

研究报告

# 综论大坝原型反分析及其应用

顾冲时, 吴中如

(河海大学水利水电工程学院, 南京 210098)

**[摘要]** 在研究大坝原型反分析及其应用研究现状的基础上, 提出了反分析中急待解决的热点问题, 并对这些热点问题进行了探讨, 介绍了一些新的分析理论和方法。

**[关键词]** 大坝; 原型反分析; 应用

## 1 前言

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, 已建成堤坝 86 000 余座, 15 m 以上大坝 18 000 余座, 其中包括坝高 240 m 的雅砻江二滩双曲拱坝、坝高 178 m 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 30 年以上, 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。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, 进而采用结构计算及数模分析, 拟定了关键坝段 13 号坝垛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, 其它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电力部, 立即降低库水位至 122 m 运行, 避免了不利于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 月下旬蓄水, 在 1989 年龙羊峡上游遭遇大洪水, 入库水量  $32.4 \text{ Gm}^3$ , 由于大坝尚未竣工, 当时面临库水位能否从 2 545 m 上升到 2 575 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  $G_4$  石英岩拉裂深度控制在 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 2 575.04 m 水位时, 实测值为 16.28 m), 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 2 575 m; 与此同时, 在大坝建成后, 笔者又对 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, 分析表明龙羊峡在正常高水位 (2 600 m) 时, 其强度

**[收稿日期]** 2000-08-07; **修回日期** 2000-10-19

**[作者简介]** 顾冲时 (1962-), 男, 江苏启东市人, 河海大学教授, 博士生导师

\* 高等学校骨干教师资助计划项目

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，委托笔者对其 1991 年以前的资料进行系统反分析，包括物理参数的反演分析，对 105 m 高程裂缝的稳定分析，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 1990~1993 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原型进行反分析，可对大坝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，进一步完善坝工设计的理论和方法。因此，原型反分析研究具有重大的社会效益和科学价值。

## 2 反分析的内涵及研究现状

### 2.1 反分析的内涵

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 and 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（图 1）。从图 1 看出：

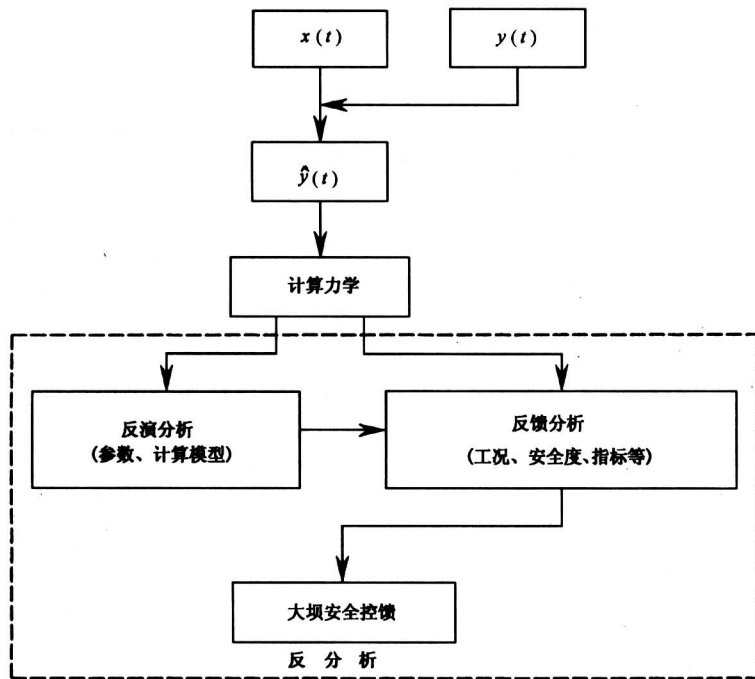


图 1 反分析示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Back Analysis

- $x(t)$  ——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）。

(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结果等，以校准影响计算精度的主要参数，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，反馈大坝的安全运行，称之为反馈分析。

