



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书
出版规划项目

Deformation Safety Monitoring of Super High Arch Dams:
Theories, Methods and Their Applications

特高拱坝变形安全监控 理论和方法及其应用

顾冲时 赵二峰 周钟 蔡德文◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



“十三五”国家重点图书
出版规划项目

Deformation Safety Monitoring of Super High Arch Dams:
Theories, Methods and Their Applications

特高拱坝变形安全监控 理论和方法及其应用

顾冲时 赵二峰 周钟 蔡德文◎著

常州大学图书馆
藏书章

 河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书在总结多项国家重点科技研发计划课题及国家自然科学基金研究成果的基础上,以我国西南已建或在建的一批300 m级特高拱坝工程的理论研究与工程实践为背景,系统介绍了特高拱坝变形安全监控理论和方法,并依托典型特高拱坝工程进行了创新性实践。本书共分八章,主要研究内容包括:特高拱坝变形有效信息识别方法、影响因素挖掘方法、安全监控建模理论、时变效应分析方法、力学参数反演方法、安全监控指标拟定方法、预警理论和方法。

本书可作为水工结构工程、水利水电工程、工程力学、安全工程和其他相近专业的本科生和研究生教材,也可供从事水利水电工程、岩土工程和土木工程等领域设计、施工、运行管理和科研工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特高拱坝变形安全监控理论和方法及其应用/顾冲时等著. —南京:河海大学出版社,2018. 12

ISBN 978-7-5630-5737-5

I. ①特… II. ①顾… III. ①高坝—拱坝—变形观测—研究 IV. ①TV642. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 282606 号

书 名	特高拱坝变形安全监控理论和方法及其应用
书 号	ISBN 978-7-5630-5737-5
责任编辑	金 怡
特约校对	黄 浩
封面设计	黄 煜
出版发行	河海大学出版社
网 址	http://www.hhup.com
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	南京工大印务有限公司
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张	23
字 数	553 千字
版 次	2018 年 12 月第 1 版
印 次	2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价	158.00 元

序

顾冲时教授等所著《特高拱坝变形安全监控理论和方法及其应用》一书即将由河海大学出版社出版,我有机会事前阅读原稿,受益良多。作者嘱我写序,我欣然同意。

我国西部地区丰富的水能资源和深山峡谷地形为特高坝的建设提供了良好条件。近年来,一批特高拱坝的建成,给我国带来了巨大的经济和社会效益。目前,我国特高混凝土坝的数量和坝高均位居世界前列,并且呈流域高坝群分布的特点。但这些工程坝高库大,部分技术指标已超出了现有规范和标准;同时,这些工程大多修建在高山峡谷地区,地形地质条件十分复杂,运行过程中又可能遭受强烈地震、极端气候等各种不利因素,大坝运行安全面临着严峻考验,一旦失事将会造成巨大的经济和人民生命财产的损失,因此特高拱坝的安全监控工作显得尤为重要。

虽然大坝工作性态综合评价方法在国内外已进行了较为系统的研究,但针对特高拱坝的研究仍然是一个新颖而值得深入探讨的课题。由于特高拱坝结构整体具有独特的变形特征,故特高拱坝变形分析工作不能简单地套用传统方法,必须通过分析特高拱坝系统变形的复杂时空特征,提出符合大坝实际变形性态的分析方法。鉴于特高拱坝工程在长期运行荷载和环境因素协同作用下的变形性态安全监控涉及因素众多,本书以我国西部地区已建 300 m 级特高拱坝工程为依托,采用多种方法进行研究,成果相互印证,进行了创新性实践,研究成果为及时掌握特高拱坝的服役性态,确保流域高坝群在长期安全运行前提下充分发挥工程效益提供了强有力的技术支持。

本书内容丰富,涵盖了特高拱坝变形分析评价的各个方面,在许多关键问题上提出了新理念和新方法。我本人深知在水利科技方面取得任何一项新成果,都需付出艰辛劳动,本书展现如此多的高水平科研成果,使我十分欣慰。我认为本书具有如下特点。

第一,本书面对复杂问题,能深入分析、突破旧框架,依据原位监测资料,建立监

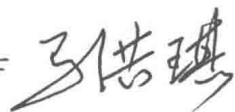
控模型,拟定监控指标,提出反演分析和预警方法等一系列新的理论和技术,定量分析评价和馈控特高拱坝的安全状况,这不仅是保障工程安全的重要手段,亦对推动水工结构工程学科的发展具有重要的科学意义。

第二,本书聚焦特高拱坝变形特性研究,从设计、施工、运行等多角度阐述了特高拱坝变形时空分布特征影响因素,建立了时空分区面板模型,重点分析了时变效应规律,提出了结构变形计算参数优化反演方法,拟定了变形分级控制指标,构建了特高拱坝变形性态预警理论和方法;依托典型特高拱坝工程,将诸多理论和方法应用于实际工程。因此,该书理论创新突出,应用价值高。

