

中国中铁四局集团有限公司资助

城市地下工程技术 研究与实践

吴 波 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

城市地下工程技术研究与实践

吴 波 著

中国铁道出版社

2008·北京

内 容 简 介

城市地下工程具有复杂工程结构条件、复杂工程环境条件、复杂工程地质条件、安全风险高、施工难度大和工期紧等特点,本书是一部紧密结合城市地下工程设计、施工、科研等技术问题的专门研究著作。

本书共分8章,第1章和第2章为城市地下工程研究基础部分,主要介绍了城市地下工程研究现状和地下工程施工过程力学模拟实现方法;第3章至第5章为城市地下工程施工力学研究的内容,主要介绍了城市地下工程施工过程中的群洞效应、时空效应、渗流—应力耦合效应等分析理论、方法和工程应用;第6章和第7章为城市地下工程环境岩土问题研究的内容,主要介绍了城市地下工程施工过程中对邻近建筑物、管线和桥梁的影响以及安全控制标准的定制;第8章为工程技术实践内容,主要介绍了城市地下工程安全快速施工及新技术成果应用典型实例。

本书资料翔实,内容新颖,重视实践,可读性强,可供从事城市地下工程、隧道或相近专业的设计、施工、科研及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下工程技术研究与实践/吴波著. —北京:中国铁道出版社,2008.5

ISBN 978-7-113-08944-3

I. 城… II. 吴… III. 城市建设-地下工程-工程技术-研究 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086137 号

书 名:城市地下工程技术研究与实践

作 者:吴 波

责任编辑:江新锡 曹艳芳 电话:010-51873018

封面设计:冯龙彬

责任校对:张玉华

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)

印 刷:北京佳信达艺术印刷有限公司

版 次:2008年5月第1版 2008年5月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:16.75 字数:416 千

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-08944-3/TU·935

定 价:60.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

序

随着我国经济和城市化的高速发展,交通阻塞已成为许多城市普遍的突出问题。解决城市交通难的主要措施是修建高效率的地下铁道。正在开通和兴建的地铁已有十多个城市;第二批正在筹建地铁的城市又有20多座。21世纪初将是我国大规模建设地铁的年代。因此,地铁修建过程中的工程技术难题和环境保护安全风险等大量问题将会不断出现,而且在数量上会越来越多。

我国政府和各级主管部门高度重视地铁修建过程中的安全问题。如何在地铁的建设过程中保护地表邻近重要结构物的安全是一个急需解决的问题。这些问题严重影响人民生命、财产安全及工程建设,并造成严重的经济损失和社会影响。从已建和在建的地铁项目来看,这方面的教训很多。作者参加地铁建设十多年,在设计、施工、科研方面做了大量技术工作,发表论文40多篇;在此基础上又进行了分析、整理,结合工程实例,写出了这本很有参考价值的专著,理论紧密联系工程实际,很有特色。这种通过科学研究并用于指导工程实践的研究方法是很正确的,具有重要的现实应用价值。

吴波博士十多年来,专心致力于城市地下工程施工力学的应用以及邻近结构物相互作用、地下工程群洞效应、时空效应、地下水渗流—应力耦合效应等方面的研究;在理论研究紧密联系工程实践方面非常突出,是一位颇有建树的年轻地下工程科技工作者,特别是在地下工程数值仿真方面有较深的造诣。

本书内容紧密结合城市地下工程技术特点和工程实例,应用多种研究手段,深入地研究了城市地下工程施工中的群洞效应、时空效应、渗流—应力耦合效应、地下结构与周围结构物相互作用、施工安全控制标准、安全快速施工技术等关键问题,所研究的问题在理论上属于学科前沿,研究成果丰富,并在实际工程中产生了显著的技术经济效益。全书结构严谨,是作者研究成果和宝贵经验的总结,必然会使读者受益。相信该书的出版将有助于推动我国地下工程技术进步。

城市地下工程在我国蓬勃发展的同时,还将面临很多挑战,研究与实践的任务仍然艰巨,需要广大科技工作者继续努力研究和实践,取得更多的突破,使我国的地下工程技术跃居国际领先水平。谨以此序致意于本书作者和读者。

中国工程院院士



2008年2月

前言

地铁建设将是我国 21 世纪城市地下空间开发的重点。除已开通地铁的北京、上海、广州、天津、南京、深圳等城市外,正在兴建和增建的有北京地铁、上海地铁、广州地铁、深圳地铁、南京地铁、重庆地铁、成都地铁、杭州地铁、沈阳地铁、西安地铁等。此外,国家已经批准和正在筹建地铁的城市有 20 多座。因此,未来地铁施工过程中地下结构以及地表环境对象的安全问题不仅不可避免,而且在数量上会越来越多。

城市地铁工程是在岩土体内部进行的,无论其埋深大小,开挖施工不可避免地将扰动地下岩土体,引起围岩内部应力的重分布,宏观表现为地层的移动与变形,施工影响范围常常波及到地表,形成施工沉降槽。施工沉降槽可能严重影响地面沉降和塌陷,从而导致道路路面破损、地下已有管道破坏以及建筑物、桥梁等市政设施的损坏,同时,地铁工程常常具有开挖跨度大、临时支护和工法转换频繁、时空效应显著、地质条件复杂等特点。因此,城市中进行地铁工程施工时,施工难度大和安全风险高。如何在地铁的建设过程中保证地下结构、地表邻近重要环境设施的安全是一个重要而迫切的现实问题,亟待解决。这些问题严重影响人民生命、财产安全及工程的建设,并造成严重的经济损失和社会影响,因此,城市中进行地下工程施工时,要与保护城市中有历史意义和经济、社会意义的设施协调起来,根据地表保护的要求,采取有效措施来减小变形,以使地表房屋、道路、管线等不至造成损害,生态环境不至恶化。因此,深入开展相关技术的研究具有重要的现实意义。

