

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

李波 梁蔚 杨胜梅 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

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

李 波 梁 蔚 杨胜梅 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

碾压混凝土坝作为一种近几十年来快速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的差异,正确合理地分析碾压混凝土坝的结构特性,并进一步分析碾压混凝土坝层面的安全性态是非常必要的。本书主要研究了碾压混凝土坝力学参数渐变规律,建立了碾压混凝土坝层面失稳安全系数的评价标准,构建了碾压混凝土坝层面性态综合评价模型。本书研究内容为进一步了解碾压混凝土坝的结构特性,更深入地评价碾压混凝土坝的安全性态提供了科学依据,不仅具有较高的理论价值,更具有广泛的应用价值。

图书在版编目(CIP)数据

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/李波等著. —南京:河海大学出版社,2017. 11

ISBN 978-7-5630-5143-4

I. ①碾… II. ①李… III. ①碾压土坝—混凝土坝—
工程力学—参数—研究 IV. ①TV642. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 294015 号

- | | |
|------|--|
| 书 名 | 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 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5630-5143-4 |
| 责任编辑 | 代江滨 金 怡 |
| 封面设计 | 张世立 |
| 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) |
| 经 销 | 江苏省新华发行集团有限公司 |
| 排 版 | 南京新翰博图文制作有限公司 |
| 印 刷 | 虎彩印艺股份有限公司 |
| 开 本 | 700 毫米×1000 毫米 1/16 |
| 印 张 | 9.25 |
| 字 数 | 181 千字 |
| 版 次 | 2017 年 11 月第 1 版 |
| 印 次 | 2017 年 11 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 48.00 元 |

前 言

碾压混凝土坝作为一种近几十年来快速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的差异,这决定了碾压混凝土坝结构特性比常规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,这是坝体结构的薄弱环节,对碾压混凝土坝的变形、渗流和应力等都产生较大的影响。正确合理地分析碾压混凝土坝的结构特性,并进一步分析碾压混凝土坝层面的安全性态是非常必要的。目前,国内外虽然有不少专家和学者对碾压混凝土坝的力学特性、层面抗滑稳定、层面性态综合评价等方面做了一些研究,但是尚处于初步探索阶段。本书应用复合材料的串并联模型、并层算法、均匀设计法、最小二乘支持向量机、偏最小二乘回归法、粒子群算法、最大熵原理以及云模型等方法,对碾压混凝土坝力学参数渐变规律、并层等效力学参数与渐变参数、层面抗滑稳定以及层面性态综合评价方法等进行了较为系统的研究。

本书主要内容如下。

第一章介绍研究的目的是意义,分析国内外研究进展,提出需研究的问题和本书主要研究内容。

第二章研究碾压混凝土坝本体及层面影响带力学参数空间渐变规律,阐述了碾压混凝土坝并层龄期分析方法,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。

第三章建立碾压混凝土坝并层等效弹性和黏弹性模型,研究碾压混凝土坝并层等效力学参数反分析方法,提出了碾压混凝土坝弹性和黏弹性渐变参数分析方法。

第四章研究碾压混凝土坝多层结构模型,总结了碾压混凝土坝层面抗滑稳定分析方法和失稳判据,提出层面力学参数对碾压混凝土坝稳定性的多因素敏感性分析法,并建立了碾压混凝土坝层面失稳安全系数的评价标准。

第五章构建碾压混凝土坝层面性态评价指标体系,提出了碾压混凝土坝层面性态评价指标的评价等级、评价标准和度量方法;构建碾压混凝土坝监控模型,研究碾压混凝土坝层面性态评价指标的赋权方法,建立了碾压混凝土坝层面性态多层次云模型综合评价模型。

第六章总结全文,提出尚需进一步研究的问题。

本书参考和引用了大量国内外专家和学者的相关研究成果,在此一并表示感谢!由于作者水平有限,书中难免存在缺点甚至错误,诚挚欢迎读者批评指正。作者特别感谢顾冲时教授、吴中如院士、郑东健教授、苏怀智教授、包腾飞教授、周兰庭副教授对本书提出的宝贵意见,并感谢雷鹏、郭航忠、景继、谷艳昌、吴海真、何鲜峰、金永强、朱赵辉、娄一青、李子阳、张治军、王志军、蒋裕丰、汪亚超、彭妍、张磊、虞鸿、赵二峰、徐宝松、霍中艳、杨阳、李占超、骆进军、武金坤、齐艳杰、顾艳玲、李靖、远近、胡江、陈宇清、李立辉、薛凌峰、雷霆、储冬冬给予本书的大力支持。

