

黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与 安全防控研究综述

柴军瑞,曹靖,丁卫华,程琳,王婷,许萍,曹成,温立峰,卜鹏,王梦雨

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:由于黄河流域库坝系统渗透破坏机理日趋复杂,对渗透破坏安全防控技术提出了新的挑战,本文从岩/土体渗流-应力耦合作用下的渗透特性演化机理、库坝系统渗流-应力耦合作用下的渗透破坏动态规律、库坝系统渗流监测分析与安全监控方法以及渗透破坏风险评估与防控技术等方面,综述了黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与安全防控的研究与实践进展,指出了目前黄河流域库坝系统渗流安全研究亟待解决的关键问题,并提出未来应着力于开发岩/土体渗流-应力耦合可视化试验装置,构建多重介质、多场耦合条件下的渗透破坏判定体系,建立能够表征环境动态与不确定性的数学模型及考虑风险因子变异性的动态风险评估与防控体系。

关键词:库坝系统;渗流-应力耦合;渗透破坏;安全监测;风险防控;黄河流域

中图分类号:TV139.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)05-0026-10

Review of disaster-causing mechanism and safety prevention and control of seepage failure in reservoir-dam systems of the Yellow River Basin//CHAI Junrui, CAO Jing, DING Weihua, CHENG Lin, WANG Ting, XU Ping, CAO Cheng, WEN Lifeng, BU Peng, WANG Mengyu (State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The mechanisms of seepage failure in the reservoir-dam systems of the Yellow River Basin are increasingly complex, posing new challenges to safety prevention and control technologies against seepage failure. This paper reviews the research and practical progress on disaster-causing mechanisms and safety management of seepage failure in reservoir-dam systems of the Yellow River Basin, focusing on the following aspects: the evolution mechanism of seepage characteristics under seepage-stress coupling conditions in rock/soil masses, the dynamic behavior of seepage failure under coupled seepage-stress conditions in reservoir-dam systems, methods for seepage monitoring analysis and safety supervision, and risk assessment and mitigation technologies for seepage failure. Key issues urgently requiring resolution in current seepage safety research for the Yellow River Basin's reservoir-dam systems have been identified. Future efforts should focus on developing visual experimental apparatus for studying rock/soil seepage-stress coupling, establishing a criterion system for judging seepage failure under multi-medium and multi-field coupling conditions, constructing mathematical models capable of characterizing environmental dynamics and uncertainties, and formulating a dynamic risk assessment and prevention/control framework that accounts for the variability of risk factors.

Key words: reservoir-dam systems; seepage-stress coupling; seepage failure; safety monitoring; risk prevention and control; the Yellow River Basin

黄河流域水利工程的系统建设始于 20 世纪 50 年代,如今已相继建成三门峡水库、小浪底水库、万家寨水库等一系列水利工程,在水量调节、防洪减灾和水质改善等方面发挥着关键作用。然而,在长期运行过程中,部分工程逐渐出现渗漏及局部裂缝等不同程度的安全隐患。此类问题若持续恶化,不仅

严重影响工程效益的正常发挥,甚至可能引发溃坝等灾难性后果,直接威胁下游地区人民生命财产安全,并对基础设施和生态环境造成难以估量的损害。

库坝系统是保障经济社会发展的关键基础设施,在防洪、灌溉、供水、发电等方面发挥着重要作用,是国家重大战略实施的重要内容。黄河流域沟

基金项目:国家自然科学基金项目(U2443230)

作者简介:柴军瑞(1968—),男,教授,博士,主要从事水工结构渗流力学研究。E-mail:jrchai@xaut.edu.cn

通信作者:曹靖(1988—),女,副教授,博士,主要从事筑坝材料性能多尺度研究。E-mail:caojing@xaut.edu.cn

后水库 1993 年的溃坝失事案例是一起典型的土石坝枢纽库坝系统重大安全事件^[1],事后经水利部专家组和政府调查组确认,这是一起由多种原因造成的局部渗漏和管涌破坏引发的严重安全事故。渗漏是影响库坝安全运行的首要安全隐患,若不及时处理,将带来严重后果。因此,保障水利水电工程全生命周期稳定安全,进行黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与安全防护研究具有重要意义。

库坝系统的渗漏问题可从岩土渗流理论出发进行初步阐释。水在岩土介质中发生渗流时,将产生动水压力,并以渗透体积力的形式作用于筑坝材料及岸坡地基,从而改变结构内部的应力分布;应力场的改变进一步引发土体压缩或膨胀,导致原有孔隙结构发生变化,进而影响渗流路径和水头分布。与此同时,渗流场的改变也会引起水荷载的重新分布,促使应力场进一步调整。渗流场与应力场相互耦合、共同作用,最终导致岩土体发生变形甚至破坏。黄河流域库坝系统地质条件复杂,渗透介质类型多样,结构在服役过程中面临多变应力状态与复杂渗流环境的交互影响,致使渗流-应力耦合作用下筑坝材料及岩土体渗透特性的演化机制尚不明确^[2]。

渗流特性不仅受流体性质及外部环境的影响,更取决于渗透介质自身的物理特性。黄河流经青藏高原、内蒙古高原、黄土高原及黄淮海平原四大地貌单元,地质构造复杂。库区周边岸坡地基常发育断层、节理等构造,显著增强岩体渗透性,从而加剧渗漏风险。流域内土体类型主要包括高寒土、风沙土、黄土、沙土和盐碱土等,其空间分布呈现明显的地带性规律。中游地区海拔介于 1 000~2 000 m 之间,广泛分布黄土地貌。黄土具有松散、大孔隙等特性,易加剧水土流失,对库岸稳定性构成显著威胁。当采用就地取材的岩土体作为筑坝材料时,渗流行为的复杂性更为突出^[3]。

同时,在全球变暖的背景下,我国降水格局已发生显著变化。《中国气候变化蓝皮书(2023)》指出,中国极端高温事件频率增加、强度增强,极端强降水事件增多,气候风险指数持续上升。黄河流域表现为暴雨事件向持续时间更长、雨强更大的方向转变,极端降雨的发生频率和强度均呈增加趋势。极端降雨可在水库集水区引发大规模洪水,直接扰动库坝系统的渗流状态。在暴雨引起的库水位快速涨落过程中,坝体内浸润线响应存在明显滞后效应,水位急剧变动时滞后现象尤为突出,将进一步加剧渗透破坏发生的风险。

