



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

黄宏伟 等 著

地下工程动态反馈与控制

同济大学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

黄宏伟 等 著

地下工程动态反馈与控制

同济大学出版社

内 容 提 要

本书主要以岩石和土体介质中的地下工程为对象,对现场工程监测数据进行分析与处理,详细论述了增量反馈、时效反馈、不确定性反馈、非线性反馈、智能反馈等方法的基本原理及其工程应用,使得根据工程监测数据进行工程性态预报及动态反馈成为可能,并以此为基础对地下工程作出正确的控制与决策。

本书主要读者对象是涉及地下工程的设计、施工、监测等单位的管理与工程技术人员,以及高等院校土木工程专业师生;也可作为高等院校土木工程专业高年级本科生、研究生的专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程动态反馈与控制/黄宏伟等著. —上海:同济大学出版社,2012. 12

ISBN 978-7-5608-4993-5

I. ①地… II. ①黄… III. ①地下工程—反馈控制—动态分析 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236973 号

地下工程动态反馈与控制

黄宏伟 等著

责任编辑 杨宁霞 高晓辉 责任校对 徐春莲 装帧设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 苏州望电印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13.75
印 数 1—1100
字 数 343 200
版 次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-4993-5

定 价 58.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

由于全球气候变暖、能源环境问题以及人口向城市的不断迁移,21 世纪已经成为地下空间与地下工程的世纪。各种城市轨道交通的地下隧道、城市地下空间、城市人防工程、山区高速公路隧道、矿山巷道、水利水电、核废料的地下储存、CO₂ 的地下储存等都涉及地下工程。因为地下工程是修建在复杂不确定性的土体或岩体中的,且其周围往往有敏感性的各类建(构)筑物,有些还是隐蔽性工程,因此在地下工程修建中,大型灾害事故时有发生,在社会上引起很大的负面影响。近几十年来,国内外已发生的此类灾害事故不胜枚举,如 1994 年 9 月上海昌都大厦基坑开挖塌方事故,2003 年 7 月上海地铁 4 号线联络通道建设中的事故,2004 年广州地铁发生的塌方事故,2004 年 4 月新加坡地铁工作井施工塌方事故,2008 年 11 月杭州地铁建设中的地铁车站开挖导致周边塌方事故,2009 年 3 月德国科隆的隧道倒塌事故等。这些触目惊心的灾害事故使我们深刻认识到在地下工程建设中面临的巨大挑战,急需要一种类似代替人工眼睛一样的监测来帮助决策者了解和掌握地下工程的特性。这就需以现场监控为基础,对在敏感环境、复杂地层条件下施工的地下工程,以及超常规大型地下结构等进行力学和变形的性态分析,适时地掌控地层和结构的特性,反馈施工参数及程序,对其进行力学变形性态的控制,确保地下工程建设的安全和可靠。

通常,每个地下工程都需要进行现场监控量测,通过监控量测取得许多监测数据,然而如何才能更有效地利用这些数据为业主和施工单位快速地作出科学的工程决策呢?本书介绍的方法原理和技术可以使我们通过监测数据来对地下工程的稳定性进行评价与快速预测,进而作出正确的工程控制和决策,有效地减少因盲目施工而导致的工程灾害。

本书的内容针对岩石和土体介质中的地下工程。首先介绍了地下工程实施动态反馈与控制的必要性、反分析方法的发展及信息化施工技术的进展(第 1 章);采用数学和工程方法分析现场监测数据,提出了数据挖掘的分析和预测方法(第 2 章);结合工程动态施工和监测,提出了增量反馈法,动态反馈了相关地层变形参数(第 3 章);结合地层介质的时效性,建立了时效反馈方法,为地下工程的时效性预测提供科学方法(第 4 章);由于地层介质和施工方法的随机不确定性,考虑到量测数

