

地铁施工过程

数值仿真及安全性分析

王洪德 马云东 崔铁军 著



清华大学出版社



王洪德，工学博士，教授。国家注册安全工程师、国家安全评价师，辽宁省安全生产专家库成员、辽宁省工程爆破协会理事、大连市安全生产专家、大连市防震减灾专家。多年来，以地下工程、轨道交通和工业园区为研究对象，将安全学、灾害学、风险评价、结构原理、流体力学等理论和方法交叉融合，从事受限空间灾害防治技术、轨道交通综合巡检监控技术、隧道火灾预控及人员疏散技术、企业精细化闭环式动态管理系统平台研发、流变系统可靠性预警模型及区域风险评价模型构建研究工作。主编出版学术专著3部、编著8部；发表学术论文82篇，EI收录25篇。主持和参加完成国家级、省部级和市级科研项目7项，主持横向课题21项；获省部级科技进步二等奖2项、三等奖1项、市级科技成果一等奖2项。

地铁施工过程 数值仿真及安全性分析

王洪德 马云东 崔铁军 著

清华大学出版社
北京

前 言

地铁工程是一项投资大、建设周期长、技术复杂的大型土木工程。与其他工程相比,地铁工程具有施工过程隐蔽、周边建(构)筑物密集、地质环境不确定、施工技术复杂等特点,势必造成工程在施工期内的风险大、灾害种类复杂。一旦出现事故,会造成重大人员伤亡或财产损失,产生极其严重的负面社会影响。

本专著以地铁工程为对象,对施工过程中隧道和深基坑稳定性、爆破震速对建筑物的影响,以及可能造成的工程事故进行数值仿真和实测校验分析。基于 FLAC3D、FDS 和 MATLAB 数值仿真,结合神经网络、差异进化算法、支持向量机等预测技术,实现对地铁施工过程安全性的定量分析及判定。

本专著旨在介绍作者近 10 年在地铁工程施工过程仿真及安全性分析技术、结合工程应用领域开展研究所取得的成果。主要介绍结合工程应用领域拓宽建立的安全性分析方法,涉及领域主要包括岩土工程、结构力学理论和技术,以及流固耦合作用影响下的富水软岩地层中工程施工过程仿真技术。工程应用方面,则将研究目标设定为根据施工监测所得到的结果,借助机理分析和反演分析,基于信息化施工技术,研究地铁工程建设安全性的动态预报与控制的途径、理论与方法。

自 20 世纪 90 年代起,随着经济建设的腾飞,我国在城市交通工程、市政建设、矿山、水利和水电等领域的基础设施建设得到了快速发展。其中,尤其是城市地铁工程的发展,更因其与人们日常生活密切相关而备受瞩目。地铁工程建设的快速发展,使地铁施工过程的安全性问题成为国内外专家学者关注的新课题,因为隧道及地铁车站等地下工程是直接在地层中建造,由此使其工程地质特征对各类建筑结构的优化选型及施工方法的合理选择必然会起制约作用。一般来说,对于隧道和地下结构工程的设计与施工,人们已经积累了丰富的经验;然而由于岩土地层自身性质所具有的复杂性,而且在市区工程建设中对环境保护的要求较高,再加上岩土工程的建设规模越来越大、技术难度越来越高,以及对一些复杂工程问题的处理缺乏经验等原因,致使地下工程施工安全事故时有发生。例如,深基坑开挖施工中横向支撑和侧向围护结构的失稳破坏,或者因周围地层变形过大从而导致附近房屋及地下管道产生移位或开裂;盾构隧道或顶管管道施工中,由盾构推进或管道顶进导致地面隆沉而引起的附近建筑物、构筑物的损坏;高速公路建设中软土路基的过量沉降或车辆行驶易于遭遇的桥头跳车;岩石隧道在穿越断层破碎带时易于塌方,穿越岩溶地带时易于遭遇突水涌泥,并导致灾难性事故发生等。

为了避免发生工程事故,人们从设计、施工方法优化和现场监测等方面对确保岩土工程施工的安全性进行了研究,并且都取得了丰硕成果。近年来,地铁工程的施工力学及其安全性问题研究均已取得巨大进展,所建立的计算方法不仅已可追踪施工开挖步骤等的影响,而且可根据由现场施工监测所得到的位移量随时间增长而变化的曲线,特别是借助反演分析方法,可确定地层材料的性态模型及其特性参数,进而对地铁施工过程形成可实现信息化施

工与安全性预报,以及信息化设计与安全性控制的成套技术。

本专著共分7章,所介绍的内容主要是大连交通大学王洪德教授及其研究团队在这一领域中进行的研究工作和所取得的成果。著作内容包括辽宁工程技术大学安全科学与工程学院崔铁军博士、大连交通大学马云东教授的部分研究成果;同时包括高秀鑫、张立漫、沈秀峰、秦玉宾等完成的学位论文成果。这些研究成果不仅可大大丰富包含地铁工程在内的岩土力学理论内涵,而且可大大促进地铁工程施工技术的进步。