作 者

2017年10月24日于武汉

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究进展	4
1.3 问题的提出	12
1.4 主要研究内容	13
第二章 碾压混凝土坝力学参数渐变规律分析	15
2.1 概述	15
2.2 碾压混凝土坝本体及层面影响带力学参数空间渐变规律	15
2.3 碾压混凝土坝弹性力学参数渐变规律分析模型	25
2.4 碾压混凝土坝黏弹性力学参数渐变规律分析模型	34
2.5 小结	38
第三章 碾压混凝土坝并层等效力学参数与渐变参数的分析方法	39
3.1 概述	39
3.2 碾压混凝土坝并层等效模型的建立	39
3.3 碾压混凝土坝并层等效力学参数的反分析	45
3.4 碾压混凝土坝渐变参数分析	53
3.5 算例	56
3.6 小结	62
第四章 碾压混凝土坝层面抗滑稳定分析	64
4.1 概述	64
4.2 碾压混凝土坝多层结构模型	64
4.3 碾压混凝土坝层面抗滑稳定分析方法和失稳判据	71
4.4 层面力学参数对稳定性的敏感性分析方法	79
4.5 碾压混凝土坝层面安全系数的评价标准分析	84

4.6	算例	88
4.7	小结	91
第五章	碾压混凝土坝层面性态综合评价方法	93
5.1	概述	93
5.2	层面性态评价指标体系	93
5.3	评价指标的评价等级、标准及度量方法	102
5.4	碾压混凝土坝监控模型的建立	108
5.5	层面性态评价指标权重的研究	111
5.6	层面性态多层次云模型综合评价	119
5.7	算例	126
5.8	小结	127
第六章	总结与展望	129
6.1	总结	129
6.2	展望	130
	参考文献	132

第一章

绪 论

1.1 研究的目的是意义

1.1.1 研究的背景

碾压混凝土坝具有混凝土坝体积小、强度高、防渗性好等特点,又具有土石坝施工简单、快速的优点,自问世以来,碾压混凝土筑坝技术引起了各国工程师的广泛兴趣。碾压混凝土筑坝始于 20 世纪 70 年代,1970 年美国加州大学伯克利分校的 Raphael 教授在《最优重力坝》一文中建议将土石坝碾压施工法引入到混凝土坝中,以提高施工速度和节省水泥用量;1970 年第十届国际大坝会议上 Paton 教授提出“重力坝内部用干硬性混凝土构筑,就能修筑经济型的大坝”。他们提出了碾压混凝土筑坝的概念^[1]。1978 年以前,碾压混凝土技术只用于像围堰这样的临时性工程和结构的修复上。1978 年 9 月,日本将碾压混凝土施工首次应用于岛地川(Shimajigawa)大坝(坝高 90 m,体积 31.7 万 m³)的主体施工,于 1980 年建成世界上第一座碾压混凝土重力坝。1982 年,美国陆军工程师兵团建成了世界上第一座全碾压混凝土坝——柳溪(Willow Creek)大坝(高 52 m,体积 33 万 m³)。近几十年来,碾压混凝土筑坝技术在全世界范围内迅速推广。

碾压混凝土筑坝技术一经出现,很快引起我国坝工界的重视。早在 1979 年初水电部邀请了部分设计、科研、施工单位和高校专家就引进和发展碾压混凝土筑坝技术进行了专题座谈,并从 1980 年开始进行碾压混凝土坝设计、施工和混凝土材料等方面的研究。1981 年至 1984 年在龚嘴、厦门机场、沙溪口、铜街子、葛洲坝等工地进行了一系列碾压混凝土试验。1984 年 9 月国家计委批准将“福建坑口水电站碾压混凝土筑坝技术”列为国家工业性试验项目。1985 年 11 月我国第一座碾压混凝土坝——福建坑口重力坝开工,该坝不分缝、全断面薄层碾压,采用高掺粉煤灰、低水泥用量的混凝土低温铺筑、连续浇筑上升,沥青砂浆作防渗。1986 年 5 月坑口电站建成,这标志着我国碾压混凝土筑坝技术从试验研究阶段走向应用阶

