

碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展

赵二峰, 顾冲时

(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)

摘要: 阐述了碾压混凝土坝的安全状况, 围绕碾压混凝土坝层面力学行为和工作性态, 综述了碾压混凝土坝层面结合性能、力学特性、变温效应、渗流分析、安全监控和综合评价等方面的已有研究进展, 认为今后应加强碾压混凝土材料与结构交互演化机理和碾压混凝土坝服役性能劣化机制、劣化过程辨识与预警及劣化干预等方面的基础理论和方法研究。

关键词: 碾压混凝土坝; 安全服役; 施工层面; 渗流; 研究进展

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)01-0011-10

Review on key technologies for safe operation of roller compacted concrete dams//ZHAO Erfeng, GU Chongshi(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Since the safety, durability and adaptability to environment of roller compacted concrete (RCC) dams are related to the safe operation, and especially the interlayer bonding quality can directly affect the seepage resistance and the interlayer anti-sliding stability, the safety status of RCC dams were overall elaborated. Concentrated on the mechanical behavior and the service performance of RCC dams, advances in the aspects of bonding performance, mechanical characteristics, temperature change effect, seepage analysis, safety monitoring and comprehensive evaluation were reviewed. It should be highlighted the basic theory and methodology of the interactive evolution mechanism of RCC materials and structures, the deterioration mechanism of RCC dam performance during long-term operation, corresponding identification and early warning methodologies, and intervention technologies as well should be further investigated in the future.

Key words: roller compacted concrete dam; safe operation; construction layer; seepage; research progress

碾压混凝土坝将常态混凝土坝的结构特点和碾压土石坝的施工工艺相结合, 集合了混凝土坝体积小、强度高和土石坝施工快速的优点, 其投资省、机械化程度高、适应性强, 备受坝工界青睐。1980 年, 日本建成了世界第一座碾压混凝土坝——89 m 高的岛地川坝(Shimajigawa)。我国从 1978 年开始研究碾压混凝土筑坝技术, 1986 年建成了国内第一座碾压混凝土坝——56.8 m 高的坑口坝, 前后经历了 20 世纪 80 年代初的探索期、20 世纪 90 年代的过渡期和成熟期, 发展到当前的创新领先期, 据不完全统计^[1], 我国已建设了 300 余座碾压混凝土坝。随着这些工程的建设, 我国碾压混凝土筑坝在建坝数量、坝型以及成套施工技术水平上均处于国际领先地位。目前, 世界上已建最高碾压混凝土坝是我国的龙滩大坝, 坝高 216.5 m, 巴基斯坦在建的 Diamer-Bhasha 坝

272 m, 建成后将成为最高的碾压混凝土坝。然而, 国内外已建碾压混凝土坝施工过程中, 由于碾压混凝土原材料和混凝土配合比不当, 以及混凝土摊铺、浇筑、分缝、分层碾压和模板工程等施工工艺粗放, 工程质量和事故时有发生; 也有碾压混凝土坝建成后, 因透水率大、芯样获得率低、层间结合抗剪性能差、蓄水后大坝严重渗漏等问题, 不得不进行大量的灌浆和坝面防渗处理, 给工程效益正常发挥带来重大损失^[2]。例如在已运行的碾压混凝土坝中, 美国 Willow Creek 与 Dworshak、加拿大 Revelstoke 和我国水东、观音阁等, 因碾压层间结合施工质量差, 相继出现裂缝、渗漏等, 给大坝健康服役带来严重危害。以往研究注重于碾压混凝土材料试验和筑坝技术等, 对碾压混凝土坝结构和渗流性态演变规律往往以经验判断为主, 缺乏理论指导。

基金项目: 国家自然科学基金(51779086, 52079046); 中央高校基本科研业务费专项(B210202017)
作者简介: 赵二峰(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水工结构安全监控与健康诊断研究。E-mail: zhaoerfeng@hhu.edu.cn
通信作者: 顾冲时(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工结构安全监控与健康诊断研究。E-mail: csgu@hhu.edu.cn

同时,对碾压混凝土坝服役性态诊断主要凭借监测资料,无法及时发现工程险情。本文在阐述碾压混凝土坝安全状况的基础上,综合论述碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展,对亟待开展的研究提出一些建议。

1 碾压混凝土坝安全状况

碾压混凝土作为主要筑坝材料,坝体逐层碾压铺筑的施工特点导致坝身出现大量的施工层面,层面施工质量决定了其力学特性,势必影响到大坝整体稳定性和防渗效果。近年来,采用碾压混凝土筑坝技术的国家日益增多,但这些工程往往存在碾压层面、异种碾压混凝土间以及建基面胶结处等结合不良现象,而且层间缝和裂缝渗水对工程质量影响甚大。美国 Galesville 坝和 Upper Stillwater 坝在钻孔取样后,发现许多芯样在铺筑层底部 1/3 ~ 1/4 高度内出现微小孔隙,在我国部分碾压混凝土坝取样中也发现类似情况。下面具体分析碾压混凝土坝存在的突出问题。

a. 碾压层面结合问题。以往通用的干硬性混凝土常因浇筑层面缺乏泛浆导致层间结合不良,尽管现今采用的亚塑性混凝土泛浆性能好、易于压实,提高了层面的抗剪断和抗渗性能,但通仓薄层碾压形成的层面仍是产生裂缝和渗漏的薄弱部位。例如,在工程现场钻取的芯样中,有的芯样断口多、气孔多、骨料架空、层缝面黏结不良、压水试验透水率大等,个别工程透水率超出了设计要求的 1 Lu,导致坝体渗漏严重。我国部分工程芯样的极限拉伸值较低,达不到设计要求。据龙滩和光照两座大坝芯样抗剪强度及原位抗剪断试验结果,表明虽然其摩擦因数 f' 、黏聚力 c' 要高于设计指标,但层间抗剪强度要低得多。与此同时,干湿度 VC 值过大、不能及时入仓碾压、骨料分离未处理、保温保湿不达标等均影响了碾压层面结合质量,也使得坝体渗透各向异性比超过了 1 个甚至 2 个数量级。

b. 碾压密实度和均匀性问题。碾压混凝土密度与所用骨料的密度关系很大,同时也与混凝土的振动碾压密实度有关。图 1(a)为实际密度与充分密实的密度比值和实际混凝土抗压强度与密实混凝土强度比值之间的关系^[3],三级配碾压混凝土骨料最大粒径为 80 mm,而广西百色工程坝体碾压混凝土骨料最大粒径为 60 mm,粗骨料最大粒径技术增强了骨料抗分离性,可碾性好、液化泛浆快,使得层间结合紧密,提高了层间抗裂性能,但骨料集中部位胶结效果差的现象仍不可避免。不同水胶比(体积比)的碾压混凝土抗剪断特性^[3]分别如图 1(b)和图 1(c)所示,图中 C_f 为粉煤灰掺量,抗压和轴拉强度随着水胶比的增大而减小。尽管富浆、低 VC 值的碾压混凝土能够提高坝体自身防渗能力,但是振动碾只能在表面振动碾压,对富浆凝胶体碾压混凝土液化泛浆、层间结合的影响尚待研究。