第1章为绪论,主要叙述地铁工程建设发展所面临的安全性问题,概述地铁工程施工全过程安全性分析、预测和控制的途径;第2章主要研究不同类型的地铁车站深基坑施工过程仿真及安全性分析方法;第3章主要采用数值仿真与实测对比分析等手段,结合人工神经网络和差异进化算法等预测技术,研究浅埋暗挖隧道施工过程对地表沉降量以及地表建(构)筑物的振动影响及安全性问题;第4章通过对盾构施工过程仿真及施工引起地表沉降机理分析,研究盾构施工建模的影响因素,研究盾构施工对既有地下管线的影响程度;第5章基于均匀和非均匀温度场条件,研究施工隧道火灾对衬砌结构的流固热耦合作用影响,仿真分析地铁车站火灾情景及最佳避灾路线;第6章主要研究地铁施工过程远程监测预警技术;第7章主要对地铁工程安全性分析问题作进一步拓展研究。

针对地铁工程施工过程的数值仿真及安全性分析来源于工程建设发展的实际需要,研究工作的进展多数也都针对工程实践及其在采用这类方法时遇到的理论问题和实际问题。近十年来,大连交通大学的研究人员遵循理论联系实际原则,在该领域结合工程实践开展研究,取得了较多研究成果,由此不仅对道路与城市轨道交通工程学科理论的发展起到了较好促进作用,而且在服务工程实践方面也做出了一定贡献。

地铁工程施工过程数值仿真及安全性分析是实践性极强的学科分支,发展该学科理论需要密切结合工程施工的实践,并应注重结合需要解决的工程问题开展研究工作。在地铁施工过程仿真和安全分析技术的研究方面虽已取得一些成果,但有待继续研究的课题却仍有很多,需要对其继续进行创造和完善。

限于水平,书中难免存在不足之处,敬请读者指正。对地铁工程施工过程进行数值仿真和安全性分析是城市轨道交通行业发展的需要,期盼这本专著的出版能够有助于学科理论研究的继续发展。

著 者

2013年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地铁工程问题安全性综述	1
1.1.1 地铁工程问题安全性内涵.....	1
1.1.2 地铁工程问题安全等级划分.....	2
1.1.3 地铁工程问题安全性预测预报.....	3
1.1.4 地铁工程问题安全性控制.....	5
1.2 地铁工程问题安全性研究进展	5
1.2.1 地下工程安全性分析研究进展.....	5
1.2.2 地下工程结构研究方法进展.....	6
1.2.3 隧道及地下工程火灾研究方法进展.....	8
1.3 反演理论及其工程应用研究进展	9
1.3.1 反演理论研究概况.....	9
1.3.2 地铁工程力学反分析数学描述	10
1.3.3 反分析数值反演方法及其应用	11
1.4 本书主要研究内容.....	12
参考文献	14
第 2 章 深基坑工程安全性分析及其应用	18
2.1 深基坑安全性分析概述.....	18
2.2 深基坑变形机理.....	19
2.2.1 深基坑底部土体回弹和隆起	19
2.2.2 围护结构变形	20
2.2.3 深基坑周围地层位移	21
2.3 深基坑工程安全性判定及控制.....	22
2.3.1 动态预报过程	22
2.3.2 深基坑工程安全性判别	26
2.3.3 深基坑工程监测方案优化与安全性控制	29
2.4 深基坑施工过程仿真及地表沉降量验证分析.....	35
2.4.1 深基坑工程概况	35
2.4.2 围护结构特点及监测方案	37
2.4.3 本构模型和单元参数	39
2.4.4 深基坑模型构建	48

