

碾压混凝土坝服役性能安全监控理论研究进展

魏博文¹, 吴海真², 李波³, 江桂荣⁴

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省水利厅, 江西 南昌 330009;
3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 4. 国家电投集团江西电力有限公司, 江西 南昌 330006)

摘要: 碾压混凝土坝逐层振捣碾压形成的诸多施工层面是坝体的薄弱环节, 注定其结构特性较常态混凝土坝更为复杂, 依托大坝原型观测资料分析大坝结构运行性态是保障碾压混凝土坝安全运行与服役寿命的重要技术手段。文中在概括碾压混凝土坝结构宏观细观力学行为、多场耦合数值仿真分析与变形监控模型等方面所开展科研工作的基础上, 论述了碾压混凝土坝工作性态安全监控理论和方法的现有研究成果, 并结合碾压混凝土坝服役性态探讨了当前研究的不足与亟待发展和完善的研究领域, 以期进一步完善碾压混凝土坝安全监控理论体系, 为碾压混凝土坝安全运行与健康服役提供理论依据与技术支持。

关键词: 碾压混凝土坝; 结构力学行为; 服役性能; 安全监控

中图分类号: TV642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2018)06-0419-06

0 引言

碾压混凝土坝作为世界筑坝技术发展的重要成果之一, 中国是其三十年来推广应用的主阵地, 目前无论是现役数量还是建造坝高均居世界之最, 其长效健康服役关系到整个水工程的安危, 已成为关乎国计民生、社会稳定的公共安全问题^[1,2]。随着大坝服役年限的增加, 坝体结构受筑坝材料性能演变与环境因素长期耦合作用, 不可避免地出现不同程度的老化及性能退化问题, 进而造成工程病险频现、结构抗力降低和失事风险增大, 严重影响大坝健康服役。

依托原型观测资料分析大坝运行性态是保障大坝健康服役的重要技术手段, 自20世纪50年代国外率先开展安全监控研究以来, 已形成了从宏观到细观精细模拟的较为成熟的大坝安全监控理论体系, 尤其是近年来, 伴随数据监测与计算机技术的不断发展, 水工结构安全监控理论研究更是取得了长足的发展^[3]。然而因碾压混凝土坝筑坝历史相对较短, 加之碾压混凝土材料与逐层振捣碾压筑坝技术的特殊性和复杂性, 碾压混凝土坝坝身存在诸多施工层面, 因此坝体结构性能分析模型与计算参数难以精确定义, 有关碾压混凝土坝安全监控研究仍存在不少亟待解决的技术问题^[4]。本文在阐述碾压混凝土坝宏观细观结构力学行为、多场耦合数值仿

真分析与变形监控模型等方面现有研究成果的基础上, 提出了一些碾压混凝土坝安全监控理论研究亟待解决的重要科学问题。

1 碾压混凝土结构跨尺度力学行为分析

混凝土坝系统是一种多相耦合系统, 从浇筑过程开始, 即处于复杂的化学-热-水力-力学耦合作用下, 混凝土坝结构性能演变与混凝土和坝基岩石材料的衰变密切相关^[5]。服役期碾压混凝土坝受静、动荷载与不确定环境因素协同作用, 驱动筑坝材料性能演化直接影响大坝结构运行效能。碾压混凝土坝逐层振捣碾压的施工工艺导致坝体存在诸多施工层面, 其作为碾压混凝土坝结构的薄弱环节, 直接关乎碾压混凝土坝服役性能的发挥。合理考虑施工层面对碾压混凝土坝体结构力学行为演化的影响是分析碾压混凝土坝运行效能的关键^[6]。

1.1 宏观力学行为研究

目前有关碾压混凝土结构宏观力学行为仿真研究可归纳为3种: 一是等效法, 利用变形等效的特点来模拟碾压混凝土坝在宏观上表现的各向异性性质, 但其概化层面影响的同时掩饰了层面的本质; 二是将层面单独考虑, 能一定程度上反映碾压混凝土坝的层面特性, 但这种分析方法对层面厚度及层面的计算参数一般难以

