

横观 | HENGGUAN

GEXIANG TONGXING YANTI WEIYI FANFENXI
DE JICHU LILUN YANJIU

各向同性岩体位移反分析 的基础理论研究



张志增 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

要 要 要 内



横观 | HENGGUAN

GEXIANG TONGXING YANTI WEIYI FANFENXI
DE JICHU LILUN YANJIU

各向同性岩体位移反分析 的基础理论研究



张志增 著

该书的出版为岩石力学反分析问题的深入研究开辟了新的路径,相信该书对岩石力学和地下工程的发展能起到很好的推进作用。为此我欣然为从事本领域研究的岩石力学工作者们推荐此书。当然,该书绝非该领域研究的“终结”,随着研究的深入,新的成果

地质工程与地质环境工程, 2016 年第 1 期

地质工程与地质环境工程, 2016 年第 1 期



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 提 要

本书系统地论述了横观各向同性岩体位移反分析的基础理论研究及应用。全书共分为 13 个部分,主要包括以下内容:绪论,岩土工程反分析理论基础,横观各向同性岩体中巷道的位移解析解,横观各向同性岩体中位移反分析的唯一性,考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中巷道的位移解析解,考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中位移反分析的唯一性,横观各向同性岩体中双洞室的位移解析解,巷道走向平行于岩体层面条件下的圆形巷道位移解析解,巷道走向平行于岩体层面条件下位移反分析的唯一性,横观各向同性岩体中位移反分析测点优化布置,基于主从式并行遗传算法的岩体位移反分析方法,横观各向同性岩体位移反分析的应用实例,参考文献。本书是作者近十年来研究横观各向同性岩体位移反分析的总结,是一部系统研究横观各向同性岩体位移反分析特征和规律的专著,具有重要的理论价值和应用价值。

本书可供煤炭、水利、矿山、铁道、交通、国防、冶金等专业的科技工作者及相关专业的高校师生、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

横观各向同性岩体位移反分析的基础理论研究/张志增著. —武汉:华中科技大学出版社, 2017.1
ISBN 978-7-5680-1704-6

I. ①横… II. ①张… III. ①岩体-横向位移-研究 IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 080515 号

横观各向同性岩体位移反分析的基础理论研究

张志增 著

Hengguan Gexiang Tongxing Yanti Weiyi Fanfenxi de Jichu Lilun Yanjiu

策划编辑:倪 非
责任编辑:倪 非
封面设计:抱 子
责任校对:何 欢
责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心
印 刷:武汉鑫昶文化有限公司
开 本:787mm×1092mm 1/16
印 张:13.75
字 数:349 千字
版 次:2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
定 价:35.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序



众所周知,各向异性问题在岩石力学研究以及岩土和地下工程中从来都是一个极具挑战性的难题,尤以横观各向同性岩体的各向异性特征表现最为明显。21 世纪初刚刚建成的锦屏一级水电站地下厂房,开挖于具有层状特征的大理岩岩体中,建设过程中发生的严重破坏就表现出了明显的方向性。由于此类研究的复杂性和挑战性,国内还鲜有相关专著出版,所以看到中原工学院副教授、博士张志增所撰写的《横观各向同性岩体位移反分析的基础理论研究》一书的书稿,我感到十分欣喜和赞赏,由衷地感受到该书作者“知难而进”的钻研精神,以及脚踏实地的扎实作风,本书确实是一本有理论、有实践、高水平的学术专著,希望早日与致力于此领域研究的读者朋友见面。

2006 年,张志增同志来到清华大学攻读博士学位,直接参与了锦屏一级水电站地下厂房施工的科研工作。面对挑战,他选择了横观各向同性岩体位移反分析问题作为博士学位论文主攻方向。这期间,他查阅了大量的参考文献,逐渐形成了清晰的研究思路,做了大量艰苦的创新性研究工作,取得了丰富的研究成果。

十年来,张志增同志持续围绕横观各向同性岩体中洞周位移反分析中的很多重要问题,进一步开展了深入、系统的研究,又完成了包括国家自然科学基金课题在内的多个科研项目,发表了多篇高水平的论文,取得了一系列的丰硕成果。该书正是凝聚了张志增同志这十年来的研究成果而完成的。一分耕耘,一分收获,十年的努力,换来了今天的硕果,可喜可贺。

统观全书,与同类已出版的著作相比,该书具有以下特色和创新点:针对横观各向同性介质以及位移反分析的基础理论展开研究,推导得到了横观各向同性岩体中巷道的位移解析解;研究了横观各向同性岩体中洞周位移反分析的唯一性以及位移反分析的测点优化布置;开发了基于主从式并行遗传算法的岩体位移反分析算法和软件。该书的相关理论成果为准确、快速地确定横观各向同性岩体的参数提供了新的研究思路和方法,并且为岩体工程施工过程中的变形预测、施工反馈设计以及稳定性评价提供了重要依据。该书既具有理论价值,又具有实际工程参考意义。