## 2.2 研究现状

大坝与基础,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。

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,尤其在混凝土坝的反分析工作中已较为普遍地应用。吴中如等人<sup>[1,2]</sup>提出利用原型观测资料,由确定性模型及统计模型结合有限元成果,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, Fanelli 和 Giuseppetti 等人<sup>[3,4]</sup>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; 吴中如、陈继禹等人<sup>[5]</sup>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度,取得了较好的效果; 陈久宇、杨代泉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,反馈纵缝的实际结构作用。葡萄牙国立土木工程研究院(简称 LNEC)<sup>[6]</sup>,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。吴中如等人<sup>[7]</sup>利用弹性理论,导出了湿胀应力的理论计算公式,并由此反馈大坝的应力控制指标,有一定的实际意义和参考价值。

近 20 年来,位移反馈分析方法,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馈分析。

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, Shimiau 提出了边界元位移反分析方法; 樱井春辅在隧洞开挖过程中,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。

在粘弹性参数反演方面,刘怀恒和杨林德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、林炳仁等人提出了由位移观测资料反演分析鲍针埃丁一

汤姆逊粘弹性模型参数的边界元法,效果较好;此外,国内外还有很多学者在这方面进行了研究,得到了一些实用的结论。

对于粘弹塑性问题的位移反分析,王芝银等研究了西原流变模型的位移反分析问题; 薛林、杨志法和郗玉亭等人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; 胡维俊等人基于优化理论,提出了拱坝位移反馈分析的多点拟合法,得到了较为合理的成果。

在坝基渗流参数反演,以及岩体应力场与渗流场耦合反馈分析方面,国内外学者做了大量的研究分析工作。王士军和刘嘉忻<sup>[8]</sup>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; 朱岳明等人<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>研究了均布正交裂隙中渗流随介质应力的变化; Brekke 等人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; Wittke<sup>[11]</sup>在考虑水位渗透力和浮托力的情况下,研究了大坝和坝基的相互作用。

在大坝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、坝的不同结构形态的影响,因而拟定的难度较大。国外在这方面报导很少,葡萄牙学者 Mara Ramos<sup>[12]</sup>,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测指标,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,以吴中如等人<sup>[13]</sup>为主,提出了用典型监测效应量的小概率法和极限状态法,拟定坝体和坝基的位移安全监控指标,取得了较好的效果。此外,近几年吴中如等人<sup>[14]</sup>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等方法更全面,在实践中已开始推广应用。

## 3 急待解决的热点问题

由上分析,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，目前还存在不少困难，有的问题直接制约着反分析的进一步深化研究，其中急待解决的问题有：

### 3.1 有限元分析法问题

有限元等数值分析方法已广泛应用于大坝的反分析，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方面，尚需深入研究。

### 3.2 反分析模型和方法问题

以往通常用单测点模型进行分析和反分析，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，由于单测点模型主要反映局部变化规律，而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演分析模型，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，目前还处在研究阶段，有一些理论和方法尚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。

### 3.3 渗流作用下应力分析问题

由监测资料分析结果表明，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，节省工作量。但至今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分析尚属起步阶段，此课题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正反分析有待进一步研究。

### 3.4 稳定分析问题

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，也是大坝及岩基稳定反分析的基础。但这些方法还有待进一步完善和提高。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，因而应用突变理论分析大坝、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，尤其用于岩体边坡的稳定性反分析判别上，将有广阔的应用前景。

### 3.5 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，则各座大坝，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，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。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意看出：拟定变形监控指标，不仅要全面分析和反分析，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。

