

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.008

# 软土地铁隧道运营期沉降监控研究综述

李桂华,黄 腾,席广永,蒋敏卫,张 东

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**阐述了软土地铁隧道运营期沉降监控的必要性与重要性,并在分析软土地铁隧道运营期沉降特点的基础上,对国内外软土地铁隧道运营期沉降监测技术、沉降预测研究、沉降稳定性分析与预警研究等问题进行了系统总结,指出了软土地铁隧道运营期沉降监控研究中存在的问题,探讨了该领域研究的发展方向。

**关键词:**地铁隧道;沉降监测;沉降预测;沉降稳定性;沉降预警

**中图分类号:**U456 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2011)03-0277-08

目前,我国大部分地铁隧道建在软弱的第四纪(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所组成,非常不利于隧道结构的沉降稳定,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。在建成运行的地铁隧道中,沉降变形灾害较为严重,并成为主要安全问题之一<sup>[1-4]</sup>。在我国轨道交通规划中,较多城市地铁工程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,无论在施工期还是运营期,都面临巨大的工程安全问题,形势不容乐观。因此,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。

本文综述了目前软土地铁隧道运营期沉降监控研究现状,总结分析了相关的理论方法及其特点,提出了目前该方面研究中有待解决的问题,并对今后有待于开展的工作进行了探讨。

## 1 软土地铁隧道运营期沉降特点

从已建成运营的软土地铁隧道沉降状况来看<sup>[1-4]</sup>,建于软土中的地铁隧道在运营期呈现出了较为复杂的沉降特点,主要有:

- 车站沉降量较小,区间隧道沉降量较大。
- 左右隧道沉降相同,横向沉降大致均匀,纵向沉降较大,并且不均匀明显,有较为严重的沉降槽。
- 运营初期沉降速率较大,随着时间推移逐渐减缓,但没有明显的收敛趋势。
- 沉降影响因素众多,分析困难,极限值难以计算分析。

这些复杂的沉降特性决定了软土地铁隧道运营期沉降监控的必要性与重要性以及现实意义。

## 2 软土地铁隧道运营期沉降监控研究现状

软土地铁隧道运营期沉降监控研究主要包括沉降监测技术研究、沉降预测研究和沉降稳定性分析与预警研究三大部分。

### 2.1 监测技术研究

在我国,为了确保地铁结构安全运行,相关规范对地铁隧道结构沉降监测技术有着严格的要求<sup>[5-6]</sup>。同时,相关学者也结合工程实际对地铁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

收稿日期:2010-06-07

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX09B\_166Z);国家自然科学基金(50279005)

作者简介:李桂华(1982—)男,江苏如东人,博士研究生,主要从事工程安全监控理论与技术研究。E-mail:1gh82911@163.com

形点的布设方案以及变形测量的等级和精度等进行了研究<sup>[7]</sup>。就目前的监测技术而言,主要有精密水准测量技术、三角高程测量技术、静力水准测量技术、数字摄影测量技术、三维激光扫描技术以及电水平尺监测技术等。

a. 精密水准测量技术. 该技术是目前我国地铁隧道沉降监测的主要技术,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,但该技术作业效率低,劳动强度大,难以实现自动化监测,而数字水准仪有效地提高了工作效率。该技术的实践应用结果表明完全满足地铁隧道沉降监测要求<sup>[1 7-10]</sup>。

b. 精密三角高程测量技术. 这是一种间接测高技术,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。高精度智能全站仪的出现使得观测精度和自动化隧道实时三维变形监测已经成为新的发展趋势<sup>[11-17]</sup>。

c. 静力水准测量技术. 该技术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。通常利用该技术实现自动化监测,已成功应用于北京地铁隧道结构整体变形监测<sup>[18]</sup>。

d. 数字摄影测量技术. 该技术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2D数字化影像恢复3D坐标,从而达到对变形进行监测的目的。该技术具有以下优点<sup>[19]</sup>:(a)能快速地获得结构变形和移动的瞬间整体信息;(b)可实现非接触测量结构的三维状态;(c)可以提供整体大面积的变形测量结果。目前该技术的应用研究已取得较好的效果<sup>[20-21]</sup>。

e. 三维激光扫描技术. 该技术是一种新型无接触式测量技术,无需反射棱镜即可精确测得扫描点的三维坐标,其扫描速度目前每秒可达数十万点。该技术集非接触、自动化程度高、高效快速等优点于一体。在国内,该技术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<sup>[18]</sup>。

f. 电水平尺监测技术. 该技术用于测量物体倾斜(即两点间高差),可多个线性连用,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<sup>[22]</sup>。