收稿日期: 2018-11-02

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(51779115, 51669013, 51569014, 51869011)。

作者简介: 魏博文(1981-), 男, 博士, 副教授。

确定;三是成层结构的分析方法,主要有界面元法、有限差分法和无限差分法,但在实际应用中存在难以确定计算参数和边界条件等问题。顾冲时^[7,8]等针对碾压混凝土坝施工层面对大坝变形产生显著影响的问题,先后建立了施工层面有厚度和无厚度分析模型,并基于碾压混凝土坝层面影响带的渐变特性,利用复合材料力学串联和并联理论,建立了碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型,提出了确定层面影响带瞬时弹性模量、延迟弹性模量以及粘性系数等方法,进而揭示了决定层面影响带特性的主要计算参数的渐变规律;笔者^[9,10]继承并发展了碾压混凝土坝层面影响带黏弹塑性流变模型,提出了碾压混凝土坝薄弱层与本体协调承载流变分析方法,给出了层面影响带厚度、弹性模量及黏性系数等计算参数的确定方法;黄光明^[11]等针对碾压混凝土坝粘弹性参数横观各向同性的特点,采用三参量固态模型来描述碾压混凝土坝力学流变特性,并结合实测资料反演获得了碾压混凝土坝段粘弹性参数;陈龙^[12]结合碾压混凝土坝的施工过程和压实机理,对碾压混凝土坝本体内部的力学参数进行了深入研究,指出碾压混凝土坝本体内部的力学参数沿层深呈指数衰减,并建立了碾压混凝土坝力学参数渐变分析模型,同时,将碾压混凝土坝整体看作横观各向同性体,建立碾压混凝土坝结构等效分析模型,通过建立等效力学参数和本体内渐变力学参数关系,揭示了碾压混凝土坝本体力学参数渐变规律;李波^[13]基于粘弹性流变本构,在研究碾压层弹性力学参数间相互关系和碾压混凝土坝并层龄期分析方法的基础上,综合考虑碾压混凝土的渐变特性,建立了碾压混凝土坝弹性力学参数和粘弹性力学参数渐变规律分析模型。然而,此类本构模型大多建立在宏观均匀介质假设这一基础之上,较少涉及大坝碾压混凝土材料的多相非均质特性,难以诠释真实混凝土内部先天或人为细观损伤及裂隙等缺陷。

1.2 宏观细观耦联分析

建立精细化模拟碾压混凝土坝工作特点的数值方法是有效诠释其结构特性的重要途径,也是架接从材料到结构、细观到宏观分析其服役性能的桥梁。为研究混凝土材料在细观尺度下复杂力学特征,国内外学者在混凝土细观力学试验、数值方法及混凝土结构变形力学响应的跨尺度模拟等方面收获了丰富的研究成果^[14-16]。即便细观力学模型在分析混凝土材料变形力学行为方面具备独到优势和重要价值,但将其直接应用于高混凝土坝仿真分析中尚无成功参考范例,受计算模型自由度庞大因素的制约,现有混凝土细观力学研究多以平面模型为主,三维模型也仅限于小尺寸构件的模拟;为此,将细观力学模型与宏观分析框架耦联共同分析,充分发挥两类模型的特点和优势,以实现混凝土材料和结构的宏观细观响应进行耦联分析,国内外学者发展了多种从细观到宏观模型的等效处理方法。唐欣薇^[17]结合位移渐进展开技术与有限单元法建立了多尺度框架下的平衡方程,对混凝土宏观等效弹性模量、泊松比等参数变化规律进行了研究;Nguyen^[18]发展了可考虑混凝土细观局部化连续损伤破裂-宏观非连续黏聚裂缝模型的多尺度耦联模型,并基于高效的并行算法实现,有效提高了混凝土结构实现细观连续-宏观非连续的多尺度耦联分析效率;吴中如^[4]亦从水工结构战略发展前沿,提出了高坝及病险大坝宏观、细观与纳观层面嵌套分析模型,微纳尺度分析法与随机疲劳理论等发展方向。目前有关写实描述混凝土坝服役性能的基础理论研究尚处于改进期,由于大坝监测仪器系统获得的结构性态信息可很好地反映其真实地质、施工、运行环境条件等因素影响,通过安全监测成果进行反馈并调整关键力学模型和参数,写实分析大坝系统多物理力学场空间分布特性,这一思路在坝工界已形成共识。

