

● 魏新江 魏纲 丁智 著 ●

# 城市隧道 工程施工技术

**City Tunneling**  
Engineering Construction  
Technique



化学工业出版社

● 魏新江 魏纲 丁智 著 ●

# 城市隧道 工程施工技术

City Tunneling  
Engineering Construction  
Technique



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分析了城市隧道施工过程中引起的土体沉降以及对邻近建筑物、地下管线等的影响,为城市隧道施工建设提供参考。内容包括:盾构隧道施工引起的土体变形规律和计算方法、盾构隧道引起的工后长期沉降预测、浅埋暗挖隧道施工引起的土体变形规律和计算方法、盾构隧道施工对邻近框架建筑物的数值模拟、浅埋暗挖隧道对邻近框架建筑物的影响分析、软土地基隧道施工中建筑物评价标准的建立、城市隧道施工对邻近地下管线的影响分析、平行盾构隧道施工相互影响分析等。

本书可供从事地下工程和隧道工程的工程技术人员在工作实践中参考,也可供高等院校有关专业作为相关课程的教材或相关课程的教学参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

城市隧道工程施工技术/魏新江,魏纲,丁智著.  
北京:化学工业出版社,2011.1  
ISBN 978-7-122-10339-0

I. 城… II. ①魏…②魏…③丁… III. 城市-隧道  
工程-工程施工 IV. U455

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第001177号

---

责任编辑:邹宁

2

责任校对:战河红

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京云浩印刷有限责任公司

880mm×1230mm 1/32 印张7½ 字数216千字

2011年4月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00元

版权所有 违者必究



# PREFACE

# 前言

随着我国城市经济规模的迅速壮大以及人口集中,特别是新老城区之间的交通往来形势严峻,综合考虑工程造价、施工周期以及对周边环境的影响等因素,城市隧道的建设逐渐受到青睐。城市隧道一般指地铁隧道,也包括地下公路隧道、过街隧道、水运隧道与管线隧道等。由于城市隧道一般穿越建(构)筑物密集的区域,隧道施工开挖过程中会引起不同程度的地面沉降和地层移动,影响周围建(构)筑物的安全和正常使用,因此需要对施工过程加以严格控制和管理。

本书结合当前国内众多大城市建设城市隧道的形势,加上作者多年对城市隧道的研究,以理论结合实际,分析了城市隧道施工过程中引起的土体沉降以及对邻近建筑物、地下管线等的影响,为城市隧道施工建设提供参考。本书内容包括:盾构隧道施工引起的土体变形规律和计算方法、盾构隧道引起的工后长期沉降预测、浅埋暗挖隧道施工引起的土体变形规律和计算方法、盾构隧道施工对邻近框架建筑物的数值模拟、浅埋暗挖隧道对邻近框架建筑物的影响分析、软土地基隧道施工中建筑物评价标准的建立、城市隧道施工对邻近地下管线的影响分析、平行盾构隧道施工相互影响的分析等。

本书可供从事地下工程和隧道工程的工程技术人员在工作实践中参考,也可供高等院校有关专业作为相关课程的教材或相关课程的教学参考书。

本书的分工如下:第1章由魏新江撰写;第2章~第4章、第6章、第8章、第9章由魏纲撰写;第5章、第7章由魏新江、丁智撰写。由

于作者水平有限，再加上编写时间仓促，书中内容难免存在缺点和疏漏，敬请读者批评指正！

本书在编写过程中参考了大量文献和相关资料，在此特向所有原作者致以谢意。杭州市重点学科对本书的出版给予了支持，此外浙江大学博士生洪杰、硕士生陈伟军和姚宁参与了文字的录入及编排、校对工作，在此谨向他们致以谢意！