第三,本书是在作者现行研究的基础上,针对特高拱坝变形特点,总体上遵循从基础到深入、由简单到复杂、由理论到实践的原则,以原位监测资料为辅佐,从解决实际问题出发,对特高拱坝变形性态安全监控和分析评价方面的成果进行了系统总结,是一本值得水利水电科技工作者参考的好书。

我认识作者多年,看到了他的成长过程,也见证了他为小湾、锦屏一级等高拱坝结构性态进行实时安全评价所做的贡献,故以为序。

中国工程院院士



2018年7月

前 言

我国水能资源丰富,水资源作为清洁可再生能源,已成为我国能源结构的重要组成部分,在国家能源供应安全保障中占有重要地位。尤其是我国西部地区丰富的水能资源和深山峡谷地形,为特高拱坝的建设提供了良好条件,先后建成了二滩、拉西瓦、构皮滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级、大岗山 7 座坝高超过 200 m 的特高拱坝,乌东德、白鹤滩等一批特高拱坝也相继开工建设。目前,我国已成为世界上特高拱坝最多的国家,取得了世人瞩目的成绩。然而这些工程坝高库大,坝体结构和工作环境复杂,并且大多处于高烈度地震区,大坝一旦失事,不但严重影响大坝自身安全,而且还会造成国民经济以及人民生命财产的巨大损失。

拱坝作为一种结构轻韧的空间壳体结构,在高坝建设中具有许多优点,其中工程量少、充分发挥材料优势、超载能力强等尤为突出。随着拱坝技术的发展,我国修建的坝高 250 m 以上的特高拱坝坝顶弧长普遍大于 600 m,坝高谷宽、总水推力大、坝体应力水平高是我国特高拱坝的基本特点。不仅如此,我国特高拱坝工程建设面临着规模宏大、技术复杂、施工困难等多项世界性复杂难题。此外,高山峡谷、区域构造运动剧烈、深层断裂等恶劣的自然条件,使得我国特高拱坝面临各种复杂的工程地质问题,尤其是松弛岩体、断层破碎岩带极易导致拱座失稳和坝基岩体的不均匀变形,成为制约特高拱坝建设的关键技术难题。

大坝安全关系国计民生,一直是各国政府和工程人员关注的焦点。随着我国大坝数量的增加以及运行时间的延长,公众对水利工程安全性的要求越来越高,必须高度重视特高拱坝的安全问题,避免事故的发生。特高拱坝与一般大坝工程相比,结构性态和工程复杂度随坝高成倍增加,力学行为具有独特特征,不同区域的变形规律相差较大,尤其是由于不同部位的约束条件、材料性质及荷载作用具有多样性,很难采用统一的分析模型进行描述。当前,大坝变形分析模型由常规模型发展到人工智能

模型、由单测点模型到时空模型等,已经取得了许多成果,模型的计算精度、稳健性和外延性也逐渐提高,但对于特高拱坝工程,坝工界尚缺少合理解释的理论方法。现行规范明确规定,坝高大于 200 m 的特高坝应开展专门研究,不能简单地套用传统的计算方法。由于变形被坝工界公认为是特高拱坝工作性态最直观的反应,为有效保障特高拱坝的安全运行,有关变形安全监控的理论与方法尚需深入研究,尤其以变形控制值和时变趋势性为核心的特高拱坝变形安全警戒值拟定方法亟待提出。但是,由于特高拱坝结构整体具有独特的变形特征,故特高拱坝变形分析工作不能简单地套用传统方法,必须通过分析特高拱坝变形的复杂时空特征,提出符合大坝实际变形性态的分析方法。而且我国众多特高拱坝服役环境复杂,在外界环境和动静荷载的长期作用下,各种病害隐患时常发生,加之坝体混凝土和坝基岩体本身具有流变特性,这些均导致大坝结构性能不断演变,引起大坝变形的时变效应。因此,围绕特高拱坝变形安全监控理论和方法这一主题,开展特高拱坝变形性态的时空分析方法研究,挖掘特高拱坝变形时变机理,建立能反映特高拱坝变形时变效应的安全监控模型和监控指标,以及构建特高拱坝变形性态预警理论和方法体系等,能够为及时掌握大坝实际服役性态、充分发挥工程效益提供强有力的技术支持,这对特高拱坝的长期安全运行具有重要的保障作用,并对提高施工和运行管理水平具有重要的科学价值。

