



测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

漫滩软土地铁隧道运营期 沉降监控理论与技术

黄 腾 李桂华 著



科学出版社

测绘科学与技术著作系列

漫滩软土地铁隧道运营期 沉降监控理论与技术

黄 腾 李桂华 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

作为地铁运行安全的主要问题之一,即地铁隧道运营期沉降监控问题日益突出,而漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控则是其中的重点、难点和热点问题。本书对地铁发展历史、地铁隧道运营期沉降研究的历史和现状、地铁隧道结构沉降监测的方法与技术要求,以及漫滩软土地铁隧道运营期沉降成因分析、沉降预测、沉降稳定性分析与预警、沉降监控信息系统研发等多个方面的内容进行了论述,其中的绝大部分内容为作者近年来的最新研究成果,具有较高的学术价值和工程实际参考价值。

本书可供地铁隧道设计、施工和管理人员以及相关领域的科研人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控理论与技术/黄腾,李桂华著. —北京:科学出版社,2012

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-035487-7

I. ①漫… II. ①黄…②李… III. ①地铁隧道-隧道工程-地面沉降-监控系统-研究 IV. ①U231

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第209246号

责任编辑:童安齐 王 钰 / 责任校对:刘玉靖
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年12月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张: 13

字数: 252 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

一个多世纪以来，随着经济的飞速发展和城市建设的高速化，城市空间不断地向下发展。充分开发地下空间，发挥地下交通优势，有效减轻城市路面交通压力，成为城市交通发展的主旋律。在此背景下，地铁成为城市交通的主力军。近年来，我国地铁事业蓬勃发展，规划、建设、开通里程迅速增长，21世纪已成为中国城市地铁交通的新纪元。

对于如此美好的地铁交通发展前景，如何在保证运行安全的前提下最大限度地发挥地铁交通优势，是运营管理者面临的巨大挑战。由于地铁隧道结构是轨道、机电设备和运行列车的载体，其结构安全成为轨道交通系统高效运行的基本保证。通常，地铁隧道建于城市浅层地下，隧道结构所处环境复杂，易受地质条件、外界环境、列车运行振动等诸多因素影响而产生变形，严重威胁了地铁隧道结构的使用寿命与轨道交通正常运行。其中，长期、过大的沉降变形会对地铁本身安全和结构防水性能以及耐久性构成威胁，而严重的不均匀沉降甚至会直接影响地铁轨道的平整度、乘坐舒适度以及地铁的安全运营。然而在我国，目前大部分地铁工程位于地质条件复杂、工程特性软弱的沿江沿海的漫滩区域，运营期沉降问题较为突出，亟待研究解决。因此，深入研究漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控的相关理论和技术，对建立和完善地铁隧道安全监控理论、为漫滩区软土地铁隧道设计、施工和运营维护提供有效的理论支持都具有十分重要的意义。

目前，国内外地铁事业迅猛发展，同时我国地铁建设也正处于高潮期。随着地铁开通运营里程的不断增加，软土地铁隧道运营期沉降问题日益突出，而对软土地铁隧道运营期沉降监控尤其是漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控的相关研究还处于初步阶段，解决相关问题的理论和技术还远不够工程实际的需求。有鉴于此，作者结合近年来在该领域的研究以及相关工程实际，对已有的研究成果进行了总结和归纳，一方面提供设计、施工和运营维护相关人员作为参考，另一方面抛砖引玉，希望有更多的专家、学者对该领域问题进行更加深入、广泛的讨论和研究。本书从地铁发展历史、地铁隧道运营期沉降研究历史和现状、地铁隧道结构沉降监测的方法与技术要求、漫滩软土地铁隧道运营期沉降成因分析、漫滩软土地铁隧道运营期沉降预测、漫滩软土地铁隧道运营期沉降稳定

性分析与预警、地铁隧道运营期沉降监控信息系统研发等多个方面结合相关工程实例对地铁隧道运营期沉降监控理论与技术作了较为全面的论述，其中绝大部分内容为作者近年来的最新研究成果，属于新思路、新方法、新应用。