因此,针对黄河流域岩土地质类型多样、挟沙流动规律复杂、极端降雨多地频现的特殊性,本文从

岩/土体渗流-应力耦合作用下渗透特性演化机理、库坝系统渗流-应力耦合作用下的渗透破坏动态规律、库坝系统渗流监测正-反分析及安全监控研究、库坝系统渗透破坏风险评估及风险防控 4 个方面对国内外研究现状与进展进行综合分析。

1 岩/土体渗流-应力耦合作用下的渗透特性演化机理

1.1 岩/土体渗流-应力耦合试验

为深入揭示岩/土体三轴应力、剪切变形与渗流耦合下的特征参数演化规律,研究人员对水力耦合试验方法开展了一系列研究。目前,大多数学者仍然采用电液伺服三轴试验系统,在不同围压和渗流压力条件下开展应力-渗流耦合三轴试验,探究岩/土体在水力耦合作用下渗流运动规律及应力-应变本构规律。例如:邬爱清等^[4]研制了 HMTS-1200 型裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统,并利用该系统开展了玄武岩在不同荷载组合下的水力耦合试验,分析了水力耦合作用下岩体试样的变形响应的影响因素;Xiao 等^[5]采用岩石压力三轴自动系统(HPTAS)进行了三轴压缩试验,研究了砂岩在不同渗流压力下强度、变形、轴向应变的变化规律,分析了岩石破坏过程中的刚度和渗透性。然而,这种试验研究方法无法直接观测内部渗流场与损伤分布,无法确定其分布规律。

为进一步确定损伤产生的位置,研究人员将声发射法引入水力耦合三轴试验,用于接收岩体破裂过程中产生的声发射弹性波信号,通过分析不同围压下岩石破裂全过程声发射特征,探究内部裂纹扩展破坏形式以及与变化水压之间的关系。例如,Chen 等^[6]采用声发射设备,以砂岩为研究对象进行了三轴压缩试验,研究了围压卸荷过程的变形特征、渗透率变化规律及声发射特性。然而由于试验观测手段的限制及岩/土体不透明的特性,目前对于应力作用下的岩/土体内的渗流演化行为以及渗流与渗透压力作用下的岩/土体变形、损伤的描述,仅仅只是宏观力学参数及整体变形破坏特征表征。

针对这一缺陷,基于 X 射线衍射设备、核磁共振成像(MRI)、X 射线计算机断层扫描(CT)、三维数字图像相关(3D-DIC)系统及扫描电子显微镜(SEM)等设备,葛苗苗等^[7-9]提出了渗流-应力耦合作用下可视化试验研究方法。然而,传统的 CT/MRI 岩芯扫描技术设备昂贵且图像频率低。相比之下,基于 CCD 相机及透明岩/土体技术的渗流-应力耦合试验方法具有可视化效果好、试验可重复性高以及设备成本低等优势,能有效实现岩/土体渗

流-应力耦合过程的全过程实时监测。

1.2 岩/土体渗流-应力耦合机理

在库坝系统所处的渗流-应力耦合环境中,水流不仅会削弱岩/土体及交界面的抗剪强度,改变裂隙与孔隙结构并诱发岩体软化,还会产生切向黏滞力、法向静水压力及渗透力,从而对其强度与稳定性产生显著影响。同时,在外部应力作用下,岩/土体及交界面会发生裂隙磨损、剪胀和孔隙闭合等改变,使岩/土体裂隙、孔隙三维形态及渗流通道发生改变,进而影响其渗透特性。

黄河流域复杂的岩/土体的渗透特性在本质上受控于其内部结构特征以及裂隙与孔隙发育规模、几何形态、分布特征和连通特性等,并与岩/土体的变形状态、损伤程度密切相关。研究发现渗流-应力耦合作用下的岩/土体渗透性不再符合传统的达西定律,一些学者^[10-14]将岩/土体的渗透系数表征为正应力、剪应力或弹性法向应变的函数,建立了一系列考虑岩/土体应力应变影响的渗透特性演化模型。这些研究极大地丰富了对岩/土体渗流-应力耦合机制与渗透特性演化规律的认识。但与岩/土体非均质多相孔隙介质所处复杂应力场及多相渗流场的耦合作用相对应,复杂条件下的渗流-应力耦合机理研究和渗透特性数学模型的构建仍面临巨大挑战,亟须从宏细观相结合的视角对耦合机理开展更为深入的研究。

1.3 岩/土体渗流-应力本构模型与分析方法

国内外不少学者分别从宏观统计和细观力学等角度出发,研究了围压效应、应力路径和应变特性的影响,建立了一系列理论模型。这些本构模型大致分为3类:经验模型、元件模型、损伤断裂模型。

1970年,Louis等^[15]根据某坝址钻孔抽水试验资料分析,得到了渗透系数与正应力的经验关系;Qi等^[16]在非饱和膨胀土的研究中建立了水力耦合和非耦合模型;陈卫忠等^[17]对深部泥岩进行了现场三轴压缩流变试验,提出了非线性幂函数模型。上述经验性模型大部分仅能描述宏观表象,不能揭示其内在机制,且参数选取易受个体经验与环境条件影响。

元件模型是利用胡克弹性体、牛顿黏性体和圣维南塑性体等元件组合来模拟岩/土体的长期变形行为,但同样不能揭示岩/土体在渗流-应力耦合条件下应变损伤的内在机制。

为了反映微观变形损伤对岩/土体应力应变的内在影响,陈锋等^[18-21]引入损伤的概念来描述岩体损伤随岩体应力状况的变化与岩体内裂隙的发展情况,进而建立损伤变量与渗透系数之间的关系,得到渗流作用下的应力应变本构模型,为岩/土体渗