全书共分八章。第一章绪论,介绍了特高拱坝变形安全监控特点,扼要介绍了本书内容。第二章特高拱坝变形有效信息识别方法,介绍了变形信息边缘特征去噪方法、有效信息多维空间提取方法和矩阵映射方法。第三章特高拱坝变形影响因素挖掘方法,介绍了时空关联挖掘模型、结构因素动态空间关联集挖掘方法、荷载及时效因素混沌小波网络挖掘方法。第四章特高拱坝变形安全监控建模理论,论述了特高拱坝变形单测点和多测点函数关系模型、特高拱坝变形分区变截距面板时空模型和动态分区变系数面板预测模型。第五章特高拱坝变形时变效应分析方法,介绍了特高拱坝变形时变效应典型成因,论述了特高拱坝变形固有时变效应的流变学分析方法、特高拱坝变形时变效应的状态空间模型和整体监控模型、特高拱坝变形时变效应数学优化监控模型。第六章特高拱坝变形力学参数反演方法,论述了特高拱坝材料特性参数优化反演分析模型、考虑时变效应的特高拱坝流变力学参数反演方法。第七章特高拱坝变形安全控制值拟定方法,论述了特高拱坝一级、二级和三级变形控制值的建立方法,同时介绍了特高拱坝变形控制值的最大熵理论拟定方法。第八章特

高拱坝变形性状预警理论和方法,论述了特高拱坝变形性状预警结构体系、预警指标拟定方法、综合诊断预警方法及信息集成可视化预警方法。

本书部分研究成果获得了国家重点研发计划(2016YFC0401601, 2016YFC0401908)、国家自然科学基金重点项目(51739003)、国家自然科学基金面上项目(51479054, 51779086, 51579083, 51579085)、国家重点实验室专项基金(20145027612, 20165042112)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)的资助。本书在编写过程中,得到了吴中如院士的大力支持和帮助,马洪琪院士在百忙之中为本书作序予以鼓励,苏怀智、郑东健、包腾飞、陈波、谷艳昌、杨阳、秦栋、王少伟、聂兵兵等同志参加了部分研究和撰写工作,同时参考了有关书籍、文献,在此向这些专家学者表示衷心的感谢。

由于特高拱坝工程长期运行荷载和环境因素协同作用下的变形安全监控涉及因素众多,且众多因素影响机理十分复杂,同时受到所掌握的资料和知识水平的限制,书中谬误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2018年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 特高拱坝变形安全监控的认识	1
第二节 本书内容扼要介绍	8
第二章 特高拱坝变形有效信息识别方法	10
第一节 变形信息边缘特征去噪方法	10
第二节 变形有效信息多维空间提取方法	15
第三节 变形有效信息矩阵映射方法	25
第三章 特高拱坝变形影响因素挖掘方法	35
第一节 特高拱坝变形时空关联挖掘模型	35
第二节 结构因素动态空间关联集挖掘方法	46
第三节 荷载及时效因素混沌小波网络挖掘方法	54
第四章 特高拱坝变形安全监控建模理论	65
第一节 特高拱坝变形整体分布特征	65
第二节 特高拱坝变形安全监控函数关系模型	71
第三节 特高拱坝变形分区变截距面板时空模型	82
第四节 特高拱坝变形动态分区变系数面板预测模型	100
第五节 应用实例	110
第五章 特高拱坝变形时变效应分析方法	120
第一节 特高拱坝变形时变效应典型成因分析	120
第二节 特高拱坝变形固有时变效应分析方法	128
第三节 特高拱坝变形时变效应数学模型分析方法	150
第四节 特高拱坝变形时变效应数学优化监控模型	171
第五节 应用实例	179
第六章 特高拱坝变形力学参数反演理论和方法	198
第一节 特高拱坝材料特性参数反演分析模型	199

第二节	特高拱坝结构计算参数的优化反演	209
第三节	考虑时变效应的特高拱坝流变力学参数反演	222
第七章	特高拱坝变形安全控制值拟定理论和方法	231
第一节	特高拱坝变形特征	231
第二节	特高拱坝一级变形控制值拟定方法	232
第三节	特高拱坝二级变形控制值拟定方法	244
第四节	考虑时变效应的特高拱坝三级变形控制值拟定方法	261
第五节	特高拱坝变形控制值的最大熵理论拟定方法	266
第八章	特高拱坝变形性态预警理论和方法	283
第一节	特高拱坝变形性态预警结构体系	283
第二节	特高拱坝变形性态预警指标拟定方法	289
第三节	特高拱坝变形性态综合诊断预警方法	311
第四节	特高拱坝变形性态可视化预警方法	330
参考文献	351

第一章

绪论

第一节 特高拱坝变形安全监控的认识

1 研究的目的和意义

我国水能资源丰富,理论蕴藏量和开发容量均居世界首位。水资源作为清洁可再生能源,已成为我国能源结构的重要组成部分,在国家能源供应安全保障中占有重要地位。21世纪初,中国已经进入大坝建设的高峰期,一批200~300 m级的特高拱坝已建或在建,如240 m高的二滩、250 m高的拉西瓦、232.5 m高的构皮滩、294.5 m高的小湾、285.5 m高的溪洛渡、305 m高的锦屏一级、210 m高的大岗山7座工程已建成发电;270 m高的乌东德、289 m高的白鹤滩等一批特高拱坝也相继开工建设。