由于作者水平有限，本书存在不足在所难免，恳请专家和读者不吝批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地铁发展概况	1
1.2 漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控的研究意义	2
1.3 漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控研究历史与现状	5
1.3.1 研究历史	5
1.3.2 监测技术研究现状	6
1.3.3 预测模型的研究现状	10
1.3.4 稳定性分析与预警的研究现状	17
1.3.5 存在的问题	20
第 2 章 地铁隧道运营期沉降监控体系	23
2.1 地铁隧道结构系统特性	23
2.2 地铁隧道运营期沉降监控目的与主要内容	26
2.3 地铁隧道运营期沉降监控体系构建	27
2.3.1 基本方法	27
2.3.2 体系的构建	28
第 3 章 地铁隧道结构沉降监测的方法与技术要求	31
3.1 监测基准网的布设与施测方法	31
3.2 隧道结构的沉降监测	32
3.2.1 区间隧道的沉降监测	32
3.2.2 隧道与车站交接处的沉降差异监测	32
3.2.3 监测数据处理与分析	32
3.3 地铁隧道结构沉降监测实例	33
3.3.1 地铁隧道沉降监测概况	33
3.3.2 监测数据处理	34
第 4 章 漫滩软土地铁隧道运营期沉降成因分析	37
4.1 漫滩软土地质特征与工程特性	37
4.1.1 软土的成因与分布	38
4.1.2 漫滩软土地质特征	39
4.1.3 漫滩软土工程特性	44
4.2 漫滩软土地铁隧道沉降时空分布特征	45

4.2.1	漫滩软土地铁隧道结构特点	45
4.2.2	西延线隧道结构沉降时空分布特征	49
4.3	漫滩软土地铁隧道沉降影响因素分析	57
4.3.1	土体环境因素的影响	57
4.3.2	列车运行荷载因素的影响	68
4.3.3	隧道渗漏的影响	72
4.3.4	外部环境因素的影响	74
4.4	漫滩软土地铁隧道沉降影响因素的影响程度分析	80
4.4.1	主成分分析基本原理	80
4.4.2	主成分分析的计算步骤	81
4.4.3	影响因素影响程度的定性与时空分析	83
第5章	漫滩软土地铁隧道运营期沉降预测	91
5.1	漫滩软土地铁隧道运营期沉降预测模式构建	92
5.1.1	形变预测模型的基本分类	92
5.1.2	漫滩软土地铁隧道运营期沉降预测特点	93
5.1.3	漫滩软土地铁隧道运营期沉降预测模式	93
5.2	基于灰色神经网络模型 GNNM (1, 1) 的地铁隧道沉降预测	95
5.2.1	灰色系统理论	95
5.2.2	神经网络模型	100
5.2.3	灰色神经网络模型	106
5.2.4	灰色神经网络 GNNM (1, 1) 在地铁隧道沉降预测中的应用	113
5.3	基于改进的 RBF 神经网络地铁隧道沉降动态预测	118
5.3.1	径向基神经网络基本理论	118
5.3.2	径向基神经网络学习算法	124
5.3.3	RBF 神经网络的改进及其在地铁隧道沉降动态预测中的应用	128
第6章	漫滩软土地铁隧道运营期沉降稳定性分析与预警	152
6.1	地铁隧道结构沉降监测基准网的稳定性研究	153
6.1.1	沉降监测基准网的参考基准	153
6.1.2	隧道结构沉降监测基准网参考基准的选取	154
6.1.3	沉降监测基准网的稳定性分析方法	156
6.1.4	实例分析	162
6.2	系统稳定性	167
6.2.1	系统稳定性概念	167
6.2.2	系统运动稳定性	168
6.3	Lyapunov 运动稳定性分析原理	169

6.3.1	动力系统方程的构建	169
6.3.2	Lyapunov 指数谱、信息维	173
6.3.3	Lyapunov 运动稳定性的定义	174
6.3.4	Lyapunov 运动稳定性判别方法	176
6.3.5	变形体系统运动稳定性分析	177
6.4	基于 Lyapunov 方法的地铁隧道沉降稳定性分析与预警	178
6.4.1	动力学方程的建立	178
6.4.2	地铁隧道运营期沉降稳定性分析判据及预警方法	179
6.4.3	沉降稳定性分析与预警	180
第 7 章	地铁隧道运营期沉降监控信息系统研发	182
7.1	系统目标与内容	182
7.1.1	系统目标	182
7.1.2	系统的构成及内容	183
7.2	系统功能及要求	184
7.2.1	系统功能结构	184
7.2.2	系统功能要求	185
7.3	系统的构建及运行模式	186
7.4	系统的实现与应用	187
7.4.1	系统总体结构	187
7.4.2	系统开发与运行环境	188
7.4.3	系统开发关键技术	188
7.4.4	系统功能模块	189
参考文献		193

