

岩体水力学

反演理论与方法

■ 邓祥辉 柴军瑞 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

岩体水力学反演 理论与方法

邓祥辉 柴军瑞 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

岩体渗流与应力相互耦合的特性早已被国内外学者所重视,针对两场耦合问题进行了大量的理论分析和数值模拟。然而,如何分析岩体渗流、渗流-应力耦合,以及确定耦合模型中的计算参数,一直是水利工程、地下工程等领域的难点和关键问题。本书针对岩体渗流-应力耦合及参数反演,从裂隙岩体渗流理论出发、系统阐述了岩体渗流模型、岩体渗流与应力耦合特性与模型、渗流与应力耦合分析方法、渗流与应力耦合作用下的参数反演分析等方面的内容。

本书是关于岩体水力学渗流-应力耦合方面的研究专著,可供从事水利工程、隧道与地下工程、石油工程等领域的科研人员、工程技术人员,以及高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩体水力学反演理论与方法 / 邓祥辉, 柴军瑞著.

—北京:国防工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-118-10024-2

I. ①岩... II. ①邓... ②柴... III. ①岩体-渗流力学-水力学-反演 IV. ①TV139.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 049809 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5 1/2 字数 142 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1200 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

人类在工程建设活动中,破坏了地层原有的结构,改变了地层初始应力场,从而引起岩体中地下水运动和围岩力学特性的改变。同时,施工扰动改变了一定区域岩体地下水的补给和排泄条件,形成人工干扰下的地下水渗流场,扰动后的地下水渗流场与岩体应力场相互影响、相互作用,可能会影响工程结构的稳定性。

天然岩体是在构造、风化、卸荷等作用下经过数万年形成的。天然岩体中既有孔隙,也存在着大量的裂隙。这些孔隙和裂隙的存在,不仅决定了岩体的力学特性,也决定着岩体的渗流特性。在岩体渗流的研究中,人们首先把岩体作为孔隙介质来研究,形成了等效连续介质理论,提出了等效连续介质渗流理论。采用等效连续介质渗流模型分析岩体渗流特性时,对于一般岩体可以满足工程分析的需要。但对于存在大的裂隙,甚至是破碎带的岩体,采用等效连续介质渗流模型分析的结果会与实际受力状态差异很大,因而国内外学者开始注意裂隙岩体的结构特性。但由于裂隙岩体结构的复杂性,裂隙岩体渗流研究工作多年来一直发展缓慢。直到 20 世纪 50 年代,有关裂隙介质渗流理论的研究才逐步展开,特别是 1959 年法国 Malpasset 拱坝溃坝和 1963 年意大利 Vajont 拱坝失事以后,裂隙岩体渗流研究逐渐得到工程界的普遍重视。此后,国内外不少学者对裂隙岩体渗流计算模型进行了广泛和深入的研究,取得了一些成果。按照裂隙岩体处理方法的不同,相应地有等效连续介质渗流模型、离散裂隙网络渗流模型、裂隙-孔隙双重介质渗流模型、多重裂隙渗流模型和分区混合介质渗流等多种渗流模型。

随着对岩体研究的深入,人们逐渐认识到地下水对岩体力学特性的影响,如地下水对岩体的软化作用,地下水的流动会影响围岩应力,

在地下水影响下岩体裂隙和孔隙会产生变化等。在对地下水影响的研究中,逐渐认识到地下水与岩体之间是一个相互联系、相互作用、相互制约的耦合关系。水在岩体中流动会改变岩体的原始应力状态,同时岩体应力状态的变化又会影响岩体中水的流动特性。无论哪一个是主动者,都会使渗流场和应力场相互影响而产生耦合作用。岩体渗流与应力相互耦合的特性早已被国内外学者所重视,针对两场耦合问题也进行了大量的理论分析和数值模拟。然而,如何确定渗流、应力及其耦合模型中的计算参数,一直是该领域研究的难点和关键问题。