2.4.5	围护结构仿真分析	49
2.4.6	深基坑开挖及地表沉降仿真	50
2.4.7	实测与仿真数据对比分析	55
2.5	带阳角深基坑变形特征仿真与实测对比分析	60
2.5.1	阳角基坑工程研究进展	60
2.5.2	工程背景及环境概况	61
2.5.3	有限元分析原理及其实现	62
2.5.4	带阳角土岩组合基坑变形特性分析	69
2.5.5	现场测试分析	73
	参考文献	75
第3章	隧道工程安全性仿真与实测对比分析	77
3.1	常用隧道施工方法分析	77
3.1.1	典型的隧道施工方法	77
3.1.2	隧道施工方法的选择	80
3.2	隧道施工过程仿真和安全性预报	81
3.2.1	隧道开挖施工过程仿真的计算方法	81
3.2.2	位移量和安全性的预报	83
3.3	隧道施工引起地表沉降的神经网络预测	84
3.3.1	地铁施工引起地表沉降概述	84
3.3.2	ANN 预测技术及其应用	84
3.3.3	地表沉降规律分析	91
3.3.4	BP 神经网络模型构建及程序编制	92
3.3.5	仿真与实测对比分析	95
3.3.6	结果分析	100
3.4	双线隧道 CRD 开挖过程仿真及地表沉降分析	100
3.4.1	双线隧道的 CRD 开挖概述	100
3.4.2	工程概况及监测方案	104
3.4.3	隧道本构模型及结构单元选取	107
3.4.4	隧道施工数值模型构建	110
3.4.5	CRD 法开挖过程数值仿真	112
3.4.6	CRD 法施工对地表建筑物的影响	116
3.5	基于差异进化的爆破振速参数反演分析	118
3.5.1	爆破振速研究概述	119
3.5.2	差异进化算法	120
3.5.3	基于 DE 的爆破振速参数识别	121
3.5.4	工程应用	122
3.5.5	结果分析	126
3.6	隧道爆破施工对地表建筑物的微振动效应分析	130

3.6.1	爆破地震波的产生机理	130
3.6.2	爆破地震波的类型	131
3.6.3	爆破振动效应的控制参数分析	132
3.6.4	工程实例概况	133
3.6.5	爆破地震波控制验算	134
3.6.6	结果分析	137
3.7	地铁隧道爆破对建筑物微振动影响仿真分析	137
3.7.1	有限元模型的建立及特性分析	138
3.7.2	爆破地震波选取	139
3.7.3	建筑结构在爆破地震波作用下的动力响应分析	139
3.7.4	爆破地震波幅值对结构的微振动响应影响	145
3.7.5	爆破地震波频率对结构的微振动响应影响	149
3.7.6	爆破地震波持续时间对结构的微振动响应影响	154
	参考文献	158
第4章	盾构施工过程仿真与安全性分析	161
4.1	盾构施工引起的地表沉降机理分析	161
4.1.1	盾构施工过程概述	161
4.1.2	盾构隧道的地表沉降机理及其影响因素	162
4.1.3	地表沉降的安全性判断与控制标准分析	167
4.2	盾构隧道施工建模影响因素仿真分析	170
4.2.1	盾构施工建模影响因素	170
4.2.2	模型构建及监测点选择	171
4.2.3	建模因素对比分析	173
4.2.4	建模因素分析结果	177
4.3	土压平衡双线盾构隧道施工引起地表沉降分析	178
4.3.1	双线地铁隧道引起地表沉降概述	178
4.3.2	工程概况	179
4.3.3	FLAC3D 仿真	182
4.3.4	仿真与实测数据对比	183
4.3.5	仿真结果分析	186
4.4	厚硬岩层盾构隧道施工对地下管线影响分析	186
4.4.1	盾构施工对地下管线影响概述	187
4.4.2	工程概况	187
4.4.3	模型选取	188
4.4.4	数值仿真分析	189
4.4.5	计算结果分析	190
4.4.6	验证分析	193
4.5	盾构接收井施工仿真及地表沉降分析	195

4.5.1	工程概况·····	195
4.5.2	模型选择·····	198
4.5.3	数值仿真分析·····	198
4.5.4	仿真与实测结果对比分析·····	200
	参考文献·····	203
第 5 章	地铁施工过程火灾仿真与安全性分析 ·····	206
5.1	地铁施工过程火灾研究概述·····	206
5.1.1	地铁施工过程火灾的特点·····	206
5.1.2	地铁施工过程火灾研究方法综述·····	207
5.1.3	国内外地铁施工过程火灾研究现状·····	207
5.2	均匀温度场条件下盾构隧道管片热辐射性能分析·····	209
5.2.1	计算流程·····	209
5.2.2	FLAC3D 模型参数确定·····	209
5.2.3	火灾时期管片的热力分析·····	211
5.2.4	模型受力分析·····	212
5.3	非均匀温度场盾构隧道衬砌热传导性能分析·····	216
5.3.1	隧道火灾时期热能传递概述·····	216
5.3.2	本构模型构建·····	216
5.3.3	火灾时期管片的热力分析·····	218
5.3.4	结果分析·····	221
5.4	基于 FDS 的地铁车站施工过程火灾仿真分析·····	222
5.4.1	地铁车站施工过程火灾概述·····	222
5.4.2	FDS 仿真应用概述·····	222
5.4.3	FDS 计算步骤·····	222
5.4.4	模型构建·····	224
5.4.5	仿真结果及分析·····	226
	参考文献·····	231
第 6 章	地铁施工过程风险监控预警技术 ·····	233
6.1	地铁施工风险监控预警技术概述·····	233
6.1.1	地铁工程风险的内涵·····	233
6.1.2	地铁工程风险分析与管理现状·····	235
6.1.3	工程风险管理·····	237
6.1.4	地铁施工过程风险预警动力机制·····	239
6.2	深基坑围护结构变形远程监测预警装备技术·····	242
6.2.1	深基坑围护结构监测预警技术概述·····	242
6.2.2	深基坑结构变形监测物联网框架·····	242
6.2.3	监控系统的物理结构·····	243