纵观上述发展,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。同时,监测信息管理也由传统人工档案化管理方式迈向了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<sup>[23-25]</sup>,对快速反馈监测信息,及时发现安全隐患起到了重要作用。

## 2.2 预测研究

软土地铁隧道结构沉降研究贯穿隧道设计、施工和运营维护的全过程,隧道沉降计算与预测的正确与否,直接关系到隧道施工安全和运行寿命。目前,软土隧道结构沉降模型主要包括基于沉降机理的确定性模型、基于统计理论的随机统计模型和基于人工智能的数学模型。

### 2.2.1 确定性模型

确定性模型是从各种因素影响隧道结构沉降的机理出发,通过研究各类因素和土层以及隧道结构沉降之间的关系,基于相关力学理论建立的数学模型。

多年来,软土隧道结构沉降的规律、产生原因和机理得到了深入的研究,沉降计算与预测模型的研究取得了较大的进展。在沉降成因方面,通过对上海与南京地铁监测分析发现,施工期影响、地层土体沉降、隧道地基沉降、地铁列车振动、隧道上方地表加卸荷载、临近隧道施工和地震等是造成软土地铁隧道沉降的主要因素<sup>[3 26-27]</sup>。在沉降变形性态和机理研究方面,大量实测资料表明,软土隧道存在着整体沉降、施工阶段沉降、长期沉降以及工程相互影响沉降4种典型模式<sup>[28]</sup>,而土性不均匀与荷载变化是影响隧道纵向变形两大主要因素<sup>[29]</sup>。而纵观整个沉降发展过程,可分为初始沉降、下卧土层超孔隙水压力消散而引起的固结沉降、下卧土体骨架长期压缩变形的次固结沉降3个阶段<sup>[30]</sup>。运营期软土隧道结构沉降影响因素众多,关系复杂,该方面研究还基本处于定性分析为主、理论分析为辅的层面,对于诸多因素的影响程度还未有较好的数学模型加以分析比较。

目前,软土隧道沉降计算与预测的确定性模型主要是在考虑各种影响因素的基础上,根据固结理论,结合各种土的本构模型,计算沉降随着时间发展的各种数值模型。在隧道周边基坑开挖卸载影响研究方面,主要应用解析法与有限元法进行计算和模拟<sup>[31-33]</sup>。在地铁荷载作用下软土地基沉降研究方面,主要利用有限

元方法和建立本构模型进行数值分析计算来预测沉降,包括静力有限元计算和经验拟合计算模型相结合方法<sup>[34-35]</sup>、软土本构模型方法<sup>[36-39]</sup>、轨道-隧道结构-地基数值分析模型方法<sup>[40]</sup>、地铁列车振动荷载模拟方法<sup>[41-42]</sup>等。在地下水位影响研究方面,应用三维流-固耦合数值方法模拟,并采用荷载-结构模式分析水位下降的影响<sup>[43]</sup>。在其他方面,主要包括有限元模拟计算渗漏水量的影响<sup>[44-45]</sup>和新建建筑桩基对紧邻已建地铁隧道的影响分析计算模型<sup>[46]</sup>。由以上分析不难看出,软土隧道结构沉降是各类因素的耦合效应,但目前的研究基本还是基于各类单因素影响效应开展,仍无法满足隧道结构沉降预测与计算的要求。

### 2.2.2 随机统计模型

常用隧道结构沉降预测随机统计模型主要有经验曲线模型、时间序列模型、灰色模型等。

a. 经验曲线模型.该模型是根据监测数据利用一定的函数曲线回归推算沉降量的一种模型,相对确定性模型大大提高了沉降估算的精度。长期沉降预测经验曲线预测模型主要有双曲线模型<sup>[47]</sup>、修正双曲线模型<sup>[48]</sup>、泊松曲线模型<sup>[49]</sup>、邓英尔模型<sup>[50]</sup>、对数曲线模型<sup>[51]</sup>、指数曲线模型<sup>[52]</sup>等。

b. 时间序列模型.该模型认为逐次的观测值是不独立的,可以用观测值之间的自相关性建立动态模型,从而利用已有的观测数据对未来数据进行预测<sup>[53]</sup>。

c. 灰色模型.该模型只需要较少样本量,从一个时间序列自身出发,采用一次累加的方法实现由非线性到线性的转化,从而弱化序列的随机性,揭示原始数据的内在规律,适合进行运营期地铁隧道沉降趋势预测<sup>[10]</sup>。在长期隧道工程实践中,研究出了灰色等时距GM(1,1)模型、新陈代谢GM(1,1)模型、灰色关联预测模型等用于隧道工程沉降预测<sup>[54-55]</sup>。