该书的出版为岩石力学反分析问题的深入研究开辟了新的路径,相信该书对岩石力学、岩土和地下工程的发展能起到很好的推进作用。为此我欣然为从事本领域研究的学子和岩石力学工作者们推荐此书。当然,该书绝非此领域研究的“终结者”,我们期待作者未来的、更进一步的成果。

李仲奎

2016 年夏于清华大学

前言

自然界中存在大量的层状岩体,具有层状构造的沉积岩大约占陆地面积的 $2/3$,在我国占到 77.3% ,大洋底部几乎全部为沉积岩所覆盖。许多变质岩、风化岩体和地下洞室开挖中形成的松动圈区域的岩体,也可视为广义层状岩体。一般情况下,力学上将层状岩体处理成横观各向同性岩体。横观各向同性岩体是指岩体在平行于层面的任意方向,都具有相同的材料常数,而平行层面的材料参数与垂直层面的材料参数则不同。横观各向同性岩体在地表分布非常广泛,涉及许多学科和生产领域,如水利水电工程、矿业工程、土木建筑工程、铁路和公路交通工程、石油与天然气开发、能源储存、国防工程和地震预测预报等,因此,研究横观各向同性岩体的力学特性对人类工程活动具有重要意义。

1939年,在芝加哥地铁隧道的施工过程中,著名的土力学之父 Karl Terzaghi 根据自己多年的工程经验和理论研究,成功地提出了一种基于现场观测信息的设计方法。20世纪60年代,奥地利专家 L V Rabcewicz 教授、L Müller 教授及 P Pacher 工学博士等人在借鉴 Karl Terzaghi 的思想以及其他工程师的隧道施工经验的基础上,总结出了“新奥法”隧道设计、施工技术,其主要特点就是通过许多测量手段对开挖后的隧道围岩动态进行监测,并以此来指导开挖作业和支护结构的设计和施工。1971年,Kavanagh 等人就根据试验测得的应变和位移,使用有限单元法来辨识复合材料的材料参数。1974年,Sakurai 尝试利用测量位移来解析地推导隧道岩体的初应力和黏弹性参数。1976年,在约翰内斯堡的岩土工程勘测研讨会上,H A D Kirsten 提出由实测岩体变形来反分析岩体弹性模量的观点,并首次采用了有限元方法。之后,基于数值计算方法和现场观测(主要是位移)的岩体工程反分析的研究便蓬勃开展起来,反分析方法作为一种确定岩体力学参数的新的途径开始登上岩土工程的历史舞台。

经过四十多年的发展,岩土工程反分析领域的研究已经取得了很多重大的突破,其成果已经在实际工程中得到广泛应用。但由于岩土体结构的复杂性和多变性,反分析的研究多针对各向同性岩土体,对各向异性岩土体反分析的研究较少,因此,这个领域中仍然有很多问题值得研究。近十年来,作者针对横观各向同性岩体位移反分析的基础理论进行了大量的研究,为准确、快速地确定横观各向同性岩体的参数提供了新的研究思路和方法。

本书主要内容包括横观各向同性岩体本构理论;岩土工程位移反分析理论及研究综述;横观各向同性岩体中巷道的位移解析解及位移反分析的唯一性;考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中巷道的位移解析解及位移反分析的唯一性;多个洞室时的位移解析解;巷道走向平行于岩体层面条件下的位移解析解及位移反分析的唯一性;横观各向同性岩体中位移反分析测点优化布置;基于主从式并行遗传算法的岩体位移反分析方法;反分析唯一性的应用实例。

本书针对横观各向同性岩体位移反分析的基础理论展开研究,系统地 will 位移反分析方法延伸到横观各向同性岩体的研究中,为准确、快速地获取横观各向同性岩体参数提供新的研究思

路和方法,对研究横观各向同性岩体中工程的变形破坏以及改善工程稳定性具有重要的指导意义。

作者希望通过本书的出版,使更多的学者了解横观各向同性岩体的基本性质,关注横观各向同性岩体位移反分析的理论方法,促进横观各向同性岩体位移反分析理论和应用的研究更加深入地发展。

本书的出版得到了 NSFC-河南人才培养联合基金项目(项目编号:U1204509)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(项目编号:2015GGJS-192)、河南省高等学校重点科研项目资助计划项目(项目编号:15A570005)以及中原工学院学术专著出版基金的资助。

