

# 软土地区开挖卸荷 对邻近地铁隧道的影响研究

/

STUDY ON THE INFLUENCE OF VICINAL SUBWAY  
TUNNEL DUE TO ADJACENT EXCAVATION AND UNLOADING  
IN SOFT SOIL AREA

周泽林 李 铮 陈寿根 刘冒佚 著



## 内容提要

本书针对城市软土地区邻近地铁隧道的基坑开挖与隧道工程,研究了土体开挖与邻近隧道变形之间相互影响机理,旨在提出一种合理的邻近开挖工况下既有隧道变形计算方法以及开挖卸荷下对既有隧道的变形控制与保护技术。全书共分为6章,分别在基坑施工引起的下卧土层附加位移场的计算方法、基坑开挖对下卧隧道竖向变形影响的解析分析方法、盾构开挖对上方隧道竖向变形影响的解析分析方法、重叠开挖卸荷下既有隧道的变形特征与控制技术等方面进行了系统的研究。

本书可作为从事土木工程、地下工程专业技术与管理人士的参考书,还可以作为大专院校岩土相关专业的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

软土地区开挖卸荷对邻近地铁隧道的影响研究 / 周泽林等著. -- 重庆:重庆大学出版社, 2023. 4  
ISBN 978-7-5689-3892-1

I. ①软… II. ①周… III. ①软土地区—基坑施工—影响—地铁隧道—研究 IV. ①U231.3

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 081499 号

## 软土地区开挖卸荷对邻近地铁隧道的影响研究

RUANTU DIQU KAIWA XIEHE DUI LINJIN DITIE SUIDAO DE YINGXIANG YANJIU

周泽林 李 铮 陈寿根 刘冒伏 著

策划编辑:林青山

责任编辑:陈 力 版式设计:林青山

责任校对:王 倩 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

\*

开本:720mm×1020mm 1/16 印张:12.25 字数:176 千

2023 年 4 月第 1 版 2023 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-3892-1 定价:89.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

## 前 言

基坑开挖和盾构开挖是目前我国城市建设中广泛存在的两类地下工程开挖活动,开挖卸荷改变了周围土体初始应力状态并对邻近既有地铁隧道产生了不利影响。如何准确地预测和控制地下开挖引起的邻近既有隧道附加内力和变形具有迫切而重要的工程学意义。软土的土质条件、地基分层特性、基坑围护结构、地层加固,以及抗拔桩加强措施等因素对既有隧道的纵向变形均有重要影响,但目前对于此类问题的研究尚不够成熟。本书将这些问题作为新的研究方向提了出来,主要采用理论分析和数值模拟等研究手段,结合离心机试验算例和现场工程实测数据就上述问题开展了系统深入的研究,主要研究内容及成果体现为:

①引入弹性层状地基模型,建立了基坑施工引起下卧土体竖向自由位移场的简化理论分析方法,该方法能充分的考虑基坑开挖面卸载、围护结构的水平作用、工程降水,以及土体分层特性等因素的影响,得出的结论更符合工程实际。结合数值算例分析发现:提出方法能较好地反映出非均质层状地基土体的应变集中(或扩散)现象。

②提出了开挖卸荷条件下隧道与周围土体相互作用的整体耦合分析方法,基于此方法,首先推导了砂质土体条件下基坑开挖引起的下卧单洞、双洞隧道纵向变形的弹性解,并结合离心机试验算例评估了计算方法的有效性;然后基于三参量 H-K 流变本构模型,推导了黏质土体条件下开挖引起的隧道纵向变形的黏-弹性解,并结合工程实测数据进行了方法运用与验证。

③将提出方法与目前常用的两阶段解析法进行算例对比发现,本书提出的耦合方法是一种整体分析方法,与两阶段解析法的分步求解过程相比,不需要选用具体的地基模型和确定各种复杂的地基参数,因此大大地减少了计算所需的参数数量,并简化了计算过程。

④将提出方法运用于工程实例分析中发现,黏性土体流变特性引起的隧道后期变形量占总变形量的比例较大,软土流变会对隧道纵向位移大小、范围及形态等造成较大的影响;变形趋近于稳定的时间与软土的流变参数有关,基坑应尽量在流变趋近稳定之前完成开挖、支护、主体浇筑和覆土回填等工序,以减小软土卸荷的时间效应对邻近既有隧道造成的不利影响。