由实测数据而得到的随机统计模型较好地反映了软土隧道结构沉降实际情况,并且对其机理及其影响因素采取了“半透明”或者“不透明”的处理方式,规避了机理的不确定性和影响因素之间的错综复杂的关系,比较符合自然发展的实际规律特性,因而相对基于沉降机理的确定性模型有着较高的预测精度和适用性,是软土隧道结构沉降预测发展的重要方向。

### 2.2.3 人工智能模型

当前,用于地铁隧道结构沉降预测的人工智能模型主要有人工神经网络模型和蚁群算法模型两类。

a. 人工神经网络模型.作为人工智能的一个活跃的研究领域,人工神经网络模型由于其独特的联结结构和并行信息处理方法,并具备非线性、非凸性、非局域性、非常定性、自适应性和强大的计算与信息处理能力,以及模拟和解决非线性问题的强大优越性而成为非线性预测的主要模型之一。孙钧等<sup>[56]</sup>采用人工智能神经网络对南京市地铁1号线工程建立了沉降监测模型。近年来,随着人们对人工神经网络研究的进一步展开,其收敛速度慢、多个局部最小点、隐含层节点不确定性等固有缺陷为实际应用带来了巨大的阻碍,经过多年的探索,将灰色系统、遗传规划算法、小波分析等理论与人工神经网络结合逐渐成为改进人工神经网络的主要途径<sup>[10,53,57-59]</sup>。

b. 蚁群算法模型.该模型采用了正反馈并行自催化机制,具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点,在解决许多复杂优化问题方面,展现出优异的性能和巨大的发展潜力<sup>[60]</sup>。

利用人工智能模型进行隧道结构沉降预测尚处于初始阶段,但是相对于确定性模型和随机统计模型,能够很好地处理各类影响因素之间以及与隧道沉降之间的复杂关系,较为适合表达隧道结构沉降系统中的模糊或不确定的知识,是处理这类不确定性、非线性和不确定问题的有力工具,有较强的解释推理功能,将是复杂因素影响下的隧道结构沉降预测的新的发展方向。

综上所述,三类隧道结构沉降预测模型分别从不同角度阐释了沉降发展过程及其趋势。目前,虽然三类模型已经取得了较好的预测效果,但是随着对软土隧道沉降问题认识的逐步深入,现有预测方式、预测效率和预测精度都越来越满足不了实际需要,如何构建更为科学合理的预测模型成为亟待解决的问题。

## 2.3 稳定性分析与预警研究

### 2.3.1 稳定性分析研究

相对于其他变形体稳定性研究,由于监测机制的不够完善以及监测资料的缺乏,对于运营期的软土地铁隧道尤其是漫滩软土地铁隧道结构沉降稳定性研究还处于初始阶段,国内外相关研究资料较为鲜见。在国内,地铁隧道结构沉降稳定性评判方法主要分为以下两种:

a. 基于测量平差理论的监测网稳定性评判方法.地铁隧道结构沉降监测网一般分级布设,由高级到低

级分为监测基准网和监测网。在进行隧道结构沉降监测时,必须首先对监测基准网的稳定性进行分析,然后再进行监测点稳定性评判。

监测基准网的稳定性分析理论主要利用平均间隙法和 $t$ 检验法对监测基准网进行总体和单点的稳定性分析。平均间隙法是应用统计检验方法对变形监测网作几何图形一致性检验,以判明该网在两期观测之间是否发生显著性变化。若检验通过则认为所有点是稳定的,否则认为不稳定。 $t$ 检验法应用了Baarda数据探测理论。检验时,在认为先验方差因子已知的条件下,首先进行监测网图形一致性检验,然后再逐点进行位移分量检验。孙景领等<sup>[10,61]</sup>根据地铁隧道本身的特点,对监测基准网的平差基准及其选取、相同基准下监测基准网稳定性分析方法等问题进行了深入研究。

b. 以规范或者设计规定量值为标准的稳定性评判方法。国内规范对沉降稳定的分类可以分为两种:一种认为只要工后沉降量值小到能够满足结构物的正常使用即可,如JTJ 250—98《港口工程地基规范》<sup>[62]</sup>、JTJ D30—2004《公路路基设计规范》<sup>[63]</sup>和JTJ 071—96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》<sup>[64]</sup>等;而另一种认为沉降速率达到规定限值即可认为沉降已经趋于稳定,如JGJ 8—2007《建筑变形测量规范》<sup>[5]</sup>、DGJ32/J 12—2005《南京地区建筑地基基础设计规范》<sup>[65]</sup>等。在对地铁隧道结构沉降稳定性进行评判时,直接根据相关规范规定进行评判即可。由于各类规范都是行业或者地区长期的施工理论和经验的提炼,因此具有较强的权威性、通用性、可靠性和可操作性。

