

混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评

顾冲时^{1,2}, 苏怀智^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:我国混凝土坝工程无论数量、高度、规模均居世界前列,大坝长效服役的健康状况不仅关系到整个工程的安危,而且对经济建设、社会安定与生态安全等具有重大影响。在对我国混凝土坝工程建设与安全现状进行阐述的基础上,从混凝土坝材料性能演化、隐患病害监测与检测、施工质量控制、安全风险管理与评定等方面,论述了混凝土坝长效服役与风险评定理论、方法及其技术的研究现状。认为今后应加强多破坏因素耦合作用下混凝土坝材料性能演化规律、大坝隐患病害与施工质量的全方位智能化监控、水库大坝风险标准与实用化评估、溃坝概率计算和后果评价等方面的深入研究,以建立和完善混凝土坝长效服役保障与提升的理论和方法体系。

关键词:混凝土坝;长效服役;性能演化;安全监控;风险评定;述评

中图分类号:TV642 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0001-12

Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams//GU Chongshi^{1,2}, SU Huaizhi^{1,2}(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The number, height, and scale of existing concrete dams in China rank high in the world. Long-term service of dam engineering has a significant influence on dam safety as well as economic construction, social stability, and ecological safety. Based on an analysis of the current status of concrete dam construction and safety in China, the current status of long-term service of concrete dams and theories, methods, and techniques for the risk assessment of concrete dams are summarized from the aspects of concrete material performance evolution, concrete dam disease monitoring, construction quality control, and risk management and assessment. The law of concrete material performance evolution under the coupling effect of multiple factors, the intelligent monitoring of hidden dangers and diseases of concrete dams as well as dam construction quality, the standards and practical methods for dam risk assessment, and the probability calculation and consequence evaluation of dam breaks should be emphasized in future studies, so as to ensure dam safety during long-term service and improve the theories and methods of concrete dam risk assessment.

Key words: concrete dam; long-term service; performance evolution; safety monitoring; risk assessment; review

1949 年新中国成立以来,我国修建了数量众多的混凝土坝,尤其是近年来在金沙江、雅砻江和澜沧江等河流上修建了一批混凝土高坝。与其他工程结构物不同,混凝土坝不仅要承受各种动、静循环荷载及各种突发性灾害的作用,还要承受来自恶劣环境的侵蚀与腐蚀、材料性能劣化等的组合影响;另外,混凝土坝建设投资巨大,社会影响面广,而且在漫长的服役过程中逐渐与周围环境达到了一种新的平衡,其退役和拆除需要特别慎重。朱伯芳院士认为,优质实体混凝土坝可以长期服役,在采取必要的技术措施后甚至能够超长期服役^[1]。美国胡佛大坝

建成于 1936 年,至今已健康运行近 80 年,一定程度上佐证了混凝土坝的长效服役能力。

混凝土坝在长期服役过程中,发挥巨大工程效益的同时,也存在一定的风险,特别是一旦溃决失事,不仅大坝损毁,还会给下游带来严重灾害。1928 年,美国 St. Francis 重力坝溃决失事,造成 400 余人死亡;1959 年,法国 Malpasset 拱坝溃决失事,造成 500 多人死亡和失踪,财产损失约 300 亿法郎。因此,全面了解混凝土坝存在的风险并对其进行评定,不仅有利于大坝安全管理工作的开展,也有利于混凝土坝长效服役的实现。本文旨在介绍混凝土坝长

效服役和风险评定的研究现状,并对今后的发展提出一些建议。

1 我国混凝土坝工程建设与安全现状

从 20 世纪 50 年代开始,我国开工建设了几乎所有类型的混凝土坝,如重力坝、拱坝、连拱坝、大头坝、平板坝等,至 20 世纪 70 年代末,混凝土坝是这一时期高坝建设的重点,代表性工程有刘家峡重力坝、响洪甸拱坝、佛子岭连拱坝、新丰江大头坝、湖南镇梯形坝等。1978 年改革开放以来,通过引进和吸收国外先进技术和经验,并在工程实践中不断创新,我国的坝工技术取得了长足的进步。这一时期,混凝土坝在高坝建设中仍占据重要地位,1978—2011 年间,已建、在建 100 m 以上大坝共 164 座,其中重力坝 13 座,拱坝 24 座,碾压混凝土重力坝 26 座,碾压混凝土拱坝 16 座^[2]。在重力坝建设方面,三峡水利枢纽工程的装机容量、金属结构、大坝混凝土总方量均位居世界第一,并且在建设过程中解决了混凝土高强度浇筑与温控、岩体高边坡开挖稳定等技术难题,极大地推动了我国重力坝技术的发展。在拱坝建设方面,溪洛渡双曲拱坝(285.5 m)、小湾双曲拱坝(294.5 m)和锦屏一级双曲拱坝(305 m)的高度均超过了格鲁吉亚的英古里拱坝(271.5 m),标志着我国高拱坝技术已达到世界先进水平,拱坝建设迈入了 300 m 级阶段。

碾压混凝土坝以干硬性混凝土为主要筑坝材料,采用振动碾分层压实修筑而成,具有水泥用量少、施工工艺简单、施工速度快、造价低等特点^[3]。我国从 20 世纪 80 年代开始研究和建设碾压混凝土坝,并于 1986 年建成坑口碾压混凝土重力坝。经过 30 多年的探索和实践,我国碾压混凝土筑坝技术已达到世界先进水平,筑坝数量和高度不断增长,已建成的碾压混凝土高重力坝有光照坝(200.5 m)、龙滩坝(一期 192 m)、官地坝(168 m)等,碾压混凝土高拱坝有云龙河三级坝(135 m)、大花水坝(134.5 m)等。目前,碾压混凝土坝在混凝土坝中所占比例越来越大。

经过 60 多年的工程实践,我国在混凝土坝建设方面积累了丰富的经验,成功解决了一系列复杂的技术难题,已建混凝土坝数量、高度、规模等均居世界前列。但 20 世纪 50—70 年代修建的混凝土坝,由于水文系列资料短缺、设计和施工技术落后等原因,部分混凝土坝存在防洪标准低、工程质量差等问题,加上管理维护不善,随着服役时间的增长,不少混凝土坝出现严重安全隐患,成为病险大坝。1978 年以后,我国混凝土坝施工技术迅速发展,混凝土坝

工程质量普遍提高,而且在服役过程中重视管理维护,总体安全状况大有好转,但也有少量混凝土坝存在一定的安全隐患。总的来说,混凝土坝主要存在以下安全问题^[4-5]:

a. 防洪安全问题。产生防洪安全问题的原因主要有两个:一是建坝时水文系列资料短缺或未按规范设计等原因,造成原防洪标准偏低;二是由于泄洪建筑物存在安全隐患或下游河道设障等原因,洪水不能正常下泄。虽然混凝土坝能够承受漫坝洪水,但也存在漫顶破坏的可能性。

b. 混凝土劣化问题。冻融、碳化、碱集料反应等破坏作用会导致混凝土性能降低,出现开裂、剥落等现象,降低结构承载能力,甚至会威胁混凝土坝安全。如丰满、云峰等大坝长期遭受冻融破坏,混凝土大面积破坏;新安江、古田溪一级等大坝碳化现象严重,碳化深度较大。

c. 裂缝问题。裂缝产生的原因很多,如混凝土性能差、温控措施不当、大坝结构不合理、冻融破坏、碱集料反应等。裂缝问题和混凝土劣化问题是相互促进的关系。混凝土坝裂缝问题非常普遍,比如陈村拱坝和佛子岭连拱坝均出现了不同程度的裂缝问题。