c. 温控防裂问题。碾压混凝土坝大多在低温季节浇筑混凝土,尤其是基础约束部位,而在次高温季节仅浇筑坝体中高高程混凝土,高温季节则停浇。同时,次高温季节施工常辅以仓面喷雾、保湿等,一般没有混凝土预冷或水管冷却措施。此外,早期工程有的既不设纵缝也不设横缝,设横缝时,间距超过 60 m,但这些大坝不同程度地产生了表面裂缝、水平裂缝和上游坝面劈头缝等。随着碾压混凝土坝的规模不断扩大,目前通常按 20 ~ 40 m 间距设置横缝,碾压混凝土发热较慢,浇筑层面散发的热量大大增加了散热时间,使得温控成为制约快速施工的技术难题。尤其对于 200 m 级高坝工程,需要在高温多雨环境下全年施工,应采取不同施工条件、气候和环境温度下的合适的温控措施,防止或减少裂缝发生。

d. 耐久性问题。世界已建和在建碾压混凝土坝的平均水泥用量约为 81.5 kg/m³,胶凝材料平均用量约为 139.42 kg/m³,掺和材料的平均掺量约为 41.54%。中国、日本、美国和西班牙采用的碾压混凝土平均水泥用量在 75 ~ 85 kg/m³ 的范围内,胶凝

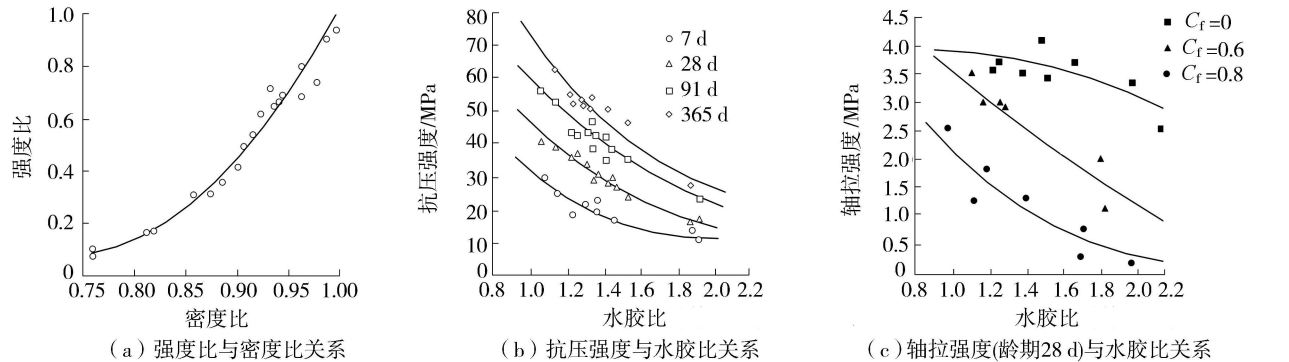


图 1 碾压混凝土力学性能与材料配合比之间的关系

材料用量的差异主要体现在粉煤灰等活性掺合料用量不同。我国碾压混凝土配合比设计一直按照高掺、中等胶凝材料用量发展,其中变态混凝土也属于创新工艺。运行最久的岛地川坝迄今已 40 余年,尚未因材料老化、荷载产生累积损伤等导致大坝结构性能衰减而出现不可接受的失效概率。但随着工程服役年限增长,荷载、环境和材料内部因素等产生的局部损伤积累到一定程度,必然影响到大坝结构保证正常功能的能力及其使用寿命。

2 碾压混凝土坝层面力学行为分析

相对其他坝型,碾压混凝土坝筑坝历时较短,常规混凝土坝安全服役评估、监控与预警理论和技术,无法综合反映碾压层面性能变化和作用响应,难以完全与实际情况相吻合。从施工过程和运行情况来看,需考虑碾压层面对大坝服役性态的影响,否则必然降低分析理论和技术的有效性,轻者不能客观反映大坝真实服役性态,误导运行管理单位对工程服役性态的客观评估和安全控制,重者可能带来灾难性事故。国内外在碾压混凝土坝层面力学行为分析方面的研究现状及发展动态分析如下。

a. 结合性能。碾压混凝土坝层面数量众多,层面结合区碾压混凝土轴拉强度及拉伸应变能力等力学性能较本体明显偏低,层间结合好坏决定了层面的力学特性,往往易成为碾压混凝土坝防渗和抗滑稳定的薄弱部位。电镜测试得到不同层间间隔时间下的层面水化产物形貌如图 2 和图 3 所示^[4],层间间隔 0 h 的层面水化产物结构密实,骨料与水化产物的结合十分紧密;随着间隔时间增大,层面水化产物结构逐渐变得疏松多孔,微小孔隙增大、微裂纹增多,部分裂纹逐渐扩展,以至有较大孔洞和裂隙出现,同时结晶程度较高。表明层间间隔越久,越易出现疏松多孔的结构形貌,势必导致层间结合质量较