大坝物理参数的反演亦是其结构宏观细观耦联数值

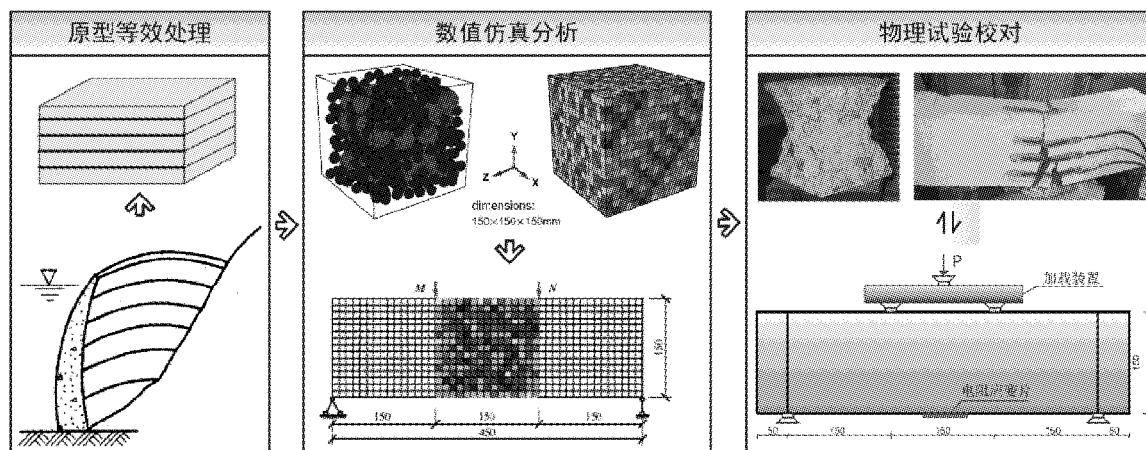


图1 碾压混凝土结构跨尺度性能仿真

分析的重要问题,黄耀英等^[19]基于变形监测资料建立了一种混凝土坝与基岩时变参数反演三步法,依次从力学机制上解析了龙羊峡重力拱坝拱冠梁在2 530 ~ 2 610 m高程的径向时效位移向上游变位的原因;康飞等^[20]运用混合单纯形人工蜂群算法,建立了一种基于不完全模态测试数据的混凝土坝动力材料参数识别的优化反演模型;顾冲时^[21]基于改进粒子群算法构建了坝体混凝土与基岩材料力学参数反演模型,并将其有效应用于实际工程分析;笔者^[22]利用GA-APSO混合罚函数构建了混凝土坝力学参数优化反演模型,并结合ANASY平台研制了相应程序。从现有的研究成果来看,目前尚无一种本构理论被公认为可以完全描述其材料力学特性,仍存在一定局限性,难以诠释碾压混凝土坝本体与层面的不同力学行为特征。由此可见,从碾压混凝土坝宏观力学性能演化机制角度,结合大坝结构真实服役特性,并综合应用试验、数值分析以及实测资料,发展基于宏观尺度耦联数值分析方法,建立一种诠释坝体结构跨尺度力学行为的仿真分析模型,如图1所示,对有效弥补现有方法中分析碾压混凝土坝运行效能演化规律的不足,实现大坝结构多尺度行为数值仿真具有一定工程实践意义。