段。坑口大坝的经验在国内很快引起反响,并被积极推广应用^[2-10]。目前我国已建碾压混凝土坝数量和规模均居世界首位。表 1.1.1 为我国部分已建碾压混凝土坝(坝高 100 m 以上)统计表。我国广西红水河的碾压混凝土坝——龙滩大坝(坝高 216.5 m)是目前世界最高的碾压混凝土重力坝,这标志着我国的碾压混凝土坝建设达到了新的水平。

表 1.1.1 我国部分已建碾压混凝土坝(坝高 100 m 以上)统计表

序号	坝名	坝型	坝高(m)	地点	完成年份
01	岩滩	重力坝	110.0	广西大化	1992
02	江垭	重力坝	131.0	湖南慈利	1999
03	棉花滩	重力坝	111.0	福建永定	2001
04	大朝山	重力坝	111.0	云南云县	2001
05	沙牌	拱坝	132.0	四川汶县	2001
06	石门子	拱坝	109.0	新疆玛纳斯	2003
07	索风营	重力坝	115.8	贵州遵义	2005
08	招徕河	拱坝	107.0	湖北长阳	2005
09	百色	重力坝	130.0	广西百色	2006
10	大花水	拱坝	134.5	贵州	2007
11	武都	重力坝	130.0	四川	2008
12	戈兰滩	重力坝	113.0	云南思茅	2008
13	洪口	重力坝	130.0	福建宁德	2008
14	光照	重力坝	200.5	贵州关岭	2008
15	彭水	重力坝	116.5	重庆	2009
16	龙滩	重力坝	216.5	广西天峨	2009
17	景洪	重力坝	108.0	云南景洪	2009
18	思林	重力坝	117.0	贵州思南	2009
19	金安桥	重力坝	160.0	云南丽江	2011
20	白莲崖	拱坝	102.0	安徽霍山	2011
21	官地	重力坝	168.0	四川西昌	2013

尽管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做了大量分析和研究,然而,由于不确定性因素较多,一些碾压混凝土坝出现的裂缝、漏水等问题仍比较突出。这除了因为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本身结构比较复杂,加之计算参数、计算模型等还难以确定,使目前碾压混凝土坝的设计难以做到完全与工程实际相吻合,有时甚至出现较大的出入。因此,以原型监测资料为基础,进行碾压混凝土坝结构计算以及研究碾压混凝土坝综合评价方法是非常必要的。这一方面可以更好地评价已建大坝的安全度,验证设计理论;另一方面可以优化在建大坝设计、施工。

1.1.2 研究的目的是和意义

经过三十多年的发展,碾压混凝土筑坝技术取得了长足的进步,但是碾压混凝土坝在结构、稳定等方面都存在一定的问題。碾压混凝土坝碾压施工过程,决定了碾压层的密实度不同,由此引起碾压层本体和层面内的相关力学参数从上到下呈递减或递增变化,同时,各碾压层的力学参数随碾压混凝土的龄期而渐变,因此,碾压混凝土坝力学参数渐变规律值得深入研究。由于碾压混凝土坝的碾压层较多,如果进行精确的模拟,计算量将非常巨大,甚至有时无法实现,因此,有必要在尽量减少计算误差的基础上建立一种新的等效模型,并通过先进的方法,对设定的等效力学参数进行反分析,求解出各等效力学参数,并进一步求解出渐变参数。此外,碾压混凝土的层层碾压决定了层面是碾压混凝土坝的薄弱环节,因此,碾压混凝土坝层面抗滑稳定性以及层面性态的综合评价也亟待深入研究。本书研究的目的是和意义概括如下。

(1) 建立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,为分析碾压混凝土坝的弹性和黏弹性力学参数渐变规律提供依据。

(2) 建立碾压混凝土坝并层等效模型,进一步通过碾压混凝土坝并层等效力学参数的反分析,得到各并层体的等效力学参数,并进一步求解,最终得到各弹性和黏弹性渐变参数,这有利于对碾压混凝土坝的结构特性进行更深入的研究。