拱坝作为一种结构轻韧的空间壳体结构,在高坝建设中具有许多优点。拱坝坝体体积一般仅为重力坝的1/2,尤其是薄拱坝,其坝体工程量甚至可以节省2/3以上。拱坝主要靠坝体拱的作用把巨大的水压力传递到两岸坝肩岩体,拱圈截面上主要承受轴力作用,通常坝体和基础的抗压强度都比较高,可以充分发挥筑坝材料抗压性能好的优势,坝越高、拱的作用越强,其优势也就越明显。拱坝属高次超静定结构,超载能力强,当外部荷载增加导致拱坝局部开裂时,坝体应力可自适应调整,只要坝基岩体牢固,拱坝安全裕度远高于重力坝。国内外有关拱坝结构破坏试验表明:拱坝的超载能力可达设计荷载的5~11倍。简而言之,拱坝的优点概括为工程量少、充分发挥材料优势、超载能力强三大方面。

除此之外,随着拱坝技术的发展,我国修建的坝高250 m以上的特高拱坝坝顶弧长普遍大于600 m,小湾拱坝更是达到了892.786 m,坝高谷宽的特点使坝体承受巨大的水压力,小湾拱坝的总水推力达1800万t,是国外同类大坝的2倍以上。同时,我国特高拱坝压应力水平一般在8.5~10.0 MPa,而国外同类型拱坝主压应力不超过7.0 MPa;拉应力问题也非常突出,采用拱梁分载法计算小湾拱坝持久组合状况下的最大拉应力高达1.1 MPa,短暂和偶然状况下的应力水平更高。坝高谷宽、总水推力大、坝体应力水平高是我国特高拱坝的基本特点。传统拱坝要求河谷尽可能对称,目前河谷对称性的重要性已不再强调,且已在不对称河谷中修建了非对称拱坝,如在不对称“V”形河谷中修建的白鹤滩拱坝,其两岸边坡呈现“左缓右陡”,690 m高程以上的左右岸边坡与河道中心线距离

相差大于100 m,复杂的地质条件大大增加了高拱坝设计与施工的难度。此外,由于拱坝的失事基本是坝肩抗滑失稳所致,所以高拱坝对地质条件的要求十分严格,尤其坝肩的抗滑稳定是保证大坝安全的关键。我国特高拱坝多处于西部雄峰陡峭地区,区域构造运动剧烈,深层断裂问题突出,面临各种复杂的工程地质问题,尤其是松弛岩体、断层破碎岩带极易导致拱座失稳和坝基岩体的不均匀变形。例如,小湾拱坝处于高地震烈度区域,坝基分布6条较大的蚀变带,坝肩分布有 f_9 , f_{10} , F_{11} , f_{12} , F_{20} , f_{34} 断层,存在岩体松弛、高岭土蚀变、堆积体、横河向断层发育等一系列复杂地形条件难题;锦屏一级拱坝存在右岸 f_{13} , f_{14} 断层影响坝肩稳定性,左岸分布深层裂缝,岩层倾倒变形, f_5 , f_8 , f_{12} 断层及煌斑岩脉引起坝肩变形等问题。为了不影响特高拱坝的安全建设和运行,需重点对坝肩、坝基和抗力体进行地质缺陷处理。可见,我国特高拱坝工程建设面临着规模宏大、技术复杂、施工困难等多项世界性复杂难题;此外,高山峡谷区域构造运动剧烈、深层断裂等恶劣的自然条件,也成为制约特高拱坝建设的关键技术难题。

虽然我国已成为世界上特高拱坝最多的国家,取得了世人瞩目的成绩,但是这些工程坝高库大,坝体结构和工作环境复杂,并且多处于高烈度地震区,大坝一旦失事,不但严重影响大坝自身安全,而且还会造成国民经济以及人民生命财产的巨大损失。大坝安全问题一直是国家和工程人员关注的焦点,随着公众对水利工程安全性的要求越来越高,必须高度重视特高拱坝的安全问题,避免事故的发生。大坝变形是特高拱坝工作性态最直观的反映,但是特高拱坝与一般大坝工程相比,结构性态和工程复杂度随坝高成倍增加,力学行为具有独特特征,不同区域的变形规律相差较大,尤其是由于不同部位的约束条件、材料性质及荷载作用的多样性,很难采用统一的分析模型进行描述。当前,大坝变形分析模型由常规模型发展到人工智能模型,再到变形多测点模型等,已经取得了许多成果,模型的计算精度、稳健性和外延性也逐渐提高,但对于特高拱坝工程,坝工界尚缺少合理解释的理论方法。现行规范明确规定,坝高大于200 m的特高坝应开展专门研究,不能简单地套用传统的计算方法,有关变形监测和安全控制的理论与方法尚需深入研究,尤其以变形控制值和时变趋势性为核心,研究特高拱坝变形安全警戒值拟定的方法亟待提出。因此,对特高拱坝变形性态安全监控理论和分析方法开展研究,对于特高拱坝的长期安全运行具有重要的作用,可使特高拱坝在安全运行的前提下充分发挥工程效益,并对提高施工和运行管理水平具有重要的科学价值。

