

大坝与坝基安全

# 大坝与坝基安全 监控理论和方法及其应用

Safety Monitoring of Dams and Dam Foundations  
— Theories & Methods and Their Application

顾冲时 吴中如 著



河海大学出版社

# 前言

建国以来,我国共修建约 8.5 万座堤坝,其中 15 m 以上的大坝约有 1.9 万座,发电装机约 100 GW,库容约 500 Gm<sup>3</sup>,这些工程在防洪、发电和灌溉等方面发挥了巨大的经济效益。然而,由于多种原因,相当一部分大坝存在安全问题,据有关部门统计,在全国 3 100 多座大中型水库大坝中约有 30%、在 8 万多座小型水库中约有 40% 存在不同程度的病险问题。与此同时,随着西部大开发和西电东送工程的大力开展,高坝大库也越来越多,其中有些大坝的坝高在 200~300 m,坝址地质条件复杂,又处于高地震和高地应力区,对工程安全提出了更高的要求。由于大坝及坝体承受巨大的荷载,其工作条件极为复杂,设计与实际运行存在一定差距,实践证明,对大坝及坝基进行安全监测,并融汇多种理论和方法对监测资料进行正反分析,建立大坝安全综合评价专家系统,这对监控大坝和坝基的安全起到重要作用。由于党和政府的重视,我国的大坝安全监控研究工作在近几年发展较快,理论和应用研究也十分活跃,涌现出大批科研成果。为了系统总结这方面的成果,使之更广泛地应用于大坝安全监控和人员培训,作者分别于 1997 年、2000 年、2001 年、2003 年撰写了《大坝安全综合评价专家系统》、《大坝原型反分析及其应用》、《碾压混凝土坝安全监控理论及其应用》和《水工建筑物安全监控理论及其应用》等专著,在这些专著的基础上,吸收了国内外在这方面的最新研究成果,撰写成本书。

本书综合考虑了不同层次的科技人员和学生的水平和要求,既介绍常用的分析方法和数学模型,又引进一些新的分析方法和理论,并在介绍各种方法和理论时,用实例加以说明,使读者在理论和应用的认识上都能受到启示。

全书共分十章。第一章绪论,主要介绍本书的内容。第二章变形和应力的统计模型,论述了混凝土坝及土石坝变形测点的统计模型,以及混凝土坝位移的时空分析模型和应力统计模型。第三章渗流监测的统计模型,论述了混凝土坝坝身和坝基渗压、土石坝浸润线的测压管水位以及渗流量统计模型。第四章灰色和模糊监控模型,论述了利用灰色系统和模糊数学理论建立大坝监测效应量预测模型的方法,同时介绍了模糊可靠度分析方法。第五章确定

性模型和混合模型,论述了混凝土坝位移和应力的确定性模型和混合模型、土石坝渗压确定性模型以及混凝土坝施工期特殊监控模型。第六章拱坝坝肩和岩土边坡体稳定性监控模型,论述了拱坝坝肩稳定分析确定性模型、稳定分析突变模型,以及分形几何理论、Lyapunov 函数和 Lyapunov 指数分析岩土边坡体的稳定性。第七章大坝及基础计算参数的反演分析模型,应用坝体、坝基和库盘整体等多种反演分析模型,论述了坝体与岩基的变形参数及徐变参数、坝体混凝土热力学参数和断裂参数以及纵缝等价摩擦系数、大坝与坝基的流变参数、土石坝材料的物理参数等反演分析理论、模型和计算公式。第八章大坝及岩基荷载工况的反馈分析,论述了混凝土坝施工期和带缝混凝土坝运行期的实际安全度和运行控制荷载等的反馈分析原理和方法,同时论述了混凝土坝变形监控指标的拟定方法。第九章渗流反分析理论和方法,论述了岩基渗透系数、土石坝渗透系数和坝体混凝土渗流扩散系数的反演分析方法,以及考虑湿胀应力下坝体、坝基应力场与渗流场耦合的分析和反分析模型。第十章大坝安全综合评价专家系统,论述了由推理机、知识库、方法库、数据库及图库组成的“一机四库”大坝安全综合评价专家系统的内容及功能。

本书内容主要来自作者多年来所完成的一系列科研项目成果,包括国家自然科学基金项目(批准号 59279394 和批准号 50579010)、国家自然科学基金重大项目(批准号 59493605)和重点项目(批准号 50139030、批准号 50539010、批准号 50539110、批准号 50539030)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2002CB412707)、国家科技“八五”至“十五”攻关项目、水利部“948”计划(批准号 CT200612)、省部委基金、国家和省部委重点项目以及佛子岭、丹江口、青铜峡、龙羊峡、三峡等水电站委托的科研项目等研究成果。

本书由顾冲时、吴中如著,郑东健、苏怀智、王建、包腾飞、郭海庆参加。限于作者的水平,书中难免有不妥之处,恳切希望读者批评指正。

作 者

2006年6月

# 目录

<b>第一章 绪论</b>	1
第一节 大坝与坝基安全监控研究的目的和意义	1
第二节 本书内容的由来及扼要介绍	2
<b>第二章 变形和应力的统计模型</b>	8
第一节 概述	8
第二节 混凝土坝变形测点的统计模型	8
第三节 混凝土坝时效位移的较佳数学模型	21
第四节 混凝土坝位移的时空分布模型	31
第五节 土石坝变形监测的统计模型	36
第六节 混凝土坝裂缝开合度的统计模型	42
第七节 应力统计模型	51
<b>第三章 渗流监测的统计模型</b>	64
第一节 混凝土坝坝身和坝基渗压统计模型	64
第二节 土石坝浸润线的测压管水位统计模型	74
第三节 渗流量统计模型	77
<b>第四章 灰色和模糊监控模型</b>	83
第一节 概述	83
第二节 灰色系统理论及其预测模型	83
第三节 模糊预测模型及模糊可靠度分析	95
<b>第五章 确定性模型和混合模型</b>	129
第一节 概述	129
第二节 混凝土坝的位移确定性模型和混合模型	129
第三节 混凝土坝的应力确定性模型和混合模型	145
第四节 土石坝渗压的确定性模型	148
第五节 施工期特殊监控模型	151
<b>第六章 拱坝坝肩和岩土边坡稳定性监控模型</b>	162
第一节 拱坝坝肩稳定分析的确定性模型	162