**魏新江**

**2010年11月25日于浙江大学城市学院**

# CONTENTS

# 目录

<b>第 1 章 概述</b>	<b>1</b>
1.1 城市隧道工程发展概况 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 城市隧道施工地层变形预测研究 .....	3
1.2.2 盾构隧道施工引起的地面长期沉降 .....	10
1.2.3 盾构隧道与邻近结构物相互影响 .....	16
1.2.4 暗挖隧道与邻近结构物相互作用 .....	20
1.3 发展趋势及研究展望 .....	25
1.3.1 盾构施工引起的长期沉降发展趋势研究 .....	25
1.3.2 盾构隧道施工对邻近结构物影响的研究 .....	28
1.3.3 暗挖隧道与邻近结构物相互作用的研究 .....	29
参考文献 .....	30
<b>第 2 章 盾构法隧道施工期间引起的土体变形计算方法</b>	<b>36</b>
2.1 盾构施工引起土体变形机理及影响因素分析 .....	36
2.1.1 盾构施工技术环节 .....	36
2.1.2 土体变形影响因素 .....	38
2.2 正面附加推力引起的土体变形计算公式 .....	39
2.3 盾壳摩擦力引起的土体变形计算公式 .....	40
2.4 土体损失引起的土体变形计算方法 .....	42
2.4.1 统一土体移动模型法 .....	42

2.4.2	通用 Peck 经验公式	67
2.4.3	修正 Sagaseta 公式	68
<b>2.5</b>	<b>盾构施工引起的土体变形计算公式</b>	<b>70</b>
<b>2.6</b>	<b>算例分析</b>	<b>71</b>
2.6.1	算例 1	71
2.6.2	算例 2	73
2.6.3	算例 3	75
2.6.4	算例 4	76
<b>2.7</b>	<b>本章小结</b>	<b>78</b>
	<b>参考文献</b>	<b>79</b>

### **第 3 章 盾构法隧道施工引起的工后地面沉降预测 82**

<b>3.1</b>	<b>引言</b>	<b>82</b>
<b>3.2</b>	<b>工后地面沉降的理论解</b>	<b>84</b>
3.2.1	现有理论方法及不足之处	84
3.2.2	本文方法	86
3.2.3	算例分析	89
<b>3.3</b>	<b>时间序列预测</b>	<b>92</b>
3.3.1	时间序列和最小二乘回归分析方法简介	92
3.3.2	用 Excel 进行拟合	93
3.3.3	算例分析	94
<b>3.4</b>	<b>数学模型预测</b>	<b>98</b>
3.4.1	常用数学模型	98
3.4.2	算例分析	99
<b>3.5</b>	<b>神经网络预测</b>	<b>102</b>
3.5.1	径向基函数网络模型	103
3.5.2	算例验证	104
<b>3.6</b>	<b>本章小结</b>	<b>108</b>
	<b>参考文献</b>	<b>109</b>

## 第4章 浅埋暗挖隧道施工引起的土体变形规律及计算方法 112

4.1 引言 .....	112
4.2 暗挖隧道施工引起的土体变形机理分析 .....	116
4.3 暗挖隧道施工引起的横向地面沉降计算公式 .....	119
4.3.1 随机介质理论介绍 .....	119
4.3.2 本文计算公式推导 .....	121
4.3.3 参数取值 .....	122
4.4 算例分析 .....	123
4.4.1 厦门东通道(翔安隧道) .....	123
4.4.2 北京地铁复兴门折返线工程 .....	123
4.4.3 北京地铁4号线工程 .....	124
4.4.4 Heathrow 试验隧道(类型2) .....	125
4.5 本章小结 .....	126
参考文献 .....	126

## 第5章 盾构法隧道施工对邻近建筑物的影响分析 128

5.1 引言 .....	128
5.2 有限元模拟 .....	131
5.2.1 整体基础建筑物工程下数值模拟 .....	131
5.2.2 独立基础建筑物工况下数值模拟 .....	140
5.2.3 桩基础建筑物工况下数值模拟 .....	145
5.3 邻近建筑物工况下地面沉降计算 .....	149
5.3.1 盾构施工对建筑物影响机理分析 .....	149
5.3.2 荷载法的建立及求解 .....	151
5.4 控制措施分析 .....	159
5.4.1 主动控制措施 .....	159
5.4.2 被动控制措施 .....	160
5.5 本章小结 .....	163
参考文献 .....	164