本书的撰写得到了清华大学李仲奎教授的悉心指导和帮助,得到了国家自然科学基金委员会、河南省教育厅、河南省财政厅、中原工学院等单位的大力支持。李小昌、李永涛、魏霖阳、张欣等硕士研究生为本书的编写提供了部分素材,在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之有很多内容还需要进一步的研究与探索,书中疏漏谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

张志增
2016 年夏

目录

绪论	(1)
第1章 岩土工程反分析理论基础	(4)
1.1 横观各向同性弹性本构理论	(4)
1.2 岩土工程反分析理论	(6)
1.3 岩土工程位移反分析研究综述	(11)
第2章 横观各向同性岩体中巷道的位移解析解	(17)
2.1 本章引论	(17)
2.2 横观各向同性岩体中圆形巷道的位移解析解	(18)
2.3 横观各向同性岩体中任意形状巷道的位移解析解	(23)
2.4 本章小结	(32)
第3章 横观各向同性岩体中位移反分析的唯一性	(33)
3.1 本章引论	(33)
3.2 参数可辨识性条件	(34)
3.3 横观各向同性岩体中圆形巷道位移反分析的唯一性	(34)
3.4 横观各向同性岩体中任意形状巷道位移反分析的唯一性	(41)
3.5 测量点布置对位移反分析的唯一性的影响	(58)
3.6 本章小结	(59)
第4章 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中巷道的位移解析解	(61)
4.1 本章引论	(61)
4.2 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中圆形巷道的位移解析解	(62)
4.3 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中任意形状巷道的位移解析解	(65)
4.4 本章小结	(69)
第5章 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中位移反分析的唯一性	(70)
5.1 本章引论	(70)
5.2 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中圆形巷道位移反分析的唯一性	(71)
5.3 考虑剪应力作用时横观各向同性岩体中任意形状巷道位移反分析的唯一性	(82)
5.4 剪应力对位移反分析唯一性的影响	(106)
5.5 本章小结	(108)
第6章 横观各向同性岩体中双洞室的位移解析解	(109)
6.1 本章引论	(109)
6.2 柯西积分法	(110)



6.3 Schwarz 交替法 (111)

6.4 横观各向同性岩体中双圆形洞室的位移解析解 (113)

6.5 本章小结 (116)

第 7 章 巷道走向平行于岩体层面条件下的圆形巷道位移解析解 (117)

7.1 本章引论 (117)

7.2 巷道走向平行于岩体层面条件下圆形巷道的位移解析解 (118)

7.3 解析解和数值解对比 (128)

7.4 本章小结 (134)

第 8 章 巷道走向平行于岩体层面条件下位移反分析的唯一性 (136)

8.1 本章引论 (136)

8.2 灵敏系数 (136)

8.3 参数可辨识条件 (138)

8.4 地应力的位移反分析唯一性 (143)

8.5 本章小结 (144)

第 9 章 横观各向同性岩体中位移反分析测量点优化布置 (145)

9.1 本章引论 (145)

9.2 基于最大位移原则的测量点优化布置 (146)

9.3 基于最大灵敏度原则的测量点优化布置 (153)

9.4 基于最小方差原则的测量点优化布置 (157)

9.5 基于最大位移原则的测量点优化布置实例 (165)

9.6 本章小结 (176)

第 10 章 基于主从式并行遗传算法的岩体位移反分析方法 (178)

10.1 本章引论 (178)

10.2 并行遗传算法 (178)

10.3 主从式并行遗传算法的性能改进 (180)

10.4 基于主从式并行遗传算法的岩体位移反分析方法的实现 (182)

10.5 性能测试 (184)

10.6 本章小结 (186)

第 11 章 横观各向同性岩体位移反分析的应用实例 (188)

11.1 本章引论 (188)

11.2 应用实例计算模型与位移值 (189)

11.3 横观各向同性岩体地应力的位移反分析 (189)

11.4 横观各向同性面内岩体参数的位移反分析 (197)

11.5 垂直于横观各向同性面方向的岩体参数位移反分析 (200)

11.6 本章小结 (203)

参考文献 (204)

绪论

各向异性是岩体的一个重要性质,它随着岩石力学理论和试验研究的不断深入,逐渐被人们认识。

自然界中存在大量的层状岩体。这些层状岩体可分为以下四种类型。①自然界中具有层状构造的沉积岩。自然界中具有层状构造的沉积岩大约占陆地面积的 $\frac{2}{3}$,而在我国占到 77.3%,大洋底部几乎全部被沉积岩覆盖。在沉积岩中蕴藏着大量的矿产,矿产不仅矿种多,而且储量大,如煤、石油、天然气、油页岩等可燃有机矿产全是沉积成因的。据第 19 届国际地质学会的资料统计^[1],沉积岩中所含有的矿产,占世界全部矿产蕴藏量的 80%。沉积岩本身也是一种重要的矿产资源,比如目前广泛应用于建筑活动的石灰岩,就是地表最常见的一种沉积岩。图 1 为红色薄层细粉砂岩的层状构造。②变质岩。许多变质岩也具有显著的层状构造特征,比如板岩、片麻岩、千枚岩等。图 2 为变质岩的片状构造。变质岩的主要成分为长石、石英和黑云母,具有水平片状构造。③地球表层的岩体。地球表层的岩体大多经历了上万年的地壳运动以