第 1 章 绪 论

本章将简要叙述世界地铁建设发展历史和中国地铁建设的历程及规划发展前景，并对软土地铁隧道运营期沉降监控相关问题及其研究发展历史加以必要的总结回顾。

1.1 地铁发展概况

自 18 世纪第一次工业革命发生以来，世界经济飞速发展，城市化进程不断加快，人口越来越向城市集中，人口密度逐渐上升。特别是一个多世纪以来，随着城市建设的高速化，城市用地日趋紧张，出现了人口超饱和、建筑空间拥挤、城市绿化减少、交通阻塞等一系列“城市综合征”问题。为此，各国除了采取综合性的政治、经济措施外，还注重城市向三维空间发展，即城市的立体再开发，以实现城市中心区改造。由于受到可用土地资源的限制，城市面积无法无限扩大，只能在有限区域中向上下两极发展。相对向下发展，无论从经济层面还是从技术风险角度，向上发展有着得天独厚的优势。因此，发达国家的大城市如纽约、巴黎等开始时都将向上发展作为优先实施的方向，但最后均由于向上部畸形发展而后出现了“逆城市化”现象。“逆城市化”表明，以高层建筑和高架道路为标志的向上部发展模式不是扩展城市空间的最合理模式。所以，在随后的城市发展历程中，逐渐形成了地面空间、地下空间与上部空间的协调发展的城市空间构成新概念。实践证明，这种科学合理的城市立体化开发方式不但扩大了空间的容量，提高了城市集约度，而且有效解决了交通拥挤、商业空间发展和城市绿化等问题。作为城市立体开发的重要组成部分，地下空间已经被视为人类所拥有的尚未充分利用和开发的宝贵资源，对其合理开发利用受到了世界范围前所未有的高度重视。20 世纪 80 年代，国际隧道协会提出“大力开发地下空间，开始人类新的穴居时代”的倡议，得到了广泛的响应。1996 年以来，国际上召开了多次以地下空间为主题的国际会议，通过了很多呼吁开发利用地下空间的决议、宣言和文件。国际工程界指出：20 世纪是高层建筑发展的时代，21 世纪将是长大隧道工程发展、大力开发利用地下空间的时代^[1]。

事实上，人类对于地下空间的利用可以追溯到远古时期，但是由于受到科学技术的限制，直到欧洲产业革命之前，地下空间的开发还非常有限。欧洲产

业革命后至今,随着科学技术水平的快速提高,地下空间开发蓬勃发展。地下铁道的建设是地下空间开发的主要形式之一,从1863年英国伦敦建成6.2km的世界上第一条地铁至今的100多年里,全世界已有约44个国家120多个城市修建了线路总长超过6000km的地下铁道交通系统,其中地下线路已经超过3000km^[1]。地铁自出现伊始就显示出强劲的生命力,是名副其实的城市生命线。在交通运输方面,城市地铁安全可靠、准时方便、乘坐舒适,能够将部分地面交通转移到地下,运送乘客高效便捷,可以极大地缓解城市交通拥挤问题;而在城市民防方面,战争时期又能够有效地发挥防空掩蔽所的作用。正因如此,世界许多大城市世界上许多大城市都极为重视地铁建设,如伦敦、巴黎、纽约、东京、莫斯科等已经形成了四通八达的地铁线网,并已经向深层发展。当前,很多大中城市仍在规划或者修建地铁,建设地铁已成为今后城市发展的一种趋势^[2]。