城市地铁工程问题的研究,主要涉及到三个大的研究方面:首先要对地铁修建过程中地下结构和邻近环境对象的施工响应进行预测和预报分析,涉及到一些相关的研究手段,主要是通过动态数值仿真技术来实现施工过程的可视化,这也是地下工程施工力学研究的重点问题;其次要对地铁在施工过程中因为施工效应对邻近桥梁、建筑和管线等结构物的影响及其控制策略进行研究,涉及到一些相关的软科学,这也是城市地下工程研究的重点和热点;最后就是要研究安全快速施工技术。

施工过程力学研究是城市地下工程研究的基础和前提,城市地下工程研究是在施工过程力学研究的基础上进一步拓展和深入,施工过程力学研究和城市环境地下工程研究的主要目的就是为了实现安全快速施工。他们的研究内容都具有广泛性、综合性和实践性的特点,在理论上属学科前沿,反映学科交叉;在应用上与国民经济密切相关,是工程技术发展亟待解决、体现科技—经济—社会相结合的一个重要研究方向,将会对我国工程建设以及 21 世纪发展产生较为广泛和深远的影响,这些研究成果必将在实际工程中产生显著的技术、经济、社会、环境等综合效益。

本书是笔者多年来所参与工程项目研究成果的综合。由于城市地铁工程问题的研究方兴未艾,随着城市地下工程建设的蓬勃发展,必将有更多的研究成果问世。所以,笔者希望抛砖引玉,把这些研究成果与大家一起交流和分享,以共同促进我国城市地下工程的技术进步。

本书结合城市地下工程的设计、施工、科研,从数值模拟、理论分析、试验、监测、检测、施工技术等方面,比较全面和深入地研究了城市地下工程在施工过程中的群洞效应、时空效应、渗流—应力耦合效应、地下结构与周围结构物相互影响关系、施工安全控制标准以及安全快速施工技术等方面的内容,把理论研究与工程实际紧密地结合起来。

在本书成果的汇集和编写过程中,中南大学彭立敏教授、西南交通大学高波教授、北京交通大学刘维宁教授、铁道第三勘察设计院史玉新设计大师、铁道第三勘察设计院索晓明副总工程师等给予了许多指导和帮助,在此深表谢意! 中铁四局集团公司闫子才总工程师、周振强教授级高级工程师、杨仲杰副总工程师,沈阳地铁公司全学让总工程师等也给予了大量的支持和帮助;本人所在单位领导、同事也提供了许多关怀和帮助,罗传义教授级高级工程师仔细审阅了书稿,中国铁道出版社江新锡主任和曹艳芳女士为本书的出版付出辛勤的劳动在此一并表示感谢。中国工程院王梦恕院士在百忙之中,审阅书稿、提出修改意见并为本书作序,借此机会深表感谢!

本书编写时间仓促,加之作者水平有限,疏漏、错误之处在所难免,恳请各位专家、同行、读者批评指正。

作者

2008 年 2 月于合肥

目 录

第 1 章 城市地下工程研究概述	1
1.1 城市地下工程研究问题	1
1.2 城市地下工程研究现状	2
1.3 城市地下工程研究前景	5
第 2 章 地下工程施工过程模拟方法	6
2.1 地下工程施工过程力学基本概念	6
2.2 地下工程开挖模拟基本方法	8
2.3 地下工程施工措施效果模拟	13
2.4 地下工程施工地表沉降机理	27
第 3 章 地下工程群洞效应研究与实践	30
3.1 地下工程空间效应 FEM 分析基本理论	30
3.2 地铁并行小净距隧道施工空间效应分析	43
3.3 地铁 Y 型分岔隧道施工空间效应分析	49
3.4 地铁群洞隧道开挖顺序优化分析	53
3.5 地铁群洞隧道施工策略优化分析	58
3.6 地铁渡线群洞隧道施工空间效应分析	63
3.7 地铁三连拱隧道施工离心模型试验	66
第 4 章 地下工程时空效应研究与实践	70
4.1 地下工程开挖弹—黏—塑性有限元	70
4.2 地下工程几何非线性有限元	81
4.3 地下工程支护时间优化分析	83
4.4 地铁双线隧道开挖时空效应分析	86
4.5 城市地铁软土时间特性流变试验	90
4.6 地铁车站客流通道施工过程时间效应分析	94
4.7 地铁车站风道施工过程时间效应分析	96
4.8 地铁隧道过河过桥施工过程时空效应分析	103
第 5 章 地下水渗流—应力耦合效应研究与实践	110
5.1 地下工程地下水概述	110
5.2 地下水与岩土体的相互作用	113