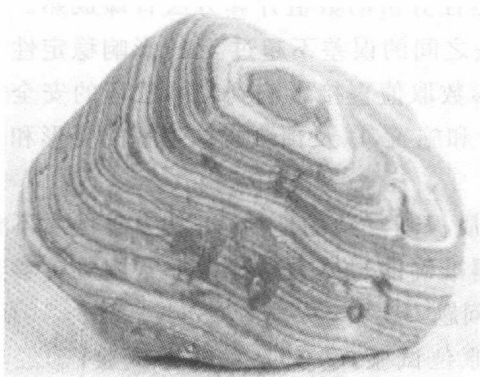


图 1 红色薄层细粉砂岩的层状构造



图 2 变质岩的片状构造

及各种地质作用,所以在岩体内部形成了许多结构面,如弱面、孔隙、节理、裂隙、断层等,含有一组呈定向规律分布的优势结构面的岩体均可视为广义的层状岩体。图3为节理构造发育的层状岩体。④风化岩体和地下洞室开挖过程中形成的松动圈区域的岩体,也可视为广义的层状岩体。由于风化岩体性质从全风化、强风化、弱风化、微风化向新鲜依次逐渐变化,松动圈岩体性质也是从洞室周边向远离洞室的方向逐渐变化的,所以这类层状岩体的参数在垂直层面的方向发生渐变。

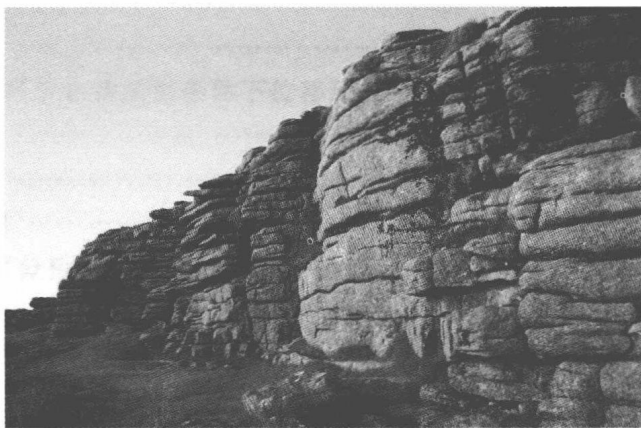


图3 节理构造发育的层状岩体

由于分布有一组占绝对优势的结构面,层状岩体的变形特性和强度特性具有明显的各向异性,因此与各向同性岩体相比,其稳定性和破坏条件也表现得较为复杂,这就对工程的施工及建筑物的稳定性会产生某些特殊的影响^[2]。各向异性使岩体的力学问题变得复杂,将层状岩体当作各向同性岩体来进行工程设计和计算会造成不可忽视的误差。对于层状岩体而言,在力学上一般可将其处理成横观各向同性岩体^[3]。所谓横观各向同性岩体,是指岩体在平行于层面的任意方向,都具有相同的材料常数,而平行层面的材料参数与垂直层面的材料参数则不同。横观各向同性岩体在地表分布非常广泛,涉及许多学科和生产领域,如水利水电工程、矿业工程、土木建筑工程、铁路和公路交通工程、石油与天然气开发、能源储存、国防工程和地震预测预报等,因此,工程建设中经常会遇到大量的横观各向同性岩体稳定性问题,研究横观各向同性岩体的力学特性对人类工程活动具有重要意义。

近年来,伴随着计算机技术的飞速发展,岩体稳定性分析的数值计算方法日臻成熟。已有研究表明^[4],有限单元法、极限平衡法等数值计算方法之间的误差不超过5%,影响稳定性分析结果的因素主要是岩体力学参数的选取。岩体力学参数取值直接影响到岩体工程的安全性和经济性,合理确定岩体力学参数,对于岩体工程的设计和施工,以及预测岩体工程的变形和稳定性都有十分重要的意义。

但是,岩体是在漫长的地质演化过程中形成的性质极其复杂的地质体,其力学性质不仅具有结构效应和时间效应,而且具有尺寸效应,要想获得准确的岩体力学参数非常困难,“参数给不准”已成为岩石力学理论分析和数值模拟的“瓶颈”问题^[5]。

