

数学模型与工程安全监测

Mathematical Models and Engineering Safety Monitoring

黄 铭 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书以安全监测数学模型为主要对象,结合水利工程和岩土工程安全监测工作的实践,注重近期监测模型在多测点、多测项、多分析方法等方面的发展,对监测模型构造原理、因子获取方法、因果关系的揭示、预测分析等多方面进行了系统论述;对监测分析中具有良好实践基础的数理统计理论,以及颇具发展前景的灰色理论、神经网络等数学方法及其模型进行了有针对性的介绍;同时结合多测点、多测项、特殊因果关系的研究成果,论述了数学模型在坝体、坝基、边坡、海堤等工程监测分析中的应用方法及研究进展。

本书可作为水利及岩土工程领域从事安全监测及工程管理工作科技人员的参考用书,也可用作有关专业的研究生学习教材或供其研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

数学模型与工程安全监测/黄铭著. —上海:上海
交通大学出版社,2008

ISBN978-7-313-05014-4

I. 数... II. 黄... III. 水利工程—安全监
察—数学模型 IV. TV513 022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 170054 号

数学模型与工程安全监测

黄 铭 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:11.5 字数:215千字

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

印数:1~2050

ISBN978-7-313-05014-4/TV·015 定价:25.00元

版权所有 侵权必究

前 言

安全监测工作贯穿水利和岩土工程的设计、施工、运行管理整个过程,是掌握被监测体实时状态、预测其将来发展动向、保证工程安全必备和有效的手段。在获得被监测体自身状态指标及相关外界影响因素的信息后,必须进行有效的分析,以揭示监测数据中蕴涵的规律。作为监测分析的主要工具,安全监测数学模型在水利及岩土工程中得到广泛重视。由于监测数学模型能有效服务于几乎全部的安全监测目的,它已成为监测资料深入分析不可缺少的组成部分,也是深入研究的重点内容。

本书以安全监测数学模型为对象,立足于水利工程、岩土工程的研究应用基础,并注重于近期监测模型在多测点、多测项、多分析方法等方面的发展动向,系统论述了监测模型构造原理、因子获取方法、因果关系的揭示、预测分析等多方面内容。

书中对经典的大坝监测数学模型结构和建立方法、各自特点及其共性进行了概括分析;介绍了与确定性模型、混合模型建模相关的有限元基本理论;结合工程力学分析原理,阐述了单点模型、分布模型、多因变量模型影响因子的选取过程;论述了以遗传蠕变原理为基础,对蠕变影响明显的状态量构建监测模型的方法;针对海堤这种特殊水利建筑的工作特点,首次较为系统地论述了海堤监测模型构造的特色、主要影响因素的选择及建模方法。

书中针对在监测分析中具有良好实践基础的数理统计理论,以及颇具发展前景的灰色理论、神经网络等数学理论进行了系统的介绍,并结合多测点、多测项、特殊因果关系的研究进展,详细论述了这些方法在工程监测分析中的应用及发展。其中,在常规统计模型基础上,对多因变量回归模型、多元随机变量分布密度、多因变量监测模型对应的置信域空间进行了较详细的论述。在灰色理论方面,介绍了包括 $GM(1,1)$ 、 $GM(N,h)$ 、 $GM(1,1,t)$ 、非线性 GM 模型在内的多种模型,根据模型的特色和监测分析的需要,区分含特殊因果关系和不含特殊因果关系的情况,详细论述了模型的建立过程和实际应用方案。对于神经网络部分,在说明神经网络和监测分析关系的基础上,主要介绍了传统的 BP 模型和新型的 GRNN 模型,并结合监测实践建立了相应的监测模型。

本书涉及坝体、坝基、边坡、海堤等工程,注重将安全监测数学模型构造的专业理论基础、数学方法与工程实际相结合,体现在以下各方面:从物理学基础出发,

分析模型的构造和因子的选择;对书中介绍的多种数学方法,着重给出相关的、系统的数学原理,便于学习掌握;并根据监测工作需要和特点,给出了各种模型在工程中分析、应用的方案,其中大多是近些年的研究成果。书中给出了大量监测模型实例,对模型构造、建模计算、分析要领等内容作了具体阐述,并对多种模型的特点、适应性及注意事项进行了分析。

全书共分7章,各章主要内容如下:第1章阐述工程安全监测的作用,监测工作的主要内容,安全监测数学模型的作用,并归纳了监测模型的主要构造方法。第2章叙述大坝安全监测模型的基本构造、基本因子的获取,三大类模型的基本结构,以及多因变量监测模型的基本结构。第3章重点论述统计回归模型的建立,包括建模所需的主要数理统计知识,统计模型的建立求解。其中不仅涉及传统的单因变量回归算法和单因变量统计模型,并推广介绍多因变量回归算法,以及多因变量回归监测模型的建立。第4章介绍确定性模型和混合模型的建模思路和求解过程,以及所涉及的有限元基本理论。第5章以监测模型的因果关系分析为对象,阐述了合理因果关系在监测模型中的重要性;详细论述了分布模型的因子构造和模型建立,总结了传统单因变量单测点监测模型、单因变量多测点监测模型、多因变量单测点监测模型和多因变量多测点监测模型四种类型;介绍了考虑遗传蠕变性质的监测模型的构造和实施办法;针对海堤特殊水利建筑的工作特点,叙述和分析了海堤监测模型构造的特色及建模方法。第6章介绍灰色模型理论及其在监测模型中的应用,阐述了与监测模型相关的灰色理论基础,以及含因果性质和不含因果性质的灰色监测模型的建立过程。第7章分析神经网络基本原理及其在监测分析工作中的应用特点;具体介绍了安全监测中应用最广的BP模型和新型的GRNN模型求解计算,以及相应的监测模型建立方法。

本书可为坝体、坝基、边坡、海堤等工程的监测提供系统的分析、建模指导;书中对涉及的主要数学理论进行了有针对性的介绍,便于从事有关安全监测工作的科技人员学习、参考和查阅;同时,本书还论述了安全监测数学模型在多测点多测项建模,与多种数学分析方法的结合,以及包括遗传蠕变、海堤特殊工况在内的因果关系分析等方面最近的研究成果,这有助于相关工作的进一步研究和发展。

本书可供水利、岩土以及相关专业监测领域管理和科研人员参考及指导之用,也可作为有关专业的博士研究生、硕士研究生的学习教材和研究参考。

本书得到国家自然科学基金项目(编号50609014)和上海市重点学科建设项目(编号B208)资助。

本书是作者多年研究成果的汇总,部分内容也是集体工作的结晶,作者的一些研究生也参与了相关工作,他们是陈亮、潘翔、王跃威、张江风等。同时,作者对给予本书以帮助的李珍照教授、陆述远教授、葛修润院士、刘俊博士表示感谢!

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程建设及安全	1
1.2 安全监测工作及作用	3
1.3 资料分析及安全监测数学模型	6
1.4 阅读本书的几点建议	9
第 2 章 大坝安全监测数学模型基础	10
2.1 大坝安全监测模型概述	10
2.2 三大类模型的基本结构	19
第 3 章 统计回归方法及监测模型	27
3.1 数理统计基本概念	27
3.2 单因变量回归模型	33
3.3 多因变量回归模型	44
3.4 建模算例	53
第 4 章 有限单元法与监测模型	58
4.1 有限单元法基本理论	58
4.2 工程有限元计算与监测模型	76
4.3 土石坝填筑期监测模型	81
第 5 章 特殊因果关系模型	83
5.1 分布模型因子形式	83
5.2 基于遗传蠕变特性的监测模型	96
5.3 海堤监测模型的影响因素分析	105
第 6 章 安全监测灰色模型	122
6.1 灰色系统理论基本概念	122

6.2	GM(1,1)模型及监测应用	126
6.3	GM(1,1,t)模型的应用	138
6.4	GM(N,h)模型及其监测应用	140
6.5	非线性 GM 模型	146
第 7 章	安全监测神经网络模型	151
7.1	神经网络基础	151
7.2	BP 神经网络	156
7.3	GRNN 模型	168
参考文献	174

第 1 章 绪 论

1.1 工程建设及安全

保障工程安全是关系到生命财产、经济建设及工程建设进展的重要工作,随着社会的发展和工程建设水平的逐渐提高,诸如水利枢纽、边坡、堤防、基坑等一些工程的规模逐步扩大,对其安全性要求也越发突出。

在水利枢纽工程建设方面,我国有着悠久的建设历史,也创造了许许多多辉煌的业绩和成就。修建于2000多年前的都江堰工程,至今仍在发挥巨大作用,而截断长江的三峡工程,正创造着新的工程奇迹。如今我国的水利枢纽建设发展迅速,在大坝数量上,我国已建成了85000多座各类大坝,其中高于100 m的大坝约80座,库容大于1亿 m^3 的大型水库有400多座,大坝数量列世界第1位。水电装机容量在1949年是36万kW,到2000年增加到7297余万kW,近几年,包括三峡工程在内的大型工程投入运行,水电装机容量更是再上一层台阶。

随着近期许多大型水利枢纽工程的规划、建设和运行,工程规模相比以往有着显著的扩大。以三峡工程为例,大坝为混凝土重力坝,最大坝高175 m,轴线全长2335 m,总库容393亿 m^3 ,坝后电站总装机容量1820万kW,其主体建筑物土石方开挖量、混凝土浇筑量、金属结构量、大坝坝体总混凝土量在世界已建和在建的水利枢纽中位于首位。工程建成后的运行不仅与长江防洪密切相关,而且工程建筑物本身安全与否关系着其下游宜昌、葛洲坝乃至更远范围内长江两岸的安全。同时,我国水电能源开发布局正进一步向西南和西北的大江、大河及高山峡谷转移,其中高坝众多,如长江上游的溪洛渡、白鹤滩,澜沧江上的小湾,雅砻江上的锦屏一、二级,乌江上的构皮滩等,坝高均在250 m以上。

这些水利枢纽在防洪、供水、灌溉、发电、水产养殖、改善环境、发展旅游等方面具有巨大的社会效益、经济效益和环境效益,但发挥其效益的一个重要前提是保障安全。随着这些工程规模的扩大,以及由于它们所在位置工程的地质条件十分复杂,自然灾害频发,地震震级高等原因,其工程安全性更显重要。对水利枢纽而言,上游水头荷载的增加,水库库容的增大,都对挡水建筑物的应力、稳定状态提出了更高要求,而库区的稳定问题也更为突出。一旦失事,其严重后果不堪设想。

在坝工历史上,有些重大事故一直给人们以深刻的警示。例如,著名的法国马

尔巴塞拱坝失事。这座修建于1954年高66.5 m的拱坝,于1959年12月2日晚突然垮坝,致使400余人丧生,在下游12 km处的费雷久城即刻成为废墟。又如1963年10月9日,当时世界上最高的一座拱坝,坝高262 m的意大利瓦依昂拱坝水库区发生大规模的山坡滑动,高达125 m的洪水漫过坝顶,横扫下游河谷内一切建筑物,致使大坝和电站报废,人员伤亡近2 000人。1994年,国际大坝委员会(ICOLD)坝失事统计解释委员会一次对坝失事调查表明,17 406座于1986年底按照ICOLD标准而注册的大坝(不含中国的大约85 000座坝和美国的高度在15~30 m之间的坝)中已有212座失事。

我国2003年公布的数据表明:“1991年以来,全国共发生235座水库垮坝事件。从垮坝原因看,147座是因发生超标洪水导致水库漫坝失事(63%);71座是因工程质量差、抢险不力造成垮坝失事(30%);其余7%的垮坝主要是管理不到位、措施不得力造成的。”从垮坝水库的规模看,小型水库233座(占99%),中型水库2座。可见中小型水库的安全同样不容忽视,而且,从防洪度汛工作来看,小型水库往往是水库安全度汛工作的薄弱环节,其中出现的问题应该引起大中型大坝安全管理工作人员的重视和借鉴。

在边坡工程方面,随着矿山开发、水利建设、城市发展等项目的进行,它往往是其中的重要环节,经常会形成有超百米的临时或永久的边坡。例如,五强溪水电站坝址左岸形成的边坡高度在130~150 m之间;清江隔河岩水电站厂房人工开挖形成的台阶式边坡高达185 m,长350 m;我国露天矿山规模宏大,最终设计边坡高度一般为300~500 m,有的已达700 m,冶金部重点矿山大冶铁矿整个东露天采场上口尺寸为2 250 m×1 000 m,南北帮采深将分别达390 m和420 m,是典型的高陡深凹露天大型矿山。

大小边坡失稳事件数目相对较多,小事故可以造成工期延误,财产、设备损失,大事故则可能造成人员伤亡,甚至改变设计初衷。天生桥二级水电站位于中国广西壮族自治区隆林县及贵州省安龙县的界河——南盘江上。水电站首部枢纽布置在天生桥峡谷出口的坝索,利用从坝索坝址至厂房长约14.5 km的河段内181 m集中天然落差,裁弯取直,开凿引水隧洞引水发电。1985年,在该工程水电站进水口明渠开挖时,发生边坡坍塌,造成48人死亡;此外,该工程电站厂房因边坡稳定问题几度改址。1989年,位于越西县的漫滩水电站在左岸坝肩开挖时,发生10.6万 m^3 滑坡,工程被迫中断,并导致更改枢纽的原布置方案。又如,大冶铁矿狮子山北帮A区在1990年4月30日发生6 000 m^3 体积滑坡,而后,在1996年7月1日再次发生较大规模的滑坡,滑坡体垂直高差240 m,总体积约90 000 m^3 。可见边坡事故影响很大,所以其安全历来倍受重视。

再以海堤工程为例,海堤是为防御台风、抵御高潮水、保卫堤内陆地安全而在

海岸线修建的重要水利建筑,在我国部分地区(如上海、浙江)也称它为海塘。我国有约1.8万 km 的大陆海岸线,分别濒临黄渤海、东海、南海三个海区,现有总长度约为1.2万 km 的各类不同标准的海堤工程,数量惊人。

作为以防洪为主要目的的海堤,一旦失事,后果也十分严重。随着我国经济建设的发展,许多沿海城市和地区成为改革开放的前沿,海堤的安全直接关系到工农业生产、金融贸易、社会秩序的正常与安宁等诸多方面。对于海堤的安全,虽然从古至今都给予其极大关注,但由于往往修建年代久远,运行时间长,加之设计施工能力所限,而且所处地理位置自然灾害突发性强、破坏力大,因此海堤安全事故的发生较为频繁。

据统计,1845~1993年在天津沿海共发生28次较大的风暴潮灾,1985年8月,受9号台风的影响,渤海湾出现的强潮使天津的海堤几乎全线漫溢。1992年9月,由于16号强热带风暴的袭击,使天津沿海遭受了建国以来最严重的风暴潮危害,有100 km海堤漫水,40处决口,新港码头、客运站被淹;1200公顷养虾池被冲毁,盐场的海堤被冲没,损失原盐30万吨,造成的直接经济损失达4亿元。浙东沿海受台风侵袭十分频繁,仅1974年的13号台风在普陀区就造成83条海堤受到严重破坏。1994年8月,在强烈的风、潮、浪及暴雨的综合作用下,台州、温州两地区沿海暴雨倾盆,潮水暴涨,致使许多标准海堤溃决,民宅毁塌,良田淹没。再如,2004年9月16日,第6号热带低压风暴潮造成福州、莆田、泉州等地30800公顷农田受淹,1400间房屋损毁,损毁海堤508处,长16.1 km,超过百万人受灾,直接经济损失达4.8亿元。2006年的1号台风“珍珠”造成汕尾市陆丰碣石、甲子、上英、海丰辟门、大湖等地多处堤坝出现决口、漫堤等险情,海丰大湖镇有600 m防护林被海潮冲毁,海面上的养殖网箱损失惨重。

从以上叙述可见,随着社会进步和经济建设的发展,水利、岩土等工程的安全问题越加重要,有必要从各个环节加强安全意识,提高安全状态识别及安全预测技术,以保证工程建设、生产的顺利进行,减少因不安全问题造成的人身、财产损失。

1.2 安全监测工作及作用

工程安全课题涉及的范围很广,要确保工程安全必须从全方位、多环节加强工作。一般而言,大型的水利工程、岩土工程要经历勘探、设计、施工、运行管理等几个过程,所有这些过程都与安全息息相关。从理论上说,如果工程影响范围内的地质构造、初始应力情况、地质材料的物理力学特性等因素能通过勘探、试验准确获取,同时设计理论方法正确,计算准确,施工合理无误,运行管理得当,那么工程安全应该是有保障的。当然,一些突发事件或无法抗拒的自然灾害还难以包括在这

些技术理论安全保障之列。即便如此,实际上,受到现有技术水平的限制,人们还无法达到上述水平和满足这些要求,而且在很多方面还相差甚远。

例如,天然岩体不仅具有显著的不连续性、非均匀性和各向异性,而且受到地应力和地下水等作用,这使得其状态十分复杂。而大型边坡开挖、地下洞室建设都使岩体受荷情况发生改变,并扰动了自然条件下的地应力(初始应力)场。合理的计算模型要求能真实反映岩体物理力学性质,以及地应力释放和重分布时的岩体性状,但目前的技术手段还无法做到。

类似的问题也出现在水工大坝的坝基和坝肩。另外,对混凝土大坝的主要建筑材料混凝土、土石坝主要建筑材料土石体而言,对它们的力学性质的了解和模拟至今尚有许多未曾解决的难题。加之水库大坝必然与水体相关,而水文、气象、水力学及水工建筑渗流性质等都还不能全面、准确予以掌握。海堤的运行环境极为特殊,堤身的安全状态受到风浪潮等海洋环境影响,而这些影响因素本身规律十分复杂,并含有大量随机因素,至今人们对它们的认识还是很有限的。同时,工程施工过程中的不定因素众多,又与前期勘测设计密切相关,安全性控制的难度很大。

由此可见,制约工程安全的环节、因素众多,在现有水平下,仅仅在勘探、设计等方面尽力做到安全考虑是不够的,工程施工、运行过程中的状态到底如何,设计计算是否合理,还须增加措施加以掌握、验证。现场安全监测及资料分析在此领域担负着重要角色。自从人们认识到安全监测的重要性以来,它已发展成为水利工程、岩土工程等建设领域不可缺少的重要组成部分。

安全监测工作的目的在于掌握和预测被监测体的状态,及时发现可能存在的问题,验证和提高设计、施工水平,指导运行调度及维护抢险。具体作用体现在:

- (1) 实时及定期掌握被监测体的工作状态,评价安全性。
- (2) 根据已测资料预测被监测体下一步或近期工作状态,并给出安全预测评价。
- (3) 发现异常现象情况和可能存在的不安全隐患,及时报警,并指导调整施工、运行、生产和维护,在出现不良后果之前采取补救措施,在出现险情时指导抢险救灾。
- (4) 以实测状态检验、提高现有的勘探、设计和施工水平,分析比较实测状态和设计计算结果,反演重要参数(如材料力学参数、初始应力场等),对现有技术水平条件下的假设理论、计算方法和施工过程等进行校核,并对其中不完善的地方加以改善,从而提高工程建设水平及安全性。

国内外工程界对安全监测都予以极大重视,许多国家成立了相应的专门机构,例如,法国在1966年设立大坝安全管理常务技术委员会,前苏联成立电站水工建筑物安全监控委员会,我国有国家电力监管委员会大坝安全监察中心(2004年成

立)等机构。一些国家为安全监测工作制定了相关标准或规定,较早的如前苏联颁布的《电站水工建筑物安全运行监视条例》(1973)、《水电站水工建筑物观测小组工作条例》(1976),美国国会在1972年通过了《国家大坝安全法令》,又于1996年通过了建立“国家大坝安全计划”的104—303号公共法案。2001年“9·11”恐怖袭击事件后,美国对大坝的安全防护认识有了进一步的提高,在通过的《国土安全法》中就涵盖了与水利建设相关的条文。2002年12月,美国总统布什又签发了《水坝安全和保安法案》。我国制定了《混凝土大坝安全监测技术规范(试行)》(SDJ336—89)、《土石坝安全监测技术规范》(ST60—94)等规范,一些建筑施工类规范如《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GBJ86—85)中也有相关监测规定。1991年3月22日,国务院发布了《水库大坝安全管理条例》,2004年12月1日,国家电监会公布了《水电站大坝运行安全管理规定》。

安全监测贯穿于工程的设计、施工和运行整个过程,整体上可分为以下几个方面工作内容:

(1) 制定监测方案,进行监测仪器选型。主要任务包括:设计满足工程需要、符合工程特点的监测系统总体布置方案;选择制定仪器设备清单;提交监测系统施工详图;提出监测系统施工埋设安装技术要求;规定各监测次数及频率;提交监测工程概算等。

(2) 监测仪器的埋设安装。主要工作包括监测仪器的制造、购置、检验、率定、埋设、安装、调试和维护。由于仪器埋设往往与坝体浇注、边坡或洞室开挖支护等工作同步进行,并存在相关制约,所以应特别注意做好准备工作和协调工作,即使在复杂的现场施工环境下,也必须保证达到设计要求。

(3) 监测资料采集与管理。仪器埋设安装成功后即进入资料的观测采集,根据工程进展一般分为施工期、运行期,另外,由于有些阶段十分特殊和重要(如水库首次蓄水期),往往对它们进行专门划分和对待。监测资料采集的主要任务是获取实测资料,实测资料应尽量做到真实、精确、延续性好。由于水利工程建设和运行时间一般都很长,监测资料的采集工作有时可长达数十年之久,所以对监测资料应及时做好整理、整编工作,并妥善保存管理。

(4) 监测资料的分析与反馈。监测资料不加以分析利用则成为废品,不仅造成资源及经济的浪费,而且无法充分发挥监测作用,难以达到发现问题、反馈信息的作用。所以监测资料分析工作从监测数据获得之始就应开始,并保证实时性、延续性。这一阶段涉及的主要工作内容包括:拟合识别被监测体的状态;对被监测体安全性进行评价;预测未来状态;反演力学参数;反馈监测信息和分析结果,以验证、改进设计和施工,指导运行调度及维护抢险等。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

1.3 资料分析及安全监测数学模型

在获得监测数据后,必须进行资料分析。资料分析可以分为定性分析与定量分析两部分。

定性分析通常包括:对实测资料中有代表性的主要测值信息进行基本特征值统计,例如,计算某时段(或某区域)的最大值、最小值及相关时间,平均值、极差、样本方差等;进行对比分析,如将新监测值与历史同条件测值进行对比,与历史最大、最小值和平均值比较,与近期数值比较,与邻近测点数值比较,与相关项目数值比较,等等;绘制实测值变化曲线及相关测项对应曲线,并以这些为基础对被监测体的状态进行初步定性识别,同时可考察测值的真实性,识别由仪器失效、观测失误等因素造成的明显不合理资料。

定量分析则需要从力学、数学等方面入手,从定量角度较为深入、详细地揭示资料所含的信息,描述内在规律,进行预测、评判和反演等。

水利枢纽建设中的安全监测工作开展较早,发展也较为系统,中华人民共和国水利部发布的《土石坝安全监测资料整编规程》(SL169—96)中,在“4.1分析方法”里,就包括有“4.1.1比较法”、“4.1.2作图法”、“4.1.3特征值统计法”、“4.1.4数学模型法”,它们不仅代表了土石坝安全监测定性分析和定量分析中基本而重要的工作内容,实际上也是相关工程监测资料分析的主要内容,只是对不同工程类型而言,具体的分析方法、分析对象会有所不同。总体来说,监测资料分析应用、研究工作都是一个由定性分析向定量分析发展的过程,并处在进一步研究、发展阶段。

作为资料分析的主要方法和定量分析的主要工具,数学监测模型在水利工程、岩土工程中得到广泛应用。工程人员借助监测模型可以对被监测状态的变化规律进行定量描述,在一定情况下,可以揭示状态量与影响因素间的定量关系,还可以借助模型进行反演分析,而在监测模型基础上的预测已成为目前应用最广的预测方法。正是由于监测模型能有效服务于几乎全部的安全监测目的,它已成为深入分析监测资料不可缺少的组成部分,也是深入研究的重点内容。

在水利和岩土工程相关监测工作中,有多种构造监测模型的思路,这里以应用最广的变形监测模型为例,阐述几种主要的构造思路。

工程安全监测项目众多,主要包括工作条件监测(如水位、潮位、水温、降雨、气温、施工进度等),变形监测(如外部水平、垂直位移,内部水平、垂直位移,倾斜,裂缝及接缝,土体固结,等等),应力应变监测(如衬砌、支护应力,锚杆荷载,混凝土应力应变,等等),渗压渗流及地下水监测(如渗压、渗流量,地下水位,等等),以及混凝土温度、坝基温度、声学测量、视频监控等。其中,变形以其测量精度高、观测方

便、资料齐全、能直接反映被监测体状态等特性而成为监测及分析的重点,其应用范围与分析水平都处于各观测项前列,是分析被监测体规律、掌握动态、评价安全的主要凭据。变形监测模型的构造主要有如下几种方式。

第一种,基于试验结果构造模型。利用试验获得的数据,本身可以建立性态模型,而且由此揭示的规律可供实测资料建模使用。在对岩石蠕变的试验研究中,学者们对许多材料进行了试验,通过观测到的变形情况及相应数据,提出了一些描述岩石蠕变特性的模型,如,格里格斯对石灰岩蠕变的描述为:

$$\epsilon(t) = A + B \ln t + Ct \quad (1.1)$$

式中: $\epsilon(t)$ ——恒定荷载下岩石的相对变形;

t ——时间;

A, B, C ——取决于岩石类型的试验常数。

马纳舍维奇对煤蠕变的描述为:

$$\epsilon(t) = \frac{t}{at + b + 1}, \quad \dot{\epsilon}(t) = 1 + A \ln t + B \quad (1.2)$$

式中: a, b ——试验常数,其他同上。

通过试验确定的这些模型结构及参数,本身即是对蠕变规律的描述与监控。同时在获得实测变形资料后,这些模型的构造往往用来建立实测模型,例如, $\ln t$, $\frac{t}{t+1}$ 等形式都是大坝监测模型中时效因子常用形式,有时也直接用来建立边坡变形监测模型。

第二种,基于理论模型建立监测模型。这里所谓的理论模型,是指对一些力学机理并不明确的材料建立的理论化的应力、应变等关系。例如,岩石蠕变研究中常采用所谓力学模型方法,这些力学模型与实物试验不能满意地完全吻合,但可反映材料状态的若干主要方面的性质。这些模型有麦克斯韦(Maxwell)模型、开尔文(Kelvin)或沃伊特(Voigt)模型,等等,这些模型在一定程度上揭示了复杂作用机理下应力、应变和时间的关系。遗传蠕变模型对应变进行了分割描述,考虑了应力历史,有望对包括瞬时变形和蠕变在内的应力应变关系加以清晰、简单表达,对监测模型的构造有很好的借鉴作用,在以后章节中将具体讨论。

第三种,基于经典力学推导、数值计算构造监测模型。水利工程中水工建筑物的变形监测模型采用这种方式的较多,应用很普遍。对于某些结构,如重力坝,在一定简化条件下,可以通过力学分析推导出变形与某主要荷载(如上游水荷)的关系式,从变形表达式中提取建模因子,构造模型;通过有限元等数值计算结果,结合荷载作用因子基本形式,也能构造模型;这些模型构造后与实测资料以一定数学方法结合,形成实际监测模型。经典的大坝监测统计模型、确定性模型和混合模型主

要采用这种方式,具体内容在后面章节中加以介绍。

第四种,以系统理论、数学方法为主构造监测模型。由于水利、岩土等工程工作环境、自身结构、建筑材料很复杂,故而变形机理也十分复杂,许多学者将作用机理、变形状态视为模糊系统、灰色系统、随机过程,以相应的数学理论来分析实测资料规律。模糊数学、时间序列分析、灰色理论、人工神经网络等方法都是构造监测模型的可选方案。必须指出的是,这类模型是指以数学方法为主导,并不意味着可以完全脱离力学原理,实际上,安全监测数学模型与数学方法紧密相连,前面几种构造模型的方法也与数学方法密切相关,而即使以某种数学理论为主导对监测序列进行分析,也应尽量从作用机理出发,总的来说,合理考虑作用机理的模型会得到更好的效果。

在实际工作中,一个好的监测模型在构造思路上往往不局限于单一形式。事实上,衡量变形监测模型的优劣,关键在于它能否客观揭示被监测体变形规律,能否准确预测,是否有利于工程安全。

近些年,结合工程建设的发展和需要,根据一些被监测体的特点,工程安全监测数学模型在多测点、多测项、多方法上开展了一系列研究和应用探讨。

多测点、多测项监测模型是对单测点、单项目分析模型的发展,这方面的系统研究在大坝坝体变形监测中出现较早。通过多测点的综合建模,可以反映出多个测点所在的空间内,被监测体结构性态的分布情况,也就是说,通过对多测点的分析,监测模型不仅能描绘出因变量随荷载变化及时间推移而变化的规律,同时还能反映出因变量在空间的分布关系,这有利于更全面、更真实地掌握被监测体的状态。

同一被监测体往往会设置多种监测项目,而这些监测项目都是被监测体状态的体现,在很多情况下,它们的变化规律是相关的,甚至存在相互耦合作用,通过建立包含多种监测项的分析模型,有利于揭示不同监测项之间的关系,相互印证,形成合理的综合预测、综合评判。

监测模型以数学相关理论为工具,采用合适的数学方法建立获得,所以,新的数学方法的提出与应用也给工程监测模型的研究带来了新的发展。经过科研人员的广泛探讨,许多有效的数学方法得以在工程安全监测中广泛应用。如前所述,除传统的统计回归方法之外,模糊数学、时间序列分析、灰色理论、人工神经网络等方法在工程监测中的应用也迅速发展,形成了多方法研究应用的格局。

同时,随着安全监测数学模型应用领域的扩展,被监测体的不同,它们的工作环境也可能有所不同,如何针对不同的分析对象和特殊的影响因素构建合适的监测模型,既是实际工程应用的要求,也是重要的研究课题。

1.4 阅读本书的几点建议

安全监测数学模型是水利及岩土工程安全监测分析的主要工具,它广泛应用于监测工作的各个环节,本书旨在较为系统地介绍安全监测数学模型的构造、数学求解、分析应用要领,以及研究新进展;对近些年来监测模型在多方法、多测点、多测项建模等方面的研究成果加以归纳分析;阐述针对特殊工程需要和特殊因果关系建立监测模型的方法;指导数学模型在工程监测中的实践应用,为监测工作的进一步完善发展提供研究思路及参考。本书由7章组成,各章内容概述参见前言部分,阅读时建议注意以下脉络。

注意安全监测模型基础、发展,以及与研究思路相结合的体系。书中从构造安全监测模型的基本方法,经典的大坝监测模型等内容出发,分析、说明了它们的结构、建立方法、特点及共性;进而结合工程特点和力学原理,论述了多测点、多测项监测模型的构造、因子选取、模型求解;同时对工程监测中特殊对象、特殊因果关系进行有针对性的分析,阐明分析思路和建模成果。

关注数学理论方法基础和监测应用,根据监测模型建模的需要,书中介绍了数理统计理论、灰色理论、神经网络理论及其相关的原理,注重数学理论自身体系,以及与监测应用的结合。

突出监测模型结构分析和建模数学方法结合的体系,既注意在监测模型基本构造以及多测点、多测项、因果关系分析结果基础上对数学方法的结合应用,也要注意利用数学模型本身特点进行工程监测分析,解决工程监测实际问题。一些模型会涉及多个章节内容。

书中给出了许多监测模型应用实例,结合模型构造分析、模型求解方法、实际模型的应用来学习,会有更好的效果和获得有益的启迪。

另外,书中涉及坝体、坝基、边坡、海堤等多种工程对象,对这些对象的监测分析既有共性,又有特点,这些也是值得注意之处。

第2章 大坝安全监测数学模型基础

2.1 大坝安全监测模型概述

2.1.1 监测工作与数学模型

大坝及其基础是开展安全监测分析最为系统的工程对象之一,作为具有悠久建筑史的大坝,其安全从古至今一直备受关注。随着测量技术、观测方法的发展,这些技术逐步应用到大坝工程,使大坝的安全监测工作发挥出巨大作用,如今大坝的建设、运行和安全监测已经密不可分。在大型工程中,安全监测的系统实施往往成为一项关键工作。

与同类工程相比,大坝安全监测的发展相对完善、技术也较为先进,其先进性体现在其监测项目的设置及其配套仪器的开发应用,以及监测资料分析处理的系统性方面。

在监测项目上,大坝主要设置有:变形监测,渗流监测,应力应变监测,温度监测,工作条件监测,以及地震、坝区岸坡稳定等其他监测项目。

大坝的变形监测包括水平位移与挠度、垂直位移、倾斜、裂缝及接缝、土体固结等。水平位移与挠度监测采用较多的是基准线法,包括垂线、引张线、视准线和激光准直线,另外,也有采用边角网与交会点法、导线法等大地测量方法,以及采用相对位移计、测斜仪等设备进行监测。坝体垂直位移监测经常采用的是几何水准测量法和静力水准测量法,在坝基中,经常采用多点位移计监测沿测孔方向的位移。倾斜监测有直接法和间接法,直接法是采用气泡倾斜仪或遥测倾斜仪测量大坝的倾斜角,间接法是通过坝体其他种类位移监测来间接获得大坝的倾斜量。裂缝及接缝的监测可以采用设置金属标点及测缝计等方式。土石坝坝体的固结和沉降可以采用沉降仪测量坝体不同高程点的高程变化,进而计算坝体固结度和沉降量。

常见的大坝渗流监测项目有:扬压力监测、渗流压力监测、绕坝渗流监测、渗流量监测和渗流水质监测等。

扬压力指水头对坝基面上产生的渗透压力及尾水对坝基面上产生的浮托力。对于混凝土坝,从扬压力的大小可以判断灌浆和排水系统的效果,如果超过设计值,对大坝安全是不利的。观测扬压力一般采用测压管或孔隙压力计。

在土石坝坝体中,渗透水将在横断面上形成一条浸润线,所谓浸润线是指,当高水位作用下,水流渗入堤坝时,会将堤坝体分为上干下湿两部分,这条干湿土的分界线即为浸润线。土石坝坝体坝基的渗流压力通常也是布置测压管或采用孔隙压力计来监测。

绕坝渗流是指库水绕过坝两端的防渗设备或坝与岸坡的接触面渗透到下游,通常也是布置测压管或采用孔隙压力计来监测,另外,测探钟、电测水位器、气压 U 型管、示数水位器及遥测水位仪等设备也具有此类功能。

渗透流量指水穿过地基及坝体产生的渗流量。为了掌握渗流情况,应分别观测各部分渗流量和总渗流量。根据渗流量的大小和汇集条件,通常采用容积法、量水堰法和测流速法。

对于渗透水,同时要注意及时进行渗水透明度检定和水质分析,渗水的浑浊不清,反映出坝基或两岸接头岩土受到溶滤或被渗流水带出,往往是管涌、内部冲刷或化学侵蚀等破坏的先兆。

大坝应力应变和温度一般采用应变计、无应力计、钢筋计、应力计和温度计等仪器进行测量。

随着监测仪器、观测手段及数据采集处理技术的进步,一些先进的仪器、方法得以在大坝监测中应用。如 GPS 技术、三维自动全站仪、声纳技术、光纤传感技术等,都为大坝的安全监测提供了可选的测量工具。

由于大坝安全十分重要,监测项目众多,资料丰富,因此为揭示监测资料所包含的内在信息,必须加强资料分析工作,否则监测设备和采集的资料无法真正发挥作用。经过多年的研究应用,大坝安全监测资料分析已具备较好的系统性,先进的分析方法较多,应用广泛。在第 1 章的内容中,涉及大坝监测分析的规范、部门相对较多,而且基本形成了以比较法、作图法、特征值统计法和数学模型法为框架的分析体系,其中监测模型的研究应用已有一定的历史基础。

自 20 世纪 50 年代大坝等水工建筑物位移监测模型由意大利范耐里(Fanelli)和葡萄牙罗卡(Rocha)等人应用以来,经历了几十年发展,成为该领域应用最广、研究最成熟的部分,在实践中也被证明效果显著。其中,统计模型、确定性模型和混合模型作为三种经典的大坝监测分析模型,也成为许多类似工程监测模型的重要参考方法。

作为监测模型分类方式,和其他工程监测模型一样,除了上述三种经典的大坝监测模型分类方式外,大坝监测模型还可以按照因果关系分为因果模型和无因果模型。因果模型以大坝的效应量(如渗压、变形等)作为因变量,建立因变量与环境量之间的数学关系,揭示两者之间的内在联系。无因果模型是从效应量自身变化规律出发,采用数学方法建立体现其发展规律的数学模型,不涉及与其他环境量的