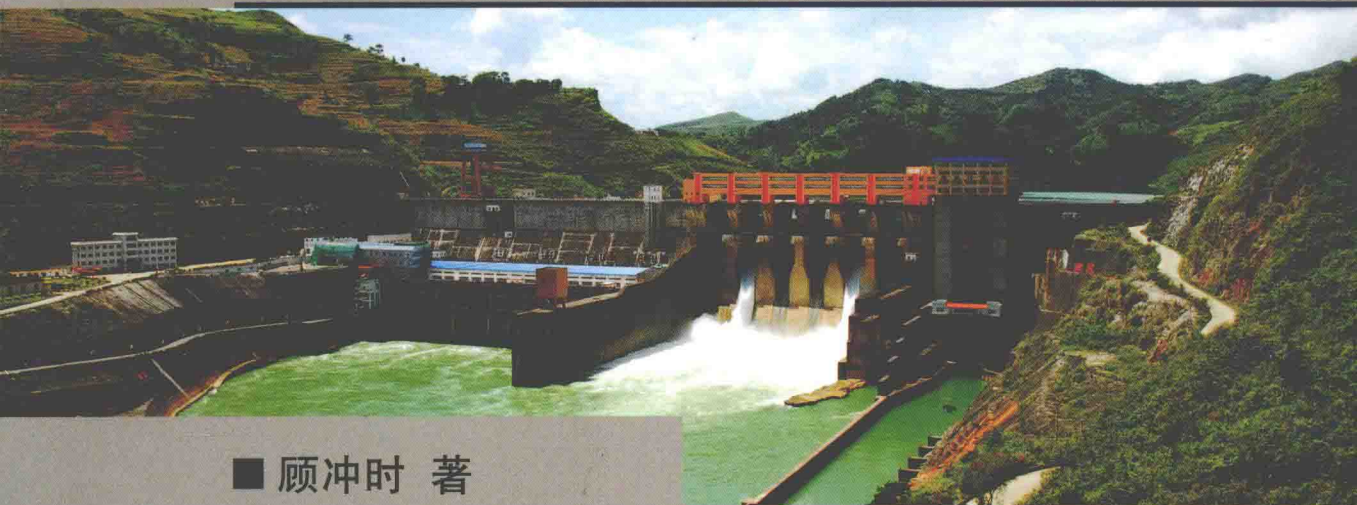




“十二五”
国家重点图书
出版规划项目

水利工程重大安全问题专题研究



■ 顾冲时 著

碾压混凝土坝安全诊断 与预警的理论和方法

Theories and Methods of Safety Diagnosis and
Early-warning for Roller Compacted Concrete Dams



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



“十二五”
国家重点图书
出版规划项目

水利工程重大安全问题专题研究



■ 顾冲时 著

碾压混凝土坝安全诊断 与预警的理论和方法

Theories and Methods of Safety Diagnosis and
Early-warning for Roller Compacted Concrete Dams



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书基于碾压混凝土坝原型监测资料和试验成果,系统地论述了碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法。全书共分七章,主要包括碾压混凝土坝安全诊断模型、安全诊断反分析理论和方法、安全诊断指标拟定与综合诊断理论和方法、安全预警系统等内容。

本书可作为从事水利水电工程、土木和建筑工程等领域内的设计、施工、管理和科研等工程技术人员的参考书;也可作为水利水电、土木和工程力学及其相近专业的本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法/顾冲
时著. —南京:河海大学出版社,2013. 2
ISBN 978-7-5630-3226-6

I. ①碾… II. ①顾… III. ①碾压土坝—混凝土
坝—安全技术 IV. ①TV642. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 271272 号

书 名 / 碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法

书 号 / ISBN 978-7-5630-3226-6/TV·337

著 者 / 顾冲时

责任编辑 / 王 平 魏 连

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

网 址 / <http://www.hhup.com>

照 排 / 南京凯建图文制作有限公司

印 刷 / 南京工大印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 20.5

字 数 / 484 千字

版 次 / 2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 100.00 元

序

顾冲时教授所著《碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法》一书即将由河海大学出版社出版,我有机会事前阅读原稿,实感荣幸。作者嘱我写序,我欣然同意。

碾压混凝土坝融合了常态混凝土坝的结构和施工等特点,是近 30 年采用并迅速推广的筑坝新技术。但由于碾压混凝土坝存在众多施工层面,其结构复杂,坝体内的施工层面往往是薄弱环节,对大坝的渗流、强度和稳定影响较大。与常态混凝土坝相比,碾压混凝土坝分析计算参数和计算模型等受不确定性因素影响较多,导致碾压混凝土坝的设计难以与工程实际相吻合,部分碾压混凝土坝出现裂缝、漏水等问题,这些问题影响大坝的安全运行,甚至让有些人怀疑到碾压混凝土坝的筑坝技术,引起国际坝工界的高度重视。目前,国内外对碾压混凝土坝的设计、施工等进行了较为深入的研究,但以原型监测资料和试验成果为基础,对大坝安全进行诊断和预警研究还不够深入,难以对某些碾压混凝土坝出现的病变现象作出合理解析,不能对大坝安全状况进行较为客观的评价。针对上述问题,作者近几年来结合多座碾压混凝土坝实际工程,以实测资料和试验成果为基础,对碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法进行了系统研究。本书是作者在悉心阅读了大量著作和科技论文并加以分析和总结后,融入了其本人最新研究成果的基础上写成的,对碾压混凝土坝的设计、施工和运行具有重要的参考价值。因此,本书兼具较高的学术水平和重要的参考价值。