⑤基于镜像源汇法和盾构隧道非等量径向土体移动模式,建立了盾构掘进对上方已建隧道影响的解析方法。结合离心机试验算例发现,提出方法非常适用于分析地层损失率较低( $\varepsilon \leq 1\%$ )的情况下盾构开挖对既有隧道、管廊等刚性结构的影响;结合某盾构下穿既有刚性管道的工程实例分析发现,管道沉降量的解析解与实测数据基本吻合,验证了提出方法的有效性。

⑥采用提出方法对盾构下穿既有隧道进行了算例分析,结果显示,垂直正交关系是既有隧道纵向变形受扰的最有利位置关系,但同时也是既有隧道受剪、受弯的最不利位置关系;提高既有隧道纵向刚度在起到减小隧道附加变形作用的同时也显著地增大了结构附加弯矩峰值。

⑦地层加固加强了地层和围护墙的连接作用及地基土体的整体性,使得加固范围内土体剪应变和卸荷应力的传递变的更加均匀,不仅能减小开挖卸荷引起的邻近隧道纵向变形大小和范围,还能有效地控制隧道自身断面的相对拉伸变形。

⑧利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>,探讨了基坑下卧回弹地基内抗拔桩的承载特性和抗隆起机理,根据桩-土相对位移分布情况将桩身分成了抗拔段、稳定段和嵌固段。研究发现,刚性抗拔桩不仅能约束桩周土体竖向位移,还能作为“异质体”切断围护墙墙脚与隧道洞室侧面之间的集中剪应变传递路径,因而显著地减小了洞室周围土体的集中剪应变大小和分布范围。

著者

2023年2月3日

# 目 录

第1章 绪论 .....	001
1.1 研究背景及选题意义 .....	001
1.2 国内外研究现状 .....	004
1.3 研究内容、方法与技术路线 .....	019
第2章 基坑施工引起的下卧土层附加位移场的计算方法 .....	022
2.1 下卧地层中土体竖向自由位移 .....	023
2.2 土体附加应力的影响因素 .....	026
2.3 基坑施工引起的土体附加应力 .....	027
2.4 算例分析 .....	037
2.5 本章小结 .....	040
第3章 基坑开挖对下卧隧道竖向变形影响的解析 .....	041
3.1 隧道纵向结构计算模型 .....	041
3.2 单洞隧道竖向附加位移的弹性解 .....	047
3.3 双洞隧道竖向附加位移的弹性解 .....	066
3.4 隧道竖向附加位移的黏-弹性解 .....	076
3.5 本章小结 .....	089
第4章 盾构开挖对上方隧道竖向变形影响的解析 .....	092
4.1 盾构开挖引起的土体自由位移场解 .....	093
4.2 隧道纵向附加位移解 .....	100
4.3 参数分析 .....	103
4.4 与离心试验结果的算例对比 .....	114

4.5	工程实例运用与分析 .....	118
4.6	本章小结 .....	122
第5章	重叠开挖卸荷下既有隧道的变形特征与控制技术研究 .....	124
5.1	工程概况 .....	125
5.2	重叠开挖周围洞室变形特征区域 .....	127
5.3	地层加固对控制隧道变形的效应分析 .....	139
5.4	抗拔桩对隧道的抗隆起效应分析 .....	150
5.5	本章小结 .....	162
第6章	结论与展望 .....	164
6.1	主要结论 .....	164
6.2	研究展望 .....	167
参考文献	.....	170
附录	.....	184
附录1:	图片目录 .....	184
附录2:	表格目录 .....	189

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及选题意义

随着中国城市化进程的加快,城市用地增长率远低于城市人口增长率,有限的城市地表土地资源已无法满足人们对生存空间的需求,城市空间的拓展正逐渐从外延式的水平方向向内涵式的立体方向发生转变,因而催生了大量的地下工程,如地下隧道、地下车站、综合管廊、人防工事、地下商场及街道等。尽管城市地下空间的开发与利用在建设前期有着详细的规划与安排,但就长远发展而言仍具有一定的不可预见性<sup>[1]</sup>。因此,实际工程中往往会出现新建地下工程邻近已建地下结构的情况,而地铁隧道作为现代城市地下交通的大动脉,其安全性极为重要,与一般的地下结构相比,国际上对地铁变形的要求更加严格,如英国<sup>[2]</sup>制定了严格的变形控制标准来保护地铁隧道,但国内尚无系统的标准规程,仅上海地区针对地铁的附加变形保护提出了如下暂行规定<sup>[3]</sup>:地铁结构位移量不应大于 20 mm;隧道纵向变形曲线的曲率半径应大于 15 000 m、相对弯曲不应大于 1/2 500。