第二节	稳定分析的突变模型	165
第三节	分形几何理论在岩土边坡稳定性分析中的应用	170
第四节	Lyapunov 函数在岩土边坡体稳定性分析中的应用	173
第五节	Lyapunov 指数在岩土边坡稳定判据研究中的应用	177
<b>第七章</b>	<b>大坝及基础计算参数的反演分析模型</b>	182
第一节	混凝土坝坝体弹性模量、坝基岩基变形模量和库盘岩基变形模量的反演	182
第二节	混凝土坝热力学参数及徐变度的反演	187
第三节	坝体混凝土的断裂韧度和纵缝等价摩擦系数的反演	191
第四节	大坝和岩基的流变参数的反演	194
第五节	土石坝材料的物理力学参数和徐变度反演	197
第六节	实例分析	199
<b>第八章</b>	<b>大坝及岩基荷载工况的反馈分析</b>	211
第一节	概述	211
第二节	大坝及岩基施工期反馈分析	211
第三节	大坝及岩基运行期的荷载工况反馈分析	213
第四节	混凝土坝变形监控指标的拟定方法	219
第五节	实例分析	225
<b>第九章</b>	<b>渗流反分析理论和方法</b>	237
第一节	概述	237
第二节	岩基渗透系数和坝体混凝土渗流扩散系数的反演	237
第三节	渗流影响下坝体和岩基应力场的反馈分析模型	240
第四节	土石坝渗透系数反演	247
第五节	实例分析	248
<b>第十章</b>	<b>大坝安全综合评价专家系统</b>	252
第一节	概述	252
第二节	系统的总体设计	255
第三节	知识库和推理机的知识工程	262
第四节	方法库的数值分析程序	277
第五节	信息管理系统	281
第六节	实例分析	284
<b>参考文献</b>		292



# 第一章

## 绪 论

### 第一节 大坝与坝基安全监控研究的目的是意义

建国以来,我国共修建约 8.5 万座堤坝,其中 15 m 以上的大坝约有 1.9 万座,发电装机约 100 GW,库容约  $500 \text{ Gm}^3$ ,这些工程在防洪、发电和灌溉等方面发挥了巨大的社会效益。然而,由于水文、地质、设计、施工质量、运行管理以及老化等原因,相当一部分大坝存在安全问题。据有关部门统计,在全国 3 100 多座大中型水库大坝中约有 30%、在 8 万多座小型水库中约有 40% 存在不同程度的病险问题,尤其是 20 世纪 70 年代以前修建的大坝,由于边设计边施工,设计和施工存在较多问题,大坝坝体及坝基防渗帷幕等老化和病变严重,可以预料 21 世纪将是病险坝除险加固的高潮。与此同时,随着西部大开发和西电东输的大力开展,高坝大库也越来越多,如正在修建的三峡、龙滩、小湾等大坝和拟建的溪洛渡、向家坝、拉西瓦等大坝,其中有些大坝的坝高在 200~300 m,坝址地质条件复杂,又处于高地震和高地应力区,对工程安全提出了更高的要求。

由于坝体及坝基承受巨大的荷载,其工作条件极为复杂,设计与实际运行往往存在一定差距。实践证明,对大坝及坝基进行安全监测,并融汇多种理论和方法对监测资料进行正反分析,建立综合评价专家系统,这对监控大坝和坝基的安全运行起着重要作用。其中:①通过监测资料全面深入地分析,建立多类监控模型和监控指标,据此定量分析评价大坝及坝基的安全状态,监控大坝的安全运行,并发现异常征兆;②以监测资料为依据,反演计算模型、计算参数和计算工况,进而对大坝及坝基的工作状态进行结构反分析,以深入分析评价安全状态,对异常征兆进行成因分析,并据此反馈设计、施工和运行,对提高和完善坝工设计的理论具有重要的科学价值和实用价值;③为了全过程地监控大坝和坝基的安全状况,仅以监测资料分析成果对大坝安全状态进行分析和评价还有局限性,尤其是在汛期或大坝出现异常时,需要组织专家作出快速决策,为此,应研究和开发大坝安全综合评价专家系统,据此对大坝及坝基的安全作出全过程的安全分析评价和监控,为领导决策大坝运行提供技术支持。

综上所述,研究大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用,不仅对监控大坝安全状况起到重大作用,使大坝在安全运行的前提下充分发挥工程效益,而且对发展坝工理论,提高施工和管理水平具有重要的科学价值。

## 第二节 本书内容的由来及扼要介绍

本书融汇多项国家自然科学基金、国家科技攻关项目的子课题、国家和部重点科研项目,以及 30 多座水电站委托的科研项目的研究成果,整合为大坝及坝基安全监控模型,大坝原型反分析理论与方法,大坝安全综合评价专家系统及其在工程中的应用等内容,见图 1-2-1。各部分的内容扼要介绍如下。