我认为本书的特色表现在以下几个方面:

(1) 建立了综合考虑施工层面影响的施工期、蓄水期、运行期安全诊断模型和补强加固特殊诊断模型,并应用灰色系统、模糊数学、分形几何等先进的数学和力学理论及方法建立了预测模型和组合预测模型,构建了碾压混凝土坝完整的安全诊断模型体系。

(2) 提出了碾压混凝土坝层面变形的模拟方法,结合碾压混凝土坝的层面特性以及本体内参数的渐变分布规律,建立了碾压混凝土坝的计算模型、计算参数、计算工况、渗流影响、实际安全度等安全诊断的反分析理论和方法。

(3) 在深入研究碾压混凝土坝的力学行为和结构与渗流转异规律的基础上,建立了碾压混凝土坝安全监控标准,提出了用模糊数学、随机理论及结构分析方法拟定碾压混凝土坝安全诊断指标的理论和方法。

(4) 根据碾压混凝土坝原型监测资料和试验成果,研究了碾压混凝土坝层面性态安全综合诊断的理论,并从层面综合诊断的角度,构建了碾压混凝土坝综合诊断的指标体



系,提出了综合诊断方法。

(5) 提出和开发了由安全综合诊断推理机、工程数据库、方法库和图库组成的碾压混凝土坝安全预警系统。

(6) 具有很强的实用性,对主要内容列举了工程实例,而不是纯理论说教,对读者起到了示范作用,是一本典型的理论联系实际的著作。

欣喜之余,写了如上个人感受,谨以为序。

中国工程院院士 吴中如

2012年4月

前 言

碾压混凝土坝作为一种近 30 年来发展起来的新兴坝型,其筑坝材料和施工工艺与常态混凝土坝有较大差异,这决定了碾压混凝土坝结构特性比常态混凝土坝要复杂得多。同时,碾压混凝土坝逐层碾压的特性决定了施工层面的存在,这是该种坝型坝体结构的薄弱环节,对碾压混凝土坝的变形、渗流和应力都产生显著影响。正确合理地分析碾压混凝土坝的结构特性,并据此对碾压混凝土坝安全进行诊断和预警,是确保大坝安全运行和充分发挥工程效益的关键所在。尽管目前对影响碾压混凝土坝工程质量和安全运行等因素,如混凝土配合比、浇筑温度、碾压质量、施工工艺以及大坝养护等已有大量的分析和研究,并取得了一批有价值的研究成果,然而,由于影响大坝安全的不确定性因素较多,一些碾压混凝土坝出现裂缝、漏水等问题仍比较突出,这除了碾压混凝土坝筑坝历史相对较短外,更重要的原因在于碾压混凝土坝结构复杂,加之计算参数和计算模型的非确定性,导致碾压混凝土坝的设计难以做到完全与工程实际相吻合,有时甚至出现较大出入。针对上述情况,在国家科技支撑计划课题“基于风险的大坝安全评价技术开发”(2006BAC14B03)、“高坝深层抗滑稳定性评估技术”(2008BAB29B03)、“水利水电工程施工重大事故控制及应急救援关键技术”(2008BAB29B06)和河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室团队重点研究项目“水利工程病变机理与健康诊断”(2009586012)以及江苏省高等学校创新团队科研计划“水利工程健康诊断与综合整治”等资助下,结合龙滩、小湾、岩滩、沙牌等碾压混凝土坝工程,基于原位监测和室内外试验,开展了碾压混凝土坝安全诊断与预警分析理论和方法的研究。本书总结了我们在这方面的最新研究成果。

本书共七章,第一章概述了研究的目的和意义,提出了需要解决的关键科学技术问题,并对本书研究成果进行简要说明。第二章研究了碾压混凝土坝在施工期、蓄水期、运行期的结构性态变化规律,建立了综合考虑施工层面影响的多种碾压混凝土坝全过程安全诊断模型。第三章研究了碾压混凝土坝力学行为和大坝各部位位移之间的关系,建立了碾压混凝土坝安全诊断时空分布模型,提出了碾压混凝土坝应力场和渗流场耦合分析模型及补强加固特殊安全诊断模型。第四章研究了碾压混凝土坝物理力学参数空间渐变特性及其分析理论,提出了力学参数统一变换的方法,并对碾压混凝土坝的计算模型、计算参数、计算工况、渗流影响以及实际安全度等提出了安全诊断反分析的理论和方法。第五章在深入研究碾压混凝土坝的力学行为和结构与渗流转异规律的基础上,建立了碾压