两种方法都是基于统计学和工程理论与实践两个方面。然而对于不同情况下的隧道结构,其沉降的原因、机理、规律以及稳定性评判方法有着较大的差别,不能仅仅依靠单一的沉降监测数据或者地区的普遍规律来进行评判,最行之有效的方法是在弄清沉降机理和明晰其沉降趋势基础上,综合考虑各类因素,建立科学合理的并有一定通用性的评判模型。

### 2.3.2 预警研究

长期以来,地铁隧道结构沉降预警一直主要以规范或者设计的固定限值为依据进行判断,这种固定限值一般由地区普遍工况、经验估计和设计预估3种方式得到,虽然能够在一定程度上起到预警作用,但常常会因实际工况与设想工况有较大偏差而导致预警失效。城市隧道预警研究目前仍处于初始阶段,主要包括隧道安全预测预警系统架构研究<sup>[66]</sup>以及隧道施工警戒值确定原则和施工安全状态分级研究<sup>[67]</sup>两个方面。科学合理的预警系统关键在于预警指标体系及其警戒值的确定。对于运营期地铁隧道结构而言,影响其沉降的因素包括确定性因素和众多的随机因素,对沉降的影响也呈灰色且动态变化的特征,直接利用固定的预警指标体系来进行评判预警势必造成误报情况的出现。因此,有必要建立一定的动态预警体系和预警模型实现预警指标的动态获取及动态预警。

## 3 有待进一步研究的问题

a. 传统的几何水准测量虽然在测量精度、测量费用等方面有一定的优势,但存在劳动强度高、测量周期长、易受轨道交通限制等缺点,极大地影响到隧道结构沉降状况反馈的实时性。其他监测技术在这些方面已有了显著的改善,一定程度上实现了自动化监测、自动化数据处理,但测量精度不够高,数据处理方法不够完善。

b. 对于城市地面沉降、隧道所处地层的水位变化和下卧土层水土流失等影响机理研究仅为推测分析,尚待进一步加强和明确。同时,当前的机理研究还基本处于单因素独立分析、定性分析为主、理论分析为辅的层面。由于影响因素繁多、相互影响、关系错综复杂,给机理分析造成了巨大困难,对于诸多因素的影响程度还未有较好的数学模型加以量化分析比较,直接影响到隧道结构沉降预测、稳定性分析及预警等后继过程的准确性和可靠性。此外,现有研究均为针对隧道结构沉降的共性影响因素,都是从确定性研究角度即土体微观角度去研究土-隧道联合体的性态特征。微观角度则需要去考虑因素的全面性,而影响因素的复杂性和不确定性对全面地研究影响因素带来了非常大的困难,结果恰是造成了对地铁隧道沉降变形机理认识的局限性。

c. 现有地铁隧道结构沉降预测研究主要集中于基于沉降机理的确定性模型、基于统计理论的随机统计模型和基于人工智能的数学模型3个方面。3种模型研究角度不同,预测原理和方法也有着根本的区别,虽然在隧道结构沉降预报中都起到了较好的作用,但也存在着较多的缺陷,需要进行深入的研究。确定性模型是建立在详细的工程地质勘察基础之上的,结合隧道结构内在特征和相关外部影响因素进行计算分析,要求沉降机理明确、各类参数准确,但由于影响沉降的因素繁多复杂,沉降机理较难弄清,各类参数因试验条件和

采样方法限制也较难准确获取,使得确定性模型对隧道结构沉降只能基于理想假设或者经验结论从单个因素进行描述,从而导致计算分析结果与实际情况存在较大差别。随机统计模型基于实测数据,具有快捷、计算简单等优点,但在建模过程中只能建立沉降量与单个或者多个因素之间的函数关系,不能充分考虑各类影响因素相互之间的关系,难以适应复杂条件下的沉降预测,而且基本为单点式模型和分布式模型,在分析时存在较大的局限性,不能很好地反映隧道纵向大跨度变化趋势。对于人工智能模型,虽然较为适合隧道结构沉降非线性系统的预测,但该方面研究目前仍处于初步阶段,而且只能以单一的沉降监测数据为预测样本,没有融合必要的影响因素信息,从而预测模型不能较好切合沉降实际状况,预测效率和预测精度也有待进一步的提高。