2 特高拱坝运行特点

随着我国混凝土坝筑坝技术的提高,大坝的总体发展趋势是筑坝高度增加、材料容许应力及应力水平提高、坝址地形地质条件放宽等。表1.1.1统计了我国已建和在建坝高分别处于前10位的混凝土拱坝和重力坝,从坝型上看,拱坝最大坝高为305 m,远高于重力坝目前最大坝高203 m,且拱坝整体高度高于重力坝。

特高拱坝承受巨大的水推力,如锦屏一级约1280万t、小湾约1800万t、溪洛渡约1300万t、二滩约940万t,进而导致特高拱坝整体应力水平高。重力坝目前的最大坝高虽然低于拱坝,但重力坝主要利用坝体自重和坝基面上产生的摩阻力来抵抗水推力的工作原理,使得坝基主要承担较大上游水推力,并且上述坝高前10位的重力坝均是实体

表 1.1.1 截至 2015 年中国已建和在建坝高前 10 位的混凝土拱坝和重力坝

坝型	坝名	流域	省份	坝高 (m)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	建设年份
拱坝	锦屏一级	雅砻江	四川	305.0	77.60	3 600	2005—2014
	小湾	澜沧江	云南	294.5	150.43	4 200	2002—2012
	白鹤滩	金沙江	云南/四川	289.0	206.02	16 000	在建
	溪洛渡	金沙江	四川	285.5	126.7	12 600	2005—2015
	乌东德	金沙江	云南/四川	270.0	74.05	10 200	在建
	拉西瓦	黄河	青海	250.0	10.79	4 200	2001—2010
	二滩	雅砻江	四川	240.0	61.80	3 300	1991—2 000
	构皮滩	乌江	贵州	232.5	64.54	3 000	2003—2009
	大岗山	大渡河	四川	210.0	7.77	2 600	2005—2015
	龙羊峡	黄河	青海	178.0	276.30	1 280	1977—1989
重力坝	黄登	澜沧江	云南	203.0	15.00	1 900	在建
	光照	北盘江	贵州	200.5	32.45	1 040	2003—2007
	龙滩	红水河	广西	192.0	298.30	5 400	2001—2009
	三峡	长江	湖北	181.0	450.40	22 500	1994—2010
	官地	雅砻江	四川	168.0	7.60	2 400	2010—2012
	向家坝	金沙江	云南/四川	162.0	51.63	6 000	2006—2015
	金安桥	金沙江	云南	160.0	9.13	2 400	2003—2011
	托巴	澜沧江	云南	158.0	10.39	1 250	2010—2016
	刘家峡	黄河	甘肃	147.0	61.20	1 138	1958—1974
	狮子关	洪家河	湖北	145.0	1.41	10	1999—2004

混凝土重力坝,因而坝高的增加,也使得重力坝坝基能够承受较大的剪力。潘家铮院士等指出:“200 m 以上高拱坝与中低拱坝的本质区别在于中低拱坝整体应力水平较低,特别是压应力安全储备较大;而高拱坝整体应力水平高,压应力安全储备较小,发生局部损伤后,应力调整的余地较小,很有可能造成整体破坏。”以二滩、锦屏一级、大岗山、溪洛渡、小湾和拉西瓦等特高拱坝工程为例(表 1.1.2),利用拱梁分载法进行上述特高拱坝的应力计算结果表明,300 m 级高拱坝与坝高 100 m 左右的拱坝相比,应力分布规律基本一致,但应力值明显偏高,基本荷载组合下,拱梁分载法得到的坝体下游面周边主压应力分布状况如表 1.1.3 所示,上下游面最大主压应力如图 1.1.1 所示。

表 1.1.2 六座特高拱坝的体型特征参数

工程名称	计算方案	河谷形态	坝高(m)	拱冠梁顶部厚度(m)	拱冠梁底部厚度(m)	河谷宽高比	拱圈中心角(°)	坝体体积(万 m ³)	最大跨度(m)	顶拱中心线弧长(m)
二滩	技施方案	V型	240	11	55.7	2.83	91.5	410	678	769.4
锦屏一级	深化方案	V型	305	13	63	1.57	93.1	373.8	480	552.4
大岗山	Ex-4 建基面方案	V型	210	10	52	2.52	93.5	313.8	530	618.6
溪洛渡	技施体型	U型	285.5	12	68	2.12	96.2	673.6	589	681.5
小湾	技施方案	V型	294.5	12	72.9	2.73	89.5	1 056.1	798.5	901.8
拉西瓦	技施方案	V型	250	10	49	2.53	73.7	242.7	632	622.4