混凝土坝安全监控标准,提出了用模糊数学、随机理论及结构分析法拟定碾压混凝土坝安全诊断指标的方法。第六章根据碾压混凝土坝的原位监测资料和试验成果,研究了碾压混凝土坝层面性态安全综合诊断的理论,并从层面综合诊断的角度,构建了碾压混凝土坝安全综合诊断的指标体系,提出了安全综合诊断方法。第七章研究了碾压混凝土坝安全预警系统的设计方法,构建了安全诊断信息融合模型,并综合应用现代先进的计算机技术、网络及通信技术,提出和开发了由安全综合诊断推理机、工程数据库、方法库和图库组成的碾压混凝土坝安全预警系统。

参加本书撰写的还有郑东健、苏怀智、包腾飞、吴相豪、陈龙、方海挺、彭友文、仲琳等同志。

本书承蒙中国工程院院士吴中如教授指导,并在百忙之中审阅和亲自作序,作者表示衷心感谢。

本书在编辑出版过程中,河海大学出版社的编辑提出了许多宝贵意见和建议,在此也向他们表示衷心感谢。

编 者

2012年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 研究的目的和意义	(1)
第二节 需要解决的关键科学技术问题	(2)
第三节 研究成果概述	(3)
第二章 碾压混凝土坝安全诊断模型	(10)
第一节 碾压混凝土坝变形分析模型	(10)
第二节 碾压混凝土坝渗流分析模型	(25)
第三节 碾压混凝土坝安全诊断统计模型	(30)
第四节 碾压混凝土坝安全诊断混合模型	(44)
第五节 碾压混凝土坝安全诊断确定性模型	(51)
第三章 碾压混凝土坝安全诊断广义模型	(64)
第一节 碾压混凝土坝安全诊断时空分布模型	(64)
第二节 碾压混凝土坝应力场和渗流场耦合分析模型	(85)
第三节 碾压混凝土坝补强加固特殊安全诊断模型	(96)
第四章 碾压混凝土坝安全诊断反分析理论和方法	(126)
第一节 碾压混凝土坝物理力学参数空间渐变特性分析理论和方法	(126)
第二节 碾压混凝土坝计算模型	(144)
第三节 碾压混凝土坝物理力学参数反演分析	(152)
第四节 碾压混凝土坝反馈分析	(191)
第五章 碾压混凝土坝安全诊断指标拟定理论和方法	(221)
第一节 碾压混凝土坝安全诊断指标的力学定义及拟定准则	(221)
第二节 碾压混凝土坝变形安全诊断指标的拟定方法	(229)
第三节 碾压混凝土坝渗流安全诊断指标	(241)



第六章 碾压混凝土坝安全综合诊断理论和方法·····	(247)
第一节 碾压混凝土坝层面性态安全标准·····	(247)
第二节 碾压混凝土坝层面性态综合诊断指标体系构建·····	(248)
第三节 碾压混凝土坝层面性态模糊安全综合诊断模型·····	(252)
第四节 碾压混凝土坝工作性态模糊物元综合诊断模型·····	(260)
第七章 碾压混凝土坝安全预警系统·····	(266)
第一节 概述·····	(266)
第二节 碾压混凝土坝安全预警系统的总体设计·····	(266)
第三节 碾压混凝土坝安全诊断信息融合模型构建·····	(271)
第四节 碾压混凝土坝安全预警系统的可视化·····	(281)
第五节 系统安全策略·····	(295)
第六节 系统开发实例·····	(305)
主要参考文献·····	(314)

第一章 绪 论

第一节 研究的目的和意义

大坝是国民经济的基础设施,其安全关系到国计民生,不仅受到各级政府的高度重视,而且已经成为公众关注的公共安全问题。碾压混凝土坝(Roller Compacted Concrete Dam,缩写为 RCCD)是近 30 年来采用的新筑坝技术,集中了常态混凝土坝的结构特性和碾压土石坝的施工特点。由于碾压混凝土坝具有节约大量水泥、简化施工工艺、施工速度快、工程造价低和及早发挥工程效益等优点,已得到迅速推广应用。至今已有 20 多个国家已建和在建了相当数量的碾压混凝土坝,其中我国有 40 多座,如我国龙滩碾压混凝土重力坝(坝高 216.5m)和沙牌碾压混凝土拱坝(坝高 132m),是世界上最高的碾压混凝土重力坝和拱坝。可以预料,随着西电东送和西部大开发带来的水资源的进一步开发利用,这种筑坝技术将得到推广。然而,在已运行的一部分碾压混凝土坝中出现了较多裂缝、漏水和溶蚀等现象,如加拿大的 Revelstoke、美国的 Dworshak 和中国的水东等碾压混凝土坝相继出现裂缝、漏水和溶蚀等病变征兆,直接影响大坝的安全运行。

