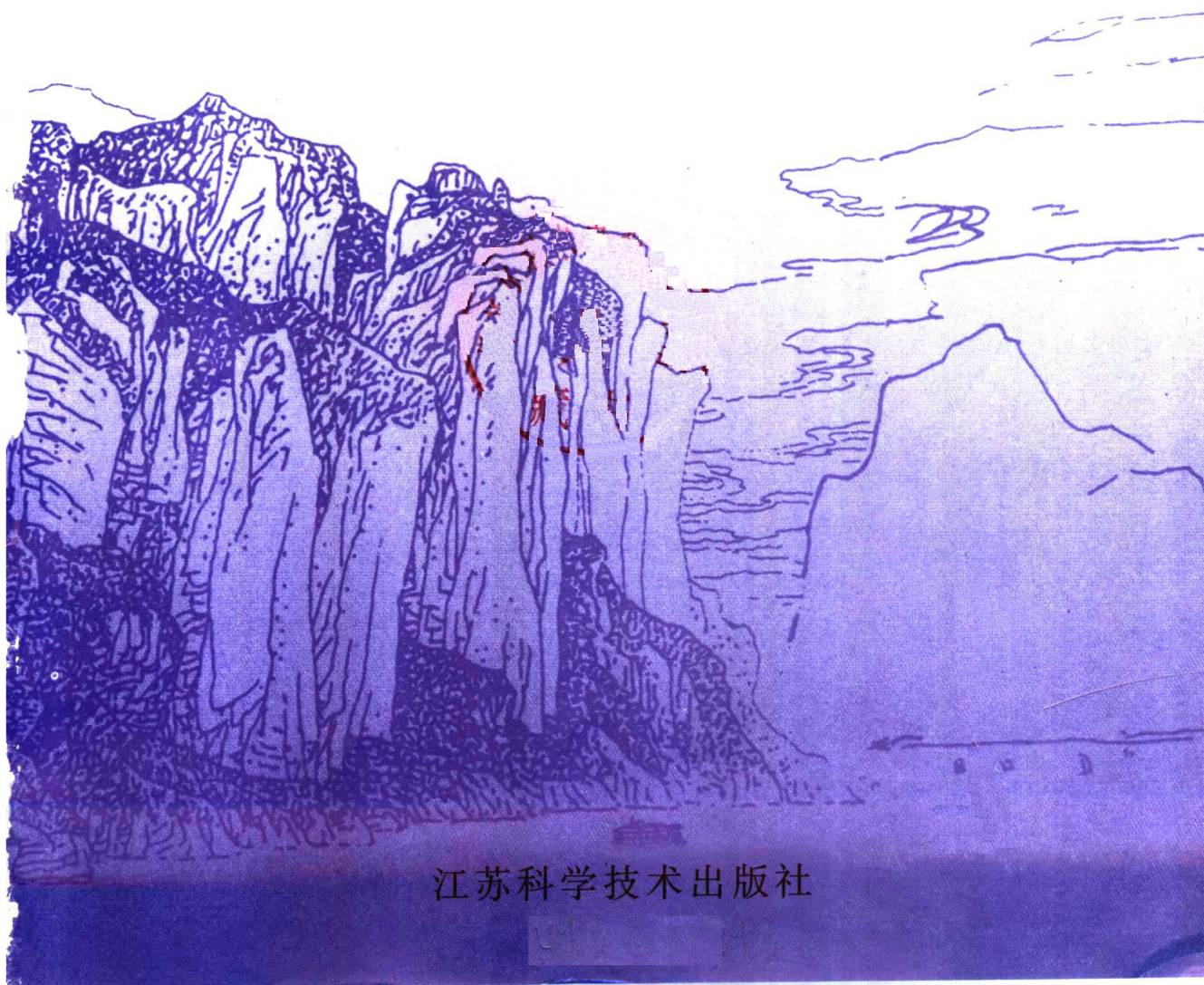


吴中如 顾冲时 著

大坝原型反分析及其应用

PROTOTYPE BACK ANALYSIS
AND ITS APPLICATION FOR DAM



江苏科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统地论述大坝及岩基的反分析理论、模型和方法,并列举相应的实例。全书共分七章,主要包括大坝及岩基的仿真有限元模型、变形参数的反演分析模型、有限元计算成果的优化处理、荷载工况的反馈分析、渗流反馈分析理论和方法、变形和应力监控指标等内容。

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、土木和工程力学等专业的本科生与研究生的教材或参考书。

致 读 者

社会主义的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步,推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定,江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经省政府批准,由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,以通过出版工作这一“中介”,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务;并能带动我省科技图书提高质量,促进科技出版事业的发展和繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物,期待得到各方面给予热情扶持,在实践中不断总结经验,使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金,以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世,还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持,特此表示衷心感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