5.3	地下工程渗流—应力耦合分析理论	118
5.4	地铁隧道井点降水渗流—应力耦合分析	120
5.5	地铁隧道降水与开挖渗流—应力耦合分析	124
5.6	地铁隧道开挖与失水渗流—应力耦合分析	127
5.7	地铁隧道邻近桥梁降水三维渗流—应力耦合分析	130
5.8	地铁车站邻近桥基降水渗流—应力耦合分析	134
第6章	地下工程施工对结构物的影响研究	139
6.1	地下工程施工对建筑物影响分析	139
6.2	地铁隧道施工对建筑物影响监测分析	141
6.3	地下工程施工对管线的影响分析	141
6.4	地下管线变形影响因素分析	144
6.5	地下管线保护措施效果分析	146
6.6	地铁隧道施工对管线影响数值模拟分析	148
6.7	地铁隧道施工对管线影响的离心试验	151
6.8	地铁隧道施工对管线影响的监测分析	152
6.9	地铁车站施工对邻近桥基的影响分析	154
第7章	地下工程施工安全控制标准研究	186
7.1	邻近建筑物变形控制标准	186
7.2	邻近管线变形控制标准	190
7.3	邻近桥基变形控制标准	190
7.4	地表及地下结构变形标准	195
7.5	地下工程施工安全风险控制与管理	201
第8章	城市地下工程快速施工技术	207
8.1	地铁竖井横通道转正洞快速施工技术	207
8.2	地铁渡线群洞隧道快速施工技术	212
8.3	地铁隧道过河过桥施工技术	219
8.4	地铁隧道富水地层非降水施工技术	223
8.5	地铁车站盖挖顺作施工技术	229
8.6	城市地下商场邻近管群施工技术	237
8.7	地铁车站钻孔咬合桩施工技术	252
参考文献		260

第1章 城市地下工程研究概述

本章主要介绍城市地下工程在我国发展的必要性,提出在修建过程中所面临的主要研究问题,分析国内外研究现状以及应用前景。

1.1 城市地下工程研究问题

城市规模的快速发展,使我国出现了“城市综合症”。主要是城市人口超饱和、建筑空间拥挤、城市绿化减少、交通阻塞。其中,交通阻塞已成为我国许多城市普遍的突出问题。如北京市干道平均车速已比10年前降低50%以上,而且时速正以每年递减2 km的速度继续下降。据统计,市区183个路口中,严重阻塞的达60%,交通阻塞的关键在于城市道路面积在城市面积中的比例以及人均道路面积太低,每公里道路汽车拥有量太大。发达国家解决城市“交通难”的主要措施是发展高效率的地下有轨公共交通,形成四通八达的地下交通网。

根据预测和分析,我国特大城市的主要干道在21世纪初将达到巨大的高峰单向断面客流量,靠一般的公共电、汽车是不能解决的,只能选用高流量的有轨交通系统方案才行。高架道路对城市景观、噪声和震动的影响将是很难接受的,高架线的建设往往使沿线地价贬值,而地铁沿线的地价却能很快增值。因此,地铁的建设将是我国21世纪城市地下空间开发的重点。

除已开通地铁的北京、上海、广州、天津、南京、深圳等城市外,正在兴建和增建的有北京地铁、上海地铁、广州地铁、深圳地铁、南京地铁、重庆地铁、成都地铁、杭州地铁、沈阳地铁、西安地铁等。此外,国家已经批准和正在筹建地铁的城市有20多座,21世纪将是我国大规模开发地下空间和建设地铁的年代。因此,未来地铁施工过程,对地下结构以及地表环境对象的安全问题不仅不可避免,而且在数量上会越来越多,深入开展相关问题的研究具有重要的现实意义。

城市地铁车站开挖工程是在岩土体内部进行的,无论其埋深大小,开挖施工不可避免地将扰动地下岩土体,使围岩应力产生重分布,宏观表现为地层的移动与变形,施工影响范围常常波及到地表,形成施工沉降槽。施工沉降槽可能严重影响地面沉降和塌陷,从而导致道路路面破损、地下已有管道破坏以及建筑物、桥梁等市政设施的损坏。同时,地铁工程常常具有地质条件复杂、开挖跨度大、临时支撑和工法转换频繁、时空效应显著等特点,因此,城市地铁工程,往往施工难度更大,安全风险更高。

在地铁工程建设过程中,如何保证地下结构、地表邻近重要环境设施的安全是一个重要而迫切的现实问题,亟待解决。这些问题严重影响人民生命财产安全及工程建设的成败,解决不好会造成严重的经济损失和社会影响,因此,城市地铁施工时,要采取有效措施来减小地表变形,保证地表房屋、道路、管线以及历史文物等不至造成损害,生态环境不至恶化。

以地铁工程为代表的城市地下工程技术问题的研究,涉及到三个重要的研究方面:首先要对地铁修建过程中地下结构和邻近环境对象的施工响应进行预测和预报分析,主要是通过理论分析、现场测试和试验等手段,其中,最常用的技术就是通过动态数值仿真技术来实现施工

过程的可视化,这也是目前地下工程施工力学中研究的重点问题;其次是要对地铁在施工过程中因为施工效应对邻近桥梁、建筑和管线等既有结构物的安全影响及其控制进行研究,这也是目前城市环境地下工程研究的重点,主要是研究环境对象的施工影响及安全控制策略;最后就是要研究在施工难度大、安全风险高、工期紧迫的现实条件下如何做到快速施工。施工过程力学研究是城市地下工程研究的基础和前提,城市地下工程研究是在施工过程力学研究的基础上进一步拓展和深入,施工过程力学研究和城市地下工程研究的目的是为了安全快速施工,为社会带来技术、经济、社会、环境等综合效益。