d. 现阶段运营期地铁隧道结构沉降稳定性评判主要根据统计学理论和规范规定限值来进行,由于缺乏必要的隧道结构和环境条件参数,评判结果不能较好地切合地铁隧道变形实际,可靠性不足,在实际评判时,仍需经过较长时间监测、观察才能得出较为合适的结论,对于隧道结构的正常维护和安全运营较为不利。

e. 运营期地铁隧道结构沉降预警主要以规范或者设计的固定限值为依据进行判断,这种固定限值一般由地区普遍工况、经验估计和设计预估3种方式得到,虽然能够在一定程度上起到预警作用,但常常会因实际工况与设想工况有较大偏差而导致预警失效。

## 4 今后发展方向

a. 地铁隧道结构系统主要包括区间隧道、地铁车站和区间设备段及隧道所处环境,具有复杂系统的特性,需要构建一套集沉降机理分析、监测信息获取、沉降趋势预测、沉降稳定性评判及预警于一体的综合监控体系,进而从根本上保证地铁隧道结构的安全运营与抗灾能力。

b. 漫滩软土地铁隧道结构沉降成因复杂,影响因素繁多,并且影响因素之间相关性较高,关系错综复杂,因而难以较好地应用确定性理论进行机理分析,需要研究确定软土地铁隧道沉降变形的影响因素以及各因素对沉降变形的影响程度,并对影响因素进行分类。

c. 运用现代数学理论和方法,结合机理研究,运用确定性和不确定性建模方法构建基于多因素的长周期和短周期软土地铁隧道运营期沉降预测模型,以实现高效高精度预测目的。

d. 随着影响因素的变化,地铁隧道结构会呈现出不同的沉降响应,而处于不同健康状态和外界条件下的隧道结构对沉降的承受力也不同。因此,需要研究建立多因素影响下动态稳定性评判模型,即根据隧道当前健康状况,以区间隧道整体为对象,以沉降趋势预测为基础,构建隧道结构沉降稳定性评判指标体系,研究分析在影响因素变化条件下,隧道结构的沉降稳定性态,同时进行沉降稳定性的定量分级,从而实现动态预测、动态评判。

e. 根据漫滩软土地铁隧道运营期沉降机理,结合沉降预测与稳定性分析研究,针对运营期地铁隧道结构特点,研究运营期隧道结构沉降预警体制与方法,基于影响因素实际变化状况构建合理的预警指标体系,建立基于多因素的隧道结构沉降预警模型,实现分级预警、动态预警。

## 参考文献:

- [1] 陈基伟,詹龙喜.上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J].上海地质,2000(2):51-56.(CHEN Ji-wei,ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of Shanghai metro line No. 1[J]. Shanghai Geology,2000(2):51-56.(in Chinese))
- [2] 王如路,周贤浩,余泳亮.近年来上海地铁监护发现的问题及对策[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程学会地下铁道专业委员会第十四届学术交流会论文集.北京:中国科学技术出版社,2001:239-242.
- [3] 黄广龙,卫敏,韩爱民,等.南京长江漫滩地层中地铁结构的沉降分析[J].水文地质工程地质,2006,33(3):112-116.(HUANG Guang-long,WEI Min,HAN Ai-min et al. Analysis on the subsidence of tunnel foundation in Nanjing Yangtze River valley flat [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2006,33(3):112-116.(in Chinese))
- [4] 刘蜀宁,唐祖萍.南京地铁西延线结构沉降的治理[J].南京市政,2006(4):25-27.(LIU Shu-ning,TANG Zu-ping. Controlling of the Nanjing metro west extension line structure settlement[J]. Nanjing Municipal,2006(4):25-27.(in Chinese))
- [5] JGJ8—2007 建筑变形测量规范[S].
- [6] GB 50308—1999 地下铁道、轻轨交通工程测量规范[S].

