

Research on the Risk Analysis and
Control of Urban Tunnels Construction

代春泉 王 磊 王渭明◎著

城市隧道施工 风险分析与控制技术研究



清华大学出版社

Research on the Risk Analysis and
Control of Urban Tunnels Construction



代春泉 王 磊 王渭明◎著

城市隧道施工 风险分析与控制技术研究

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

城市隧道施工风险,尤其是对通过破碎岩层、穿越密集建筑区、超浅埋、大跨度隧道施工风险进行识别,构建适应于此类复杂工程的风险评估与风险控制模型,进而建立动态风险预警系统,是该研究领域的重点和难点问题。本书在广泛查阅国内外相关领域研究成果,大量总结类似工程资料的基础上,结合现代工程项目管理理论、现代岩土工程防灾减灾理论、岩土工程数值分析技术等相关知识,采用理论分析、数值模拟与现场监测相结合的方法对城市隧道施工风险识别、风险评估、风险处置以及动态风险预警等问题进行了深入、系统的研究。

本书涉及岩土工程力学分析和风险管理两大专业知识,适合具有一定基础的专业技术人员学习和使用,也可以作为岩土工程和工程管理专业的硕士研究生及博士研究生的学习参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

城市隧道施工风险分析与控制技术研究 / 代春泉,王磊,王渭明著. —北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-40644-0

I. ①城… II. ①代… ②王… ③王… III. ①城市隧道-隧道施工-风险分析-研究 ②城市隧道-隧道施工-风险管理-研究 IV. ①U459.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第153221号

责任编辑:杜春杰
封面设计:刘超
版式设计:刘艳庆
责任校对:赵丽杰
责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:15.75

字 数:378千字

版 次:2016年3月第1版

印 次:2016年3月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:057069-01

前言

— Preface —

随着城市空间拓展的立体化,城市地下工程施工环境的复杂化以及国家、社会安全施工意识的提高,城市隧道地下工程施工风险分析与控制受到人们的普遍关注和重视。研究城市隧道施工风险,尤其是对通过破碎岩层、穿越密集建筑区、超浅埋、大跨度隧道施工风险进行识别,构建适应于此类复杂工程的风险评估与风险控制模型,进而建立动态风险预警系统,是该研究领域的重点和难点问题。

本书以《城市破碎岩层快速施工与安全控制技术研究》和国家自然科学基金《弱胶结软岩锚喷结构加固机理及其损伤演化研究》等课题为依托,在广泛查阅国内外相关领域研究成果,大量总结类似工程资料的基础上,结合现代工程项目管理理论、现代岩土工程防灾减灾理论、岩土工程数值分析技术等相关知识,采用理论分析、数值模拟与现场监测相结合的方法对城市隧道施工风险识别、风险评估、风险处置以及动态风险预警等问题进行了深入、系统的研究。

本书在编写过程中,得到了胶州湾隧道接线工程指挥部、中铁三局胶州湾隧道接线工程项目部、中铁十九局胶州湾隧道接线工程项目部、西南交通大学接线工程监测项目部、中铁隧道设计研究院、青岛勘察测绘研究院等部门的配合与支持,并提供了大量有价值的工程参考资料;课题组陈炳志博士、秦哲博士在现场监测、数据处理和理论分析方面做了重要工作;同时本书吸收了大量相关论文、著作中的研究成果,作者在此表示最诚挚的感谢。

目前,隧道工程,特别是城市隧道施工风险管理在我国刚刚起步,无论是在理论方面,还是在工程实践方面,都有大量的工作需要研究。本书研究取得的成果为科学、有效地进行城市隧道等复杂地下工程风险分析提供了思路,为类似工程的风险控制提供了可以借鉴的经验。研究成果既具有特定工程的针对性,又具有其他工程的通用性;同时,不可否认,对于城市隧道这类复杂工程的风险管理从定性到定量描述还需要进一步的研究,相关理论需要深化。另外,限于作者水平,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

路漫漫其修远兮,吾将上下而求索!

远,无惧!