据的不确定性,提出了不确定性反馈方法(第5章);在反馈分析中,针对地层介质和隧道结构的非线性性态,提出了非线性系统的动态反馈方法(第6章);由于地下工程的复杂性,其不确定因素较多,经验在工程决策中占有很大比重,为了能够把经验反映到工程决策中去,提出了智能反馈方法(第7章);最后结合具体工程案例,包括软土盾构施工、深基坑开挖、软土顶管施工及岩石隧道施工等,从地层、地下工程结构以及施工参数上对地下工程施工进行控制(第8章)。本书介绍的这些研究成果是在我课题组已经完成的两项国家自然科学基金、首批教育部新世纪优秀人才计划项目、首批上海曙光计划项目以及多项工程实践咨询项目等基金类、人才类和咨询类项目资助基础上,经过二十多年的科学研究,并通过9年的博士研究生教学实践中取得的,是我们长期的科研和教学成果的总结。书中的部分成果已经获得1999年建设部一等奖、2004年上海市决策咨询一等奖、2008年国家科技进步二等奖、2008年上海市科技进步二等奖。同时本书部份成果也得到了“国家重点基础研究发展计划(2011CB013800)”及“长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)”的资助。

另外,我们通过大量的工程实践和研究,对书中内容已经做过多次修正与补充,其中引用的通过大量的工程实例进行的分析与计算成果,也已经在教学实践中反复运用。

本书初稿由我课题组博士后王国欣博士整理而成,素材取自于我先前指导的魏磊硕士、张冬梅硕士、熊祚森博士的学位论文及我主持完成的多个课题研究报告。智能反馈一章内容由高玮博士提供初稿。全书最后由本人统一整理、核定。

需要说明的是,本书初稿完成比较早,由于各种原因一直未能出版。在同事、好友及同济大学出版社编辑的多次督促和帮助支持下,2012年终于完成。但仍感力不从心,书中难免出现差错之处,诚望读者批评指正。

本书可供涉及地下工程的设计、施工、监测等单位的管理与工程技术人员以及高等院校土木工程专业的师生阅读参考;也可作为高等院校土木工程专业高年级本科生、研究生的专业课教材,相关专业的科研和技术人员也可参考使用。

黄宏伟

2012年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 地下工程实施动态反馈的必要性 / 3
- 1.2 反分析方法的发展 / 4
- 1.3 反分析方法的分类及展望 / 7
- 1.4 地下工程的信息化施工 / 9
 - 1.4.1 监控的概念 / 9
 - 1.4.2 信息化施工 / 9
 - 1.4.3 信息化施工的发展 / 11

第 2 章 现场监测数据的分析与处理 / 13

- 2.1 施工监测内容及进展 / 15
 - 2.1.1 监测内容 / 15
 - 2.1.2 现场监测的进展 / 15
- 2.2 监测数据的处理、分析和预报 / 18
 - 2.2.1 数据的取舍 / 18
 - 2.2.2 工程监测数据的分析模式 / 24
 - 2.2.3 工程监测数据分析的方式 / 24
 - 2.2.4 工程监测数据的预测 / 25
- 2.3 测点布置、测试频率、预警及报警值 / 30
 - 2.3.1 测点布置 / 30
 - 2.3.2 测试频率 / 31
 - 2.3.3 现场监测预警及报警值 / 32

第 3 章 增量法反馈与控制 / 33

- 3.1 增量法反馈的意义 / 35

- 3.2 基于弹性地基梁的增量法反馈及实例分析 / 35
 - 3.2.1 荷载增量的确定 / 37
 - 3.2.2 土体水平基床系数值的确定 / 37
 - 3.2.3 挡墙位移的确定 / 38
 - 3.2.4 工程实例分析 / 39
 - 3.2.5 基坑开挖中 k 值变化的一般规律 / 44
- 3.3 基于弹性薄板理论的增量法反馈及实例分析 / 46
 - 3.3.1 弹性薄板的内力及挠度 / 46
 - 3.3.2 弹性薄板的变分求解 / 48
 - 3.3.3 工程实例分析 / 48
- 3.4 讨论 / 53