到目前为止,渗流场和应力场耦合反演参数的研究才刚刚开始。从研究思路上看,主要有两个:一是针对连续介质进行渗流场与应力场耦合模型的参数反演,即在连续介质中或可以视为连续介质的区域内,基于水头、位移等多类型观测资料和耦合正分析的方法,实现了渗流、应力的参数反分析。相对于单场而言,可以大大提高参数反演结果的可信度。二是针对离散裂隙进行渗流场与应力场耦合的参数反演,即把某些裂隙岩体或某些区域作离散介质来研究,在渗流计算中运用离散裂隙网络模型计算,同时利用现场观测数据如水头、位移等进行拟合,以误差最小为目标函数,建立离散裂隙岩体渗流场与应力场耦合的参数反演思路,但反演参数的难度更大。

本书是在等效连续介质渗流理论的基础上,开展岩体渗流特性、岩体渗流参数反分析、岩体渗流-应力两场耦合分析、渗流场与应力场耦合作用下的参数反演分析等方面的研究。全书共分为7章,具体研究内容如下:第1章简要介绍了岩体反演理论,从位移反分析出发,系统总结了目前位移反分析、渗流参数反分析、渗流-应力耦合作用的参数反分析研究的主要成果、存在的主要问题,以及未来的发展方向。特别对两场耦合分析的模型参数反演分析中,存在的问题进行了深入分析。第2章对岩体渗流分析的不同模型进行了介绍和对比,并把效率更高的自适应遗传算法与等效裂隙岩体渗流场数值分析有机结合,对岩体三维渗流以及渗流参数进行反分析。第3章研究了水-岩相互作用的机理,对岩体渗流-应力两场耦合的不同模型的应用条件、范围以及优缺点等进行了比较,建立了孔隙连续介质和等效裂隙连续介质耦合的数学模型。第4章介绍了在考虑非稳定渗流的情况下,进行非稳定渗

流孔隙介质和等效裂隙介质渗流-应力耦合数值分析的方法,并对优化方法与两场耦合数值分析的结合以及参数反演的数值方法进行了介绍和分析。第5章系统研究了工程岩体渗流-应力耦合分析涉及的参数,并对参数分类,同时,对待反演参数的选取方法进行了介绍;结合孔隙连续介质和等效裂隙连续介质耦合模型,建立了两种耦合模型的参数反演模型,并针对工程算例进行渗流-应力耦合作用的参数反分析数值分析。第6章以某水利工程坝区为例,根据坝址区钻孔实测水位资料,对该区域天然渗流场渗透系数进行了反演;并根据反分析得到的渗透系数,对大坝建成后正常蓄水位工况下坝址区渗流场进行预测,提出了有针对性的建议。第7章以某山岭公路隧道为例,采用孔隙等效介质渗流-应力耦合模型,在考虑初始地应力场的情况下,结合现场测试的位移、水位等实测资料对该隧道渗流-应力耦合作用的模型参数进行反演分析;并根据得到的反演参数,对下一个施工段隧道拱顶沉降和洞周收敛进行了变形预测。

本书的成书基础是笔者的博士论文《工程岩体渗流场-应力场耦合分析的模型参数反演研究》。在本书撰写的过程中,西安理工大学的陈尧隆教授、李守义和党发宁教授,长安大学的陈建勋教授,西安建筑科技大学的邵珠山教授对笔者的研究工作给予了高屋建瓴的指导。西安工业大学的顾致平教授、何晖教授在本书的修改过程中也提出了许多宝贵的修改意见。正是在这些老师和前辈的关心和帮助下,笔者才在工作和学业上一步步不断成长,在此向他们表示衷心的感谢。

特别感谢课题组的李康宏、何萌、许增光、崔文娟、何杨、伍美华、覃源、徐维生、马超、王春、刘钊、王玉才、张建、吴江江、黄梅琼、杨雯惠等对本书提出的宝贵建议和付出的辛勤劳动。此外,本书的现场测试工作也得到了中国水电十五局两河口隧道项目部的大力协助,在此表示衷心的感谢。