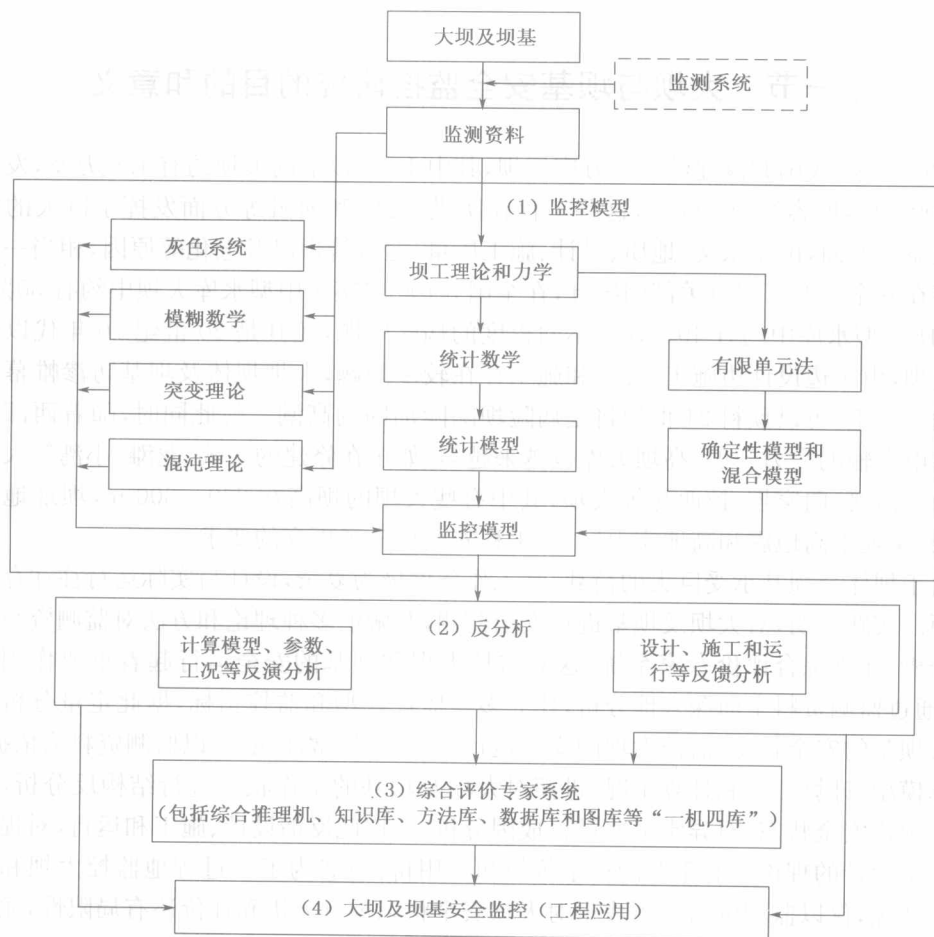


图 1-2-1 “大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用”研究内容框图

### ■ 一、大坝及坝基安全监控模型 ■

依据大坝及坝基的原型监测资料,应用各种数学、力学、信息科学等方法,建立大坝及坝基安全监控模型,其主要任务是由实测资料建立数学监控模型,应用这些模型监控大坝及坝基等水工建筑物的施工、运行,同时对模型中的各个分量(特别是时效分量)进行物理解释,借以分析大坝、边坡等的工作性态。根据建立模型方法的不同,可以归纳为:用统计

学方法建立统计模型;用灰色系统理论建立预测模型;用模糊数学建立预测模型;用有限元法分析计算,并与实测值拟合,建立确定性模型或混合模型;针对大坝施工期卸载、加载及其相互作用的复杂过程,建立施工期特殊监控模型;依据监测资料,建立坝肩稳定分析预测模型以及用突变理论判别坝肩稳定性的突变模型;针对大坝的库区和坝址存在较普遍的岩土边坡滑坡地质灾害,建立岩土边坡稳定分析和预测的混沌模型。本书针对上述内容,在对各种模型建模机理、方法进行深入研究的基础上,将其应用于三峡、水口、龙羊峡、佛子岭、丹江口、青铜峡等工程施工、运行的监控。本书的主要研究成果框图如图1-2-2所示。

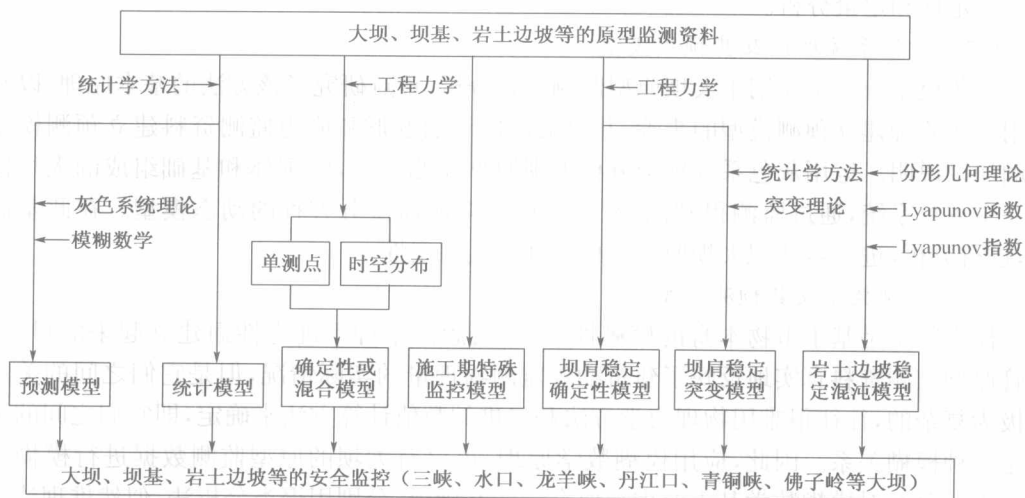


图 1-2-2 大坝与坝基安全监控模型研究主要内容框图

### (一) 统计模型

在坝工实际问题中,影响一个事物的因素往往是复杂的。在寻找预测量和预测因子之间的关系式时,不可避免地要涉及到许多因素,找出各个因素对某一预测量的影响,建立它们之间的数学表达式,即回归模型。借此推算某一组荷载集时的预测量,并与其实际值比较,以判别建筑物的工作状况,对建筑物进行监测。同时分离方程中的各个分量,并用其变化规律,分析和估计建筑物的结构性态。建立统计模型时,原型监测资料分析的常用方法——多元回归、逐步回归、加权回归、正交多项式回归以及差值回归等的基本原理和计算公式。