d. 基础地质问题。由于勘探不到位或基础处理不全面、不彻底,部分混凝土坝基础存在地质问题,比如葛洲坝、新安江等大坝基础中存在软弱夹层。

e. 抗震安全问题。目前西部强地震区已建或在建数座 300 m 级高拱坝,这些高坝存在一定的震害风险。此外,20 世纪 50—70 年代建设的一些混凝土坝的抗震安全问题也应予以重视。

f. 安全管理问题。安全管理问题在小型水利工程中尤为突出,主要表现为专职管理人员、专业技术人员缺乏,水文监测、大坝监测设施陈旧落后或根本没有等。

综上所述,混凝土坝长效服役的影响因素和演化过程非常复杂,既受到施工质量、运行管理等影响,又受到人类活动与环境因素等影响,其相互之间存在复杂的互馈和综合作用。因此,混凝土坝长效服役与风险评定研究是一个多学科交叉和多研究手段综合的复杂课题,涉及材料、大坝隐患病害、施工质量和安全管理模式等相互关联的多方面问题。混凝土材料性能的时变演化和大坝的隐患病害关系着混凝土坝的安全性和服役寿命,优良的施工质量是混凝土坝长效服役的基础,而先进的安全管理模式有助于减小大坝风险,延长大坝服役寿命。

2 混凝土坝材料性能演化规律及阻伤措施

混凝土作为混凝土坝最主要的筑坝材料,其材

料性能的劣化是导致混凝土坝服役性能降低的内在因素,也会直接影响混凝土坝的服役寿命。混凝土是具有复杂结构的复合材料,其在服役过程中不仅要承受各种荷载作用,也要承受复杂的环境作用,诸多因素之间交互作用,材料性能演化规律十分复杂^[6]。影响混凝土材料性能演化的因素很多,如冻融破坏、碳化、硫酸盐侵蚀、碱集料反应和力学破坏等。

混凝土因内部孔隙水的冻融循环产生的破坏称为冻融破坏。北方寒冷地区的水工混凝土建筑物常常会遭受冻融破坏,尤其是大坝水位变化区、溢流面、泄水雾化溅水区等部位。由于混凝土冻融破坏的复杂性,目前还没有能够完全揭示其内部破坏机理的理论,普遍接受的有静水压理论和渗透压理论。静水压理论认为,毛细孔中的水结冰时,体积膨胀产生静水压力,导致混凝土发生破坏^[7-8]。渗透压理论认为,在温度降低时,孔径较大的毛细孔中的水首先开始结冰,使得溶液浓度增大,而孔径较小的毛细孔和凝胶孔中的水并不结冰,溶液之间出现浓度差,水从小孔向大孔迁移和重分布,从而产生渗透压,引起混凝土破坏^[9]。我国在冻融破坏机理方面的研究相对较少,多是从实验和假设出发,以质量损失、孔体积和孔径分布的变化和宏观力学参数(抗压强度、弹性模量等)为判断依据来研究混凝土的抗冻性^[10-11]。实际工程中可以通过选择合适品种水泥、使用优质骨料、降低水灰比、掺入外加剂、严格控制施工质量等措施提高混凝土抗冻性。

碳化是指空气中的 CO_2 通过孔隙和裂缝向混凝土内部扩散,并与碱性物质发生反应,使得混凝土碱性下降的复杂物理化学过程^[12-13]。碳化虽然能够降低混凝土孔隙率,提高密实度和强度,但是会使钢筋容易锈蚀,引起混凝土开裂,甚至剥落。目前,在碳化机理已经较为明晰的情况下,国内外学者在碳化深度预测和影响因素等方面进行了较多的研究。影响混凝土碳化的因素众多,主要包括材料因素(水泥品种、水灰比、掺和料及外加剂等)、环境因素(相对湿度、温度、应力及二氧化碳浓度等)和混凝土施工质量^[12]。混凝土碳化部位可以采用丙乳砂浆、环氧厚浆涂料、硅粉砂浆等材料进行处理。

硫酸盐侵蚀的破坏作用可以概括为: SO_4^{2-} 与水泥水化物发生反应,生成钙矾石、石膏等产物,这些产物吸水膨胀导致混凝土破坏;pH 值降低引起 C-S-H 凝胶解体,降低混凝土强度和黏结性能^[14]。硫酸盐侵蚀破坏机理非常复杂,现有研究仍无法完全对其进行解释,一些理论仍存在争议,比如混凝土硫酸盐结晶破坏理论^[15]。混凝土材料自身性质和外部环境都会影响硫酸盐侵蚀的严重程度,比如水泥品种、密

实度、 SO_4^{2-} 浓度、溶液 pH 值等。实际工程中可以通过合理设计混凝土材料、提高混凝土密实度以及设置保护层等措施提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。

碱集料反应是指混凝土中的碱性物质与集料中的活性成分之间发生化学反应,生成物吸水膨胀从而导致混凝土开裂的复杂过程^[16]。裂缝的产生又加剧了其他物理或化学不利因素的破坏作用,极大地降低混凝土结构的强度和工程寿命。碱集料反应具有滞后性,在混凝土结构建成之后才会发生,并且一旦发生很难阻止和修复,常被称为混凝土的“癌症”。一般来说,实际工程中可以采用限制混凝土含碱量、合理选用集料、掺入引气剂等措施预防和抑制碱集料反应^[16-17]。

水工混凝土材料性能的演化是多种力学因素和环境因素耦合作用的结果。这些力学因素和环境因素并非简单叠加在一起,因素之间也相互影响,若只考虑单一因素来研究水工混凝土材料性能演化规律显然不符合实际情况。目前,混凝土材料性能演化规律的研究大多针对单一破坏因素,多因素耦合作用的研究相对较少,部分学者开展了此方面的研究工作,比如 Nguyen^[18-19] 等通过试验研究了钙离子析出和力学破坏作用下混凝土材料性能的变化规律,并建立了化学-力学耦合模型;于琦等^[20] 基于 Papadakis 碳化模型和数值分析技术,研究了冻融环境对混凝土碳化的影响,建立了碳化深度预测模型。此外,常通过试验手段来获得混凝土材料性能演化规律,而 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》只针对单一破坏因素,没有多因素耦合作用的试验标准,这给研究带来了一定的困难。

3 混凝土坝隐患病害监测、检测与诊断

冻融、碳化、温度疲劳、溶蚀、裂缝等破坏因素的单独作用或共同作用,会导致混凝土材料性能劣化、大坝强度和稳定性下降、坝体与基础防渗能力降低等诸多问题的出现。为了解混凝土坝的安全运行状态,常将巡视检查、原位监测与现场检测相结合,通过对所得信息与资料进行分析,来监控和诊断大坝安全状况。

3.1 混凝土坝隐患病害监测与检测技术

3.1.1 原位监测技术

混凝土坝原位监测是指在坝体和基础内埋设各种监测仪器,比如应力计、应变计、温度计、渗压计、引张线仪等,通过定期或实时监测的方式获得埋设部位的应力应变、温度、渗流、变形等监测资料^[21]。国外在 19 世纪末 20 世纪初即开始对混凝土坝位