1.2 城市地下工程研究现状

1.2.1 地下工程施工力学研究现状

随着地下工程建设水平的不断发展和提高,在工程设计和施工中不仅需要考虑到使用期间工程结构物的工作状态,更需要考虑施工过程中不同工序状态的动态响应及相互影响。因此,在地下工程施工过程中,对工程结构物及周围介质的力学分析,便形成了与工程建设密切相关的新的工程力学学科分支——地下工程施工力学。

鉴于地下工程结构以及赋存环境的复杂性,地下工程施工力学所研究的问题常常涉及到求解域的时间效应、空间效应、不同物理场间的耦合效应等方面,在研究这些问题时,常用的研究手段主要是室内模型与土工试验、现场测试与检测、理论分析、数值模拟等,这里重点介绍在工程设计、施工和研究中使用最广泛的数值模拟技术。

随着计算机软件、硬件的快速发展,数值模拟技术在地下工程问题的求解中有着非常广泛的应用前景。一些高校或研究机构自行研制的程序,在理论上已经达到了较高的水平,能够较好地考虑本领域中的某些特殊问题,但其可靠性和实用性还有待验证和提高。目前,国内外还没有能够很好地求解所有地下工程问题的专用软件,国内外科技工作者在解决复杂的实际问题时,主要还是依托商业软件来进行。因此,地下工程数值模拟技术的研究水平主要还是通过众多的商业软件来体现,商业软件的水平 and 高度也反映了在实际工程中的应用水平和所能求解问题的深度。

常用于求解地下工程问题有代表性的国内外软件中,按求解算法分类主要包括:有限元法软件、有限差分法软件、有限体积法软件、离散元法软件、粒子颗粒流法软件、无网格法软件;按求解器类型分类主要包括:隐式求解器软件、显式求解器软件、隐式和显式联合求解器软件;按求解问题的惯性效应分类主要包括静力学问题分析软件、动力学问题分析软件;按求解问题所涉及到的不同物理场分类主要包括:固体力学问题分析软件、流体力学问题分析软件、热力学问题分析软件以及不同物理场相互耦合问题分析软件;按解决问题的专业范围分类主要包括:通用软件和专业软件。

目前,地下工程问题分析中常用的软件主要有:SAP 系列软件、ANSYS 系列软件、MSC 系列软件、MIDAS 系列软件、SIGMA 系列软件、理正系列软件、PLAXIS 系列软件、ITASCA 系列软件、GEO-STUDIO 系列软件、同济曙光、ADINA、ABAQUS、DIANA、LS-DYNA、FLUENT 等。

SAP84、SAP2000、ALGOR 等主要用于杆梁结构问题的计算,在实际工程的结构设计中应用比较多,但是用它求解的问题相对比较简单,不能求解复杂地下结构施工过程的施工力学效应。同济曙光、SIGMA、GEO-SLOPE、PLAXIS、MIDAS/GTS、FLAC、DIANA 等是地下工

程中的专业软件,具有易学易用、专业结合紧密、解决问题方便快捷等特点,尤其是 FLAC 软件,在求解问题的深度和广度方面更有其独到之处。

但专业软件也具有前后处理功能较弱、求解综合问题性能较差、对某些问题的适应性较差、二次开发性能较差等限制,综合考虑,MIDAS/GTS 的工程应用前景很被看好。ANSYS、MARC、ADINA、ABAQUS 等是用于求解地下工程问题的常用通用软件,这些软件具有前后处理功能强大、处理综合问题能力强、处理某些特殊问题能力强、二次开发功能强、涉及面广等特点,但也具有解决问题时不够专业、对使用者的理论背景要求较高、解决问题的周期比较长等缺陷。

综上所述,FLAC 软件、DIANA 软件、MIDAS/GTS 软件是目前求解复杂地下工程问题相对较好和功能较全面的专业软件,ABAQUS 软件、ADINA 软件、MSC 系列软件、ANSYS 系列软件、FLUENT 软件是目前求解复杂地下工程问题相对较好的通用软件。地下工程施工力学是一门新兴的边缘学科,国内外在这方面的研究还很不成熟,理论研究滞后于蓬勃发展的工程实践,这仍是未来几年我国学术界和工程界研究的重点问题。

1.2.2 城市环境岩土工程问题研究现状

环境岩土工程是一门新兴学科,既是应用性的工程学,又是社会学,是技术、经济、政治、文化相结合的新型学科,它的产生是社会发展的必然结果。地下环境岩土工程是施工过程力学与环境科学密切结合的一门新学科,它主要是应用施工过程力学的观点、技术和方法为治理和保护环境服务。

环境岩土工程问题可以分为两个大类,第一类是人类与自然环境之间的共同作用问题,这类问题的动因主要是由自然灾害引起的,譬如地震灾害、海岸灾害、区域滑坡、洪水灾害、火山等,这些问题通常称为大环境岩土工程问题;第二类是人类的生活、生产和工程活动与环境之间的共同作用问题,这类问题的动因主要是由人类自身引起的,譬如城市垃圾和工业生产中的废水、废液、废渣等有毒有害物对生态环境的危害,以及工程建设活动对周围建筑环境和水环境的影响,有关这方面的问题,统称为小环境岩土工程问题。