确定岩体力学参数的传统方法有三种:①现场原位试验;②实验室试样试验;③经验类比法。

现场原位试验精确可靠,但是周期长、费用高,还受到地形、地质、施工条件的限制,而且原

位试验的结果通常仅能证明试验点附近岩体的特性^[6],因此岩体力学参数不能完全通过现场原位试验来获取。若全部以原位试验作为获取岩体力学参数的手段,其经济代价将远远超出岩土工程造价的允许范围^[7]。

现场采样后通过实验室试验确定岩体力学参数是一种常规的确定方法,但因为在进行现场采样时已经破坏了岩体原有的力学状态,并且由于样本尺寸大小的限制,该方法存在代表性不强和尺寸效应等缺陷。

经验类比法得到广泛的应用^[8],如各种形式的岩体工程分级法、相似类比法。在国际上受到广泛重视的是 Z. T. Bieniawski 和 Barton 分别提出的 SIR(RMR)和 NGI(Q)分级法,我国的《工程岩体分级标准》对每一级岩体都给出了相应的力学参数。但由于岩体本身的复杂多变性以及工程师经验的不确定性使得量级上难以准确掌握其力学参数,使用该方法所获得的力学参数缺乏试验和理论依据,可靠性不高,只能是一个概略的参数。

以上三种方法各有优势,但都具有一定的局限性。大量研究表明,基于现场量测信息的反分析方法为确定岩体力学参数提供了一条新的途径^[9,10],并且在岩体工程施工过程中的变形预测、施工反馈设计以及稳定性评价中发挥着重要作用。所谓反分析方法,是指通过现场监测得到岩体所产生的位移量或应力量等信息,将其作为已知条件,利用相应的数学模型来反推出岩体的力学参数,并将这些力学参数反馈回模型中以对岩体的稳定性进行分析的一种逆向分析方法。

本书针对横观各向同性岩体位移反分析的基础理论展开研究,为准确、快速地获取横观各向同性岩体的力学参数提供了新的研究思路和方法。

岩土工程反分析 理论基础

1.1 横观各向同性弹性本构理论

1963 年, Lekhnitskii^[11]总结了前人的诸多研究成果, 出版了《各向异性弹性体的弹性理论》《Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body》一书, 这是第一本系统介绍材料各向异性的专著。我国学者丁皓江于 1997 年出版了《横观各向同性弹性力学》^[12]一书, 并于 2006 年出版了该书的英文版《Elasticity of Transversely Isotropic Materials》^[13](这也是横观各向同性弹性学领域内的第一本英文专著), 他在书中全面系统地总结了横观各向同性弹性力学的主要成果, 将一个世纪以来分散于各个领域、各种杂志的关于横观各向同性弹性力学的研究工作以统一的记号、统一的方法和统一的格式进行描述。

根据物性参数的对称面, 各向异性弹性体可划分为极端各向异性弹性体、单对称各向异性弹性体、正交各向异性弹性体和横观各向同性弹性体。极端各向异性弹性体内的任一点在沿任意两个不同方向上的弹性力学性质均互不相同, 它具有 21 个独立的弹性常数。根据弹性对称关系, 极端各向异性弹性体可以逐步退化为单对称各向异性弹性体、正交各向异性弹性体、横观各向同性弹性体和各向同性弹性体, 相应地, 独立的弹性常数的数目分别减少为 13、9、5 和 2。

横观各向同性弹性体是正交各向异性弹性体的特殊情况, 它的特点是在平行于某一平面的所有方向(又称横向)上都具有相同的弹性参数, 而与之垂直的方向(又称纵向)上的弹性参数又与之不同。

建立如图 1.1 所示的坐标系, 假定 xOy 为横观各向同性面, Oz 为对称轴。横观各向同性弹

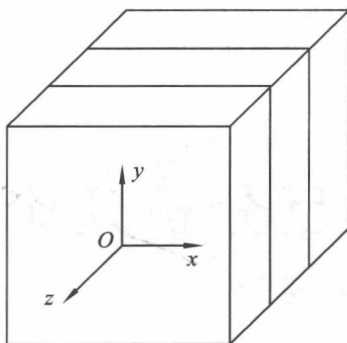


图 1.1 横观各向同性材料坐标系建立示意图

性的应变应力关系为^[13]

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu'}{E'} & -\frac{\mu'}{E'} & \frac{1}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1-1)$$

式中, E 是横观各向同性面 (xOy 平面) 内的弹性模量; E' 是垂直横观各向同性面 (Oz 轴方向) 方向的弹性模量; μ 是横观各向同性面内的泊松比; μ' 是垂直横观各向同性面方向的泊松比; G 是横观各向同性面内的剪切模量; G' 是垂直横观各向同性面方向的剪切模量。