移、温度、扬压力等进行观测,但早期对大坝进行观测主要是为了检验并改进坝工设计理论和方法。20 世纪中叶国外相继发生溃坝事故,引起了人们对大坝安全的重视,原位监测作为保障大坝安全的重要手段得到了迅速发展,一大批新型监测仪器被用于原位监测,同时自动化监测系统开始出现并不断得到完善。我国从 20 世纪 50 年代才开始混凝土坝原位监测技术的研究和应用,早期主要以引进国外监测技术为主,并在实践中加以改进。1978 年改革开放之后,国家投入了大量资金用于水利水电工程大坝建设,也带动了原位监测技术的发展。

混凝土坝原位监测需要使用大量传感器,目前以差动电阻式、差动电容式、振弦式、步进马达式等传统传感器为主。智能传感器在传统传感器的基础上加入微处理器模块,提高了传感器的精度和可靠性,是传感器技术未来的发展方向。光纤传感器是近年来发展起来的一种新型传感器,可用于监测大坝位移、温度、渗流、裂缝等,但光纤传感器在实际水利工程中的应用还不是很多。GPS 技术在 20 世纪 90 年代被用于大坝变形监测,虽然因部分混凝土坝处于高山峡谷地区而受到一定限制,但在隔河岩大坝、石门子水库大坝等工程中也得到了成功应用。

3.1.2 现场检测技术

原位监测可以获得仪器埋设部位所测物理量的变化规律,但是隐患病害不一定出现在监测仪器埋设的部位,而且监测仪器也可能出现使用寿命终结的情况。应将原位监测与以无损探测为主的现场检测技术配合使用。国外从 20 世纪 70 年代开始研究大坝隐患病害现场检测技术,如意大利模型与结构研究所 (ISMES) 将声波层析方法用于大坝的安全检查,日本曾用声波层析方法对丰满大坝进行检测^[22]。我国这方面的研究工作始于 20 世纪 80 年代,目前也已取得了较大的进展。

可用于混凝土结构无损检测的方法很多^[23-26],比如回弹法、超声波法、冲击回波法、射线法、声发射法、电磁法、雷达法等;在渗漏检测方面,有同位素示踪法、水下摄像法、自然电场法、温度场法等。虽然无损检测方法很多,但是混凝土坝因其几何尺寸等原因,有些检测方法在现场检测时并不合适,应对这些方法的适用性进行研究,比如吴中如等^[21]研究了重大水工混凝土结构隐患病害的瑞利波法检测、超声波法检测以及 CT 检测的原理与资料分析方法,并探研了渗漏隐患的示踪法检测技术、水质分析法检测技术和水下摄像法检测技术;熊永红等^[27]将脉冲回波法引入到三峡工程,进行了现场测试;此外,SL713—2015《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》

也对水工混凝土结构不同检测项目及方法提出了建议和要求,主要检测项目有混凝土强度检测、内部缺陷检测、裂缝深度检测、结构厚度检测、钢筋分布及锈蚀检测、水下缺陷与渗漏检测等。

3.2 混凝土坝隐患病害诊断模型和方法

通过巡视检查、原位监测和现场检测可以获得混凝土坝隐患病害的信息和资料,然后借助工程经验、监控模型、数值分析等方法实现对混凝土坝隐患病害的诊断。监控模型诊断方法主要通过对大坝实测资料进行分析,建立数学监控模型,同时对模型中的各个分量进行物理解释,以了解大坝的工作性态,诊断分析异常状况^[21, 28]。

国外开展监控模型研究较早,20 世纪 50 年代就已开始用统计回归方法定量分析大坝变形观测资料。1956 年, Tonini^[29] 将水压分量、温度分量和时效分量作为影响大坝的主要自变量。1977 年, Bonaldi 等^[30] 提出了混凝土坝变形监控的确定性模型和混合模型。我国在监控模型研究方面起步较晚。20 世纪 70 年代,陈久宇等^[31] 率先使用统计回归方法分析原型观测资料,为我国监控模型研究奠定了基础。吴中如等^[32-33] 系统研究了混凝土坝安全监控的统计模型、确定性模型和混合模型,建立了大坝与坝基安全监控模型体系,并在实际应用中取得了满意的效果。近年来,模糊数学、灰色理论、神经网络、小波分析、遗传算法、混沌理论等理论和方法被应用于监控模型研究,许多新型模型不断出现^[34-35]。目前,统计模型、确定性模型和混合模型仍然是混凝土坝最常用的监控模型,但对于碾压混凝土坝,需要考虑其施工特点对大坝工作性态的影响。此外,库区和坝区的岩土体滑坡会影响大坝安全,所以也需要合适的监控模型对其进行分析评价。

4 混凝土坝施工质量控制

优良的施工质量是混凝土坝长效服役的基础。混凝土坝施工工序复杂,从开始施工至建成要经历基础开挖及处理,混凝土制备、运输、浇筑与养护,坝体缺陷处理等多道工序,施工质量控制应贯穿整个施工过程和各道工序。

混凝土坝的基础应具有足够的强度、稳定性以及抗渗能力。基础开挖的深度和形状应根据大坝对基础的要求以及基础的地形、地质条件分析确定,并在浇筑前进行彻底的清理。混凝土坝基础处理措施有很多,比如灌浆、开挖置换、预应力锚固等。因每个工程情况不同,应根据实际情况设计地基处理方案,如向家坝水电站从建基面选择、渗控体系、基础加固处理 3 个方面设计地基处理方案^[36];李家峡大

坝综合利用开挖置换、高压固结灌浆、预应力锚索加固、设置完善的排水系统等措施对复杂地基进行处理^[37]。

混凝土是混凝土坝的主要筑坝材料,其材料性能在很大程度上决定了大坝的工程质量。混凝土原材料从采购(生产)、存储到加工都要满足规范 and 设计要求,然后按照配合比进行拌和。混凝土坝不同部位对混凝土材料性能的要求也有所差别,应根据浇筑部位的工作条件和原材料品质,由室内试验和现场试验确定最优配合比。混凝土制备完成后,应及时运输到现场进行浇筑,并避免在运输过程中出现骨料分离、严重泌水等现象。因为混凝土坝施工强度高,混凝土用量大,且存在多种混凝土同时运输的情况,一个合理高效的混凝土运输方案是非常必要的。三峡水电站为避免错料等质量事故发生,提高运输效率和拌和系统生产能力,采用计算机运输条码识别系统指挥混凝土运输^[38]。钟桂良等^[39]借助物联网技术和计算机技术,研究了混凝土运输过程智能控制技术,并在某 300 m 级高拱坝施工进行了可行性验证。在混凝土坝施工过程中,对材料运输过程进行智能控制是当前研究和应用的热点。

混凝土浇筑与养护是坝体成型的重要环节,既要满足施工进度要求,又要保证坝体浇筑质量达到规范和设计要求,质量控制难度较大。众所周知,混凝土坝容易产生温度裂缝,需要采取必要的温控措施,比如埋设冷却水管、薄层浇筑等。过去,混凝土温度多是依靠人工进行控制,有时候温控效果并不理想。潘镇涛等^[40]为了减少温度控制过程中人为因素的影响,利用模糊控制理论建立了模糊温控系统,对大体积混凝土温度进行控制,以避免混凝土开裂。段云岭等^[41]利用分布式光纤温度测量系统测量混凝土内部温度,实现了温度仿真程序标定,以便确定合适的温控措施。林鹏等^[42]针对人工通水冷却的弊端,建立了通水冷却智能温度控制系统,并在溪洛渡拱坝建设中得到了应用。目前,混凝土温度控制方法有由人工控制向智能控制转变的趋势。