索,才是人生不懈奋进的动力!

代春泉

2015年10月于青岛

目 录

— Contents —

第一部分 城市隧道施工风险管理基本理论

第 1 章	城市隧道施工风险概述	2
1.1	引言	3
1.1.1	问题的提出	3
1.1.2	研究意义	5
1.2	国内外研究现状	5
1.2.1	隧道施工力学机理研究现状	6
1.2.2	隧道地下工程风险研究现状	8
1.2.3	隧道工程风险研究存在的问题	13
1.3	本书主要研究内容和要解决的问题	13
1.3.1	主要研究内容	14
1.3.2	要解决的关键问题	15
第 2 章	城市隧道施工风险机理分析	16
2.1	城市隧道施工风险简述	17
2.1.1	城市隧道风险特征	17
2.1.2	城市隧道施工风险内涵	18
2.2	城市隧道施工风险管理系统	19
2.2.1	城市隧道施工风险系统构成	19
2.2.2	风险研究一般流程	19
2.2.3	城市隧道施工风险研究流程	20
2.3	城市隧道施工风险发生机理分析	22
2.3.1	城市隧道施工风险发生原因	22
2.3.2	城市隧道施工风险发生机制	23
第 3 章	城市隧道施工风险研究方法	25
3.1	风险识别	26
3.1.1	风险识别概述	26



3.1.2	风险识别的含义	27
3.1.3	风险识别流程	27
3.1.4	风险识别方法及工具	28
3.2	风险因素辨识	28
3.2.1	风险因素的含义	28
3.2.2	风险因素的分类	29
3.2.3	城市隧道施工风险因素分析流程	29
3.2.4	地层变形风险的主要因素分析	29
3.3	风险接受准则	36
3.3.1	风险接受准则的制定原则	36
3.3.2	风险接受准则的制定方法	36
3.3.3	城市隧道风险接受准则的制定方法	37
3.3.4	常用风险源辨识方法	37
3.4	风险评估	38
3.4.1	风险评估概述	38
3.4.2	常用风险评估方法概述	38
3.4.3	城市隧道施工风险评估的特点	48
3.4.4	城市隧道施工风险评估流程	48
3.5	风险处置	49
3.5.1	风险处置态度	49
3.5.2	风险处置策略	50
3.5.3	风险处置措施	50
3.5.4	风险处置的技术措施	51
3.5.5	风险处置的管理措施	58
3.6	风险预警	59
3.6.1	隧道施工风险动态预警流程	59
3.6.2	动态风险预警原则	60
3.6.3	风险预警主要内容	60

第二部分 胶州湾隧道接线工程施工风险分析与控制实践

第4章	胶州湾隧道接线工程施工重大风险识别	62
4.1	胶州湾隧道接线工程概况	63
4.2	城市隧道施工风险界定	64
4.2.1	风险主体	64
4.2.2	研究阶段	64
4.2.3	研究重点	65
4.2.4	研究特色	65
4.2.5	研究方法	66
4.3	城市隧道工程风险识别	66