我国城市地铁交通发展已有40多年,经历了从无到有、由弱渐强的发展历程。20世纪中叶,我国开始筹备地铁建设,并以人防为主要目的规划了北京地铁网络。1965年7月1日,北京地铁一期线路动工兴建,全长23.6km,于1969年10月1日建成试运行。20世纪80年代末至90年代初,为了解决北京、上海和广州等特大城市日益突出的交通问题,以北京地铁复八线和地铁一期工程改造、上海轨道交通1号线和广州地铁1号线等地铁项目开始建设为标志,以城市交通为目的的我国(不包括港、澳、台地区)地铁建设正式拉开了序幕。20世纪90年代以来,随着国家经济水平与科学技术水平的不断提高,越来越多的城市开始了地铁交通项目的规划和建设。进入21世纪后,我国进入了地铁建设高潮期。截至2008年年底,我国已有北京、上海、广州、深圳、天津、长春、大连、武汉、重庆、南京等10个城市拥有共29条城市轨道交通运营线路,运营里程达到776km。在2008年世界金融危机爆发后,国务院推出了4万亿元的拉动内需方案,31个省份的投资计划中,北京、广州、武汉、长沙等众多城市的轨道交通规划引人注目,获批项目总里程达1700km,总投资逾6000亿元。目前,国家已经批准建设和正在筹建地铁的城市已达40多座,预计到2050年中国城市轨道交通线路总长将超过4500km。因此,21世纪将是中国城市轨道交通的新纪元。

1.2 漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控的研究意义

对于美好的轨道交通发展前景,如何在保证运行安全的前提下最大限度地发挥轨道交通优势,是运营管理者面临的巨大挑战。由于地铁隧道结构是轨道、

机电设备和运行列车的载体，其结构安全成为轨道交通系统高效运行的基本保证。通常，地铁隧道建于城市浅层地下，隧道结构所处环境复杂，易受地质条件、外界环境、列车运行振动等诸多因素影响而产生变形，从而给地铁隧道结构使用寿命与轨道交通正常运行带来不利。在地铁隧道结构众多形变类型中，沉降变形是最重要的也是最关键的一种，长期、过大的沉降变形会对地铁本身安全和结构防水性能以及耐久性构成威胁，而严重的不均匀沉降甚至会直接影响地铁轨道的平整度、乘坐舒适度以及地铁的安全运营。有鉴于此，近年来，随着我国城市地铁建设的全面展开，地铁隧道结构沉降监控问题，尤其是沉降成因分析、沉降预测、沉降稳定性分析与预警等沉降监控关键技术问题，无论在隧道施工期还是在运营期都受到地铁管理部门和广大专家学者的高度重视，成为地铁隧道结构安全监控领域的研究焦点。

地铁隧道结构包括行车隧道、渡线、折返线、地下行车线、联络线以及其他附属建筑物。地铁隧道结构沉降变形事关隧道结构使用寿命和轨道交通运行安全，必须通过包括施工前科学合理的勘察设计、施工过程中质量控制和工后长期监控等多种途径将其控制在安全容许的范围内。然而，由于勘察设计的不可全面性和施工方法的缺陷性，以及隧道结构运行过程中影响因素的不确定性，地铁隧道结构工后沉降量通常无法得到较为准确的计算，许多地铁隧道在运营后的较长时间内仍存在沉降变形，因而运营期沉降监控成为确保隧道结构安全运行的重要内容之一。对地铁隧道结构沉降状况进行周期性监测，并及时分析监测数据，反馈结构安全状况，预测以后沉降情况，提前采取必要措施控制沉降，防止事故的发生，是运营期地铁隧道结构沉降监控的基本内容与目的。但是，由于影响因素的复杂性和不确定性以及计算理论与方法的局限性，地铁隧道结构的沉降监控问题多年来一直未能得到较好解决，是地铁隧道结构安全监控研究领域的重点和难点。

至目前为止，我国大部分地铁隧道建在软弱的第四纪沉（冲）积土层中，该土层属软土地质条件，土体主要由天然含水量大、压缩性高、承载能力低的淤泥沉积物及少量腐殖质组成，在地质历史上大多位于江河湖海的漫滩区域，具有天然含水量高、天然孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、固结系数小、固结时间长、灵敏度高、扰动性大、透水性差、土层层状分布复杂、各层之间物理力学性质相差较大等特点，非常不利于隧道结构的稳定。而在我国轨道交通规划中，较多城市如上海、广州、天津、南京、宁波、无锡、苏州等地铁工程基本集中在经济发达的沿海和沿江的漫滩区域，地质条件复杂，地层也多为软土地质，土质条件较差且地下水位较高，无论在施工期还是在运营期，都面临巨大的工程安全问题，形势不容乐观。已有相关公开资料显示，近年来，在已