目前,城市近接地下工程正呈现出“深、大、复、近、杂”的特点与趋势,开挖卸荷范围越来越大,与既有地铁隧道的距离越来越近,空间位置关系也越来越复杂。现选取中国部分城市典型的邻近既有地铁隧道的大范围开挖卸荷工程案例作简要介绍,见表 1.1。从表 1.1 可见,目前城市建设中主要存在两类典型

的大范围地下开挖卸荷工程,一是大面积基坑工程,以明挖法和暗挖法为主,新建基坑骑跨于既有隧道之上的情况称为基坑近距离上跨施工<sup>[4]</sup>;二是大断面隧道工程,此类城市隧道施工多以盾构法为主。新建盾构隧道近距离穿越已建隧道的情况称为盾构近距离穿越施工<sup>[5]</sup>。城市建设中还存在一些其他的近接地下工程,如地下管道、桩基开挖、微型隧道及地下市政设施等,但与以上两类工程相比,此类工程涉及的开挖卸荷量较小,对既有地铁隧道的影响也相对较小。在城市软土地区敏感环境下进行大范围土体开挖会危及邻近地铁隧道的运营安全,对既有地铁隧道纵向变形的预测和控制是设计和施工中需要高度重视的问题,随着中国城市地下空间的大规模开发,类似工程问题必将越来越多,而且亟待解决。

表 1.1 邻近既有地铁隧道的大范围开挖卸载工程实例

工程类别	工程名称	既有线	近接情况	最小间距/m	施工方法
基坑近距离上跨施工	北京金融街地下通道基坑	北京地铁 2 号线	顺行上跨	1.5	明挖法
	北京地铁 5 号线东单车站基坑	北京地铁 1 号线	正交上跨	0.6	暗挖法
	上海东方路下立交基坑	上海地铁 2 号线	上方斜跨	2.8	明挖法
	天津西青道下沉隧道基坑	天津地铁 1 号线	上方正跨	0.3	明挖法
	南京龙蟠路隧道西段基坑	南京地铁 1 号线	上方斜跨	2.5	明挖法

续表

工程类别	工程名称	既有线	近接情况	最小间距/m	施工方法
盾构近距离 穿越施工	北京地铁4号线 隧道	北京地铁9号线	上方斜交穿越	1.4	盾构法
	北京某大断面地下 人行隧道	北京地铁10号线	垂直上穿	2.0	CRD暗挖
	上海地铁11号线 隧道	地铁4号线	上、下叠交穿越	1.7	盾构法
	上海外滩观光隧道	地铁2号线	上方斜交穿越	1.5	盾构法
	广州大塘-沥滘区间 隧道	地铁3号线	重叠下穿	6.0	盾构法

目前对地铁盾构隧道横向特征变形的研究较多,纵向特征变形的研究较少。而盾构隧道纵向抗变形能力较弱,纵向变形进一步发展会导致盾构管片接缝处差异变形过大而受到破坏。因此,针对开挖卸荷条件下既有隧道纵向变形的计算方法研究是十分必要的,由于该类工程技术难度很大,目前开挖卸载理论方面的研究尚不够成熟,工程施工中仍存在一定的盲目性。本研究将从土力学和弹性力学的基本理论出发,对基坑近距离上跨施工和盾构近距离穿越施工这两大类卸载工程对既有地铁隧道的影响进行系统深入的理论研究,主要研究内容包括卸载理论模型、数值分析及工程实例应用等。实现技术理论创新,丰富地下卸载工程理论的内涵,为今后类似工程的设计和施工提供指导和服务,这也是本研究的理论及实践意义所在。

## 1.2 国内外研究现状

软土一般是指天然孔隙比大于或等于 1.0,且天然含水量大于液限的细粒。城市地区的软土的力学特性为:

### (1) 高含水量和高孔隙比

软土的天然含水量  $w$  一般为 50% ~ 70%,饱和度一般大于 95%,液限  $w_L$  一般为 40% ~ 60%,天然含水量  $w$  与液限  $w_L$  之间成正比增加。天然孔隙比  $e$  为 1 ~ 2,且天然含水量  $w$  与其天然孔隙比  $e$  之间呈直线变化关系。