- [7] 于来法. 论地下铁道的变形监测[J]. 测绘通报, 2000(5):13-15.(YU Lai-fa. On deformation monitoring of subway[J]. Bulletin of Surveying and Mapping 2000(5):13-15.(in Chinese))
- [8] 魏本现. 地下铁道、轻轨交通工程运营阶段道床变形测量方法[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(4):181-183.(WEI Ben-xian. Deformation measurement of subway and light rail transit project during operational phase[J]. West-China Exploration Engineering 2007, 19(4):181-183.(in Chinese))
- [9] 梁杨兴, 徐顺明. 广州地铁二号线调整工程位移沉降监测与分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(8):305-307.(LIANG Yang-xing, XU Shun-ming. The displacement settlement detection and analysis of the adjust project of the second line Guangzhou underground[J]. Shanxi Architecture 2008, 34(8):305-307.(in Chinese))
- [10] 孙景领. 地铁隧道结构沉降监测及分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [11] 徐万鹏. 隧道位移监测新方法的可行性探索[J]. 铁道工程学报, 2000(2):65-68.(XU Wan-peng. Feasible probing on new method of displacement monitor of tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society 2000(2):65-68.(in Chinese))
- [12] 卫建东, 徐忠阳, 张良琚. 动态基准实时测量系统的开发与应用[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1):31-35.(WEI Jian-dong, XU Zhong-yang, ZHANG Liang-ju. The development and application of real-time dynamic benchmark measure system[J]. Hydrographic Surveying and Charting 2005, 25(1):31-35.(in Chinese))
- [13] 包欢, 卫建东, 徐忠阳, 等. “智能全站仪网络监测系统”在地铁监测中的应用[J]. 北京测绘, 2005(3):19-22.(BAO Huan, WEI Jian-dong, XU Zhong-yang, et al. The application of intelligentized total station network monitoring system for structure deformation of subway[J]. Beijing Surveying and Mapping 2005(3):19-22.(in Chinese))
- [14] 周山, 付振华. 广州地下铁道既有隧道的自动化监测方案[J]. 科技咨询导报, 2007(17):45-46.(ZHOU Shan, FU Zhen-hua. Automated monitoring program of guangzhou subway tunnels[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2007(17):45-46.(in Chinese))
- [15] 张笑星. 地铁隧道结构变形和地铁运营安全自动监测的研究和应用[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(增刊1):191-197.(ZHANG Xiao-xing. Structural deformation and the mtr subway tunnel operational safety research and application of automatic monitoring[J]. Modern Tunnelling Technology 2008, 45(Sup1):191-197.(in Chinese))
- [16] 刘永中. 地铁隧道测量机器人自动化变形监测研究与应用[J]. 铁道勘察, 2008, 34(4):1-3.(LIU Yong-zhong. Monitoring research on automatic deformation of surveying robot for metro tunnel and its application[J]. Railway Investigation and Surveying 2008, 34(4):1-3.(in Chinese))
- [17] 黄明智, 文兵. 新加坡地铁隧道保护工程中的自动化实时三维监测系统[C]//上海市土木工程学会, 上海隧道工程股份有限公司. 大直径隧道与城市轨道交通工程技术 2005 年上海国际隧道工程研讨论文集. 上海: 同济大学出版社, 2005:595-599.
- [18] 邱冬伟, 梁青槐, 杨松林. 北京地铁隧道结构整体变形监测的研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(增刊1):16-17.(QIU Dong-wei, LIANG Qing-huai, YANG Song-lin. Integral monitoring of Beijing subway tunnel deformation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(Sup1):16-17.(in Chinese))
- [19] 田胜利. 隧道及地下空间结构变形的数字化摄影测量与监测数据处理新技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [20] SATORU M, TAKUJI Y, MAI M, et al. Configuration and displacement measurement using vision metrology[J]. Proceedings of the Japan Symposium on Rock Mechanics 2001, 11(2):707-712.
- [21] 桑中顺. 隧道变形监测中的近景摄影测量技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [22] 徐祥其. 电水平尺沉降自动遥测系统在地铁监护中的应用[J]. 岩土工程界, 2009, 12(2):71-74.(XU Xiang-qi. Application of electric automatic system level settlement of custody in the metro[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(2):71-74.(in Chinese))
- [23] 蔡翔, 佟琳琳. 地铁建设工程中引入安全监测及监控系统必要性分析[J]. 中国建设信息, 2008(12):20-22.(CAI Xiang, DONG Lin-lin. Analysis of the need for safety monitoring and control system of subway construction project[J]. Information of China Construction 2008(12):20-22.(in Chinese))
- [24] 黄腾, 李桂华, 孙景领, 等. 地铁隧道结构变形监测数据管理系统的设计与实现[J]. 测绘工程, 2006, 15(6):1-7.(HUANG Teng, LI Gui-hua, SUN Jing-ling, et al. Design and realization of the data management system for the subway tunnel construction deformation monitoring[J]. Engineering of Surveying and Mapping 2006, 15(6):1-7.(in Chinese))
- [25] 黄维华, 岳荣花, 张学华, 等. 地铁隧道结构变形监测信息管理系统的开发[J]. 现代测绘, 2008, 31(1):23-25.(HUANG Wei-hua, YUE Rong-hua, ZHANG Xue-hua, et al. Development of information management system for the structural deformation monitoring of subway tunnel[J]. Modern Surveying and Mapping 2008, 31(1):23-25.(in Chinese))
- [26] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. 地下空间, 2000, 20(4):264-267.(LIN Yong-guo, LIAO Shao-ming, LIU Guo-bin. A discussion of the factors effecting on longitudinal deformation of subway tunnel[J]. Underground Space 2000, 20(4):264-267.(in Chinese))