<b>第 6 章 浅埋暗挖隧道施工对邻近建筑物的影响分析</b>	<b>166</b>
6.1 引言 .....	166
6.2 有限元模拟 .....	167
6.2.1 几何模型建立及参数设定 .....	167
6.2.2 有限元模拟步骤 .....	169
6.2.3 初始应力场计算结果分析 .....	169
6.2.4 隧道开挖结果分析 .....	172
6.2.5 地面变形分析 .....	174
6.2.6 建筑物变形分析 .....	177
6.2.7 衬砌受力分析 .....	180
6.3 控制措施分析 .....	182
6.4 本章小结 .....	183
参考文献 .....	184
<b>第 7 章 软土地基隧道施工中建筑物评价标准建立</b>	<b>185</b>
7.1 引言 .....	185
7.2 国内外评价标准 .....	186
7.3 沉降槽宽度参数法评价标准 .....	191
7.3.1 沉降槽宽度参数 $K$ .....	191
7.3.2 沉降槽宽度参数法评价标准的建立 .....	193
7.4 实例分析 .....	195
7.4.1 实例 1 .....	195
7.4.2 实例 2 .....	195
7.5 本章小结 .....	196
参考文献 .....	197
<b>第 8 章 城市隧道施工对邻近地下管线的影响分析</b>	<b>198</b>
8.1 引言 .....	198
8.2 隧道开挖引起的管线变形机理分析和管线控制标准 .....	199
8.2.1 隧道开挖引起的管线变形机理分析 .....	199

8.2.2	管线控制标准	199
<b>8.3</b>	<b>三维有限元模拟</b>	<b>201</b>
8.3.1	有限元建模说明	201
8.3.2	有限元模拟结果分析	204
8.3.3	算例分析	209
<b>8.4</b>	<b>控制措施分析</b>	<b>211</b>
<b>8.5</b>	<b>本章小结</b>	<b>214</b>
	<b>参考文献</b>	<b>214</b>
<b>第9章</b>	<b>平行盾构隧道施工相互影响分析</b>	<b>216</b>
<b>9.1</b>	<b>引言</b>	<b>216</b>
<b>9.2</b>	<b>有限元模拟</b>	<b>217</b>
9.2.1	有限元模型及参数建立	217
9.2.2	有限元模拟结果分析	218
<b>9.3</b>	<b>控制措施分析</b>	<b>224</b>
<b>9.4</b>	<b>本章小结</b>	<b>224</b>
	<b>参考文献</b>	<b>225</b>

# 第1章 概述

## 1.1 城市隧道工程发展概况

随着我国国民经济的快速发展,城市化水平的不断提高,大量的人口不断涌向城市,城市的发展面临着严峻的局势。由于城市化的高速发展,在我国已经形成了城市综合征,主要表现在城市人口超饱和、建筑空间拥挤、城市绿化减少等方面,不解决好城市综合征问题将会严重限制我国社会经济的可持续发展。地下空间,作为人类在地球上安全而舒适生活的补充空间,在经济及土地资源可持续发展战略中占有愈来愈重要的地位。地下空间的有效利用不仅可以解决城市综合征,缓解城市交通问题,而且会带来巨大的经济效益。同时,修建地下设施是城市现代化发展的一个必须途径。因此,修建城市隧道成为加快城市现代化进程的重要一部分,修建城市隧道不仅可以改善交通流量,减轻由于交通拥挤引起的环境压力,而且也保护了城市的风景,把地表的一部分建筑拿到地下,扩大了城市的绿化面积<sup>[1]</sup>。近十多年我国城市轨道交通建设速度迅猛。1995~2008年的12年间,我国建有轨道交通的城市,从2个增加到10个,投资以每年100多亿元的速度在推进。迄今为止,已有10个城市开通了31条城市轨道交通线,运营里程达到835.5km。近期,国务院又批复了22个城市的地铁建设规划,总投资达8820.03亿元。国家发改委基础产业司司长王庆云指出,目前全国有近50个城市达标,我国轨道交通建设未来发展有着巨大