流-应力耦合分析提供了有力的理论支撑。然而,这些模型仍存在诸多不足之处,例如损伤力学不能表达宏观裂纹的扩展过程,断裂力学又难以反映微观裂纹的变化过程,因此亟须从细观力学角度结合多重理论研究岩/土体渗流-应力耦合数学模型。

学者们对于裂隙渗流-应力耦合特性的试验和理论研究极大地推动了对耦合机理的认识,然而,岩/土体内部渗流场和应变损伤场的演化特征仍未得到充分理解,岩/土体及交界面渗流运动特性及耦合作用机理的研究还不够充分,考虑应力与渗流作用下筑坝材料及岩/土体各向异性损伤的宏细观力学本构模型亟待提出。

2 库坝系统渗流-应力耦合作用下的渗透破坏动态规律

2.1 渗透破坏试验与数值模拟

为探究库坝系统的渗透破坏机理,现阶段研究多从试验与数值模拟两方面开展。

在试验研究方面,辛圆心等^[22]利用大土柱装置研究了不同上覆压力下土样渗透破坏机理,发现其过程包括稳定渗流、破坏发生和破坏后阶段;李娜等^[23]通过箱式装置模拟了水闸侧墙与土体接合部的渗透破坏,发现其包括稳定渗流、管涌形成发展和冲蚀破坏阶段;刘杰等^[24]采用砂槽试验研究了双层地基渗透破坏,并确定了最危险地层结构,结果表明破坏始于上层土,止于下层管涌型土层;李火坤等^[25]通过室内模型试验完整地模拟了二元堤基管涌从单个泡泉发展至管涌群并最终造成堤基塌陷溃决的全过程;赵永胜等^[26]针对黄河古贤水利工程坝址区存在的剪切带,开展了原位和室内原状样渗透变形试验,发现原位渗透变形破坏形式都表现为一定的水力劈裂和软弱夹层、泥化带的细颗粒流失和挤出破坏,综合判定为集中冲刷破坏。

相较于试验方法的直观有效性,数值模拟可从细观角度深层次地探究渗透破坏演变机理。例如:罗玉龙^[27]基于连续介质力学提出管涌耦合机理,建立了三相渗流侵蚀耦合模型,真实模拟了管涌复杂过程;高成路等^[28]采用“混合”时间积分方案构建了裂隙岩体应力-渗流耦合方法,揭示了水力裂隙作用机制;Li等^[29]利用EDEM-FLUENT耦合模拟系统,研究了破碎岩体变质量渗透,揭示了其孔隙率、渗透率、质量损失率变化规律及地质构造突水机理;刘胜等^[30]采用数值模拟方法研究了管涌发生后堤防渗流场响应特征,探究了堤防不同深度和不同水平位置处的孔隙水压力变化规律,提出了基于孔隙水压力变化特征快速识别堤防管涌险情的思路;蒋中明

等^[31]以洞庭湖区典型土质堤防为对象,采用FLAC^{3D}软件开展了渗流-温度-应力耦合计算,分析了堤身及堤基在渗漏及结构破坏条件下的渗流场、温度场和损伤场的时空演变特性,探明了温度与渗流、温度与结构破坏之间的内在联系。

渗透破坏过程是时间维度和空间维度的结合作用,现阶段针对不同情况渗透破坏演化机理的研究已较为明晰,但鲜有考虑时空因素的共同影响,难以复现实际工程情况下渗透破坏孕育-发生-发展的全过程。因此,搭建库坝系统渗透破坏试验平台,揭示不同部位渗透破坏全过程时空演变机理对于保障库坝系统安全稳定具有十分重要的意义。

2.2 渗透破坏的临界条件

为保障库坝系统在渗流-应力耦合作用下的渗透稳定性,探明渗透破坏发生的临界条件是十分必要的。渗透稳定性是指土防止因渗流作用而损失细小颗粒的能力,目前的评价准则主要包括几何准则、水力准则、几何-水力耦合准则等(表1)。

几何准则大致分为3类,分别以特征粒径、细颗粒含量及特定独立指标来判定土体内部稳定性。刘杰等^[32]从颗粒组成评价内部稳定性方面对间断级配砂砾石进行了一系列研究,提出基于细颗粒含量标准评价土体内部稳定性。Huang等^[33]将临界渗流速度与临界水力梯度联系起来,在一维向上渗流的条件下,提出了基于土壤颗粒受力平衡和土壤孔隙概率分布的颗粒运动理论模型。在土力学中一般以临界水力梯度来判断是否发生渗透破坏^[34]。针对不同筑坝材料临界水力梯度的确定,研究者开展了大量的探究。为确定砂砾土的临界水力梯度,王明年等^[35]针对渗流作用下内部不稳定砂性土潜蚀问题,从细颗粒起动角度出发,结合土体有效应力和细颗粒应力折减,首次建立了砂砾土细颗粒起动临界水力坡降计算公式;毛昶熙等^[36]按渗透力与土颗粒浮重间的极限平衡推导出计算管涌土的砂砾土料各级土颗粒的管涌临界坡降公式。为确定无黏性土的临界水力梯度公式,刘杰等^[32]根据水流条件(上升水流和水平水流)开展研究,并提出了相应公式。

基于上述分析,现阶段学者们进行了大量关于颗粒流失和土壤侵蚀的研究以建立合适的准则来评

估土体的渗透稳定性,但尚缺乏统一的综合性判定指标体系。面对黄河流域特殊的气候及地质条件,现有准则未能全面考虑特殊环境下的指标因素,如泥沙含量、水位变化等,因此需进一步建立多指标联合作用下的渗透破坏临界判定体系。

2.3 渗透破坏的灾害防控

渗透破坏的灾害防控主要包括不良地质超前预报、破坏机制与演化过程模拟、预测与预警等方面。对于库坝系统而言,渗透破坏演化过程的真实模拟是开展监测预警与防控决策的重要理论基础^[37]。为深入探究库坝系统渗透破坏演化过程,研究人员采用试验研究、数值模拟以及试验与模拟相结合的方法开展了多方面研究。例如:周宗青^[38]针对隧道断层破碎带突涌水问题,提出了渗透破坏突水灾变演化的CFD-DEM耦合分析法,开展了试样与工程尺度模拟研究,揭示了“变强度-变渗透性-变黏度”机制以及优势通道的形成过程;黄俊文等^[39]针对缺少关于渗透破坏发展至漫顶破坏溃坝过程的模型的问题,建立了一个土石坝溃坝溃口流量变化的概化分析模型,并验证了该模型的正确性;Shao等^[40]综合考虑了水流、颗粒运移和渗透性演化的耦合效应,建立了多场耦合渗流特征演化模型;黄震^[41]采用模拟与试验相结合的方法,揭示了流固耦合作用下岩体的渗流演化规律及突水灾害机理,阐明了裂隙扩展的时空演化规律。