### (2) 低渗透性

软土的渗透系数一般为  $10^{-4} \sim 10^{-8}$  cm/s,位于滨海相和三角洲相的软土地区,由于土层中夹有薄层或极薄层的粉、细砂、粉土等,使得土层水平方向的渗透系数较垂直方向大。

### (3) 高压缩性

软土均属高压缩性土,其压缩系数一般为  $0.7 \sim 1.5$  MPa<sup>-1</sup>,且压缩系数随着土的液限和天然含水量的增大而增高。

### (4) 低强度

软土的抗剪强度小且与加荷速度及排水固结条件密切相关,不排水三轴抗剪强度值很小,与其侧压力大小无关。排水条件下的抗剪强度随固结程度的增加而增大。

深入研究软土地区开挖卸载对邻近隧道纵向的影响规律和控制技术具有重要的工程意义和理论价值,国内外学者已进行了相关研究,并取得了一定的成果,但由于土体介质的不确定性以及隧道-土体之间相互作用的复杂性,导致目前的研究成果尚不够成熟和完善。下面将该领域已有的研究成果及存在的问题进行阐述。

### 1.2.1 基坑卸荷引起的周围土体自由位移

在软土地层中开挖基坑,上部卸荷后必然会引起基坑底面下卧地基土体发生回弹变形,回弹变形量的大小成为分析基坑稳定性和下卧已建隧道附加变形的重要依据。Tergzaghi. K<sup>[6]</sup>早在 20 世纪 60 年代就注意到了基坑开挖空间越大,产生的坑底回弹变形就越大的事实;Bjerrum<sup>[7]</sup>给出了估算基坑底板隆起的方法;Imae<sup>[8]</sup>对影响基坑及土体变形的几个因素进行了详细的比较分析,包括基坑大小、开挖顺序、支撑结构、土体性质、地下水和暴露时间等。

目前,我国《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[9]</sup>认为,基坑的变形计算比较复杂,且不够成熟,只能作为一般性的要求提出,规范基于分层总和法思路所给出的底板隆起变形计算公式为,

$$\delta = \psi_c \sum_{i=1}^n \frac{p_c}{E_{ci}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \quad (1.1)$$

式中  $\psi_c$ ——回弹经验系数;

$p_c$ ——基地以上土附加压力;

$E_{ci}$ ——土的回弹模量;

$z_i$ ——第  $i$  层土的深度;

$\bar{a}_i, \bar{a}_{i-1}$ ——地基附加应力系数;

$n$ ——计算厚度的分层数。

传统的回弹变形估算方法是将被开挖土体视为等重量的竖向卸载,利用均布荷载作用下的弹性半空间表面沉降公式或分层总和法来计算土体回弹变形。如杨位<sup>[10]</sup>等介绍了利用弹性力学法计算基坑开挖引起的土体自由回弹变形公式为,

$$s = \frac{1-\nu}{E} \cdot wbp_0 \quad (1.2)$$

式中  $b$ ——矩形均布荷载的宽度或圆形均布荷载的直径;

$w$ ——中性点回弹影响系数;

$\nu$ ——土体泊松比。

刘国彬、侯学渊等<sup>[11]</sup>利用室内三轴试验模拟了基坑土体卸荷和下卧土体上抬变形,通过试验提出了土体回弹位移计算公式为,

$$s = -29.17 - 0.167\gamma H + 12.5 \left( \frac{t}{H'} \right)^{-0.5} + 5.3\gamma c^{-0.04} (\tan \varphi)^{-0.54} \quad (1.3)$$

式中  $H$ ——基坑开挖深度,  $H' = (1+q/\gamma)H$ ;

$q$ ——地面超载;

$t$ ——围护结构的入土深度;

$c, \varphi, \gamma$ ——土体的黏聚力、内摩擦角和重度。

刘国彬等<sup>[12]</sup>根据大量基坑实测资料,提出了残余应力的概念来求解软土地区基坑土体的隆起变形,残余应力系数  $a = \text{残余应力}/\text{卸荷应力}$ 。建立了一个基于应用残余应力原理和应力路径方法的计算方法(同济经验法)来求解坑底回弹量,即,