潜力。

目前国内外修建城市隧道的施工方法有盾构法、浅埋暗挖法、明挖法等。暗挖法和盾构法施工虽然对上覆土层扰动较小，但仍不可避免地会对周围土体产生扰动，进而引起土体变形，引起一系列的环境岩土问题。例如：导致地面建筑物倾斜、开裂乃至坍塌，邻近桩基断裂或产生较大沉降，既有隧道或地下管线断裂、破损，道路路面破损等。最近几年，我国地下隧道施工发生过多起严重的事故。2002年，深圳地铁一期工程四号线在施工过程中引发地面塌陷以及邻近建筑物的轻微沉降等问题，对工程产生了重大影响。2003年7月1日，正在施工中的上海轨道交通4号线（浦东南路至南浦大桥）区间隧道浦西联络通道发现渗水，随后出现大量流沙涌入，引起地面大幅沉降，造成3栋建筑物严重倾斜，黄浦江防汛墙局部坍塌并引起管涌。历时8昼夜，造成1.5亿元左右的直接经济损失。2004年9月25日，广州地铁二号线延长段琶洲塔至琶洲区间工地自来水管被压断，引起大量涌水，造成工地的基坑挡土墙急剧变形，基坑北侧及南侧出现局部小范围塌方。以上这些触目惊心的事实值得我们引以为戒。

对城市隧道施工引起的环境效应研究具有非常重要的意义。本书就以下问题展开了一些研究工作：城市隧道在施工中受到哪些力的作用及如何计算；隧道施工引起的土体变形规律如何；如何减小隧道施工引起的工后沉降；如何减少隧道施工对周围土体的扰动；如何最大限度地降低隧道施工对邻近建（构）筑物、地下管线及平行盾构隧道的影响；对受影响的建筑物采取何种保护措施，是加固还是搬迁；如何建立建筑物评价标准体系等。这些问题一直为业主和承包商所关心，同时对落实科学发展观，建设节约型社会，也有重要意义。这些问题的研究涉及：城市隧道施工引起的周围土体变形计算，包括施工期间的土体变形及工后长期沉降；城市隧道施工对邻近建筑物、地下管线和既有隧道的影响分析；软土地基隧道施工中建筑物评价标准建立。有关这方面问题理论的建立和问题的解决将为隧道施工设计合理化和对周围建筑物保护提供科学的理论依据。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 城市隧道施工地层变形预测研究

在软土地层中建造隧道,或多或少对原有土层造成了一定程度的扰动,这是导致地面变形的主要原因。同时由于施工技术、施工质量、周围环境及软土介质的复杂性和不确定性,必然会引起一定量的地层移动和地表沉降。它将影响到邻近建筑物及地下管线的安全,影响周围的环境。随着城市盾构法区间隧道、暗挖法隧道日益增多,而这些一般都穿越建筑物密集、交通繁忙、地下管网密布、地质情况复杂的城市中心地带,施工条件受到限制,因此,能满足一定精度的隧道施工引起的地面变形预测方法愈加受到关注。