由上述可知,混凝土坝施工过程中任一环节出现问题,都会对施工质量产生不利影响。由于国外在建高混凝土坝较少,混凝土坝施工质量控制方面的研究成果很少。近年来,国内学者在混凝土坝施工质量实时控制方面进行了大量的研究,并取得了丰富的成果,如 Zhong 等^[43]考虑高拱坝施工过程中各种复杂的约束条件,研制开发了施工质量与进度实时控制系统,实现了施工过程的实时监测与反馈控制;吴斌平等^[44]基于 GPS 技术和 RTK 技术,建立了针对浇筑碾压施工的质量实时监控系

统,对压实质量参数的有效控制。目前,这些研究成果已在锦屏一级拱坝、龙开口碾压混凝土坝、官地碾压混凝土坝等工程中得到了应用,有力地保障了混凝土坝的施工质量。

5 混凝土坝风险管理与评定

5.1 混凝土坝风险管理

目前,混凝土坝安全管理模式正由传统的工程安全管理向风险管理转变,以期实现大坝工程安全和下游公共安全的统筹考虑,提高混凝土坝安全管理水平。风险管理技术起源于美国,美国也最早将其应用于水利工程领域。1976 年 Teton 坝和 1977 年 Kelly Barnes 坝的相继失事,使美国各界开始关注大坝的安全问题,推动了风险管理技术在大坝安全管理领域的研究与应用。随后,美国陆军工程师团、美国垦务局等机构和组织均制定了各自的风险管理办法,对所管辖大坝进行安全管理。20 世纪 90 年代,加拿大 BC Hydro 公司率先将风险分析技术引入大坝安全管理工作中,并为许多国家组织了大坝安全管理培训^[45]。澳大利亚在大坝风险管理方面亦处于世界先进水平,颁布了《大坝安全管理指南》、《大坝溃决后果评价指南》等多部指南^[46-47]。2000 年 9 月,“风险分析在大坝安全决策和管理中的应用”成为了第 20 届国际大坝会议的议题,标志着以风险分析为基础的大坝风险管理技术受到了广泛的关注和认可。目前,美国、加拿大和澳大利亚等国都已建立了比较完整的大坝风险管理体系,主要包括风险标准的建立、风险确认、风险评估和风险处理等内容,能够对大坝存在的风险进行全过程性管理^[48]。我国开展大坝风险管理研究较晚,但也取得了一定的进展。

风险标准的制定需要综合考虑经济发展情况、社会价值观、法律体制等多方面因素,我国目前没有统一的风险标准,但一些学者在这方面进行了积极的探索,如宋敬衡等^[49]考虑我国东西部地区人口分布、经济发展水平的差异,提出了生命风险的区域划分标准;彭雪辉等^[50]在分析国外主要风险标准的基础上,根据我国水库溃坝资料,提出了个体生命风险标准、群体生命风险标准、经济风险标准和社会与环境风险标准;李宗坤等^[51]将大坝风险标准与现行安全标准有效衔接,构建了包括生命风险标准和经济风险标准的大坝风险标准体系。

风险评估主要通过计算溃坝概率和溃坝后果来对风险进行分析,然后将分析结果与风险标准进行比较,判断风险是否可以接受。风险评估需要研究的技术要点很多,主要有溃坝模式研究、溃坝洪水研

究、溃坝概率估算方法研究以及溃坝后果评价方法研究。混凝土坝在服役过程中可能遭受洪水、地震等各种不利因素作用,并且其本身也可能存在薄弱环节,导致大坝存在溃决失事的可能,溃坝模式研究就是为了分析大坝溃坝失事的模式与路径。混凝土坝坝址处的洪水计算相对比较简单,难点在于溃坝洪水演进分析。溃坝洪水演进分析的方法有简化分析法、经验公式法、数学模型法等,在实际应用时可以根据具体情况选择合适的分析方法^[52]。

在对风险进行评估之后,应根据评估结果选择合适的方案处理风险。我国以前主要采用工程措施处理风险,但目前已经认识到非工程措施在风险处理中的重要作用,如加强安全监控、编制应急预案、将水库降等退役等。在采用工程措施对混凝土坝进行补强加固时,需要首先解决2个核心问题,即哪些缺陷需要优先补强加固以及应该选择哪种补强加固方案。针对这2个问题,一些学者开展了相关的工作,并提出了解决办法,如严祖文等^[53]指出可以通过FMECA法对大坝风险要素进行排序,确定大坝的主要风险因素,并分别利用事件树法、层次分析法、风险分析方法确定最优的除险加固方案;蔡守华等^[54]基于AHP法和TOPSIS法,建立了除险加固方案优选模型。

在大坝风险管理法规标准建设方面,2007年以来水利部先后颁布了《水库大坝安全管理应急预案编制导则(试行)》、SL483—2010《洪水风险图编制导则》、SL164—2010《溃坝洪水模拟技术规程》、SL602—2013《防洪风险评价导则》,以及组织编制了《水库大坝风险评估导则(征求意见稿)》^[55]。

除上述内容外,大坝风险管理还有其他一些关键技术需要深入研究,如洪水安全利用技术、除险加固效果评价技术等^[48, 56]。

5.2 溃坝概率分析

溃坝概率分析首先要识别风险要素,明确有哪些风险要素可能会导致大坝失事,然后确定溃坝模式与溃坝路径,一般使用FMEA法或FMECA法,最后计算溃坝概率。在识别风险要素、确定溃坝模式与溃坝路径时,可以参考国内外风险评估导则和已有溃坝案例。溃坝概率分析的重点和难点在于溃坝概率的计算,常见的溃坝概率估算方法有历史资料统计法、专家经验法、事件树法和可靠度方法等。

历史资料统计法是指通过对历史资料中记载的相似事件进行统计分析,来确定某一事件的发生概率。历史资料统计法没有考虑大坝实际情况的差异、筑坝技术和安全管理手段的进步等因素对溃坝概率的影响,有时候计算出的概率会有较大偏差。

专家经验法一般借助定性描述和定量概率转换表,将专家依靠其丰富经验作出的定性判断转换为定量概率,如李雷等^[52]结合我国具体情况和国外经验,建立了定性描述与概率对应表。历史资料统计法和专家经验法一般只用于溃坝概率的初步分析。

事件树法可以用来计算混凝土坝的溃坝概率。它一般以可能导致溃坝失事的荷载作为初始事件,用树形图表示荷载与溃坝失事之间的逻辑关系,逐步分析并确定各分支事件的发生概率,最后计算得到大坝的溃坝概率。事件树中各分支事件的发生概率可以通过历史资料统计法、专家经验法、可靠度方法以及故障树法确定。事件树法在确定溃坝概率过程中受人为因素影响较大,目前在混凝土坝中应用不多^[57-58]。

混凝土坝因其本身和所处环境的变异性以及人们认知的局限性,不确定性因素大量存在,如库水位、地震、坝基和坝肩地质条件等。不确定性因素是风险产生的根源。可靠度方法考虑了因素的不确定性对溃坝概率的影响,能够比较真实地反映混凝土坝的安全状况。理论上讲,所有可靠度计算方法均可被用于计算溃坝概率,如直接积分法、JC法、蒙特卡罗法、响应面法、随机有限元法等。目前,溃坝概率分析的可靠度方法大致分为传统可靠度方法和非概率可靠度方法两类。传统可靠度方法基于常规可靠性理论和模糊可靠性理论,可用于计算大坝洪水漫顶破坏概率、失稳破坏概率、渗透破坏概率、强度破坏概率等,不同的坝型侧重点也有所不同^[59]。对于混凝土坝,传统可靠度方法的研究和应用主要集中在强度破坏、失稳破坏等方面,如吴世伟等^[60]采用三维随机有限元法计算拱坝的点可靠度,研究了开裂深度与可靠度的关系以及拱坝体系的失效概率;封伯昊等^[61]引入损伤边界概念,综合利用响应面法和有限元分析法,在强度可靠度范畴内对混凝土坝进行可靠度分析;朱建明等^[62]利用Rosenbleuth法计算可靠度指标,并结合安全系数进行重力坝深层抗滑稳定分析;彭慧慧等^[63]提出了重力坝坝体失稳风险标准,建立了模糊风险分析模型并对其进行求解,然后结合风险标准对大坝安全进行评估;张社荣等^[64]分析了碾压混凝土重力坝的潜在抗滑失效路径,并计算了地震作用下层间抗滑稳定体系的动力可靠度。