(3) 研究碾压混凝土坝层面抗滑稳定分析方法和失稳判据,深入探讨层面力学参数对层面稳定性的影响,并确定碾压混凝土坝层面失稳安全系数标准,为碾压混凝土坝层面抗滑稳定分析提供科学依据。

(4) 研究层面性态评价指标体系、监控模型、评价指标度量、评价权重以及评价方法等,综合评价碾压混凝土坝层面性态,为判断层面性态质量的好坏提供科学依据。

综上所述,开展碾压混凝土坝力学参数渐变规律和层面综合分析方法的研究,可以进一步了解碾压混凝土坝的结构特性,更深入地评价碾压混凝土坝的安全性态,为碾压混凝土坝的设计、施工以及运行提供科学依据,不仅具有较高的理论价值,更具有广泛的应用价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 碾压混凝土坝的结构分析方法

国内外对碾压混凝土坝变形和应力等结构特性进行了大量的分析,简单的方法是不考虑碾压混凝土坝层面的存在,直接套用常规混凝土坝的数值模拟方法^[11-14]。但是,碾压混凝土坝由于在筑坝过程中层层碾压,碾压层之间会出现一系列的施工层面,与碾压层的本体相比,层面的力学性质存在较大的差异,因此,在分析碾压混凝土坝结构特性时,应考虑层面对整个坝体性质的影响,需将本体和层面分开考虑,才能较为客观地反映整个大坝的变化规律。

碾压混凝土坝的分层施工特点决定了碾压混凝土坝有几十甚至几百个碾压层,对这种层状结构的数值模拟,可以根据实际的碾压过程,利用有限单元法把结构离散成许多单元^[15-16],这种方法在理论上是可行的,但是,在实际操作中工作量巨大,有时很难实现。根据实际的可操作性,目前,可以应用于碾压混凝土坝结构特性的数值模拟方法归纳起来主要有:等效连续模型法、非均匀单元法、非均匀层合单元法、浮动网格法和并层算法等。

等效连续模型法是一种处理多层材料的方法,其思想是把多层材料等效为一种材料进行结构分析。刘光廷等根据等效模量理论提出了一种均质横观各向同性体等效连续模型,根据等效连续模型计算的宏观位移场再进一步进行局部夹层应力计算^[17]。该模型精度较高,且方法简单,工作量大大减少。在此基础上,王宗敏等根据变形等效的基本原理,将碾压混凝土的层面采用无厚度的节理单元进行模拟,改进了上述模型,导出了一个新的等效连续本构模型,并给出了碾压混凝土层间真实应力的估算式^[18]。刘海成等根据能量等效原理,把层状结构体转换为横观各向同性体,建立了一个连续等效模型,根据等效模型的计算结果进一步计算本体和夹层之间的应力、应变,使得计算工作量大大减少^[19]。常晓林等根据变形和应力连续条件,提出将碾压混凝土本体和层面叠合成块体单元,只需对某些关键部位(建基面、不同材料分区界面等)布设节理单元^[20]。柯敏勇等利用复合材料力学中的串并联模型,建立了碾压混凝土拱坝等效连续模型,并采用压扁单

元和等效连续模型相结合来模拟碾压混凝土坝坝体、层面和基岩,并用分散式裂缝模型模拟坝体开裂状态^[21]。周兰庭等针对碾压混凝土坝本体及层面影响带计算参数对变形影响的问题,运用敏感性分析原理对某碾压混凝土坝变形主要计算参数进行敏感性分析^[22]。等效连续模型法能够加大计算网格的尺寸,提高计算效率,但是该模型把多个碾压层等效成一种材料,忽略了单元内各碾压层之间材料属性的差异性,弱化了层面对坝体结构的影响,会造成一定程度的计算误差。

