

姚爱军 滕延京
衡朝阳 曹伍富 著

地铁隧道施工邻域灾变 评估理论与实践



科学出版社

地铁隧道施工邻域灾变 评估理论与实践

姚爱军 滕延京 衡朝阳 曹伍富 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面阐述了地铁隧道施工邻域灾变评估理论及工程实例,主要内容包
括:地铁隧道施工邻域灾变基本特征、地铁隧道施工邻域灾变预测评价
基本方法、地铁隧道施工邻域地表沉降预计方法的改进、地铁隧道施工邻域
灾变控制的工程措施、地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全性评估基本程序、
地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全控制标准研究等。在此基础上,本书选
取了三个代表性工程实例,即地铁隧道施工邻域高层建筑物、多层建筑物和
老旧民居群(低层建筑物),分别介绍了其安全性评估方法及其程序。

本书可供城市地下铁道工程、地下建筑工程、采矿工程、水利水电工程
等领域的广大科技人员及高等学校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地铁隧道施工邻域灾变评估理论与实践/姚爱军等著. —北京:科学出版
社,2016. 11

ISBN 978-7-03-050433-3

I. ①地… II. ①姚… III. ①地铁隧道-隧道施工-工程施工
IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257598 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:300 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

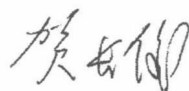
序

进入 21 世纪,我国城市地铁建设已进入快速发展阶段。地铁由于具有占地空间少、运输能力大、运行速度快、环境污染小、乘坐安全舒适等特点,已经成为人们最理想、最便捷的交通工具,是现代化大城市重点建设的工程项目之一。据统计,截至 2015 年,中国已有 25 座城市拥有了地铁,预计到 2020 年将有 45 座以上城市建成或筹建地铁,城市轨道交通网络将密布城市中心区,给人们的出行带来极大便捷。

回想当年,1969 年中国建成第一条地铁工程——北京地铁 1 号线,老一辈地铁人付出了艰辛的劳动,用汗水和智慧筑造了中国首条城市地下铁路,给人们带来了梦幻般的地下宫殿体验和便捷的交通享受。时至今日,新一代的地铁建设者不辞辛苦,努力工作,克服了众多的技术难题与施工困难,开创了我国城市轨道交通迅猛发展的新时代。

城市地铁建设中,地铁隧道施工将会对周边环境产生一定损伤,若控制不当将造成人员伤亡或重大财产损失。因此,近年来人们十分重视开展地铁隧道施工邻域灾变评价理论与安全性评估方法研究。姚爱军教授及其科研团队自 2006 年起就以北京地铁 10 号线、9 号线等相关线路为主要依托,在地铁隧道施工邻域灾变评估方面开展了深入细致的研究工作,参加了多项地铁穿越建(构)筑物的安全性评估工作。2008 年受邀参加其科研团队的课题评审工作,对其科研成果有了较深入的了解,并对其研究进程进行了关注。在随后的 8 年研究中,该团队做了大量的调查研究并参与了工程实践工作,通过数据统计分析、数值模拟和工程实例研究,积累了丰富的工程资料,这些逐渐形成了该书的主要内容和成果。该书在地铁隧道施工邻域灾变预测评价基本方法、地铁隧道施工邻域地表沉降预测方法的改进、地铁隧道施工邻域灾变控制的工程措施、地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全性评估基本程序和安全控制标准等方面进行了十分有益的探索,提出了科学适用的控制指标和方法,体现了较高的学术价值,为城市地铁工程规划、隧道施工、建(构)筑物现状检测、安全性评估、监控量测等领域的科技人员提供了良好参考和应用范例。

令人欣喜的是,该书作者以及广大的年轻的地下工程科技人员面对我国不同地域复杂的工程地质条件,克服了重重困难,并不断探索新技术和新方法,其心可嘉,十分难得。我相信该书的出版对于优化地铁隧道设计和施工方案,减少工程灾害,保护周边环境,提升灾害防御能力具有重要的意义。