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{ii}} h_i \quad (1.4)$$

式中  $n$ ——计算厚度的土体分层数;

$h_i$ ——第  $i$  层土体的厚度;

$E_{ii}$ ——第  $i$  层土体的卸荷模量;

$\sigma_{zi}$ ——第  $i$  层土体的平均卸荷应力值,  $\sigma_{zi} = \sigma_0(1-a_i)$ , 其中,  $\sigma_0$  是总卸荷应力值,  $a_i$  是第  $i$  层土体的残余应力系数。

S. K. Bose<sup>[13]</sup>利用二维有限元法研究了围护结构、开挖深度等因素对基坑隆起变形的影响;Hamdy Faheem<sup>[14]</sup>利用三维有限元法,考虑剪力的折损,模拟了矩形基坑开挖卸载后影响基坑变形的因素。

陆培毅等<sup>[15]</sup>利用三维有限元方法,采用修正剑桥模型本构关系模拟了基坑开挖过程中基坑面积、支撑形式和开挖深度对坑底土体回弹变形的影响。

刘国彬等<sup>[16]</sup>采用三轴流变试验仪进行了卸荷流变试验,模拟了基坑开挖

产生的应力场,并结合试验结果提出了一种五元件模型,用于分析基坑土体回弹变形的时间效应。

郑刚等<sup>[17]</sup>考虑基坑的降水作用,采用三轴试验模拟了基坑开挖过程中的土体力学性能及变形性状,研究发现降水可以提高土体的力学性能,降水对坑底回弹变形的影响不容忽视。

木林隆等<sup>[18]</sup>考虑土体的小应变特性,基于芝加哥地区基坑工程的监测数据进行反分析,借助于有限元法提出了一种简化计算方法来分析基坑开挖引起的周边土体三维位移场,并将有限元结果和实测数据进行了对比。

郑刚、邓旭等<sup>[19]</sup>采用有限元软件 PLAXIS 建立了考虑土体小应变特性的数值模型,分析了不同围护结构变形模式下的基坑侧方区域深层土体竖向位移和水平位移的特点。

总的来说,国内外关于基坑周围土体位移的研究主要集中在坑内隆起、地表沉降和侧方土体位移等方面,而对坑底面下卧地层内部位移场的研究偏少。国内外学者们提出的估算基坑围护墙及地表沉降的计算方法(Mana 等<sup>[20]</sup>、Kung 等<sup>[21]</sup>)多是基于弹性理论的经验、半经验公式,因此往往带有地域局限性以至于难以推广运用,而且这些方法大都无法用于预测坑底面下卧土层的位移。目前针对基坑下卧地层内部位移还仅限于依赖有限元法的一些规律性探讨,有限元法虽能有效地模拟各种施工工况,但是受制于土体本构关系和输入参数的选择,尚无法达到量化的要求。

## 1.2.2 基坑开挖卸荷引起的下卧隧道变形

### (1) 理论解析方面

刘国彬、侯学渊<sup>[11]</sup>提出了残余应力法,结合软土的卸荷模量来计算基坑开挖对隧道隆起变形的影响,将受开挖扰动范围内隧道位置处的土体隆起变形视为隧道结构的上抬变形;吉茂杰<sup>[22]</sup>考虑开挖的时空影响并结合变形实测分析,对残余应力计算方法进行了修正,推导了考虑隧道隆起时空效应的实用理论计

算公式。残余应力法对基坑卸载后土体隆起变形的计算结果较准确、稳定,但没考虑“隧道-土体”之间的相互作用,导致隧道上抬变形计算结果过于保守。

目前,广泛运用于计算地下开挖引起邻近隧道变形的解析法是两阶段法,其基本思路为:第1阶段计算出开挖引起的隧道位置处土体附加应力或位移;第2阶段将隧道视为一根弹性地基梁,再将第1阶段求得土体附加应力或位移施加于隧道,得出隧道与土体相互作用的变形平衡微分方程,从而求解隧道纵向附加变形及内力。只要参数输入得当,便能得到符合实际的结果。Attewell等<sup>[23]</sup>基于 Winkler 理论提出了一种用于分析地下开挖对管线影响的理论模型;Takagi 等<sup>[24]</sup>采用弹性地基梁法计算管道附加位移时,在考虑土体沉降后,为求解方便,对地基梁的平衡微分方程进行了简化处理,

$$EI \frac{d^4 S}{dy^4} + kSD = kS_p d \quad (1.5)$$

式中  $S$ ——土体沉降量;

$D$ ——管道直径;

$S_p$ ——管道附加位移;

$EI$ ——管道纵向弯曲刚度;

$k$ ——地基基床系数;

$d$ ——管线直径。

陈郁等<sup>[25]</sup>、张治国等<sup>[26]</sup>提出了基于 Winkler 模型的两阶段应力法来分析基坑开挖卸载对下卧地铁隧道附加变形,并与三维数值模拟计算结果进行了对比分析,取得了较好的一致性;张强等<sup>[27]</sup>考虑到黏性土体的流变特性,根据弹性-黏弹性对应原理,基于 Winkler 模型来求解黏性软土中开挖卸荷引起的下方隧道的附加应力和位移。

由于 Winkler 模型仅用唯一的参数——基床系数  $k$  来体现地基刚度,这只是一种粗略的近似。为了获取更加精确与合理的分析模型,一部分学者从弹性半无限空间出发,引入位移或者应力假定来得到地基和隧道附加变形的解析模

型,如 Vlasov 模型<sup>[28]</sup>;另一部分学者则对 Winkler 模型进行了改进,通过增加弹簧参数,提出了能反映地基剪切刚度的双参数 Pasternak 模型<sup>[29]</sup>,周泽林和陈寿根等<sup>[30]</sup>利用 Pasternak 模型探讨了基坑开挖对邻近隧道纵向变形的影响因素;黄栩等<sup>[31]</sup>利用更加复杂的三参数 Kerr 地基梁模型来获得土体卸载所引起的隧道响应,它包含两个弹簧层(刚度分别为  $k_1, k_2$ ) 和一个剪切层(刚度为  $G$ ),并结合实测数据对 Winkler、Pasternak 与 Kerr 等 3 种地基模型的模拟结果进行了详细对比分析。结果显示, Kerr 地基模型更具优越性, Pasternak 模型次之,可作为一种近似选择, Winkler 模型的计算结果则最不理想。

虽然两阶段法具有力学传力机制明确、计算速度快等优点,但第 2 阶段中地基梁模型的选择对结果影响很大,分析中选用的地基梁模型越复杂,结果就越合理,但是计算所需的地基参数就会越多,而如有效地确定各地基参数的取值又成了一个新增难点;此外,该方法在第一阶段中把地基土体视为弹性均质半无限体,无法反映实际层状地层在荷载作用下的土体应力(或应变)的集中(或扩散)现象。

## (2) 数值模拟方面

复杂基坑的施工具有过程性,理论分析方法无法考虑具体施工条件、加固措施和开挖顺序等因素,而数值模拟方法可以有效地模拟基坑的开挖过程和土体非线性影响。随着计算机硬件水平的进步和数值模拟技术的发展,以有限元和有限差分为代表的数值模拟方法在地下工程中得到了广泛运用。

Lo 等<sup>[23]</sup>采用有限元法模拟了多伦多粉质黏土地层中隧道上方基坑开挖,并对隧道的附加位移进行了预测。结果表明,数值模拟方法可对隧道的附加位移进行较准确评估;Marta 等<sup>[33]</sup>提出了一种硬地层中隧道上方基坑施工全过程的二维有限元法数值分析方法,得到的分析结果与现场实测数据基本一致;SHARMA<sup>[34]</sup>报道了新加坡某广场基坑施工对下卧隧道的影响,通过数值模拟研究了隧道变形特征,指出结构刚度大的隧道会承受较大的附加弯矩。