传统可靠度方法用概率论和模糊理论描述不确定性,需要较多数据,而且概率模型比较小的误差就可能导致计算出的溃坝概率出现较大的偏差^[65]。在影响大坝的不确定性因素中,受试验或监测条件的限制,有些因素的数据是非常缺乏的,限制了传统

可靠度方法的应用范围。而基于区间模型和凸集模型的非概率可靠度方法对数据要求较低,只需知道不确定参数的界限即可,具有更好的适用性。但是,非概率可靠度方法在混凝土坝溃坝概率分析中只见少量报道,如张勇等^[65]借助响应面法和有限元法,建立了非概率可靠度分析模型,并对小湾高拱坝进行可靠性分析。夏雨等^[66]用凸集模型描述不确定性,定义了坝体单元的非概率可靠度指标,并通过搜索所有可能的失效模式来确定拱坝的可靠度。袁慕勇等^[67]以碾压混凝土重力坝为例,建立了非概率可靠度计算模型,分析了重力坝的主要失效模式。

此外,混凝土坝的许多不确定性因素具有时变特性,如混凝土材料性能会随时间缓慢变化、扬压力会因排水孔淤积发生变化等,这种时变特性也会影响混凝土坝的安全。但是,由于时变问题的复杂性,时变可靠度或时变风险率在水工领域研究较少,刘宁等^[68]考虑重力坝的随机温度场、随机徐变应力场以及混凝土强度的随机过程特性,提出了时变可靠度计算方法,并对某一重力坝进行了时变可靠度分析;杨志刚^[69]在可靠度分析中引入灰色理论和混凝土损伤概念,通过对随机变量进行时变灰色预报研究重力坝的时变可靠度问题;姜树海等^[70-71]研究了时变效应对堤坝渗流风险率和大坝防洪风险率的影响;苏怀智等^[72]综合利用模糊概率理论和时变效应理论,建立了大坝时变风险率计算模型,并给出了基于信息熵理论的时变风险率计算方法。

5.3 溃坝后果评价

全面分析混凝土坝存在的风险,不仅需要确定溃坝概率的大小,还要对溃坝所造成的后果进行评价。溃坝后果评价主要包括生命损失、经济损失、社会与环境影响三部分。

5.3.1 生命损失评价

溃坝生命损失受众多因素影响,给其估算带来了较大困难。李雷等^[73]通过研究指出,影响生命损失估算的几个关键因素分别是风险人口、警报时间、溃坝洪水的严重程度以及公众对溃坝事件严重性的理解程度。国外对生命损失非常重视,取得的研究成果也比较多。1988年,Brown等^[74]建立了溃坝生命损失与风险人口、警报时间之间的估算关系式。1993年,Dekay等^[75]将溃坝洪水严重程度考虑在内,建立了包含风险人口、警报时间和溃坝洪水严重程度的生命损失估算公式。1999年,Graham^[76]将公众对溃坝事件严重性的理解分为模糊和明确2种情况,并考虑警报时间和溃坝洪水严重程度,建议了不同情况下溃坝生命损失死亡率的取值大小及范围。2001年,Reiter^[77]在Graham法的基础上提出了

一种更加细化的生命损失估算方法,即Rescdam法。上述几种方法使用基于溃坝历史记录数据的经验公式估算生命损失,历史记录数据是否充足、公式的参数量化处理是否得当都会影响生命损失估算的准确性^[73]。为了更准确地估算生命损失,一些学者将可靠度理论引入到生命损失研究中,并提出了一些估算方法,如Assaf法。我国生命损失研究起步较晚,但也取得了一定的进展,一些新理论和新方法被应用到生命损失估算中。周克发等^[78]根据8座已溃大坝调研资料,在Graham法的基础上,用严重性程度系数修正风险人口死亡率,提出了适用于我国的生命损失评价模型。王志军等^[79-80]利用支持向量机、神经网络、GIS等技术和方法,对溃坝生命损失进行评估。王君等^[81]针对我国溃坝资料缺乏的现状,引入可变模糊集理论,建立了溃坝生命损失预测模型。

5.3.2 经济损失评价

20世纪六七十年代,美国、日本等国即已开始研究洪灾损失评估方法,我国从20世纪80年代开始对洪灾损失进行研究。经过几十年的研究和发展,洪灾经济损失评估方法已相对比较成熟,可用于计算溃坝经济损失。经济损失包括直接经济损失和间接经济损失两部分。《水库大坝风险评估导则(征求意见稿)》^[55]建议:直接经济损失可采用分类损失率法、单位面积综合损失法和人均综合损失法进行计算;间接经济损失可采用系数折算法和调查分析法进行计算。虽然溃坝经济损失可以采用洪灾经济损失评估方法进行计算,但是溃坝洪水要比一般洪水破坏性更大。针对溃坝洪水的特点,一些学者专门研究了溃坝经济损失估算方法,如施国庆等^[82]将溃坝损失分为洪水淹没损失(包括淹没直接经济损失、淹没间接经济损失和淹没非经济损失)、库区塌岸损失和溃坝工程损失三大类,并探讨了每种损失的计算方法;杜丙涛等^[83]从溃坝后区域之间的关联关系入手,以经济损失为例,研究了损失大小、持续时间、损失范围的相关关系;王志军等^[84]基于物元模型将溃坝洪水淹没范围划分为不同区域,并制定了财产损失率建议表,然后对溃坝经济损失进行计算。

5.3.3 社会与环境影响评价

溃坝对社会与环境影响涉及面很广,近年来国内一些学者进行了初步研究。王仁钟等^[85]总结了社会与环境影响的主要因素,并对其进行量化,提出了社会与环境影响指数的确定方法。何晓燕等^[86]建立了社会影响、环境影响的评价指标体系和量化方法,并综合利用层次分析法和模糊数学方法对溃

坝社会与环境影响进行评价。周克发等^[87]考虑社会经济发展对溃坝洪水损失的影响,建立了社会与环境影响的估算公式,并给出了公式中参数的取值范围。张莹^[88]在分析溃坝对环境、生态影响的基础上,利用能值足迹法对环境损失、生态损失进行量化,并提出了相应的计算方法。