表 1.1.3 六座特高拱坝下游面周边主压应力(单位:MPa)

工程名称	左岸			右岸		
	上部	中部	下部	上部	中部	下部
二滩	-1.0~-4.5	-4.5~-7.0	-7.0~-9.0	-2.0~-4.5	-4.5~-6.5	-6.5~-9.0
小湾	-2.0~-7.0	-7.0~-10.0	-6.0~-10.0	-2.0~-8.0	-8.0~-10.0	-5.0~-10.0
大岗山	-2.0~-5.0	-5.0~-6.0	-6.0~-7.0	-2.0~-4.5	-4.5~-6.0	-5.0~-7.0
锦屏一级	-4.0~-6.5	-6.5~-7.0	-6.0~-8.0	-3.0~-7.0	-7.0~-8.0	-5.0~-7.0
溪洛渡	-4.0~-7.0	-6.0~-7.0	-6.0~-8.0	-4.0~-8.0	-7.0~-8.0	-6.0~-7.0
拉西瓦	-1.0~-5.0	-3.0~-6.5	-4.5~-6.5	-1.0~-4.5	-3.3~-6.5	-4.0~-6.5

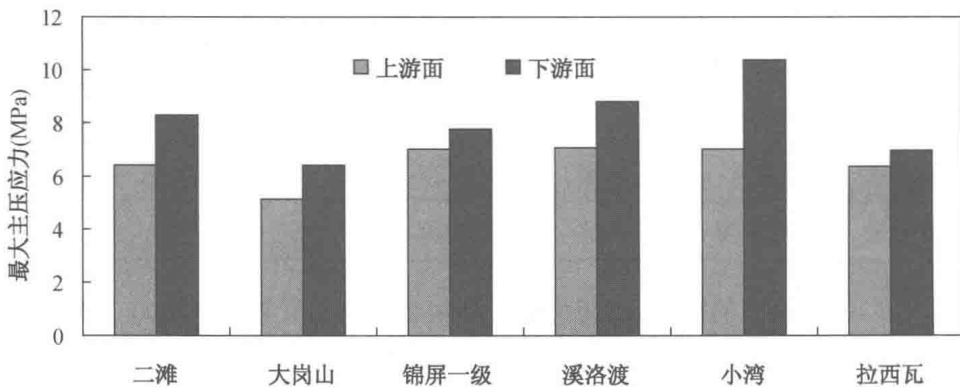


图 1.1.1 六座特高拱坝上下游面最大主压应力

因此,特高拱坝的一大特点就是高应力,坝体混凝土和坝基岩体及结构面将承受高应力作用,且与中低高度的混凝土坝有明显区别,特别是对坝基的断层、节理和软弱结构面等地质缺陷体而言,在高应力作用下,其变形时间效应将更加显著。另外,特高拱坝在设计阶段进行的体型优化,尽管降低了坝体的峰值应力,但导致坝体高应力区分布较广。故

特高拱坝不仅应力水平高,而且高应力区分布广,这也将运行过程中带来一系列的问题。目前,我国修建的特高拱坝主要位于西部地区,特别是西南地区的深山峡谷之中,该区域地质构造复杂、地应力高,存在大量高陡边坡,地震烈度高,除了上述高应力特点外,特高拱坝在运行过程中还面临以下问题。

(1) 坝前水推力大,导致坝基和坝肩变形较大,并且在长期高水压力作用下,可能会引起大坝影响范围内软弱构造带的性态变化。

(2) 特高拱坝多位于深山峡谷之中,坝址两岸一般都是高出坝顶数百米的陡峭边坡,其稳定性及变形特征将直接影响大坝的安全运行,意大利 Vajont 拱坝库岸滑坡和 Beauregard 拱坝岸坡蠕动挤压坝体就是典型的实例。

(3) 特高拱坝坝体厚度大,内部水化热不容易散发,蓄水后在气温、库水温度和内部水化热作用下,坝体内外温差较大,并且坝体横断面越大,所受约束作用越强,因而温度应力也相对较大,坝体开裂风险增大,后期在高水压力作用下,初期形成的温度裂缝可能发展成危及大坝安全的裂缝。

(4) 我国西部地区具有丰富的水能资源和适宜修建特高坝的高耸陡峻峡谷地形,但形成这些地形条件的区域性地质构造也是孕育强震的条件,有记录的中国内陆强震绝大多数都发生在西部地区,因而特高拱坝的坝址大多位于强震区;另一方面,岩体深部传播过来的地震波到达地表后,地震峰值加速度随着地面高度的增加而增大,因而在遭遇相同地震情况下,坝高越高,大坝受地震影响越大。