本书得到了西安工业大学专著出版基金的资助,在此表示衷心感谢。本书同时也得到了国家973计划项目子项“深长隧道突水突泥灾变演化与失稳机理(2013CB036003)”,国家自然科学基金项目“水-岩耦合作用下高边坡变形机理与稳定性分析(50579092)”国家自然科学基金项目“高地应力深埋软弱围岩隧道大变形机理及施工力学特性

研究(51408054)”,陕西省重点科技创新团队支持计划(2013KCT-15),教育部博士点基金“软弱围岩隧道施工过程荷载释放特性研究(20136118110007)”,陕西省教育厅自然基金项目“裂隙岩体渗流场与应力场动态耦合参数反演研究(2010JK599)”,以及陕西省交通厅建设科技项目(13-14K)等项目的资助,在此一并表示衷心的感谢!

本书写作中参考了大量相关文献和专业书籍,在此谨向相关作者深表谢意!由于笔者理论水平和实践经验有限,书中难免存在差错和不足之处,敬请读者批评、指正!

编者

2014年12月

目 录

第 1 章 岩体参数反演理论概述	1
1.1 岩体参数反演的必要性	1
1.2 岩体参数反分析研究现状	2
1.2.1 位移反分析研究现状	4
1.2.2 渗流参数反分析研究现状	7
1.2.3 渗流-应力耦合作用的参数反分析研究现状	12
1.3 岩体参数反分析方法的展望	13
第 2 章 岩体渗流理论	15
2.1 岩体结构特性与渗流	15
2.1.1 岩体结构特性	15
2.1.2 岩体渗流特性	18
2.2 单裂隙渗流	20
2.2.1 单裂隙渗流的概念模型	20
2.2.2 立方定律的修正	21
2.2.3 单裂隙渗流控制方程	23
2.2.4 单裂隙渗流的耦合特性	24
2.3 岩体渗流模型	26
2.3.1 等效连续介质渗流模型	27
2.3.2 离散裂隙网络渗流模型	30
2.3.3 裂隙-孔隙双重介质渗流模型	36
2.3.4 多重裂隙网络渗流模型	38
2.4 岩体渗流模型综合分析	39
第 3 章 岩体渗流参数反演方法	42
3.1 渗流参数反演的数学模型	43

3.1.1	待反演参数	43
3.1.2	目标函数的建立	44
3.2	改进遗传算法	44
3.2.1	遗传算法	44
3.2.2	遗传算法的基本结构	45
3.2.3	改进遗传算法	49
3.3	渗流参数反分析方法	50
3.3.1	渗流参数反分析步骤	50
3.3.2	渗流参数反分析程序	51
3.4	工程实例	52
3.4.1	工程概况	52
3.4.2	工程建模及计算	53
第4章	岩体渗流与应力耦合作用分析理论	57
4.1	岩体渗流与应力耦合作用机理	57
4.2	岩体渗流与应力耦合作用模型	59
4.2.1	岩体渗流-应力耦合模型	59
4.2.2	岩体渗流-应力耦合数值分析方法	63
4.3	岩体渗流-应力耦合作用的数值分析	64
第5章	岩体渗流与应力耦合作用的参数优化反演	70
5.1	耦合分析的模型参数及分类	70
5.2	待反演参数敏感性分析	74
5.3	模型参数优化反演方法	74
5.3.1	目标函数	74
5.3.2	渗流场与应力场耦合的模型参数优化反演程序	75
5.4	渗流-应力耦合作用的模型参数反演分析应用	76
5.4.1	孔隙连续介质耦合作用的参数反分析	77
5.4.2	等效裂隙介质耦合作用的参数反分析	86
第6章	参数反分析在某水利工程中的应用	93
6.1	工程概况	93
6.2	分析模型及边界条件	95
6.2.1	反演分析数学模型	95

6.2.2	边界条件	95
6.3	渗透系数反演分析	95
6.3.1	渗透系数变化范围设定	95
6.3.2	有限元计算模型	97
6.3.3	计算结果与分析	97
6.4	正常蓄水位坝址区渗流场预测	103
第7章	参数反分析在某深埋富水隧道中的应用	107
7.1	工程概况	107
7.2	待反演参数的确定	109
7.2.1	初始地应力场	109
7.2.2	渗流场参数	110
7.3	计算模型与假定条件	111
7.3.1	计算模型	111
7.3.2	边界条件及假定	112
7.3.3	荷载条件	113
7.4	隧道各断面位移测量	115
7.5	参数反演分析	118
7.6	隧道变形预测	126
附录		138
参考文献		153