目前,对影响碾压混凝土坝工程质量和安全运行的因素,如混凝土配合比、浇筑温度、碾压质量、施工工艺以及混凝土养护等已有大量分析和研究。然而,由于筑坝技术的特殊性,仍然存在不少技术问题亟待解决,这除了碾压混凝土筑坝历史相对较短外,最重要的原因在于碾压混凝土坝结构复杂,计算参数和计算模型等难以确定,使碾压混凝土坝的设计难以与工程实际相吻合。存在的问题主要有:① 层面结合质量及渗透问题。碾压混凝土坝的成层结构,无论从结构强度,还是从抗渗能力看,都是坝体中的薄弱面。我国某工程现场抗剪断试验表明,碾压混凝土层内黏结力为 1.6MPa,不作任何处理的层面黏结力只有 0.8MPa,仅为层内部黏结力的 50%;铺水泥砂浆层面黏结力可达到 1.25MPa,为内部黏结力的 78%。就目前碾压混凝土施工方法和工艺水平而言,碾压混凝土坝在宏观上不可避免成为渗透各向异性比最小达 1~2 个数量级的强渗透各向异性体。据龙滩和普定碾压混凝土坝现场压水试验结果,其渗透系数各向异性比平均达 3~4 个数量级。观音阁和柳溪两坝坝体的渗透系数各向异性比竟达 6~7 个数量级。② 碾压密实度和均匀性问题。碾压混凝土黏性低,在卸料和平仓时容易发生骨料分离现象。骨料粒径越大、骨料用量越多、胶凝材料用量越少,发生骨料分离的可能性越大。振动碾只能在碾压层表面振动碾压,不能像振捣器那样深入到混凝土内部进行扰动,使砂浆流入骨料空隙中,挤出气泡,所以骨料集中部位胶结效果较差。③ 横缝设置问题。随着碾压混凝土坝的规模增大,取消横缝,仅在低温季节施工的方式已不能适应。横缝合理间距的确定,应当在满足



防裂要求的前提下,采用尽可能大的间距以利于快速施工。④ 耐久性问题。低水泥用量与高粉煤灰用量使碾压混凝土初期强度低,后期强度高于常态混凝土。由于最早的碾压混凝土坝距今仅有 30 余年,所以对碾压混凝土强度的长期性能仍需进行研究。⑤ 碾压混凝土坝位移安全诊断模型和诊断指标问题。目前,对于常态混凝土坝的位移诊断模型和诊断指标已有一定的研究,并得到了较为广泛的实际工程应用。但如何基于碾压混凝土坝本体、施工层面及坝基等各部分的变形规律和本构关系,提出适合碾压混凝土坝的安全诊断模型和诊断指标的拟定方法仍有待进一步研究。

大量工程实践表明,综合应用理论分析、数值仿真、室内试验和现场原位监测等成果,开展碾压混凝土坝工作性态和病变机理研究,构建碾压混凝土坝安全诊断模型、诊断指标以及安全综合诊断体系,研发碾压混凝土坝安全在线评价及反馈分析系统,并由此监控碾压混凝土坝的安全运行以及反馈设计、施工等,可以有效保障工程的安全。目前,对于碾压混凝土坝安全诊断与预警研究方面存在简单套用常态混凝土坝的理论及研究方法的问题,如何针对碾压混凝土坝本体、施工层面及坝基等各部分的工作特点,提出适合碾压混凝土坝的安全诊断和预警的理论、方法是迫切需要解决的重大关键技术问题。

第二节 需要解决的关键科学技术问题

大坝和基础存在着诸多不确定因素,因此,原位监测与逆问题一直被坝工界列为研究重点。对于碾压混凝土坝而言,由于坝体结构的特殊性和复杂性(如坝体存在大量的层面),仅用有限的试验数据及常规的分析方法,显然难以获得满意的结果,往往出现计算结果与实际情况存在较大差异的情况。所以,迫切需要研究碾压混凝土坝的安全诊断与预警问题的分析理论和方法。一直以来,大坝安全诊断和预警研究主要针对常态混凝土坝,对碾压混凝土坝诊断与预警问题研究较少,结合原位监测资料的研究更少,缺乏较为理想的分析理论和方法,许多问题需进一步解决。

(1) 目前对碾压混凝土坝的层面结构所决定的力学特性和力学模型的研究往往从宏观角度采用等效处理方式,没有考虑碾压混凝土坝的压实机理以及由此引起的碾压层内力学参数在空间的渐变分布特性。因此,需要结合碾压混凝土坝的压实机理,建立碾压层内力学参数空间渐变分析模型以及数值分析理论和计算方法。

(2) 目前对碾压混凝土坝建立的统计模型或混合模型都是参考传统的混凝土坝,模型的效应量仅从宏观上体现碾压混凝土坝的层面效应,没有反映层面特性对效应量的贡献。因此,需要结合本体、施工层面及坝基等各部分的变化规律和本构关系,建立适合碾压混凝土坝的监控模型。

(3) 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,深入研究施工层面的变化性质及规律,提出层面不同阶段变形的模拟方法,建立施工层面分析模型。