2 大坝多场耦合数值分析

碾压混凝土坝逐层振捣碾压的施工工艺导致坝体存在诸多施工层面,其层面渗流特性对碾压混凝土坝运行安全影响重大。自20世纪70年代,Bellier^[23]和Witke^[24]在分析法国某拱坝失事成因时发现,在受载后坝基某些主要部位会出现应力集中现象,进而导致岩体初始渗流特性的改变,最终产生集中渗透压力引起拱坝失稳。据此,两人揭示了坝基渗流场与应力场相互作用是导致垮坝的主要原因。之后,国内外学者就渗流场与应力场耦合分析方法开展了大量研究,现阶段国内外对坝体渗流场与应力场相互作用研究主要集中在数值模拟分析方面,针对碾压混凝土坝层面渗流与应力耦合问题的系统性研究成果相对较少,大多是借以岩体裂隙渗流与应力耦合方法开展的。柴军瑞^[25]建立了基于离散裂隙网络的碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析数学模型,但该模型仅能体现水流在缝隙中的运动规律,未能揭示本体与层面的渗透交融特性;沈振中^[26,27]采用罚函数法处理渗流边界条件,推导了求解有自由面渗流问题的基本方程,并建立了基于无单元法的应力场与渗流场耦合分析模型;朱岳明等^[28]利用等效连续介质模型,将层面渗流量等效平摊到本体中,并将其理解为具有对称等效渗透张量的各向异性连续体,采用连续介质渗流理论进行分析研究,但由于水交替过程存在于碾压

混凝土坝层面系统与本体系统之间,该模型未考虑此过程,故难以保证渗透压力、流速等渗流特性的等效,亦未能表征碾压混凝土坝层面渗流真实状态;程正飞^[29]采用耦合VOF法建立了包含不同地层、不良地质体、帷幕、排水孔以及坝体的碾压混凝土坝三维统一模型,对其复杂自由渗流场较好地实施了数值模拟;李明超^[30]以某高碾压混凝土重力坝防渗结构为研究对象,提出了一种基于伽辽金法的渗控结构渗流数值模拟方法。然而这类模型在对渗流数值进行模拟时有两个技术难点,一是排水孔排水效果,二是带自由面渗流问题。通常其排水孔的处理采用排水子结构和杆单元等方法,自由面的处理采用固定网格法和变网格法等。顾冲时^[31]从碾压混凝土坝安全监控角度,在反演碾压混凝土坝本体及层面影响层的厚度、弹性模量等参数的基础上,建立了碾压混凝土坝渗流场与应力场两场耦合模型,但该模型未考虑结构劣化损伤效应,后同笔者^[10]就碾压混凝土坝层面渗流与变形相互作用问题,发展并提出了一种基于内时损伤的碾压混凝土坝流固耦合分析模型。从现有的研究成果来看,施工层面作为碾压混凝土坝防渗的薄弱部位,其本体与层面抗渗能力的差异决定了坝身是强渗透各向异性体,故层面渗流是研究碾压混凝土坝服役性态的关键,而目前对于两场耦合作用下碾压混凝土坝力学性能演化规律分析,大多基于粘弹性宏观力学模型开展的研究,难以量化服役期筑坝材料时变损伤特性。

3 变形监控模型理论研究

变形是大坝结构在外界环境因素与筑坝材料性能演变耦合作用驱动下最能直观可靠反映其运行性能的观测量,环境荷载与大坝变形间的映射关系如图2所示。依据大坝原型观测资料科学有效地建立大坝变形监控模型可较好地反映大坝结构演变特征,也可定量解读主要影响因素的作用和预测大坝运行情况,并依此对大坝服役性态进行判诊。国外于20世纪50年代率先开展了安全监控研究,但主要是对监测值做定性分析。1956年Tonini^[32]首次将水压、温度和时效3部分作为导致大坝位移变形的主要因子,并将水压因子和温度因子用三次多项式表示;随后Xerez^[33]等将气温作为温度因子,选取观测前不同天数的平均气温来分析坝高110 m的卡斯特罗拱坝;Rocha^[34]等将温度因子用大坝横断面各层的平均温度和温度梯度表示,水位因子则用函数式来表示。20世纪80年代以后,Pedro^[35]等、Purer^[36]等开展了更广领域深层次的发展研究,并取得了大量的研究成果^[37,38]。国内在大坝安全监控方面的研究工作开展相对较晚,20世纪70年代河海大学陈久宇教