经建成运行的城市地铁隧道中,软土地区特别是漫滩区的地铁隧道在施工期和运营期都产生了较大沉降变形。上海市地铁1号线于1995年4月正式建成投入运营,其设计深度大多位于或穿越饱和软黏土层。经过长期的变形监测发现,隧道在长期运营中的沉降及不均匀沉降相当大,许多隧道段的沉降和不均匀沉降一直在发展,而且没有收敛的趋势^[3]。至2001年底,人民广场站至新闸路站之间的区间隧道最大累计沉降量超过200mm,黄陂南路站至人民广场站之间的区间隧道差异沉降量近100mm。过大的不均匀变形已对隧道的结构、接头防水构成威胁。在当时的情况下,虽然管片遭到破坏的情况极少,但在1号线已发现道床与管片之间发生开裂现象,在汉中路站至黄陂南路站之间已经发现至少5处整体道床与管片之间发生开裂和脱节现象,断断续续累计达300m。经过调查发现,基本上都是由隧道局部较大的不均匀沉降造成的。在上海地铁1号线中,曲率半径较小的隧道段沉降量较大,道床开裂现象很多,钢轨磨损严重^[4]。另外,由于纵向不均匀沉降造成管片接缝变形增大,1号线的区间隧道渗漏水的地方很多,漏水点主要集中在环缝、封顶块相连的“十字缝”等处,而环缝漏水是最难处理的。随着隧道纵向不均匀沉降的发展,隧道漏水的情况越来越多,甚至会影响地铁的正常运营。南京地铁1号线西延线位于长江漫滩饱和软黏土地基中,隧道基础地基采用水泥土深层搅拌桩加固。主体结构于2003年1月开工,至2003年年底钢筋混凝土结构施工结束,2004年2月完成顶板回填。2004年5月上旬,地铁西延线轨道铺设时,发现隧道结构下沉,开始对隧道结构沉降进行监测^[5]。至2005年初,部分地段结构底板沉降较大,形成了三个较长的沉降槽:第一个沉降槽(XK0+840~XK1+130)累计沉降最大值为120.4mm;第二个沉降槽(XK1+700~XK2+000)累计沉降最大值为109.0mm;第三个沉降槽(XK2+760~XK3+120)累计沉降最大值为112.0mm;非沉降槽部分的累计沉降量在30.0mm以下^[6]。由于监测及时、加固措施采取得当,才避免了更大的损失。天津市地处冲积平原地区,局部有软土层和地震液化层,天津地铁1号线工程在西站过河段施工期间的最大沉降量就达到480mm,侵限很严重,线路调整无法解决根本问题,经过研究,最终将线路尽量调整到侵限均匀、轨道采取特殊设计、减薄道床厚度,最终解决了该难题,避免了工程的拆除重建^[7]。在上述工程实例中,不难看出,软土地铁隧道自建成开始就可能存在较大的沉降变形,会严重威胁到隧道结构安全和正常的轨道交通运行,存在较大的安全隐患。究其原因,除了个别情况下隧道结构安全意识没有得到充分重视外,根本在于软土特别是漫滩区地质条件复杂,地层土质较差,地铁隧道沉降变形机理不清,沉降变形稳定性评判和预警理论不完善,导致对地铁沉降变形不能做出有效的预测和控制。由此可见,如何科学、准确、及时地分析和预测

漫滩软土地铁隧道结构沉降状况,对确保隧道结构安全与轨道交通正常运行显得尤为重要,而建立一套科学、合理、高效、可靠的监控体系也已成为迫在眉睫的重要任务。

当前,国内外对于软土地铁隧道结构沉降变形的研究主要集中在隧道沉降成因分析、隧道沉降机理研究、隧道沉降监测技术研究、隧道沉降模拟计算、预测隧道沉降数学模型和方法、隧道沉降预警与控制等方面。对于隧道沉降成因分析和隧道沉降机理研究,主要针对土体本构关系和各类荷载影响,从土体微观角度和荷载影响进行理论分析。对于控制和预测分析模型的研究,无论是确定性模型还是统计模型,大都是依据局部采样所得参数建立的模型,或者是根据监测点建立的单点或散点式模型。这一类模型对于隧道沉降因不具有通用性而不能提供有效的保障,同时,面对影响因素复杂多变的漫滩软土隧道,其适应能力较弱,使用的范围较小,也不能跟随计算机技术的发展。需要引入现代的数学理论和方法,建立人工智能信息处理模型,并且研究适合大跨度、整体性的数值模拟和预测模型,对隧道结构沉降变形观测数据进行整体分析和动态分析,建立时空分布模型,克服观测资料分析中孤立、静态的不足,实现动态、整体的要求,还需要做大量的研究,这对漫滩软土地铁隧道沉降监控具有重要的实践意义。对于隧道沉降预警的研究,主要以相关规范中的沉降量以及速率规定进行,没有较为科学合理的预警模型与方法以及机制,难以切合隧道实际。需要从地铁结构变形影响因素、变形特征、发展趋势等方面综合考虑,研究综合沉降机理分析、沉降预测、稳定性评判等模型于一体的预警理论体系,实现实时监测、动态预测、动态预警的要求,从而使运营期地铁隧道结构沉降监控达到一个新的高度,对地铁隧道结构的运营监护更为科学合理。