(5) 特高拱坝的泄流速度可达 $30\sim 50\text{ m/s}$,并且泄洪流量大,多数高坝的设计泄量超过 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$,如二滩超过 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、溪洛渡超过 $40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 等,由此引起的脉冲振动、空化空蚀、掺气雾化、磨损磨蚀和河道冲刷等问题十分突出。

3 特高拱坝变形特征分析方法

拱坝的建设具有十分悠久的历史,最早可以追溯到古罗马时代。1854年,法国 Francois Zola 首次采用当时先进的弹性力学厚壁圆筒公式进行了拱坝的结构分析与设计;1922年,美国拱坝研究委员会在世界范围内调查了 100 座已建和在建的拱坝,并对其中的七座进行了原型观测,在全面研究拱坝的结构原理和变形性态的基础上,总结了拱坝的基本变形规律和工作性态,奠定了现代拱坝结构变形分析的理论基础。随着美国加州伯克利大学采用二维有限元对 Dworshak 大坝开展仿真计算研究,有限元仿真分析方法已成为拱坝变形特征分析的一种重要的数值计算方法。目前,针对特高拱坝变形特征的分析方法中,国内外一般采用各种数值计算和三维地质力学模型试验相结合的方法,两者相互验证,相互补充,苏联、美国、加拿大等世界各国的学者相继开展了对混凝土坝变形场的仿真分析研究;国内有关混凝土坝规范也明确要求工程设计人员采用有限元仿真分析,同时,许多科研机构也深入研究了仿真分析的理论、方法与程序,并广泛应用于国内大中型工程。

特高拱坝作为一种高次超静定结构,所经受的外部荷载主要由拱和梁共同承担,拱向推力依靠坝肩岩体的支撑,如柯因在 Malpasset 拱坝溃决后总结:“我相信坝本身并未破坏,它是因基础破坏而被推走的。”虽然拱坝坝体本身具有很高的变形适应性,而且有较高的

超载安全储备,但由于基础变形,拱坝也存在溃决可能性。也即是,特高拱坝的实际变形性态除了受外部荷载影响外,基础变形对大坝工作性态的影响也不容忽视。国内外研究人员针对基础的地质条件、稳定性等进行了广泛研究,并取得了一批有价值的成果。此外,特高拱坝长期运行中除经受常规荷载以外,还有可能受到各种非常规荷载及特殊因素的影响,为全面掌握其服役期内的变形特征,需对特高拱坝可能经受的偶然荷载、不利荷载组合作用下的变形响应,以及全生命周期大坝变形演变过程进行研究。数值分析法的思想是采用渐进的方法,即逐步增加荷载或降低材料强度,使坝体-坝基系统达到破坏前的极限平衡状态。在分析过程中,涉及一个关键问题是如何判断大坝系统是否达到了极限平衡状态,这需要选取合适的收敛判据,常用的失稳判据有收敛性判据、突变型判据和塑性区贯通判据等,其中突变判据是根据特征点的变形荷载曲线或变形强度曲线寻找突变点,即对应着系统的极限平衡状态,基于该判据的研究成果颇多。但是,已有的稳定性分析成果和经验大都侧重于拱坝失稳破坏的极限状态,对超载过程中大坝整体的变形性态演变规律研究较少,而且特征点的变形是局部参量,难以真实反映大坝整体的变形性态,以特征点的变形突变判据确定结构极限状态,与实际情况有出入,但可通过考虑采用系统的应变能或塑性应变能来代替特征点变形,结合不同超载系数下特高拱坝变形性态的演变过程,能更加有效地评估工程的安全性。此外,针对特高拱坝可能经受的偶然荷载、不利荷载组合等非常规荷载作用,也可以通过假定拱坝的体型、强度、地质条件等固有因素不变,采用连续加荷及水压超载等方式,计算分析不同超载系数下的大坝变形场,据此分析大坝变形性态的演变过程。也有很多国内外学者采用物理模型试验和数值分析的方法开展了大量的相关研究,物理模型试验是把实际工程和地质问题按比例进行缩放,通过试验结果直观反映大坝与地基的破坏形态、变形的分布特征和破坏机制。

4 特高拱坝变形安全监控研究难点

由于特高拱坝服役过程中面临着高应力水平、地质条件复杂和失事后果严重等问题,并且影响因素和演化机理非常复杂,尚存在许多关键问题亟待研究和解决。

(1) 准确而有效的变形监测信息是进行特高拱坝变形性态研究的基础,然而,变形监测信息时常受到外在复杂多变的环境因素影响,采集获得的实时监测数据在表现大坝变形真实状况时存在偏差。此外,为了确保变形监测的全面性,全自动化的监测仪器得到了大量应用,虽然监测数据量成倍增长,但也产生了数据冗余、失效等问题。为了确保特高拱坝变形性态分析结果的可靠性,需要研究变形监测数据的预处理方法,达到有效剔除变形监测数据中无效甚至错误的信息,同时获取和集成有效信息的目的。