2016年2月16日

前 言

城市地铁隧道施工是一个典型的卸荷力学过程,会引发邻域岩土体产生复杂的应力场、位移场变化,其演化规律受水文地质条件、工程地质条件、施工工法、施工技术制约,当地质条件和施工环境较为复杂时可能会造成严重的工程灾害。作者从事该领域的研究已有十年之久,参加的工程项目越多,越是感觉地下工程之复杂。单就地铁隧道施工引发邻域灾变机理来说,对不同地域、不同地质条件,可谓千差万别,需要人们针对地铁隧道施工邻域灾变特征、评估方法、控制措施等进行系统的研究。作者虽然承担和参与了一些科研课题和工程项目的研发,在该领域进行了初步探索,并取得了一些成果,但仍然感到工程资料的缺乏和不足。因此,作者撰写此书的目的就是通过分享作者及其科研团队的部分成果,期许对地铁隧道施工邻域灾变评估工作和该领域的学术研究有一定的参考价值。

本书的研究内容是作者近十年来完成的相关研究项目的归纳和总结。资助本书的主要研究项目包括:建设部研究开发项目“地铁隧道施工对周边建(构)筑物影响与灾害防治关键技术研究”(编号:2007-k6-4),建设部专题项目“地铁施工过程中地基沉降变形对环境影响研究”(编号:防灾应急 20(2008)),北京市教育委员会科技计划面上项目(2009)“多层互层地层中地铁隧道施工引发地表损伤规律研究”(编号:KM200910005012),高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目“地铁隧道暗挖施工引发覆土中无压管道灾变机理研究”(编号:20121103110022),以及住房和城乡建设部课题“地铁隧道下穿建筑物诱发变形及灾害防治技术”(编号:2013-K3-22)等。

全书共 10 章,其中第 1 章阐述城市地铁建设与工程灾害的关系,以及地铁隧道施工邻域灾变评价与控制领域的研究现状;第 2 章从地铁隧道施工邻域灾变基本特征研究入手,分析隧道施工的影响域和隧道施工邻域灾变作用对象、邻域灾变形式及隧道施工引发邻域灾变的影响因素等,它是后续章节的基础;第 3 章论述地铁隧道施工邻域灾变预测评价基本方法,结合工程实例重点研究隧道施工引发邻域灾变数值模拟的技术要点、相似材料物理模拟的方法,并总结隧道施工影响域的变形规律;第 4 章依据数理统计的方法提出改进的地铁隧道施工邻域地表沉降预计方法,即改进的 Peck 公式;第 5 章分别针对致灾源、致灾途径、致灾对象、评估与监测等阐述地铁隧道施工邻域灾变控制的主要工程措施;第 6 章系统地提出地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全性评估基本程序与要点,它是本书的核心内容,而各阶段的评估方法均体现在其他章节中;第 7 章归纳总结地铁隧道施工邻域建(构)

筑物安全控制标准,以及建(构)筑物变形控制要点和原则;第8~10章则分别针对高层建筑物、多层建筑物、老旧民居群(低层建筑物)的特点,介绍其评估方法与步骤,是本书研究成果的具体应用,为安全性评估提供了经验。

在本书的撰写过程中,项目组的其他研究人员毛利勤、周智、孙曦源、向瑞德、赵强、刘方元、管江、房师军、史高平、杨学嘉、张新东、雷刚等在资料收集、模型试验、数值计算等方面付出了辛勤劳动,在此表示感谢。

地铁隧道施工邻域灾变类型纷繁复杂,影响因素众多,地质条件各异,本书研究的内容有一定局限性,且鉴于作者的知识水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者不吝赐教。