(4) 层面特性决定了碾压混凝土坝是强渗透各向异性体,渗流具有显著的层面渗流行为,故渗流应力耦合问题尤为突出。因此,有必要结合参数的渐变特性开展应力场和渗流场耦合方面的研究。

(5) 层面问题是所有碾压混凝土坝问题产生的关键,对层面性态的评价有助于对碾



压混凝土坝的更深层的了解。因此,建立层面性态评判的指标体系及评判方法具有重要的现实意义。

(6) 变形诊断指标是监控大坝安全的重要指标。一方面,荷载方式或组合不同、作用时间不同,大坝将处于不同的力学状态。另一方面,计算参数的模糊性和随机性为变形的计算带来近似性。因此,应当结合碾压混凝土坝的特殊力学行为,根据不同荷载组合、不同受力状态、时效行为以及参数的模糊性和随机性,开展变形诊断指标拟定理论和方法方面的研究工作。

第三节 研究成果概述

针对碾压混凝土坝安全诊断与预警中的重大科学技术问题,从 1996 年开始,我们经过 10 多年的努力,在多项国家级、省部级科研项目以及多个重大水利水电工程委托项目资助下,从碾压混凝土坝薄层碾压、大仓面或整体浇筑,在施工期、蓄水期和运行期的不同特点出发,结合我国出现病变较多的典型碾压混凝土坝、已建或新建特高碾压混凝土坝,综合应用模型试验、现场监测以及理论与数值分析方法,系统研究了碾压混凝土坝安全诊断与预警理论、方法及工程实践,建立了一整套完整的碾压混凝土坝安全诊断正反分析和安全诊断指标拟定理论、方法以及大坝安全性态综合诊断体系;依据上述成果,借助先进的计算机软硬件技术、网络技术、通讯技术等,开发了碾压混凝土坝安全预警系统,由此对碾压混凝土坝作出全过程的安全诊断和预警,为工程的设计、施工及安全运行提供了源头的技术支持。上述成果已在多个实际工程中得到成功应用,取得了显著的社会经济效益。现将主要研究成果归纳如图 1-3-1 所示。

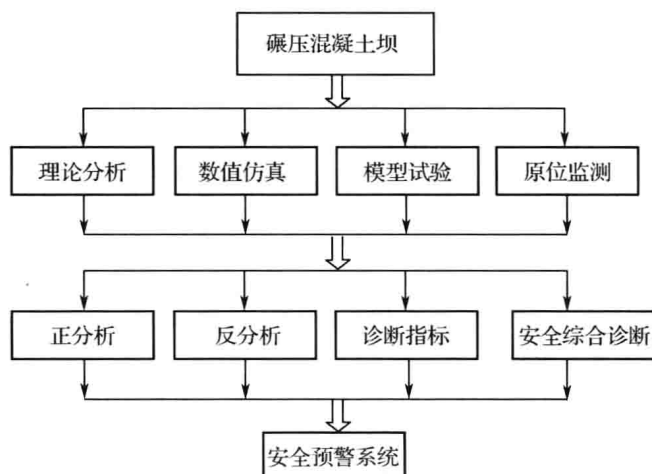


图 1-3-1 碾压混凝土坝安全诊断与预警理论和方法研究成果

一、碾压混凝土坝安全诊断分析模型

根据碾压混凝土坝的层面特性,结合碾压混凝土坝在施工期、蓄水期、运行期的结构性态变化规律,提出了综合考虑施工层面影响的多种碾压混凝土坝全过程安全诊断模型,



同时,针对参数渐变情况下的应力渗流耦合问题,提出了两场耦合分析模型。

1. 碾压混凝土坝变形分析模型

(1) 碾压混凝土坝施工层面变形分析模型。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,深入研究了施工层面的变化性质及规律,首次提出了层面不同阶段变形的模拟方法,建立了施工层面有厚度和无厚度分析模型,该模型能反映层面的弹性变形、衰减蠕变、不可逆变形以及加速蠕变等变形状态。

(2) 碾压混凝土坝的结构计算模型。根据碾压混凝土的结构特点,对碾压混凝土坝的结构计算模型进行了研究,综合考虑各碾压层之间的变形协调条件,建立了碾压混凝土坝整体、本体及层面相关参数的关系式,提出了等效弹性模型,研究了碾压混凝土本体和层面的屈服破坏准则,建立了多层结构弹塑性模型。

2. 碾压混凝土坝渗流分析模型

综合考虑碾压混凝土坝强渗透各向异性的特点,利用现代数学、力学方法与坝工理论,对碾压混凝土的渗流分析模型进行了研究,提出了能反映碾压混凝土层面渗流特性的碾压混凝土坝成层等效模型,建立了碾压混凝土坝广义等效渗透系数张量与碾压本体及碾压层面渗流特性的关系模型。同时,研究并提出了碾压混凝土坝渗流计算中自由面、溢出面及排水孔等问题的处理方法。

3. 碾压混凝土坝安全诊断统计模型

应用坝工理论和力学原理,对变形、应力应变、裂缝开度、扬压力和渗流量等各监测量的统计模型中的因子进行选择。然后,用多种统计数学方法(如逐步回归、加权回归、正交多项式回归和差值回归等),结合实测资料,建立了考虑碾压混凝土坝层面影响的安全诊断统计模型,据此分析、评价和监控碾压混凝土坝的工作性态。