序

吴中如、顾冲时两位同志主撰的《大坝原型反分析及其应用》一书,即将由江苏科学技术出版社出版,我有机会事前阅读原稿,实感荣幸。作者嘱我写篇序言,我也欣然同意了。

我国是举世闻名的治水大国,具有悠久的筑坝历史,从新中国成立以后,我国已建成堤坝 8.6 万余座,15m 以上大坝 1.8 万余座,其中包括坝高 240m 的雅砻江二滩双曲拱坝、坝高 178m 的黄河龙羊峡重力拱坝,以及正在修建的世界第一大水利工程——长江三峡水利枢纽等工程。这些工程的建成,在防洪、发电、灌溉、供水和航运等方面产生了巨大的社会效益。与此同时,将使我国的坝工技术水平,包括勘测、科研、施工和管理等水平上升到一个新台阶。

大坝是承受巨大荷载的复杂结构的建筑物,其安全是关系到国计民生的大事。不少工程已运行了三十多年,随着大坝运行时间的延长,工程老化已日趋突出,并随着高坝大库建设的增多,大坝的安全已引起普遍关注。这就要求提供可靠的分析理论和计算技术以及更合理的数学物理模型和更精确的参数,这些都离不开大坝原位观测资料的反分析。作者多年来做了大量的工程项目和科研项目,在大坝原型反分析理论、方法及其应用方面取得了大量成果。在总结上述成果的基础上,并吸收国内外在这方面的科研成果,撰写成《大坝原型反分析及其应用》一书,这必将推动我国大坝安全监控上升到一个新阶段,开创新的局面。因此,本书不仅具有高的学术水平,而且具有重要的实用价值。

本书的特色具体表现在以下几个方面。

1. 针对影响有限元模型精度的位移模式、单元形态和边界条件等关键因素,提出了反分析方法。从而,使计算模型更符合工程实际情况。
2. 充分利用大坝原位监测资料和校准的有限元模型,提出了坝体、岩基和库盘整体等计算参数的多种反演分析模型,从而校准计算参数。
3. 对有限元反分析中计算的应力和位移,提出了优化后处理的方法。
4. 对影响大坝安全的几个关键问题,如施工期和运行期坝体出现的裂缝以及运行期渗流对大坝应力的耦合影响等,首先进行深入的机理分析,然后,提出了实际安全度和运行控制荷载等反分析方法。
5. 发展了变形监控指标拟定的理论和方法,首先应用突变理论分析大坝及岩基的失稳转异特征,然后,提出了用结构分析方法拟定变形监控指标。
6. 本书具有很强的实用性,对主要方法都列举了工程实例,而不是纯理论

说教,对读者起到示范作用,是一本典型的理论联系实际著作。

欣喜之余,写了个人感受,谨以为序。

中国科学院、中国工程院院士
河海大学名誉校长、教授

敬 尧

1999年10月

前 言

我国治水具有悠久的历史,是举世闻名的筑坝大国,尤其从建国以来,共修建了 8.6 万余座堤坝,其中有正在修建的举世瞩目的世界第一大水利工程——长江三峡水利枢纽以及已建成的坝高 240m 的四川雅砻江上的二滩拱坝等工程。这些工程的建成,在防洪、发电、灌溉、供水和航运等方面产生了巨大的社会效益。与此同时,也使我国的坝工技术水平,包括勘测、设计、科研、施工和管理等,上升到一个新台阶,有不少技术水平已处于国际前列。

随着高坝大库和复杂地基上建造高坝的日益增多,以及大坝运行时间延长而使工程日益老化等问题;与此同时,大坝的失事又导致巨大的灾难。因此,大坝安全已引起人们的普遍关注。这就要求坝工设计时,提供可靠的分析理论和计算技术,以及更合理的数学物理模型和更精确的参数,这些都离不开原位监测资料的反分析(包括反演分析和反馈分析)。作者主要总结十多年来结合大量实际工程和科研项目的成果,并吸收了国内外在这方面的科研成果,撰写成本书。

全书共分七章。第一章绪论,主要介绍本书的内容。第二章大坝及基岩仿真有限元模型的反演,针对影响仿真有限元模型的几个关键因素,论述了反分析方法。第三章大坝与岩基仿真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等反演分析理论、模型和计算公式。第四章反演分析中有限元计算成果的优化处理,论述应用插值补点回归法、动态迭代回归法、动态插值迭代回归法和应力最佳点的节点应力计算等反分析方法,对反分析中的应力和位移的计算成果进行优化后处理。第五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多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。第六章渗流反馈分析理论和方法,论述考虑湿胀应力以及坝基应力场与渗流场耦合的分析和反分析模型。第七章变形和应力监控指标,变形监控指标是当前大坝安全监测领域内急待解决的难题,在分析大坝和岩基失稳转异特征的基础上,论述变形监控指标拟定的反馈分析理论和方法。以上反分析理论、模型和方法均编制了相应的分析程序,并已应用于实际工程。

限于作者的水平,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。沈振中、赵斌、蔡新等也参加部分编写工作,对此表示衷心的感谢!

作 者
1999 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 反分析的内涵	1
第二节 反分析研究的科学意义	2
第三节 研究现状和问题	3
第四节 本书的主要内容	6
第二章 大坝及岩基的有限元模型的反馈	7
第一节 概述	7
第二节 位移模式对应力和位移的影响	8
第三节 单元的形态对位移和应力的影响	10
第四节 基础边界条件对应力和位移的影响	12
第三章 大坝及岩基计算参数的反演分析模型	17
第一节 大坝及岩基空间位移场的数学模型	17
第二节 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	21
第三节 坝体混凝土的温度线膨胀系数和导温系数的反演	26
第四节 坝体混凝土的断裂韧度和纵缝等价摩擦系数的反演	33
第五节 大坝和岩基的粘性系数的反演	37
第六节 实例分析	41
第四章 反演分析中大坝及岩基有限元计算成果的优化处理	51
第一节 计算位移的优化	51
第二节 计算应力的优化	55
第三节 实例分析	62
第五章 大坝及岩基荷载工况的反馈分析	65
第一节 概述	65
第二节 大坝及岩基施工期反馈分析	65
第三节 大坝及岩基运行期的荷载工况反馈分析	67
第四节 实例分析	75
第六章 渗流反馈分析理论和方法	80
第一节 岩体渗流的特点	80
第二节 岩基渗透系数和坝体混凝土渗流扩散系数的反演	81

第三节	渗流影响下坝体和岩基应力场的分析模型	83
第四节	利用突变理论分析大坝及岩基的稳定性	91
第五节	实例分析	95
第七章	变形监控指标	99
第一节	混凝土坝的变形过程及转异特征	99
第二节	拟定监控指标的准则	100
第三节	拟定监控指标的方法	102
第四节	实例分析	106
主要参考文献		111

第一章 绪 论

第一节 反分析的内涵

一、反分析的定义

为了充分利用原位监测资料的信息,对大坝的安全状态作出准确评价,需要对原位监测资料进行全面深入的分析和反分析。其中,资料分析简称正分析,主要依据监测资料建立多类监控模型,以此监控大坝今后的运行。反分析按其实际内涵包含反演分析和反馈分析,两者既有有机的联系,又有区别,按系统识别理论的概念可统称为反分析,见图 1-1-1。

从图 1-1-1 看出:

(1) 反演分析是依据正分析的成果,应用计算力学(包括结构和渗流有限元等方法),反求大坝的计算参数、有限元模型及其计算成果等,以校准影响计算精度的主要因素,称之为反演分析。

(2) 反馈分析是综合应用正分析与反演分析的成果,应用计算力学,反馈大坝的运行工况、安全度(强度、稳定)和监控指标等,以馈控大坝的安全运行,称之为反馈分析。

本书重点论述反分析的理论、模型、方法及其应用。

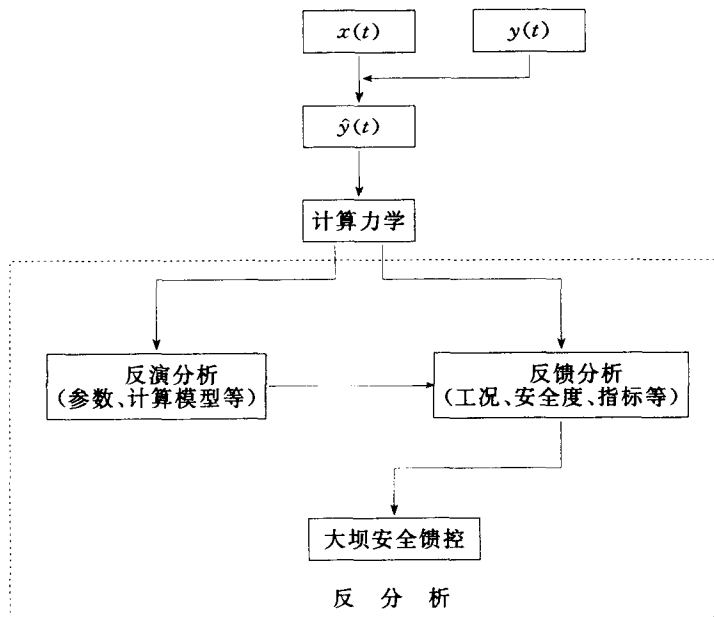


图 1-1-1 反分析示意图

图中 $x(t)$ ——外力或环境量(如水压力、温度、地震、降雨等);

$y(t)$ ——效应量(如变形、扬压力、应力应变等);

$\hat{y}(t)$ ——效应量的监控模型(如统计模型、混合模型和确定性模型)。

第二节 反分析研究的科学意义

我国至今共修建了 8.6 万多座堤坝,其中国家电力公司下属大坝 130 多座,这些工程在国民经济中产生了巨大的社会效益。然而,由于种种原因,如水文、地质、施工质量以及老化等原因,部分大坝存在不安全因素,直接影响工程效益的发挥,甚至威胁下游人民的生命财产安全。此外,随着国民经济的飞跃发展,水利水电工程也向高大方向发展,如已建的二滩、龙羊峡、乌江渡等大坝,在建的三峡、小浪底等大坝,其安全显得尤为突出,已引起各级政府及坝工界的高度重视。由于大坝及岩基工作条件复杂,荷载、计算参数、边界条件、计算方法等还难以精确模拟,使目前水工设计还难以做到完全与工程实际相吻合,有时会有较大差别。因此,利用原位监测资料反分析大坝及岩基实际运行状况,一方面可评价大坝和岩基的实际安全度;另一方面对在建的坝,依据施工实测资料,及时进行反分析,并对施工、设计方案提出反馈建议,从而达到优化设计施工的目标。由此可见,反馈分析研究有着重大的实用意义和科学价值。例如:佛子岭连拱坝,利用 1984 年以前的变形资料,反演了坝体及坝基的实际物理力学参数,进而进行结构计算及数学模型的反分析,拟定了关键坝垛 13 号垛的坝顶水平位移的监控指标为 5.29 mm,并提出低温高水位控制水位为 122 m;1993 年 11 月下旬,佛子岭大坝库水位上升至 125.6 m,又遇强寒流影响,13 号坝垛坝顶水平位移达 5.81 mm,超过了监控指标,其他坝垛坝顶位移超过历史最大值 20%~54%;坝基沉降也超过历史最大值;运行单位及时上报了原电力工业部,立即降低库水位至 122 m 运行,避免了不利运行工况对坝体结构的危害和可能导致的运行事故。又如:龙羊峡大坝,于 1986 年 10 月下闸蓄水,在 1989 年龙羊峡上游遭遇大洪水,入库水量 32.4Gm^3 ,由于大坝尚未竣工,当时面临库水位能否从 2545 m 上升到 2575 m 的决策问题;作者通过 1989 年以前的原位监测资料分析和反分析,提出了控制坝段(9 号坝段)的径向位移为 16.99 mm,左岸坝肩上游的 G_4 石英脉拉裂深度控制在 50 m;根据库水位上升过程的实测资料,9 号坝段径向位移和 G_4 开裂深度等均不超过提出的控制值(9 号坝段在 2575.04 m 水位时,实测值为 16.28 mm),并结合下游虎丘山岩体边坡的稳定分析,提出库水位可以上升到 2575 m;与此同时,在大坝建成后,作者又对 1995 年 12 月前的资料进行系统深入的正反分析,包括对大坝、坝基及库盘的物理力学参数的反演分析,在此基础上进行了深入的反馈分析,分析表明龙羊峡大坝在正常水位(2600 m)时,其强度和稳定是能保证的,这为尽快发挥工程效益提供了理论依据。再如:陈村拱坝,1989 年定为病坝后,委托作者对其 1991 年以前的资料进行系统的反分析,包括物理参数的反演分析,对 105 m 高程裂缝的稳定反分析,并拟定了关键坝段(8 号坝段)坝顶水平位移的监控指标为 8.76 mm;根据 1990 年~1993 年的实测资料验证,该坝经变形多次调整以后,变形形态正常,实测位移未超过监控指标;由此提出陈村拱坝经加固处理后拟改为正常坝的建议,经原电力工业部批准由病坝改为正常坝,从而进一步发挥了工程效益。由上述实例表明:依据实测资料对大坝及岩基进行反分析,可对大坝和岩基的工作性态作出科学评价,从而一方面对病险坝的处理提供科学依据,另一方面使大坝在确保工程安全的前提下,充分发挥工程的效益。与此同时,可以检验设计施工,进一步提高坝工设计的理论和方法。因此,反分析研究具有重大的社会效益和科学价值。

第三节 研究现状和问题

一、研究现状

大坝与岩基,存在着诸多不确定因素,甚至未知因素。因此,原位监测与反馈分析工作得到了广泛的应用和发展。

太沙基在 1969 年提出的观测设计法(Observational Design Method),是反馈分析思想的最早应用,他用现场观测结果修正参数与设计。三十多年来,在隧道工程中,由于推广奥地利学者 L. V. Rabcewicz 教授提出的新奥法(New Austrian Tunneling Method,简称 NATM)而取得了显著的经济效益^[1,2],新奥法的内含是:在隧洞开挖过程中,通过对围岩及支护的观测和量测,由此反馈施工和设计。

国内外对大坝的反分析工作开展比较深入,取得了一些成果,尤其是混凝土坝的反馈分析工作已开展较为普遍。作者^[3~6]提出利用原位观测资料,由确定性模型及统计模型,并结合有限元分析成果,反演坝体混凝土的弹性模量和温度线膨胀系数的方法,取得了较好的效果;Bonaldi、Fanalli 和 Giuseppetti 等人^[7,8]提出了有明显概念的确定性模型,并以此来反演坝体的弹性模量和温度的线膨胀系数,在大坝的反分析中起到了积极作用;作者和刘眉县等人^[9,10]提出了利用离下游不同深度的温度计的测值,并考虑坝面粘滞层的影响,来反演混凝土导热系数的方法;陈久宇等人^[11]利用离上游面不同距离的渗压计测值,并考虑上游库水位的波动,反演坝体混凝土的扩散系数,有一定的实用价值;作者^[12]利用临界荷载法和小概率试件法,反演坝体混凝土的断裂韧性,取得了较好的效果;陈久宇、杨代泉^[13,14]用有效指数法和传递荷载指数法,反馈了大坝横缝的实际传递荷载的能力;此外,利用确定性统计模型,结合实测资料,反分析纵缝的实际结构作用。葡萄牙国立土木工程研究院(简称 LNEC)^[15],利用施工期间浇筑混凝土的温度观测资料,反馈温控设计和控制接缝灌浆的时间,对实际工作有一定的指导意义。作者^[16,17]利用弹性理论,导出了湿胀应力的理论计算公式,并由此反分析大坝的应力控制指标,有一定的实际意义和参考价值。

现代控制理论和计算技术的发展促使岩体工程领域开始重视反馈分析理论及其应用研究。国外的 Kireten 和 Gioda、Sakurai 等,以及国内的杨林德等人提出了基于现场监控监测技术的位移反分析方法^[18~21],解决了给定岩体本构关系后单测点的岩基的反演分析问题。曾国熙等人^[22],根据建筑物施工期间现场实测的位移、应力和孔隙压力等资料,通过反分析法确定基坑开挖问题的有关参数,取得了较好的效果。

近二十年来,位移反分析方法,已从弹性问题发展到粘弹性和弹塑性以及粘弹塑性问题的位移反分析。

在弹性问题的位移反分析中,国内外许多学者在这方面作了较多工作;Shimizu^[23]提出了边界元位移反分析方法;樱井春辅^[24]在隧洞开挖过程中,假定其周边问题为位移初应力的线性函数,从而实现了平面应变问题的位移反馈分析法;刘允芳^[25]提出了用解析方法解决弹性介质中非圆形洞室的位移反分析原理及公式;杨志法等人^[26]利用有限元图谱实现了隧洞的位移反分析。此外,还有许多学者都进行过这方面的研究工作^[27~30]。

在粘弹性参数反演方面,刘怀恒^[31]和杨林德^[32]在这方面做了较多的研究,在国内比较具有代表性,他们引入基于时间的等效弹性模量,由此首先反演若干时刻的等效弹性模量,

然后反推流变参数,但这种算法只局限于简单的线弹性材料。沈家荫、林炳仁等人^[33]利用位移观测资料,应用边界元法反演分析鲍埃丁-汤姆逊粘弹性模型参数,效果较好;此外,国内外还有很多学者在这方面进行了研究^[34~39],得到了一些实用的结论。

弹塑性问题的位移反分析主要采用单纯形优化、黄金分割法、直接搜索法等。意大利学者 Gioda 和 Maier 等人^[40],首先利用单纯形优化法进行了弹塑性反分析。国内外许多学者在此基础上,进一步完善和发展了这种方法^[41~43];这种方法通用性强,可利用原有的弹塑性有限元程序进行反馈分析,但其收敛速度较慢。

对于粘弹塑性问题的位移反分析,王芝银等人^[44]研究了西原流变模型的位移反分析问题;薛林、杨志法和郅玉亭等人^[45,46]采用两步位移反分析法,研究了伯格模型等位移反分析;陈子荫^[47]对圆形洞室经 Laplace 变换,导出了广义凯尔文模型的位移解析解,并利用直接搜索法求解非线性方程中的待定参数;王芝银等人^[48]提出了粘弹塑性增量位移反分析的复合形法,减少了迭代次数,缩短了计算时间;胡维俊等人^[49]基于优化理论,提出了拱坝位移分析的多点拟合法,得到了较为合理的成果。

在岩基渗流参数反演,以及岩体应力场与渗流场耦合反分析方面,国内外学者做了大量的研究分析工作。王士军和刘嘉忻^[50]利用钻孔中实测的地下水位,通过反分析推算岩体的渗透系数;沈振中等人^[51]利用测压孔水位结合渗流有限元分析,反演坝体和坝基的渗透系数。Gale^[52]研究了均布正交裂隙中渗流随介质应力的变化;Brekke 等人^[53]假设坝基下存在两组裂隙,计算了在自然、灌浆、排水等情况下,不考虑渗流作用的应力场以及耦合分析的应力场;Ohnishi^[54]用耦合有限元分析计算了靠近压力隧道的岩体边坡的应力场及边坡稳定性问题;Wittke^[55]在考虑水的渗透力和浮托力的情况下,研究了大坝和坝基的相互作用;孙钧等人^[56]将岩体视为多孔连续介质,在考虑应力场和渗流场耦合作用下,分析了复合膨胀渗水围岩——支护系统的粘弹塑性效应,得到了不同受力阶段,引水隧洞工程围岩——支护系统的应力场和渗流场的分布情况。

在大坝和岩基安全监控指标反馈分析方面,应力和扬压力等可以用规范法来拟定其监控指标。而对于变形监控指标,由于受地形、地质、坝的不同结构形态等影响,因而拟定的难度较大。国外在这方面报道很少,葡萄牙学者 Mara Ramos^[57],提出用模型试验和数学分析(如有限元等)或者在设计时确定的允许值作为监控指标,如位移和应力,根据模型和有限元分析成果,确定其变化规律,由原型观测资料与上述成果比较,以此评价大坝的静力工作状态。在国内,作者^[58,59]提出了用典型监测效应量的小概率法和极限状态反分析法,拟定坝体和坝基的位移安全监控指标,取得了较好的效果^[60,61]。此外,近几年作者^[62]提出了基于结构分析法,拟定大坝及坝基的位移监控指标的反分析方法,这种方法联系了大坝的级别和重要性,因而比典型监测效应量小概率率等方法更全面,在实践中已开始推广应用。

二、研究的问题

综上所述,反分析研究有着较大的实用意义和科学价值。在国内外学者的共同努力下发展较快。但是,在反分析中,目前还存在不少问题,有的问题直接制约着反馈分析的进一步深化研究,其中急待解决的有下列几个问题。

(一) 有限元分析法的反分析问题

有限元等数值分析方法已广泛应用于大坝及岩基的反分析,但其应力分析成果目前还

难以应用于工程设计中。其主要问题是影响有限元分析成果的主要因素尚需进一步研究。特别是：计算的边界条件、荷载的模拟、参数的选择、分析成果优化以及综合分析和评价等反分析问题，尚需深入研究。

（二）反分析模型和方法的问题

以往通常用单测点模型进行反分析，这种模型和方法在监控和评价大坝及岩基的工作性态方面取得了一定的实效。但是，单测点模型主要反映局部变化规律，与反映整体性态效应还有一定差异。因此，还应结合坝体及岩基的监测资料，建立坝体和岩基整体的反分析模型，由此得到反映整体性态的反演值，从而馈控大坝及岩基的整体运行状况，提出运行荷载控制域，使运行和管理单位极方便地监控大坝安全状况。而建立整体的反分析模型，目前还在研究阶段，对一些理论和方法有待实践的进一步验证。与此同时，坝基及库区对大坝安全影响较大，而这些区域地质构造复杂，往往不仅要反演综合参数，而且要反演断裂构造等薄弱部位的参数，即应进行分区分层反演，这些工作在过去做得很少。

（三）渗流作用下应力反分析问题

由监测资料分析成果表明，混凝土坝上游面，尤其在坝踵，长期处于水下工作，混凝土在渗流水作用下，其孔隙内的含水量增加，引起混凝土微膨胀，由于受到周围约束，引起湿胀应力。据文献^[63]可知，在坝踵引起的湿胀压应力可达 $1.0\text{ MPa}\sim 1.5\text{ MPa}$ 。若考虑此因素，则在设计大坝时，可放宽对应力的要求，减小断面，节省工程量。但至今对湿胀应力的机理尚处于研究阶段，而用数值计算分析进行模拟反分析尚属起步阶段，这已成为坝工监测领域的一个重要课题。此外，在考虑坝体湿胀作用下，坝基渗流场与应力场的耦合作用，及其对坝体及岩基的强度和稳定安全度的影响反分析有待进一步研究。

（四）稳定反分析问题

众所周知，目前大坝及岩基的稳定分析，主要用安全系数法和可靠度理论等，这些方法在大坝设计中应用较广，但这些方法还有待进一步完善和提高。由工程实践表明：大坝和坝基失稳是从量变到质变的突变过程，因而应用突变理论研究大坝、坝基及岩体的稳定性更切合实际情况。这在坝工上应用很少，但可预见突变理论将被坝工界重视和应用，尤其在岩体边坡的稳定性判别上，将有广阔的应用前景。

（五）安全监控指标问题

拟定大坝安全监控指标是反馈分析的一个重要研究课题。对应力和扬压力等安全监控指标可直接依据现行规范或设计单位的拟定值。但变形监控指标的拟定比较复杂，其原因是大坝的高度、筑坝材料、地形地质以及运行方式等不同，则不同大坝，即使是同一座大坝的各个坝段的监控指标也不同；其拟定需以实测数据为依据，以各类设计规范为准则，由强度和稳定等作为控制条件，通过复杂的力学分析和反分析，或者设计、运行单位根据长期运行的经验确定^[61,64,65]。位移监控指标充分反映了大坝及岩基的结构性态，是综合分析、综合评价和监控大坝运行的主要依据。同时，当监测量在监控指标的某一范围时，立即可以判断大坝的安全状况，这给运行单位带来极大的方便。从变形监控指标的含义看出：拟定变形监控指标，不仅要观测资料进行全面分析和反分析，而且要进行应力场与位移场通过荷载场进行

复杂的耦合结构分析。因此,拟定大坝及坝基变形监控指标是坝工界监测领域内急待解决的重要课题,尚有很多技术问题有待进一步研究。

第四节 本书的主要内容

本书针对上述问题,结合原电力工业部资助的《反馈设计研究》项目,论述了大坝及岩基反分析的一整套理论和方法,并将其应用于工程实际。

本书共分七章。第一章绪论,介绍反分析研究的科学意义、研究现状和存在的问题以及本书的主要内容。第二章大坝及岩基的有限元模型的反馈,对影响有限元模型计算精度的几个关键问题,包括位移模式、单元形态和基础边界条件等,进行了理论分析,指出了造成误差的原因以及改进措施。第三章大坝及岩基计算参数的反演分析模型,影响有限元仿真分析精度的另一个重要因素是计算参数的选择,为此作者提出了以实测资料为依据,主要用空间位移场,对坝体混凝土、坝基岩基和库盘岩基的分区分层和整体的变形模量,坝体混凝土的温度线膨胀系数、导温系数、断裂韧度和等价摩擦系数,以及坝体和岩基的粘滞系数等计算参数进行反演的分析模型,并将之应用于龙羊峡和佛子岭等大坝。第四章反演分析中大坝及岩基有限元计算成果的优化处理,按常规方法处理位移和应力等计算成果时,有可能产生病态,为此作者提出了计算位移和应力的优化处理方法。第五章大坝及岩基荷载工况的反馈分析,针对大坝规模大、工期长和受自然条件影响大等特点,提出了施工期的反馈分析流程;与此同时,针对大坝运行期因裂缝等原因,引起大坝结构性态的改变,使运行期的控制荷载产生变化,为此,重点论述了带缝大坝的运行荷载反馈分析方法,并将这些方法应用于佛子岭等大坝。第六章渗流反馈分析理论和方法,针对岩基裂缝渗流和坝体渗流的特点,论述了岩基渗透系数和坝体混凝土渗流扩散系数的反演方法;然后,研究了渗流影响下坝体和岩基应力场的分析模型,包括混凝土的湿胀应力、坝基应力场与渗流场的耦合分析以及在渗流影响下坝体和坝基应力场分析;此外,提出了用突变理论分析大坝及岩基的稳定性,并将以上理论和方法应用于龙羊峡等大坝。第七章变形和应力监控指标,在分析混凝土重力坝和拱坝变形过程及转异特征的基础上,提出了拟定变形一级、二级和三级监控指标的力学定义;然后,研究了用数理统计法以及粘弹性和粘弹塑性理论拟定变形监控指标的方法,并将之应用于龙羊峡等工程。

第二章 大坝及岩基的有限元模型的反馈

第一节 概 述

众所周知,有限元法分析坝体及岩基的结构状态时,将大坝及岩基这个连续的空间结构离散成为有限个单元结构,通过结点连接组成整个体系,并设法确定各单元的劲度矩阵 $[K]_{e_j}$,由此组合成整体劲度矩阵 $[K]$,最终建立结点位移 $\{\delta\}$ 和结点荷载 $\{R\}$ 之间的平衡方程

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (2-1-1)$$

由上式求出结点位移,从而求出应力。式(2-1-1)中, $[K]$ 为整体劲度矩阵,即

$$[K] = \sum_{e_j \in \Omega_1} [C]_{e_j}^T [K]_{e_j} [C]_{e_j} + \sum_{e_j \in \Omega_2} [C]_{e_j}^T [K]_{e_j} [C]_{e_j} + \sum_{e_j \in \Omega_3} [C]_{e_j}^T [K]_{e_j} [C]_{e_j} \quad (2-1-2)$$

式中 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ——坝体、坝基以及库区岩基的计算域;

$[C]_{e_j}, [K]_{e_j}$ ——单元 e_j 的劲度变换矩阵和劲度矩阵。

$$[K]_{e_j} = \iiint_{\Omega_j} [B]^T [D] [B] d\Omega \quad (2-1-3)$$

式中 $[D]$ ——弹性矩阵,与坝体及岩基的变形模量 E 和泊松比 μ 有关;

$[B]$ ——单元几何特性矩阵,与单元的尺寸、形状等有关。

如果用 n 个结点等参单元来求解结点位移和单元应力,并令位移模式及坐标变换为

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^n N_i v_i, \quad w = \sum_{i=1}^n N_i w_i \quad (2-1-4)$$

$$x = \sum_{i=1}^n N_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^n N_i y_i, \quad z = \sum_{i=1}^n N_i z_i \quad (2-1-5)$$

式中 N_i ——位移的形函数,它是局部坐标 ξ, η, ζ 的显函数,在不同形式的单元中取不同的形式;

u, v, w —— x, y, z 方向的位移。

式(2-1-3)用局部坐标表示为

$$[K]_{e_j} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (2-1-6)$$

式中

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} y_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} z_i \end{vmatrix} \quad (2-1-7)$$

由式(2-1-1)~(2-1-7)可得到,每个单元上的结点位移 $\{\delta\}_{e_j}$

$$\{\delta\}_{e_j} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_n, v_n, w_n]^T \quad (2-1-8)$$

则单元内的应力 $\{\sigma\}_{e_j}$ 为

$$\{\sigma\}_{e_j} = [D][B]\{\delta\}_{e_j} = [D][B_1, B_2, \dots, B_n]\{\delta\}_{e_j} \quad (2-1-9)$$

其中

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

由式(2-1-1)~(2-1-9)看出:除物理力学参数外,影响单元结点位移及单元内应力计算成果的因素有:位移的模式(即形函数),单元的形态(包括单元的各向长度相对大小,棱边的曲折,棱边的夹角和棱边上结点的间距等),基础边界条件等。下面几节分别分析上述影响因素。

第二节 位移模式对应力和位移的影响

位移模式与真实位移形态的差别是影响计算成果的主要因素。真实位移的函数可以展开为 Taylor 级数,如果把构造的位移模式看作是忽略高次项的 Taylor 级数,则略去项便是误差项。下面分析几种典型单元。

一、常应变单元

常应变单元的位移模式 $u = a_1 + a_2x + b_3y$ (三角形单元)和 $u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$ (四面体单元),与真实位移函数展开的 Taylor 级数相比,舍去了二次及其以上的各项,其误差估计写为 $\Delta u = O(h^2)$ (h 为三角形或四面体最大的边长)。由于常应变单元的应变(应力)是常数,因此其误差 $\Delta \epsilon = O(h)$,这比位移模式的误差大一个数量级,因此常应变单元的应力精度较低,即使在结点位移达到完全精确的数值时,求得的单元应力仍然精度不高,相邻单元面的应力依然存在突变现象。

二、平面四边形单元

平面四边形单元的形函数为

$$N_i = \frac{1}{4} \left(1 + \xi_i \frac{x}{a} \right) \left(1 + \eta_i \frac{y}{b} \right) \quad (2-2-1)$$

式中 $\xi_i = \frac{x_i}{|x_i|}$; $\eta_i = \frac{y_i}{|y_i|}$ ($i = i, j, m, p$)

则其位移模式为

$$P = \sum_{i,j,m,p} N_i P_i \quad (P = u, v) \quad (2-2-2)$$

上述位移模式形式上包含了二次项 xy , 它与真实位移函数 Taylor 多项式相比, 缺少了 x^2, y^2 的二次项及其以上的多项式。因此, 其位移误差可粗略估计为 $O(h^2)$, 其形式与常应变单元的精度一样。但实际上它的精度比常应变单元(三角形单元)要高。这一点, 可从平面四边形单元得到证明, 由应力矩阵 $[S]$ 可求得:

$$[S] = [S_i, S_j, S_m, S_p]$$

$$[S_i] = [D][B_i] = [D] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$= \lambda \begin{bmatrix} \xi_i(b + \eta_i y) & \mu \eta_i(a + \xi_i x) \\ \mu \xi_i(b + \eta_i y) & \eta_i(a + \xi_i x) \\ \frac{1-\mu}{2} \eta_i(a + \xi_i x) & \frac{1-\mu}{2} \xi_i(b + \eta_i y) \end{bmatrix} \quad (t = i, j, m, p) \quad (2-2-3)$$

式中 λ ——常量, 与 E, μ 有关;

a, b ——常量, 其余与式(2-2-1)相同。

由应力公式 $[\sigma] = [S]\{\delta\}^e$ 可看出: 四边形单元中的应力分量不是常量, 正应力 σ_x, σ_y 的主要项(即不含 μ 相乘的项)沿其法线方向呈线性变化, 而它的次要项(即与 μ 相乘的项)沿切向按线性变化。至于剪应力分量 τ_{xy} , 则沿 x, y 两个方向都按线性变化。因此, 在弹性体中采用同样数目的结点时, 矩形单元的精度高于简单的三角形单元。

三、等参单元

在等参单元中, 尽管位移模式是局部坐标的简单幂函数, 却很难分析位移和应力在单元中的变化规律。为分析方便, 假设有一个边长为 $2L$ 的立方体等参单元, 结点在其棱边长均匀分布, 并且将整体坐标的 x, y, z 轴取在局部坐标的 ξ, η, ζ 轴上, 则不难得到

$$x = L\xi, \quad y = L\eta, \quad z = L\zeta \quad (2-2-4)$$

下面以 20 结点等参单元为例, 分析位移和应力在单元中的变化规律。

由式(2-1-4), 并考虑结点为 20 的情况, 则其位移模式为

$$u = \sum_{i=1}^{20} N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^{20} N_i v_i, \quad w = \sum_{i=1}^{20} N_i w_i \quad (2-2-5)$$

$$\text{式中 } N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i)(1 + \eta_i)(1 + \zeta_i)(\xi_i + \eta_i + \zeta_i - 2) \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi_i^2)(1 + \eta_i)(1 + \zeta_i) \quad (i = 9, 10, 11, 12)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \eta_i^2)(1 + \xi_i)(1 + \zeta_i) \quad (i = 13, 14, 15, 16)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \zeta_i^2)(1 + \eta_i)(1 + \xi_i) \quad (i = 17, 18, 19, 20)$$

$$\xi_0 = \xi_i \xi_i, \quad \eta_0 = \eta_i \eta_i, \quad \zeta_0 = \zeta_i \zeta_i \quad (i = 1, 2, \dots, 20)$$

将式(2-2-4)代入式(2-2-5)可见, 位移分量沿坐标方向是按二次式变化, 由空间间