6.2.4	系统软件体系	244
6.2.5	预警功能介绍及实例分析	246
6.2.6	结果分析	248
6.3	长大隧道健康状况远程监测诊断装备系统构建	249
6.3.1	长大隧道健康状况监测诊断装备系统研究概述	249
6.3.2	长大隧道健康状况监测诊断装备系统组成	249
6.3.3	长大隧道传感器布设	252
6.3.4	影响长大隧道健康状况因素	253
6.3.5	健康诊断指标判定标准确定	256
6.3.6	工程实例分析	259
	参考文献	261
第 7 章	地铁工程安全性分析方法的拓展	264
7.1	Duncan-Chang E-B 模型软化技术研究	264
7.1.1	Duncan-Chang E-B 模型存在的缺陷	265
7.1.2	Duncan-Chang E-B 模型及其改进	265
7.1.3	Duncan-Chang E-B 改进模型的二次开发	266
7.1.4	模型计算与比较	266
7.1.5	结果分析	269
7.2	基于差异进化支持向量机的坑外土体沉降预测	269
7.2.1	概述	269
7.2.2	坑外岩土体沉降预测的 DE-SVM 方法	270
7.2.3	实例分析	274
7.2.4	结果分析	277
	参考文献	277

第1章 绪 论

作为城市公共交通的一种便捷工具,地铁是解决城市交通拥挤的一项切实可行的措施。地铁工程(metro engineering)是一种充分利用土地资源,用地下结构空间取代岩土空间(geotechnical space)的工程建设活动。地铁工程大多建在大中型城市繁华街区,地上建筑群密集,地下管线网纵横交错,具有地理位置特殊、质量安全要求高、涉及的工程专业多、工程量巨大、地下和露天作业多、工程与周边环境关系密切、施工的流动性大、施工的单元性多、施工的周期长等特点,从而决定了地铁工程的不确定因素多、安全性能差、可能引发的事端种类繁多。一旦发生地铁安全事故,其后果是相当严重的,往往是群死群伤^[1,2]。随着我国轨道交通地下工程建设的全面开展,强化地铁工程问题安全性分析理论和技术研究,提高工程风险控制水平,显得极为重要。

1.1 地铁工程问题安全性综述

1.1.1 地铁工程问题安全性内涵

地铁工程由于受到自然环境、施工技术手段以及人员施工素质等方面的影响,有其自身特点。如隧道施工,无论是明挖法(cut and cover)、盖挖法(cover and cut),还是暗挖法,如矿山法(mining method)、盾构法(shield method)或沉管法(immersed tube method),都要打破岩土体结构原有的平衡。施工接触区域内的岩土体要重新达到平衡,就要借助外层土体削减残余应力。当应力无法削减时,就会导致牵引或推动相关岩土体隆起或沉降、滑坡、变形等现象出现,甚至导致岩土体结构破坏、坍塌。地铁工程建设有多种事故形式,如地表沉降、支撑破坏、邻近结构物受损、地下管线破坏、隧道或站场电器火灾或爆破振动引起的结构体破坏等^[3~6]。因此,如何通过先进理论和技术手段,及时掌握岩土体平衡破坏后的应力变化规律以及引起地表沉降或坍塌的程度,明确支护是否满足承载物的要求,提高地铁工程全过程的安全性和风险承受能力,成为人们关注的热点问题。

地下工程(underground engineering)安全性包括地下结构(或构筑)物施工系统安全,以及受地下工程施工影响的周围建筑物和各种设施安全。作为城市地下工程的重要分支,地铁工程问题安全性分析(safety analysis),就是预先发现工程全寿命周期(whole life cycle)各阶段可能存在的危险因素,全面掌握其基本特点,明确其对工程施工安全性影响的程度。“预先”是指:无论工程寿命周期的哪个阶段,都要在该阶段开始之前就进行工程安全性分析,发现并掌握工程施工过程的危险因素^[7~9]。

按照安全“人-机-环-管”方法学观点,列出地铁工程施工全过程安全影响因素,如图 1-1 所示。本书针对各种地铁工程问题的安全性分析,都是基于对这些安全因素耦合作用影响