作 者

2016年2月2日于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 城市地铁建设与工程灾变	1
1.2 地铁隧道施工邻域灾变研究现状综述	3
1.2.1 地铁隧道施工引发地表沉降估算理论与方法研究	3
1.2.2 地铁隧道施工邻域灾变的控制标准的研究	7
1.2.3 地铁隧道施工邻域安全性评估方法研究	12
1.3 地铁隧道施工邻域灾变研究关键问题	13
第 2 章 地铁隧道施工邻域灾变基本特征	15
2.1 地铁隧道施工工法与影响域	15
2.1.1 地铁隧道施工工法	15
2.1.2 地铁隧道施工影响域	21
2.2 地铁隧道施工邻域灾变作用对象	24
2.2.1 地面建筑物	24
2.2.2 地下建筑物	25
2.2.3 城市道路、铁路与桥梁	25
2.2.4 地下管线	27
2.2.5 河湖水域	28
2.3 地铁隧道施工邻域灾变形式	28
2.4 地铁隧道施工引发邻域灾变的影响因素	29
第 3 章 地铁隧道施工邻域灾变预测评价基本方法	31
3.1 灾变预测评价方法概述	31
3.2 地铁隧道施工邻域地表(地基)形变数值模拟分析	32
3.2.1 隧道施工邻域灾变数值模拟初步及关键技术	32
3.2.2 地铁隧道施工引发邻域灾变影响因素数值模拟	54
3.3 地铁隧道施工邻域上覆地层灾变相似材料模型试验	89
3.3.1 相似理论	89
3.3.2 隧道原型与工程地质条件	93
3.3.3 试验方案与相似系数确定	94

3.3.4 试验装置与测试系统	98
3.3.5 试验成果分析	99
第4章 地铁隧道施工邻域地表沉降预计方法的改进	104
4.1 分析方法与问题	104
4.2 实测数据回归分析	105
4.2.1 回归分析方法	105
4.2.2 拟合曲线与 Peck 曲线对比	107
4.3 Peck 公式的改进	113
4.3.1 Peck 公式改进形式	113
4.3.2 参数 α, β 统计规律	118
4.4 工程实例验证	121
第5章 地铁隧道施工邻域灾变控制的工程措施	124
5.1 概述	124
5.2 地铁隧道施工工法优化控制	125
5.2.1 浅埋暗挖法的优化控制措施	125
5.2.2 盾构法的优化控制措施	126
5.3 地铁隧道邻域地层加固控制	128
5.3.1 工程隔断法	128
5.3.2 地层(地基)注浆加固法	137
5.3.3 不同加固方法的效果比较	140
5.4 邻近建(构)筑物加固控制	141
5.4.1 结构自身加固	141
5.4.2 基础托换	142
5.5 工前安全性评估与施工监控量测	142
5.5.1 工前安全性评估	143
5.5.2 施工监控量测	143
5.6 工程实例——控制措施的效果分析	144
5.6.1 实例1——南小街8号楼	144
5.6.2 实例2——北小街8号楼	148
第6章 地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全性评估基本程序	153
6.1 概述	153
6.2 地铁隧道施工邻域建(构)筑物现状调查	154
6.2.1 基本情况调查	154
6.2.2 建筑结构详细情况调查	155
6.2.3 隧道施工邻域岩土环境条件	156

6.2.4 建(构)筑物既有变形	156
6.3 地铁隧道施工邻域建(构)筑物附加变形控制值确定	157
6.4 地铁隧道施工邻域建(构)筑物附加变形预测	158
第7章 地铁隧道施工邻域建(构)筑物安全控制标准	160
7.1 隧道施工影响域内地表变形安全控制标准	160
7.2 建筑地基基础变形控制标准	161
7.3 公路铁路变形安全控制标准	162
7.4 地下管线变形安全控制标准	164
7.5 隧道施工邻域建(构)筑物安全控制标准确定原则	169
第8章 地铁隧道侧穿高层酒店大楼安全性评估	171
8.1 工程概况	171
8.1.1 建筑物与隧道概况	171
8.1.2 岩土工程条件	171
8.2 酒店大楼的现状调查	176
8.2.1 仪器设备	176
8.2.2 建筑物外观调查检测	176
8.2.3 建筑物结构现状检测	182
8.2.4 建筑物沉降变形现状调查与测量	183
8.3 隧道侧穿酒店大楼诱发地基变形预测	186
8.3.1 模型构建与基本假定	186
8.3.2 计算步骤	189
8.3.3 计算结果分析	190
8.4 酒店大楼安全性评估结论与对策	194
8.4.1 地基变形允许值	194
8.4.2 变形控制值与综合评估	195
第9章 地铁隧道下穿长途客运站安全性评估	196
9.1 工程概况	196
9.1.1 隧道结构与建筑物特征	196
9.1.2 研究区工程地质条件	197
9.2 长途客运站的现状调查与评价	201
9.2.1 建筑物外观现状	201
9.2.2 结构内部探测	202
9.2.3 建筑物现状测量	203
9.3 隧道下穿长途客运站诱发地基变形预测	208
9.3.1 计算模型建立	209