#### 1. 变形和应力监测的统计模型

监测变形和应力所得的物理量是监测水工建筑物运行工况的重要量,其中变形监测量直观可靠,国内外普遍作为最主要的监测量。该部分重点研究混凝土坝、土石坝和地下工程水工建筑物的变形统计模型,混凝土坝裂缝的开合度以及应力的统计模型中因子选择的基本理论和计算公式,并用龙羊峡、佛子岭、丹江口等实际工程应用加以说明。同时还对变形的时效分量作了专门研究。

#### 2. 渗流监测的统计模型

大坝竣工蓄水后,受到渗流水的作用,将对水工建筑物的安全产生不利影响,当渗流





要素(渗流水头、渗透坡降等)一旦超过允许值,就会出现破坏。为了掌握大坝的真实运行状态,必须对各监测物理量的实测资料进行分析,建立预测方程。这样就可以了解大坝的渗流状态,预测大坝的运行情况。合理的分析方法是根据渗流的基本理论,用确定性函数和物理推断选择统计模型的因子及其表达式,然后根据监测资料用数理统计法定出模型中的各项系数。这就是目前普遍采用的统计分析法,也是本部分的主要研究内容。包括混凝土坝坝体渗流、坝基扬压力、土石坝坝基、坝身测压管水位以及绕坝渗流等监测资料的统计分析,并结合龙羊峡、古田溪一级大坝等工程实例,系统地研究渗流的成因分析、因子选择以及计算成果解释等方法和步骤。同时对有降雨影响和复杂地基上的测压管水位也做了定性和定量分析。

### (二) 灰色系统理论及其预测模型

将灰色系统理论应用于大坝原型监测资料分析,重点研究了该方法的基本原理,以及应用这些原理建立预测模型的步骤,并以某连拱坝的变形和应力监测资料建立预测模型为例加以说明。运用灰色系统理论分析大坝原型监测资料,将坝体和基础组成的大坝作为一个灰色系统,通过监测得到的较少信息,建立所需微分方程的动态模型。在此基础上,进行分析,进一步认识大坝原型结构特性及其稳定性。

### (三) 模糊数学及其预测模型

模糊数学是基于事物本身的模糊性,即其概念的某种不确定性而建立起来的科学。尽管原型监测资料真实地反映了建筑物各监测物理量的实际情况,但是它们之间的关系是极为复杂的,往往很难用物理力学方法和先进的数值计算方法来确定,即它们之间的关系是一种模糊关系。因此,应用模糊数学原理,可以对大坝的原型监测数据进行模糊分析。本部分在对模糊数学基本原理简要介绍的基础上,分别用聚类分析法、似然推理法和综合评判法对大坝的位移及安全度进行分析,并建立预测模型,运用模糊数学理论对大坝原型结构进行模糊可靠度分析。

### (四) 确定性模型和混合模型

用统计分析法建立统计模型,用灰色系统理论建立预测模型,用模糊数学建立监控模型。这些模型的基本特点是利用实测资料,并将效应量作为随机变量或随机过程,应用上述方法,建立各种数学模型,从本质上讲,它们是经验模型。当监测资料不包括荷载(如水位、温度等)发生的极值或监测资料系列较短,那么由这些资料建立的数学模型将难以用于监测;对大坝的工作性态不能从力学概念上加以本质解释;由于随机因素的影响,这些模型的外延预测时间较短,精度较低。针对上述问题,该部分研究了混凝土坝的变形、应力以及土石坝的渗压的确定性模型和混合模型。包括建立模型的基本原理,其中侧重研究水压分量和温度分量的计算方法,以及该值与实测值拟合的原理,分单测点和时空分布的确定性模型和混合模型,给出了其在三峡、龙羊峡、佛子岭、碧口等工程应用的实例。

### (五) 施工期特殊监控模型

从坝基开挖到坝体浇筑经历了开挖卸载、加载及其相互作用的复杂过程,对坝体位移和应力有显著影响。然而,由于施工干扰,常常造成监测系统不到位,不能监测这些影响量,也就无法捕捉位移的初始值,从而难以分析大坝和坝基的位移全过程,这将影响大坝安全监测的准确性。为了对大坝和岩基施工期的工作性态和安全状况作出及时的定量评



价,并为大坝蓄水、竣工验收提供科学依据,深入开展大坝和岩基施工期的变形分析是十分必要的。为此,以三峡大坝为例,选取地质条件复杂并有代表性的泄洪2#坝段,详细模拟分析了坝基开挖卸载过程中岩基回弹的时间效应、坝体混凝土浇筑加载过程中岩基和坝体压缩变形的时间效应以及卸载和加载共同作用的时间效应,从而获得了岩基和大坝在施工期的位移变化的全过程以及大坝变形的初始值,以供大坝安全监测参考。

#### (六) 拱坝坝肩稳定性监控的确定性监控模型和突变模型

拱坝失事大部分是由于坝肩失稳引起的,尤其是高拱坝,监控大坝安全主要是监控坝肩是否稳定。为此,在总结以往坝肩稳定分析方法的基础上,依据监测资料,研究了建立坝肩稳定分析预测模型以及用突变理论判别坝肩稳定性的方法。其中,在已知坝肩最不利滑动以及滑移方向的情况下,针对坝体埋有足够的温度计,应用载常数建立坝肩稳定分析预测模型。在坝肩埋有位移测点并可获得位移实测值的情况下,首先建立位移分析模型,然后应用突变理论导出稳定分析判据,据此判别坝肩是否稳定。以龙羊峡重力拱坝左坝肩最危险滑动面稳定分析为例,检验了该方法的可行性,经分析,所得结论与有限元法分析和模型试验结果一致。