第1章 岩体参数反演理论概述

1.1 岩体参数反演的必要性

在人类工程活动中,工程荷载施加于岩体之上,改变岩体内部应力场的分布,从而影响岩体的结构,引起岩体中地下水运动和力学特性的改变;同时,工程施工改变了岩体区域性或局部地下水的补给和排泄条件,形成人工干扰下的地下水渗流场。地下水渗流场与岩体应力场相互影响、相互作用,可能最终影响工程岩体的稳定性。

由于构造、风化、卸荷等作用,天然岩体中存在着大量的裂隙。这些裂隙长短、大小不一,在渗流中作为流动的通道。裂隙岩体与孔隙型介质最大的区别在于:孔隙在三个方向上延伸,而裂隙在两个方向上延伸,在这两个方向上比第三个方向上大得多;孔隙的延伸长度比研究区域小得多,而裂隙的延伸很大甚至可以贯穿整个研究区域,其大小变化很大。这必然导致裂隙岩体中渗流截然不同于孔隙型介质。由于孔隙介质分析的理论十分成熟,工程经验相对丰富,近代的工程设计仍把岩体视为与土体类似的孔隙型介质,用连续性介质渗流理论进行分析。相对于多孔介质渗流理论而言,裂隙介质渗流理论发展明显滞后。

直到20世纪50年代,有关裂隙介质渗流理论的研究才逐步展开。然而,裂隙岩体渗流与孔隙介质渗流不同。特别是1959年法国Malpasset拱坝溃坝和1963年意大利Vajont拱坝失事以来,裂隙岩体渗流逐渐得到工程界的普遍重视,人们也逐渐意识到裂隙岩体渗流研究的重要性与紧迫性。为此,国内外不少学者对裂隙岩体渗流计算模型进行了广泛和深入的研究。目前,岩体渗流模型的研究方法主要有四种,即按照裂隙岩体处理方法的不同,相应地有裂隙-孔隙双重介质渗流模型、等效连续介质渗流模型、离散裂隙网络渗流模型和分区混合介质渗流模型。

目前,相对于渗流场的研究,国内外对于应力场的研究较为成熟。在渗流与应力两场耦合理论研究中,也提出了诸多仿真性较好的耦合分析模型,而与这些复杂模型相应的计算参数,却由于实际工程中不确定因素较多,而很难确定。因此,参数的准确选取就显得非常重要,尤其是对仿真性较好的复杂耦合模型而言,情况更为突出。目前的反分析,成果几乎都集中于单场参数反分析。由于单场反分析与两场耦合作用的参数反演对应的分析模型、边界条件都不一样。因此,单场反分析的结果直接应用到考虑耦合作用的分析中可能会造成较大的误差。而实际表明,考虑渗流-应力耦合作用能更好地反映工程岩体真实的变形机理和渗流特性。这样,进行渗流、应力耦合分析时,需要确定一些不易直接测定的参数,这正是研究渗流-应力耦合作用时,反演参数的必要性所在。

为了提高反分析参数的可信度,通常需要测定水位、位移量等多类型观测资料。然后结合渗流场与应力场耦合正分析过程,进行参数反演。由于反分析过程包含了大量实测信息,使反演参数具有较高可信度,因此这种方法是解决这类问题的一种重要手段。然而,纵观国内外文献,考虑岩体渗流和应力耦合时,进行参数反分析还处于探索阶段,对很多问题还没有研究清楚。这样,考虑渗流场与应力场的耦合作用,反演计算参数就成为研究的重点和难点,正逐渐被重视和关注。综上所述,考虑渗流和应力耦合作用时模型参数反分析是一项关键课题,有必要对其进行深入研究。