基于工程要求,国内外大量的学者也对此展开了很多研究,也取得了很多的成果。纵观软土隧道施工引起的土体变形预测研究方法,可将其分为静态分析法和动态分析法。其中,静态分析法包括以 Peck 理论体系<sup>[2~4]</sup>,考虑弹性、弹塑性和黏弹性的解析法<sup>[5~9]</sup>,理论移植法<sup>[10~25]</sup>及专家系统<sup>[26]</sup>;动态分析法包括各种数值分析法<sup>[27~33]</sup>等。其中 Peck 理论体系是基于 Peck 公式,后经不断改进和完善的公式。理论移植法包括回归分析法、随机介质理论、镜像法等。静态分析法是不考虑时间变化、具体的施工技术(如施工条件、衬砌刚度、衬砌与土层的相互作用及施工中采取的一些辅助措施)及土质情况等众多实际存在的因素,而动态分析法部分考虑其中的一些影响较大的因素综合来预测土层变形,如时间因素,在不同时刻可得到对应时刻的沉降,同时,此变形值也取决于隧道推进时的土质及施工具体细节。

#### 1.2.1.1 静态分析法

##### (1) Peck 理论体系

① 地面横向沉降分布预测 Peck<sup>[2]</sup>基于对隧道施工引起的地面沉降槽性状的观察以及大量实测数据的分析,认为施工中引起的地面沉降是在不排水情况下发生的,所以地面沉降槽体积应等于土体损失的体积,据此,他于1969年在墨西哥土力学及基础工程国际会议上

首次提出了盾构法隧道施工阶段的地面沉降估算公式：

$$S(x) = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1-1)$$

式中， $S(x)$  为离隧道轴线  $x$  距离处的地面沉降量，mm； $x$  为所求沉降点至隧道中心的水平距离，m； $i$  为地面沉降槽宽度系数，即隧道中心至沉降曲线反弯点之间的距离； $V_{\text{loss}}$  为盾构隧道单位长度的土体损失量， $\text{m}^3/\text{m}$ 。

Peck 公式即用误差函数曲线近似表现隧道上方地面沉降槽的曲线，由于此法简单，只要确定两个参数，因而得到广泛的应用。但 Peck 法是基于“土体损失”提出来的，然而在工程实践中，土体损失与各种因素有关，如操作方法、地层条件、地面环境、施工管理等。一般难以准确估计，所以计算精度不高，不能用来做细致分析。因此，国内外许多专家根据具体的情况对 Peck 公式进行修正和完善。

Attewell 亦假定沉降槽的曲线形式为正态分布曲线，并于 1981 年提出了计算最大沉降量的预测公式：

$$S_{\text{max}} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \quad (1-2)$$

$$i = RK \left(\frac{h}{2R}\right)^n \quad (1-3)$$

式中， $K$ 、 $n$  对某一种土来说为一定的常数； $R$  为隧道半径； $i$  意义同式 (1-1)； $h$  为隧道轴线埋深； $V_{\text{loss}}$  为沉降槽的横断面面积， $V_{\text{loss}}$  的取值依土类而定，变化范围很大，所以此法的预测精度并不好。

据实测值计算最大沉降的方法，还有半谷法（1977）、藤田法（1982）、方晓阳在 Peck 法和藤田法基础上提出的 Peck-Fujita 法（1994）等。

② 地面纵向沉降分布预测 Attewell 等（1982）<sup>[3]</sup> 提出采用累积概率曲线公式来计算隧道轴线上方的纵向地面沉降：

$$S(y) = S_{\text{max}} \left[ \Phi\left(\frac{y-y_1}{i}\right) - \Phi\left(\frac{y-y_2}{i}\right) \right] \quad (1-4)$$

式中， $S(y)$  为沿隧道掘进方向坐标为  $y$  处的纵向地面沉降量，m； $y$  为地表面点沿隧道掘进方向的坐标，m； $y_1$  为隧道开挖面推进

起始点,  $m$ ;  $y_f$  为当前隧道开挖面的位置,  $m$ 。 $\Phi$  函数可由标准正态分布函数表查得。

刘建航等 (1991)<sup>[4]</sup> 总结了自 1958 年以来上海等地区的软土隧道施工经验, 根据 Peck 公式的基本原理和国外有关资料, 提出了纵向地面沉降估算公式:

$$S(y) = \frac{V_{l1}}{\sqrt{2\pi i}} \left[ \Phi\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - \Phi\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right] + \frac{V_{l2}}{\sqrt{2\pi i}} \left[ \Phi\left(\frac{y-y'_i}{i}\right) - \Phi\left(\frac{y-y'_f}{i}\right) \right] \quad (1-5)$$