的深刻剖析,特别是基于技术层面的仿真分析和实测数据反演校核来具体展开的。

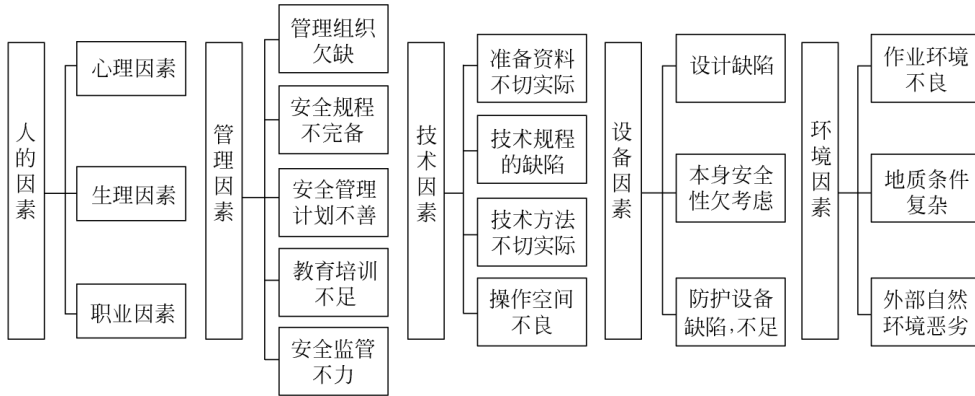


图 1-1 地铁工程施工全过程安全影响因素

1.1.2 地铁工程问题安全等级划分

1. 地下工程安全分级

地下工程建设期间,应对其可能产生工程损失的不同程度(人员伤亡、造成经济损失、产生社会影响)确定不同的安全分级。地下工程安全等级主要是根据工程本身的安全风险以及工程周边的环境风险来综合确定。表 1-1~表 1-3 列出了天津市建设管理委员会给出的安全等级标准(safety classes standard)^[10~12]。

表 1-1 地下工程安全分级

安全分级	安全后果	工程类型	周边环境
一级	很严重	深基坑或隧道	安全要求很高
二级	严重	较深基坑或隧道	安全要求高
三级	不严重	普通基坑或隧道	安全要求一般

注: ①深基坑指明挖法、盖挖法施工的地下工程基坑,隧道指盾构法或浅埋暗挖法施工的地下工程; ②周边环境指基坑或隧道施工影响范围内既有建(构)筑物、道路、地下设施、地下管线、岩土体及地下水体等的统称; ③安全要求很高指工程周边环境中有地铁、高速铁路、煤气管、大型压力水管、大型立交桥等重要建筑市政设施,且必须确保安全或对变形特别敏感的既有建(构)筑物或变形要求特别高的既有建(构)筑物或工程本身安全风险极高; ④同一工程周边环境不同可分别划分成不同的安全等级。

2. 深基坑安全分级

深基坑(deep foundation excavation, DFE)是指开挖深度超过 5m(含 5m)或地下室三层以上(含三层),或深度虽未超过 5m,但地质条件和周围环境及地下管线特别复杂的工程。根据施工场地工程地质与水文地质条件、开挖深度、周边环境,以及破坏后果的严重程度等因素,深基坑工程的安全性可定性划分为一、二、三级,如表 1-2 所示。

表 1-2 深基坑安全分级

安全分级	划分条件
一级	① 基坑开挖深度 $>20\text{m}$ 。 ② 距基坑 $1.0h$ 范围内有地铁、高速铁路、煤气管、大型压力水管、大型立交桥、重要铁路干线、大型重力流管线或有压管、在施的深基坑；距基坑 $0.7h$ 范围内有必须保护的建筑、管线等设施
二级	① 开挖深度在 $14\sim 20\text{m}$ 的基坑。 ② 距基坑 $(1.0\sim 2.0)h$ 范围内有地铁、高速铁路、煤气管、大型压力水管、大型立交桥、重要铁路干线、大型重力流管线或有压管、在施的深基坑；距基坑 $1.5h$ 范围内有必须保护的建筑、管线等设施
三级	开挖深度 $<14\text{m}$ ，且环境安全无特殊要求

注： h 为基坑开挖深度。

3. 盾构隧道安全分级

盾构施工(tunnel boring machine, TBM),即全断面隧道掘进机隧道施工法,是靠旋转并推进刀盘,通过盘形滚刀破碎岩石而使隧洞全断面一次成型的隧道施工方法。根据施工场地工程地质与水文地质、降排水条件、盾构类型、盾构隧道的线路技术条件、周边环境安全的影响程度、工期延误及交通影响、破坏后果的严重程度等因素,对盾构隧道工程安全定性划分为一级、二级、三级共三个等级,如表 1-3 所示。