9.3.2 数据对比分析	209
9.3.3 现场监测与对比	212
9.3.4 数值计算综合结论	213
9.4 长途客运站安全性评估结论与对策	214
9.4.1 建筑物的地基基础变形允许值确定	214
9.4.2 控制标准确定	214
9.4.3 评估结论与对策	215
第10章 地铁8号线下穿老旧民居安全性评估	216
10.1 工程概况	216
10.1.1 隧道与地面建筑物	216
10.1.2 工程地质条件	217
10.2 老旧民居的现状调查与评估	220
10.2.1 地面建筑群概况	220
10.2.2 建筑物外观现状检查	221
10.2.3 地基基础沉降与倾斜现状	228
10.2.4 什南区间沿线建筑物结构体系评价	228
10.3 隧道下穿老旧民居的地基变形预测	229
10.4 安全性评估结论与对策	230
10.4.1 地基变形允许值	230
10.4.2 附加变形的控制标准	230
10.4.3 综合评估建议	230
参考文献	231

第 1 章 绪 论

进入 21 世纪,中国的大城市均在大力发展城市轨道交通,特别是地铁,由于其不受地面道路情况的影响,能够按照设计标准,快速、安全、舒适地运送乘客,具备运行效率高、无污染、大运量等特点,从而成为解决大城市交通拥堵的有效途径,是大城市发展绿色交通的首选模式。但是,城市地铁建设也随之带来对周边环境的影响和灾变。

1.1 城市地铁建设与工程灾变

城市地铁的建设初期是较为缓慢的,单条地铁工程的建设周期也较长。20 世纪末期,随着大城市的不断涌现,以及特大城市人口的过度集中,城市交通几近陷入困境,发展城市轨道交通成为解决城市交通问题的重要措施。世界上第一条地下铁道是 1863 年 1 月建成的位于英国伦敦的大都会地铁,其干线长度约 6.5km。进入 20 世纪后,各国地铁建设进入高潮时期。目前,全世界已有 100 多座城市开通了地铁,总长度超过 7000km。中国第一条地铁是北京地铁 1 号线,于 1965 年 7 月 1 日在北京西郊玉泉路开工,1969 年 10 月 1 日完工通车,全长 23.6km,共设 17 个车站,是中国地铁之首。截至 2014 年,北京市轨道交通运营线路 17 条,运营里程 465km,正在施工线路共 12 条(段),线路全长约 198.4km。到 2015 年北京市的地铁通车总里程达到 561km,位居全世界各大城市首位。据《北京市城市轨道交通近期建设规划(2013—2020 年)》可知,届时北京轨道交通线网运营线路将达 30 余条,运营里程达 1000km。同时,2000 年以来,我国其他各大城市的地铁建设突飞猛进。今天的中国已是世界上隧道及地下工程规模最大、数量最多、地质条件与结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家,技术水平与建设成就已走在世界前列(王梦恕等,2010)。修建地铁已是各大城市基础建设的必要内容,是现代化大都市的标志,中国城市地铁建设已经进入大发展的黄金时期。

城市地铁建设为人们带来舒适快捷的交通便利与巨大的经济效益,同时地铁建设也会对其邻域造成地质环境损伤,甚至发生灾变。事实上,任何地下工程的开挖与掘进,都是卸荷的力学过程,必然在周围岩土体产生应力场和位移场的变化,若控制不力,则会在邻域发生地面沉降、坍塌等灾变。地铁车站施工如此,区间隧道施工也如此。另外,对于已建成的地下空间结构,若有邻域建(构)筑物的施工,如基坑、竖井开挖,桩基施工等,也会对既有地下空间结构产生影响,如图 1-1 所