#### (七) 岩土边坡稳定分析的突变模型

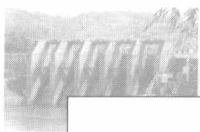
库区和坝址的岩土滑坡是严重的地质灾害,它直接影响大坝及其下游的安全。因此,岩土边坡稳定性分析和监控也是大坝安全监控的重要内容。影响岩土边坡稳定的因素十分复杂,如滑坡的几何形状、参数和影响因素等,使有的分析方法和模型有其局限性。岩土边坡的原位监测资料,包含了所有外因和内因共同作用的真实效应,其分析成果,用于岩土边坡的稳定性分析和预测,有不少成功的实例。然而,以往的分析方法主要用位移变化趋势作为稳定识别的依据,因此,难以从中提取更多的信息,为滑坡失稳分析提供依据。为此,在吸收以往研究成果的基础上,研究了利用岩土边坡的原位监测资料,应用分形几何理论、Lyapunov 函数和 Lyapunov 指数对岩土边坡的稳定性进行分析和预测,从而,在岩土边坡的原位监测资料中得到更多信息,为分析岩土边坡的稳定性提供新的途径。应用这些方法对碧口水电站库区的滑坡体的稳定状况进行了分析,得出了该滑坡的不稳定程度很低,即滑坡体属缓动式低速滑坡,其与实测资料分析的结果是一致的。同时,这些方法可以较简便地判别岩土边坡体的稳定性,从而,当一旦出现滑坡时可以为领导决策人畜撤离方案提供依据。

## ■ 二、大坝及坝基的反分析和变形监控指标拟定的理论和方法 ■

大坝工作条件极为复杂,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;稳定用刚体极限平衡理论等)、计算荷载工况(如温度和扬压力等)、施工质量、地质条件和老化等不确定因素的影响,使大坝设计的结构状态与实际有差距。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、荷载工况等。然后,用结构分析和置信区间法等拟定大坝变形监控指标。

### (一) 反演分析

应用系统识别理论,以上述建立的数值统计模型、确定性模型和混合模型分离的各个



分量(水压、温度、时效等)为依据,通过计算力学(主要是有限元法)模拟上述荷载和徐变的各个分量,两者比较,借以反馈和校准计算模型、计算参数等。包括:①计算模型反分析,包括边界(即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;②对有限元计算成果(位移和应力)进行反演优化处理;③用建立的大坝及岩基、计算参数的测点和空间位移场的反分析模型,反演坝体弹性模量和岩基与库盘岩体的变形模量和粘性参数,坝体混凝土的线膨胀系数、导温系数、导热系数、放热系数、绝热温升和拱坝温度荷载计算公式,断裂韧度和纵缝等价摩擦系数等;④对土石坝材料的 Duncan-Chang 模型的 8 个参数(主要是  $K$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $D$ )和徐变度等进行反演;⑤对混凝土坝的渗流扩散系数和土石坝防渗体的渗透系数等也作了反演。通过以上反演,为反馈分析提供准确的计算模型和参数。

## (二) 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归纳总结,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。①计算工况的反馈,基于裂缝是混凝土坝主要病变的特点,根据裂缝产生的时间和成因,将裂缝分为由水化热引起的施工缝(第一类裂缝)、灌浆等引起的施工期裂缝(第二类裂缝)以及运行期荷载作用和老化产生的裂缝(第三类裂缝)。由于第三类裂缝的产生和扩展影响大坝的安全,为此,本书重点研究这类裂缝的产生和扩展的机理,以及裂缝稳定的控制荷载。②渗流影响的反馈分析,在坝踵附近由于渗入混凝土孔隙中的水的湿胀作用,引起坝踵的湿胀应力,为此分析了湿胀应力的计算方法,同时研究坝基应力场与渗流场的耦合分析以及渗流作用的坝体与坝基的应力场。③实际安全度的反馈分析,基于监测资料,建立强度、抗裂和稳定的可靠度分析方法,分析大坝现状的实际安全度。

## (三) 拟定大坝及坝基的变形监控指标

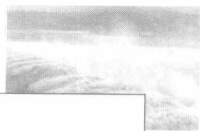
首先基于混凝土坝的设计和监测规范,对混凝土坝的三级监控指标进行定义,并建立了相应的定量指标,提出了用小概率法和结构分析法拟定坝顶和坝基水平位移的监控指标。其中小概率法是基于实测资料,用统计学拟定;结构分析法是应用反演分析所得到的计算模型、计算参数以及控制荷载等,用粘弹性、粘弹塑性和大变形等理论拟定。

# ■ 三、大坝安全综合评价专家系统 ■

基于设计和监测规范,融汇坝工理论、数学力学、人工智能、现代计算等理论和方法以及技术,依据实测资料、正反分析成果以及专家知识等,开发大坝安全综合评价专家系统。系统由综合推理机、知识库、方法库、工程数据库和图库(简称“一机四库”)组成,并在计算机上实现对监测资料和有关安全的设计、施工、运行资料以及专家知识进行全过程的管理,对大坝安全进行全过程的分析和评价,以及评价大坝的安全级别。

## (一) 功能

根据大坝安全的需要,该系统有实时分析评价大坝安全状况(简称“实时分析”)、综合评价大坝安全状况(简称“综合评价”)的功能。其中实时分析的主要功能是发现异常征兆,并对其进行成因解析,为辅助决策提供技术支持,以实时分析和评价大坝的安全状况;