表 1-3 盾构隧道安全分级

安全分级	划分条件
一级	① 下穿既有轨道线路(含铁路)、河、湖的盾构工程； ② 下穿须保护的重要既有建(构)筑物、紧靠滑裂区内大型既有建(构)筑物的盾构工程； ③ 盾构覆土 $\leq 1D$
二级	① 靠近既有建(构)筑物,下穿重要市政管线的盾构工程； ② 不良地质地段的盾构区间联络通道、盾构始发与到达区段； ③ 盾构覆土 $(1\sim 1.5)D$
三级	下穿一般市政管线及其他市政基础设施的盾构工程

注： D 为盾构直径。

针对地铁工程实际,进行安全分级时,应结合工程特点和环境特点,在充分调查研究及分析的基础上,按具体情况对隧道的不同区段确定不同的等级,必要时可提高一个等级进行安全风险管理的。

1.1.3 地铁工程问题安全性预测预报

地铁工程建设离不开安全性预测预报。施工过程中,整个岩土体连同支护结构的应力分布规律是随着地层结构的不同而发生变化的,大部分岩土力学公式来源于实验和经验,且不说某个计算问题是否满足某模型的适用条件,即使满足了条件,所获得的计算数值也可能与实际相差甚远。由于隧道等地下结构的特殊性,更不可能通过破坏性试验测量;对于现

场施工而言,只能通过表象来了解结构内部的变化。在施工过程中通过对各种物理量施工前后对比,才能进一步了解、分析和预测可能的下一段时间内的情况来考察其安全可靠。也就是说,施工方法的合理性评估,既包括判别当前工程施工过程是否安全,又包括判别后续施工阶段周围岩土层和支护结构能否保持稳定,甚至包括使用阶段建(构)筑物结构能否安全可靠地投入运营。

1. 工程安全性预测预报内涵

由施工监测得到的位移量等监测数据,虽可方便地直接用于评判当前阶段地铁工程施工的安全性,但若评判后续工程阶段周围岩土体和支护结构的稳定性,则需要构建基于初始条件的数值分析模型,通过仿真和推理论证等技术手段,并结合实测数据进行反分析(back analysis),即根据岩土体在实际工程荷载作用下监测到的性状变化,采用数值分析方法对岩土体的力学特性和(或)初始应力条件进行分析,使工程模型能更加精确地反映未来施工变化趋势。这些通过研究形成或建立的分析理论和可供选用的方法,都将构成地铁工程安全性预测预报的重要内容。

2. 工程安全性预测预报方法

基于地铁工程施工监控量测得到的位移量等数据来预测、预报工程安全性的方法虽可分为经验判断法(empirical judgement method)和数值分析法(numerical analysis method)两类,但在采用经验判断法时,通常是根据沉降或位移量测值变化规律,给出周围岩土层和支护结构最终沉降量或位移量,并据此评判其在工程施工过程中的稳定状态。显然,采用此类方法对地铁工程安全性能实施成功预测、预报的前提,是工程技术人员在同类工程建设过程中积累有丰富的经验,具有一定的随机性。

科学合理的地铁工程安全性预测预报,应是在兼顾经验基础上的数值分析方法。即参照以往由设计计算和对监测资料的分析积累的经验,对其建立可追踪施工过程力学状态的数值模型,通过参数敏感度分析(sensitivity analysis)对其确定关键参数,并在借助位移反分析确定关键参数取值或取值范围的基础上,将其用于预测预报地铁工程各施工阶段位移量,并据以判断周围岩土层和支护结构在工程施工全过程中的安全状态。

众所周知,借助位移反分析(displacement back analysis)确定周围岩土层特性参数值,是可供工程实践采用的有效方法^[13]。然而,如果计算模型中的参数值都是由位移反分析方法来确定,则不仅反分析计算的优化过程将十分冗长,而且很可能得不到物理概念合理的解答,甚至导致计算过程不能收敛^[14]。经验表明,如果能将反分析计算的目标未知数局限于关键参数,则常可得到较好的预报效果^[15]。数值模型中的其余参数,多数可根据地质勘察资料赋值。此外,作者的研究成果表明,在地质资料丰富的场合,如果能借助地质统计方法确定主要参数的取值范围,则由位移反分析法所确定的关键参数常可得到很好的结果^[16]。

对地铁工程问题安全性的预测预报技术,本书在隧道工程安全性仿真与实测对比分析、深基坑工程安全性仿真与实测对比分析等章节中将介绍相应研究成果。通常情况下,以上所提及的研究方法对各类岩土工程施工都适用。

1.1.4 地铁工程问题安全性控制

地铁工程问题安全性分析,是服务于工程实际的预防性和控制性分析。安全性分析的目的,既包括保障开挖施工阶段的周围岩土层(surrounding rock)和围护结构(retaining structure)能保持稳定,以及工程完工后的衬砌结构在运营过程中能可靠使用,又包括在可能条件下节省材料和投资。为达此目的,有必要在对地铁工程施工全过程安全性进行分析预测的基础上,给出具体控制措施和策略。