目前,在灾变机制定量模拟方面的研究仍存在较大不足,现有渗流-应力耦合作用下的渗透破坏模型难以充分反映黄河流域库坝系统所处的复杂环境条件及其演化特征。为此,建立库坝系统多尺度、多介质、多场耦合的渗透破坏模型,预测黄河流域库坝系统不同阶段、不同位置的渗透破坏孕灾过程,对于减少渗透破坏的发生尤为重要。

综上所述,黄河流域库坝系统工程环境复杂,筑坝材料和岩/土体渗透破坏过程受泥沙淤积、旱涝循环、材料特性等因素共同影响,现有理论及方法仍存在明显局限。为保障库坝系统的安全稳定,有必要在现有研究的基础上,结合黄河流域典型特征,深入探究库坝系统在渗流-应力耦合作用下渗透破坏的时空演化机理,并实现渗透破坏孕灾全过程的预测。

表1 库坝系统渗透稳定性评价准则分类及参数表征

评价准则类型	核心思想	主要表征参数	适用性
几何准则	基于土体颗粒级配与结构特征判断内部稳定性	粒径分布曲线、细颗粒百分比	适用于土体或坝体稳定性初步评价
水力准则	通过渗流场力学参数评估临界破坏条件	水力梯度(临界梯度)、水力剪应力、围压、孔隙流速	适用于均质、结构简单的土体渗流稳定分析
几何-水力耦合准则	综合考虑颗粒结构特性与渗流力学参数的相互作用	几何参数(如孔隙率)、水力参数(如渗透力)	多用于高风险坝基或复杂层状结构分析

3 库坝系统渗流监测正-反分析及安全监控

3.1 库坝系统渗流监测正-反分析

以水位、降水量、时效等环境变量作为自变量,以渗流效应量作为因变量,通过模拟变量之间的映射关系,可以建立渗流分析的统计模型。该类模型可以通过其解释功能有效分离环境变量的效应,分析环境变量对结构渗流的影响规律,即监测数据的正分析。统计模型基于线性函数,有非常直观的可解释性、可验证性^[42]。例如:Si 等^[43]利用遗传算法对土石坝测压管水位的影响因素进行随机组合,建立了一种新的遗传算法优化的回归模型;刘望亭等^[44]从渗流的基本方程出发,分析了渗流的影响因素,建立了渗流统计模型;马春辉等^[45]针对土石坝传统渗流预测模型易陷入局部最优、抗干扰性差、精度低等问题,以 RUN 算法优化 XGBoost 关键参数,构建了 RUN-XGBoost 渗流预测模型,实现了全局寻优、快速收敛与高鲁棒性;陆公义等^[46]针对土石堤坝管涌现象的监测识别问题,提出了一种基于 YOLO 模型的堤坝管涌识别方法。对于土石坝渗流安全监测模型而言,如何合理地刻画渗流的滞后效应仍是研究难点,为解决这一问题,许多学者从不同角度对土石坝渗流的滞后成因及机理进行了分析,并提出多种方法加以修正,从而建立了更具适应性的渗流安全监测模型^[47-50]。

库坝系统渗流-应力耦合数值模拟结果的可信度很大程度上依赖于其模型参数取值的准确性。然而,该类模型参数的反演过程往往呈现时变性、随机性、灰色性以及未确知性等多重不确定性特征,本质上属于欠定方程的求解问题,具有不适定性、强非线性以及计算复杂度高典型难点。针对参数反演过程中的不适定性问题,通常需要引入正则化方法进行约束。在各种参数正则化方法中,贝叶斯推断通过引入先验分布实现参数正则化,并能够将观测误差与建模不确定性显式纳入反演框架^[51-52]。该方法不仅能够动态修正有限元模型中不确定参数的分布函数,还可求解参数的后验概率分布,从而对反演结果的可靠性进行量化评估。为进一步提高参数反演的计算效率和智能化水平,满足在线分析的需求,可以采用代理模型技术^[53]模拟数值模型参数和监测量之间的复杂非线性关系,以便在反演过程中替代有限元计算,提高求解效率。为高效反演模型渗流参数,王相烜等^[54]采用多因素敏感性分析法研究了长河坝水电站特高心墙堆石坝坝基渗流控制特性对防渗系统各材料以及表层基岩的渗透系数的敏感性;Köpke 等^[55]提出了一种能够处理贝叶斯反演中

由代理模型引入的模型误差的方法;余红玲等^[56]提出了一种贝叶斯框架下大坝渗流参数反演组合代理模型。外部环境作用下考虑渗流-应力耦合作用的库坝系统具有动态演化特性和随机不确定性,可基于贝叶斯推断方法和代理模型技术,利用动态监测数据来实现数值模型参数的动态反演,快速跟踪系统参数的动态演化规律。

3.2 库坝系统渗流安全监控

大坝安全监控的核心问题在于建立能够反映环境变量与大坝结构效应量之间映射关系的预测模型,并基于模型预测结果或结构分析结果拟定监控指标。目前,大坝安全监测模型主要有 3 类,即数据驱动模型(包括统计模型、时间序列模型、机器学习模型等)、以有限元等数值仿真方法为核心的机理模型以及将前两种模型进行优化融合的混合模型。数据驱动模型的精度和泛化能力高度依赖于监测数据的质量,但库坝系统渗流监测数据通常存在随机不确定性,同时受大坝运行管理约束,训练样本中往往缺乏极端荷载工况下的监测数据,使得模型的泛化能力难以满足实际工程应用的要求^[57-58]。机理模型可解释性强,但其求解复杂问题的效率低,引入了主观与客观不确定性,难以满足库坝系统渗流安全监控过程中实时动态高效分析的需求。相比之下,数据-机理融合模型兼具机理模型和数据驱动模型的优势,为工程问题的“最后一公里”提供了实现途径^[59-60]。该类模型通过融合仿真模拟数据与历史监测数据,既利用工程原理揭示系统规律,又通过分析数据捕捉复杂性与不确定性,从而提升了集成模型的预测精度。基于数据-机理融合模型能够构建反映库坝系统渗流真实变化规律及内在联系的智能监控模型,实现库坝系统渗流安全状态的在线监控。