王建江等根据碾压混凝土坝的施工特点,考虑碾压层与混凝土龄期相关的弹性模量非均匀性,以及层面对结构受力变形的影响,提出了非均匀单元法^[23]。该方法把阶梯形分布的力学参数简单近似地表示成单元局部坐标的连续函数,由于相邻升程间这些参数有较大的突变,这会引入一定的误差。朱岳明等在非均匀单元法和虚拟层合单元法的基础上,结合碾压混凝土坝的施工特点,提出了非均质层合单元法^[24]。非均质层合单元法考虑不同升程间参数的突变现象,只把同一升程内各碾压层的力学参数用简单的连续函数进行描述,并用虚拟层合单元法的分段积分法进行积分,在数学上更严密地解决单元内的非均质问题。该方法将每个升程作为一个非均质层,但是,随着时间的推移,各升程间的力学参数相差会越来越小,因此,这种分层的方法不够严密,会给计算带来一定的误差。李守义等提出了浮动网格法,该方法认为当施工过程中同一升程内的各薄层最小龄期达到预定龄期后,其水化热温升、弹模和徐变随时间变化较小,温度和应力变化不大,可以将这些薄层单元合并为一个大单元,合并后大单元的力学参数按薄层单元的平均龄期计算,而上部新浇筑的混凝土仍采用薄层单元计算^[25]。该方法保证了碾压混凝土坝的计算精度和计算效率,但是,该方法没有给出预定龄期的计算公式。朱伯芳首先提出了并层算法,根据混凝土力学参数与龄期的关系,把混凝土坝分为几个区域,上部是分层计算的,下部根据混凝土龄期的不同而逐步把几个浇筑层合并起来,使原来的一二百层,减少到十层左右,计算得到极大的简化^[26]。并层算法的主要思想和浮动网格法比较类似,它可以把力学参数相近的多层混凝土合并成一层,用统一划分的大单元取代原来的小单元,并且给出了并层龄期的计算公式。

碾压混凝土坝施工碾压过程决定了碾压层的密实度和龄期不同,并由此引起了本体、层面和碾压层相关力学参数的渐变特性。总体而言,迄今为止各国学者在研究碾压混凝土坝结构特性、反演本体和层面黏弹性参数时,大多没有考虑本体、层面和碾压层相关力学参数的渐变特性。对碾压混凝土坝黏弹性参数时空渐变规律的研究是一个相当复杂的问题,相关研究开展比较晚。近年来已有学者用等效连续模型法来研究碾压混凝土坝黏弹性参数空间渐变规律。顾冲时等首先提出碾

压混凝土坝层面影响带具有渐变特性,建立了碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型,并根据模型的不同状况,提出了确定层面影响带厚度、瞬时弹性模量、延迟弹性模量以及黏性系数等的方法,揭示了决定层面影响带性质的主要计算参数的渐变规律^[27]。陈龙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的力学参数进行了深入的研究,指出碾压混凝土坝本体内的力学参数沿层深呈指数衰减,并建立了相应的碾压混凝土坝力学参数渐变模型,同时,将碾压混凝土坝整体看作横观各向同性体,建立碾压混凝土坝整体等效模型,通过整体力学参数和本体内渐变力学参数间的关系,得到碾压混凝土坝本体的渐变规律^[28]。周兰庭等认为施工过程是碾压层内力学参数渐变的直接影响因素,并基于碾压层内弹性模量分布特征,提出了碾压层弹性模量理论解^[29]。魏博文等针对碾压混凝土坝施工层面影响带渐变力学特性,基于坝体层内材料横观各向同性假定,提出了层面影响带厚度、弹性模量以及黏性系数等计算参数的确定方法,确立了相应的黏弹塑性流变分析计算流程^[30]。上述研究者采用等效连续模型法单独对碾压混凝土坝本体或层面黏弹性参数的空间渐变规律进行了研究,说明了碾压混凝土坝本体和层面的黏弹性参数在空间上具有一定的渐变特性,但是,研究都没有同时考虑本体和层面黏弹性参数的渐变特性。

1.2.2 层面抗滑稳定分析

碾压混凝土坝存在着众多的施工层面,若处理不当,很容易成为大坝稳定的薄弱面。目前研究稳定性的方法主要有规范规定的材料力学法(刚体极限平衡法)、有限元数值方法(常采用弹塑性有限元法)和可靠度分析法。

材料力学法主要指的是刚体极限平衡法,该方法假定可能滑动体为刚体,不考虑其变形,根据静力平衡条件确定其安全系数。该方法理论成熟、概念清晰、计算简单,是过去和现阶段普遍采用的方法,已积累了丰富的经验,在规范中有与该方法相配套的容许安全系数^[31]。王光纶等分析研究了拱坝沿建基面滑动问题的实质及在实际工程中发生的可能性,提出了一种基于刚体极限平衡法的计算拱坝沿建基面滑动的整体稳定分析方法^[32]。温中华等应用刚体极限平衡法和有限元法对故县水工重力坝进行了稳定性分析,并对两种方法进行了比较^[33]。戴会超等主要采用刚体极限平衡法对三峡大坝深层抗滑稳定进行了研究^[34]。