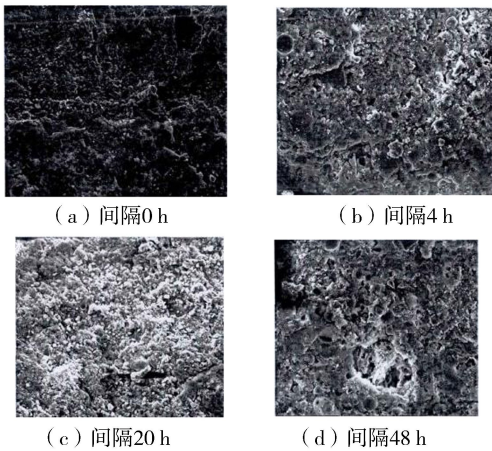


图 2 放大 1 000 倍的碾压混凝土层面水化物形貌

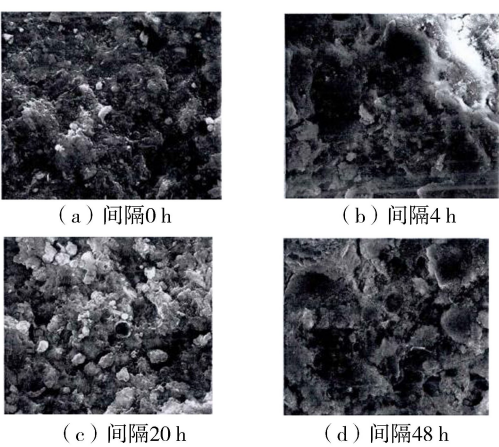


图 3 放大 5 000 倍的碾压混凝土层面水化物形貌

差。对四级配碾压混凝土微观结构的研究^[5]表明,骨料粒径和骨料表面自由水含量对混凝土力学性能有着显著影响。因此,需要在下层混凝土初凝前摊铺压实上层混凝土以及采用层面喷毛铺砂浆或水泥浆处理冷缝。通常采用 VC 值评定碾压混凝土施工质量,刘东海等^[6-7]试验研究了不同 VC 值下碾压参数控制标准和压实质量的单位压实能量指数评价方法,邢岳等^[8]融合人工智能技术研发了基于 Auto CAD/Open GL 的层面压实可视化馈控系统,屈嘉程等^[9-10]分别利用瑞雷波速和常规硬 X 射线检测了碾压热层压实度,进行了碾压混凝土薄弱区域压实质量精细评价。此外,在黄登、百色、观音岩等碾压混凝土坝坝体中钻取芯样进行了大量的密实性、原位抗剪等层间结合性能检测,充分反映了碾压层间结合性能的提升。也有许多学者试验研究了双膨胀外加剂改善碾压层间砂浆性能^[11]、结晶添加剂增强二级配碾压混凝土抗裂性^[12]、导电碾压混凝土用于解决越冬层裂缝^[13]以及黏结剂和引气剂对碾压混凝土孔隙率和抗冻性的影响^[14]。可见,碾压施工层面结合性能对大坝整体稳定性和防渗效果起着控制性的作用,层面结合性能较差必然危及大坝健康运行,尤其是高坝更为明显。因此,结合上述研究成果,今后宜重点从材料配合比、层面间隔时间、仓面 VC 值控制、骨料分离和集聚、施工仓面降温保温、初凝层面处理等方面提出层面结合性能改善措施。

b. 力学特性。主要体现在不同层间间歇时间对碾压质量的影响、层面断裂和本构关系的理论研究,以及层面在不同处理方式下的抗剪、抗拉性能等方面。由于碾压混凝土坝是分层碾压而成的,层面附近极易发生粗骨料分离现象,从而形成大量水平层间缝。在层间断裂方面,沈英等^[15]考虑碾压层面非均布应力与应力-位移软化效应,提出了碾压混凝土直剪试验与有限元计算相结合的剪切断裂模型;彭一江等^[16]用随机骨料模型替代碾压混凝土的细

观结构,模拟了试件的细观损伤开裂过程。在层面抗剪、抗拉性能方面,林长农等^[17]研究了龙滩碾压层本体及层面的抗剪及抗拉性能,建立了碾压层抗压强度、层面轴拉强度与其极限拉伸值的关系;王怀亮等^[18]通过多轴应力作用下层面抗剪强度试验,揭示了层面力学脆性特征;张艳红等^[19]研究了武都碾压混凝土重力坝在不同初始静载下的混凝土动态弯拉特性和破坏特征;还有学者试验研究了全级配碾压混凝土动态拉伸特性、不同粉煤灰掺量的碾压混凝土在冻融环境下的抗剪断特性、不同龄期下的碾压混凝土有效裂缝长度和断裂韧度。申嘉荣等^[20]建立了胶凝材料、粉煤灰、水胶比以及层面施工、现场气候条件等因素与层间抗剪强度的非线性预测模型;李明超等^[21]利用常态-碾压混凝土复合试件细观数值模型,建立了联合筑坝材料的剪切破坏准则。对于含层面碾压混凝土的本构关系及其破坏准则理论的研究,通常将其按均质各向同性且含软弱夹层的层状结构处理,具有代表性的有等参数流变模型、正交各向异性本构模型、内时损伤本构模型、各向异性徐变损伤本构模型和弹-黏塑性动态剪切本构模型等。此外,张社荣等^[22-23]测定了碾压混凝土的动态压缩性能,建立了基于 Weibull 统计分布的损伤演化本构模型。上述研究成果在一定程度上描述了碾压混凝土层面的静态和动态力学特性,但在反映碾压层实际复杂应力状态的压剪、拉剪及其各种组合状态和层面抗剪条件影响的剪切强度破坏准则和本构模型,以及层面剪切破坏形成机制和复合应力状态下的静动力工作特性等方面,尚存在改进的空间。

c. 数值模拟。主要有等效分析法、单独考虑层面分析法和成层结构分析法。等效分析法借鉴节理岩体分析思路,利用等效原理模拟碾压混凝土坝宏观上表现出的各向异性特征,包括等效模量法、变形等效法、能量等效法、渗流等效法等。这些方法计算相对简单,但将层面特征概化到等效体中,忽略了层面特性的影响。刘光廷等^[24]根据等效模量理论提出了均质横观各向同性体等效连续模型;王宗敏等^[25]根据变形等效原理,采用无厚度节理单元模拟了碾压层面;苏培芳等^[26]采用复合单元法模拟层面进行温度场仿真分析。碾压混凝土坝的分层施工特点决定了其具有几十甚至几百个碾压层,顾冲时等^[27]建立了施工层面有厚度和无厚度分析模型,剖析了层面影响带渐变规律;陈龙^[28]指出碾压混凝土本体内的力学参数沿层深呈指数规律衰减,建立了力学参数渐变分析模型和结构等效分析模型;李波^[29]建立了碾压混凝土坝弹性力学参数和黏弹性力学参数渐变规律分析模型。此外,对碾压混凝土

层状结构进行数值模拟时,可以根据实际碾压过程,单独考虑层面进行分析^[30]。例如非均匀单元法、薄层单元法、无厚度缝面单元法、虚单元法与浮动网格法结合等,这些方法能在一定程度上反映层面特性,故比概化层面处理的等效法合理,但其在层面厚度等参数确定方面比较困难。成层结构分析法是把碾压混凝土属性相近的多层合并成一层,上部分层计算,下部把几个浇筑层合成一体,使原来的一二百层减少到 10 层左右,利用有限差分法、界面元法或无限差分法将碾压混凝土坝按成层结构进行模拟分析,但计算参数和边界条件尚难以合理确定。总体而言,上述对碾压层力学特性模型的研究大多是基于宏观等效处理开展的,有的专门针对施工层面,有的则概化了层面影响,对碾压层内力学参数渐变的模拟也仅是基于黏弹性本构关系进行的^[31],尚无法揭示薄弱层面影响带的演变规律。今后可充分考虑层面损伤影响,从非线性黏弹塑性本构关系角度,建立基于变形协调的并层等效数值模拟模型,同时碾压层内的热力学和渗流参数演变的反演计算方法^[31]也有待研究。