授^[39,40]开始将统计回归分析法应用于大坝原型监测资料分析中,并在大坝安全监控模型方面开展了大量科研工作,详细地研究了混凝土坝位移统计模型、确定性模型和混合模型中水压、温度和时效等因子选择的基本原

理、方法和公式,并将其应用到工程实例中,取得了满意的效果。此后,在国内大量学者的不断探索和研究下,大坝安全监控模型取得了长足的发展,除了对传统监控模型进行改进外,许多新型模型也被不断提出。

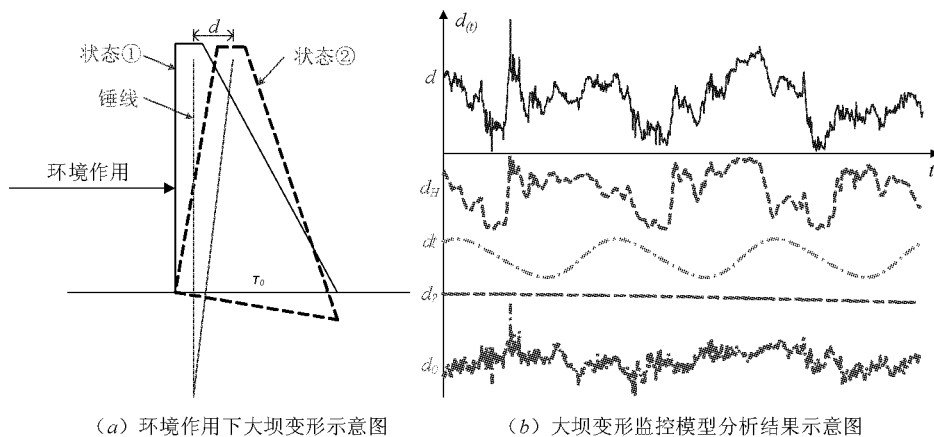


图2 大坝变形监控分析模型

Léger^[41]采用简化确定性模型描述大坝的温度变形,在校核模型参数的基础上,采用所建模型推演了极端天气下加拿大某混凝土重力坝的变形情况;顾冲时^[42,43]为解决大坝安全监控确定性模型、混合模型中水压分量数学模型易出现拐点病态问题,分析了其拐点病态的原因,提出了出现拐点病态的判据及相应处理方法;何金平^[44]针对单测点信息监测模型的缺点,提出了基于贝叶斯理论融合多测点信息的大坝安全监测模型;李占超^[45]综合运用 Bootstrap 法和偏最小二乘回归分析方法于大坝结构性态转异诊断中,建立了混凝土坝小样本安全监控模型;苏怀智^[6]综合运用 SVM 与贝叶斯理论,建立了考虑除险加固措施影响的重力坝位移监测统计模型;笔者^[22,46-48]先后结合混沌理论、蛙跳算法、时间序列分析等原理分析了变形监控模型残差序列混沌效应,建立了考虑残差混沌效应的变形监控模型。然而,当前有关变形监控研究存在套用常态混凝土坝变形分析理论与方法的问题,未能有效考虑碾压混凝土坝层面相对薄弱特性,已建的变形监控模型难以跟踪监控并反馈碾压混凝土坝的真实工作性态,尤其对层面性态量化分析难度较大。

4 发展趋势和亟待解决的问题

目前,在碾压混凝土坝服役期结构性能演变与安全监控分析模型方面取得了一些有益研究,并且部分成果已成功应用于碾压混凝土坝运行性态诊断工作中。但是,在碾压混凝土坝材料与结构性态演变机理方面的研