式中,  $S(y)$  为纵向地面沉降量,  $m$ ;  $y$  为沉降点至坐标轴原点的距离,  $m$ ;  $y_i$  为盾构推进起始点至坐标轴原点的距离,  $m$ ;  $y_f$  为盾构隧道开挖面至坐标轴原点的距离,  $m$ ;  $y'_i = y_i - L$ ,  $y'_f = y_f - L$ ;  $L$  为盾构机的长度,  $m$ ;  $V_{l1}$  为盾构开挖面引起的土体损失 (欠挖时为负),  $m^3/m$ ;  $V_{l2}$  为开挖面以后因盾尾空隙压浆不足及盾构改变推进方向为主的所有其他施工因素引起的土体损失,  $m^3/m$ 。

该公式适用于不排水条件下, 式中  $V_{l1}$  和  $V_{l2}$  值较难准确确定, 只能凭经验决定开挖面是否出现“负土体损失”, 从而反映是否出现地面隆起, 与施工参数无关, 因此存在欠缺。

经验法是基于实际观察和大量数据的总结得出的, 它给出了地表沉降和影响范围的估算方法, 可作为设计和施工的参考。但是, 经验法是在不排水的前提下, 考虑到“土体损失”的基础上提出的, 而“土体损失”是一个经验参数, 施工前很难确定, 只有通过反算和合理假设才能得到, 故其使用有一定的限制。同时, 无法考虑地层的详细信息, 也无法考虑施工的具体措施和细节, 更不能得到时间与地层移动和变形间的依赖关系。因此, 其计算值与实测值一般相差较大, 在实际的应用中也受到限制。

## (2) 弹性、弹塑性和黏弹性理论解析解

考虑地基土层的变形特点, 许多学者将地基土作为弹性、弹塑性和黏弹性体考虑。陶履彬、侯学渊<sup>[5]</sup> 采用轴对称的平面应变弹性理论分析了圆形隧道的应力场和位移场。日本的久武胜保<sup>[7]</sup> 研究了圆形隧道的非线性弹塑性的理论解, 将土体作为弹塑性和黏弹性材料, 反映了土体的非弹性性质, 并考虑了地层位移与时间的相关性。

Bobet(2001)<sup>[7]</sup>提出了饱和土体中浅埋隧道土体变形的二维解析预测方法,该方法假定与隧道轴线垂直的横截面为平面应变条件,土体为多孔弹性材料、衬砌(管道)是弹性的。采用该方法可以求得连续体内任一点的短期或长期的应力和变形。假设条件为:(a)半径为 $r_0$ 的圆形隧道;(b)与隧道轴线垂直的横截面为平面应变条件;(c)土体与衬砌之间的接触面是无摩擦的(例如盾构法隧道);(d)隧道埋深与半径比大于1.5;(e)土体为均质、各向同性;(f)衬砌厚度 $t$ 较小;(g)土体渗透性很小,假定在施工期间没有超孔隙水压力消散。

Chou(2002)<sup>[8]</sup>采用Bobet(2001)<sup>[7]</sup>提出的饱和土体中浅埋隧道土体变形的解析预测方法,与28条隧道的实测数据进行了对比。计算结果与实测值相当吻合,一般误差在15%的范围内。分析结果表明:(a)绝大多数土体移动是由间隙参数 $g$ 引起的, $g = G_p + U_{3D} + \omega$ ,包括隧道开挖面的三维土体变形、盾尾建筑空隙和人为因素;(b)绝大多数土体变形发生在隧道周围3~4倍半径的范围内;(c)垂直向变形为零的底部边界应该放在隧道轴线下2倍的隧道直径处,或者在最先开始的一层坚硬土层处;(d)隧道周围的水平向移动要明显地小于垂直向移动;(e)解析计算方法往往低估最大土体变形量而高估沉降槽宽度,然而,当有适当的间隙参数估计值和少量土体屈服时,预测值与实测值的差别就很小。