3 碾压混凝土坝工作性态分析

a. 变温对碾压混凝土坝结构性态的影响。碾压混凝土通常采用低热水泥,且水泥用量较常态混凝土少,水化热和绝热温升相对较低。此外,薄层浇筑、连续上升的施工方式通常不采取人工二期降温措施,与常规混凝土坝相比,坝体最高温度出现相对较晚,降温过程也相对更为缓慢,坝体达到准稳定温度场历时相对要长。冯明琿等^[32]模拟了浇筑升程施工过程和蓄水、放水运行全过程的温度应力变化;Chen 等^[33]采用网格重新定位方法仿真模拟了碾压混凝土坝施工期温度和温度应力变化过程,降低了计算工作量;Malkawi 等^[34]根据碾压混凝土坝施工期热力耦合模拟计算成果,提出了温度裂缝的控制措施;张国新等^[35]通过不同坝高的 RCC 拱坝温度仿真分析了封拱温度及对温度荷载变化的影响;谢祥明等^[36-37]研究了高温气候地区碾压混凝土重力坝坝体温度裂缝成因和防止措施以及寒冷地区越冬期表面保温对碾压混凝土坝的影响;Kuzmanovic 等^[38]提出了碾压混凝土坝非稳定温度阶段热应力分析的黏弹性数值模拟方法;裴亮等^[39]建立了碾压混凝土拱坝施工期坝体最高温度可靠性功能函数和可靠度指标求解模式;李明超等^[40]仿真模拟了碾压混凝土重力坝控裂结构诱导缝降低温度应力的效果;Abu-Khashaba 等^[41]利用缩尺模型试验研究了粉煤灰在细化碾压混凝土孔结构、降低水化热和温

度荷载的效应。在上述温度仿真模拟和综合温控措施下,碾压混凝土坝防裂效果良好,这对工程安全运行和耐久性产生了积极的影响。尽管如此,通常采用的选择低热水泥、合理分缝、降低浇筑温度、表面保温、内部通水冷却等温控措施均存在一定局限性,尤其近年来建设的碾压混凝土坝仍不时出现温度裂缝,给大坝健康运行留下了隐患。今后应根据材料性能、结构尺寸、气候条件、铺筑层厚、浇筑温度、碾压升层及间歇方式,结合仓面降温散热措施等,从控制原材料温度、优化配合比、严格控制混凝土浇筑温度、仓面喷雾保湿和及时覆盖养护等方面采取综合措施,合理安排施工时段,并对碾压混凝土坝的温度控制标准、温控技术进行创新研究,尽量减小温降过程中的温度梯度和温差,以降低变温在碾压混凝土快速筑坝过程中的不利影响。

b. 渗流分析。与常规混凝土相比,碾压层面水平向渗透性较强,库水高渗透压力作用下,层面有发生水力劈裂的危险。对于层面渗流,在数值分析时多采用缝隙流层流“立方定律”来描述。朱岳明等^[42]假定碾压混凝土为具有对称等效渗透张量的各向异性连续体,将层面渗流量等效平摊到本体中,采用连续介质渗流理论进行分析。杨华全等^[43]将离散裂隙网络模型应用于数目不多且对大坝应力和稳定起关键作用的层面中,而将等效连续介质模型应用于非关键层面进行渗流模拟计算。与此同时,程正飞等^[44]建立了碾压混凝土坝三维统一模型,采用VOF法进行了坝体渗流场数值模拟;Xie等^[45]模拟分析了常规混凝土、二级配混凝土等不同防渗材料和厚度下的三级配碾压混凝土坝温度变化差异性;Li等^[46]提出了能在碾压混凝土坝中形成防渗层的新型自密实混凝土,并试验研究了这种高流动性抗渗抗裂混凝土的力学性能。在碾压混凝土坝服役期间,坝体渗流和应力是相互影响的,模拟计算时有必要考虑二者的相互作用,建立联合求解坝体渗流场和应力场的耦合模型。此外,李明超等^[47]利用基于伽辽金法的渗控结构模型,研究了不同厚度的二级配碾压混凝土和变态混凝土的影响规律,以及不同渗控方案下的渗流场形态变化;程正飞等^[48]建立了碾压混凝土坝渗控结构的多目标优化数学模型,利用粒子群算法与代理模型进行了模型求解。针对碾压混凝土层(缝)间渗漏溶蚀,孔祥芝等^[49]采用硝酸铵溶液循环浸泡加速法进行了试验模拟,图4为不同溶蚀程度的试件切剖面酚酞指示剂显色变化过程,随着溶蚀时间增长,代表碱性降低的溶蚀混凝土不变色区逐渐增大,表明混凝土钙离子溶出前锋线逐渐向内部延伸,即溶蚀深度逐渐增加,溶蚀降低了

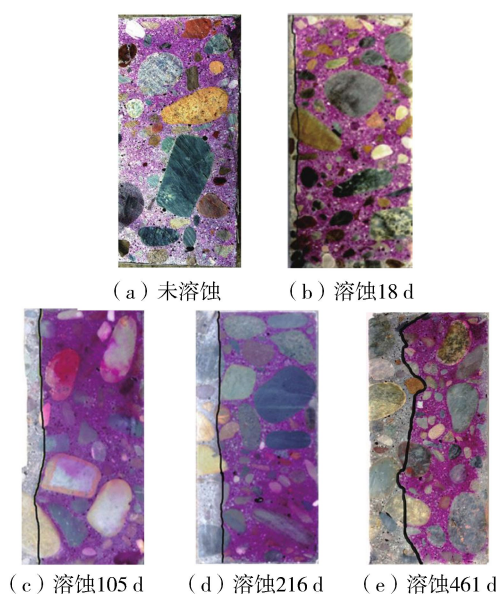


图4 加速溶蚀作用下混凝土缝面喷酚酞指示剂显色情况

缝隙两侧砂浆的密实度以及增大了孔隙率。上述渗流数值模拟和试验研究成果表明,碾压混凝土坝的渗透性主要取决于层面集中渗漏通道,但层间渗透特性不仅与层面处理有关,还与层面加载、渗流通道化学侵蚀等有关,大坝长期服役的渗流性态演化机制尚未完全被揭示,在层面渗流数值模拟方法、渗流场与应力场耦合模型、坝体防渗层及渗控结构优化、渗漏溶蚀效应剖析等方面仍有待深入研究。