## 4 研究进展

针对上述提出的问题，国内以河海大学等单位为代表，依据实测资料，对大坝及岩基反分析中的热点问题进行了研讨，得到了下列主要成果：

1) 针对大坝及岩基反分析中影响有限元精度的几个关键因素，从最基本公式着手，分析了引起误差的原因，研究了提高有限元计算精度，并结合实例进行了分析，得到了以下结论：对于高坝大库，在分析其位移时，应考虑大范围有限元模型，而对于应力可用近坝区有限元模型分析。至于中小型坝，在选择合适的边界约束情况下，坝基的范围考虑  $1 \sim 2$  倍坝高，其精度即可满足工程的要求。

2) 从点、线、面位移场入手，提出了坝体、

坝基和库盘整体的反演分析模型,并首次成功用于大坝及岩基的反分析。此外,对不同的实测温度情况,导出了多种反演坝体混凝土温度线膨胀系数的方法,提出了经数值计算并由实测温度计测值推求未知点的变温值的公式,基本上解决了因温度计布置不足而难以反演混凝土温度膨胀系数和导温系数的问题。

3) 应用粘弹性有限元,结合实测资料,提出了大坝及岩基的粘性系数的反演分析模型,并导出了分步反演粘性系数的公式,开发了相应的分析程序。

4) 提出了用插值补点回归法、动态迭代回归法以及动态插值迭代回归法优化反馈分析中位移计算结果的方法。此外,研究了由应力最佳点推求有限元的结点应力方法,利用这一方法可优化反分析中应力计算结果,从而,可进一步提高反分析成果的质量。

5) 建立了判别裂缝再生和扩展的数学模式,以及临界荷载图的控制方程。并基于可靠度理论,提出反馈大坝及岩基实际运行荷载的分析方法,开发了相应的分析程序。

6) 研究了利用突变理论分析大坝及岩基稳定性的基本原理,提出了利用尖点突变模型反分析大坝和岩基稳定状况的判据及计算模型。实例分析表明,其成果与有限元法分析和模型试验结果一致。

7) 在深入分析混凝土坝及岩基的变形过程及转异特征的基础上,提出了拟定大坝变形监控指标的准则及其计算方法;通过实例,重点研究了利用结构分析法拟定变形监控指标的原理和分析步骤,研制了相应的弹性、粘弹性、粘弹塑性等有限元分析程序。

上述研究成果,已应用于龙羊峡、佛子岭、陈村、丹江口、古田溪、安砂、池潭等工程,并已取得了实时馈控的实效和显著的经济效益。

## 5 结语

大坝原型反分析理论及其应用问题,一直是坝工和监测界研究的重要课题。虽然,坝工监测界已做了大量的分析和研究工作,并已取得了许多丰硕成果,但由于该方面问题的复杂性,目前,还需作进一步的研究和分析,其中包括下列几个热点问题:

1) 反分析模型及分析方法方面。以往,监测

界中广泛采用单测点监控模型对坝体及岩基进行反馈分析,为监控大坝安全、反馈设计取得了一定的实效;但是由于单测点模型,仅反映局部状况,对综合分析和评价大坝及其地基的安全状况带来困难。在坝工设计界中,通常用到结构分析方法,然而,依据大坝及坝基的实际情况和资料合理地建立结构计算模型、计算参数的选择以及进一步优化计算成果等问题,尤其是将两者混合在一起的反分析模型和方法尚在进一步研究之中。随着学科的交叉发展,一些新的边缘学科理论(例如突变理论等)用于反馈设计分析中,将进一步改进和完善反馈设计理论。

2) 变形监控指标。利用变形安全监控指标,反馈和控制大坝的安全运行是坝工界一直关注的重要课题,因为利用变形监控指标,可方便地馈控大坝的安全状况;但是拟定变形监控指标的难点是:各座大坝、即使是同座大坝的各个坝段,其变形监控指标不同,需要以实测数据为依据,各类规范为准则,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,并参照管理、运行单位根据长期运行的经验来确定。因此,这方面研究的内容广泛而复杂,有许多的技术问题尚需深入研究。