示。这是两对矛盾体,在当前的城市地铁施工中都表现得特别突出。本书着重针对第一个矛盾体开展详细研究工作,即地铁隧道施工对邻域建(构)筑物的影响及其控制对策。

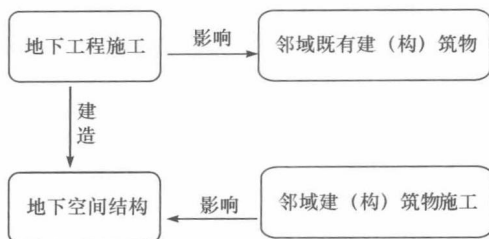


图 1-1 地下工程与邻域建(构)筑物关系

在城市地铁建设中,由于地铁隧道施工难度巨大,影响因素众多,隧道施工必然会对周边环境造成重大影响。如隧道坍塌造成人员伤亡及重大经济损失,地面沉降过大造成城市道路凹凸不平、塌陷,周边建(构)筑物变形严重造成建(构)筑物开裂甚至倒塌,地下管线变形过大造成煤气泄漏、爆炸及水管爆裂形成水患,电缆断裂造成停电或通信中断等,这些隧道工程施工灾变问题在我国各大城市地铁建设中时有发生。

例如,2003年7月,在上海轨道交通4号线越江隧道施工过程中,因其作业面内有大量的水和流沙涌入,引起隧道部分结构损坏,诱发周边地区地面沉降,导致三栋高层建筑物严重倾斜、黄浦江防汛墙局部坍塌并出现管涌,造成巨大经济损失和不良社会影响。2005年1月,在北京市惠新南里附近,地铁隧道施工引发周边地面沉降,导致住宅内地板砖崩裂,引起办公人员与居民恐慌,造成严重不良社会影响。2005年11月,北京市中轴路熊猫环岛地铁隧道采用明挖法施工时,基坑周边突然出现坍塌,至少400m²范围的基坑塌陷10余米,原因是地铁施工引发周边地层变形,从而引起地下一根直径60cm的管道破裂出现涌水,造成交通堵塞和不良社会影响。2006年1月,在北京市东三环京广桥附近,地铁暗挖施工引起地下污水管道变形破裂、漏水,并导致路面塌陷,形成一个面积达200m²、深约12m的大坑,使污水灌入正下方的地铁10号线工地,导致灾害损失惨重,造成不良社会影响。2006年3月,北京地铁10号线苏州街站东南地表发生塌方事故,塌方区域地上、地下环境条件十分复杂,东侧紧靠居民楼,西北侧紧邻交通干道,北侧有四条电力管线,此次塌方造成了严重人员伤亡和重大财产损失。2007年3月8日,北京东三环国贸桥向北方向桥下东侧辅路发生路面塌陷,塌陷面积约4m²、深度约2m,一辆途经此地的公共汽车车轮陷入;3月9日,该处再次塌陷,同时陷住一辆过路的402路公交车,公共交通再次受阻。2008年1月17日下午3点,广州地铁5号线大西盾构区间2#联络通道在施工中突然涌水发生塌方,造成双桥路旁边花

圃内的地面 100m^2 塌方,事故过程中没有人员伤亡,地面交通局部(入城方向)被迫暂时封闭。2008年11月15日下午14:30左右,浙江省杭州市风情大道地铁1号线施工现场发生坍塌事故,八车道的风情大道塌下去100多米,塌陷宽度20m左右,边上的河水倒灌向塌陷的地铁坑道内,直接造成在此处行驶的11辆汽车下沉陷落,施工人员8人死亡、13人下落不明。2012年11月29日上午10点左右,南京地铁3号线与2号线的换乘站——大行宫站,由于施工地点处于秦淮古河道,富含水和砂,地质条件复杂,与2号线连接处出现涌水、涌沙,导致地面突然塌陷,促使南京一辆31路公交车在行驶到中山东路大行宫十字路口时车头陷入塌陷形成的大坑中。2013年1月28日,因修建广州地铁6号线文化公园站,导致附近地处广州最繁华区域的康王南路突然出现大面积地陷,使得2栋6间商铺塌陷坑内。