因此,本书的研究成果,对于水利工程、地下工程的渗流分析,评估地下水对结构安全的影响具有非常重要的意义。

1.2 岩体参数反分析研究现状

在求解岩土工程问题时,通常根据工程基本情况,确定其几何条件、荷载条件、边界条件;同时根据地质勘探和室内外试验来确定地质条件、本构模型、力学参数;最后通过解析法或数值法,求解结构或岩土介质的物理量(如应力、应变等)的过程称为正分析。随着计算机技术的发展,数值计算方法得到了很快的发展和广泛的应用,成为求解岩土

工程复杂问题的有效手段和方法。但是,数值模拟的近似度取决于所用本构模型,而反映模型的是计算参数。因此,数值模拟的近似度最终取决于采用模型及其相关参数。这样,在分析过程中,计算模型中参数的确定成为复杂岩土工程分析中的一个重要方面。然而,岩土体一般形成过程非常复杂,往往是非线性、不连续的材料,确定参数的过程是非常复杂的问题。在实际工程中,如何正确给定岩土体的力学参数已经成为一个比较棘手的问题。

在确定岩土体力学参数方面,主要有三种方法,分别是理论解析法、实测法以及反分析法。

(1) 理论解析法。采用数学推导,得到待反演参数的数学表达式。适用于比较简单的弹性、弹塑性、黏弹性等平面问题,由于假设条件与实际差别较大,可应用范围很小。

(2) 实测法。实测法是采用试验来确定力学参数的方法。目前实测方法主要有室内试验和原位测试。试验测定范围比较有限,测试结果只能代表取样点附近的岩体特性,而且由于取样的扰动,使参数的确定产生一些不确定性。此外,室内试验的“尺寸效应”明显,且与现场条件不符;原位测试也存在数据离散性大、代表性不强及成本高昂等缺点。

(3) 反分析法。反分析法是以现场量测到的反映系统力学行为的某些物理信息量(如位移、应变、水位等)为基础,通过反演模型,反演推算得到该系统的各项或一些初始参数,有时甚至是本构模型的方法。反分析法简单地说,就是把理论解析与实测相结合的方法,这种方法最终目的是建立一个包含实测信息的理论分析方法,以便能正确预测岩土结构的某些力学行为。根据现场量测信息的不同,岩土工程反分析法分为应力反分析法、位移反分析法及应力与位移的混合反分析法。相对而言,在工程中相对位移的测定比较容易,因此位移反分析法的应用最为广泛。

自20世纪70年代提出由现场量测信息进行参数及本构关系等的反分析方法以来,反分析方法得到了很大的发展。通过反分析得到的参数是等效参数,它综合反映岩土体的性质和工程施工的各种影响因素。采用反演参数作为在同一模型下正分析的输入参数,能大大提高

分析结果的可靠性。反分析方法为数值计算提供实用参数的同时,也为预报技术提供了理论基础。在施工过程中,根据施工期间的实测资料进行反分析,将反分析的结果反馈到设计、施工和管理中,为改进设计、优化施工、进行工程预报提供依据,对提高工效、降低成本、保证安全都非常有作用。

1.2.1 位移反分析研究现状

反分析思想于 20 世纪 70 年代中期由 Kirsten 首先提出,后经 G. Maier、G. Gioda 以及 Skurai 等学者发展,并将反分析过程与有限元方法结合,得到有限元的逆分析过程。反分析方法的最主要特点是利用量测位移,根据反推得到的逆方程,求解力学特性参数、初始地应力等参数。在研究中发现,位移法反分析法求解也是有条件的,其求解的必要条件是:待反演参数数目不能多于量测位移数据的数目,当量测位移数据的数目多于待确定参数个数时,需采用优化方法才能求得最佳值。实践中又采用特征函数方法推导参数的方差及其高阶矩,该法不但考虑了量测信息的随机性,还考虑了物理模量的不确定性,无疑更符合实际情况。在位移反分析最初的研究阶段,逆解法以其计算速度快,可一次解出所有待定参数等优点而引起很大的关注。但随着研究深入,该方法需要作出诸多假定,适用范围比较窄等缺点成为研究取得进一步突破的瓶颈。此后,反分析方法随着计算机技术、优化方法的快速发展,取得了非常快速的发展。并逐渐成为解决岩土工程参数确定的最重要的方法,为实际工程提供了确实可行的方法,因此深受工程界的欢迎。