4 库坝系统渗透破坏风险评估及风险防控

4.1 库坝系统渗透破坏风险评估

准确、全面地识别系统潜在风险因素是开展风险评估与防控的基础。国外学者较早地对库坝系统的整体风险评估问题开展了研究,并在实践中提出了多种模型和方法。其中,典型的风险评估模型包括贝叶斯网络模型、事件树分析模型、故障树分析模型、失效模式及影响分析模型、危险度分析模型;典型的方法则包括模糊近似推理法、一阶二阶矩法、区间分析法、破坏模式和影响分析的随机方法等众多库坝系统整体风险评估方法。这些模型和方法为系统化识别风险因素、量化渗透破坏风险以及制定科学防控策略提供了理论和技术支撑。

在国外诸多研究的基础之上,我国学者结合基

本国情提出了情景分析法、风险矩阵法、风险指数法等诸多风险评估方法。例如:吴胜文等^[61]将信息论中的熵权与集对分析法相结合,建立了基于熵权-集对分析法的土石坝溃决风险评价模型;Su 等^[62-63]综合了支持向量回归方法和贝叶斯理论,构建了基于模糊时变模型的土石坝溃决风险分析模型;高延红^[64]按照工程结构可靠性理论的基本原理,建立了堤防工程和土石坝工程中的地基渗透稳定可靠性分析模型;魏海等^[65]通过对坝体材料物理参数进行统计分析得出了参数的概率分布,并提出了一种评估土坝渗透稳定失效风险的可靠性分析方法;胡冉等^[66]提出了一种将渗流有限元计算结果与随机响应面法相结合的渗透稳定可靠度分析方法;周兰庭等^[67]针对土石坝运行安全评价中指标间相互影响、主客观权重赋值不够合理以及隶属区间模糊性等问题,提出了一种土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型。当前,库坝系统风险评估的研究视角正由传统静态评估逐步向动态评估转变。然而,现有方法主要集中于概率模型、贝叶斯网络模型及函数模型的应用,仍存在风险因素交互作用弱、参数不确定性和时变特性考虑不足等局限。因此,未来的研究重点在于构建一种动态风险评估方法,该方法需充分考虑风险因素及安全监控指标本身所具有的不确定性和时变特性。

4.2 库坝系统渗透破坏风险预警防控

随着库坝系统渗透破坏风险管理理念的不断深入,风险防控在库坝系统渗透破坏安全领域得到了有效应用。在库坝系统风险等级划分方面,美国垦务局将大坝险情从高到低分成 4 个级别,对发生不可接受的险情,采取有效合理的措施来降低风险^[68];梅亚东等^[69]基于大坝防洪安全设计标准,分析了土石坝失事概率及其引起的风险损失;李雷等^[70]基于国外的大坝风险分析方法,结合我国国情,研究了大坝的失效概率、溃决模式、溃坝后果评价、风险标准、风险管理等方面的关系;王志军^[71]以土石坝风险分析的内容为基础,建立了土石坝风险分析框架,并根据失效概率与损失风险对土石坝风险等级进行了划分;周建平^[72]基于不同行业的生命风险损失标准,提出了我国大坝水电站的社会与个人的生命风险标准。

部分学者基于风险等级研究了库坝系统渗透破坏风险防控措施。例如:Lin 等^[73]通过优化设计理论、施工方法和管理理念,提出了一套控制和预防土石坝渗透破坏的工程程序;Celik 等^[74]在区间 2 型模糊集的背景下,采用多准则决策方法对土石坝风险因子进行排序,并制定了针对性风险控制措施;

Shen 等^[75]通过对土石坝风险因素的识别,明确了风险演化的规律状态,结合土石坝监测数据,构建了土石坝应急响应辅助模型。当前库坝系统风险预警防控研究成果对防控库坝系统渗透破坏风险提供了重要支撑,然而风险评估及等级划分通常忽略了库坝系统风险因子动态变化的特性,并且针对渗透破坏风险防控的研究不足,缺少完整的预警防控体系和管理平台。

5 研究展望

虽然前人对黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与安全防控作了大量研究,取得了一定成果,但由于黄河水少沙多、水量时空分布不均、人均水资源量少等特点,变化环境下黄河流域库坝系统渗透破坏机理更为复杂,对渗透破坏安全防控技术提出了新的挑战。今后尚待深入研究的问题主要有:

a. 受限于岩/土层探测技术的发展,目前岩/土体渗流-应力耦合试验依然主要采用“黑匣子”式的测试手段,对岩/土体内部的应变损伤发育特征、渗流-应力耦合效应与渗透特性演化机理研究不够深入,有必要开发岩/土体渗流-应力耦合可视化试验装置,探究岩/土体渗流-应力耦合作用机理与渗流特性动态演变规律。

b. 现有渗透破坏临界判定准则考虑因素相对单一且判定准则指标不够完善,渗流仿真模型无法反映库坝系统中的多重介质,渗流-应力耦合作用下大尺度渗透破坏孕灾过程不清晰,有必要建立渗透破坏临界判定体系,构建多重介质多场耦合渗透破坏模型。

c. 外部环境作用下考虑渗流-应力耦合作用的库坝系统具有动态演化特性和随机不确定性,库坝系统渗流安全控制研究现有的静态建模方法难以适用,有必要建立动态的数学模型模拟环境变量和库坝渗流之间的对应关系,实现对库坝渗流异常状态及时预警。

d. 现有渗透破坏指标体系忽略了风险因子的变异性,库坝系统渗透破坏风险评估模型多以静态模型为主,很难准确评估库坝系统的渗透破坏风险并开展相应的预警防控,有必要建立考虑风险因子变异性的动态风险评估模型及相应预警防控体系,开展黄河流域典型工程库坝系统渗透破坏机理与安全防控应用研究。