由上可见,城市地铁建设经常伴随着对邻域产生重大影响的工程灾害,虽然这些灾害最终得到了控制,并克服了施工困难,但是面对复杂的工程地质和施工条件,人们对于地铁隧道施工引发邻域灾变的机理和规律还不是很清晰,施工风险众多,相似的灾害仍然时有发生,突显出地下铁道工程建设的安全现状与当前形势极不适应。因此,本书针对地铁隧道施工邻域灾变机理、控制措施与安全性评估方法进行了详细研究,对优化地铁隧道工程设计方案、提升地铁隧道安全施工和监测技术、减少地铁隧道施工邻域的工程灾害具有重要意义和广阔的应用前景。

1.2 地铁隧道施工邻域灾变研究现状综述

世界上地铁建设已经有150余年的历史,我国也有40余年的开发经验,因此在地铁隧道施工引起邻域灾变预测理论、方法和评价与控制措施方面的研究已经取得丰硕的成果,但由于我国各地工程地质条件差异性较大、施工条件复杂,相关的地铁隧道施工邻域灾变控制理论和方法、规范、标准等还不满足当前地铁建设的需要,因此有待进一步完善与发展。

1.2.1 地铁隧道施工引发地表沉降估算理论与方法研究

正确估计因地铁隧道施工引发的地面(地层)变形,选择最佳的施工技术,制定一套完善的工程措施以确保隧道施工影响域内建筑物、桥隧与地下管线等重要设施的安全,成为各国学者最为关注的研究课题。纵观地铁隧道施工时地表变形预测的研究方法,可将其分为经验公式、解析法、相似材料模型试验法和数值模拟法等。

首先,在地铁隧道施工引发地表变形预测经验公式方面,最具代表性的就是Peck(1969)系统提出的地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法,即

Peck 公式。Peck 认为,在不排水的情况下,隧道开挖所形成的地表沉降槽的体积应等于地层损失的体积;他总结了大量资料后,提出了地表沉降槽近似呈正态分布的概念,即所谓的 Peck 曲线。在 Peck 的研究基础上,很多外国学者针对不同的情况做了进一步的研究,主要有:Clough 和 Schmidt(1981)提出了饱和含水塑性黏土中的地面沉降槽宽度系数 i ;Attewell(1978,1981)假定沉降槽曲线为正态分布,对沉降槽宽度系数 i 进行了修正,提出了横向沉降槽宽度系数 i 取决于接近地表的地层强度、隧道埋深和隧道半径,并给出了估算地表沉降的新公式;O'Reilly 和 New (1982)整理英国大量的实测值后建议,对于在单一土层中隧道掘进引起的近地表沉陷,主要是 Z_0 的近似线性函数,和隧道施工方法、隧道直径没有关系;Fujiita(1981)分析了日本大量用不同盾构施工得到的观测数据,发现黏土中取 $i = 0.5Z_0$ 和实际结果一致,和施工方法无关。在我国,刘建航等(1990,1991)以上海软土隧道施工实例为背景,提出了“负地层损失”的概念,并修正了预测地表纵向沉降的 Peck 公式;同济大学侯学渊和廖少明(1993)结合上海地区饱和土和盾构施工的特点,提出了考虑时效(即土体扰动后固结)沉降的修正 Peck 公式;阳军生和刘宝琛(2002)针对城市隧道施工引起的地表移动及变形提出了评价方法;刘波和陶龙光(2004,2006)对于地铁双孔平行隧道开挖,基于部分实测沉降数据的 Powell 最优化理论方法,实现了 Peck 法与随机介质法各自的多参数反分析预测,开发出了地铁隧道施工诱发地层环境损伤预测评价与控制设计的 STEAD 系统;韩煊等(2007)在 Mair 公式的基础上,着重讨论了沉降槽宽度参数随地层深度的变化趋势,并提出了修正计算公式;缪林昌等(2008)以矿山法施工为例,推导了隧道施工在新的状态下的土体内部孔隙水压消散的公式,进而考虑土体的固结引起的沉降变形。