反分析思想一经提出就受到学术界的广泛关注,国内外很多学者投入到反分析的研究中来。1980 年 Gioda 等为确定岩体的弹性及弹塑性力学参数,把单纯形等优化方法与正分析相结合,对力学参数进行反分析,并对不同优化方法在反分析中的应用进行了探讨。同济大学杨林德、黄伟等建立了平面应变弹性和弹塑性问题的反演方法,并结合有限元法,对地下洞室初始地应力位移的参数反分析进行了程序验证。杨志法等根据弹性条件下工程围岩不同的几何尺寸、力学参数、荷载以及位移等因素,预先计算不同弹性模量、初始应力与位移的关系曲线,

建立简便的图谱和图表,根据相似理论,实际工程可根据工程相关条件,比对图谱和图表,反推初始应力和弹性模量。王芝银、李云鹏等根据位移反分析原理,把复合型法与增量反分析有机结合,反演初始地应力、弹性模量等参数。总的来说,自 Kirsten 提出反分析思想,到 20 世纪 80 年代,反分析思想和方法理论研究较多,但应用有限。

20 世纪 80 年代以后,对岩体参数反演的理论研究发展很快。从研究思路主要有两个大的方面:一是数学解析法;二是数值分析法。数学解析法就是采用数学推导,对需要确定的参数进行理论推导。在数学解析法方面,国外学者 Gioda、Skurai、Maier 等首先对岩体参数反分析的可辨识性进行了研究,提出了参数可辨识性的条件和判断方法。Hisatake、Cividini 等学者对不同形状的地下洞室初始地应力、弹性模量以及泊松比等参数的解析方法作了研究。到了 20 世纪 80 年代中后期,我国一些学者开始研究参数反演解析法。研究取得了一些成果,主要集中在两个方面:一是对于不同断面形式的地下洞室,推导初始地应力、弹性模量等参数的数学解析式;二是对不同情况下,力学参数的可辨识条件进行了理论证明,主要成果详见表 1-1。

表 1-1 解析法主要研究成果

成果类别	应用的方法	假定条件	主要领域	主要成果
参数解析解	采用数学的拉普拉斯变换(简称拉氏变换)和复变函数方法	假定地下洞室为黏弹性介质	弹性复变方法和一般弹性理论	采用位移反分析解析法,对任意形状的地下洞室的初始地应力、弹性模量、泊松比等参数进行推导,并研究初始地应力、弹性模量等参数与洞室不同方向位移的关系
参数可辨识条件	弹性复变函数方法和一般弹性理论	假定地下洞室为平面问题、变形适合于弹性变形理论	弹性复变方法和一般弹性理论	对地下洞室的竖直、水平及剪切地应力分量、弹模模量和泊松比等参数的解析法进行了研究。特别是对不同形状洞室的不同参数组合可辨识的唯一性进行了理论分析

在参数反分析数值计算方面,也取得了很大进展。20 世纪 90 年代以后,位移反分析方法得到很大的发展和应用。在位移反分析方法方面,根据是否采用优化方法可以分为优化位移反分析和一般位移反分析;根据是否具有很大的不确定性,又可以分为确定性反分析和不确定反分析。确定性反分析由于分析方法相对不是很复杂,采用此方法的研究人员较多,应用的范围较广,取得的成果也较多。特别是与优化方法相结合的确定性位移反分析,在实际工程中得到了广泛的应用。如冯夏庭对位移反分析进行了深入研究,提出了多种改进遗传算法和神经网络算法,并把这些改进的人工智能方法应用到位移反分析中,并在很多工程中进行了应用,取得了很好的效果;吴立军、刘迎曦等以有限元和约束优化方法为基础,建立岩层变形破坏结构计算模型,反演地应力参数和岩层结构模量,提高了设计优化的可靠性和准确性。贾超、刘宁等把优化方法与位移反分析法,以洞室岩体的弹性模量、泊松比等作为待反演参数,建立了基于位移反分析法的正演模型,并结合石碑岭隧道进行了反分析,对后续施工断面进行了安全预测。