4.3.1	专家调查问卷设计	66
4.3.2	问卷发放及回收	67
4.3.3	专家权重	67
4.3.4	专家问卷调查统计分析	68
4.3.5	隧道工程风险二次识别	69
4.3.6	城市隧道施工风险事故分析	70
4.4	城市隧道施工风险清单	72
4.4.1	城市隧道施工风险的关联性	72
4.4.2	城市隧道施工风险主成分分析	72
4.4.3	城市隧道施工最终风险清单	75
第 5 章	胶州湾隧道接线工程施工典型风险源辨识	77
5.1	专家问卷设计与数据处理	78
5.1.1	专家问卷设计	78
5.1.2	专家权重	79
5.1.3	专家问卷调查统计分析	79
5.2	胶州湾隧道接线工程施工地层变形风险因素综合分析	80
5.3	城市隧道施工建筑物变形风险研究	81
5.3.1	城市隧道施工上部建筑结构变形机理分析	81
5.3.2	城市隧道施工上部建筑结构变形风险因素分析	83
5.3.3	城市隧道施工上部建筑结构变形风险因素	85
第 6 章	胶州湾隧道接线工程施工风险接受准则	86
6.1	近接既有建筑施工变形控制标准	87
6.1.1	城市隧道施工变形概述	87
6.1.2	城市隧道施工变形值控制标准的确定原则	87
6.1.3	城市隧道施工变形值控制标准的确定方法	87
6.1.4	隧道施工引起上部建筑结构破坏特征	88
6.1.5	隧道施工引起上部建筑结构破坏控制指标	92
6.2	复杂地质条件下隧道施工变形控制标准	93
6.2.1	隧道施工地面变形控制指标	93
6.2.2	国外隧道施工变形值控制规定	94
6.2.3	我国隧道施工变形值控制规定	95
6.3	胶州湾隧道接线工程施工地层变形分析	96
6.3.1	隧道开挖引起的地面沉降数值模拟分析	96
6.3.2	隧道开挖引起的地面沉降的经验公式	101
6.3.3	地面长期沉降	104
6.3.4	预测公式验证	104
6.3.5	施工影响距离分析	105
6.3.6	隧道开挖对上部建筑结构的内力及变形影响研究	109
6.3.7	胶州湾隧道接线工程施工变形控制标准	113

6.4	胶州湾隧道接线工程施工风险评价标准	117
6.4.1	城市隧道施工风险概率与风险损失等级划分	117
6.4.2	城市隧道施工风险等级划分	118
6.4.3	胶州湾隧道接线工程施工风险接受准则	118
第7章	胶州湾隧道接线工程施工风险评估	119
7.1	风险因素的时空特征分析	120
7.1.1	城市隧道施工风险的时间效用	120
7.1.2	城市隧道施工风险排序动态分析	121
7.2	城市隧道施工风险评估模型	123
7.2.1	层次分析法评价指标权重分析	123
7.2.2	城市隧道施工模糊综合评估模型	125
7.2.3	城市隧道施工风险评估模型分析	132
7.3	胶州湾隧道接线工程——四川路主隧道施工风险评估	132
7.3.1	工程概况	132
7.3.2	四川路主隧道普通段风险评估与控制	134
7.3.3	四川路主隧道近接青岛市第五人民医院大楼施工风险评估与控制	144
7.3.4	四川路主隧道下穿青岛某部队营房施工风险评估与控制	147
7.3.5	四川路主隧道近接海丰宿舍楼风险评估	150
7.3.6	四川路主隧道近接轮渡宿舍楼风险评估 (YK1+370~YK1+390)	153
7.4	云南路穿越高层段施工风险评估分析	156
7.4.1	工程概况	156
7.4.2	云南路主隧道侧穿高层建筑	157
7.4.3	胶州湾隧道青岛端接线工程施工风险等级	161
第8章	胶州湾隧道风险控制技术研究	162
8.1	四川路主隧道施工风险处置	163
8.1.1	注浆加固围岩	163
8.1.2	施工方案优化	164
8.1.3	荷载状态的改变	167
8.1.4	外部因素的改变	168
8.1.5	四川路主隧道入口段施工风险再评估	168
8.2	云南路穿越高层段隧道施工风险处置	169
8.2.1	上部建筑与隧道施工相互影响分析	169
8.2.2	云南路出口段风险处置措施	172
第9章	施工安全监测与风险预警	174
9.1	胶州湾隧道接线工程施工安全监测	175
9.1.1	监测要求	175
9.1.2	监控量测方法	176
9.2	基于模糊控制的风险预警模型	178
9.2.1	模糊预警判断标准	178