## 参考文献

- [1] 吴中如,阮焕祥.混凝土坝观测资料的反分析[J].河海大学学报,1989,(2):50~54
- [2] 刘观标,吴中如.反演连拱坝混凝土的物理参数[J].河海大学学报,1987,(4):78~82
- [3] Bonaldi P, Fanelli M, Giusepitti G. Displacement forecasting for concrete dams via deterministic mathematical models[J]. International Water Power & Dam Construction, 1977, 29(9):143~148
- [4] Giusepitti G. Basic theory underlying the computation of influence coefficients[C]. ISMES, 1986. 241~247
- [5] 吴中如,陈继禹,范树乎.用反演分析法推求连拱坝混凝土的力学参数和断裂初度[J].大坝观测与土工测试,1986,(3):7~11
- [6] LNEC. Criteria followed in portugal in observation of concrete dams[J]. Detection of Deterioration Phenomena, Teletransmission, 1979(10):18~23
- [7] Gu Chongshi, Wu Zhongru. Research on the expansion stress in wet concrete and the application to the allowable stress in arch dams[J]. Dam Engineering, 1996, 7(4): 351~362
- [8] Wang shijun, Lin Jiixin. Determination of hydraulic con-

- ductivity model for concrete foundation by optimum inversion [C]. International Symposium on Monitoring Technology of Dam Safety, 1992. 187~192
- [9] 朱岳明. 测压管水位的反分析确定性混合模型[C]. 大坝安全监测技术国际学术讨论会论文集, 1992. 92~97
- [10] Gale J E. The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress—fracture closure—fracture permeability relationships[C]. Proc. of the 23th U. S. Symposium on Rock Mech, Berkeley, California, 1982. 107~113
- [11] Wittke W. Rock mechanics—theory and applications with case histories, Berlin: Springer—Verlag, 1990
- [12] Mara Ramos A. New method for quantitative analysis of dam displacement [C]. 3rd International Conference on Computation Methods and Experimental Measurement, Porto Carras, Greece 1987. 213~220
- [13] 吴中如, 沈长松, 阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 河海大学出版社, 1990. 112~124
- [14] 吴中如, 朱伯芳. 三峡水工建筑物安全监测与反馈设计[M]. 中国水利水电出版社, 1999. 81~104

## Review on New Theories and Methods in Prototype Back Analysis of Dam

Gu Chongshi, Wu Zhongru

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineer, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] Based on the study of the present theories and application in prototype back analysis of dam, the hot problems which need to be solved urgently in back analysis are pointed out and studied. Some new back analysis theories and methods are introduced.

[Key words] dam; prototype back analysis; application



### 《加氢裂化工艺与工程》

随着我国加工重质原油及含硫原油的比例不断增多,特别是生产环境友好的清洁油品的需求增加,加氢裂化技术在我国炼油企业得到了广泛的应用和飞速发展。为此,炼油及石化行业的人士迫切需要更多和更深入地了解 and 掌握加氢裂化的技术理论和最新进展。

有鉴于此,中国石化出版社专门邀请了抚顺石化研究院、洛阳石化工程公司、中国石化信息中心和抚顺石化公司等单位的十几名专家,撰写了《加氢裂化工艺与工程》专著。该书历时3年多,由专家们查阅和研究了大量国内外的文献资料后撰写而成,有不少国内技术成果及数据首次披露在本书。全书涵盖了加氢裂化催化剂及化学反应、原料及产品、工艺过程及反应参数、反应动力学及数学模型、装置流程及主要设备、传质传热及流体力学、工业装置操作技术及自动控制、高压下的物流性质、加氢脱蜡技术、技术经济等。该书内容新颖翔实,理论与实际相结合,其学术性与实用性都达到了较高水平,是从事科研、设计、生产、教育及技术管理人士的重要参考资料。

该书由韩崇仁担任主编,约150万字,参考文献近1400篇。这是中国石化出版社有关主要炼油技术的工艺与工程系列专著之一。它是继《催化裂化工艺与工程》等专著之后又一本重要专著。