综上所述,深入分析和研究漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控的相关理论和技术,对建立和完善地铁隧道安全监控理论、为漫滩区软土地铁隧道设计、施工和运营维护提供有效的理论支持都具有十分重要的意义。

1.3 漫滩软土地铁隧道运营期沉降监控研究历史与现状

1.3.1 研究历史

相对于历史较为悠久的地铁隧道,对其沉降及机理的研究则起步较晚。隧道施工引起的地表沉降研究是隧道沉降问题研究的主要方面之一,典型代表是著名学者 Peck 的研究。1969年,在墨西哥国际土力学地基基础会议上,基于当时大量隧道开挖施工引起的地表沉降实测资料,Peck 系统地提出地层损失的概

念和估算隧道开挖、地表下沉的实用方法,即著名的 Peck 公式^[8]。此后,此方面问题的研究得到了相当大的发展,对于不同该问题的研究方法也层出不穷,发表了大量有关隧道施工引起地层变位的研究文献。但是,对于长期沉降而言,实测资料的缺乏和长期沉降过程中影响因素的不确定性在相当长一段时间内制约了对其的研究。近 20 年以来,随着各类城市隧道的建设及投入使用,隧道结构长期沉降引起的运营隐患和环境影响问题日益突出,才促使长期沉降研究走向快速发展的轨道。

软土的复杂特性是导致隧道沉降问题一直没有得到很好解决的主要因素之一,也是其他地基工程领域中的难题。因此,长期以来,很多学者对软土沉降机理及发展趋势开展了大量的研究。同时,列车的周期性运行荷载及其振动影响也不可忽略。20 世纪 60 年代,Seed 对 Mississippi 软黏土在循环荷载作用下的土体强度和变形进行了深入研究,随后至今,这方面的研究便不断增多,取得了令人瞩目的成果。在列车振动影响方面,早期的研究主要是通过现场振动测量,进行数学处理后给出经验的计算公式。20 世纪 70 年代,Lang 和 Kurzweil 首先给出振级与距离有关的简单预测公式^[9,10]。此后,随着试验仪器越来越先进以及研究理论的发展,该方面研究愈加深入。

在沉降监测及其资料分析方面,历史则相对较为短暂。O'Reilly 等对修建于正常固结粉质黏土中直径为 3.0m 的英国 Grimsby 隧道进行了为期 11 年的监测,通过对监测结果的分析,得出隧道长期沉降的发展规律:软黏土中隧道长期沉降需要经历相当长的时间才能达到稳定状态;长期沉降槽随时间的发展不断拓宽,长期沉降槽的宽度为短期沉降槽宽度的 2 倍;长期沉降量增加了 46~48mm,占总沉降量的 50%之多^[11]。Bowers 等对修建于伦敦黏土中的 Heathrow 高速公路隧道长期沉降发展情况进行了分析。结果显示,在该隧道建成后 3 年内,隧道轴线上方的地表沉降从瞬时沉降的 26mm 增加到 37mm,并且沉降槽也呈现扩大趋势,而且无论是瞬时沉降还是长期沉降都可用 Peck 沉降曲线进行拟合^[12]。随着对隧道沉降相关问题研究的深入,通过隧道沉降监测及其资料分析来研究隧道长期沉降规律也得到越来越多的重视。

在国内,对软土隧道沉降的研究起步较晚,但是,随着软土地铁隧道建设与投入运营的高峰期到来,该领域研究已经逐渐受到广泛重视^[13]。目前研究主要集中在隧道沉降监测技术研究、隧道沉降成因分析、隧道沉降机理研究、隧道沉降危害评价、隧道沉降模拟计算、隧道沉降预测与防治、隧道沉降预警等方面。