Park(2004)<sup>[9]</sup>提出了预测软土中浅埋和深埋隧道引起土体变形的二维弹性解,隧道平面周围位移边界条件采用椭圆形的土体移动模式。研究了采用均匀径向和椭圆形土体移动模式引起的地面和深层土体沉降和水平向变形的区别。作了5个算例分析,结果表明计算值与实测值有较好的一致性。

由于受计算条件的限制,只能对较简单的边界条件和初始条件求出解答,所以这些方法几乎无一例外地将地层假定为均匀的、轴对称的平面应变问题,使其应用受到极大的限制。

### (3) 理论移植法

① 随机介质理论模型 刘宝琛等<sup>[10]</sup>在随机介质概念的基础上建立了横向和纵向地表沉降槽预测公式。随机介质理论是把地层移动看成一个随机过程,并用柯莫哥洛夫方程表示。朱忠隆<sup>[11]</sup>、施成华<sup>[12]</sup>



也运用随机介质理论对具体情况分析,推导出了隧道施工引起的纵向地表沉降简化公式。时亚昕<sup>[13]</sup>运用随机介质理论,推导出了任意圆弧段开挖引起的地表移动及变形公式,从而实现了各种断面形状、多孔隧道及其分部开挖引起的地表移动及变形预测。

② 模糊数学模型 孙洪涛<sup>[14]</sup>应用 Fuzzy 概率测度理论,推导出了计算地下隧道开挖引起的地层移动变形的 Fuzzy 概率公式,并依此进行了变形分析预测。

③ 随机理论模型与模糊数学模型结合 李建华<sup>[15]</sup>采用模糊-随机理论以预测盾构引起的地层移动。基于随机理论、随机有限元、模糊概率测度和数理统计方法,对软土盾构隧道中的地层移动问题进行了比较深入的探讨。

④ 镜像理论 Sagaseta(1987)<sup>[16]</sup>对近地面以下某深度处由于土体损失引起的不可压缩性土体的应变场进行了分析,采用绝对位移作为变量来求解地面以下土体的位移场和应力场。假定土体是不可压缩的均匀弹性半无限体,采用一个镜像源来消除无限介质情况下产生的虚拟边界条件。

文献 [17] 中 Schmidt 对 Sagaseta 提出的公式表示了质疑,认为采用该公式计算得到地面沉降槽宽度要明显大于实测值, Sagaseta (1988)<sup>[17]</sup>对该讨论作了回复,对横向地面沉降计算公式作了修正。

Verruijt 和 Booker(1996)<sup>[18]</sup>利用 Sagaseta(1987)<sup>[16]</sup>提出的“镜像法”,假定土体是线弹性材料,认为隧道变形机理主要是隧道表面土体的等量径向位移和长期的隧道椭圆化变形,采用半弹性平面方法,得到土体垂直位移  $U_z$  和土体水平位移  $U_x$  的理论计算公式。

Loganathan 和 Poulos(1998)<sup>[19]</sup>采用椭圆形非等量土体移动模式,利用 Lee 等 (1992)<sup>[20]</sup>提出的等效土体损失参数  $g$ ,对 Verruijt 和 Booker(1996)<sup>[18]</sup>提出的短期计算公式进行了修正。

陈枫等 (2004)<sup>[21]</sup>在 Sagaseta 提出的基于土体损失引起的地面沉降理论基础上,结合工程实际情况,提出了模拟盾构推进过程的三维土体损失模式,并推导了相应的地面位移计算解析公式。但是该公式相当复杂,且参数须由已知的地面沉降值采用回归反分析方法获得,在施工前无法预测,使其应用受到限制。

姜忻良等 (2005)<sup>[22]</sup>根据土体损失的空间分布规律,应用镜像法