9.2.2	模糊预警模型	179
9.2.3	模糊预警反馈分析	180
9.3	胶州湾隧道模糊预警分析	181
9.3.1	四川路主隧道施工风险预警分析	182
9.3.2	云南路主隧道施工风险预警分析	184
第 10 章	城市隧道施工风险突变研究	185
10.1	突变理论概述	186
10.1.1	突变理论数学基础	186
10.1.2	初等突变	187
10.1.3	尖点突变分析	187
10.2	风险灰色突变分析	187
10.2.1	灰色突变理论概述	187
10.2.2	灰色突变模型	188
10.3	城市隧道施工失稳突变实例分析	192
 第三部分 青岛地铁隧道施工风险管理 		
第 11 章	青岛地铁车站施工稳定性分析	196
11.1	青岛地铁中山公园站工程概况	197
11.1.1	工程位置及周边环境	197
11.1.2	工程概况	198
11.1.3	工程地质概况	199
11.1.4	工程特点和难点	200
11.2	青岛地铁中山公园站施工稳定性分析	200
11.2.1	施工现场状况	201
11.2.2	力学模型	201
11.2.3	模型反演优化	202
11.2.4	车站开挖分析	205
11.3	青岛地铁中山公园站支撑拆除稳定性分析	207
11.3.1	拆除分析	207
11.3.2	预应力锚杆加固	209
11.3.3	锚索加固	209
第 12 章	青岛地铁中山公园站施工风险管理	211
12.1	风险指标的建立	212
12.1.1	现场调研	212
12.1.2	相关研究成果调研	212
12.2	中山公园站风险指标结构	213
12.2.1	确定层次结构	213
12.2.2	评价指标结构优化	213



12.2.3	确定指标体系总体框架	214
12.2.4	中山公园站风险指标体系	214
12.3	中山公园站风险评估	215
12.3.1	风险评价标准	215
12.3.2	施工风险评估	216
参考文献		225
附表与附图		234



第一部分

城市隧道施工风险管理基本理论

- ➔ 第 1 章 城市隧道施工风险概述
- ➔ 第 2 章 城市隧道施工风险机理分析
- ➔ 第 3 章 城市隧道施工风险研究方法



第 1 章 城市隧道施工风险概述

- 1.1 引言
- 1.2 国内外研究现状
- 1.3 本书主要研究内容和要解决的问题



1.1 引言

1.1.1 问题的提出

随着我国经济社会的快速发展和城市化进程的不断加快,越来越多的人口涌向城市。人口向城市聚集在促进经济发展的同时,也带来了众多的负面效应,如人口密度增加、城市规模扩大、基础设施疲软、交通拥堵等,已成为各大城市的发展瓶颈。因此,发展快速交通是城市集约发展的要求。加强交通等基础设施建设的要求与城市市区可供利用的土地资源紧缺之间的矛盾,使地下空间的开发利用成为扩大城市容量与功能的有效途径。近年来,世界各国大力开发城市地下空间,兴建地下人防、地下停车场、地下商场、地下交通线路等工程。国际上提出“21世纪为人类开发利用地下空间的年代”^[1],岛国日本更是提出了“充分利用地下空间,把国土面积扩大数倍”的设想。“十一五”期间我国兴建了大量城市地下交通线路,目前,北京、上海、广州、南京、青岛、杭州等23座城市正在建设或规划城市地铁等城市交通项目,至2015年规划线路总长度2400km,总投资达7000亿元人民币^[2-3]。同时,随着厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾隧道的顺利贯通,大连—烟台跨渤海湾海底隧道,上海—宁波杭州湾海底隧道,连接香港、澳门的伶仃洋跨海工程,广东—海南的琼州湾工程以及胶州湾第二隧道均在规划建设中。目前,我国已成为世界上隧道工程建设总里程最长、发展最快的国家。

与一般工程结构相比,隧道工程具有高度多维不确定性,这些不确定性影响隧道工程建设的各个环节,引发工程建设中地层变形过大、沉陷、坍塌、涌水和流砂等多种恶性工程事故。近年来,较为典型的隧道工程事故如图1-1~图1-7所示。城市隧道工程因跨度大、埋深浅、地质条件复杂、地下管网密布、地面建筑密集等特点,施工难度更大。近十年来,国内外城市隧道工程建设中发生的重大事故如表1-1所示^[4-6]。