1.3.2 监测技术研究现状

随着隧道结构变形问题的日益突出,隧道结构变形监测越来越受到重视。

著名岩石力学专家 L. Millmer 指出,“岩土工程,特别是在隧道工程中变形量测的重要性尚未被很多人所认识。对岩土结构,特别是对隧道的形态进行的量测已被证明,其重要性犹如对钢结构和混凝土结构所进行的静力计算一样”。我国有关规范对于地铁隧道等重大工程也都有明确规定,《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2007)、《地下铁道、轨道交通工程测量规范》(GB 50308—1999)等规定地铁工程施工全过程和运营阶段中,必须定期进行变形监测,通过对监测数据的分析,经评定认为已经稳定的可以停止观测^[14,15]。

此外,许多学者也结合地铁工程实际对地铁隧道结构变形监测的必要性与相关技术进行了讨论,为制订地下铁道测量规范和进行地铁变形监测提供了必要参考。于来法结合广州地铁1号线变形监测的实际,在分析进行地铁结构变形监测必要性的基础上,全面论述了地下铁道地面与地下变形测量的内容和方法、变形观测周期和频率、基准点和变形点的布设方案,论证并提出垂直位移和水平位移变形测量的等级和精度^[16]。马振海、于春华通过对多个城市已建成的城市轨道交通线路进行调查,分析了地铁工程在建设及运营期间主体结构变形的原因和特点。结论指出,城轨交通工程在运营期间,主体结构普遍存在变形的问題,有必要对主体结构变形进行监测,动态掌握结构变形情况^[7]。

传统的隧道沉降测量方法主要以水准测量为主,精度较高,应用广泛,但是工作量较大,并且对点位所在空间位置有一定的要求,对于特殊位置的点位无法正常测量,在隧道沉降监测中有一定的局限性。随着电子技术的发展,许多新的监测理论方法被提出,尤其是一大批测量新仪器的出现,监测研究方法不断创新,为隧道沉降监测提供了新的支持。就目前的监测技术而言,主要有精密水准测量、精密三角高程测量、静力水准测量、数字摄影测量、三维激光扫描技术以及电水平尺监测技术等。

1) 精密水准测量

水准测量是传统的沉降监测技术,具有测量精度高、成果可靠、操作简便、仪器设备普通便宜等优点,但该方法的作业效率低、劳动强度大、难以实现自动化监测。随着数字水准仪的普及应用,水准测量的劳动强度得到较大的降低,数据处理也更为方便快捷,有效地提高了成果的精度和可靠性。陈基伟、于来法、黄腾、魏本现、梁杨兴、孙景领等针对该技术在地铁隧道沉降监测中的应用问题开展了大量的实践研究。结果表明,该技术完全满足铁隧道沉降监测要求^[3,16~20]。目前,本方法是我国地铁隧道沉降监测的主要方式。

2) 精密三角高程测量

三角高程测量是一种间接测高法,通过观测两点间的水平距离和天顶距(或高度角)求出两点间高差的方法。该观测方法简单,对空间要求小,施测速

度快,劳动强度低,但受观测条件和仪器精度限制,观测精度较低。随着近年来高精度智能全站仪的出现与普及,观测精度和自动化程度都得到较高的提升,将沉降监测与水平位移监测合为一体的三维位移监测成为此方法新的应用方向。徐万鹏结合全站仪发展特点,在实际工作中探索出一套基于全站仪的三维位移监测系统,可以及时、快速、精确地在一个测站为多个监测断面提供可靠的三维变形量^[21]。此外,得益于高精度智能全站仪的自动化观测技术、无线数据通信技术,以及计算机数据处理技术,自动化地铁隧道实时三维变形监测已经成为新的发展趋势,在我国广州地铁和新加坡地铁等隧道位移监测中均有所应用^[21~28]。

3) 静力水准测量

静力水准测量的基本原理是依据液体连通器原理,用传感器测量每个监测点容器内液面的相对变化,再通过计算得到各点相对于基点的相对沉降量。通常利用此系统实现自动化监测,系统内各测点的静力水准仪内的液面瞬间相对高差变化和垂直位移信息经过换能、专用放大电路,传输到采集仪中,通过数据线和服务器连接,从而自动监测铁道床的沉降。此系统已成功应用于北京地铁隧道结构整体变形监测^[29]。