第 4 章 时效反馈 / 55

- 4.1 经验回归方法 / 57
- 4.2 时间序列方法 / 57
 - 4.2.1 时间序列模型的建立 / 58
 - 4.2.2 时间序列法预报的过程 / 58
- 4.3 流变时效的反馈分析 / 64
 - 4.3.1 软土时效变形模型及选择 / 64
 - 4.3.2 黏弹性位移反分析 / 64
 - 4.3.3 工程实例分析 / 66

第 5 章 不确定性动态概率反分析 / 71

- 5.1 不确定性反分析的必要性及进展 / 73
 - 5.1.1 不确定性反分析的必要性 / 73
 - 5.1.2 不确定性反分析介绍 / 74
- 5.2 随机有限元的逆反分析 / 76
 - 5.2.1 随机有限元逆反分析原理 / 76
 - 5.2.2 随机参数的特征函数法分析 / 79
 - 5.2.3 算例分析与讨论 / 80
- 5.3 广义概率反分析 / 81
 - 5.3.1 Bayesian 反分析原理 / 82

- 5.3.2 基于 Bayesian 广义参数反分析 / 83
- 5.3.3 广义参数反分析的优化问题描述及其优化实施 / 87
- 5.3.4 算例分析及讨论 / 91
- 5.4 区间逆反分析 / 95

第 6 章 非线性动态反馈与预报 / 97

- 6.1 地下工程系统特征及状态变量 / 99
 - 6.1.1 地下工程系统状态特征 / 99
 - 6.1.2 工程实例计算 / 102
- 6.2 地下工程状态变量的非线性动态模式反演及预报 / 106
- 6.3 地下工程稳定性动态反馈的数学方法 / 116
 - 6.3.1 动态稳定性状态的定义 / 116
 - 6.3.2 地下工程系统的动态稳定度 / 117
 - 6.3.3 信息扩散理论与地下工程系统
动态稳定性的分类 / 121
- 6.4 非线性动态反馈的工程实例分析 / 124
 - 6.4.1 工程实例 1 / 124
 - 6.4.2 工程实例 2 / 132

第 7 章 智能反馈与控制 / 139

- 7.1 智能逆向反演分析 / 141
 - 7.1.1 智能逆向反演方法 / 141
 - 7.1.2 智能逆向反演法的实施 / 143
 - 7.1.3 工程实例分析 / 144
- 7.2 智能优化反演分析 / 151
 - 7.2.1 智能优化反演方法及实施 / 151
 - 7.2.2 工程实例分析 / 153
- 7.3 智能反馈控制方法 / 157
 - 7.3.1 智能预测控制技术 / 158
 - 7.3.2 智能预测控制在基坑工程中的应用(袁金荣,2001) / 159
 - 7.3.3 工程实例分析 / 160

第8章 地下工程监控案例分析 / 163

- 8.1 地下工程的控制技术 / 165
 - 8.1.1 地下工程控制策略 / 165
 - 8.1.2 地下工程控制措施 / 166
- 8.2 软土盾构推进对临近基坑施工影响的监控案例分析 / 168
 - 8.2.1 工程概况 / 168
 - 8.2.2 地层物理力学参数 / 169
 - 8.2.3 基坑现场监测分析 / 170
 - 8.2.4 基坑施工中采取的控制措施 / 177
- 8.3 软土深基坑工程预报案例分析 / 178
 - 8.3.1 工程概况及监测布置 / 178
 - 8.3.2 现场监测数据的预报方法 / 180
 - 8.3.3 动态预报模型 / 180
 - 8.3.4 不同预测方法的对比分析 / 181
- 8.4 软土顶管隧道相互影响监控案例分析 / 184
 - 8.4.1 工程概况及工程地质 / 184
 - 8.4.2 顶管顶进中的关键问题 / 185
 - 8.4.3 监测内容及布置方案 / 186
 - 8.4.4 北线顶推对南线管道的影响监测分析 / 187
- 8.5 岩石公路隧道穿越民房的监控案例分析 / 197
 - 8.5.1 工程概况 / 197
 - 8.5.2 监控内容及量测布置 / 198
 - 8.5.3 现场监控数据分析 / 201