但是刚体极限平衡法比较粗糙,只考虑了平衡条件,没有考虑变形,且引入了一些假定,因此,在大坝稳定性分析方面有不足之处。

弹塑性有限元法通常有强度储备系数法和超载法。强度储备系数法认为:由于受多种因素的影响,材料的强度参数很难准确确定,随机性和波动性较大,致使

材料的实际强度有可能比设计要求的标准强度低,因此,可以用降低大坝强度参数的方法来研究大坝失稳的渐进破坏过程。超载法认为:由于某些特殊原因的影响,作用在坝上的外荷载有可能超过设计荷载,因此,可以用逐渐增加外荷载的方法来研究大坝从局部到整体的渐进破坏过程。

目前,强度储备系数法较多地被用来模拟碾压混凝土坝破坏过程,取得了较多的成果。段亚辉和任旭华等采用弹塑性有限元法,对碾压混凝土重力坝层面上的应力、点安全系数分布及沿层面失稳破坏的机理与过程进行了初步的分析,揭示了碾压混凝土重力坝的失稳破坏机理,取得了可供进一步研究碾压混凝土重力坝稳定性、提高稳定安全度的参考意见^[35, 36]。张仲卿“八五”期间结合仿真模型试验和非线性有限元计算,对碾压混凝土重力坝层面破坏的形状和位置等进行了研究,结果表明,由于层面胶结不均匀,坝体沿碾压混凝土结合较差的层面呈台阶式的破坏^[37]。赖国伟等采用不等比例降强度参数法,对碾压混凝土重力坝的渐进破坏过程、破坏机理和极限承载能力进行了分析,认为碾压混凝土重力坝失稳表现为沿层面的剪切滑移,或表现为自下游侧本体大面积的压剪屈服与沿层面剪切滑移的组合^[38]。常晓林和任旭华在研究碾压混凝土重力坝失稳破坏机理的基础上,提出了碾压混凝土重力坝的稳定临界准则及其一般性的审查方法与公式,并与现行规范方法进行了比较,所得结果对工程设计以及有限元数值方法实用化有普遍的参考意义^[39, 40]。朱军等利用不同比例降强度法,研究了碾压混凝土重力坝的破坏过程与失稳准则,提出了 SFC 曲线作为临界曲线,位于 SFC 曲线以下,坝体处于安全状态,以上则为不稳定状态^[41]。

有限元法的主要问题是由于各工程的复杂性和有限元法计算程序的差异性,目前尚无对碾压混凝土坝层面抗滑稳定有统一的标准。

可靠度分析法是基于概率统计理论的不确定性分析方法,起源于对结构设计、施工和使用中存在的认识,它主要研究结构在规定时间内和规定的条件下完成预定功能的概率。目前,大坝可靠度理论主要研究的是随机不确定性下的可靠度。其主要特点是将作用的荷载、抗力和物理力学参数等变量都当作随机量,通过统计分析确定各随机量的分布类型,然后利用结构分析法建立大坝的极限状态方程,从而求大坝的失效概率和可靠度指标。可靠度分析法在研究碾压混凝土坝抗滑稳定性方面得到了广泛的应用。刘宁通过计算碾压混凝土重力坝抗滑稳定的可靠度,说明了层面参数的变异性及相关性对碾压混凝土重力坝抗滑稳定性的影响^[42]。赵会香等对碾压混凝土重力坝可靠度进行了系统分析,采用 JC 法、三维随机有限元法研究了坝体坝基联合作用下的可能失效途径^[43]。

运用可靠度理论解决实际问题时需要大量的实验资料,但是,实际中常常不能得到足够多的样本,这使得一些随机量的概率分布以一定经验值来推求。此外,可

靠度计算分析的关键是建立恰当的功能函数,但实际工程中,功能函数往往不能以显函数表达,这就使得计算变得非常复杂或难以进行。因此用可靠度分析法计算大坝的稳定性时,有时精度不高,甚至无法使用。