环境岩土工程问题所涉及的范围虽然较广,但以解决人类岩土工程活动所产生的环境问题为主体,特别是城市环境岩土工程问题。下面对小环境岩土工程问题中由城市地铁工程活动引起的环境土工问题的研究现状进行论述。

城市地铁工程活动引起的环境土工问题主要是指地铁工程施工活动期间对市区建(构)筑物基础、道路路基和路面、各类地下管线、既有城市立交桥基、既有地铁工程等市政设施的危害,这类危害主要是由于施工诱发变形引起的。因此,城市环境岩土工程问题研究的本质和核心就是施工变形的预计、控制及重要环境对象的安全预报、控制和保护。

近年来,环境岩土工程领域中学科交叉与渗透日益广泛,在现有的施工水平基础上,逐步从一些新的理论(模糊数学、优化理论、灰色理论、神经网络理论、分形几何理论、耗散结构理论、混合物理论、可靠度理论、随机过程理论等)和方法(系统论、控制论、信息论、风险论、专家系统、人工智能方法等)中寻求更大的帮助和出路是一个新的研究动向,这主要是从理论上对城市环境岩土工程问题进行纵向的研究;另一方面,鉴于地下岩土工程问题研究对象的复杂性,研究减少环境影响的施工工艺和施工设备也具有重要的现实意义,因此,在施工工艺、设备上取得进展,提高施工水平,在一定程度上解决和减少环境影响问题应成为今后研究的一个重要方向。

预测未来若干年,我国城市建设规模依然会呈现蓬勃发展的态势,城市环境岩土工程问题的研究水平、设计水平以及施工水平都还处在不断的发展和提高之中,因此,针对这一问题的研究是迫切的并具有重要的现实意义,这将成为我国近期环境岩土工程研究的重点和热点。

1.2.3 存在的缺陷和不足

国内外关于地下工程施工力学和城市环境岩土工程研究现状表明,无论在理论研究还是在数值模拟、测试技术、设计水平、施工水平等方面都有了很大的进展,但从本课题的研究出发,认为还有一些不足之处,主要表现为以下两个方面:

(1) 施工过程数值模拟技术的实现方面

地下工程中的施工过程力学问题,主要表现为空间效应、时间效应、流场—应力—温度多物理场耦合效应等特点,目前,实际工程问题的数值模拟水平主要还是以反映弹性或弹塑性空间效应为主,但要把问题解决好并不容易,特别是复杂地下工程问题的应用分析,这里面主要有五个关键技术成为其限制因素。

其一就是能否很好地实现开挖、支护、加固等工程措施。总览国内外虽有众多软件在理论上都能实现开挖、支护过程,但计算结果与理性分析或经验判断相近的软件并不多,正是因为这个原因,也造成了工程界的科技工作者长期以来对计算结果的猜疑,实际上,用于求解地下工程问题的软件最重要的一面就是看其能否很好地实现初始状态以及开挖、支护过程,这一功能实现的效果对计算结果的评判有重大的影响,也成为选用软件的一个重要考虑因素。

其二就是能否构建复杂的有限元模型。在城市地铁工程的建设中,由于地下结构和周围环境对象的空间位置非常复杂,只有利用软件的可视化功能所建的有限元模型才能够很好地逼近现实中的工程物理模型,才能使计算结构更趋于合理,这一功能在一定程度上也限制了一些软件的应用和普及。

其三就是看软件是否具备良好的求解高度非线性问题的性能。地下工程的岩土问题常常具有材料非线性、几何非线性、边界非线性等特点,企图在复杂的空间效应分析中来成功模拟开挖—支护过程以及对周围环境对象的影响是非常困难的。

其四就是对计算分析结果的评价与计算者的理论背景掌握程度、设计施工经验的积累程度、软件使用的熟练程度等是密切相关的。

其五就是还缺乏成熟的用于围岩和周围环境对象稳定性和安全状况的评判标准。正是基于这个原因,才导致部分计算分析工作者为了取得收敛解而人为地去调改计算参数,这种计算结果的利用价值不言而喻,更可怕的是容易混淆数值上的不收敛和物理上的不收敛,如果是数值上的不收敛而被视为物理上的不收敛,那样得出的结论将对实际工程的设计和施工产生很大的负面影响。

实际上,想要利用数值模拟技术来较好地反映实际地下工程问题中的施工效应,主要取决于软件的选用、软件使用的熟练程度、理论背景的掌握、专业知识的掌握、工程和计算经验的累积、反分析技术的应用、安全评价标准的建立和应用等这些因素。

(2) 施工环境变形控制理论方面

目前,在城市地下工程设计中,传统的强度控制理论已逐渐让位于变形控制理论,变形控制的基本思想是支护结构在满足强度的前提下,尚需满足其刚度和变形上的使用要求,即工程施工全过程既要保证安全、不失稳,又要保证其对周围土工环境不造成破坏性的影响。