究仍处于探索阶段,其宏观性态安全监控理论存在套用常态混凝土坝分析手段的问题,未能较好地考虑碾压混凝土坝的结构特性,不能全面地诠释碾压混凝土坝的真实服役性态。因此,笔者认为就碾压混凝土坝服役性态监控理论可从以下几个方面进行进一步深入研究。

(1) 大坝混凝土材料及结构性能演化机制研究方面,服役期大坝受内外环境双重效应作用,环境因素主要通过驱动材料演化来影响大坝结构性态,坝体材料劣化又是大坝性能演变的重要因素,直接决定着混凝土坝的服役寿命。大坝混凝土性能演变对工程结构长效服役影响已达成共识,在其演变特征对混凝土坝性能影响方面研究也取得了一些有益结论,但目前尚未形成诠释水工混凝土内部破坏机理的理论,尤其有关反映碾压混凝土坝材料及结构力学性能跨尺度演化机制系统研究方面鲜有报导,而筑坝材料及层面薄弱带的性能劣化是服役期碾压混凝土坝运行效力降低的内在因素,分析其结构性能演变驱动机制又是建立碾压混凝土坝性能安全监控方法的基础。因此,有必要从材料宏观物理特性层面,综合考虑荷载与环境因素的影响,进一步研究典型因素对碾压混凝土坝运行效能演化作用及规律,据此深入分析多元合力下碾压混凝土坝服役性能演化规律。

(2) 坝体内部多场耦合行为数值仿真研究方面,现阶段国内外对坝体渗流场与应力场相互作用研究主要集中在数值模拟分析方面,而针对碾压混凝土坝层面渗流与应力耦合问题的系统性研究成果相对较少。施工层面作为碾压混凝土坝防渗的薄弱部位,其本体与层面

抗渗能力的差异决定了坝身是强渗透各向异性体,故层面渗流亦愈发成为研究碾压混凝土坝服役性态的关键问题之一,而对于两场耦合作用下碾压混凝土坝力学性能演化规律分析,以往大多都是基于粘弹性宏观力学模型开展的研究,难以量化服役期筑坝材料时变损伤特性。为此,有必要开展多力耦合作用下碾压混凝土坝力学性能宏细尺度演化仿真分析模型研究,为跟踪监控碾压混凝土坝服役性态提供科学依据。

(3)碾压混凝土坝工作性态安全监控方面,存在简单套用常态混凝土坝研究理论与方法的问题;而在有关融合坝体多类型监测信息并结合坝体材料和结构多尺度演化特性,开展碾压混凝土坝运行效力跟踪监控等方面的研究较少;且碾压混凝土坝力学参数、边界条件及结构和渗流分析的复杂性,在实际的安全监控模型构建方面仍有许多问题需要进一步研究。为此,利用来自不同监测类型和不同时空大坝多源信息,综合考虑碾压混凝土坝本体、施工层面及坝基等各部分的工作特点,并融合在役大坝多源时空监测信息,研究碾压混凝土坝运行效能演化状态的多源多尺度跟踪监控理论与方法是迫切亟需解决的关键技术问题。

5 结 语

开展碾压混凝土坝服役性态安全监控理论研究对保障大坝安全运行与充分发挥工程效益具有重要的科学价值和实用意义,伴随对碾压混凝土材料及结构性能研究的深入,专门针对碾压混凝土坝安全监控理论的研究也取得了有益的科研成果。但由于碾压混凝土坝建坝历程相对较短,碾压混凝土坝结构性能的研究尚处于起步阶段,合理科学诠释多力耦合作用下碾压混凝土宏观结构性能演变特征及驱动机制,并开展碾压混凝土坝服役效能演化状态的多源多尺度跟踪监控方法研究,对完善碾压混凝土坝安全监控理论体系、确保碾压混凝土坝长效服役和安全运行意义重大。