c. 安全监控模型。通过布设完善、先进的监测系统,可以获得碾压混凝土坝施工期、蓄水期和运行期等各个阶段的变形、渗流规律。利用这些监测数据进行时空分析,建立监控和预测模型,有助于评判工程当前的工作状态、及时发现问题。吴中如等^[50]系统地论述了碾压混凝土坝结构和渗流分析及反分析理论和方法,建立了碾压混凝土坝层面性态的正反分析模型,坝体温度场时空分布模型和考虑层面渗流特性的渗流量监控模型,以及可使本体与层面分量分离的混合模型。为反映库水压力作用滞后效应以及层面渗流特征,顾冲时等^[51-52]建立了碾压混凝土坝渗漏量安全监控模型,提出了渗透系数反演分析的最大熵方法,这些研究成果着重突出了碾压层面对大坝渗流的影响。在研究碾压混凝土坝坝体变形变化规律时,卡尔曼滤波法、扩展粗集模型、时空监控模型、集合经验模态分解、云模型等也被引入该领域。不仅如此,在利用所建立的监控模型进行碾压混凝土坝热力学参数反演分析中,往往需要求解优化问题,最小二乘支持向量机、可变容差法、混沌遗传算法、人工鱼群算法、支持向量机等^[53-54]数据挖掘技术均已在实际工程中得到了应用,为准确评价碾压混凝土坝安全服役性态提供了技术支撑。

尽管如此,由于碾压混凝土坝热力学和渗流参数变化的不确定性、边界条件及坝体结构的复杂性,如何充分利用多效应量长序列原型监测资料,在反映大坝长期服役性能演化的时变监控模型构建和诠释结构性态演变机理的主要影响因素定量挖掘等方面仍需进一步研究。

d. 工作性态评价。碾压混凝土坝在服役过程中,工作性态逐渐发生变化,其安全状态一般分为正常、异常、险情三大类,而根据大坝结构性态又可分为弹性、弹塑性和失稳破坏3个工作阶段。在碾压混凝土重力坝变形性态分析方面,主要包括对层面和大坝整体的变形分析,顾冲时等^[55]利用建立的碾压层面的法向、切向本构模型进行了坝体时效位移有限元模拟计算;Noorzaei等^[56]采用弹塑性有限元模型对碾压混凝土坝结构变形特性进行了分析,应力重分布的考虑使得计算结果更加合理;Kartal等^[57]研究了动水压力对碾压混凝土坝变形的影响,动水压力作用会使水平位移增大;Arici等^[58]比较了二维模型和三维模型对碾压混凝土坝变形计算结果影响的适用性。此外,李明超等^[59]探究了高碾压混凝土坝异种材料交界面的应力奇异性和变形协调机制;牛景太等^[60]利用层面蠕变损伤模型剖析了施工层面变形变化规律;王少伟等^[61]模拟了带缝碾压混凝土拱坝的变形场和应力场分布规律;陈健云等^[62]揭示了碾压层不同力学参数下的坝体层面失稳的临界滑动面形状变化规律;苏培芳等^[63]通过光照碾压混凝土坝施工期仿真,综合评价了大坝温控和渗控效果以及整体安全性;Wang等^[64]试验研究了丰满新坝碾压混凝土施工期汛期高速水流的冲蚀磨损特性。还有学者利用实测数据评价了寒旱区碾压混凝土坝服役性态,剖析了一些工程长期运行期间异常变形和渗流性态的成因机制,以及采用随机损伤力学、非概率方法、响应面法等开展了碾压混凝土重力坝的静动力可靠度研究。在碾压混凝土坝地震响应方面,坝体结构缝影响、大坝整体动力反应、坝肩稳定、坝体开裂、水平薄弱层面、失事模式等有限元数值模拟和振动台试验均涌现出丰富的成果^[65-70]。碾压混凝土坝服役期间,监控指标拟定也是评估和预测抵御可能发生荷载能力的重要内容。有学者从碾压混凝土坝工作状态的影响因素开展研究,应用集值理论、云模型^[71]、区间数理论等构建了评价因素集,拟定了层面失稳判据,建立了层面性态综合评价模型等。上述研究综合利用模型试验、数值模拟和原型监测等多种手段从多方面评价了大坝工作性态,涉及了诸多确定性的和不确定性的因素,尚需利用随机理论、模糊数学、区间数理论等在评价

指标体系建立、评价指标度量、指标权重拟定及评价方法确立等方面结合工程实践不断地完善。

4 研究展望

a. 碾压混凝土材料与结构交互演化机理。对典型工程现场钻孔取样,进行多种环境因素作用下碾压混凝土力学特性试验,研究不同初始静载、骨料不同初始损伤和骨料强度的空间随机分布等对碾压混凝土破坏机理的影响,分析材料各组分参数对拉压异性、压硬性、非均匀强化和软化等宏观力学性能的影响,研究碾压混凝土力学特性演化的主导因素。在试验研究基础上,利用数值仿真技术建立碾压混凝土组成与微观结构的演变模型,剖析骨料-砂浆界面细观结构对碾压混凝土力学特性的相互影响关系,发展由细观向宏观过渡的均匀化方法,引入表征材料细观结构和损伤的物理或几何量,构建碾压混凝土细观结构、内部缺陷与宏观力学性能之间的定量关系;建立碾压混凝土多相复合材料的数值分析模型,模拟结构局部劣化发生、发展过程,据此提出碾压混凝土力学特性的时变分析方法,揭示结构性态劣化累积的微观-细观-宏观力学规律。

b. 碾压混凝土坝服役性能劣化机制。通过建立数值仿真模型,精细化模拟力学要素与多重环境要素作用下碾压混凝土坝层间缝扩展和演变过程,从损伤扩展的能量耗散过程及特征等方面揭示局部损伤演变过程的宏观规律和能量耗散机理;针对碾压混凝土坝本体和层面渗流差异性,研究大坝渗流性态演变主要影响因素的提取方法,利用数值模拟和原型监测成果,建立能够充分反映层面影响的渗流演变混合模型,拟定大坝渗流性态转异判据。利用分形理论模拟典型恶劣环境条件下碾压层面局部损伤特征,构建基于连续损伤力学的局部损伤扩展演变分析模型,建立结构局部损伤诊断的熵变模型,揭示局部损伤演变的熵变规律;应用灾变理论,剖析典型恶劣环境条件下碾压混凝土坝薄弱层面局部损伤变化特征,考虑碾压层面-坝体-坝基互馈作用,构建基于熵理论的碾压混凝土坝整体稳定性熵灾变分析模型,揭示典型恶劣环境条件下碾压混凝土坝服役性能劣化机制。

c. 碾压混凝土坝服役性能劣化过程辨识与预警。通过碾压混凝土坝服役性能劣化的仿真模拟,着重探究层面渗漏、层间缝、裂缝等病变或破坏过程的典型特征,建立碾压混凝土坝病变和失事的主要劣化模式,揭示碾压混凝土坝在单一、多种病变组合状态下的累积效应和演化规律;构建碾压混凝土坝服役性能劣化与结构状态熵演化的相关关系,提出