参考文献 / 206

第 1 章 绪 论

地下工程是修建地下空间的工程,它包括在地下岩石和土体中开挖的各种隧道、通道、洞室及各类地下室。由于它具有不确定性及复杂性的特点,人们就需要运用一定的科学方法和手段来确保它在实施过程中的安全及可靠。本章简要论述地下工程实施动态反馈的必要性、反分析方法及信息化施工技术的进展。

1.1 地下工程实施动态反馈的必要性

随着城市化进程的不断加快,城市人口密度日益增长,地下空间资源的开发和利用已成为人类解决城市用地不足、交通拥挤、环境污染等难题的一条重要途径。地下工程是实现地下空间的开发和利用的工程,包括在地下岩石和土体中开挖的各种隧道与洞室,是一门综合性的科学技术。地下工程的主要内容包括完成地下建筑所实行的规划、设计和施工。任何在岩石或土层中进行的地下工程施工,工序上都包括了挖掘、支护和设备安装等内容。地下工程施工方法根据地层不同分为土层中施工和岩石中施工两种,在土层中施工主要采用明挖法(放坡、支护、降水)、盖挖法、逆作法、浅埋暗挖法、沉箱、沉井、沉管法、盾构法、顶管法(大口径与微型顶管),而在岩石中施工主要采用钻爆法、新奥法、隧道掘进机法(TBM法)等。随着地下工程施工中新理论、新技术、新方法、新材料和各种先进施工机具的不断涌现,地下工程施工技术在不断改进和完善,而这些新的技术和方法更加依赖于施工的信息化。

不难想象,地下工程面临有多种不确定性和不确知性,粗略介绍如下。

(1) 工程赋存地层条件本身的不确定性。其主要是因地下工程周围的水文地质环境,如岩石、土体和水文由于其赋存的条件和形成过程具有天然的复杂性、不确定性和不确知性。

(2) 施工环境、条件、方法和设备异常复杂。越来越多的大型、特大型地下空间需要施工,越来越近间距的各类地下工程需要修建,环境要求也越来越高,施工日益受到人们的高度关注和重视,因而需要采用相适应的多种施工工法和设备;外部客观不定的因素影响,如气候、降雨等复杂性。

(3) 由于工程所处周围岩土介质的特殊复杂性以及介质与地下结构本身的相互作用,使得地下工程的设计在其物理力学模型、力学计算参数、边界条件、共同作用的考虑等方面也带有一定的不确定和不确知性,有的根本无法准确模拟。正因为如此,人们往往不得不借助于带有某些主观臆断的经验方法。随着工程监控量测技术的发展,人们发现可以通过监控量测对这种复杂不确定的对象予以控制。国际隧道协会的创立者和荣誉终身主席、著名的隧道工程师 Sir Alan Muir Wood 曾说“uncertainty is a feature that is unavoidable in tunneling. but it can be understood and controlled so that it does not cause damaging risk.”通过现场监控量测,可以了解施工过程中周围岩土体及结构体的变形及应力的变化,从而对地下工程的稳定性作出预测和判断,并反馈于下一施工循环的设计和施工,以确定是否要及时或通过下一循环施工来修改初始的设计参数或者施工参数及方案,如此循环方能确保施工中的安全性和设计的科学合理性。这就是土木工程中广为采用的信息化施工的概念,也即国际土力学与基础工程学会前主席、著名的 Ralph B. Peck 教授提出的观测法(the observational method)。Peck 教授创立了地下工程观测法,认为“nothing is better practice than

predicting and verifying how the subsurface materials will behave, and adjusting the design and construction procedures on the basis of the observations as a project proceeds.”因此地下工程的设计要不断地根据监测和开挖的地质情况调整设计。这是一个动态的设计。地下工程的施工是一个不断依赖监控量测来掌控和预报前方地层和支护结构变化,进而变更施工参数和方案,通过对地下工程结构本身以及周围介质进行控制,而不断确保施工过程安全的施工。同上部结构工程相比,有的国际专家称地下工程是没有最终设计的(no final design)。