参考文献:

[1] 陈祖煜. 沟后水库大坝失事实录[J]. 水利管理技术, 1994(1): 19-22. (CHEN Zuyu. Gouhou Reservoir dam

- failure fact sheet[J]. Water Conservancy Construction and Management, 1994(1): 19-22. (in Chinese))
- [2] 柴军瑞,李守义. 大柳树水利枢纽坝区渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊2): 2322-2325. (CHAI Junrui, LI Shouyi. Analysis of coupled seepage and stress fields in rock mass around the Daliushu Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Sup2): 2322-2325. (in Chinese))
- [3] 程彦培,石建省,叶浩,等. 黄河中游地质环境背景分析与岩土侵蚀类型划分[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 4-9. (CHENG Yanpei, SHI Jiansheng, YE Hao, et al. Analysis on erosion genre of soil and rock in the Middle Yellow River and geological environment background[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 4-9. (in Chinese))
- [4] 郭爱清,范雷,钟作武,等. 现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2161-2171. (WU Aiqing, FAN Lei, ZHONG Zuowu, et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2161-2171. (in Chinese))
- [5] XIAO Weijing, ZHANG Dongming, WANG Xiaojun. Experimental study on progressive failure process and permeability characteristics of red sandstone under seepage pressure[J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105406.
- [6] CHEN Xu, TANG Chun'an, YU Jin, et al. Experimental investigation on deformation characteristics and permeability evolution of rock under confining pressure unloading conditions[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(8): 1987-2001.
- [7] 葛苗苗,李宁,盛岱超,等. 水力耦合作用下非饱和压实黄土细观变形机制试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2437-2448. (GE Miaomiao, LI Ning, SHENG Daichao, et al. Experimental investigation of microscopic deformation mechanism of unsaturated compacted loess under hydraulic coupling conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2437-2448. (in Chinese))
- [8] 冯西洲. 水对泥岩损伤作用机理的核磁共振试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(32): 226-231. (FENG Xizhou. Nuclear magnetic resonance investigation on the mechanism of water damage to mudstone[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(32): 226-231. (in Chinese))
- [9] TAO Meng, MA Lifeng, WU Fengbiao, et al. Experimental study on permeability evolution and nonlinear seepage characteristics of fractured rock in coupled thermo-hydraulic-mechanical environment: a case study of the sedimentary rock in Xishan area[J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106339.
- [10] LIU J, ELSWORTH D, BRADY B H. Linking stress-dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(5): 581-596.
- [11] 陈益峰,周创兵,盛永清. 应变敏感的裂隙及裂隙岩体水力传导特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2441-2452. (CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, SHENG Yongqing. Strain-dependent hydraulic conductivity for single rock fracture and fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2441-2452. (in Chinese))
- [12] WANG Changsheng, JIANG Yujing, LUAN Hengjie, et al. Effect of shearing on hydraulic properties of rough-walled fractures under different boundary conditions[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(3): 865-879.
- [13] YAO Chi, SUN Zhejie, JIN Yunzhe, et al. Evolution of contact state during shear of rough rock joints and its influence on seepage characteristics[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022214.
- [14] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229-239. (ZHAO Yangsheng. Coupled mathematical model on coal mass-methane and its numerical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 229-239. (in Chinese))
- [15] LOUIS C, MAINI Y N. Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock[C]//2nd ISRM Congress. Belgrade: Pergamon Press, 1970: ISRM-2CONGRESS-1970-032.
- [16] QI Shunchao, VANAPALLI S K. Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 70: 68-82.
- [17] 陈卫忠,谭贤君,伍国军,等. 非饱和岩石温度-渗流-应力耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2395-2403. (CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Study on thermo-hydro-mechanical coupling model for unsaturated rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2395-2403. (in Chinese))
- [18] 陈锋,李银平,杨春和,等. 云应盐矿盐岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 3022-3027. (CHEN Feng, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Experimental study on creep behaviors of rock salt in Yunying salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 3022-3027. (in Chinese))
- [19] 刘保国,于明圆,孙景来,等. 水-力耦合作用下页岩力学特性及其损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1041-1054. (LIU Baoguo, YU Mingyuan, SUN Jinglai, et al. Study on mechanical