横观各向同性弹性体有 5 个独立的弹性常数, 分别为 E 、 E' 、 μ 、 μ' 和 G' , 而 $G = E/2(1 + \mu)$, 不是独立的弹性常数。弹性常数之间有如下的限制关系^[14]:

$$-1 < \mu < 1 - 2\mu'^2 \frac{E}{E'} \quad (1-2)$$

$$-\sqrt{\frac{E'}{E}} < \mu' < \sqrt{\frac{E'}{E}} \quad (1-3)$$

考虑到岩土材料中零泊松比和负泊松比的材料非常罕见, 所以式 (1-2) 和式 (1-3) 可以改写为

$$0 < \mu < 1 - 2\mu'^2 \frac{E}{E'} \quad (1-4)$$

$$0 < \mu' < \sqrt{\frac{E'}{E}} \quad (1-5)$$

横观各向同性弹性本构理论已经十分成熟, 也已被纳入教科书和许多数值计算软件中, 如 FLAC、ABAQUS 等, 所以横观各向同性弹性本构理论已经成为经典理论, 进一步研究的空间不大, 但关于横观各向同性弹性体中地下工程结构位移反分析的基本理论研究鲜有报道。本书将

在横观各向同性弹性本构理论的基础上,对横观各向同性弹性体中各种巷道的位移解析解、反分析的唯一性和测量点优化布置等问题展开研究。

1.2 岩土工程反分析理论

1.2.1 反分析的起因

反分析之所以被提出并得以相当快速的发展,一方面是由于传统的确定岩体力学参数的方法存在各种局限性,另一方面是由于岩土工程实践的迫切需要。

1939年,在芝加哥地铁隧道的施工过程中,著名的土力学之父 Karl Terzaghi 根据自己多年的工程经验和理论研究,成功地提出了一种基于现场观测信息的设计方法^[15],如图 1.2 所示。这种方法将在施工现场测得的信息和设计预测的信息进行比较,依此修正设计中采用的岩体力学参数并预测下一施工阶段的岩体状态,根据预测评估的结果来决定是否调整现有的施工方案,由于施工方案可以根据实测信息进行实时调整,因此整个施工过程的经济性和合理性得到了保证。20 世纪 60 年代,在借鉴 Karl Terzaghi 的思想以及其他工程师的隧道施工经验的基础上,奥地利专家 L. V. Rabcewicz 教授、L. Müller 教授及 P. Pacher 工学博士等人^[16,17]总结出了“新奥法”隧道设计、施工技术。该方法的主要特点就是通过许多测量手段对开挖后隧道围岩的动态进行监测,并以此来指导开挖作业和支护结构的设计和施工。由于这种方法具有合理性和广泛的适用性,它在世界各国的地下工程界被普遍重视和推广^[18]。图 1.3 为采用“新奥法”的隧道施工现场。

“新奥法”技术据以进行隧道设计和施工的主要依据是隧道的收敛位移测量信息。这方面的研究工作相应地集中在位移测量方法和收敛限制法设计理论上。由于考虑到岩体是存在节理等非连续构造的介质以及其他方面的复杂特性,奥地利学派认为单纯应用连续介质力学的方法难以解决岩石力学的应用和发展问题^[19],因此收敛限制法设计理论偏重于以工程经验为依据,而不强调定量的力学分析。但从 20 世纪 60 年代末起,随着计算机技术的发展及各种数值计算方法的完善和普及,人们再也不能抵御这种强大分析工具的魅力,有限单元法等数值计算方法开始逐渐应用于岩土工程中。

1971 年,Kavanagh 等人^[20]就根据试验测得的应变和位移,使用有限单元法来辨识复合材料的材料参数,并初步讨论了测量信息对材料参数的灵敏度以及测量误差、测量点个数和 Fisher 矩阵的条件数对辨识过程的收敛性的影响等问题,但由于奥地利学派思想的影响,岩土材料参数辨识方面的工作有所滞后。1974 年,Sakurai^[21]尝试利用测量位移来解析地推导隧道岩体的初应力和黏弹性参数。1976 年,在约翰内斯堡的岩土工程勘测研讨会上,Kirsten 提出由实测岩体变形来反分析岩体弹性模量^[22]的观点,并首次采用了有限元方法。之后,基于数值计算方法和现场观测(主要是位移)的岩体工程反分析的研究便蓬勃开展起来。经过四十多年的