国内外在这方面的研究成果还是初层次的,其中,对实际工程比较实用的两个重要研究方

面是:施工过程中施工变形的控制研究和施工变形控制基准的研究。

关于施工变形控制的应用研究,目前,基本上是以平面问题作为研究对象,还需要进一步从三维效应、时空效应、耦合效应等方面进行进一步地深化研究。

关于施工变形控制基准的研究,目前,还没有成熟的规范和行业标准可供参考,也没有形成一套行之有效的研究办法,因此,在施工过程中,针对重要的、典型的建筑物、桥梁、管线等环境对象需要进行专题研究,确定施工变形的控制基准以及环境对象的安全保护措施和策略以及安全管理。

这两个方面的应用研究目前在国内还很不成熟。

1.3 城市地下工程研究前景

由于地下工程施工力学的研究国内外还处于不断地发展之中,而在此基础上进行进一步研究的城市环境土工问题则显得更为不成熟,但它们的研究内容都具有广泛性、综合性和实践性的特点。在理论上属学科前沿,反映学科交叉;在应用上与国民经济密切相关,是工程技术发展亟待解决、体现科技—经济—社会相结合的一个重要研究方向,将会对我国工程建设以及21世纪发展产生较为广泛和深远的影响。

在城市复杂环境条件下进行地铁的浅埋暗挖施工,给实际工程的设计、施工和研究都带来了很大的挑战和风险,同时也带来了机遇,可以预计通过对施工过程及其对邻近重要环境对象的影响研究,其研究成果将直接为该工程的动态设计和信息化施工服务,为保障工程的顺利实施提供理论指导和决策作用,同时提升类似工程的设计、施工、研究和管理水平,为相关行业标准 and 规范的制定做出应有的贡献,通过技术进步和创新,最终实现工程安全快速施工的目的。

第2章 地下工程施工过程模拟方法

本章介绍了地下工程施工过程力学基本特点,阐述了与施工过程力学密切相关的开挖模拟方法,结合自己的研究成果,提出了各种支护措施力学效果的模拟方法,分析了城市地下工程施工过程重点关注的地表沉降机理问题,这些是城市地下工程技术问题研究的基础。

2.1 地下工程施工过程力学基本概念

2.1.1 地下工程施工力学概念

地下工程是修筑在具有一定的应力场、渗流场和温度场的复杂地质(力学)环境中的结构物,这与地面工程是全然不同的,但地下工程长期都处于“经验设计”和“经验施工”这种举步维艰的局面,这种局面与迅速发展的地下工程的现实是极不相称的。因此,寻求用于解决地下工程问题的新的理论和方法,已成为近十几年来业内人士的共同愿望。

近代工程建设发展,提出了一种新的理念,即在工程设计阶段,不但要考虑结构物本身应满足工程力学与使用性能要求,而且还应考虑在工程施工过程中,在不同的工序状态下,对围岩地质环境和相邻结构物的不同影响。根据这种理念,为了解决施工过程中由于工序状态不同、时空环境不同及相邻工程环境不同等动态相互影响所提出的工程问题,需要对结构物及工程介质进行跟踪分析和解答,从而形成了新的工程力学学科分支——施工力学。

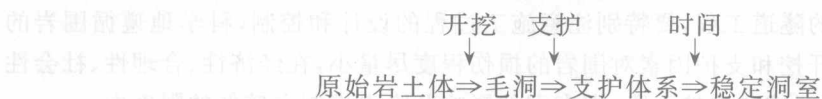
土木工程施工力学是在时变力学的基础上,力学学科与土木工程等工程学科结合的产物,研究工程施工过程中物体的力学性质,认为不仅研究对象的几何尺寸、材料参数随时间而变化,而且施加在物体上的荷载大小及方向也是时间的函数。其理论依托将涉及固体力学、结构力学、工程地质力学、岩土力学、(渗)流体力学、计算力学以及结构工程、基础工程、地下工程、水工工程、海洋工程、道桥工程、环境工程等多门学科,需要基础科学与工程科学密切配合与交叉、渗透。施工力学研究在理论上属学科前沿,反映学科交叉;在应用上与国民经济密切相关,是工程技术发展亟待解决,体现科技与经济相结合的一个重要研究方向,其成果将会对我国工程建设以及21世纪发展产生广泛、深远影响。

隧道工程施工力学可以认为是土木工程施工力学的一个重要分支学科,主要研究隧道施工过程中隧道结构、围岩及周围环境的力学响应及控制,其所牵涉的内容是比较广泛的,包括从地质体的研究一直到施工结束形成稳定洞室为止的全部内容,涉及地质学、地质力学、岩土力学、渗流(体)力学、结构力学、固体力学、耦合力学、优化理论以及建筑材料、设计、施工、试验、量测、防灾等诸多方面的知识,可以说是一门综合性极强的边缘学科。

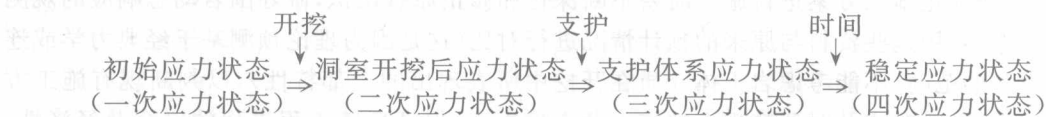
2.1.2 地下工程施工力学基本思想

地下工程施工的基本目的是在各类地质体(岩体或土体)中修筑为各种目的服务的、长期稳定的洞室结构体系。从结构角度讲,这个结构体系是由周围地质体和各种支护结构构成的,即洞室结构体系=周围地质体+支护结构。它的形成则是通过一定的施工过程或者说是一定