4. 碾压混凝土坝安全诊断混合模型

根据碾压混凝土坝的层面特性,用平行于层面的综合弹性模量和垂直于层面的综合渗透系数描述本体的弹性模量和渗透系数,结合有限元计算和对监测资料系列的回归分析,建立了可以使本体和层面分量分离的变形混合模型和渗流混合模型。

(1) 碾压混凝土坝变形安全诊断混合模型。利用复合材料力学思想,系统地研究了碾压混凝土坝的本体和层面特性,提出了分离本体和层面作用效应的分析理论和模型。将碾压混凝土坝坝体位移分为两大部分:第一部分为基本(本体)分量,该部分位移由本体产生;第二部分为层面分量,该部分位移由层面产生。其中:水压本体分量和温度本体分量通过有限元计算,分别得到水位和温度与位移的拟合表达式;而水压层面分量、温度层面分量和时效分量则结合实测位移资料进行回归计算,从而构建碾压混凝土坝变形混合模型,实现了本体分量和层面分量的分离。

(2) 碾压混凝土坝渗流安全诊断混合模型。用横观各向同性的综合渗透系数描述本体的渗透系数,用渗流有限元计算得到本体的水压基本分量,然后通过对监测资料回归计算,得到层面分量,从而建立了渗流安全诊断混合模型,并将渗流模型中的层面分量从整体效应量中分离出来。

5. 碾压混凝土坝安全诊断确定性模型

研究了碾压混凝土坝的本体和层面的结构特点,分析了大坝在蓄水期、运行期的结构



性态变化规律,采用伯格模型、广义开尔文模型、萨瓦拉模型等黏弹性和黏弹塑性模型,以薄层单元模拟层面,运用有限元法计算水位分量、温度分量和时效分量,并结合实测资料,建立了坝体变形确定性模型。

6. 碾压混凝土坝安全预测预报模型

应用时间序列分析、灰色系统、模糊数学、小波理论、神经网络、遗传模拟退火算法、偏最小二乘法、混沌理论、分形几何等理论和方法对效应量的监测资料建立了预测模型和组合预测模型,并对工程结构的稳定性和安全度进行综合评估。

7. 碾压混凝土坝安全诊断时空分布模型

(1) 位移场安全诊断时空分布模型。研究了碾压混凝土坝力学行为,分析了大坝各部位位移之间的关系,基于场论和坝工理论,构建了具有明确物理意义的碾压混凝土坝位移场,提出了主要影响因素(水压、温度)和时效分量因子的时空表达式,建立了碾压混凝土坝位移场的统计、混合和确定性安全诊断时空分布模型。

(2) 温度场时空分布模型。基于热力学理论,在分析坝体温度场影响因素的基础上,构建了坝体温度场与水温、气温和水泥水化热之间的关系,并以坝体温度计(包括混凝土温度计,应力应变计和测缝计等处的温度计)的实测值为约束条件,应用形函数和有限元法建立了坝体温度场的时空分布模型。

8. 碾压混凝土坝应力场和渗流场耦合分析模型

研究了碾压混凝土坝的层面特性和结构与渗流计算参数的渐变规律,利用复合材料分析理论、模型试验和有限元分析方法,深入研究了碾压混凝土坝渗流场与应力场的相互影响机理,建立了碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析模型,并开发了耦合分析的程序。与此同时,为了进一步了解诊断模型中各分效应量(如水压和温度)对总效应量(如位移)的影响程度,在综合分析碾压混凝土坝工作性态的基础上,提出了贡献系数、贡献度等概念,并建立了相关计算公式。据此描述各主要影响因素对总效应量的作用,并对贡献程度的等级进行划分。

9. 碾压混凝土坝补强加固特殊诊断模型

针对补强加固后的碾压混凝土坝,其监测资料存在序列短、不连续等特性,应用灰色系统理论及人工神经网络方法,提出了基于补强加固后监测资料贫信息的大坝工作性态诊断模型;建立了补强加固大坝监测效应量的变异诊断模型,提出了对全系列监测数据进行基准校正的方法;基于 Heaviside 阶跃函数,建立了大坝监测效应量的自适应模型。

二、碾压混凝土坝安全诊断反分析理论和方法

由于设计参数(变形、热力学和渗流参数)、计算模型和计算方法(重力坝视为固端梁,用材料力学法计算应力;拱坝视为拱梁结构,用拱梁荷载分配法计算应力)、计算荷载工况(温度和扬压力等)、施工质量、地质条件和老化等不确定因素的影响,碾压混凝土坝设计的结构状态与实际有较大差距,需要利用监测资料进行反分析(包括反演分析和反馈分析),以校准计算参数、计算模型、荷载工况以及大坝与坝基的实际安全度等。为此,结合碾压混凝土坝施工过程、压实机理和层面特性等,系统研究并建立了碾压混凝土坝反分析理论和方法。