这里需要提出的是,在地下工程设计施工中,对这一特殊的不同于地上工程的施工方法,国内外普遍采用的术语有反分析方法、反演方法、动态反馈法、信息化设计和施工法、观测法、情报法(日本)等。本书不去讨论哪种术语更为合适,只是为了更能体现地下工程的动态性,故采用动态反馈法,但同时为尊重传统的做法,反分析法、反演方法和信息化施工等词语也会偶尔提到。

另外,还需要指出,本书主要针对地下工程在敏感环境、复杂地层条件下的施工,以及超常规大型地下工程的施工等,其中涉及城市各类地下工程、交通运输隧道等工程领域。

1.2 反分析方法的发展

根据王芝银等(1998)《岩石力学位移反演分析回顾及进展》的文献,反分析方法的发展主要经历了如下的历程。

20世纪70年代初,人们开始注意由现场量测信息确定各类计算参数的研究。Kavanagh 和 Clough 在 1972 年发表反演弹性固体的弹性模量的有限元法,在 1976 年约翰尼斯堡(Johannesburg)的岩土工程勘测研讨会上,Kirsten 提出了量测变形反分析法,1977 年 G. Maier 提出了岩石力学中的模型辨识问题。

20世纪80年代为直接和间接反分析方法研究的重要时期。1980年,Gioda 提出采用单纯形等优化方法求解岩体的弹性及弹塑性力学参数,并讨论了不同优化方法在岩土工程反分析中的适用性;1981年,Gioda 等人利用实测位移反算作用在柔性挡土结构上的土压力;1983年,Arai 采用二次梯度法求解弹性模量 E 和泊松比 μ 的方法;1977年,Kovari 提出了反算地层压力参数的方法;1983年,Sakurai 提出了反算隧洞围岩地应力及岩体弹性模量的逆解法;1981年,中国科学院地质研究所杨志法教授等提出了另一种位移反分析方法——图谱法,利用事先建立的图谱反演围岩地应力分量及弹性模量。

随着岩体工程的发展,国内外众多研究者采用不同的方法对反分析法及其应用作了大量研究。他们考虑到初始地应力由构造应力及自重应力组成,进行线性和非线性位移反分析,利用少量实测位移由拉格朗日插值法反算黏弹性地层初始地应力或在应力空间及应变空间用边界元法进行弹塑

性位移反分析。

在考虑时间相关性、空间效应、消除量测前丢失位移等的影响,刘怀恒(1988)在《地下工程位移反分析——原理、应用及发展》一文中针对 5 种常用流变模型(Maxwel 模型、Kelvin Poyting-Thomson 模型、广义 Kelvin 模型及 Burgers 模型等)进行了有限元法和边界元法位移反分析的系统研究,提出了逆解回归法和逆解优化法,朱维申等(1989)在《考虑时空效应的地下洞室变形观测及反分析》一文中则考虑时空效应对 3 个地下巷道或隧道进行了反演分析;利用空间效应及围岩与支护相互作用的增量位移直接反算支护荷载和初始地应力,虽避开许多未知因素的影响,但在反算地应力时需要已知较可靠的空间效应影响系数;弹塑性问题的反分析研究多采用了优化技术,如黄金分割法、单纯形法、变量替换法、Powell 法和 Rosenbrok 法等,而围岩黏弹塑性位移反分析,则采用了逆解法与优化法相耦合的方法。对于浅埋地下巷道或隧道,围岩的初始地应力不再是均匀分布。不少文献对初始地应力或边界分布荷载的线性或函数分布形式进行了反演分析的研究。王芝银等(1993)在《地下工程位移反分析法及程序》一书中把这些成果应用于黏弹性及弹塑性反分析中。在平面位移反分析的发展过程中,三维反演反分析同样受到人们的重视,有考虑隧道衬砌所进行的三维弹性反分析,有弹性、黏弹性地层初始地应力及力学参数反演计算的有限元法和边界元法,也有空间轴对称蠕变位移反分析的研究。对非均质岩体(多介质材料)的反演分析也有不少研究报导。考虑量测位移及参数先验信息的随机性和不确定性,Bayesian 法、最大似然法等数学方法被用于反演岩体的力学特性参数。