在对确定性位移反分析研究的同时,许多学者针对反分析中不确定性因素进行了研究,提出了一些具有一定实用价值的不确定反分析方法。如黄宏伟等研究了位移反分析中的不确定因素,引入特征函数和数学随机过程,把这两种方法与有限元法结合,提出了反演力学参数的随机逆反分析方法。孙钧、蒋树屏、袁勇等对不确定反分析做了研究,采用建立概率反分析目标函数,并结合优化方法建立了参数反分析极大似然法,对待反演参数进行了分析,由于该法包含了位移量测误差特性及参数先验信息,计算结果非常合理。林育梁等把模糊数学与有限元结合,同时根据位移反分析原理,建立了模糊有限元反分析法,考虑了反分析中的不确定性。蒋树屏则应用卡尔曼滤波,针对洞室开挖后围岩力学状态的不确定性,建立了考虑松动圈的卡尔曼滤波与有限元反分析法;并对白云隧道特定断面进行了现场监测数据及参数反演,得到了断面围岩塑性区历时变化图,从而及时了解了围岩的稳定状况,指导了设计和施工。朱全永、景诗庭等采用 Monte - Carlo 法,结合有限元技术,提出了 Monte - Carlo 反分析法。这种方法最大的优点是考虑了反分析的随机过程,但突出的缺点是样本多,计算工作量很大。徐卫

亚、刘世君等认为实测信息本身具有不确定性,岩石力学参数作为变量,其变化是有一定范围的,据此建立分区参数的反分析模型,研究了变量数目与实际测量精度对反分析结果的影响,这个工作在实际工程分析中非常有价值;刘维宁基于信息论,从理论上推导了岩土工程中反问题的反演定理,分析了观测信息量、先验信息量、后验信息量以及理论信息量四者的相互关系,并证明了所推导定律与反分析中的直接法、逆解法和贝叶斯法的关系。这一成果综合考虑了实测信息、工程经验及理论分析的不确定性,研究提出了新的途径。

1.2.2 渗流参数反分析研究现状

渗流反分析的发展远远落后于位移反分析,20世纪60年代人们才开始注意到渗流参数的确定问题。1969年, Snow 提出直接采用野外测量法来确定渗流参数,这个办法虽然简单易行,但成本较高,同时由于实测结果代表性较差,应用非常困难。也有学者从 DuPuit 公式和 Theis 公式出发,考虑采用解析解或者半解析解反分析含水层的渗透系数,但由于公式解析的假设条件经常与实际情况相差很大,获得的结果往往难以应用。到了20世纪70年代,渗流参数反分析研究获得了一定的进展。Kitamara(1977)从研究一维线形抛物线型方程参数的可辨识性入手,对可辨识条件进行了研究,为渗流参数反演提供了理论依据。Chaveni(1979)研究了渗流参数可辨识反演的充要条件,认为可辨识的充要条件是当且仅当优化问题存在于实测值的唯一连续解时,参数是可辨识的。Yeh(1984)提出了广义可辨识性准则,根据这个准则,结合抽水试验能进行渗流参数辨识。在20世纪80年代以后,国外的渗流参数反分析发展较快,取得了很多研究成果。

国内渗流参数反分析研究开展较晚,国内对于渗流反问题最早的介绍和论述可以追溯到20世纪80年代末,河海大学的朱岳明对他和导师 W. Wittke 多年来的研究工作做了总结,对裂隙岩体渗流的基本理论、研究模型、数值计算方法以及渗流参数的确定等方面进行了系统的回顾和总结,对以后渗流反问题研究的工作进行了展望。这是国内最早开始研究和介绍渗流反分析的论著。在此后的研究中,渗流反分析引起了国内学者的广泛关注,特别是20世纪90年代以后,渗流反分析