6 发展趋势和亟待解决的问题

虽然混凝土坝长效服役和风险评定研究已取得较多成果,并且部分成果已经在实践中得到应用,但仍有不少问题需要进一步探讨,特别是以下几个方面亟待加强研究。

a. 目前关于混凝土材料性能演化规律的研究所考虑的破坏因素偏少,与混凝土坝实际情况较脱节,未来需要深入研究多破坏因素耦合作用对混凝土材料性能演化规律的影响,据此制定合理措施以保障混凝土坝长效服役。此外,应制定并颁布针对多破坏因素耦合作用的混凝土长期性能和耐久性能试验方法及标准,借以规范试验方案设计,使研究成果更有说服力。

b. 通过原位监测和现场检测可以获得混凝土坝隐患病害的信息和资料,为大坝安全分析提供依据。但过去对大坝安全状况进行分析诊断和监控,主要采用基于监测资料建立监控模型等方法,这类方法已不能完全满足当前高库大坝安全管理需要,建立数字大坝,对大坝进行自动化、智能化监控是大坝安全监控的发展趋势。

c. 混凝土坝施工工序复杂,影响施工质量的因素众多,质量控制难度大,应抓住影响施工质量的主要因素和关键环节,采取合理措施,保障混凝土坝施工质量;还应更加重视混凝土坝施工质量与进度实时控制研究,以对混凝土坝施工过程进行全方位、全时段监控,并加大其在水利工程中的推广使用。

d. 尽管我国大坝风险管理研究已经取得了极大的进展,但应立足于我国国情并借鉴国外先进经验,尽快建立水库大坝风险标准;应深入开展风险评估实用技术研究,力求快速、准确地评估大坝风险;应高度重视风险处理的非工程措施,并与工程措施结合使用,以降低大坝风险;应尽快建立或完善法规标准体系,规范大坝风险管理工作。

e. 可靠度方法是计算溃坝概率的有力工具,但目前还不是非常成熟,在复杂溃坝模式下的溃坝概率计算、时变可靠度分析等方面还需要加强研究,常规可靠性理论、模糊可靠性理论和非概率可靠性理论的组合运用是今后的发展趋势。在溃坝后果评价方面,生命损失估算方法、社会与环境影响评价方法

应成为今后研究的重点。

7 结 语

混凝土坝长效服役和风险评定研究是一个多学科交叉的复杂课题,研究范围非常广泛。笔者仅选择了几个比较典型的研究热点论述其研究现状,并探讨了当前研究存在的问题及未来的发展趋势。长效服役和风险评定研究的目的是为了使已建、在建或新建混凝土坝能够健康安全的长期服役,促进我国经济社会的可持续发展和生态环境建设,建议在该领域继续加强研究,尽快建立并完善混凝土坝长效服役保障与提升的理论和方法体系,以期实现大坝生命早期保障混凝土坝的“活力”,生命中期通过“保健”增强“活力”,生命后期通过“医治”延续“活力”等目标,为推动水工结构工程学科的进一步发展奠定科学基础。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 论混凝土坝的使用寿命及实现混凝土坝超长期服役的可能性[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 1-9. (ZHU Bofang. On the expected life span of concrete dams and the possibility of endlessly long life of solid concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 1-9. (in Chinese))
- [2] 贾金生. 中国大坝建设 60 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [3] 龙起煌, 郑治. 中国碾压混凝土坝技术[J]. 水利水电技术, 2013, 44(8): 11-14. (LONG Qihuang, ZHENG Zhi. Technology for construction of RCC dams in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(8): 11-14. (in Chinese))
- [4] 钮新强. 大坝安全诊断与加固技术[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊 1): 60-64. (NIU Xinqiang. Technique for diagnosing and strengthening dam safety[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1): 60-64. (in Chinese))
- [5] 王理华. 我国水电站大坝安全现状分析[J]. 水力发电, 1994, 20(6): 35-39. (WANG Lihua. Present status of large dam safety in China[J]. Water Power, 1994, 20(6): 35-39. (in Chinese))
- [6] 陈胜宏, 何真. 混凝土坝服役寿命仿真分析的研究现状与展望[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(3): 273-280. (CHEN Shenghong, HE Zhen. Status quo and prospects for simulation analysis of service life for concrete dam[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(3): 273-280. (in Chinese))
- [7] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. Journal of American Concrete Institute, 1945, 41(4): 245-272.

- [8] POWERS T C. Structure and physical properties of hardened portland cement paste [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1958, 41 (1) : 1-6.
- [9] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing [C] // BURRGGRAF F. Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, D. C. : Transportation Research Board Business Office, 1953 : 285-297.
- [10] 黄士元, 蒋家奋, 杨南如, 等. 近代混凝土技术 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [11] 孙伟, 缪昌文. 现代混凝土理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] 肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述 [J]. 混凝土, 2010 (1) : 40-44. (XIAO Jia, GOU Chengfu. Overview of the research for concrete carbonation [J]. Concrete, 2010 (1) : 40-44. (in Chinese))
- [13] KHUNTHONGKEAW J, TANGTERMSIRIKUL S, LEELAWAT T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20 (9) : 744-753.
- [14] 金雁南, 周双喜. 混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理 [J]. 华东交通大学学报, 2006, 23 (5) : 4-8. (JIN Yannan, ZHOU Shuangxi. Types and mechanism of concrete sulfate attack [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23 (5) : 4-8. (in Chinese))
- [15] 邓德华, 刘赞群, de SCHUTTER G, 等. 关于“混凝土硫酸盐结晶破坏”理论的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40 (2) : 175-185. (DENG Dehua, LIU Zanqun, de SCHUTTER G, et al. Research progress on theory of “sulfate salt weathering on concrete” [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40 (2) : 175-185. (in Chinese))
- [16] 王增忠. 混凝土碱集料反应及耐久性研究 [J]. 混凝土, 2001 (8) : 16-18. (WANG Zengzhong. Research on alkali aggregate reaction and durability of concrete [J]. Concrete, 2001 (8) : 16-18. (in Chinese))
- [17] 蒋冬青. 碱集料反应对混凝土工程的损坏及预防 [J]. 房材与应用, 2006, 34 (2) : 7-10. (JIANG Dongqing. Alkali-aggregate action damaging and countermeasure to concrete construction [J]. Housing Materials & Applications, 2006, 34 (2) : 7-10. (in Chinese))
- [18] NGUYEN V H, COLINA H, TORRENTI J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: part I experimental results [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237 (20/21) : 2083-2089.
- [19] NGUYEN V H, NEDJAR B, TORRENTI J M. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: part II modelling [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237 (20/21) : 2090-2097.
- [20] 于琦, 牛荻涛, 屈锋. 冻融环境下混凝土碳化深度预测模型 [J]. 混凝土, 2012 (9) : 3-5. (YU Qi, NIU Ditao, QU Feng. Model for predicting carbonation depth of concrete in freezing-thawing circumstance [J]. Concrete, 2012 (9) : 3-5. (in Chinese))
- [21] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [22] 赵志仁, 徐锐. 国内外大坝安全监测技术发展现状与展望 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34 (5) : 52-57. (ZHAO Zhiren, XU Rui. Advance and prospect of monitoring technology for dam safety [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34 (5) : 52-57. (in Chinese))
- [23] TARUSSOV A, VANDRY M, HAZA A D L. Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38 : 1246-1254.
- [24] ELFERGANI H A, PULLIN R, HOLFORD K M. Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40 : 925-933.
- [25] SHAH A A, RIBAKOV Y. Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation [J]. Materials & Design, 2009, 30 (10) : 4095-4102.
- [26] 李家伟. 无损检测手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [27] 熊永红, 陈义群, 余才盛, 等. 脉冲回波法在三峡工程混凝土检测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2 (2) : 97-100. (XIONG Yonghong, CHEN Yiqun, YU Caisheng, et al. Application on detecting concrete of three gorges project by impact echo method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2 (2) : 97-100. (in Chinese))
- [28] SU Huaizhi, HU Jiang, WU Zhongru. A study of safety evaluation and early-warning method for dam global behavior [J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11 (3) : 269-279.
- [29] TONINI D. Observed behavior of several Italian arch dams [J]. Journal of the Power Division, 1956, 82 (6) : 1-26.
- [30] BONALDI P, FANELLI M, GIUSEPPE TTI G. Displacement forecasting for concrete dams [J]. International Water Power and Dam Construction, 1977, 29 (9) : 42-50.
- [31] 陈久宇, 林见. 观测数据的处理方法 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [32] 吴中如. 混凝土坝安全监控的确定性模型及混合模型 [J]. 水利学报, 1989, 20 (5) : 64-70. (WU Zhongru. Deterministic model and mixed model of concrete dam safety monitoring [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 20 (5) : 64-70. (in Chinese))