同时也有众多学者致力于从动力系统、能量、信息论等角度来研究稳定性,如吴中如等提出了利用分形几何和李雅普诺夫函数来判断岩土边坡的稳定性^[44-45];顾冲时等提出了利用尖点突变模型作为大坝和岩基稳定状况的判据及计算模型^[46];包腾飞利用相空间重构反演了裂缝动力方程,利用运动稳定性理论建立了裂缝的亚临界扩展判据^[47];娄一青等建立边坡内最大水平方向位移与折减系数的尖点突变模型,并以此作为边坡是否失稳的判断标准^[48];卓家寿等提出了用干扰能量法来确定滑裂面、滑动方向,并导出了最小稳定安全系数^[49];方国柱等通过提取边坡的多种信息,用信息量法对高边坡稳定性进行了评价^[50];张俊峰等利用GIS强大的数据管理和空间分析功能,引入信息量模型,开发了地质稳定性评价系统^[51]。此外,随着计算机的发展,各种新型方法,如模糊数学^[52]、灰色理论^[53]、神经网络^[54]等都应用到各种稳定分析中。

1.2.3 层面性态综合评价方法

综合评价是指对多属性体系结构描述的对象系统做出全局性、整体性的评价。碾压混凝土坝层面性态综合评价方法是指通过一定的评价方法对大坝安全的多层次、多目标结构系统做出综合评价,其主要包括大坝安全影响因素评价体系的构建、监控模型的建立、评价指标权重的确定和评价方法的选取。

1.2.3.1 监控模型

对层面性态进行综合评价时,需要对各定量指标进行度量,这就要建立各定量指标对应的监控模型。大坝的监控模型主要是在大坝实测资料的基础上建立的,经历了较长的发展历史,国外在20世纪50年代以前主要对监测值作定性分析^[55]。1956年意大利的托尼尼(Tonini)首次将影响大坝位移的因子分成水压、温度和时效三部分,并均用三次多项式来表示水压因子和温度因子^[56]。1958年Xerez等将气温作为温度因子,并取观测前不同天数的平均气温来分析高110 m的卡斯特罗(Castelo)拱坝^[57]。同年,Rocha等采用大坝横断面各层的平均温度和温度梯度作为温度因子,水位因子则用函数式来表示^[58]。与此同时,意大利的爱迪生水电公司1958年在第六届国际大坝会议上提出了时效变化为双曲线的观点^[59]。1963年日本的中村庆一等采用回归分析法分析大坝的监测资料,筛选出对大坝影响显著的因子,建立最优回归方程,并对方程的有效性进行了检验^[60]。1964年Silvera等通过幂函数来表示时效因子^[61]。1967年Widmann认为对大坝温度有主要影响的是大气气温,主要包括年平均气温和观测时的气温与年平均气

温的差值两方面,而对于水荷载,应考虑水位的上升和下降过程^[62]。Bonaldi 等于 1977 年和 1980 年提出了混凝土坝变形的确定性模型和混合模型,将有限元理论计算值与实测数据有机地结合起来^[63-64]。1984 年 Pedro 等采用定量分析和定性分析相结合的方法对监测数据进行建模^[65]。1985 年 Guedes 等利用多元线性回归(高斯-马尔柯夫概率函数模型)拟合自变量与效应量的关系,这种方法能确定自变量和效应量的最佳经验公式,并且能分离出各个分量^[66]。1985 年 Gomezlaa 等首先提出了混凝土坝坝基渗流量和扬压力的确定性模型^[67]。1986 年 Purer 等提出了一种混合回归模型,该模型的特点是增加因变量的前期值作为自变量参与回归分析,结果表明其残差比一般回归模型可减少 50%,回归精度得到提高^[68]。在数学监控模型方面,国外的许多学者也做了大量的研究^[69-76]。

在我国,大坝安全监控方面的研究工作起步相对较晚,20 世纪 70 年代以前主要通过绘制测值过程线以及最大、最小等简单特征值的定性分析等方法来分析大坝的工作性态。20 世纪 70 年代,河海大学陈久宇教授开始应用统计回归分析法分析原型监测资料,并将分析成果进行物理成因的解释^[77-78]。20 世纪 80 年代,吴中如等进一步在监控模型方面做了大量的工作,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^[79-82]。自此以后,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,许多新型模型被不断提出^[83-84]。

