部进行了加固，见图 13。此时水库入库流量已达峰值 5392 m³/s。

3.3 应急溢洪道漫顶过流 2月11日 8:00，水库水位上涨至应急溢洪道堰顶高程 274.62 m，溢流堰首次过流(图 14)。据加州 DWR 报告，水流漫过应急溢洪道堰顶时长超过 37 h，直至 2月12日 21:00，水库水位才再次降低至堰顶高程 274.62 m，其变化过程见图 15。



图 13 2月10日应急溢洪道下游坝坡清理及坝趾加固(来源：Brian Baer, DWR)



图 14 2017年2月11日应急溢洪道首次过流(来源：Zack Cuninghame, DWR)

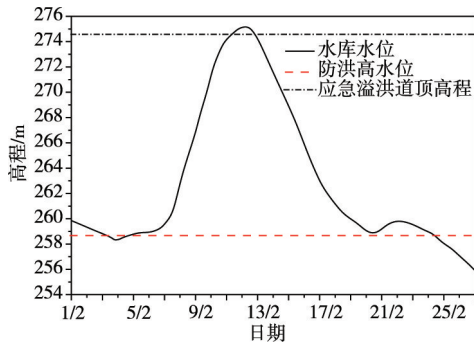


图 15 2017年2月1—27日奥罗维尔水库水位变化过程

应急溢洪道漫顶过流后，对下游冲刷破坏极为严重，导致进场公路被冲毁，靠近右岸建筑物处出现一冲刷口(图 16)，应急溢洪道宽度 527.3 m，估计冲刷口距右岸建筑物约 20 m，若冲刷侵蚀继续，将很可能进一步扩展，造成应急溢洪道失事，后果将不堪设想。



图 16 2017年2月13日应急溢洪道过流后出现小缺口(来源：Randy Pench, Sacramento Bee)

3.4 后果预测及紧急抢修 由于无法确定后续应急泄洪的破坏程度，地方政府考虑失事后果的严重性，于2月12日17:00左右向大坝下游3个区县居民发布紧急撤离令，比尤特、尤巴、马里维尔等区域约18.8万人开始紧急撤离。同时，加州DWR采取泄洪措施，将主溢洪道的泄洪流量增加至 $2830\text{ m}^3/\text{s}$ ，虽水库水位迅速降低至应急溢洪道堰顶高程以下，但却使得主溢洪道的破坏程度更严重。所幸的是在增大流量泄洪过程中，主溢洪道的破坏部位并未进一步向上游扩展。

2月13日，应急溢洪道停止漫顶过流后，由于进坝公路被冲毁，为避免洪水再次漫顶冲刷下游，在应急溢洪道的下游部位采用直升飞机吊入大量袋装石块，以加固补强(图17)。位于坝上的工人们辅助性建筑物上的洞和裂缝进行了快速修补，并用混凝土加固。所幸的是，之后洪水没有再次漫顶过流。

2月27日，主溢洪道基本停止泄流，被冲刷破坏后的主溢洪道如图18所示。接下来的修复工作包括对主溢洪道的上部进行喷混凝土加固，以避免小流量过流时进一步的冲刷侵蚀破坏；采用爆破快速拆除主溢洪道泄洪槽下部，以尽快开展修复重建工程。



图17 直升飞机吊入袋装石块



图18 被冲刷后的主溢洪道^[25]

4 事故原因分析与主要问题

事故发生后，FERC要求加州DWR成立了独立调查组(Independent Forensic Team)^[25]，包括岩土工程、水工结构、工程地质、水力学和大坝安全等领域6名专家。加州DWR提供基础资料，并负责相关协调工作。调查结果表明，此次溢洪道事故是由于长期以来的制度不完善、管理不到位、行业惯用做法不科学、溢洪道设计与施工不足、主溢洪道泄流槽老化和地基条件差等问题未能及时妥善处理等多种原因所致。总体来说，事故原因与反映的主要问题可分为工程问题和非工程问题。

4.1 工程问题 工程问题主要有：(1)设计存在缺陷。一是设计者认识与经验不足。独立调查组认为，主溢洪道的主要设计者工程设计经验少，仅仅是在大学课程设计中接受过指导培训；加州DWR也未重视设计方案咨询和审查；在设计中，未总结对比已建的其他大型泄槽式溢洪道。二是地质工程师未能与设计者进行充分技术交底。此外，溢洪道设计者仅对泄槽底部地质缺陷区进行了不充分地开挖回填，其他均假定泄槽位于完好的基岩上，这与实际情况并不相符。(2)施工建设存在不足。施工过程中，一是基础处理不到位，在主溢洪道泄槽底部仍发现部分区域中等风化和强风化的岩体，甚至在一些区域出现压实的黏土层。二是泄槽底板混凝土厚度不足，排水管的直径由4英寸被调整增加至6英寸，增加了排水沟附近区域的裂缝，加之混凝土底板下部排水管嵌入底板，使得排水管上部的混凝土厚度达不到设计要求。三是锚杆长度缺乏适当的调整，在主溢洪道泄槽下岩体风化严重的区域，锚杆的长度和开挖回填深度均未有调整。