图1-1 深圳地铁隧道工程事故



图1-2 北京地铁隧道工程事故



图1-3 上海地铁隧道工程事故



图 1-4 新加坡地铁隧道工程事故



图 1-5 广州地铁隧道工程事故



图 1-6 南京地铁隧道工程事故



图 1-7 台湾地铁隧道工程事故

表 1-1 近十年来国内外城市隧道工程事故

编 号	年 份	事 故	损失(美元)
1	1994	德国慕尼黑地铁隧道施工坍塌	400 万
2	1994	中国台湾台北地铁隧道施工坍塌	1 200 万
3	1995	美国洛杉矶地铁隧道施工坍塌	900 万
4	1995	中国台湾台北地铁隧道施工坍塌	2 900 万
5	1999	英国 Hull Yorkshire 隧道施工坍塌	5 500 万
6	2000	韩国大丘地铁隧道施工坍塌	2 400 万
7	2002	中国台湾高速铁路隧道施工坍塌	3 100 万
8	2003	上海地铁 4 号线隧道施工涌水, 引起地面大面积沉降	不详
9	2004	上海轨道交通 9 号线隧道破裂进水, 引起地面塌陷	不详
10	2005	广州地铁 3 号线发生地面严重塌陷、地下泥水冒出工程事故	不详
11	2007	北京苏州街地铁 10 号线工程发生塌方事故	不详
12	2008	广州地铁 5 号线发生涌水塌方事故	不详
13	2008	杭州风情大道地铁施工工地发生大面积塌陷事故	不详
14	2009	深圳地铁 1 号线续建工程出现沉降塌方工程事故	不详
15	2009	西安地铁 1 号线施工沟槽开挖支护不及时导致塌方	不详
16	2010	北京地铁 15 号线施工支撑脱落	不详
17	2011	大连地铁交通大学施工段因地下暗流冲走部分泥土出现大面积塌方	不详
18	2012	上海地铁施工某停车场在施工中发生坍塌	不详
19	2013	南宁地铁工地的污水管线迁改施工中发生塌方	不详

综合分析上述城市隧道工程事故, 主要原因有以下几点。

(1) 对隧道近接施工处理不当。城市近接隧道施工稳定性受上部建筑物及地面活动的



影响,如果对邻近建筑物及地面活动处理不当,容易导致工程失稳乃至灾难性事故的发生。

(2) 对围岩类别统计不全。隧道工程开工前,工程地质勘查不可能对施工场区内的土层状况完全了解,如因土层的变异性,潜在的地质破碎带等不良地质状况导致的透水、涌水、坍塌等都可能引发工程事故。

(3) 对施工过程中致险因子考虑不足或处置不当。例如,施工过程中突降罕见的暴雨或者输水管道破裂,从而引起上覆土体强度劣化,导致变形加大,引发工程事故。

(4) 对地面动荷载的处理不当。城市隧道施工地面活动多而复杂,产生的冲击应力对浅埋大跨隧道施工安全影响较大。

综上所述,城市地下隧道工程地上建筑密集,地下管线密布,地质条件复杂,围岩环境多变,施工变形控制严格,无论从工程设计角度还是从现场施工管理角度来看,都存在很大的风险。如何处理潜在的风险因素,如何减少或规避风险,是该类工程建设值得研究的关键问题。本书正是紧跟国际地下空间发展的前沿,围绕亟待解决的关键问题,突出研究的区域性,探讨模型的通用性,以《城市隧道施工风险分析与控制技术研究》为题,系统研究青岛胶州湾隧道青岛端接线工程、青岛地铁施工过程以及济南拟建地铁工程等典型城市隧道工程施工过程中的各风险管理环节,提出具有针对性的、科学合理的施工风险处置预案和具有通用性价值的理论体系。