- properties and damage constitutive model of shale under hydro-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1041-1054. (in Chinese))
- [20] WANG Susheng, XU Weiya, WANG Wei. Experimental and numerical investigations on hydro-mechanical properties of saturated fine-grained sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104222.
- [21] 李嘉豪, 陈延可, 文金萍, 等. 基于温度-渗流-应力耦合作用下地下采空区损伤岩体受力分析[J]. 矿业工程研究, 2021, 36(2): 48-53. (LI Jiahao, CHEN Yanke, WEN Jinping, et al. Force analysis of damaged rock mass in underground goaf based on temperature-seepage-stress coupling [J]. Mineral Engineering Research, 2021, 36(2): 48-53. (in Chinese))
- [22] 辛圆心, 詹美礼. 深厚覆盖层地基渗透破坏试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 152-157. (XIN Yuanxin, ZHAN Meili. Study on seepage failure mechanism of deep overburden[J]. Yellow River, 2019, 41(7): 152-157. (in Chinese))
- [23] 李娜, 汪自力, 赵寿刚, 等. 水闸侧墙与土体接合部渗透破坏过程模拟试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 75-81. (LI Na, WANG Zili, ZHAO Shougang, et al. Simulation test on seepage failure process of junctions between sluice side wall and soil mass[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 75-81. (in Chinese))
- [24] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤双层面地基渗透破坏机理模型试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1211-1220. (LIU Jie, XIE Dingsong, CUI Yihao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1211-1220. (in Chinese))
- [25] 李火坤, 王文韬, 王姣, 等. 二元堤基结构堤防管涌机理模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 79-88. (LI Huokun, WANG Wentao, WANG Jiao, et al. Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 79-88. (in Chinese))
- [26] 赵永胜, 王新建, 李金都, 等. 古贤水利工程坝址区剪切带渗透变形特性试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(12): 106-111. (ZHAO Yongsheng, WANG Xinjian, LI Jindu, et al. Experimental study on seepage deformation characteristics of shear zones of dam site of Guxian hydro-junction[J]. Yellow River, 2022, 44(12): 106-111. (in Chinese))
- [27] 罗玉龙. 堤防渗流控制技术及管涌机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [28] 高成路, 李术才, 周宗青, 等. 岩体水力压裂应力-渗流耦合近场动力学模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 470-480. (GAO Chenglu, LI Shucai, ZHOU Zongqing, et al. Peridynamics simulation of stress-seepage coupling in hydraulic fracturing of rock mass[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(4): 470-480. (in Chinese))
- [29] LI Chong, YAO Banghua, MA Qingqing. Numerical simulation study of variable-mass permeation of the broken rock mass under different cementation degrees [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 3592851.
- [30] 刘胜, 王媛, 冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 10-16. (LIU Sheng, WANG Yuan, FENG Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 10-16. (in Chinese))
- [31] 蒋中明, 杨江寅, 黄湘宜, 等. 堤坝渗漏及结构破坏条件下渗流传热特性的数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 66-73. (JIANG Zhongming, YANG Jiangyin, HUANG Xiangyi, et al. Numerical analysis of seepage and heat transfer characteristics under dam leakage and structure failure conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 66-73. (in Chinese))
- [32] 刘杰, 谢定松. 砾石土渗透稳定特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2632-2638. (LIU Jie, XIE Dingsong. Research on seepage stability experiment of gravelly soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2632-2638. (in Chinese))
- [33] HUANG Zhe, BAI Yuchuan, XU Haijue, et al. A theoretical model to predict suffusion-induced particle movement in cohesionless soil under seepage flow [J]. European Journal of Soil Science, 2021, 72(3): 1395-1409.
- [34] 梁成彦, 许合伟, 李亚, 等. 边坡管涌现象及坡地安全的探讨[J]. 价值工程, 2018, 37(25): 107-109. (LIANG Chengyan, XU Hewei, LI Ya, et al. To investigate the safety of slope and slope of the piping phenomenon[J]. Value Engineering, 2018, 37(25): 107-109. (in Chinese))
- [35] 王明年, 江勇涛, 于丽, 等. 砂性土细颗粒起动临界水力坡降计算方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2515-2524. (WANG Mingnian, JIANG Yongtao, YU Li, et al. Analytical solution of startup critical hydraulic gradient of fine particles migration in sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2515-2524. (in Chinese))
- [36] 毛昶熙, 段祥宝, 吴良骥. 砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3705-3709. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, WU Liangji. Study of critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3705-3709. (in Chinese))
- [37] 周宗青, 李利平, 石少帅, 等. 隧道突涌水机制与渗透破

- 破坏变过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3621-3631. (ZHOU Zongqing, LI Liping, SHI Shaoshuai, et al. Study on tunnel water inrush mechanism and simulation of seepage failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3621-3631. (in Chinese))
- [38] 周宗青. 渗透破坏突水灾变变化过程中多相流模拟的DEM-CFD耦合分析方法[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [39] 黄俊文, 于沐, 邓刚, 等. 渗透破坏诱发土石坝溃坝洪水过程概化计算模型[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(10): 185-187. (HUANG Junwen, YU Shu, DENG Gang, et al. A generalised computational model for the flooding process of an earth and rock dam failure induced by infiltration damage[J]. China Water Transport, 2017, 17(10): 185-187. (in Chinese))
- [40] SHAO Jianli, ZHOU Fei, SUN Wenbin. Evolution model of seepage characteristics in the process of water inrush in faults[J]. Geofluids, 2019, 2019: 4926768.
- [41] 黄震. 流固耦合作用下岩体渗流演化规律与突水灾变机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [42] LI Bin, YANG Jie, HU Dexiu. Dam monitoring data analysis methods: a literature review[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(3): e2501.
- [43] SI Chundi, LIAN Jijian, QIE Zhihong, et al. Research on the genetic regression model of earth-rock dam safety monitoring and its application[C]//2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou: IEEE, 2005: 2874-2879.
- [44] 刘望亭, 李旦江. 土石坝渗流的统计模型[J]. 大坝观测与土工测试, 1991(增刊1): 52-60. (LIU Wangting, LI Danjiang. Statistic modelling for seepage through earth rockfill dams[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1991(Sup1): 52-60. (in Chinese))
- [45] 马春辉, 侯媛媛, 杨杰, 等. 基于RUN-XGBoost算法的土石坝渗流预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 72-78. (MA Chunhui, HOU Yuanyuan, YANG Jie, et al. Seepage prediction model of earth-rockfill dams based on RUN-XGBoost algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 72-78. (in Chinese))
- [46] 陆公义, 欧阳鹏, 程赞, 等. 基于YOLO模型的堤坝管涌监测智能识别方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 89-94. (LU Gongyi, OUYANG Peng, CHENG Yun, et al. Intelligent identification method of dyke piping monitoring based on YOLO model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 89-94. (in Chinese))
- [47] WANG Shaowei, BAO Tengfei. Monitoring model for dam seepage based on lag effect[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353-356: 2456-2462.
- [48] 蔡婷婷, 苏怀智, 顾冲时, 等. 综合考虑渗流滞后效应和库水位变化速率影响的大坝渗流统计模型[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 45-48. (CAI Tingting, SU Huaizhi, GU Chongshi, et al. Dam seepage statistical model under comprehensive consideration of hysteresis effect of seepage and impact from variation rate of reservoir water level[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 45-48. (in Chinese))
- [49] 庞琼, 王士军, 谷艳昌, 等. 基于滞后效应函数的土石坝渗流水位模型应用[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 225-229. (PANG Qiong, WANG Shijun, GU Yanchang, et al. Application of earth-rock dam seepage water level model based on hysteresis effect function[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 225-229. (in Chinese))
- [50] 苏怀智, 周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 1-10. (in Chinese))
- [51] ROSSAT D, BAROTH J, BRIFFAUT M, et al. Bayesian inference with correction of model bias for thermo-hydro-mechanical models of large concrete structures[J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115433.
- [52] YANG Jie, JIA Dongyan, CHENG Lin, et al. The influence of different back analysis conditions on the stochastic back analysis of arch dam material parameters: a case study[J]. Structures, 2023, 55: 2307-2323.
- [53] 黄耀英, 张耀, 徐小枫, 等. 非饱和水工混凝土水力系数反演研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(3): 132-140. (HUANG Yaoying, ZHANG Yao, XU Xiaofeng, et al. Study on hydraulic coefficient inversion of unsaturated hydraulic concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(3): 132-140. (in Chinese))
- [54] 王相炬, 刘得潭, 何传凯, 等. 长河坝水电站特高心墙堆石坝双防渗墙渗流控制特性反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 88-93. (WANG Xiangxuan, LIU Detan, HE Chuankai, et al. Inversion analysis on seepage control characteristics of double cut-off walls for the extra-high core rockfill dam at Changheba Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 88-93. (in Chinese))
- [55] KÖPKE C, IRVING J, ROUBINET D. Stochastic inversion for soil hydraulic parameters in the presence of model error: an example involving ground-penetrating radar monitoring of infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 829-843.
- [56] 余红玲, 王晓玲, 王成, 等. 贝叶斯框架下大坝渗流参数反演组合代理模型研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 306-315. (YU Hongling, WANG Xiaoling, WANG Cheng, et al. Research on ensemble surrogate models of dam seepage parameters inversion under Bayesian framework[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 306-315. (in Chinese))