1. 碾压混凝土坝物理力学参数空间渐变特性分析理论和方法

在深入分析碾压混凝土坝的施工特性和层面特性的基础上,对碾压层内部力学参数在空间上的渐变分布特性进行了研究,取得了以下主要成果:

(1) 结合试验和现场资料,研究了由于振动碾激振力和振动加速度在碾压层内的不均匀传播而引起的力学参数在碾压层内的不均匀分布规律,揭示了力学参数在碾压层内的渐变机理。

(2) 将碾压层分成若干平行于层面的小层,研究了横观各向同性参数和各小层参数之间的转换理论和方法,提出了力学参数统一变换公式。

(3) 用指数分布描述碾压层内部弹性模量和渗透系数的变化,并计算分析了在不同的碾压层厚和不同的力学参数各向异性比情况下,各参数指数分布的具体形式和参数变化规律。

2. 碾压混凝土坝安全诊断计算模型反分析

结合碾压混凝土坝的层面特性以及本体内参数的渐变分布,建立了能模拟参数渐变的黏弹性位移场计算模型,提出了能模拟层面渗流和本体内渗透系数渐变的渗流场计算模型,在此基础上,反演分析了边界(计算范围及边界约束条件等)以及有限元位移模式和单元形态对位移和应力的影响等。

3. 碾压混凝土坝物理力学参数反演分析

(1) 热力学参数反演分析。利用受气温影响显著的坝体下游表面埋设的温度计测值,提出了反演混凝土热力学参数(导温系数、导热系数、表面放热系数、混凝土绝热温升等)的方法。

(2) 蠕变参数反演分析。考虑坝体混凝土分层碾压加载以及变温荷载等各种情况及其组合情况,提出了反分析坝体混凝土蠕变度的可变容差法优化技术,并编制了相应的分析程序。

(3) 碾压混凝土坝力学参数渐变特性反演分析。应用混沌遗传算法对碾压混凝土坝的横观各向同性参数和渐变参数进行了反演,验证了参数渐变模型的合理性和正确性,同时,得到了碾压混凝土坝的弹性模量、渗透系数等参数在碾压层内的分布规律。

(4) 碾压混凝土坝等效物理力学参数反演分析。为减小层面性态分析计算量,简化有限元分析模型,利用变形等效原理,建立了能反映层面对坝体弹性模量综合影响的等效弹性模量、泊松比和剪切模量的分析模型。结合有限元分析,提出了反演坝体等效横向和竖向弹性模量的方法;通过对层面细观应力的分析,提出了反映层面影响的等效横向和竖向温度线膨胀系数确定方法,并基于实测变形资料,利用统计模型和确定性模型,给出了反演碾压混凝土温度线膨胀系数的方法。

4. 碾压混凝土坝反馈分析

融汇监控模型和反演分析的成果,通过计算力学的分析计算和演绎,从中寻找大坝和坝基的某些新规律和信息,及时反馈到设计、施工和运行中,从而优化设计、施工和运行,并完善和发展现行水工设计和施工规范。主要包括:计算工况、渗流、实际安全度的反馈分析等。

(1) 计算工况的反馈分析。针对裂缝是碾压混凝土坝病变的主要响应,用断裂力学、



分形理论等数学力学方法,解析了碾压混凝土坝裂缝产生的成因和失稳机理,提出了控制裂缝失稳的预测方程和临界荷载图。

(2) 渗流影响的反馈分析。利用提出的碾压混凝土坝层面结构渐变特性分析模型以及层面渗流渐变特性分析模型,研究了碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合的力学行为,提出了碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合的反馈分析模型,并编制了多自由度耦合计算程序。

(3) 实际安全度的反馈分析。基于监测资料,提出了强度、抗裂和稳定的可靠度分析方法,分析了大坝的实际安全度。

三、碾压混凝土坝安全诊断指标拟定理论和方法

在对碾压混凝土坝变形、应力、渗流转异特征进行系统研究的基础上,给出了碾压混凝土坝安全诊断指标的力学定义,并建立了相应的定量指标,在此基础上,提出了碾压混凝土坝变形和渗流安全的诊断指标拟定方法。

1. 碾压混凝土坝安全诊断指标的力学定义及拟定准则

(1) 碾压混凝土坝变形安全诊断指标。根据碾压混凝土重力坝失稳破坏形式,用建基面屈服率的转异特征描述了线弹性、屈服变形和失稳破坏等变化状态,并定义了相应的三级变形安全诊断指标。根据碾压混凝土拱坝的失稳破坏形式,分别用线弹性及准线弹性工作阶段、屈服变形阶段和失稳破坏阶段描述了拱坝的渐进破坏过程,并定义了相应的三级变形安全诊断指标。

(2) 碾压混凝土坝渗流安全诊断指标。结合碾压混凝土坝的渗流特性,以碾压混凝土坝坝体应力与渗透系数的关系式为基础,给出了碾压混凝土坝渗流安全诊断指标的力学定义和拟定准则。