1.1.2 研究意义

地下工程项目风险管理研究在我国起步较晚,目前在这方面理论研究较多,应用研究较少。而传统的风险管理,分散、鼓励的研究方法很难适应城市隧道施工风险这样的复杂系统风险分析。在实际生产过程中,技术人员缺乏风险意识,对工程施工过程中存在的风险识别以及风险处置等缺乏系统观念,加之现代大型项目风险的多层次性、非线性以及非可逆性等^[7-12]使得这类工程风险管理难度更大,无从下手。在当前情况下,研究适用于城市地下工程建设的风险分析、评估和管理的理论和方法已迫在眉睫。在此背景下,选择城市隧道施工风险分析与控制技术研究为题,具有重要的理论价值和重大的现实意义。

(1) 调研分析城市浅埋暗挖大跨隧道施工风险源,深层次挖掘潜在的诱因因素,并对其进行分类和评估,重点研究高频风险导致的工程失稳规律,并给出控制措施,保障施工安全。

(2) 分析城市隧道工程施工风险因素,研究避险措施,及时规避或弱化风险,用最经济的方法处理风险。

(3) 研究城市隧道施工风险接受准则,提炼出具有针对性的标准和通用性的模型,为城市大跨隧道施工风险分配、风险承担提供决策依据。

(4) 结合工程实践经验和监测数据反演相应模型及参数,为信息化施工规范的设计和相关法律法规制度的制定提供理论支撑和实践支持。

1.2 国内外研究现状

城市隧道工程施工风险是“隧道—地层—上部结构”“设计—施工—管理”等多方面



综合作用的结果,风险管理理论自 20 世纪 70 年代引入地下工程领域,国内外专家结合具体工程项目对地下工程风险进行了深入探究,包括地下工程风险识别、风险评估、风险处置、风险预警等方面,取得了大量可供借鉴的研究成果。城市隧道施工风险分析涉及隧道施工力学响应机理和隧道施工风险分析两方面的内容,本节将就这两方面国内外研究现状展开论述。

1.2.1 隧道施工力学机理研究现状

城市隧道工程施工力学响应涉及“隧道—地层—上部结构”共同作用,随着隧道工程的大规模建设,隧道施工力学问题研究得到极大关注并获得大量卓有成效的成果。国内外学者在现场监测分析、室内模型试验、数值模拟以及模型分析等方面做了大量的工作,主要研究成果介绍如下。

1. 理论研究

隧道工程,尤其是城市隧道工程,处于复杂的施工环境中,有着不确定的边界条件,其荷载分布也无法准确描述。目前,隧道力学分析理论多是根据提出一系列假设条件而给出的,其解答很难与实际工程相一致。

Burland^[13-16]采用弹性简支梁模型分析了隧道支护结构变形的分布规律,并计算出隧道在纯弯曲和纯剪切时的偏斜率和最大拉应变值。

$$\frac{\Delta}{L} = \left(\frac{L}{\Delta \times t} + \frac{3I}{2tLH} \frac{E}{G} \right) \varepsilon_{b\max} \text{ 和 } \frac{\Delta}{L} = \left(1 + \frac{HL^2}{18I} \frac{E}{G} \right) \varepsilon_{d\max} \quad (1-1)$$

Netzel^[17]研究认为,传统的结构拉应变破坏准则没有考虑剪应变沿纵向的变化,计算值偏大,并进行了公式修正。

Muir^[18]和 Carter^[19]、Sagasta^[20]和 Verruit^[21]、徐永福^[22]分析了盾构施工支护结构受力分布规律,并提出了计算衬砌内力的简化方法。

Attewell^[23]、Chen^[24]根据现场观测,总结出 68 个隧道内力分布规律,根据弹性地基梁模型推导出隧道施工管线位移与应力分布的计算公式,并进行了数值分析验证。

Peck^[25]提出了地层损失的概念,认为隧道开挖地表沉降槽的体积与地层损失的体积相等,并提出了一系列假设,认为隧道开挖地面沉降分布近似为正态分布,给出了地面沉降的计算公式:

$$W_x = W_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1-2)$$

式中: W_x ——距隧道中线 x 处的地面沉降量 (mm);