的力学转换过程来实现的。这个过程大体上可作如下表达：



与之相应的力学过程为：



新奥地利隧道设计施工法(简称新奥法)是 Rabcewicz 在总结隧洞建造实践经验基础上创立的,是一种设计、施工、监测相结合的科学的隧道建造方法,它的理论基础是最大限度地发挥围岩的自承作用。至今,新奥法在世界各国的隧洞和地下工程建设中获得了极为迅速的发展,在铁路、公路、水工隧洞及软弱地层中的城市地下工程中获得了广泛的应用。其基本原则主要有:

(1)围岩是隧洞承载体系的重要组成部分,所以在施工中尽可能保护围岩的原有强度,避免围岩出现不利的单轴和双轴应力状态。

(2)为了充分发挥围岩的结构作用,应允许有控制的围岩变形,一方面允许变形能达到在支护结构周围的围岩中形成承载环的量级,同时必须限制它,使围岩体不会过渡松弛而丧失或大大降低承载能力。为此,在施工中必须进行现场量测,来实现围岩的变形控制。

(3)在选择支护手段时,一般应选用能大面积的、牢固地与围岩体紧密接触,能及时施设和有随时加强可能性的支护手段,多采用喷射混凝土,同时要求层要薄,要有柔性,当要求增加支护抗力时,一般采用喷混凝土与锚杆或钢筋网或钢架等支护方式的联合形式来实现。

(4)为了提高安全度或设置防水层,一般采用复合式衬砌,即初期支护和二次支护,二次支护要适时,即不要太早也不要太晚。

(5)支护结构在施工中需适时闭合,设置仰拱形成封闭结构,使其充分发挥作用是施工中的一个重要环节。此外,隧道形状要尽可能圆顺,避免拐点以减少应力集中。

新奥法着重从施工措施的角度总结了现代隧道工程的设计施工方法,却未能从更广泛、更深刻的角度阐明其内在的原因和根据。实际上,隧道从开始开挖施工到工程结束都有一段过程,开挖将会使地下岩土体内部原有的物理力学平衡发生变化,通过施工中岩土内部的物理力学诸因素的重新调整与转化,达到施工完毕后的新的平衡状态和稳定状态,施工过程是一个时间和空间都不断变化的过程,而最终状态(最终解)不是唯一的,而是与开挖过程密切相关,或者说是与应力路径或应力历史相关,显然就有一个过程的优化问题,对于复杂的群洞隧道尤其如此。因此,隧道施工力学基本原理可以总结为以下几个方面:

(1)隧道工程的施工受到自然因素不确定性的影响,要全面而正确地认识各种因素的影响,不仅要研究自然因素(如地下水、初始地应力、岩土体的物理力学特性等),还需要研究人为的工程因素(譬如在设计或施工阶段主动地做寻优工作)。

(2)隧道工程施工期和竣工后的运行期,围岩的稳定性及有关的经济效益、社会效益不仅和其最终状态有关,而且和达到施工最终状态所采取的开挖途径和方法有关。这是因为隧道施工中围岩的边界在时空域中是不断变化的,围岩处于复杂的反复加卸载过程。从力学角度讲,这是一个非线性过程,不只与最终状态有关,而且和应力路径或应力历史相关。

(3)为了了解隧道结构的稳定性以及施工对环境的影响、施工支护效果,要在施工前对工程进行动态施工力学优化分析,针对不同的开挖顺序以围岩稳定或地表沉降作为优化目标,寻

求最优或几个较优的施工方案,以供设计或施工单位决策。

(4)对于复杂条件下的隧道工程,要特别注意施工过程的设计和控制,科学地遵循围岩的动态响应规律,使人体的开挖和支护因素对围岩的损伤程度尽量小,在经济性、合理性、社会性的前提下因地制宜地运用开挖和支护手段,把有害的影响及隐患控制在较低的限度内。

(5)根据优化施工方案进行施工时要不断深化和修正原有认识,做好围岩动态响应的观测及监测工作,要用这些资料与原来的预计情况进行对比(这是因为理论预测基于经典力学或连续介质力学的范畴,不能考虑岩土体介质在开挖中所表现出的全部特性),以判断现有施工方案的合理性,必要时应及时调整现有的施工及支护方案,保证后续工程进程的安全及经济性、社会性。

(6)要强调勘察、设计、施工、科研四个环节紧密结合,互相渗透,根据实际中出现的新情况和新资料不断修正原有的认识和调整原有的施工方案,要有允许随时修改原有施工方案和方法的灵活性,使之符合实际情况。

2.1.3 地下工程施工力学基本原理

施工力学具备以下6条基本原理:

- (1)系统的非确定性原理;
- (2)工程施工状态过程的非线性原理;
- (3)工程的稳定性评价及施工支护设计的优化分析原理;
- (4)施工过程的设计与控制原理;
- (5)适时观测及适时调整原理;
- (6)全过程的系统性原理。

2.1.4 地下工程施工力学效应

(1)时间效应

若材料具有黏性或涉及非正常问题,这些含有时间因素的问题将和几何、物性、边界的时变发生耦联,产生施工力学时间效应,即同一结构,不同施工时间控制过程,其最终力学状态不同。