以上设计缺陷和施工建设不足，导致主溢洪道建成后就存在“先天性缺陷”。大坝刚建成之后，排水管上方及沿线的混凝土泄槽底板就开始出现裂缝，在底板下方形成大流量排水。起初，底板裂缝及排水被认为是不正常现象，但很快就被认定为“正常现象”，只是需要持续的修补，这成为本次溢洪道事故的先天性诱因。

4.2 非工程问题 事故中,有多次机会人工干预可阻止事态进一步恶化,但由于多种诱导因素相互影响、共同作用,使得出现紧急事故时错过遏制事故发展的最佳时机。从非工程问题的角度分析,主要暴露出以下问题:(1)运行管理与紧急决策能力不足。尽管加州DWR及美国相关部门建立了完善的大坝安全核查与评估机制,但在运行调度与管理,尤其是紧急情况的运行调度方案制定与决策方面仍显得相对不成熟,过度的依赖监管人员及监管程序,导致紧急情况下未能在最佳时机快速做出最有效决策;(2)大坝安全核查与评估未能触及本质问题。尽管美国能源监管委员会、加州水资源部等部门建立了完善的大坝安全核查与评估机制,包括年度常规检查、五年定期核查、潜在失事模式分析和应急处置计划等,但受经费成本控制、核查与评估方法等问题限制,导致大坝安全核查与评估难于发现危及工程安全问题的关键因素;(3)加州DWR的管理机制存在不足。与其他大型工程业主一样,加州水资源部对其关键基础设施的可靠性过于自信,忽略了其在紧急情况下的应急能力。同时,受政府及相关机构成本经费控制压力,导致大坝安全管理、日常维护和补强加固往往得不到应有的重视。此外,由于加州水资源部的管理保守,不能积极主动的学习先进的行业知识,未能形成运行管理所需的专业技术能力和风险管理能力。

5 对我国大坝安全管理的启示

当前,我国大坝数量位居世界第一,随着新建大坝数量的增多和已建大坝运行期的增长,其安全管理与风险防控将成为今后我国大坝安全关注的重点。美国在大坝安全管理方面已从法律法规、监管机制、风险评估、补强修复和应急管理等多方面投入了大量的人力、物力和资金,国家层面以立法的形式实施了“美国国家大坝安全计划”。但由于全美大坝的平均坝龄长(达56年),存在一些高风险的大坝,正开展安全补强工作。而奥罗维尔坝溢洪道事故恰好发生于其投运50年之际,此次事故偶然之中存在一定的必然性,对全球坝工领域产生的影响较大,其经验与教训值得深思与借鉴。

5.1 严控设计过程,避免重大隐患 工程选址、工程规模、坝型及筑坝技术等设计方案的研究和决策,事关工程安全、投资和工期,是水电工程前期工作中的重大工程技术问题。设计方案的缺陷是此次奥罗维尔坝溢洪道事故的重要原因之一,除此之外,美国加州圣弗朗西斯坝、法国马尔帕塞拱坝均是设计过程把控不严,导致设计错误而形成溃坝事件。为体现设计先进性和合理性,避免设计者“经验缺乏”或“独断专横”,切实推进设计审查,对重大疑难问题进行专题研究,可最大程度的避免先天性重大缺陷。

我国水利水电行业实行严格的工程勘察设计资格标准和市场准入制度,对不同规模的大坝工程要求设计单位具备与之相应的勘察设计能力。业主单位委托有相应资质单位开展前期研究论证工作,编制初步设计文件或可行性研究报告后,按规定进行评审或审查,并报行业主管部门审批。总体而言,设计审查制度能够规避工程规划设计中可能的重大安全隐患。与此同时,当前我国水库大坝设计均是基于“工程安全”的单一梯级设计,为在设计阶段更好的防控风险,今后我国水库大坝设计将更多的考虑公共安全,向基于“工程风险”的流域梯级水库群系统风险防控的方向发展。