参考文献:

- [1] 顾冲时,苏怀智.混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):1~12.
- [2] 钟登华,王飞,吴斌平,等.从数字大坝到智慧大坝[J]. 水力发电学报,2015,34(10):1~13.
- [3] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [4] 吴中如,顾冲时,苏怀智,等.水工结构工程分析计算方法回眸与发展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):395~405.
- [5] 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.
- [6] Su H Z, Wen Z P, Sun X R, Yang M. Time-varying identification model for dam behavior considering structural reinforcement[J]. Structural Safety, 2015, 57: 1~7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 魏博文,徐镇凯,徐宝松.碾压混凝土坝层面影响带黏弹塑性流变模型[J]. 水利学报,2012,43(9):1097~1102.
- [10] Gu C S, Wei B W, Xu Z K, et al. Fluid-solid coupling model based on endochronic damage for roller compacted concrete dam[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11):3247~3255.
- [11] 黄光明,李云,顾冲时,等.碾压混凝土坝横观各向同性粘弹性参数反演[J]. 水利水运工程学报,2006(4):15~20.
- [12] 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]. 河海大学博士学位论文,2006.
- [13] 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]. 河海大学博士学位论文,2010.
- [14] 马怀发,陈厚群,吴建平,等.大坝混凝土三维细观力学数值模拟研究[J]. 计算力学学报,2008,25(2):241~247.
- [15] Van Mier J G M. Concrete fracture: a multiscale approach[M]. CRC press, 2012.
- [16] 张楚汉,唐欣薇,周元德,等.混凝土细观力学研究进展综述[J]. 水力发电学报,2015,34(12):1~18.
- [17] 唐欣薇,张楚汉.基于均匀化理论的混凝土宏细观力学特性研究[J]. 计算力学学报,2009,26(6):876~881.
- [18] Nguyen V P, Stroeven M, Sluys L J. Multiscale failure modeling of concrete: Micromechanical modeling, discontinuous homogenization and parallel computations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 201~204:139~156.
- [19] 黄耀英,黄光明,吴中如,等.基于变形监测资料的混凝土坝时变参数优化反演[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(21):2941~2945.
- [20] 康飞,李俊杰,许青.混合蜂群算法及其在混凝土坝动力材料参数反演中的应用[J]. 水利学报,2009,40(6):736~742.
- [21] 龚晓雯,顾冲时.基于改进粒子群算法的水口重力坝坝体参数反演[J]. 水电能源科学,2010,28(02):72~74+77.
- [22] 魏博文,徐镇凯,李火坤,等.基于GA-APSO混合罚模型的混凝土坝力学参数优化反演[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4211~4217.
- [23] Bellier J, Londe P. The Malpasset dam, engineering foundation[C]// Conf. Proc. the Evaluation of Dam Safety. 1976.
- [24] Wittke W, Leonards G A. Modified hypothesis for failure of Malpasset dam[J]. Engineering Geology EGGOAO, 1987, 24(1~4).
- [25] 柴军瑞,仵彦卿.碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J]. 水利学报,2000(9):33~36.
- [26] 沈振中,陈小虎,王金男.基于无单元法的应力场与渗流场耦合分析模型[J]. 水电能源科学,2007,25(4):61~63.
- [27] 沈振中,陈小虎,徐力群.重力坝应力-渗流相互作用的无单元耦合分析[J]. 岩土力学,2008,29(S1):78~82.
- [28] 朱岳明,黄文雄.碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合作用的研究[J]. 红水河,1997,16(3):1~8.
- [29] 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.
- [30] 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):1064~1070.
- [31] Gu C S, Su H Z, Zhou H. Study on coupling model of seepage field and stress field for RCCD[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005,