- [27] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. 地下工程与隧道, 2009(1):1-6.(WANG Ru-lu. Factors influencing deformation of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. Underground Engineering and Tunnels 2009(1):1-6.(in Chinese))
- [28] 廖少明, 白廷辉, 彭芳乐, 等. 盾构隧道纵向沉降模式及其结构响应[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5):566-595.(LIAO Shao-ming, BAI Ting-hui, PENG Fang-le et al. Longitudinal settlement forms and structural response of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2006, 2(5):566-595.(in Chinese))
- [29] 黄宏伟, 臧小龙. 盾构隧道纵向变形性态研究分析[J]. 地下空间, 2002, 22(3):244-251.(HUANG Hong-wei, CANG Xiao-long. Research and analysis on longitudinal deformation characteristics of shield tunnel[J]. Underground Space, 2002, 22(3):244-251.(in Chinese))
- [30] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [31] 青二春. 地铁隧道上方大面积卸载下的变形及控制模式研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [32] 钟定兰. 软土地区基坑开挖对既有地铁隧道影响的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [33] 师晓权. 基坑开挖对下卧隧道影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [34] 刘明, 黄茂松, 李进军. 地铁荷载作用下饱和软粘土的长期沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5):813-817.(LIU Ming, HUANG Mao-song, LI Jin-jun. Long-term settlement of saturated soft clay under subway loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2006, 2(5):813-817.(in Chinese))
- [35] 刘明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11):1703-1709.(LIU Ming, HUANG Mao-song, LIU Yan-hua. Long-term settlement of tunnels across a river induced by vehicle operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009, 31(11):1703-1709.(in Chinese))
- [36] 唐益群, 张晓晖, 赵书凯, 等. 地铁荷载下软黏土微结构与宏观变形的相关性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(7):872-877.(TANG Yi-qun, ZHANG Xiao-hui, ZHAO Shu-kai et al. Correlatability of microstructure change and macroscopical deformation of soft clay under subway load[J]. Journal of Tongji University: Natural Science 2009, 37(7):872-877.(in Chinese))
- [37] 张曦. 地铁振动对隧道周围软粘土微结构影响及动力特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [38] 刘莎. 地铁行车荷载作用下隧道周围饱和软粘土流变效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [39] 赵书凯. 地铁行车荷载下软粘土微观结构变形破坏机制研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [40] 曾二贤. 交通动荷载引起的软土地基长期沉降[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [41] 罗强. 地铁荷载作用下地基沉降的弹塑性分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [42] 陈海忠, 何波, 东东. 地铁移动荷载作用下地基沉降的弹塑性分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2009, 26(3):13-17.(CHEN Hai-zhong, HE Bo, GE Dong-dong. Elastic-plastic analysis of foundation settlement caused by subway moving load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition 2009, 26(3):13-17.(in Chinese))
- [43] 刘庭金, 邓飞皇, 莫海鸿. 水位下降对地铁盾构隧道的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(增刊1):207-210.(LIU Ting-jin, DENG Fei-huang, MO Hai-hong. Water level decrease in the impact analysis of shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(Sup1):207-210.(in Chinese))
- [44] 郑永来, 刘曙光, 韩文星, 等. 软土隧道渗漏对隧道沉降影响分析[C]//中国岩石力学与工程学会. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004:506-509.
- [45] 庄丽, 张银屏. 软土地层盾构隧道渗水量与沉降关系的模拟分析[J]. 中国建筑防水, 2006(6):13-15.(ZHUANG Li, ZHANG Yin-ping. Analogue analysis for relationship between leaking water amount and settlement of tunnels in soft soil stratum[J]. China Building Waterproofing 2006(6):13-15.(in Chinese))
- [46] 徐而进, 陈伟, 褚峰. 桩基沉降对紧邻地铁隧道的影响分析[J]. 结构工程师, 2009, 25(4):119-123.(XU Er-jin, CHEN Wei, CHU Feng. Analysis for the influence of pile foundation settlement on adjacent tunnel[J]. Structural Engineers 2009, 25(4):119-123.(in Chinese))
- [47] FANG Y S, LIN S J, LIN J S. Time and settlement in EPB shield tunneling[J]. Tunnels and Tunneling, 1993, 25(11):27-28.
- [48] 甘友文, 王志亮, 郑华. 地基沉降预测中的双曲线模型修正[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1):98-100.(GAN You-wen, WANG Zhi-liang, ZHENG Hua. Modification of hyperbolic model in settlement prediction of foundation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology 2004, 31(1):98-100.(in Chinese))
- [49] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4):322-325.(ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during the complete process of construction and operation[J]. Rock and Soil Mechanics 2000, 21(4):322-325.(in Chinese))
- [50] 邓英尔, 谢和平. 全过程沉降预测的新模型与方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1):1-4.(DENG Ying-er, XIE He-ping. New model and method of forecasting settlement during complete process of construction and operation[J]. Rock and Soil Mechanics 2005, 26(1):1-4.(in Chinese))