综合评价是为大坝安全定期检查(一般为5年一次)提供依据,对大坝安全级别(正常坝或一类坝、病坝或二类坝、险坝或三类坝)作出综合评价,以缩短定期检查的时间。

## (二) 系统结构、组成和主要内容

主要由总控和“一机四库”组成。其中:①总控控制输入、系统运行和输出。②知识库,“实时分析”的知识库由时空分析、力学规律、监控模型、监控指标、日常巡查和关键问题等六大评判准则及其权重分析,对监测值进行评判;“综合评价”的知识库包括工程等级、设计标准、强度、稳定、原型工作性态、施工质量、运行和库区滑坡等八大评判准则及其权重分析,以识别大坝的各项安全标准。③综合推理机,“实时分析”的综合推理机依据知识库的评判结果识别异常值,并对其进行成因分析和反分析,对疑难杂症进行综合分析和评价,对结构异常或险情提供辅助决策的建议;“综合评价”的综合推理机依据知识库的评判结果,评价大坝的安全级别,对病坝(或二类坝)、险坝(或三类坝)提出控制水位的建议。④工程数据库,由工程档案库、原始数据库、整编数据库和生成数据库组成,对监测资料以及有关安全的设计、施工和运行资料及专家知识进行管理。⑤方法库,包括监测资料处理和正反分析软件、结构和渗流分析软件以及综合评判等各类程序。为处理各类监测资料,建立各类监控模型、力学规律、监控指标以及洪水复核、大坝的强度和稳定复核提供有关分析程序。⑥图库,包括各类图表和图像的管理软件,为管理工程数据、“实时分析”和“综合评价”等提供优良的图形图像界面。

这里要指出的是,因工程需要,有时将名称定为在线监控及反馈分析系统,其基本原理与专家系统相同,其中在线监控由知识库完成,反馈分析由综合推理机完成。

## 第二章

### 变形和应力的统计模型

#### 第一节 概 述

大坝与坝基的监测物理量大致可以归纳为两大类:第一类为荷载集,如水压力、泥沙压力、温度(包括气温、水温、坝体混凝土和坝基的温度)、地震荷载等;第二类为荷载效应集,如变形、裂缝开度、应力、应变、扬压力或孔隙水压力、渗流量等。通常将荷载集称为自变量或影响因子(用  $x_1, x_2, \dots, x_k$  表示),荷载效应集称为因变量(用  $y$  表示)。

在坝工实际问题中,影响一个事物的因素往往是复杂的。例如大坝位移,除了受库水压力(水位)影响外,还受到温度、渗流、施工、地基、周围环境以及时效等因素的影响;扬压力或孔隙水压力受库水压力、岩体节理裂隙的闭合、坝体应力场、防渗工程措施以及时效等影响。因此,在寻找因变量与因子之间的关系式时,不可避免地要涉及到许多因素。实践证明,仅靠理论分析计算,很难得到与实测值完全吻合的结果,但脱离基本理论的分析,也难以解析工程中存在问题的力学机制,因此两者是相辅相成的。合理的方法是根据对大坝和坝基的力学和结构理论分析,用确定性函数和物理推断法,科学选择统计模型的因子及其表达式,然后依据实测资料用数据统计法确定模型中的各项因子的系数,建立回归模型。借此推算某一组荷载集时的因变量,并与其实测值比较,以判别建筑物的工作状况,对建筑物进行监控。同时,分离方程中的各个分量,并用其变化规律,分析和估计大坝与坝基的结构性态。

原位监测资料分析常用多元回归、逐步回归、加权回归、正交多项式回归和差值回归等方法,其基本原理和计算公式详见参考文献[7]。

#### 第二节 混凝土坝变形测点的统计模型

##### ■ 一、变形统计模型的因子选择 ■

众所周知,在水压力、扬压力、泥沙压力和温度等荷载作用下,大坝任一点产生一个位移矢量  $\delta$ ,其可分解为水平位移  $\delta_x$ ,侧向水平位移  $\delta_y$  和竖直位移  $\delta_z$ ,见图 2-2-1。

按其成因,位移可分为三个部分:水压分量( $\delta_H$ )、温度分量( $\delta_T$ )和时效分量( $\delta_\theta$ ),即:

$$\delta(\delta_x \text{ 或 } \delta_y \text{ 或 } \delta_z) = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (2-2-1)$$

某些大坝在下游面产生较大范围的水平裂缝(见图 2-2-1),它对位移也有一定的影响,如果考虑裂缝的影响,则需要附加裂缝位移分量( $\delta_j$ ),那么式(2-2-1)变为:

$$\delta(\delta_x \text{ 或 } \delta_y \text{ 或 } \delta_z) = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta + \delta_j \quad (2-2-2)$$

从式(2-2-1)或式(2-2-2)看出,任一位移矢量的各个分量  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  具有相同的因子,因此下面重点研究  $\delta_x$ (以下简称  $\delta$ )的因子选择。

上述各个分量中的因子选择的基本理论和公式,详见参考文献[7],这里仅根据监测设备埋设情况,提出因子选择的原理和结果。

### (一) 水压分量 $\delta_H$ 的因子选择

在水压作用下,大坝任一测点产生水平位移( $\delta_H$ ),它由三部分组成(如图 2-2-2):库水压力作用在坝体上产生的内力使坝体变形而引起的位移  $\delta_{1H}$ ;在地基面上产生的内力使地基变形而引起的位移  $\delta_{2H}$ ;库水重作用使地基面转动所引起的位移  $\delta_{3H}$ 。即:

$$\delta_H = \delta_{1H} + \delta_{2H} + \delta_{3H} \quad (2-2-3)$$

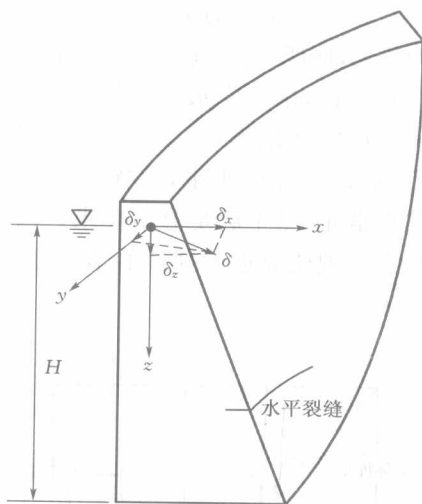


图 2-2-1 位移矢量及其分量示意图

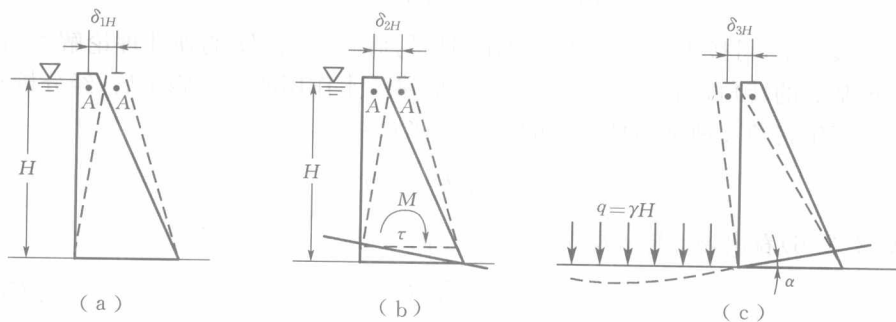


图 2-2-2  $\delta_H$  的三个分量  $\delta_{1H}, \delta_{2H}, \delta_{3H}$

下面按不同坝型,分别计算  $\delta_{1H}, \delta_{2H}, \delta_{3H}$ 。

#### 1. 重力坝

库水压力依靠悬臂梁传给地基。因此,作用在梁上的荷载  $q = \gamma H$ (即与  $H$  呈线性分布)。

(1)  $\delta_{1H}, \delta_{2H}$  的计算公式。为简化计算,将坝剖面简化为上游铅直的三角形楔形体,如图 2-2-3。在库水压力作用下,坝体和地基面上分别产生内力( $M, F_s$ ),使大坝和地基引起变形,因而使监测点 A 产生位移。应用工程力学分析和演绎,最后选择  $\delta_{1H}, \delta_{2H}$  的因子表达式分别为:

$$\delta_{1H} = \sum_{i=1}^3 a_i H^i \quad (2-2-4)$$



$$\delta_{2H} = \sum_{i=1}^3 a_i H^i \quad (2-2-5)$$

(2)  $\delta_{3H}$ 的计算公式。在上游库水重作用下,引起库盘变形,使任一监测点产生水平位移  $\delta_{3H}$  [图 2-2-2(c)]。严格地讲,推导库水重引起的位移  $\delta_{3H}$  十分复杂,因为库区的实际地形、地质都十分复杂。为简化起见,作下列假设:库底水平,水库等宽(如图 2-2-4 所示)。作此假定,基本满足分析要求。因为库盘变形引起的位移主要受靠近大坝处的地基变形的影响,而在这部分的水库可近似视为库底水平和等宽。

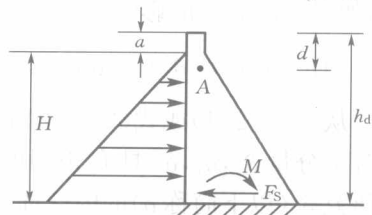


图 2-2-3  $\delta_{1H}, \delta_{2H}$  的计算简图

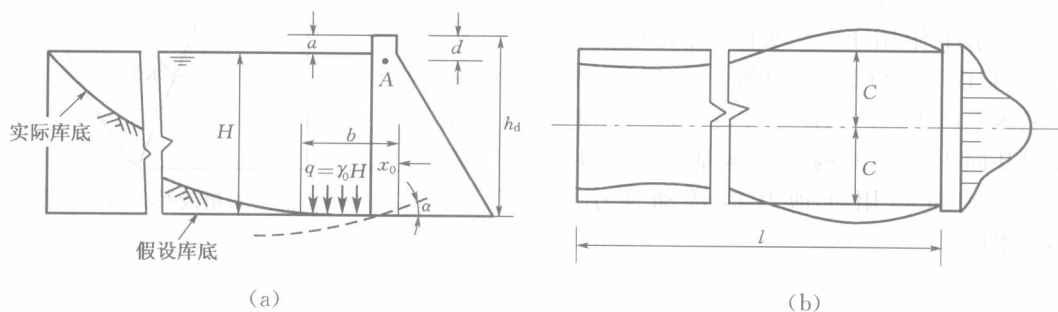


图 2-2-4  $\delta_{3H}$  的计算简图

在上述假设下,可按无限弹性体表面作用均匀荷载  $q = \gamma_0 H$  的弹性理论解答,首先求得坝踵处坝基面的转角  $\alpha$  [图 2-2-4(a)],在考虑渗流水作用的转角修正后,经分析和演绎得库基变形产生转角  $\alpha$  使坝体任一点的水平位移  $\delta_{3H}$  为:

$$\delta_{3H} = \alpha(h_d - d) \quad (2-2-6)$$

由式(2-2-6)看出,  $\delta_{3H}$  与  $\alpha$  及  $H$  成正比,即:

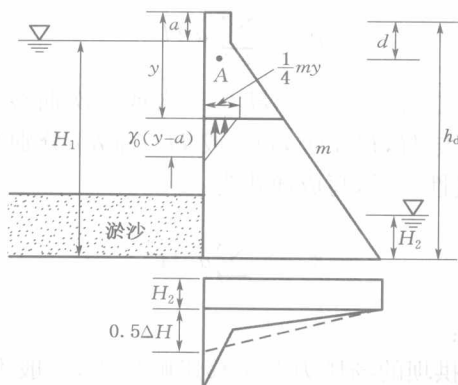
$$\delta_{3H} = \alpha H \quad (2-2-7)$$

(3) 水压分量  $\delta_H$  的表达式。通过上面分析,重力坝上任一监测点,由库水压力作用产生的水平位移  $\delta_H$  ( $\delta_H = \delta_{1H} + \delta_{2H} + \delta_{3H}$ ) 与水深  $H, H^2, H^3$  呈线性关系,即:

$$\delta_H = \sum_{i=1}^3 a_i H^i \quad (2-2-8)$$

(4) 扬压力和泥沙压力对位移的影响。扬压力为上浮力,使坝体产生弯矩和减轻自重,从而使坝体产生变形;泥沙压力则加大坝体的压力和库底压重,也使坝体产生变形。两者对位移的影响如下:

① 扬压力。坝基渗透压力可简化为上游  $0.5\Delta H$  ( $\Delta H = H_1 - H_2$ ),下游为零;浮托力在坝基面上均匀作用  $H_2$ 。坝体扬压力在上游为水深  $(y - a)$ ,在排水管处为零(见图 2-2-5)。

图 2-2-5  $\delta_H, \delta_{bH}$  的计算简图

用工程力学分析和演绎,并考虑扬压力滞后库水位,坝基扬压力引起监测点 A 的位移。选择位移监测时的库水位与监测前  $j$  天的平均库水位之差( $\Delta\bar{H}_j$ )作为因子,即:

$$\delta_H = a_f \Delta\bar{H}_j \quad (2-2-9)$$

而坝身扬压力引起监测点 A 的水平位移与上下游水头差  $\Delta H^2$  呈线性关系。同时,考虑上游水位的动态变化,扬压力要滞后库水位,有些工程采用位移监测时的库水位与监测前  $j$  天的平均库水位之差( $\Delta\bar{H}_j$ )的平方作为因子,即:

$$\delta_H = a_b (\Delta\bar{H}_j)^2 \quad (2-2-10)$$

② 泥沙压力的影响。在多沙河流中修建水库,坝前逐年淤积,加大坝体的压力和库底压重。在未稳定前,一方面泥沙逐年淤高;另一方面因淤沙固结,使内摩擦角加大,减小侧压系数。因此,泥沙压力对位移的影响十分复杂。在缺乏泥沙淤积资料和泥沙容重时,此项无法用确定性函数法选择因子。为简化计,可把泥沙对位移的影响由时效因子来体现,不另选因子。

## 2. 拱坝和连拱坝

(1) 梁或支墩的分配荷载。拱坝由于水平拱和悬臂梁的两向作用,使水压力分配在梁上的荷载  $p_c$  呈非线性变化。同样,连拱坝由于拱筒的两向作用,有少部分荷载通过拱筒的梁向作用传给地基,大部分由拱筒传给支墩,该部分荷载  $p_c$  也呈非线性变化(如图 2-2-6 所示)。因此  $p_c$  通常用水深  $H$  的二次或三次式来表达:

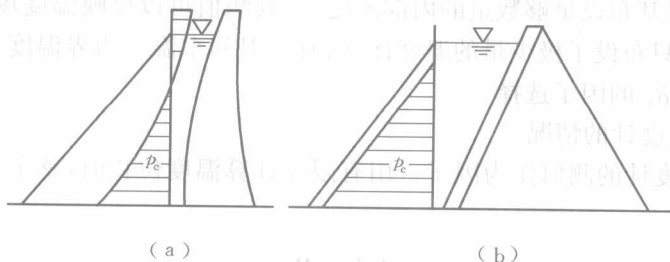


图 2-2-6 梁或支墩的分配荷载

(a) 拱坝 (b) 支墩坝





$$p_c = \sum_{i=1}^{2(3)} a_i H^i \quad (2-2-11)$$

(2) 水压分量的表达式。由于  $p_c$  与  $H$  呈二次或三次曲线关系,因此与分析重力坝的原理相同,推得  $\delta_{1H}$  分别与  $H, H^2, H^3, H^4$  (或  $H^5$ ) 而  $\delta_{2H}$  分别与  $H^2, H^3, H^4$  (或  $H^5$ ) 呈线性关系,  $\delta_{3H}$  仍与  $H$  呈线性关系,写成通式为:

$$\delta_H = \sum_{i=1}^{4(5)} a_{1i} H^i \quad (2-2-12)$$

(3) 其他因素的影响:

① 扬压力:拱坝和连拱坝的扬压力对位移影响较小,一般不考虑,若需考虑,计算公式同重力坝。

② 泥沙压力的分析和处理同重力坝。

③ 坝体变形重调整的影响。

拱坝在持续荷载作用下,坝体应力重分布产生可恢复的调整变形。根据石门拱坝的分析成果,选择测值前的月平均水深( $H_1$ )作为因子,即:

$$\delta_{4H} = \sum_{i=1}^3 a_{2i} H_1^i \quad (2-2-13)$$

3. 水压分量  $\delta_H$  的表达式

综上所述,  $\delta_H$  的数学表达式可归纳为表 2-2-1。

表 2-2-1  $\delta_H$  的数学表达式

坝型	库水压力	坝基扬压力	坝身扬压力
重力坝	$\sum_{i=1}^3 a_i H^i$	$a_f \Delta \bar{H}_j$	$a_b (\Delta \bar{H}_j)^2$
拱坝	$\sum_{i=1}^{4(5)} a_{1i} H^i + \sum_{i=1}^3 a_{2i} H_1^i$	$a_f \Delta \bar{H}_j$	$a_b (\Delta \bar{H}_j)^2$

(二) 温度位移分量的因子选择

温度位移分量  $\delta_T$  是由于坝体混凝土和岩基温度变化引起的位移。因此,从力学观点来看,  $\delta_T$  应选择坝体混凝土和岩基的温度计测值作为因子。温度计的布设一般有下列两种情况:坝体和岩基布设足够数量的内部温度计,其测值可以反映温度场;坝体和岩基没有布设温度计或只布设了极少量的温度计,而有气温和水温等边界温度计。下面分别讨论这两种情况下  $\delta_T$  的因子选择。

1. 有内部温度计的情况

(1) 用各温度计的测值作为因子。用有限元计算温度位移时,整个结构物的平衡方程组为:

$$K\delta_T = R_T \quad (2-2-14)$$

变温结点等效荷载列阵  $R_T$  为: