

大坝安全综合分析和评价的理论、方法及其应用

①
98.18(3)
2-6

吴中如 顾冲时 沈振中 赵斌 吴相豪

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

TV698.21
TV698.1

摘要 扼要介绍河海大学 20 多年来,结合 30 多座水电站大坝工程,在应用概率论、模糊数学、混沌理论、分形几何、人工智能、模式识别、神经网络等理论的基础上,开展数学监控模型、参数和边界条件反分析、拟定变形监控指标及大坝安全综合评价专家系统等方面的理论、方法及其应用研究的概况。

关键词 大坝 安全监控 反分析 数学模型 综合分析 综合评价

河海大学从 70 年代初开始,在陈久宇教授开创下,在国内首先开展大坝原位监测资料分析,并将成果应用于定量分析大坝的安全状况和监控大坝的安全运行。20 多年来,河海大学先后承担“七五”、“八五”和“九五”国家重点科技攻关项目子题 4 项,国家自然科学基金三峡重大项目的第 V 课题等国家基金和部基金 6 项,三峡升船机和临时船闸安全监测工程、二滩水电站工程安全监控及反馈分析系统的综合分析推理库、福建全省水电站大坝安全管理专家系统等重大工程项目。另外还承担刘家峡、龙羊峡、丹江口、佛子岭、陈村、碧口等 30 多座大坝的安全分析和监控等科研项目。与此同时,还参加 10 多座大坝的首次定期检查工作。结合这些工程和科研项目,在数学监控模型、反分析、拟定监控指标以及大坝安全综合评价专家系统等方面,取得了一大批成果,建立了完整的大坝安全监控理论和方法体系,并将成果应用于实际工程,取得了显著的社会、经济效益。

1 数学监控模型

1.1 统计模型及其回归模型的研究和应用

70 年代初,陈久宇教授首先提出应用坝工理论选择统计模型的因子,并结合实测资料,运用回归分析法,建立回归模型及其预报方程,并用模型分离的各个分量,尤其是时效分量,分析大坝的工作状态和监控大坝的安全运行。从而把单纯用数学方法处理监测资料,推进到将资料分析成果应用于定量评价和监控大坝的安全运行。应用上述模型,成功地分析了刘家峡整体式重力坝、响洪甸重力拱坝的结构性态,为监控这些坝的安全运行起到了显著作用^{①②}。

1.2 确定性模型的研究及其应用

吴中如等在统计模型的基础上,吸收国外先进技术,在 80 年代初提出将有限元分析与统计分析相结合的确定性模型^{[1]③}。首次提出的确定性模型的基本原理是:水压分量和温度分量用有限元计算值,时效分量仍用

第一作者简介:吴中如,男,教授,中国工程院院士,从事大坝安全监控研究,曾发表《大坝安全综合评价专家系统》等论著。

①陈久宇.响洪甸重力拱坝原型结构性态分析报告.华东水利学院,1974

②陈久宇.刘家峡重力坝原型观测资料分析报告.华东水利学院,1978

③吴中如等.佛子岭连拱坝原型结构性态分析总报告.河海大学,1986

统计模式,然后与实测值拟合,建立测点的确定性模型及其预报方程。应用上述原理,结合佛子岭连拱坝,将1984年以前的实测资料,建立关键坝垛(13号垛)的确定性模型及其预报方程。这些成果有效地定量评价了该坝三次事件(两次加固、一次洪水漫顶)对大坝结构性态的影响;正确地预报了1989年高水位运行和解析了1993年11月下旬遭遇特殊情况时,大坝出现异常的成因。与此同时,上述模型还成功地应用于陈村、龙羊峡、丹江口等多座大坝安全分析、评价和监控,取得了很好的效果。

为了对时效分量进行力学模拟,我们从90年代初开始,研制和开发了用于观测资料分析的粘弹性和粘弹塑性有限元模型和程序,结合实测资料对时效分量进行全过程的力学模拟,并与水压分量和温度分量的有限元计算表达式相结合,再与实测值拟合,建立了完整的确定性模型。应用上述原理,建立了龙羊峡重力拱坝典型坝段的确定性模型,对该坝运行过程中,9号坝段在1989年6月5日至10日径向位移向上游产生5~6mm的突变值进行了解析和监控^[2]。

在测点模型的基础上,提出了全坝和水平拱的变形确定性模型,对全坝和水平拱的变形性态进行实时监控,如龙羊峡重力拱坝,应用该模型,发现了E1.2497~E1.2560部位的切向位移,整体向左岸变形。

1.3 其它监测模型的研究

在进行统计模型和确定性模型开发研究的同时,我们在80年代初,应用时间序列、模糊数学和灰色系统理论等,结合佛子岭连拱坝等工程的观测资料,建立了预测模型^[1],收到了与统计模型、确定性模型相互检验的效果。

90年代初,我们应用混沌理论分析岩土边坡体的监测资料,提出了分形几何理论在岩土边坡稳定性分析中的应用^[3];应用Ljapunov指数研究岩土边坡的稳定判据^[4];应用Ljapunov函数研究岩土边坡的稳定性^[5]。这些成果,可以快速地判断岩土边坡

的稳定状态,为决策提供依据。

2 完善和发展反分析理论

70年代末,陈久宇教授结合刘家峡、响洪甸大坝工程建立了统计模型,并用平面理论解析法反演坝体混凝土弹性模量,用有效指数法分析刘家峡重力坝横缝的结构作用,用非线性参数迭代法反演坝体混凝土的渗流扩散系数等,为我国的原型观测资料反分析开创了新局面^②。

在此基础上,我们应用有限元法,结合原型观测资料建立各类监控模型分离的各个分量,反演坝体和坝基的变形参数(包括弹性模量和变形模量等)、热力学参数(包括线胀系数、导温系数)、断裂参数(断裂韧度)、等价摩擦系数,以及土石坝的渗流参数及徐变度等。

90年代初,利用空间位移模型和水平拱模型,并结合三维有限元法,我们又对坝体、坝基和库盘进行分层分区的变形反演^[2]。与此同时,应用三维粘弹性和粘弹塑性有限元法,对基岩和坝体的粘性参数进行反演^[2]。从而,对结构分析所用的参数,利用原位监测资料进行全面地反演和校准,为结构分析提供可靠依据。

在发展和完善参数反分析的理论及方法的同时,我们对有限元模型的边界条件(包括有限元范围、边界约束条件以及特殊边界的模拟等)也进行了反分析^{[2][6]},使有限元模型更能反映大坝及坝基的实际情况。

3 拟定变形监控指标的理论、方法及其应用研究

监控指标是监控大坝安全的关键指标,它不仅可以快速地判断大坝的安全状况,而且给大坝管理带来极大的方便。因此,正确拟定监控指标已成为坝工监测领域内的重要课题。

监控指标包括变形、扬压力和应力等。扬压力和应力的监控指标依据规范拟定。而拟定变形监控指标则比较复杂,因为大坝的

坝高、坝型、筑坝材料、地形地质以及运行方式等不同,各座大坝及各个坝段的变形监控指标也不同,需要依据实测资料,进行全面深入地正反分析,然后通过荷载场,将应力场与位移场进行复杂的耦合结构正反分析,才能拟定。

3.1 常规分析法拟定变形监控指标

目前常用置信区间法,即用数学监控模型的回归预报值 $\hat{\delta}$ 与实测值 δ 的差值 Δ ,若在置信区间 $\Delta = \pm s$ 范围内,则测值正常,否则为异常。该法没有较好地联系大坝的结构性态,有时测值超过置信区间,但不一定是异常值。

针对上述问题,我们在 80 年代初提出用小概率法拟定变形监控指标。其基本原理是:根据不同坝型和各座坝的特点,在实测系列中,每年选择对变形、稳定、强度或裂缝不利的荷载组合作用时,所对应的监测量 y_{mi} (或数学监控模型中分离的荷载分量)构成一个样本,即

$$y = \{y_{m1}, y_{m2}, \dots\} \quad (1)$$

然后,对其进行分布检验和统计特性值(均值 $\bar{y}$ 和标准差 σ_y) 计算,确定失事概率 α ,从分布函数

$$y_m = F(\bar{y}, \sigma_y, \alpha) \quad (2)$$

中求出监控指标 y_m 。

3.2 结构分析法拟定变形监控指标

用结构分析法拟定变形监控指标^[6],包括对其进行力学定义,确定变形监控指标的划分标准、进行边界条件和参数反分析,用粘弹性和粘弹塑性理论拟定变形一、二、三级监控指标。其中边界条件和参数反分析,上文已有说明,这里扼要说明其它部分内容^[6]。

3.2.1 变形监控指标的力学定义及划分标准

依据大坝安全条例和监测规范,大坝的安全状态分正常、异常和险情三大类。与此同时,根据大坝的结构性态也可分弹性、弹塑性和失稳破坏三个阶段。因此,变形监控指标也相应分一、二、三级。

根据重力坝和拱坝的大量工程经验和试验成果,大坝变形一般分线弹性、屈服和破坏

三个阶段。其中,重力坝的线弹性阶段,其应力小于材料的比例极限或允许应力,拱坝的应力则小于准线弹性极限;屈服阶段为应力小于屈服强度,但重力坝上游面不允许出现裂缝;破坏阶段为应力达到强度极限。下面是对应上述各阶段的控制标准(或约束条件)。

一级指标的控制标准:

$$\text{强度} \quad \sigma_t \leq [\sigma_t], \quad \sigma_s \leq [\sigma_s] \quad (3)$$

$$\text{稳定} \quad K \geq [K] \quad (4)$$

二级指标的控制标准:

$$\text{强度} \quad \sigma_t \leq \sigma_{tR}, \quad \sigma_s \leq \sigma_{sR} \quad (5)$$

$$\text{稳定} \quad F \leq R_{m2} \quad (6)$$

$$\text{抗裂} \quad K_c \leq [K_{1c}] \quad (7)$$

三级指标的控制标准:

$$\text{强度} \quad \sigma_t \leq \sigma_{tm}, \quad \sigma_s \leq \sigma_{sm} \quad (8)$$

$$\text{稳定} \quad F \leq R_{m3} \quad (9)$$

式中 σ_t, σ_s 分别为不利荷载工况下在控制部位的计算应力; $[\sigma_t], \sigma_{tR}, \sigma_{tm}$ 分别为材料的允许拉应力、屈服强度和强度极限; $[\sigma_s], \sigma_{sR}, \sigma_{sm}$ 分别为材料的允许抗压强度、屈服强度和强度极限; F 为对应不利荷载组合时,滑裂面上的滑动力; R_{m2}, R_{m3} 分别为对应滑动面上材料的抗剪切强度(c, f)处于屈服和强度极限时的抗滑力; $K, [K]$ 分别为对应不利荷载组合时的抗滑稳定安全系数和允许抗滑稳定安全系数; $K_c, [K_{1c}]$ 分别为裂缝尖端的应力强度因子和断裂韧度。

这里应指出:大坝不允许出现破坏阶段,即变形应小于三级监控指标。

3.2.2 拟定变形监控指标的理论和方法

a. 基本原理。依据上述力学定义和划分标准,根据式(3)至式(9),可简写出:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(\sigma_t, \sigma_s, [\sigma_t], [\sigma_s], [K], c, f, [K_{1c}]) \\ &= f(\Omega_p) = f(\delta_{im}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $x = R - F$; Ω_p 为不利荷载组合集; δ_{im} 为 i 级监控指标。

根据式(10)、通过荷载集 Ω_p 计算应力,由约束条件求出对应的各级监控指标 δ_{im} (i

= 1, 2, 3)。

b. 理论和方法。依据各级监控指标的力学定义,针对大坝存在时效位移的特点,在计算 δ_{im} 及其对应的 σ_t, σ_s 时,可用下列理论和方法拟定变形一、二、三级监控指标。

①用粘弹性理论拟定一级变形监控指标。采用4个参数的伯格斯模型(即开尔文和麦克斯威尔串联模型),并针对大坝及坝基的结构特点,编制粘弹性有限元分析程序,计算一级变形监控指标所对应的荷载组合工况及约束条件的变形值,即为一级监控指标。

②用小变形的粘弹塑性理论拟定二级变形监控指标。将宾哈姆模型与伯格斯模型串联,构成6个参数的粘弹塑性模型,并考虑大坝的结构特点,编制粘弹塑性有限元分析程序,计算二级变形监控指标所对应荷载工况及约束条件的变形值,即为二级监控指标。

③用大变形粘弹塑性理论拟定三级变形监控指标。应用大变形理论,即流变模型与上述模型相同,但应力和应变用 Cauchy 应力的 Jauman 导数及变形率,并考虑大坝的结构特点,编制大变形的粘弹塑性有限元分析程序,计算三级变形监控指标所对应的荷载工况及约束条件的变形值,即为三级监控指标。

3.3 应用情况

应用上述理论和方法先后为佛子岭、陈村、丹江口、龙羊峡等工程拟定了变形监控指标,在监控这些大坝的安全运行中取得了实效。比如,佛子岭连拱坝,依据1984年以前的变形资料,经深入进行正反分析,拟定关键坝段(13号垛)低温期的坝顶水平位移为5.285 mm,控制水位为122 m;1993年11月下旬遇强寒流冲击,库水位上升到125.56 m,11月20日的实测水平位移为5.31 mm,与监控指标接近。由于未采取降低库水位的措施,在11月22日,实测位移达5.81 mm,河床其它坝垛向下游的水平位移也超过历史最大值20%~54%,坝基沉陷也超过历史最大值,安徽省电力局上报安徽省政府和电力部后,立即降低库水位至122 m,并及时组织特种安全

检查,避免了不利运行工况对大坝结构的危害和可能导致的运行事故。与此同时,给其它坝拟定的变形监控指标也收到了监控大坝安全的实效。

4 大坝安全综合评价专家系统

由于大坝的工作条件十分复杂,对其安全分析和评价,已从单因素发展到多因素,从单项分析发展到多项综合分析和综合安全评价。因此,采用专家系统进行分析就显示出其独特的功能。河海大学在90年代初,在潘家铮院士的支持下,与电力部大坝安全监察中心、青海省电力工业局等合作,共同开发和研制了大坝安全综合评价专家系统^[2,7],下面介绍其核心内容。

4.1 系统的总体目标

依据各类规范、专家知识和对监测资料深入正反分析的成果,对实测资料和日常巡视结果,进行实时分析,评判测值的性质,及时发现大坝运行中的疑点和不安全因素,对其进行综合推理分析,综合评价大坝的安全状态,并提出辅助决策的建议。

4.2 系统的总体结构和功能

专家系统由综合推理机、知识库、工程数据库、方法库和图库(简称“一机四库”)组成,其总体结构见图1。各部分的主要内容和功能扼要介绍如下。

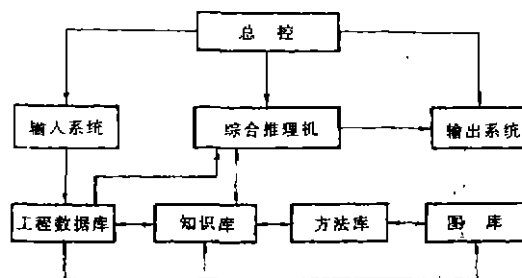


图1 专家系统总体结构

a. 知识库。依据各类规范和专家经验,构成各类评判准则(包括时空评判、力学规律、监控模型、监控指标、日常巡查和关键问题),根据实测资料,评判测值是否正常或者大坝是否工作正常。

b. 综合推理机。若识别测值为疑点或异常,或者为病险坝,则用推理机进行成因分析和辅助决策,包括综合分析检查、观测检查、物理成因分析、专家综合诊断和辅助决策等部分。

c. 工程数据库。工程数据库为大坝安全综合分析和评价提供资料和数据,主要包括工程档案库、原始数据库、整编数据库和生成数据库,以及管理设计、施工资料、监测资料、资料分析和反分析成果等。

d. 方法库。方法库为大坝安全综合分析和评价提供定量依据,主要包括资料分析和反分析软件包、结构和渗流分析软件包、综合分析和评价程序、洪水调节计算程序等。

e. 图库。图库用于大坝安全综合分析和评价的图形、图像需求,以达到身临其境的效果。

4.3 应用情况

大坝安全综合评价专家系统成果首先应用于龙羊峡重力拱坝的安全分析和评价,成功地解析了龙羊峡大坝从蓄水以来运行过程中出现的疑点和不安全因素,并提出辅助决策的建议。与此同时,该成果还应用于丹江口工程。目前,正推广应用于福建省的水电站大坝和二滩水电站大坝等工程的安全分析和评价。

5 结 语

河海大学从 1974 年以来,在大坝安全综合分析和评价方面取得了一系列成果,主要归纳如下:

a. 在国内首先提出基于坝工知识的统计模型,为我国利用观测资料,对大坝的安全状态作出定量分析开创了新局面。与此同时,在国内首先提出确定性模型,将有限元与统计分析相结合,有效地监控大坝的安全运行。另外,还将时间序列、灰色系统和模糊数

学等理论,用于分析大坝观测资料中,以建立预测模型。近几年来,还应用混沌理论,建立岩土边坡体的稳定性分析模型。从而,建立了完整的监控模型体系,并在实际工程中得到了广泛应用。

b. 发展和完善反分析理论,将实测资料建立的监控模型分离的各个分量,结合结构分析(如有限元、理论解析解等)的计算成果,反演了分区分层和综合的变形参数、热力学参数、断裂参数、渗流参数等。与此同时,还对有限元模型及其边界条件进行反分析。从而为正演分析大坝、坝基的结构性能提供了可靠的参数和有限元模型。

c. 在国内首先提出应用小概率法和结构分析法拟定变形监控指标,在佛子岭大坝等实际工程的实时监控中取得了实效。

d. 在国内首先提出基于“一机四库”的大坝安全综合评价专家系统。该系统应用于龙羊峡等工程中,取得了显著的社会、经济效益,并在福建省的水电站大坝和二滩等工程中推广应用。这将使我国的大坝安全监控上一个新台阶。

参考文献

- 1 吴中如等. 水工建筑物安全监控理论及其应用. 南京:河海大学出版社,1990
- 2 吴中如,顾冲时. 大坝安全综合评判专家系统. 北京:北京科技出版社,1997
- 3 吴中如等. 分形几何理论在岩土边坡稳定性分析中的应用. 水利学报,1996(4)
- 4 吴中如等. 应用 Ljapunov 指数研究岩土边坡的稳定判据. 岩石力学与工程学报,1997,16(3)
- 5 吴中如等. 应用李雅普诺夫函数研究岩土边坡的稳定性. 水利学报,1997(8)
- 6 吴中如等. 混凝土坝变形监控指标的理论及其应用. 大坝观测与土工测试,1997,21(3)
- 7 Wu Zhongru et al. Cause analysis in dam safety assessment. Dam Engineering, 1994, 5(1)

(收稿日期:1997-09-16 编辑:马敏峰)