王卫东等<sup>[35]</sup>采用了能反映应力路径的上海软土卸荷模量,依托实际工程

动态地模拟了考虑时空效应的开挖卸荷对地铁的影响。研究表明,土体卸荷模量直接决定了变形结果大小,但卸荷模量的取值具有较强的经验性;高广运等<sup>[36]</sup>以上海市某邻近地铁隧道的基坑工程为背景,运用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对基坑开挖及坑外二次加固工艺进行了三维数值模拟分析。研究发现,既有地下结构物和地基加固体作为异质体具有减小地层位移的屏障作用;黄宏伟等<sup>[37]</sup>采用有限元软件 PLAXIS 中的 HS 硬化本构模型来模拟城市软黏土层,分析了上海外滩通道明挖基坑对下卧已运营隧道附加应力和变形的影响规律;郑刚等<sup>[38]</sup>采用有限元软件 ABAQUS 中的修正剑桥模型分析了天津西青道下沉明挖隧道施工对既有地铁 1 号线的影响并对各种加固保护措施的效果进行了模拟分析。结果表明,提高加固参数能减小地铁隧道接缝间的差异变形,但其加固效果随着参数的增加而减弱,加固参数的设计取值存在一个合理范围;黄兆伟等<sup>[39]</sup>基于土-结构相互作用模型,建立了基坑开挖对下卧地铁隧道影响的三维数值模型,分析了土体加固、分块开挖等隧道变位控制的技术措施效果。分析表明,土体加固技术效果最为明显。

尽管数值方法能有效地模拟隧道-土体相互作用,但各种土体本构模型的复杂性及其适用土质条件,以及土体参数的不确定性等因素,使数值分析目前大多仅用于定性计算与分析。而且该方法建模复杂、计算耗时,限制了其在工程实际中的应用。

### (3) 试验方面

国外方面, M. Devriendt<sup>[40]</sup>和 Burford 等<sup>[41]</sup>报道了伦敦 South Bank 区黏土地层中邻近既有地铁隧道的 The Shell Centre 基坑工程,通过对该地铁隧道变形进行了长达 27 年的监测发现,随着低渗透地层中土体固结过程的缓慢进行,隧道附加上抬变形仍在继续,且南线、北线隧道的监测点上抬位移分别达到 60 mm、50 mm; Kusakabe 等<sup>[42]</sup>在东京工业大学设计了砂土中开挖卸载对邻近管线影响的离心试验模型。结果显示,一般卸载引起的管线变形主要以弹性变形为主,当卸载间距很小时,开挖引起的塑性变形逐渐增大; Kojima 等<sup>[43]</sup>进行了地面加

载、卸载情况下既有隧道变形的室内模型试验研究,发现在砂性土中卸载引起的隧道非线性变形特征明显;G. W. Byun 等<sup>[44]</sup>设计了几组尺寸比例为1:2的大型模型试验工况,模拟了新建基坑附近隧道衬砌应力及上抬变形特征。

蒋洪胜等<sup>[45]</sup>依托上海地铁2号线上方某最小间距基坑工程,监测了施工中的隧道各项变形指标。分析认为,适当加强隧道的纵向柔性可以提高结构抵抗破坏及适应土体变形的能力;韦凯等<sup>[46]</sup>基于上海市大量地铁隧道附加变形实测数据,总结了地铁隧道长期变形的规律,并根据蚁群算法提出了一种分析隧道长期变形的理论模型;孔令荣等<sup>[47]</sup>对多个邻近地铁隧道的基坑开挖引起的隧道变形实测结果进行了系统的分析。研究发现,当基坑与隧道之间的水平间距小于4.0 m时,隧道的侧向位移急剧增大,且隧道位置高于基坑底面时,会产生较大的附加沉降。

魏少伟<sup>[48]</sup>在香港科技大学采用离心机设计了两组模型试验,采用国际通用砂 Toyoura Sand 制备土体,分析了开挖卸荷条件下邻近既有隧道横截面附加内力和变形的分布规律。研究发现,增大土体弹模能有效地减小开挖引起的隧道横截面变形,降低结构附加弯矩;梁发云等<sup>[49]</sup>依托上海市某邻近地铁隧道的深基坑工程,采用离心试验模型,研究了“先挖大基坑、后挖小基坑”施工方式对地铁变形和内力的影响规律;姜兆华<sup>[50]</sup>采用室内模型试验方法研究了基坑开挖对邻近既有隧道结构附加弯矩、土压力及断面内径的影响。试验发现,开挖卸载后衬砌土压力会发生改变,进而导致结构断面发生竖向拉伸、水平收缩的现象,此外,隧道附加土压力与附加弯矩的发展情况一致。

现场监测法得到的内力和变形数据是各种施工因素综合影响的体现,反馈结果可直接用于评价隧道安全情况,但其缺点主要是工作量大、研究周期长且不具备预测性;室内模型试验对于探明卸荷对隧道变形、受力的影响机理具有重要意义,但其存在试验费用高、相似条件不易准确、边界条件和初始条件不易控制等缺点,使其得到的信息有限而大多仅用于定性分析规律性结论。