4) 数字摄影测量

基本原理是利用高精度的数字化成像设备,通过相关的图像处理技术,由二维数字化影像恢复三维坐标,通过对比不同时刻成像的三维坐标变化情况得出结构的变形情况,从而达到对变形进行监测的目的。使用近景摄影测量进行变形监测具有以下优点^[30]:①能快速获得结构变形和移动的瞬间整体信息;②可实现非接触测量结构的三维状态;③可以提供整体大面积的变形测量结果。日本 Miura Satoru 等应用摄影测量方法进行隧道的收敛测量,在直径 7m 的地铁隧道内,观测点的三维坐标精度已经与全站仪相当,标志着数字化近景摄影测量已经可以用于隧道的变形监测^[31]。国内桑中顺研究了基于非量测相机,在不设像控点的情况下,进行变形测量的可行性,并开发了一套施工隧道的变形量测系统^[32]。由于该方法的精度对物方控制点的数量、相机设备性能和计算的理论方法均有较高要求,因此还未进入完全实用阶段。但是随着数字技术和摄影测量仪器设备的不断发展,此法将是未来地下空间开发中变形测量的发展方向之一。

5) 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术也称为激光雷达技术,是一种新型无接触式测量技术,它通过内含扫描棱镜的快速激光测距仪发射激光扫描测量的方法,以点云的形式获取测量物体的阵列式几何图像数据,建立物体的空间三维模型。它不需反

射棱镜即可精确测得扫描点的三维坐标，其扫描速度目前可达数十万点每秒。该技术集非接触、自动化程度高、高效快速等优点于一体，随着仪器的发展以及数据处理技术的进步，逐渐受到工程领域的重视。在国内，已使用于北京地铁隧道结构整体变形监测，取得了良好的效果^[29]。

6) 电水平尺监测技术

电水平尺 (EL Beam) 是美国 Slope Indicator 公司推出的用于测量物体倾斜 (即两点间高差) 的仪器，原先仅作为机械量具使用，后来土木工程师将它多个线性连用，用来监测物体的线性不均匀沉降，具有高分辨率 (能检测到微小至 1" 的倾角变化)、可靠性高、安装简单、遥控测读和不影响列车正常运行等优点，常用于行车时封闭的地铁隧道中进行连续沉降监测^[33]。

对于岩土工程领域的施工，刘建航院士提出“理论导向，量测定量，经验判断，快速反馈”的十六字方针，强调了现场监测以及信息快速反馈的重要性。显而易见，此十六字方针对于运营地铁隧道结构安全监测同样重要，而监测技术的高效性与可靠性则是保障其顺利实施的根本所在。目前，随着经济水平的不断提升，科技进步的日新月异，城市轨道交通蓬勃发展，隧道沉降监测的方法、手段和技术逐步成熟，从以往的传统水准测量到三维激光扫描技术和电水平尺监测技术，基本实现了监测过程的自动化，推动了监测技术向更高层次的发展。同时，随着监测技术的进步以及计算机科学的发展，监测信息管理方面也由传统人工档案化管理方式迈向计算机软件系统管理的新发展阶段，实现了监测信息获取、处理与分析的自动化和系统化，对快速反馈监测信息，及时发现安全隐患起到了重要作用。在国外，意大利和法国最早开发工程监测数据处理系统，并对监测数据采用简单的统计模型进行分析，如意大利开发的 MIDAS 系统以使用混合模型及确定性模型进行在线监控而著称。国内的蔡翔、佟琳琳在详细分析地铁建设工程中的主要安全风险的基础上，提出引入安全监测及监控系统的必要性^[34]。针对运营期的地铁隧道结构变形监测特点，本书作者设计开发了一套地铁隧道结构变形监测数据管理系统，具有直接与外业观测电子手簿连接下传原始观测资料、预处理和数据库管理等功能，实现了测量内外业的一体化^[35]。黄维华等结合南京地铁运营期隧道结构变形监测实例，开发了一套具有变形监测资料存储、预处理、管理分析、可视化分析、预测预报及限值预警等功能的信息管理系统，保证了准确、及时、快速的数据处理和信息反馈^[36]。可以预见，随着国内运营地铁隧道的增多，变形监测方法和手段将更加先进，科学决策所需的监测信息支持要求也将更高，安全监测专家系统将是该类系统发展的最终趋势。

对于运营期软土隧道，长期、连续的沉降监测为预报和控制隧道沉降提供