碾压混凝土坝服役性能劣化的熵融合诊断方法,利用结构状态熵和安全信息熵表达方法拟定大坝稳定性转异判据,提出碾压混凝土坝病变过程和服役性能劣化的监控方法;根据碾压混凝土坝劣化过程,构建碾压混凝土坝服役性能预警指标体系,研究多个预警指标之间的有机联系和时变特征,通过建立多指标时空联合预警模型,实现工程隐患和险情的有效监控,保障工程安全运行。

d. 碾压混凝土坝服役性能劣化干预。借助理论分析和数值仿真手段,模拟典型工程措施和非工程措施对碾压混凝土坝渗流、开裂、失稳等病险的影响,评估服役可靠度提升的效能;以预警指标阈值为约束条件,反馈分析结构性态灾变的控制荷载组合模式和控制准则,设计碾压混凝土坝安全服役模式调控方案,建立典型工程措施和非工程措施干预效果的评估模型。将动态可靠度和优化方法相结合,以可靠度提升和病险修复的经济合理性以及病险均衡维护为目标,构建碾压混凝土坝病险修复措施最优化决策模型;重点针对层面结合不良、裂缝处理和阻渗导渗等补强措施,建立局部病险隐患补强修复效果评价参数体系,运用模糊数学建立补强修复效果的量化评价模型,并采用数值模拟手段建立补强修复措施长期效力的预测模型。

参考文献:

[1] 田育功,于子忠,郑桂斌. 中国 RCC 快速筑坝技术特点 [C]//国际碾压混凝土筑坝技术新进展与水库大坝高质量建设管理:中国大坝工程学会 2019 学术年会论文集. 北京:中国大坝工程学会,2019:46-56.

[2] 陈波,黄梓莘,郑付刚,等. 考虑风险与社会支付意愿的大坝长效服役决策[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4): 35-40. (CHEN Bo, HUANG Zishen, ZHENG Fugang, et al. Decision-making method of dams for long-term service considering risks and social willingness to pay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(4):35-40. (in Chinese))

[3] 肖峰,冯树荣. 龙滩碾压混凝土重力坝关键技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

[4] LIU G H, LU W B, LOU Y D, et al. Interlayer shear strength of roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments [J]. Construction and Building Materials,2018,166:647-656.

[5] HE Z, DENG H Y, FAN F P, et al. Microstructure of four-graded roller compacted concrete [J]. Construction and Building Materials,2018,187:25-37.

[6] 刘东海,孙龙飞,夏谢天. 不同 VC 值下基于压实功的 RCC 碾压参数控制标准确定方法[J]. 水利学报,2019,50(9): 1063-1071. (LIU Donghai, SUN Longfei, XIA

Xietian. Compaction energy-based determination method for control standards of RCC compaction parameters under different vibrating-compacted values [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (9): 1063-1071. (in Chinese))

[7] LIU D H, LI Z L, LIU J L. Experimental study on real-time control of roller compacted concrete dam compaction quality using unit compaction energy indices [J]. Construction and Building Materials,2015,96:567-575.

[8] 邢岳,田正宏,杜辉. 碾压混凝土坝仓面压实质量 5D 可视化馈控研究[J]. 水力发电学报,2019,38(6):29-40. (XI Yue, TIAN Zhenghong, DU Hui. 5D visual feedback and control of compaction quality of working units of RCC dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (6):29-40. (in Chinese))

[9] 屈嘉程,田正宏,孙啸,等. 基于瑞雷波速的碾压混凝土压实效果评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4): 58-64. (QU Jiacheng, TIAN Zhenghong, SUN Xiao, et al. Evaluation of RCC compaction effect based on Rayleigh wave velocity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):58-64. (in Chinese))

[10] GODOI W C, CORAIOLA G, JUNIOR S R. Expounding structures of roller compacted concrete dam specimens by means of hard conventional X-ray inspection [J]. Heliyon,2019,5:e01467.

[11] ZHU X L, GUO Z H, YANG W, et al. Effects of double expansion agents on the properties of interlayer in roller-compacted concrete [J]. Construction and Building Materials,2020,262:120909.

[12] WANG L, ZHANG G X, WANG P Y, et al. Effects of fly ash and crystalline additive on mechanical properties of two-graded roller compacted concrete in a high RCC arch dam [J]. Construction and Building Materials,2018,182: 682-690.

[13] ZHANG M X, LI M C, ZHANG J R, et al. Experimental study on electro-thermal and compaction properties of electrically conductive roller-compacted concrete overwintering layer in high RCC dams [J]. Construction and Building Materials,2020,263:120248.

[14] WU Z M, LIBRE N A, KHAYAT K H. Factors affecting air-entrainment and performance of roller compacted concrete [J]. Construction and Building Materials,2020, 259:120413

[15] 沈英,曾昭扬,周立峰. 碾压混凝土层面的剪切断裂分析[J]. 力学学报,1994,26(6):679-689. (SHEN Ying, ZENG Zhaoyang, ZHOU Lifeng. Analysis of shear fracture of roller compacted concrete layer [J]. Engineering Mechanics,1994,26(6):679-689. (in Chinese))

[16] 彭一江,黎保琨,刘斌. 碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J]. 水利学报,2001,32(6):19-22. (PENG Yijiang, LI Baokun, LIU Bin. Numerical simulation of