在二维和三维的弹性、弹塑性、黏弹性及黏弹塑性的反演计算和初始地应力的均匀分布、线性分布、函数分布以及均质、非均质材料的反分析等方面取得显著进展的同时,位移反分析法在许多岩体工程中得到成功应用,如利用大坝观测资料反算坝体的渗透系数,将反分析法用于确定地基土的土性参数和地下巷道与隧道围岩地应力及力学参数,求解引水隧道围岩地应力和部分力学参数及立井变形参数等。在有关量测误差的处理、测点布置方式的优化及有关实用问题(如同时利用量测位移与量测荷载、量测位移中既有相对值又有绝对值的处理及考虑可缩性支架刚体位移影响的反分析等)上也有不少的成果。

反分析的目的不仅仅在于对工程范围内岩体初始地应力和力学特性参数的估计,更重要的是同现场监控技术及工程稳定性分析相结合,对工程的可靠度作出合理的评价和符合实际的预测,并对施工中的工程进行支护参数和方案的反馈设计等,使数值解答能有效地用于工程决策。

自从 S. Sakurai(1983)提出一种现场量测辅助设计技术(即用现场量测位移反算岩体弹性模量和初始地应力,然后应用这些参数进行正分析或设计初次支护的参数)之后,国内外不少研究者注意到了反分析结果的应用问题。从围岩、支护的弹性、弹塑性变形预测,到利用考虑时空效应的流变反分析结果进行黏弹性、黏弹塑性分析,预测围岩或支护后期变形及安全度,对工程给出事先的预测。事实上,复杂的岩体工程问题本身具有许多不确定的未知因素,将其视为灰色系统,将反分

析看作是一种灰色逆过程,则可以用灰色系统理论,通过灰色动态模型或灰色预测模型预测未来的位移,并由所预测的位移进行位移反分析后,再利用正分析对围岩或支护的安全度作出超前预测。刘怀恒(1988)以此为基础,提出了一种监测、分析及预报的系统,其实质是在现场监测过程中,建立动态反演与预测模型,利用已获取的量测数据反演参数,及时进行预测。当预测值与后继量测位移发生偏差时,利用新数据修改反演模型,以获取新的参数继续预测,这样不断反演,与预测形成动态反演建模预测法。

在数值位移反分析法的发展过程中,解析位移反分析法也有了长足的进展。其中,圆形洞室围岩弹性及黏弹性位移反分析解答是研究的重点,非圆形洞室的位移反分析主要是采用复变函数方法获取解答。但这些研究只适于求解线弹性和线黏弹性、无支护隧洞问题,无法考虑工程因素和边界较复杂、非均匀地应力、非均质和非线性问题。