- [51] 陈希哲. 土力学与地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [52] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [53] 王铁生. 地下隧洞测控技术与地表沉降动态监控模型的研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [54] 黄明华, 刁心宏, 杨华. 隧道变形预测的灰色模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(2): 22-24. (HUANG Ming-hua, DIAO Xin-hong, YANG Hua. Study on grey model of deformation of tunne[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(2): 22-24. (in Chinese))
- [55] 周小俊, 田金国, 谷川. 灰色关联预测及其在变形预测中的应用[J]. 铁道勘察, 2009, 35(1): 28-30. (ZHOU Xiao-jun, TIAN Jin-guo, GU Chuan. Forecasting of grey correlative approach as well as its application in deformation forecasting[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, 35(1): 28-30. (in Chinese))
- [56] 孙钧, 朱忠隆, 袁金荣. 地铁盾构掘进环境土工安全的智能预测与控制[J]. 地下工程与隧道, 2002(3): 2-10. (SUN Jun, ZHU Zhong-long, YUAN Jin-rong. Intellectual prediction and control of environmental earth work safety in the process of metro shield driving [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2002(3): 2-10. (in Chinese))
- [57] 任松, 姜德义, 杨春和. 基于遗传算法的浅埋隧道开挖地表沉降神经网络预测[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(3): 46-49. (REN Song, JIANG De-yi, YANG Chun-he. Predicting the earth surface subsidence caused by excavating shallow tunnel with the genetic neural network[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(3): 46-49. (in Chinese))
- [58] 李金锋. 遗传BP神经网络在地铁工程沉降预测中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [59] 岳荣花. 小波神经网络在沉降预测中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [60] 韦凯, 宫全美, 周顺华. 隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 993-998. (WEI Kai, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Ant colony algorithms of long-term uneven settlement prediction in tunne[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 993-998. (in Chinese))
- [61] 黄腾, 岳荣花, 陈建华, 等. 地铁隧道沉降监测基准网的稳定性分析[J]. 铁道勘察, 2006, 32(5): 1-3. (HUANG Teng, YUE Rong-hua, CHEN Jian-hua et al. Analysis on stability of monitoring datum network for metro tunnel settlement[J]. Railway Investigation and Surveying, 2006, 32(5): 1-3. (in Chinese))
- [62] JTJ 250—98 港口工程地基规范[S].
- [63] JTG D 30—2004 公路路基设计规范[S].
- [64] JTJ 017—1996 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].
- [65] DGJ32/J12—2005 南京地区建筑地基基础设计规范[S].
- [66] 吴昊, 彭大文. 城市隧道安全预测预警系统构架研究[J]. 上海应用技术学院学报: 自然科学版, 2008, 8(4): 302-306. (WU Hao, PENG Da-wen. A research on the frame of early warning system for city tunnel[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2008, 8(4): 302-306. (in Chinese))
- [67] 钟山. 盾构法隧道施工监测数据处理与预警、报警研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

## Review of researches on settlement monitoring of metro tunnels in soft soil during operation period

LI Gui-hua, HUANG Teng, XI Guang-yong, JIANG Min-wei, ZHANG Dong

(College of Geosciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The necessity and the importance of settlement monitoring of metro tunnels in soft soil during the operation period were described. Based on analyzing the settlement characteristics of the metro tunnels in soft soil during the operation period, the problems of the worldwide metro tunnels in soft soil during the operation period were systematically summarized, including settlement monitoring technology, settlement prediction research, settlement stability analysis, settlement warning and so on. The problems in the researches on the settlement monitoring of the metro tunnels in soft soil during the operation period were put forward. The trend of further researches on this field was discussed.

**Key words:** metro tunnel; settlement monitoring; settlement prediction; settlement stability; settlement warning