地铁工程问题安全性分析预测的着眼点,是借助于以往积累的经验或由施工力学研究成果所建立的分析理论与方法对地铁工程施工全过程安全性进行系统分析;而安全性控制所关心的则是对地铁工程施工全过程安全性分析原理与方法,以及在设计过程中可赖以对安全性控制方法选择取得优化解的各种途径。由此可见,由地铁工程问题安全性分析预测取得的结果,可用作安全性控制研究的基础资料,而安全性控制研究的着眼点则主要是对周围岩土层和围护结构的稳定性分析选定判断条件,以及制定据以对安全性控制方法确定取得优化解的策略。

1.2 地铁工程问题安全性研究进展

1.2.1 地下工程安全性分析研究进展

1. 国外研究进展

自 20 世纪 70 年代美国麻省理工学院(MIT)土木与环境学部的 Einstein(1974)教授在隧道与地下工程中引入安全风险分析以来,安全性分析理论及方法在地铁工程领域已取得了一些研究成果,他基于隧道工程安全性分析所构建的隧道成本模型(tunnel cost model),成为最早将不确定性引入地下工程领域的安全性评估模型^[17~19]。结合 Einstein 的研究成果,英国剑桥大学(University of Cambridge)的 Salazar 博士(1983,1986)将不确定性的影响同工程造价联系起来,构建了隧道工程安全性数值分析模型^[20,21]; Sturk(1996)建立了一个涉及地下工程的以概率统计和风险分析为工具的风险分析和决策系统,并将其应用于瑞典斯德哥尔摩环形公路隧道工程不同设计方案选择中,从可靠性和安全性的角度得出了有关隧道技术的有价值的结论^[22]; Kampmann(1998)等结合丹麦哥本哈根地铁工程,提出了 40 余种灾害类型、10 种安全风险类型和 40 余项风险减轻措施^[23]; Isakson(1999)在估计隧道工程成本时,考虑了潜在意外事件发生的可能性、影响结果,以及不同地质因素对生产率的影响,以此建立了工程总成本表达式,并在瑞士 Grauholz 隧道施工方法选择上获得了应用^[24]; Reilly(2000)提出了隧道工程的建设过程也就是进行全面的安全风险管理和风险分担的过程,他将地下工程中的主要风险划分为四类,即造成人员伤亡和经济损失的风险、造成工期延误的风险、造成不能满足设计和使用要求的风险、造成工程造价增加的风险^[25]; Geyer(1995)建立了地下工程最可能事故集合,估计了各种情况下工程事故的发生

生可能性和后果严重性,并建立了安全风险标准,体现了地下工程安全性分析定量模型的优势^[26]。

2. 国内研究进展

在中国,随着城市轨道交通建设的快速发展,地铁工程问题安全性分析理论及技术研究显得尤为迫切,很多专家学者以及工程人员也展开了卓有成效的工作,并取得了一定研究成果。张海波等(2005)以上海市轨道交通二期工程浦东南路站—南浦大桥站区间近距离叠交隧道盾构施工为研究对象,对近距离叠交情况下后建隧道盾构施工引起老隧道衬砌的应力和变形进行了仿真分析,并研究了土层性质、隧道覆土厚度、隧道间相对位置、隧道间相对距离等因素与隧道间影响的关系^[27];吴为义等(2008)采用弹性地基梁理论及“管线-土-盾构”耦合方法,结合实测结果,分析了深圳地铁益田站至香蜜湖站区间盾构隧道施工对3m直径电缆管线的影^[28];陈龙(2004)针对软土地区盾构隧道施工期的风险分析与评估等问题,提出了软土地区盾构隧道施工期风险分析与评估模型,对于软土地区盾构隧道施工期风险概率的可能性分布规律,以及耐久性损失、环境影响损失的分布规律进行了归纳总结,进而为定量分析评价软土地区盾构隧道施工期风险提供了科学的理论依据^[29];陈神龙等(2006)根据地铁车站工程施工影响因素随机性和模糊性等特点,提出了风险评估模糊综合评判法,其中运用层次分析法确定影响因素的权重^[30];王岩等(2004)运用层次-模糊综合评判法对地铁隧道进行了安全评估^[31];陈太红等(2008)从施工、设计、管理等方面提出了地铁工程建设中风险的防范控制措施^[32]。总之,在地铁安全风险研究方面虽然已经取得了很大发展,部分成果已应用于实际工程建设中,也取得了很好的效果,但同时存在的很多安全性问题还需要我们去研究探索。