20 世纪 90 年代以来,运用系统论、信息论以及模型识别技术,对岩土介质系统物理本构关系的反演建模、模型可信度分析,模型鉴别、检验理论和逆问题统一理论的建立等也有不少研究。袁勇,孙钧(1993)以系统辨识理论和连续介质力学原理为根据,较系统地阐述了岩土介质系统逆问题的建模、参数优化辨识及目标函数构造的原则和方法,进一步完善了概率反分析、Bayesian 反分析、最大似然反分析等理论。基于信息论的观点,综合考虑被反演参数的观测信息、理论预测信息和经验性信息,给出关于被反演参数的更高信息含量的信息表达。这种表达为“后验信息量[未知信息量]=先验信息量+观测信息量+理论信息量”。在这个理论基础上,刘维宁(1993)研究了认识系统参数后验信息的技术途径及反分析结果的唯一性和稳定性问题。黄宏伟,孙钧(1994)则基于 Bayesian 原理,考虑荷载、变形的不确定性及参数的先验信息,认为“量测值=确定性趋势项+随机项”,以随机过程理论为基础,提出了广义参数反分析法。这种方法可推广到现有的几种不确定性反分析上去,如 Bayesian 反分析、最大似然反分析等。除随机反分析外,非确定性反分析还有模糊反分析、扩张卡尔曼滤波器有限元反演法及神经网络反分析法等。总之,这些研究考虑了岩体工程中量测信息的随机性、模糊性和现场量测环境的复杂性,较全面地描述了反分析法的实质和解释了反分析应用中的一些现象,这些方法既归属于不确定性反分析法,又包含了确定性反分析,为逆问题的模型辨识,形成统一的反演理论,解决反分析问题中的一些理论问题,奠定了一定的理论基础。

近期的研究更多地注重反分析的拓宽与应用研究。如应用优化法中的牛顿法反算三维渗透性的分布;对某地下污水处理厂的围岩参数进行三维反分析,得出与现场量测十分吻合的结果;基于地质调查和极限平衡理论,对某露天矿岩(煤)层弯曲变形与破坏模式的反分析,探讨岩层破坏的原因;将广义 Bayesian 方法用于地下工程,并讨论初值选取对反分析结果的影响及模型识别问题,认为更多非确定参数的复杂模型不一定能给出比简单模型更好的工程预测;利用优化设计中的 Powell 法研究地铁结构引起的地面沉降参数的反分析;等等。此外,为了简化非线性和非均质问题

的反演过程,加快反演收敛速度,摄动方法被引入反分析计算之中,形成了一种有特色的摄动反演分析法。

1.3 反分析方法的分类及展望

根据反分析时所利用的基础信息不同,反分析方法可以分为应力反分析法、位移反分析法和混合反分析法。应力反分析法是依据在工程区域内有限个少数实测应力值,建立相应的数学力学模型推求整个工程区域内的初始地应力场;而位移反分析法则利用现场量测位移来反推系统(工程区域)的力学特性及其地质背景的初参数(即工程区域内的力学特性参数、初始地应力等);与前两种方法相对应,混合反分析法依据的基础信息既有位移量测值,又有应力(或荷载)量测值,由这两类信息反推系统的边界条件(或支护荷载)。由于位移量测比应力量测更经济、方便,且较易获取,因此,位移反分析法更为工程所广泛采用。混合反分析法则常用于对支护荷载的反演分析中,其反演分析过程与位移反分析法完全类似。

位移反分析法按照其采用的计算方法又可以分为解析法和数值法(有限元法、边界元法等)。由于解析法只适合于简单几何形状和边界条件的问题反演,因此,难以被复杂的岩土工程所广泛采用。数值法具有普遍的适应性。根据实现反分析过程的不同,数值法又可以分为3类,即逆解法、直接法和图谱法。

逆解法是直接利用量测位移求解由正分析方程反推得到的逆方程,从而得到待定参数(力学特性参数和初始地应力分布参数等)。简单地说,逆解法即是正分析的逆过程。此法基于各点位移与弹性模量成反比、与荷载成正比的基本假设,仅适用于线弹性等比较简单的问题。其优点是计算速度快,占用计算机内存少,可一次解出所有的待定参数。