由于土层条件的复杂性以及施工状况的多变性,迄今为止还没有完全精确的解析解。现有的解析解均是在简单假定条件下得到的,但不失一般性,可用来定性判断地表沉降的一般规律。例如,Sagaseta(1987)假设土层各向同性和不可压缩,提出了地表三维沉降公式,并进行了推广。Verruijt 和 Booker(1996)采用 Sagaseta 的方法,提出了匀质弹性半空间隧道变形引起的地表变形的解析解,他们给出的结果是对 Sagaseta 解的推广,不仅适用于不可压缩土的情况(泊松比为 0.5),而且适用于泊松比为任意值的情况。Lognathan 和 Poulos(1998)认为:地表位移是由地层损失引起的,但隧道径向位移是不均匀的,其形状近似椭圆形;地层的沉降主要发生在隧道轴线与水平方向夹角为 45° 的范围内,得出了横向地表沉降的解析公式。Bobet(2001)假设地层和衬砌都是完全弹性的,求出了衬砌和地层共同作用下的解析公式,该方法基于弹性假设,对土体的特性没有完全考虑。

在相似材料模型试验研究方面,作为一个重要的科学研究手段,可以十分形象地模拟隧道施工过程并揭示邻域灾变的演化规律。但由于岩土体的重力相似问题,模型试验大多采用离心机模型试验。Litwiniszyn (1957) 基于砂箱模型试验,用大小相同的球体模拟地层进行了模拟试验,其试验结果表明,盾构掘进引起的地表沉降的沉降槽横向分布形式与概率形式相同。Atkinson(1974)以砂和高岭土为介质,以橡皮膜敷于隧道内表面上进行了模拟试验,其试验结果表明,土的破坏面近似朗金主动破坏面,十分接近 Peck 曲线。Mair 等(1983)用有限元和离心模型试验相结合的方法研究了浅埋隧道的地表沉陷规律,指出浅埋隧道的坍塌稳定率随埋深变化,且地表沉降在很大程度上取决于隧道周边的黏土的特性。Kuwahara 等(1999)利用离心模型试验对盾构隧道盾尾空隙引起的地层变形进行了试验研究,分析了盾尾空隙导致地层变形的机理。Nomoto 等(1999)利用离心机试验对干砂中盾构隧道掘进进行了大量的模拟试验,获取了试验过程中的衬砌应力、纵横剖面地面沉降和隧道周围土压力的大量试验数据,提出了基于盾尾空隙厚度和 z/d (隧道埋深与洞径的比值) 等参数的地面沉降经验公式等。近几年,我国在隧道相似材料试验方面也有较大进展。王戌平(2004)对于单拱破碎围岩隧道的构筑问题,设置了 8 个隧道模型,研究了开挖对不同隧道围岩压力分布的影响,揭示了洞周径向压力的松弛范围与洞径、围岩特性、裸露时间的关系;设计了 4 个连拱模型试验,研究了连拱毛洞开挖引起的应力场变化规律,对不同的连拱断面的衬砌受力差异进行了深入的分析,同时对中隔墙的受力特点也进行了探讨,提出了合理的连拱隧道构筑方法及优化断面图。傅德明等(2005)针对大型多功能的先进盾构掘进模拟试验平台进行了研究,介绍了盾构掘进模拟试验平台的主要组成部分、特点以及关键的技术指标。俞涛(2005)针对地铁盾构隧道近接施工,对平行、交叠和正交三种典型的盾构隧道近接情况下,新建隧道对既有隧道的影响规律进行了全面系统的研究。刘光磊等(2008)通过对可液化地层中地铁隧道结构的地震反应进行动力离心模型试验,研究了饱和松砂地基在地震作用下的反应特性、可液化地层中地铁隧道结构的上浮及变形特性和设置截断墙对限制隧道结构上浮的效果等问题。李超(2010)以北京典型地铁区间隧道为例,采用相似材料模型试验研究了无支护隧道开挖过程的地表沉降规律。马险峰等(2012)利用离心模型试验对盾构隧道的地层损失进行了模拟,研究了地层损失与施工期及工后地表沉降的关系;通过量测、分析隧道纵向沉降、纵向应变、隧道周围土压力和超孔隙水压力的变化,研究了隧道的纵向沉降特性。谢雄耀等(2013)针对软土地区重叠盾构隧道施工,采用相似材料模型试验,研究了不同开挖顺序及不同推进速度下既有隧道位移和内力的变化规律。