- 26(3):325~332.
- [32] Tonini D. Observed behavior of several leakier arch dams[J]. Journal of the Power Division, 1956, 82:1~26.
- [33] Xerez A., Lamas J. F. Methods of analysis of arch dam behavior[C]. VI Congress on Large Dams. New York, 1958.
- [34] Rocha M., et al. A Quantitative method for the interpretation of the results of the observation of dams[C]. VI Congress on Large Dams. New York, 1958.
- [35] Pedro J. O., et al. Stress evaluation in concrete dams, the example of verosa dam[C]. International Conference on Safety of Dams. Coimbra, 1984.
- [36] Purer E., Steiner N. Application of statistical methods in monitoring dam behavior[J]. International water power & dam construction, 1986, 38(12):33~35.
- [37] Gu Chongshi, Zhao Erfeng, Jin Yi, et al. Singular value diagnosis in dam safety monitoring effect values[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(5):1169~1176.
- [38] Spanggaard I, Snoj M, Cavalcanti A, et al. Gene Electrotransfer of Plasmid Antiangiogenic Metargidin Peptide(AMEP) in Disseminated Melanoma; Safety and Efficacy Results of a Phase I First-in-man Study[J]. Human Gene Therapy Clinical Development, 2013, 24(3):99~107.
- [39] 陈久宇. 应用实测位移资料研究刘家峡重力坝横缝的结构作用[J]. 水利学报, 1982(12):12~20.
- [40] 陈久宇. 观测数据的处理方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [41] Léger P, Seydou S. Seasonal thermal displacements of gravity dams located in northern regions[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(3):166~174.
- [42] 顾冲时, 汪亚超, 彭妍, 等. 大坝安全监控模型的病态问题及其处理方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(12):1574~1579.
- [43] 顾冲时, 苏怀智, 王少伟. 高混凝土坝长期变形特性计算模型及监控方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5):1~14.
- [44] He J P, Tu Y Y, Shi Y Q. Fusion Model of Multi Monitoring Points on Dam Based on Bayes Theory[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(11):2133~2138.
- [45] 李占超, 张慧莉, 刘兴阳, 等. 混凝土坝小样本安全监控模型研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(10):1043~1051.
- [46] 魏博文, 熊威, 李火坤, 等. 融合混沌残差的大坝位移蛙跳式组合预报模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2016, 41(9):1272~1278.
- [47] Wei B W, Yuan D Y, Li H K, et al. Combination forecast model for concrete dam displacement considering residual correction[J]. Structural Health Monitoring, 2017. DOI:147592171774860.
- [48] Wei B W, Yuan D Y, Xu Z K, et al. Modified hybrid forecast model considering chaotic residual errors for dam deformation[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2017. DOI:10.1002/stc.2188.

编辑: 张绍付

Research progress on service behavior safety monitoring model of roller compacted concrete dam

WEI Bowen¹, WU Haizhen², LI Bo³, JIANG Guirong⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangxi Provincial Department of Water Resources, Nanchang 330009, China;

3. Changjiang River Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

4. National Electric Investment Group Jiangxi Electric Power Co. LTD, Nanchang 330006, China)

Abstract: Numerous layers caused by the construction process of layer by layer compaction in the roller compacted concrete dams(RCCD)are the weak links of RCCD, which determines that the structural properties of RCCD are complicated than concrete dams. Analyzing the operational behavior of the dam structures based on dam prototype observation data is an important technological means to guarantee the safety operation and service life of RCCD. The scientific achievements about the current studies on the service behavior safety monitoring theories and methods of RCCD are discussed by summarizing the existing research results about structural mechanical behavior in macroscopic and microscopic scales, seepage coupling model and displacement monitoring model of RCCD. Based on the structural characteristics of RCC dam, the deficiency of the current studies and the research areas that need development and improvement are discussed, which can help to further deepen the safety monitoring theory of RCCD and to provide theoretical basis and technical support to guarantee the safety operation and healthy service of RCCD.

Key words: Roller compacted concrete dam(RCCD); Structural mechanical behavior; Service behavior; Safety monitoring

翻译: 魏博文