直接法又称直接逼近法,也可称为优化反演法。这种方法是把参数反演问题转化为一个目标函数的寻优问题。直接利用正分析的过程和格式,通过迭代最小误差函数,逐次修正未知参数的试算值,直至获得“最佳值”。其中优化迭代过程常用的方法有单纯形法、复合形法、变量替换法、共轭梯度法、罚函数法、Powell等。G. Gioda等(1987)总结了适用于岩土工程反分析的4种优化法,即单纯形法、Rosenbrok法(一种改进的变量替换法)、拟梯度法和Powell法,这些方法各有其特点和不足。总的来说,这类方法的特点是可用于线性及各类非线性问题的反分析,适用范围很广;缺点是通常需给出待定参数的试探值或分布区间等,同时,计算工作量大,解的稳定性差,特别是当待定参数的数目较多时,费时、费工,收敛速度缓慢。

杨志法教授提出的图谱法以预先通过有限元计算得到的对应于各种不同弹性模量和初始地应力与位移的关系曲线,建立简便的图谱和图表。根据相似原理,由现场量测位移通过图谱和图表的

图解反推初始地应力和弹性模量。目前这一方法已发展为用计算机自动检索,使用时只需输入实际工程的尺寸与荷载相似比,即可得到所需的地层参数。该方法简便实用,尤其适用于线弹性反分析,具有较高的精度。

综上所述,位移反分析的发展可归纳为几个主要阶段:线性阶段,20世纪70年代末80年代初;流变、非线性阶段,80年代;非确定性反分析与预测及模式识别与理论问题的探讨阶段,80年代末至今。研究涉及各种方法,如解析方法、各种数值方法、概率及模糊方法等。其中对于非线性、多介质问题,大多采用传统优化方法或随机规划技术与数值方法的有机结合来实现。但这些方法均存在计算工作量大、解的唯一性、稳定性差等问题,实用性也需进一步解决。同时,由于岩体工程问题的复杂性,还需要进一步探讨的工作有以下几个方面。

(1) 耦合问题的反分析。对于固液耦合(应力场与渗流场的耦合、应力场与承压水的耦合)、固液气耦合(应力场、渗流场与气流场的耦合)问题,配合工程现场实测(如承压水水压观测、现场瓦斯监测等),进行反分析与预测,具有重要理论和实际意义。

(2) 动力问题反分析。解决非线性动力系统的反分析方法和理论问题,对岩体爆破动力问题、高地应力区的岩爆问题等的动力参数,能利用有关的基础信息给予确定或预测,将会使动力数值分析结果更符合实际。

(3) 动态反演过程模型。实际岩土体力学行为的发生、发展是一个动态过程,它不仅随着工程的施工、环境的变化和时间的持续在不断变化,而且岩土体工程系统每时每刻都处于物质、能量、信息的交换和流动之中。因此,建立动态反演预测模型,对岩土体工程系统内的能量积累、能量耗散的全过程进行可视化反演预测、预报,将更具有实用价值。

(4) 反分析与正分析的同步发展。岩土力学是一门多学科相互渗透、相互交叉的学科,随着相关学科新理论、新方法的出现,岩土力学正分析的建模(如损伤、分形、分叉、混沌理论和流形方法等引入后的建模)也在不断充实和完善。反分析应及时利用现场观测信息反演分析新模型和新方法中的有关参数,以使之尽可能快地应用于实际。

(5) 动态反演预测法应用软件的标准化和实用化问题。将新理论、新方法及其反演分析用于实际,必须设计制作相应的应用软件。岩土力学与工程紧密相关,解决工程问题需要有标准化的实用软件。应用软件实用化的研究是一项极其重要的细致工作,需要花费大量的时间和精力,开展大量的具体的把理论研究成果转化为实用技术的工作,并在实际实施和应用过程中不断改进、完善,为理论研究提出新的课题,促进理论研究的深入,使理论真正服务于工程实际。重视这项工作将有助于逐步缩小理论与实际的距离。

可以相信,随着研究的进一步深入和应用领域的拓宽,反分析方法的理论将更为完善,并与正分析和现场观测构成一个封闭系统,即“观测—反分析—正分析(预测)—观测”系统,其具有相当广阔的应用前景,将对完善地下工程的设计、施工理论和方法起到重大作用。