随着计算机技术的不断发展,针对地层移动和地表沉降的预测,国外学者进行

了大量的数值模拟与仿真实验研究,其主要方法有有限元法、离散元法、边界元法、半解析元法等。有限元法又分线弹性、非线性弹性、弹塑性、黏弹性、黏弹塑性等几种。Ito 和 Hisatake(1982)用三维常量边界元法分析了均质线弹性地层中的浅埋隧道在开挖面瞬间到达某一位置且隧道周边应力完全释放时,隧道轴线上方地表变形的问题。Finno 和 Clough(1985)用有限元法模拟了隧道施工工艺水平对地层位移的影响,该施工工艺水平用一个由经验确定的参数表示。该方法的一个最大特点是能够直接确定出由工作面压力引起的扰动带范围以及模拟这部分土层的后续固结沉降。Lee 和 Rowe(1990)开发了一种三维弹塑性有限元分析技术,模拟了软黏土中盾构掘进和掘进过程导致的地层损失,给出了非线性问题的求解步骤和适用于三维隧道分析的弹塑性土体本构模型。对无衬砌(允许土体塑性变形完全发展)和完全衬砌(开挖面处应力释放是土体移动的唯一来源)浅隧道这两种极限状况下隧道周围土体不排水情况下的应力场和位移场进行了有限元计算。进而, Lee 和 Rowe(1990)假定土体具有弹性-完全塑性的关系,用三维弹塑性有限元分析了加拿大安大略省的桑德贝隧道,引入总间隙参数,分析了隧道开挖面推进和隧道施工引起的地层损失,他们认为利用各向同性弹性-理想塑性土体本构模型计算得到的地面沉降槽宽度比实测数据宽得多,而利用各向异性弹性本构模型可以很好地改善预测结果。Simpson 等(1996)针对伦敦西斯罗机场试验隧道进行了有限元分析,通过对线弹性-横向各向异性模型与非线性-各向同性模型的比较发现,对于超固结土,土的各向异性模型能够给出较好的结果。Melis 等(2002)提出了一个基于有限差分软件 FLAC3D 模拟盾构开挖过程的数值模型,该模型考虑了开挖面卸荷、盾尾脱空、填充注浆、衬砌变形和衬砌重力的影响,获得了良好结果。Mroueh 和 Shahrour(2002)利用三维弹塑性有限元法分析了盾构隧道施工对近邻桩基的影响,计算结果表明,桩体的内力分布主要取决于桩端相对隧道轴线的位置及桩体轴线与隧道中心的距离,并指出群桩效应可以显著减小后部桩体的内力。Hunter(2005)采用数值模拟方法研究了地铁隧道施工对邻近地下管线的影响,发现管线遭破坏的主要原因为拉应变达到极限强度导致管节轴向拉裂等。在我国,季亚平(2004)采用平面有限元法对盾构施工过程中的地层位移和土压力进行研究时,通过单元“生死”来模拟盾构开挖、盾尾注浆和衬砌管片支护过程;在对注浆材料不同硬化阶段受力性质进行室内试验的基础上,采用变刚度体模拟了浆液的固化过程,分析了注浆体厚度、土质条件、衬砌刚度、隧道相对埋深对地层位移和衬砌压力分布的影响。刘洪洲和孙钧(2001)采用三维有限元法对影响地面沉降的各个因素,如注浆量、盾体长度、推进步长、开挖面推进力、盾尾建筑空隙等分别进行了讨论,计算了各因素影响的地层沉降大小,并总结了地层沉降的规律。孙钧和刘洪洲(2002)用三维弹塑性有限元法分析了上海地铁交叠盾构隧道施工变形问题,根据上海地铁 2 号线的实测资料对受已建隧道施工扰动范围内土体各参数进行不同