(2)路径效应

若材料具有物理非线性或考虑几何非线性或考虑边界非线性(如接触问题),则这些问题含有的路径因素将和几何、物性、边界的时变发生耦联,产生施工力学路径效应,即同一结构,不同施工顺序控制过程,其最终力学状态不同。

(3)耦合效应

若研究问题涉及到多个物理场,如应力场、温度场、流体场等,这些场之间存在相互作用,产生施工力学耦合效应,当然,其分析结果与非耦合分析不同。

2.2 地下工程开挖模拟基本方法

2.2.1 开挖模拟基本原理

由于城市地铁隧道工程一般接近地表,岩土体结构相对疏松,构造应力常常可以忽略不计,初始应力场可以假定为重力场,用有限单元法计算在自重作用下地下工程的开挖,一般采用反转应力释放法进行计算。

隧道开挖前围岩处于初始应力状态 $\{\sigma\}^0$,以及与之相适应的初始位移场 $\{u\}^0$,沿开挖边界上的各点也都处于一定的原始应力状态,隧道开挖后,因其周边上的径向应力 σ_n 和剪切力 τ 都为零,开挖使这些边界的应力“解除”(卸荷),从而引起围岩变形和应力场的变化。对上述过程的模拟通常所采用的方法是邓肯(J. M. Duncan)等人提出的“反转应力释放法”,即把这种沿开挖作用面上的初始地应力反向后转换成等价的“释放荷载”,通常的做法是根据已知的初始应力,进而求得沿预计开挖的洞周边界上各节点的应力,一般假定各节点间应力呈线性分布,反转洞周边界上各节点的应力方向,并改变其符号,即可求得洞周边界上的释放荷载,然后施加于开挖作用面进行有限元分析,把由此得到的位移作为由于工程开挖卸荷产生的围岩位移,由此得到的应力场与初始地应力场叠加即为开挖后的应力场,这种模拟开挖效果的方法见图2.2.1-1,可见,这种方法的关键是释放荷载的确定。

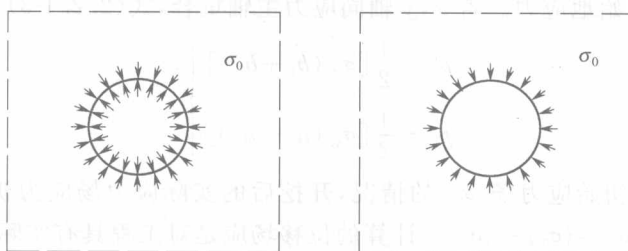


图 2.2.1-1 释放荷载的确定

对于释放荷载的确定,常用的方法是根据预计边界两侧单元的初始应力通过插值求得各边界节点上的应力,然后假定两相邻边界节点之间应力变化为线性分布,从而按静力等效原则计算各节点的等效节点荷载,具体计算方法如下(见图2.2.1-2)。

具体计算方法为两相邻节点之间初始应力呈线性变化。则对于任一开挖边界点 i ,开挖所引起等效释放荷载(等效节点力)为

$$\left. \begin{aligned} p_x^i &= \frac{1}{6} [2\sigma_x^i(b_1+b_2) + \sigma_x^{i+1}b_2 + \sigma_x^{i-1}b_1 + 2\tau_{xy}^i(a_1+a_2) + \tau_{xy}^{i+1}a_2 + \tau_{xy}^{i-1}a_1] \\ p_y^i &= \frac{1}{6} [2\sigma_y^i(a_1+a_2) + \sigma_y^{i+1}a_2 + \sigma_y^{i-1}a_1 + 2\tau_{xy}^i(b_1+b_2) + \tau_{xy}^{i+1}b_2 + \tau_{xy}^{i-1}b_1] \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1-1)$$

式中,上标 $i, i-1$ 及 $i+1$ 为沿开挖边界上的有限元网格的节点号, $a_i = x_{i-1} - x_i$, $a_2 = x_i - x_{i+1}$, $b_1 = y_i - y_{i-1}$, $b_2 = y_{i+1} - y_i$ 。

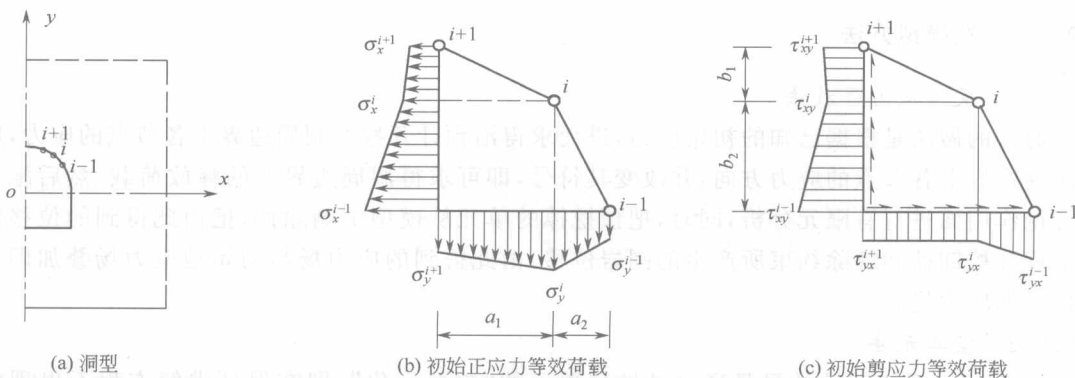


图 2.2.1-2 开挖边界上应力及等效节点力计算图