- [33] 吴中如,沈长松,阮焕祥.论混凝土坝变形统计模型的因子选择[J].河海大学学报:自然科学版,1988,16(6):1-9. (WU Zhongru, SHEN Changsong, RUAN Huanxiang. Factor selection of displacement statistical models for concrete dams [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 1988, 16(6): 1-9. (in Chinese))
- [34] 顾冲时,吴中如.大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M].南京:河海大学出版社,2006.
- [35] SU Huaizhi, WU Zhongru, WEN Zhiping. Identification model for dam behavior based on wavelet network [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007, 22(6): 438-448.
- [36] 张永涛,曾祥喜,史艳.向家坝水电站大坝基础处理设计[J].人民长江,2015,46(2):76-80. (ZHANG Yongtao, ZENG Xiangxi, SHI Yan. Dam foundation treatment design of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2015, 46(2): 76-80. (in Chinese))
- [37] 白俊光,林鹏,李蒲健,等.李家峡拱坝复杂地基处理效果和反馈分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5):902-912. (BAI Junguang, LIN Peng, LI Pujian, et al. Reinforcement effects of Lijiaxia Arch Dam on complicated rock foundations and its back analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 902-912. (in Chinese))
- [38] 周厚贵.水工混凝土施工技术的进展及问题[J].中国三峡建设,2003(3):11-13. (ZHOU Hougui. Development of hydraulic concrete construction technology [J]. China Three Gorges Construction, 2003(3): 11-13. (in Chinese))
- [39] 钟桂良,尹习双,邱向东,等.高拱坝混凝土运输过程智能控制技术研究[J].水力发电,2015,41(2):55-58. (ZHONG Guiliang, YIN Xishuang, QIU Xiangdong, et al. Research on intelligent control technology for concrete transport of high arch dam [J]. Water Power, 2015, 41(2): 55-58. (in Chinese))
- [40] 潘镇涛,陈有亮,周静伟,等.应用模糊控制理论进行大体积混凝土施工过程的温度控制[J].上海大学学报:自然科学版,2006,12(4):431-436. (PAN Zhentao, CHEN Youliang, ZHOU Jingwei, et al. Temperature control in mass concrete using fuzzy theory [J]. Journal of Shanghai University: Natural Science Edition, 2006, 12(4): 431-436. (in Chinese))
- [41] 段云岭,郑桂水.碾压混凝土坝施工进度与质量控制的新措施[J].水力发电,2002,28(2):19-23. (DUAN Yunling, ZHENG Guishui. A new approach of construction progress and quality control of RCC dam [J]. Water Power, 2002, 28(2): 19-23. (in Chinese))
- [42] 林鹏,李庆斌,周绍武,等.大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J].水利学报,2013,44(8):950-957. (LIN Peng, LI Qingbin, ZHOU Shaowu, et al. Intelligent cooling control method and system for mass concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 950-957. (in Chinese))
- [43] ZHONG D H, REN B Y, LI M C, et al. Theory on real-time control of construction quality and progress and its application to high arc dam [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(10): 2611-2618.
- [44] 吴斌平,崔博,任成功,等.龙开口碾压混凝土坝浇筑碾压施工质量实时监控系统研究与应用[J].水利水电技术,2013,44(1):62-65. (WU Binping, CUI Bo, REN Chenggong, et al. Research and application of concrete rolling-compaction quality real-time monitoring system for Longkaikou RCC Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 62-65. (in Chinese))
- [45] 楼渐逵.加拿大 BC Hydro 公司的大坝安全风险管理体系[J].大坝与安全,2000,14(4):7-11. (LOU Jiankui. Dam safety risk management of BC Hydro Company in Canada [J]. Large Dam and Safety, 2000, 14(4): 7-11. (in Chinese))
- [46] ANCOLD. Guidelines on assessment of the consequences of dam failure [R]. [S. l.]: ANCOLD, 2000.
- [47] ANCOLD. Guidelines on dam safety management [R]. [S. l.]: ANCOLD, 2003.
- [48] 彭雪辉,赫健,施伯兴.我国水库大坝风险管理[J].中国水利,2008(12):10-13. (PENG Xuehui, HE Jian, SHI Boxing. Dam risk management in China [J]. China Water Resources, 2008(12): 10-13. (in Chinese))
- [49] 宋敬衡,何鲜峰.我国溃坝生命风险分析方法探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(5):628-633. (SONG Jingxiang, HE Xianfeng. Discussion on analysis method for risk of life loss caused by dam failure in China [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(5): 628-633. (in Chinese))
- [50] 彭雪辉,盛金保,李雷,等.我国水库大坝风险标准制定研究[J].水利水运工程学报,2014(4):7-13. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 7-13. (in Chinese))
- [51] 李宗坤,葛巍,王娟,等.中国水库大坝风险标准与应用研究[J].水利学报,2015,46(5):567-573, 583. (LI Zongkun, GE Wei, WANG Juan, et al. Risk criteria and application on reservoir dams in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 567-573, 583. (in Chinese))
- [52] 李雷,王仁钟,盛金保,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [53] 严祖文,彭雪辉,张延亿.病险水库除险加固风险决策[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [54] 蔡守华,张展羽,张鹏,等.基于 AHP-TOPSIS 的小型水库除险加固优化排序方法[J].扬州大学学报:自然科