- meso-level mechanical properties of roller compacted concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32 (6): 19-22. (in Chinese))
- [17] 林长农, 金双全, 涂传林. 龙滩有层面碾压混凝土的试验研究[J]. 水力发电学报, 2001 (3): 117-129. (LIN Changnong, JIN Shuangquan, TU Chuanlin. Experiment researches on RCC with layer surfaces for Longtan Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001 (3): 117-129. (in Chinese))
- [18] 王怀亮, 宋玉普. 多轴应力条件下碾压混凝土层面抗剪强度试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42 (9): 1095-1101. (WANG Huailiang, SONG Yupu. Mechanical properties of roller compacted concrete under multiaxial stress state [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (9): 1095-1101. (in Chinese))
- [19] 张艳红, 胡晓. 武都重力坝碾压混凝土动态弯拉性能的试验研究与数值分析[J]. 水利学报, 2011, 42 (10): 1218-1225. (ZHANG Yanhong, HU Xiao. Experimental research and numerical analysis on dynamic flexural bending performance of concrete in Wudu RCC Gravity Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (10): 1218-1225. (in Chinese))
- [20] 申嘉荣, 徐千军. 碾压混凝土坝层面抗剪断强度的人工神经网络与模糊逻辑系统预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59 (5): 345-353. (SHEN Jiarong, XU Qianjun. Prediction of interlayer shear strength parameters for RCC dams using artificial neural network and fuzzy logic system [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59 (5): 345-353. (in Chinese))
- [21] 李明超, 张梦溪, 张津瑞. 常态-碾压混凝土联合筑坝材料变形特性与抗剪强度准则研究[J]. 水利学报, 2019, 50 (2): 157-164. (LI Mingchao, ZHANG Mengxi, ZHANG Jinrui. Deformation characteristics and shear strength failure criteria of CC-RCC materials in combined dam structures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (2): 157-164. (in Chinese))
- [22] 张社荣, 宋冉, 王超, 等. 碾压混凝土的动态力学特性分析及损伤演化本构模型建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50 (1): 130-138. (ZHANG Sherong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Dynamic mechanical property analysis of roller-compacted concrete and damage constitutive model establishment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (1): 130-138. (in Chinese))
- [23] ZHANG S R, WANG X H, WANG C, et al. Compressive behavior and constitutive model for roller compacted concrete under impact loading: considering vertical stratification [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 428-440.
- [24] 刘光廷, 郝巨涛. 碾压混凝土拱坝坝体应力的简化计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36 (1): 27-33. (LIU Guangting, HAO Jutao. Simplified numerical method in stress analysis of RCC arch dam with layered structure [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1996, 36 (1): 27-33. (in Chinese))
- [25] 王宗敏, 刘光廷. 碾压混凝土坝的等效连续本构模型[J]. 工程力学, 1996, 13 (2): 17-23. (WANG Zongmin, LIU Guangting. An equivalent continuum constitutive model for roller-compacted concrete dam [J]. Engineering Mechanics, 1996, 13 (2): 17-23. (in Chinese))
- [26] 苏培芳, 翁永红, 陈胜宏, 等. 碾压混凝土温度场分析中层面对应的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增刊1): 2649-2654. (SU Peifang, WENG Yonghong, CHEN Shenghong, et al. Composite element method of lift joint simulation for roller compacted concrete temperature field analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Supl): 2649-2654. (in Chinese))
- [27] 顾冲时, 程乐群, 李婷婷. 探讨碾压混凝土坝薄层单元有限元分析法[J]. 计算力学学报, 2004, 21 (6): 718-721. (GU Chongshi, CHENG Lequn, LI Tingting. Study on thin-layer element and application in FEM analysis of RCC dams [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21 (6): 718-721. (in Chinese))
- [28] 陈龙. 碾压混凝土坝空间渐变力学特性及安全监控模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [29] 李波. 碾压混凝土坝力学参数渐变规律和层面综合分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [30] ZHAO E F, LI B. Evaluation method for cohesive crack propagation in fragile locations of RCC dam using XFEM [J]. Water, 2021, 13 (58): w13010058.
- [31] 王少伟, 徐丛, 苏怀智. 锦屏一级拱坝黏弹性工作性态反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (5): 62-69. (WANG Shaowei, XU Cong, SU Huaizhi. Back analysis of viscoelastic working behavior for Jinping-I Arch Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (5): 62-69. (in Chinese))
- [32] 冯明晖, 鲁林, 张钟鼎, 等. 碾压混凝土坝温度应力仿真计算[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40 (2): 228-232. (FENG Minghui, LU Lin, ZHANG Zhongding, et al. Finite element modeling of RCD dam temperature stress field during concrete placing [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40 (2): 228-232. (in Chinese))
- [33] CHEN Y L, WANG C J, LI S Y, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32: 677-682.
- [34] MALKAWI A H, MUTASHER S A, QIU T J. Thermal-structural modeling and temperature control of roller compacted concrete gravity dam [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17 (4): 177-187.
- [35] 张国新, 杨波, 张景华. RCC 拱坝的封拱温度与温度荷

- 载研究[J]. 水利学报,2011,42(7):812-818. (ZHANG Guoxin,YANG Bo,ZHANG Jinghua. Grouting temperature and thermal load of RCC arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (7): 812-818. (in Chinese))
- [36] 谢祥明,郭磊. 高温地区碾压混凝土重力坝的施工期温度裂缝控制[J]. 天津大学学报,2011,44(6):504-510. (XIE Xiangming, GUO Lei. Thermal cracking control of RCC gravity dam constructed in high air temperature and dry area [J]. Journal of Tianjin University,2011,44 (6): 504-510. (in Chinese))
- [37] ZHANG X F,LI S Y,LI Y L,et al. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions [J]. Advances in Engineering Software,2011,42: 939-943.
- [38] KUZMANOVIC V, SAVIC L, MLADENOVIC N. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of RCC dams [J]. Journal of Thermal Stress, 2013,36(2):112-134.
- [39] 裴亮,代萍,何坤,等. 高碾压混凝土拱坝温控可靠性分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):90-94. (PEI Liang, DAI Ping, HE Kun, et al. Reliability analysis of temperature control of high RCC arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (1):90-94. (in Chinese))
- [40] 李明超,张梦溪,王孜越. 考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝控裂结构温度场与温度应力数值分析[J]. 水利学报, 2017, 48 (5): 551-567. (LI Mingchao, ZHANG Mengxi,WANG Ziyue. Numerical analysis of temperature field and thermal stress of the crack control structure with induced joint of RCC gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (5): 551-567. (in Chinese))
- [41] ABU-KHASHABA M I, ADAM I, EL-ASHAAL A. Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam [J]. Alexandria Engineering Journal,2014,53:131-142.
- [42] 朱岳明,龚道勇,章洪,等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法[J]. 水利学报,2003,34(3):63-68. (ZHU Yueming, GONG Daoyong, ZHANG Hong, et al. Plan element simulation of fracture seepage for analyzing seepage in RCC dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(3):63-68. (in Chinese))
- [43] 杨华全,任旭华. 碾压混凝土的层面结合与渗流[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [44] 程正飞,王晓玲,吕鹏,等. 基于 VOF 法的碾压混凝土坝自由渗流场数值模拟[J]. 水利学报,2015,46(5): 558-566. (CHENG Zhengfei,WANG Xiaoling,LYU Peng, et al. Numerical simulation of free seepage field in RCC dams based on VOF method [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46 (5):558-566. (in Chinese))
- [45] XIE H W, CHEN Y L. Determination of the type and thickness for impervious layer in RCC dam [J]. Advances in Engineering Software,2005,36:561-566.
- [46] LI M C,ZHANG M X,HU Y,et al. Mechanical properties investigation of high-fluidity impermeable and anti-cracking concrete in high roller-compacted concrete dams [J]. Construction and Building Materials,2017,156:861-870.
- [47] 李明超,王孜越,郭鑫宇,等. 碾压混凝土坝防渗层及渗控结构优化分析[J]. 应用力学学报,2016,33(6): 1064-1071. (LI Mingchao, WANG Ziyue, GUO Xinyu, et al. Seepage simulation and optimization for impervious structures of roller compacted concrete dam [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2016,33 (6):1064-1071. (in Chinese))
- [48] 程正飞,王晓玲,任炳昱,等. 基于代理模型的碾压混凝土坝坝体渗控结构多目标优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52 (8): 793-803. (CHENG Zhengfei, WANG Xiaoling, REN Bingyu, et al. Multi-objective optimization of seepage control structures of RCC dams based on the surrogate model [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (8):793-803. (in Chinese))
- [49] 孔祥芝,陈改新,李曙光,等. 渗漏溶蚀作用下碾压混凝土层-缝-面抗剪强度衰减规律试验研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1082-1088. (KONG Xiangzhi, CHEN Gaixin,LI Shuguang,et al. Studies on the decreasing rule of the anti-shearing strength along RCC joints (cracks) subjected to leaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48 (9):1082-1088. (in Chinese))
- [50] 吴中如,顾冲时,吴相豪. 碾压混凝土坝安全监控理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [51] 顾冲时,李波,徐宝松,等. 碾压混凝土坝渗漏安全监控模型建模方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36 (5): 579-584. (GU Chongshi, LI Bo, XU Baosong, et al. Safety monitoring model of roller-compacted concrete dam seepage [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36 (5): 579- 584. (in Chinese))
- [52] 娄一青. 碾压混凝土坝渗流演变特性及安全监控方法研究[D]. 南京:河海大学,2009.
- [53] 牛景太. 基于奇异谱分析与 PSO 优化 SVM 的混凝土坝变形监控模型[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6): 60-65. (NIU Jingtai. Dam deformation monitoring model based on singular spectrum analysis and SVM optimized by PSO[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(6):60-65. (in Chinese))
- [54] 徐韧,苏怀智,杨立夫. 基于 GP XGBoost 的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost[J]. Advances in

- Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (5):41-46. (in Chinese))
- [55] 顾冲时,黄光明,赖道平. 碾压混凝土坝施工层面变形分析模型[J]. 应用数学和力学, 2007, 28 (1): 70-76. (GU Chongshi, HUANG Guangming, LAI Daoping. Analytic model of deformation of construction interfaces of RCCD [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28 (1):70-76. (in Chinese))
- [56] NOORZAEI J, BAYAGOOB K H, ABDULRAZEG A A, et al. Three dimensional nonlinear temperature and structural analysis of roller compacted concrete dam [J]. CMES, 2009, 47(1):43-60.
- [57] KARTAL M E. Three-dimensional earthquake analysis of roller-compacted concrete dams [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(7):2369-2388.
- [58] ARICI Y, BINICI B, ALDEMIR A. Comparison of the expected damage patterns from two- and three-dimensional nonlinear dynamic analyses of a roller compacted concrete dam [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 10(3):305-315.
- [59] 李明超,张梦溪,沈扬,等. 高碾压混凝土重力坝分区材料-结构界面特性与变形协调仿真分析[J]. 水利学报, 2020, 51(1):3-13. (LI Mingchao, ZHANG Mengxi, SHEN Yang, et al. Deformation coordination simulation analysis of sectionalized material-structure interface properties of high RCC gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (1):3-13. (in Chinese))
- [60] 牛景太,魏博文,彭友文. 基于损伤理论的碾压混凝土坝层面影响带流变模型[J]. 水力发电, 2012, 38(8):44-47. (NIU Jingtai, WEI Bowen, PENG Youwen. Rheological model of RCC dam effecting zones based on damage mechanics [J]. Water Power, 2012, 38 (8):44-47. (in Chinese))
- [61] 王少伟,包腾飞,徐波. 裂缝影响下碾压混凝土拱坝整体安全度评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44 (4):1479-1486. (WANG Shaowei, BAO Tengfei, XU Bo. Global safety evaluation of RCC arch dam under cracks [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (4):1479-1486. (in Chinese))
- [62] 陈健云,王舒,徐强,等. 应用遗传算法搜索碾压混凝土坝滑动面的研究[J]. 水力发电, 2014, 40(3):34-36. (CHEN Jianyun, WANG Shu, XU Qiang, et al. Research on sliding surface of roller compacted concrete dams based on genetic algorithm [J]. Water Power, 2014, 40 (3):34-36. (in Chinese))
- [63] 苏培芳,汪卫明,何吉,等. 碾压混凝土重力坝全程综合仿真分析与安全评估[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1769-1774. (SU Peifang, WANG Weiming, HE Ji, et al. Integrated simulation and safety assessment for RCC gravity dam on rock foundation during whole process of construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (6):1769-1774. (in Chinese))
- [64] WANG X, LUO S Z, HU Y A, et al. High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24 (1):32-38.
- [65] YILMAZTURK S M, ARICI Y, BINICI B. Seismic assessment of a monolithic RCC gravity dam including three dimensional dam-foundation-reservoir interaction [J]. Engineering Structures, 2015, 100:137-148.
- [66] SHI B W, LI M C, SONG L G, et al. Deformation coordination analysis of CC-RCC combined dam structures under dynamic loads [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(2):162-170.
- [67] 肖珍珍,王登银,陈建叶,等. 碾压混凝土高拱坝坝肩稳定及坝体开裂静动力分析[J]. 岩土力学, 2015, 36 (12):3541-3575. (XIAO Zhenzhen, WANG Dengyin, CHEN Jianye, et al. Static and dynamic analyses of abutment stability and dam cracking of a roller-compacted concrete high-arch dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (12):3541-3575. (in Chinese))
- [68] 冯新,张宇,范哲,等. 考虑水平薄弱层的碾压混凝土拱坝振动台试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12):1493-1501. (FENG Xin, ZHANG Yu, FAN Zhe, et al. Experimental study on impact of horizontal weak layer on dynamic failure mechanism of roller compacted concrete arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (12):1493-1501. (in Chinese))
- [69] CHEN D H, YANG Z H, WANG M, et al. Seismic performance and failure modes of the Jin'anqiao Concrete Gravity Dam based on incremental dynamic analysis [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 100:227-244.
- [70] 钟登华,刘肖军,佟大威,等. 考虑施工质量影响的碾压混凝土坝地震动力响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47 (3):215-222. (ZHONG Denghua, LIU Xiaojun, TONG Dawei, et al. Study on seismic responses of RCC dams considering influences of construction quality [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3):215-222. (in Chinese))
- [71] 魏博文. 碾压混凝土坝服役性态及诊断方法研究[D]. 南京:河海大学, 2013.

(收稿日期:2020-03-04 编辑:骆超)