日前,建立碾压混凝土坝监控模型时,大多不考虑碾压混凝土坝逐层碾压的施工特点,仍采用常规混凝土坝的分析方法,这就不能真实地反映碾压混凝土坝的工作性态。为此,一些学者针对碾压混凝土坝的施工特点,对碾压混凝土坝监控模型进行了深入的研究。吴中如等利用薄层单元模拟层面影响,建立碾压混凝土坝蓄水期位移的确定性模型和运行期位移时空分布的确定性模型^[85]。顾冲时等深入研究了层面的变化性质及分布规律,建立了层面有厚度和无厚度分析模型^[86]。仲琳基于碾压混凝土坝坝体渗流量等效原理和单裂隙渗流理论,建立了考虑坝体层面渗流特性的碾压混凝土坝渗流量监控模型,并利用复合材料理论,建立了能反映碾压混凝土坝特点的变形混合模型^[87]。顾冲时等针对层面的渐变特性,建立了碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型,提出了确定层面厚度、瞬时弹模、延迟弹模及黏性系数的方法,建立了相应的三维黏弹性模型^[88]。陈龙根据碾压混凝土坝的施工过程、压实机理和室内外试验,研究了碾压层内力学参数的分布特征,建立了能反映参数渐变的黏弹性位移计算模型和渗流计算模型,并建立了可以使本体分量和层面分量分离的变形混合模型和渗流混合模型^[89]。

1.2.3.2 指标权重的确定方法

在大坝的运行过程中,每一个指标对其大坝安全运行的影响程度是不同的,这就需要对各评价指标的重要性(权重)进行分析,以确定各评价指标重要性的大小。现阶段权重的确定方法大致可以分为主观赋权法和客观赋权法,这些方法均可应用在碾压混凝土坝层面性态的综合评价中。

主观赋权法是基于决策者的经验或偏好,按重要性程度对各指标进行比较、赋值和计算而确定权重的方法,目前,主观赋权法主要有层次分析法(AHP法)、Delphi法、G1法等。

(1) 层次分析法

层次分析法是美国运筹学家在20世纪70年代提出的,简称AHP(Analytical Hierarchy Process)。它是在专家打分的基础上,进行相应的计算。该方法对照一相对重要的参照值,给出指标两两比较重要性等级,因而可靠性高,误差小。该方法在20世纪80年代传入我国,并在很多方面得到广泛的应用。在大坝安全领域,何金平提出了一种确定大坝实测性态综合评价权重的方法——乘积标度法,该方法是在层次分析法的基础上,兼顾大坝结构实测性态综合评价的特点而提出的一种赋权方法^[90]。张小飞用层次分析法确定评价因素的权重,进而对百东河土石坝的安全性做出了直观和准确的评价^[91]。刘晶将层次分析法应用到砌石拱坝老化病害评价中,确定了各评价指标的权重^[92]。

当评价指标数较多时,该方法易产生判断模糊;此外,给出的判断矩阵很难满足一致性要求。

(2) Delphi法

Delphi法是美国宝兰德(Borland)公司于20世纪40年代末开发的一种有效的群体决策方法。它是一种客观的、匿名的、综合多数专家经验与主观判断的方法,又称专家打分法。该方法比较简单,在研究无法定量表达的影响因素所包围的事物时,常表现出独特的优势。该方法已应用到多个领域,在大坝安全领域,吴中如和顾冲时首次在大坝安全综合评价中引入该方法,并将其作了进一步完善^[93]。该方法在目标较多时,很难做到客观合理,而且不易保证判断思维过程的一致性。

同时,层次分析法和Delphi法也可以互相补充,相互结合^[94-95],但是,总体来说,主观赋权法具有主观色彩,透明度、再现性差,专家或决策者的知识、经验及偏好会对权重大小形成干扰。

客观赋权法是基于影响因素的客观数据而确定权重的方法,目前,客观赋权法主要有主成分分析法、熵权法、因素分析法、拉开档次法等。

(1) 主成分分析法

主成分分析法是一种多元统计分析法,基本思想是通过数学变换用多个评价