- 学版, 2009, 12 (1): 71-75. (CAI Shouhua, ZHANG Zhanyu, ZHANG Peng, et al. Priority decision model of small reservoirs reinforcing project based on AHP-TOPSIS [J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2009, 12(1): 71-75. (in Chinese))
- [55] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 水库大坝风险评估导则(征求意见稿)[Z]. 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2012.
- [56] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit-cost ratio using a life quality index[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 799-817.
- [57] 马福恒. 病险水库大坝风险分析与预警方法[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [58] 贾超, 李新群. 高坝风险分析的事件树法[J]. 水力发电, 2006, 32(8): 71-74. (JIA Chao, LI Xinqun. Event tree method in risk analysis for high dams[J]. Water Power, 2006, 32(8): 71-74. (in Chinese))
- [59] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping. Service life predicting of dam systems with correlated failure modes [J]. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(3): 252-269.
- [60] 吴世伟, 张思俊, 吕泰仁, 等. 拱坝的失效模式与可靠度[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1992, 20(2): 88-96. (WU Shiwei, ZHANG Sijun, LÜ Tairen, et al. Failure mode and reliability of arch dams[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 1992, 20(2): 88-96. (in Chinese))
- [61] 封伯昊, 张立翔, 金峰. 基于损伤的混凝土大坝可靠度分析[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 46-51. (FENG Bohao, ZHANG Lixiang, JIN Feng. Reliability analysis of concrete dam based on damage concept[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 46-51. (in Chinese))
- [62] 朱建明, 张宏涛, 陈祖煜. 重力坝深层抗滑稳定可靠度分析研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1444-1448. (ZHU Jianming, ZHANG Hongtao, CHEN Zuyu. Reliability analysis on deep slide of gravity dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1444-1448. (in Chinese))
- [63] 彭慧慧, 王刚, 马震岳. 重力坝坝基失稳模糊-随机风险率计算方法研究[J]. 大坝与安全, 2011(4): 1-6. (PENG Huihui, WANG Gang, MA Zhenyue. Research on calculation method of fuzzy-random risk for instability of gravity dam foundation[J]. Dam & Safety, 2011(4): 1-6. (in Chinese))
- [64] 张社荣, 王超, 孙博. 重力坝层间抗滑稳定体系的动力可靠度分析方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3139-3144. (ZHANG Sherong, WANG Chao, SUN Bo. Dynamic reliability analysis method of anti-sliding stability between layers of gravity dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3139-3144. (in Chinese))
- [65] 张勇, 赖国伟, 程睿, 等. 高拱坝的非概率可靠性分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(5): 62-65. (ZHANG Yong, LAI Guowei, CHENG Rui, et al. Non-probabilistic reliability analysis of high arch dams[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(5): 62-65. (in Chinese))
- [66] 夏雨, 张仲卿, 赵小莲, 等. 基于非概率可靠度理论的拱坝安全度评价[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 79-83. (XIA Yu, ZHANG Zhongqing, ZHAO Xiaolian, et al. Safety analysis of arch dam based on non-probability theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 79-83. (in Chinese))
- [67] 袁慕勇, 陆廷春, 徐宝松, 等. 基于非概率方法的碾压混凝土重力坝可靠度计算[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 29-33. (YUAN Muyong, LU Tingchun, XU Baosong, et al. Reliability calculation of RCC gravity dam based on non-probabilistic method [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2013, 35(6): 29-33. (in Chinese))
- [68] 刘宁, 刘光廷. 随机徐变应力影响下重力坝时变可靠度初探[J]. 水利学报, 1999, 30(5): 50-57. (LIU Ning, LIU Guangting. Time-dependent reliability of concrete gravity dam affected by random thermal creep stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(5): 50-57. (in Chinese))
- [69] 杨志刚. 基于灰色理论的混凝土重力坝损伤时变可靠度分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
- [70] 姜树海, 范子武. 基于 Bayes 方法的堤坝时变渗流风险率评估[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 420-424. (JIANG Shuhai, FAN Ziwu. Assessment of seepage time-varying risk rate for embankments and dams based on Bayesian approach [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 420-424. (in Chinese))
- [71] 姜树海, 范子武. 时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 425-430. (JIANG Shuhai, FAN Ziwu. Influence of time-varying effect on flood control risk rate for dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 425-430. (in Chinese))
- [72] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping, et al. Evaluation model for service life of dam based on time-varying risk probability [J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(7): 1966-1973.
- [73] 李雷, 周克发. 大坝溃决导致的生命损失估算方法研究现状[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(2): 76-80. (LI Lei, ZHOU Kefa. Methods for evaluation of life loss induced by dam failure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(2): 76-80. (in Chinese))
- [74] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam failure[J]. Water Resources Bulletin, 1988, 24(6): 1303-1309.

- [75] DEKAY M, MCCLELLAND G. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis, 1993, 13(2): 193-205.
- [76] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[R]. Denver: Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, 1999.
- [77] REITER P. Loss of life caused by dam failure: the Rescedam lol method and its application to Kyrkosjarvi Dam in Seinajoki [R]. Helsinki: PR Water Consulting Ltd., 2001.
- [78] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 145-149. (ZHOU Kefa, LI Lei, SHENG Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(3): 145-149. (in Chinese))
- [79] 王志军, 顾冲时, 张治军. GIS支持下基于遗传优化神经网络的溃坝生命损失评估[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(1): 64-68. (WANG Zhijun, GU Chongshi, ZHANG Zhijun. Evaluation method of loss-of-life caused by dam breach based on GIS and neural networks optimized by genetic algorithms[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(1): 64-68. (in Chinese))
- [80] 王志军, 顾冲时, 娄一青. 基于支持向量机的溃坝生命损失评估模型及应用[J]. 水力发电, 2008, 34(1): 67-70. (WANG Zhijun, GU Chongshi, LOU Yiqing. Model for evaluation of loss-of-life caused by dam breach based on support vector machine[J]. Water Power, 2008, 34(1): 67-70. (in Chinese))
- [81] 王君, 袁永博. 基于可变模糊聚类迭代模型的溃坝生命损失预测[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 82-85. (WANG Jun, YUAN Yongbo. Forecasting life loss of dam break based on variable fuzzy clustering iterative model [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 82-85. (in Chinese))
- [82] 施国庆, 朱淮宁, 荀厚平, 等. 水库溃坝损失及其计算方法研究[J]. 灾害学, 1998, 13(4): 28-33. (SHI Guoqing, ZHU Huaining, XUN Houping, et al. Study on reservoir dam-break loss and its calculation methods[J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(4): 28-33. (in Chinese))
- [83] 杜丙涛, 袁永博. 溃坝后关联区域损失模型研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 64-68. (DU Bingtao, YUAN Yongbo. Study on loss model of relevant regions after dam break [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(1): 64-68. (in Chinese))
- [84] 王志军, 宋文婷, 马小童. 溃坝经济损失评估方法研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 30-34. (WANG Zhijun, SONG Wenting, MA Xiaotong. A method of estimating economic loss caused by dam-break [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(2): 30-34. (in Chinese))
- [85] 王仁钟, 李雷, 盛金保. 水库大坝的社会与环境风险标准研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 8-11. (WANG Renzhong, LI Lei, SHENG Jinbao. On criterion of social and environmental risk of reservoir dams [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(1): 8-11. (in Chinese))
- [86] 何晓燕, 孙丹丹, 黄金池. 大坝溃决社会及环境影响评价[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1752-1757. (HE Xiaoyan, SUN Dandan, HUANG Jinchi. Assessment on social and environmental impacts of dam break [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(11): 1752-1757. (in Chinese))
- [87] 周克发, 李雷. 基于社会经济发发展的溃坝洪水损失动态预测评价模型[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(增刊1): 145-148. (ZHOU Kefa, LI Lei. Dynamic forecasting evaluation model of flood loss due to dam breach based on socioeconomic development [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(Sup1): 145-148. (in Chinese))
- [88] 张莹. 基于能值足迹法的溃坝环境、生态损失评价[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (收稿日期: 2015-07-29 编辑: 骆超)

• 简讯 •

第十三届中国水论坛成功举办

2015年8月23日,由中国自然资源学会水资源专业委员会等单位主办的第十三届中国水论坛在河北省石家庄市成功举办,来自国内外高校、科研机构及相关企事业单位的530多名专家学者参加了会议。本届中国水论坛主题为“水科学前沿与中国水问题对策”,重点探讨流域水文与洪水预报、生态水文、遥感水文、水科学与水资源、洪旱灾害、水环境、农田水文与水资源承载力、新方法与新技术探索等方面内容。中国科学院刘昌明院士、中国工程院康绍忠院士、中国自然资源学会水资源专业委员会主任夏军教授、日本千叶大学唐常源教授、日本国立环境研究所王勤学教授、日本金剛大学王权教授、香港中文大学陈永勤教授、台湾大学张仓荣教授等130余位专家作了学术报告,并进行了广泛的学术交流。(本刊编辑部供稿)