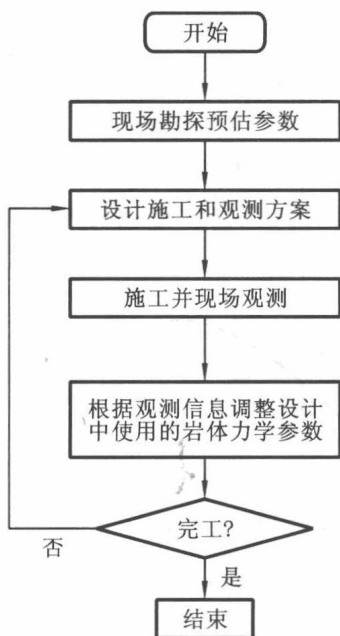


图 1.2 基于现场观测信息的反馈设计、施工流程图



图 1.3 采用“新奥法”的隧道施工现场

发展,这个领域的研究已经取得了很多重大的突破,其成果已经开始在实际工程中陆续得到应用。但是,由于岩体结构和反分析方法的复杂性,这个领域中仍然有很多问题值得研究。

1.2.2 反分析的概念和理论描述

所谓岩土工程反分析^[23],即以现场量测到的反映系统力学行为的某些物理信息量(如应力、应变、位移或破坏状态等)为基础,通过数学物理反分析模型,得到岩土介质的本构模型及等效力学参数(如初始地应力、变形参数、强度参数、结构荷载等)的方法^[24]。它的最终目的是建立一个输出更接近现场实测结果的理论模型,以便较准确地反映或预测岩土结构的某些力学行为。

反分析方法是太沙基提出的基于现场观测信息设计方法的具体实现。近年来,反分析方法得到了较快的发展,在岩土工程中得到了越来越多的应用,人们对反分析的认识也逐步加深。下面分别从数学和系统论的角度对反分析进行描述。

1. 数学描述

反分析一定是相对于某种正分析而提出的。没有正分析的定性和定量的研究基础,就不能提反分析问题。对于一个物理系统而言,其数学模型的一般形式为^[25]

$$K(p, u) = F(f) \quad (1-6)$$

其中, p 是模型参数,是系统的内因,一般依赖于介质特性; u 是系统的状态变量,其中可测量的部分称为系统的输出; f 是系统的输入,通常表示源、外力、控制等外部作用; K 和 F 是相应的微分算子。 p 和 f 分别属于其容许函数集合 Q_p 和 Q_f ,而 p, u 和 f 都可能是时间的函数。假设任意给定 $p \in Q_p$ 和 $f \in Q_f$,在所有的边值和初值条件的约束下,上式都存在某种意义下适定的、与

物理背景符合的解 u , 则称这个求解过程为正分析。

反分析就是将正分析的某种必需的、已知的确定因素变为未知的、待求解的变量, 并且将正分析的状态变量的一部分(可测量的)作为必须满足的或已知的条件(设计或控制目标)。

2. 系统论描述^[10,26]

由系统论的角度来看, 岩土力学研究的对象实质上是一个复杂的巨型系统, 人们对其进行的各种施工活动, 均可看成是系统的输入, 而人们能测量到的位移、应力、破坏等均可视为系统的输出。此过程可用图 1.4 形象地表达。

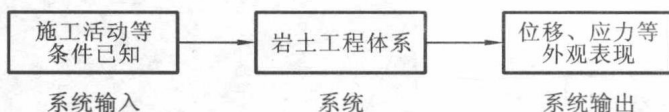


图 1.4 反分析系统

由于在实际工程中, 外观表现(也即位移、应力、应变等)均可观测得到, 而施工活动等因素也能直接人为控制, 因此实际上需要求解的系统模型、状态参数等, 实质上为一个系统辨识问题。

基于对系统先验信息的了解程度, 可以把系统辨识问题分为两类: “黑箱问题”和“灰箱问题”。

“黑箱问题”也叫完全辨识问题。在这种情况下, 被辨识系统的基本特性是完全未知的。例如, 系统是线性的还是非线性的, 是动态的还是静态的, 对这些基本的信息都一无所知, 要辨识这类系统当然是很困难的, 目前尚无有效的办法。

“灰箱问题”又叫不完全辨识问题。在这一类问题中, 被辨识系统的某些基本特性(例如是线性的还是非线性的)已知, 不能确切知道的只是系统方程的阶次和系数, 所以这类问题比“黑箱问题”容易处理。许多工程中的辨识问题属于“灰箱问题”, 因此, 系统辨识问题就简化为模型辨识和参数辨识。