$W_{\max}$ ——隧道中心线处的地面沉降量 (mm);

x ——距隧道中线的距离 (m);

i ——沉降槽宽度系数,即沉降曲线反弯点的横坐标 (m)。

刘建航等^[26]根据大量的现场监测分析,总结了隧道施工地面沉降分布规律,提出了“负地层损失”的概念,并推导了隧道施工地面纵向沉降的计算表达式。

关保树^[27]根据北京复兴门折返线工程实地量测结果得到了地层下沉曲线。



2. 现场监测分析

在保证城市隧道及地铁等工程顺利施工的同时,为了保证周围既有建筑设施的安全,作为新奥法施工过程中重要组成部分的施工监测被普遍应用到施工过程中,在众多监测项目中,地表沉降监测被看作城市隧道施工变形监测的重中之重。国内一大批科研院所、高校学者对隧道施工过程中地表沉降、建筑结构变形以及围岩变形进行监测分析,取得了大量的现场数据,主要研究成果如下。

刘宝琛等^[28]也进行了大量现场测试,对隧道施工 CRD 法中隔墙控制地面沉降效果、中隔墙拆除工艺进行了系统研究。

李毕华等^[29]根据小净距隧道现场实测,分析了在实施不同开挖方案的情况下,隧道表面变形与地面变形分布特征,并总结了不同施工方案下隧道施工变形的经验公式。

另外,刁天祥^[30]、吴波^[31]、王刚^[32]、曾超^[33]、张顶立^[34]等分别从不同角度研究了不同地质条件下隧道施工变形问题。

3. 数值模拟分析

计算机技术的发展,给人类带来了革命性的变化,基于计算机的数值模拟技术有着其他方法无法比拟的优点^[35-40]:①可以构建形状复杂、边界复杂和荷载复杂的模型;②可以进行非均质、非连续、各向异性的模拟;③可以应用弹性、弹塑、粘弹等多种本构方程;④可以模拟岩土体中存在的重力场、渗流场和热力场,考虑多场的耦合作用;⑤可以相对直观地对隧道的动态分步开挖过程进行模拟研究;⑥可以经济、快捷地得出结论,克服实际试验不可逆性的缺陷。

当前较流行的数值模拟计算方法主要有:有限单元法(FEM)、有限差分法(FDM)、边界单元法(BEM)、离散单元法(DEM)、非连续变形法(DDA)等。其中有限单元法自20世纪50年代提出,发展至今已经相当成熟,是目前应用最广泛的一种数值方法,可以用来求解弹性、弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等问题,是地下工程应力应变分析最常用的方法。但有限单元法在本质上是一种连续介质的数值分析方法,对于分析岩体洞室在模拟岩体中存在的断层、节理、裂隙等非连续结构面时,存在一定困难。有限差分法就是把微分用有限差分代替,把导数用有限差商代替,从而把基本方程和边界条件近似的改用差分方程来表示,把求解微分方程的问题转换成为求解代数方程的问题。边界单元法将偏微分方程变换成求解对象边界上的积分方程式并将其离散化求解。由于变换成边界上的方程式使问题比解析对象降低了一维,对于一般的线性问题只需进行区域边界的单元分割,所以与有限单元法相比,具有计算时间短、适用范围广等特点,但边界单元法对奇异边界较难处理。离散单元法首先由 Cundall 提出,其基本思想是岩块之间的相互作用同时受表征“位移—力”的物理方程和反映“力—加速度”的运动方程的支配,通过迭代求解显示岩体的动态破坏过程。它的一个突出功能是在反映岩块之间接触面的滑移、分离与倾翻等大位移的同时,又能计算岩块内部的变形与应力分布。并且,它利用显式时间差分法(动态松弛法)求解动力平衡方程,求解非线性大位移与动力稳定问题较为容易。该法主要用于分析节理岩体及其与锚杆(索)的相互作用。离散单元法存在的主要问题是阻尼系数的选取和迭代计算的收敛性。非连续变形法是由石根华与 Goodman 提出的,该法能较好地模拟具有非连续面岩体的运动与变形特性。

近几年,有关城市地下工程施工的数值模拟分析的主要成果有以下几个方面。