- [57] LIU Bo, CEN Weijun, ZHENG Changhai, et al. A combined optimization prediction model for earth-rock dam seepage pressure using multi-machine learning fusion with decomposition data-driven [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 242: 122798.
- [58] HIEMER S, ZAPPERI S. From mechanism-based to data-driven approaches in materials science [J]. Materials Theory, 2021, 5(1): 4.
- [59] 马睿, 尹韬, 李浩欣, 等. 大坝机理-数据融合模型的基本结构与特征[J]. 水力发电学报, 2022, 41(5): 59-74. (MA Rui, YIN Tao, LI Haoxin, et al. Basic structure and characteristics of dam mechanism-data-driven fusion models[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(5): 59-74. (in Chinese))
- [60] 李心如, 宋锦焄, 杨杰, 等. 基于概率性预测的抽水蓄能电站大坝渗流安全监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4): 76-84. (LI Xinru, SONG Jintao, YANG Jie, et al. Seepage safety monitoring model for pumped storage power station dams based on probabilistic prediction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 76-84. (in Chinese))
- [61] 吴胜文, 秦鹏, 高健, 等. 熵权-集对分析方法在大坝运行风险评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 36-40. (WU Shengwen, QIN Peng, GAO Jian, et al. Application of entropy weight and set pair analysis theory to risk assessment of dam operation [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 36-40. (in Chinese))
- [62] SU Huaizhi, WEN Zhiping, SUN Xiaoran, et al. Time-varying identification model for dam behavior considering structural reinforcement [J]. Structural Safety, 2015, 57: 1-7.
- [63] SU Huaizhi, LI Jinyou, WEN Zhiping, et al. Dynamic non-probabilistic reliability evaluation and service life prediction for arch dams considering time-varying effects [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(15/16): 6908-6923.
- [64] 高延红. 现有堤坝地基渗透稳定可靠性研究及加固方案分析[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(1): 82-86. (GAO Yanhong. Study on foundation seepage stability reliability and analysis of reinforcing plan for existing dikes and earth-rock dams [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(1): 82-86. (in Chinese))
- [65] 魏海, 沈振中. 土坝渗透稳定可靠性分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1404-1409. (WEI Hai, SHEN Zhenzhong. Reliability analysis on seepage stability of earth dams and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1404-1409. (in Chinese))
- [66] 胡冉, 陈益峰, 李典庆, 等. 心墙堆石坝渗透稳定可靠性分析的随机响应面法[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1051-1060. (HU Ran, CHEN Yifeng, LI Dianqing, et al. Reliability analysis of seepage stability of core-wall rockfill dam based on stochastic response surface method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1051-1060. (in Chinese))
- [67] 周兰庭, 郭枫, 王浩. 土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 86-92. (ZHOU Lanting, GUO Feng, WANG Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 86-92. (in Chinese))
- [68] CYGANIEWICZ J M, SMART J D. U. S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making [C]//Transactions of The International Congress on Large Dams. Beijing: ICOLD, 2000: 351-370.
- [69] 梅亚东, 谈广鸣. 大坝防洪安全评价的风险标准[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4): 8-10. (MEI Yadong, TAN Guangming. Risk criteria for assessment of dam hydrological safety [J]. Water Resources and Power, 2002, 20(4): 8-10. (in Chinese))
- [70] 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: 192.
- [71] 王志军. 我国水库大坝风险评价研究进展及展望 [J]. 大坝与安全, 2008, 22(3): 15-19. (WANG Zhijun. Research progress and prospect in risk assessment of reservoir dam in China [J]. Dam & Safety, 2008, 22(3): 15-19. (in Chinese))
- [72] 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. (ZHOU Jianping, WANG Hao, CHEN Zuyu, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I: fundamentals and criteria [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 505-514. (in Chinese))
- [73] LIN Peng, NING Zeyu, SHI Jie, et al. Study on the gallery structure cracking mechanisms and cracking control in dam construction site [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105135.
- [74] CELIK E, GUL M. Hazard identification, risk assessment and control for dam construction safety using an integrated BWM and MARCOS approach under interval type-2 fuzzy sets environment [J]. Automation in Construction, 2021, 127: 103699.
- [75] SHEN Guangze, LU Yi, ZHANG Shichen, et al. Risk dynamics modeling of reservoir dam break for safety control in the emergency response process [J]. Water Supply, 2021, 21(3): 1356-1371.

(收稿日期: 2025-06-30 编辑: 俞云利)