2. 碾压混凝土坝安全诊断指标的拟定方法

(1) 碾压混凝土坝变形安全诊断指标。

① 结合位移安全诊断指标的力学定义和拟定准则,提出了结构分析法拟定位移安全诊断指标的理论和方法,并针对力学参数和外荷载的模糊性,定义了模糊安全诊断指标,研究并提出了模糊安全诊断指标拟定方法。

② 基于力学参数和外荷载的随机性,定义了随机安全诊断指标,系统研究了随机安全诊断指标的拟定原理,提出了基于蒙特卡罗随机有限元法拟定碾压混凝土坝变形安全随机诊断指标的方法。

(2) 碾压混凝土坝渗流安全诊断指标。在深入研究碾压混凝土坝渗流特性的基础上,基于提出的碾压混凝土坝空间渗流诊断模型,提出了用置信区间法拟定碾压混凝土坝渗流安全诊断指标的原理和方法。

四、碾压混凝土坝安全综合诊断理论和方法

在对碾压混凝土坝层面性态诊断因素进行深入分析的基础上,根据碾压混凝土的试验结果和监测资料,研究了碾压混凝土坝层面性态安全诊断理论,从层面综合诊断的角度,构建了碾压混凝土坝综合诊断的指标体系和综合诊断方法。



(1) 利用层面参数与本体参数的比值,以及平行于层面方向的综合参数与垂直于层面方向的综合参数的比值作为综合诊断指标,建立了层面性态诊断指标,根据这些指标以及能体现层面特性的实测资料和试验资料,建立了碾压混凝土坝层面性态综合诊断结构图,见图 1-3-2 所示。

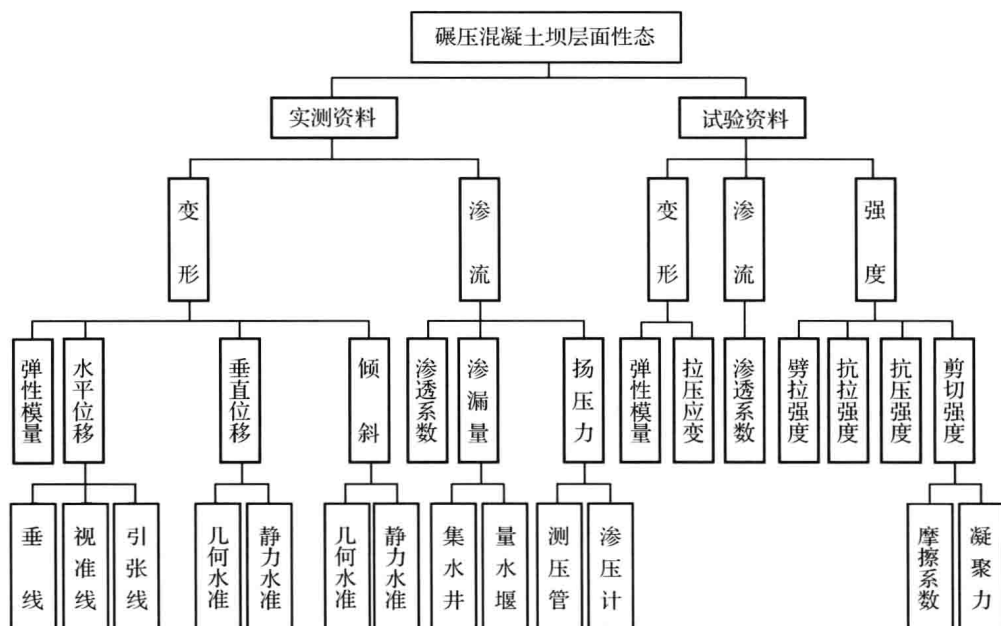


图 1-3-2 碾压混凝土坝层面性态综合诊断结构图

(2) 根据层面性态划分方式及诊断标准的不同,分别采取百分比形式和五个等级描述层面性态的优劣,同时,根据统计模型和试验结果,确定了影响层面性态的各因素的等级划分标准。

(3) 建立了碾压混凝土坝层面性态诊断的模糊综合诊断模型和模糊物元模型,研究并提出了各影响因素权重的确定方法,建立了碾压混凝土坝安全综合诊断模型和方法。

五、碾压混凝土坝安全预警系统

应用现代先进的计算机技术、网络及通讯技术,集成上述有关碾压混凝土坝安全诊断正反分析、安全诊断指标、综合诊断等成果,研发了由安全综合诊断推理库、工程数据库、方法库和图库组成的碾压混凝土坝安全预警系统。

本系统中各库的功能如下:

1. 安全综合诊断推理库

按其功能分“在线安全诊断”和“反馈分析”。其中,“在线安全诊断”主要依据实测资料及其正反分析成果与专家知识,用时空分布评判、力学规律评判、安全诊断模型评判、安全诊断指标评判、日常巡查评判、关键问题评判等六大评判准则分别对变形、渗流和应力应变等监测资料进行评价,并对各准则及监测量进行权重分析,找出异常测值。“反馈分