5.2 强化建设管理,确保工程质量 建设质量是工程的生命,质量管理贯穿工程全生命期。建设过程中,要重视对水文气象、河流泥沙、工程地质、坝基处理以及泄洪消能等重大关键技术问题,以及洪水、地震、泥石流等自然灾害的不可预见性研究,尤其在工程施工中,应根据施工开挖揭露的实际地质情况,进一步研究完善工程设计方案,强化隐蔽工程和全过程管理,确保工程安全可靠。奥罗维尔主溢洪道在修建过程中,如若对发现泄槽地板的地质条件不及预期好,甚至发现软岩及黏土层等问题及时研究并完善地基处理方案和结构措施,奥罗维尔坝主溢洪道的先天性缺陷即可避免。

有经验的监理、质量监督、现场咨询工程师可通过现场勘查发现问题、提出问题,并促使设计工程师进行研究,改进设计。目前,我国在水利水电工程建设中,大力推行工程建设监理和质量监督工作,提倡开展工程建设项目全过程咨询制度。雅砻江流域水电开发公司在锦屏一级、二级水电站、两河口水电站、杨房沟水电站建设过程中,执行了建设监理、质量监督与全过程技术咨询制

度，保证了工程的质量，取得良好效果。

5.3 加强运行监测，提升应急能力 加强流域各个梯级水库的运行监测，优化运行水库群联合调度方案，最大程度提升流域整体抵抗风险的能力，进而提升应急管理能力和风险处置水平，确保在紧急事故中将影响和损失降至最低。奥罗维尔坝溢洪道事故中，加州水资源部未能提出最优的泄洪方案，错过了最佳泄洪时机，造成下游 18.8 万人不得不紧急转移。但另一方面，在仅仅 24 h 内，18.8 万人能够高效、有序地转移，也体现出地方政府超强的应急管理能力和公众极强的应对危机意识。

我国应进一步加强水库大坝运行监测与调度水平，研究制定风险防控应急调度预案，并通过演练不断加以改进。流域管理机构和水库大坝业主要加强与地方各级政府、气象、水文、国土等部门的联系协作，及时掌握雨情、水情动态和预测预报情况，完善预警通信系统和信息发布机制，通过各种方法向受影响区域提前发布暴雨、洪水和工程泄洪信息；同时，应积极做好公众的安全教育宣传，建立切实可行的应急预案和多部门应急联动机制。

5.4 完善监管机制，强化风险控制 有效健全的监督管理机制是确保水库大坝风险可控的基本保障，但健全的监管机制不能流于形式，而要切实有效。美国自 1892 年建成第一座水电站，至今已有近 130 年的历史，其水库大坝安全管理形成了联邦政府和州政府两级管辖的机制。凡是由美国垦务局、陆军工程师兵团、田纳西管理局等联邦机构建设和管理的大坝均是联邦政府管辖，其余的大坝由所在州政府管辖，但非联邦政府管辖的水电大坝归属联邦能源监管委员会管辖。尽管美国监管机制健全，但此次奥罗维尔坝溢洪道事故受经费、核查方法等条件限制，历次检查并未能触及本质原因。

我国一直重视水库大坝安全监管，经过数十年发展，已形成《水法》《水库大坝安全管理条例》等法律法规，以及水电站大坝安全注册、定期检查、安全监测等监管机制，保障了我国水库大坝基本安全。今后，我国应进一步健全水库大坝的监管机制，基于信息化、智能化确保监管切实有效，风险可控，并重点研究全流域尺度下梯级水电站库群的系统性风险防控，充分发挥流域各梯级水库联合风险调度能力，提升流域系统抵抗灾害的能力。

5.5 重视薄弱环节，确保运行可靠 尽管启闭机、闸门、泄水消能等附属建筑物是水电枢纽工程的次要建筑物，但其重要性不亚于大坝等主要建筑物。在运行监测与维护管理中，应重视泄水消能等建筑物的运行可靠性核查，尤其重视薄弱部位、薄弱环节的核查。此次奥罗维尔坝溢洪道泄水安全事故是在远小于设计泄洪流量情况下发生，该事故并非个案，我国乃至全球各国都曾不同程度地出现过泄水安全事故，且很大一部分事故是在小流量情况下出现的问题。大坝安全核查，不仅需要复核最大泄流能力，更要检查各种泄流组合下的运行可靠性，包括闸门的正常启闭，流道与河道的抗冲刷和抗冲蚀能力。对于运行多年的高坝大库，泄水建筑物运行的几率不大，需要定期开展闸门的启闭和泄流试验，检查泄流后泄水及消能建筑物的运行情况。对于多年不经常运行的应急溢洪道，要重视底板、边墙的缺陷核查。应急溢洪道要做到备而有用。