(2) 由于特高拱坝变形通常受到水压、温度等荷载因素影响,还和大坝材料物理力学特性、坝体结构、地质、水文及施工等诸多因素有关。为了深入研究特高拱坝的变形性态,需要分析其主要影响因素。然而,大多数影响特高拱坝变形的因素类型多样、关系复杂,难以直接建立各种影响因素和变形效应量间的简单关系,故需要针对不同影响因素的特点,研究影响特高拱坝变形性态因素的有效挖掘方法。

(3) 特高拱坝变形监测序列主要通过垂线监测等获取,现有的分析模型和方法往往是基于一维变形时间序列,比如单测点统计模型,很难综合反映特高拱坝的整体变形特

征;此外,考虑位置影响的时空模型虽能描述大坝的整体变形性状,但忽略了不同区域变形规律的差异性。因此,如何根据有限的变形序列通过分类研究,区分大坝不同区域的变形规律,是特高拱坝变形性状建模分析的重要前提;同时,考虑大坝不同区域固有影响因素作用产生的特异性,建立符合特高拱坝实际变形性状的分析模型,将是进一步深入研究的课题。

(4) 特高拱坝变形系统是一个随机的、耗散的以及复杂的动态演变系统,内部结构随着运行年龄的增加会逐渐发生调整,从而导致特高拱坝结构性态的改变,通过判断坝体变形监测序列的平稳性有助于更客观地揭示变形时间结构的本质特性和变化规律;在此基础上,如何通过分析各时期大坝变形的空间结构,诊断结构发生调整或存在隐患的部位,依据特高拱坝变形的动态分区特征,建立相应的变形分析模型对深入分析特高拱坝变形性状至关重要。

(5) 特高拱坝变形在服役期内一直处于变化之中,一方面是上游库水位和气温变化等作用于坝体上的外荷载的变化,使得大坝变形随之改变;另一方面,筑坝材料固有的流变特性和服役期材料性能的演变,导致特高拱坝结构变形性状发生变化。荷载作用下由筑坝材料固有性能及服役期材料性能演变所引起的变形时变效应,是大坝结构性态发生趋势变化甚至发生转异的标志,而大坝变形监测量是各影响因素作用下的综合值,因此有必要基于变形监测资料,对特高拱坝变形时变效应进行辨识,并从筑坝材料性能的角度对其合理性进行分析,以便对特高拱坝结构变形性状的转异进行识别和评判。

(6) 特高拱坝变形固有时变效应主要源于坝体混凝土徐变和坝基岩体蠕变等筑坝材料固有的流变特性,特高拱坝的一个突出特点就是高应力水平,而应力水平对筑坝材料流变特性的影响较大。因此,需要构建适合特高拱坝变形的流变本构模型,并研究相应的有限元数值模拟方法,以便量化分析由筑坝材料固有流变特性所引起的特高拱坝变形固有时变效应。

(7) 材料性能是决定结构性能的关键因素,而特高拱坝在长期服役过程中,荷载和环境因素将驱动筑坝材料性能发生演变,进而导致特高拱坝结构性能发生变化,并引起大坝变形的时变效应。因此,在研究特高拱坝变形时变效应时,需要针对坝体混凝土所面临的荷载特点和环境因素,研究典型因素作用下坝体混凝土的劣化机理和物理力学性能演变规律,并通过合理的特高拱坝材料本构模型,量化分析筑坝材料性能演变导致特高拱坝结构性能变化而引起的变形时变效应。

(8) 特高拱坝变形时变效应反映到监测效应量上,主要表现为时效变形发展趋势、可恢复变形变幅及测点之间关联性的变化,特高拱坝体积庞大,需要研究能反映大坝变形时空特性的监控分析方法,以便合理评价大坝结构性能的变化。

(9) 由于特高拱坝安全监控指标是识别大坝所处状态的科学判据,但是监控指标过宽会遗漏异常和险情信号,导致灾变;监控指标过严则可能误报险情,干扰正常运行和效益发挥。科学地拟定监控指标,对于准确识别险情意义重大,它直接关系到大坝安危、运行决策和工程效益的发挥。特高拱坝与一般高拱坝相比,其结构性态更加复杂,因此,其变形监控指标必须进行专门的研究,以便为大坝的安全运行提供参考,为大坝运行管理决策提供支持。

(10) 在特高拱坝长期服役过程中,由于受到诸多因素的影响,大坝变形性状相关信