1.2.2 地下工程结构研究方法进展

多年来,国内外学者尝试多种不同方法对隧道、竖井和基坑引起的地表沉降或结构变形等安全性问题进行研究,包括经验公式法、解析法、模型试验法和数值仿真方法等。

1. 经验公式法

在经验公式研究方面,Peck(1969)对大量地表沉降数据进行分析,提出了地层损失的概念和估算方法^[33];Schmidt(1969)、Attewell(1978)和Rankin(1988)相继由实例分析支持和发展了Peck公式^[34~36];同济大学侯学渊等(1993)结合上海地区饱和土和盾构施工特点,提出了考虑时效(土体扰动后固结)沉降的修正Peck公式^[37];Fang(1993)在实测了台北污水管道施工中的地表沉降后,得出沉降的绝大部分发生在盾构通过后前4天内,而最终沉降槽形状类似Peck提出的曲线^[38],并在以后研究中Fang(1993)提出了土压平衡盾构纵向沉降随时间的变化曲线呈双曲线型。Mail和Taylor(1993)把经验公式法延伸到计算地下土体沉降,通过实地测量和离心模型试验,探讨了粘土中隧道施工引起地表沉降槽宽度与最大沉降量随深度的变化^[39]。经验公式法的局限性在于缺乏理论依据,故通常仅仅适用于经验所获得的局部地区。对于工程地质条件或施工技术差异较大的地区,应用前需对其实用性进行考察;另外,经验公式法所提出的成果往往局限于只能得到地表沉降,而不能像解

析法和数值仿真方法等那样,可以全面分析得到整个分析域的岩土层变形、应力和应变等。

2. 解析法

在解析法研究方面,Sagaseta(1987)提出在一个弹性半空间中不可压缩土(泊松比为 0.5)中的闭合解,给出了弹性各向同性均质体在靠近地表情况下产生地层损失情况下的应变解^[40]; Verruijt 和 Booker(1996)修正了 Sagaseta 方法,考虑了泊松比和隧道的椭圆化变形的影响^[41]; Bobet(2001,2002)基于地层均匀且各向同性、轴对称平面应变的假设基础上,推导出饱和土层中浅埋隧道开挖引起的地层瞬时变形公式,并据此计算了世界各地 28 条隧道的变形,所涉及的地层均为地下水位以下的软粘土或硬粘土^[42,43]。相对于其他方法,解析法的研究成果相对较少,这主要是由于问题本身的极端复杂性决定的。只有在对问题本身进行了足够的近似简化后,才有可能得到解析解。因此,一般只能考虑一些理想化的问题,针对比较简单的边界条件和初始条件得到解答。从上述学者提出的方法来看,无一例外均将岩土层假定为均匀、各向同性、轴对称的平面应变问题,没能考虑更为复杂的岩土层条件,更无法顾及施工条件,因此只具有理论上的参考意义。

3. 模型试验法

在模型试验法研究方面,离心模型试验技术是一项越来越受关注的试验技术。其特点是能在原型应力状态下,观察和研究岩土工程的变形状态和破坏状态。Guttler 和 Stoffers(1988)用离心模型试验对圆形隧道变形和破坏的形态进行了研究^[44]。姚燕明、杨龙才等(2002)通过对某地铁站设计推荐方案进行离心模型试验,分析了隧道开挖对地面的沉降影响,同时根据试验模型的地表沉降曲线分析,提出了采用该方案施工时地表沉降控制基准值^[45]。

4. 数值仿真方法

数值仿真方法被人们公认是一种求解工程结构问题的最有效的通用方法。伴随着岩土工程数值方法和计算机仿真技术的发展,该方法获得更广泛的应用。目前的数值仿真方法包括:有限差分法^[46]、有限单元法^[47]、边界单元法^[48]、离散单元法^[49,50]等。

1) 有限单元法

有限单元法(FEM)非常成熟,是一种经典且应用广泛的数值方法。该方法在隧道及深基坑等岩土工程分析领域应用非常广泛。其突出优点是能适当地解决岩土体的不连续性与非均匀性,建模分析时能获得模型分析范围内岩土体的应力、应变分布情况与大小,有效解决了传统理论方法将分析对象看作刚体而进行极限平衡分析的缺点,并且可以按照本构关系研究隧道或深基坑变形问题与最终破坏原因,寻求模型中最可能、最早发生屈服破坏的位置,以及必须采取加固的位置等。但是有限单元法对岩土体的位移不连续及大变形等难题还无能为力(尤其是针对地铁深基坑工程施工期的围护结构大变形问题),在处理应力集中和无限域这些情况下的结果与实际差别较大。边界单元法对势函数的要求严格,使这种方法在处理非均质、非线性问题方面不如有限单元法灵活、有效。

2) 离散单元法

离散单元法的突出特点是可以在分析结果中体现岩土体接触面的倾覆、分离与滑移等