此外，也要重视建筑物运行维护与补强加固。泄水建筑物地基沉降、材料劣化、结构损伤往往具有隐蔽性，要加强定期巡检和必要的检测，对可能影响运行安全的隐患，要及时补强加固。对开畅式溢洪道存在杂物要及时清除；对高速水流部位，重视裂缝、蜂窝、麻面等缺陷的二次处理；对于掺气减蚀部位，定期检查通气孔的掺气效果。通过充分重视薄弱部位、薄弱环节，确保水库大坝始终安全可靠。

5.6 持续开展隐患排查，推进全流域系统风险评估 隐患排查和风险评估要定期开展，提早开展，对流域系统各梯级、对枢纽工程各建筑物、对大坝泄水设施、安全监测设施、防洪度汛计划、预警预防等措施等进行系统检查，及时发现问题并分析原因，及时研究处理措施。奥罗维尔大坝自建成至今均按要求执行了美国能源监管委员会、内务部垦务局及加州水资源部的定期检查，并每五年开展一次潜在失事模式分析，但溢洪道事故的发生足以证明大坝隐患排查、安全核查与风险评估不够到位。

目前，我国水电站大坝已形成基本完善的安管理体系。前期工作中，严格执行设计审查核准制度、重大问题专家咨询制度；建设过程中，强化质量监督，重视关键节点的安全鉴定和验收；运行过程中，责任主体明确，监督和管理职责落实到位；对于重大科学问题能够进行全面深入的论证

分析, 确保工程风险可控。但从流域梯级水电站库群系统安全的角度, 我国还需要进一步完善法规制度, 改进运作机制, 加强研发投入, 加快建立健全流域梯级水电站综合监测与管理平台系统, 确保大坝隐患排查、风险评估和定期检查切实有效。

6 结论与建议

奥罗维尔坝溢洪道事故为美国大坝安全管理敲响了警钟, 也提醒世界各国在建设水库大坝的同时, 应足够重视大坝勘测设计质量和运行维护中的安全管理。本文在收集分析奥罗维尔大坝基本资料的基础上, 系统阐述了奥罗维尔坝经历的重大事件及2017年溢洪道事故的详细过程, 深入分析事故发生的原因和反映的工程问题和非工程问题。

(1)此次奥罗维尔大坝溢洪道事故是长期以来的制度不完善、管理不到位、行业惯用做法不科学, 溢洪道设计与施工不足、主溢洪道泄流槽老化、地基条件差等问题未能及时妥善处理等多种原因所致。设计者工作经验不足、技术交底不充分、政府监管不重视设计咨询和审查、基础处理不彻底、泄槽底板混凝土厚度不足等是本次事故先天性缺陷的主要原因。运行管理与应急调度失当、安全核查与风险评估流于形式、政府监管不力等是本次事故后天性隐患形成的主要原因。

(2)我国水利水电行业实施的“市场准入、设计审查、质量监督、安全鉴定、竣工验收、大坝注册、安全定检、隐患排查治理”等一系列强制性监管制度, 在督促业主、设计、施工和监理等各市场主体安全生产责任落实方面发挥了重要作用。在大坝安全管理方面, 我国应继续严格实行勘察设计审查制度, 完善工程建设监理、质量监督和全过程咨询制度, 切实落实水库大坝隐患排查、定期检查与风险评估、风险防控机制, 加快建立流域水库大坝风险管理体系, 确保流域水库群安全、可靠运行。

(3)奥罗维尔大坝溢洪道事故应急处置过程中, 水库应急调度显然并非最科学的, 但其积极有序、及时高效地转移约18.8万人, 从另一方面说明了州政府较高的应急管理能力, 保证了公共安全, 值得我国流域梯级水电站库群应急除险和风险应急处置工作借鉴。如何能在确保工程安全的前提下, 提升风险决策与应急管理能力, 尤其在流域梯级水库群系统中通过风险应急调度, 将灾害风险的社会影响降低至最小, 是今后重点关注工作之一。现实工作中, 相关工作的开展及机制的建立与推动, 更需要国家法律法规、政策环境以及行业共识的支撑与激励。

参 考 文 献:

- [1] VAHEDIFARD F, AGHAKOUCHAK A, RAGNO E, et al . Lessons from the Oroville dam[J] . Science, 2017, 355(6330): 1139-1140 .
- [2] ARISTOTELIS E K . The Oroville Dam 2017 Spillway Incident Possible Causes and Solutions[D] . National Technical University of Athens, 2017 .
- [3] McDONALD C . Oroville Dam highlights infrastructure risks[J] . Risk Management, 2017, 64(3): 6-9 .
- [4] SAMANTHA S, DEREK H, KRISTINE P . 188, 000 evacuated as California's massive Oroville Dam threatens catastrophic floods[N/OL] . The Washington Post, 2017-2-13 .
- [5] 中华人民共和国水利部 . 2017年全国水利发展统计公报[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2017 .
- [6] 周建平, 王浩, 陈祖煜, 等 . 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I : 理论基础和等级标准[J] . 水利学报, 2015, 46(5): 505-514 .
- [7] 杜效鹄, 李斌, 陈祖煜, 等 . 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 II : 高土石坝坝坡稳定安全系数标准[J] . 水利学报, 2015, 46(6): 640-649 .
- [8] 周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等 . 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究 III : 梯级土石坝连溃风险分析[J] . 水利学报, 2015, 46(7): 765-772 .
- [9] 周建平, 周兴波, 杜效鹄, 等 . 梯级水库群大坝风险防控设计研究[J] . 水力发电学报, 2018(1): 1-10 .
- [10] US Army Corps of Engineers . Oroville Dam and Reservoir, Report on Reservoir Regulation for Flood Control

- [M]. Sacramento: US Army Corps of Engineers, 1970.
- [11] California Department of Water Resources. Lake Oroville Spillway Repairs: General Overview[Z/OL]. [2017-04-18]. <https://cdec.water.ca.gov/reservoir.html>.
- [12] California Department of Water Resources. California State Water Project, Volume III: Storage Facilities[M]. Sacramento: The Resources Agency, 1974.
- [13] California Department of Water Resources. Assessment of the Vegetation Area on the Face of Oroville Dam[R]. DWR, 2017.
- [14] California Department of Water Resources. Board of Consultants Memorandum No. 7-May 31, 2017. Oroville: California Department of Water Resources[Z/OL]. [2017-05-31]. <https://cdec.water.ca.gov/reservoir.html>.
- [15] 赵纯厚, 朱振红, 周端庄. 世界江河与大坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [16] California Department of Water Resources. Performance of the Oroville Dam and Related Facilities during the August 1, 1975 Earthquake[M]. Sacramento: Department of Water Resources, 1977.
- [17] California Department of Water Resources. The Floods of February 1986[R]. DWR, 1986.
- [18] KOZLOWSKI D, EKERN M. Heavy Precipitation Event, Southwest Oregon, Northern California, and Western Nevada, December 26, 1996 – January 3, 1997[M]. Sacramento: California Nevada River Forecast Center, NOAA, 2012.
- [19] California Department of Water Resources. Historic Rainstorms in California[R]. DWR. 1997.
- [20] California Department of Water Resources. SP-E4: Flood Management Study[R]. DWR. 2004.
- [21] JOHNSON R. Oroville Dam: After 10 years of delays on relicensing, 16 groups want more time[Z/OL]. Retrieved from Mercury News [2017-07-21]. <http://www.mercurynews.com/2017/07/21/oroville-dam-after-10-years-of-delays-on-relicensing-16-groups-want-more-time/>
- [22] STORK R, SHUTES C, REEDY G, et al. The Oroville Dam 2017 Spillway Incident: Lessons from the Feather River Basin[R]. Friends of the River, 2017.
- [23] California Department of Water Resources Division of Operations and Maintenance. Potential Failure Mode Analysis Report Oroville Dam[R]. DWR, 2009.
- [24] California Department of Water Resources Division of Operations and Maintenance. Potential Failure Mode Analysis Report Oroville Dam[R]. DWR, 2014.
- [25] JOHN W F, IRFAN A A, PETER A D, et al. Independent Forensic Team Report Oroville Dam Spillway Incident[R]. Independent Forensic Team, 2018.

Lessons from the Oroville Dam spillway failure analysis

ZHOU Xingbo¹, ZHOU Jianping², DU Xiaohu¹

(1. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. Power Construction Corporation of China, Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: The Oroville Dam spillway failure not only attaches importance to the United States for dam safety management, but also reminds to all countries in the world. On the basis of comprehensively reviewing the major risk event of the Oroville Dam in US, this paper systematically elaborates the failure process of Oroville main spillway and emergency spillway and deeply analyzes the possible cause and solutions. The result shows that the cause of this failure should be a systematic problem which accumulated in a long-term in many aspects, such as project design, construction and operation management. The spillway design and construction defects are inherent risk, and the insufficient of operation and management mechanisms are human risk. According to the major issues reflected in the incident, the authors has made proposals in terms of dam design, construction, operation and emergency management, and call on the relevant departments in China to speed up the establishment of the lifecycle dam risk management system.

Keywords: Oroville Dam; spillway accident; dam safety; emergency response; safety management

(责任编辑: 王冰伟)