1.2.3 反分析的分类

岩土工程反分析方法的种类繁多, 为了理论研究和工程应用的需要, 有必要对岩土工程反分析的分类问题进行研究。反分析的分类如图 1.5 所示。

根据反分析的目标, 可以把反分析分为模型辨识和参数辨识(或称为参数反分析)。所谓模型辨识, 就是指从众多模型组成的集合中选择最佳模型。参数辨识是在模型结构已知的情形下, 确定模型中的某些或全部参数。从理论意义上来看, 模型辨识比参数辨识更为重要。如果介质模型有违实际情况, 无论参数如何确定也不能确切表达介质性态的力学响应。相反地, 合适的模型可使参数辨识变得容易, 因此, 模型辨识是岩土工程反分析中更重要的一个方面。

根据反分析所依据的现场量测信息, 可以将反分析分为应力反分析、应变反分析、位移反分析、破坏状态反分析和混合反分析。基于有限个测点的应力量测值可用于反求初始地应力场, 但应力量测技术复杂且可靠性较差, 所以应力量测技术较少被采用。在初始地应力的研究中, 由钻孔测取应变变量早已被用作初始地应力反分析的输入量。基于位移量测的反分析方

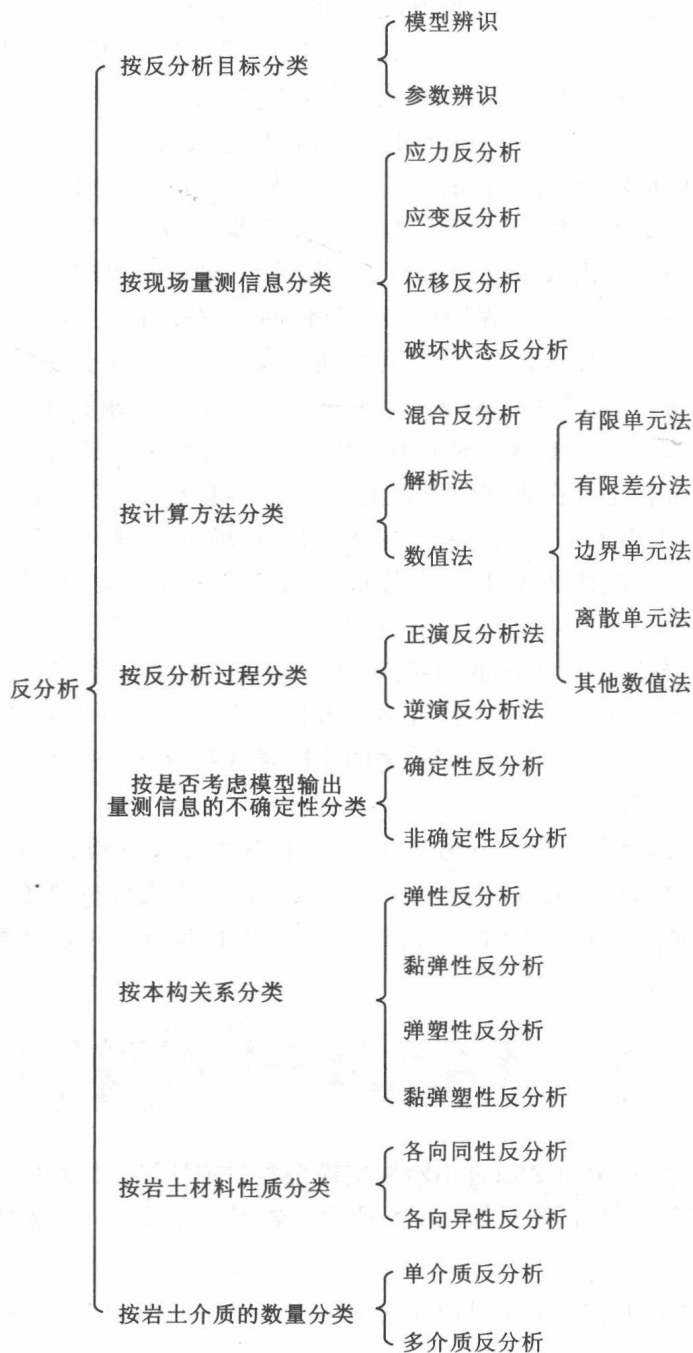


图 1.5 反分析的分类

法——位移反分析,因位移量测方法简便和适应性广而得到较快的发展和应用,是研究最多、成果最丰富的反分析。基于破坏状态,可计算反分析材料的强度参数,比如用已发生滑坡的滑体反算抗剪强度参数^[27]。混合反分析是指结合两种或多种量测信息进行反分析。

按照计算方法划分,反分析可分为解析法^[28]和数值法^[29]。解析法的优势在于概念明确、计算速度快,但只适宜求解简单几何形状和边界条件下的线弹性和无支护的工程结构问题;数值法则主要用于解决复杂工程性态和非线性问题。因此,数值法对于复杂的岩土工程而言,更具