

浅埋隧道施工地层变形时空统一 预测理论与应用

施成华 彭立敏 雷明锋 著



科学出版社

www.sciencep.com

浅埋隧道施工地层变形 时空统一预测理论与应用

施成华 彭立敏 雷明锋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书紧密结合我国快速发展的城市地铁、各种市政浅埋隧道施工中所遇到的周边构筑物保护问题,考虑隧道开挖上部地层移动与变形的时间-空间发展过程,系统阐述了浅埋隧道矿山法施工、盾构法施工、隧道施工降水引起的地层移动与变形的计算方法以及浅埋隧道施工地层变形的可靠性计算方法,并通过多个工程实例的计算分析,验证了计算方法的可靠性,进一步从理论角度探讨了隧道施工地层变形的主要影响因素及其影响程度,分析了浅埋隧道施工地层变形的时空变化规律,为进一步的地层变形的控制提供了依据。

本书可供从事隧道工程和地铁工程方面的设计、施工、研究人员参考,也可供隧道工程、岩土工程等专业的高等学校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

浅埋隧道施工地层变形时空统一预测理论与应用/施成华,彭立敏,雷明锋著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029236-0

I. ①浅… II. ①施… ②彭… ③雷… III. ①浅埋隧道-隧道工程-工程施工-施工技术 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 200643 号

责任编辑:任加林/ 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](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

*

2010年11月第 一 版 开本·B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张 11 3/4

印数:1—2 000 字数 226 800

定价:38.00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 010-62132124(VA03)

版权所有,侵权必究

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

前 言

随着我国基础设施建设的快速发展,城市地铁、各种市政浅埋隧道也得到了大量发展,浅埋隧道施工引起的地表变形及其对周边建筑管线设施的影响问题也越来越引起人们的重视。隧道施工引起的地层移动与变形具有典型的时间效应和空间效应,地层任意点的移动过程是时间和空间的连续函数。仅仅对隧道施工完成后的地表变形进行研究所得出的结论往往与工程实际情况不相适应,也不能满足当前隧道工程建设的需要,因此也必要对隧道施工过程中地层变形的计算方法进行研究,了解地层移动的内在变化过程 and 变化规律,从而确保浅埋隧道施工过程中周边建筑管线设施的安全。

本书在消化吸收已有浅埋隧道施工地层变形相关研究成果的基础上,从隧道施工引起的地层移动与变形的机理出发,以随机介质理论为基础,并结合土体固结压密理论以及 Mindlin 弹性理论,考虑隧道开挖地层移动与变形的时间-空间发展过程,系统地对浅埋隧道矿山法及盾构法施工引起的地层移动与变形的相关问题进行了研究。在结构体系上,全书分成理论计算方法和计算实例与应用两大部分。理论部分主要推导了能考虑多种不同施工影响因素的地层变形时空统一计算公式,隧道施工过程中地下水位随隧道施工不断变化时地层变形的时空统一计算公式,盾构推进工作面附加压力以及盾构机外壁与土层摩擦力作用下隧道周边地层变形的时空统一计算公式,并将可靠度理论、随机介质理论与其他相关理论相结合,建立了隧道施工地层变形的可靠性计算方法。在算例分析和工程应用方面,对多个浅埋隧道工程实例进行了计算分析,进一步从时空效应角度讨论了隧道纵向施工分部前后间距,对向、背向施工,横断面施工分块,施工掘进速度,地下水位降深,降水井距隧道距离,盾构隧道工作面附加压力、壳壁与土层摩擦力等施工因素影响下地层变化的变化规律等进行了研究,为隧道施工中采取工程措施控制地层变形,保护隧道周边建筑管线设施的安全提供了依据。

本书在完成过程中得到了第一作者的博士生导师刘宝琛院士的悉心指导和认真审阅,在此作者向他致以最诚挚的谢意。本书完成过程中,参考了国内外同行的有关论文、著作,引用和借鉴了他们的研究成果,在此一并表示感谢。

鉴于作者的水平及认识的局限性,书中难免还会存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 目的与意义	1
1.2 隧道施工地层变形的时空效应及变形机理	2
1.2.1 地层移动与变形的时空效应	2
1.2.2 地层移动与变形的理论基础	4
1.3 隧道施工地层变形预计方法研究综述	6
1.3.1 经验公式法	6
1.3.2 理论解析法	9
1.3.3 数值分析法	10
1.3.4 模型试验法	12
1.3.5 神经网络与灰色预测方法	13
1.3.6 随机介质理论方法	14
1.3.7 城市隧道施工地层变形研究存在的问题及发展趋势	15
1.4 本书主要内容	16
第二章 矿山法施工隧道地层变形的时间-空间过程	18
2.1 单元开挖引起的地层变形	18
2.1.1 单元开挖引起的地层下沉	18
2.1.2 单元开挖引起的地层水平移动	20
2.1.3 单元开挖引起的地层其他变形	22
2.2 隧道开挖引起的地层变形	25
2.2.1 隧道施工地层变形的时间过程	25
2.2.2 隧道施工及停工时地层变形时空过程的统一计算	30
2.2.3 考虑隧道反复施工、停工的地层变形时空过程的统一计算	33
2.2.4 考虑隧道掘进速度变化时地层变形时空过程的统一计算	34
2.2.5 考虑隧道地质条件变化时地层变形时空过程的统一计算	36
2.2.6 隧道分部施工时地层变形时空过程的统一计算	37
2.2.7 多隧道施工时地层变形时空过程的统一计算	40
2.2.8 半无限开挖情况下地层变形时空过程的计算	43
2.3 地层变形计算基本参数及其反分析方法	44

2.3.1	隧道施工洞内地层损失的确定	44
2.3.2	下沉速度系数 C 值的确定	46
2.3.3	隧道施工地层变形基本参数的反分析方法	46
2.4	隧道开挖空间的具体计算	48
2.4.1	圆形开挖横断面	49
2.4.2	椭圆形开挖横断面	50
2.4.3	马蹄形开挖横断面	51
2.4.4	任意开挖横断面	52
2.4.5	隧道开挖变形空间的简化计算	53
2.5	考虑隧道施工多因素影响的地层变形时空统一计算公式	54
第三章	隧道疏水地层变形的时间-空间过程	60
3.1	岩土疏水引起的地层有效应力的变化	60
3.2	单元疏水引起的地层变形	63
3.3	隧道降水及开挖引起的地层变形	65
3.3.1	井点降水引起的地层变形	65
3.3.2	降水漏斗曲线的确定	69
3.3.3	隧道开挖引起的地层变形	70
3.3.4	水位恢复后地层的回弹	71
3.3.5	降水及开挖引起的总地层变形	72
3.4	隧道开挖及失水引起的地层变形	72
3.4.1	开挖失水引起的地层变形计算	72
3.4.2	隧道开挖引起的地层变形	76
3.4.3	隧道开挖及失水引起的地层总变形	76
第四章	盾构法施工隧道地层变形的时间-空间过程	77
4.1	盾构施工地层沉降的组成	77
4.2	盾构推进工作面推力及壳壁摩擦力引起的地层变形	79
4.2.1	盾构推进的力学模型及假定	79
4.2.2	盾构正面推力与盾壳摩擦力的取值	79
4.2.3	Mindlin 公式	80
4.2.4	盾构推进工作面推力引起的地层变形	80
4.2.5	盾构外壁与土层之间的摩擦力引起的地层变形	85
4.3	盾构法施工引起的地层变形	89
4.3.1	隧道开挖引起的地层变形	89
4.3.2	盾构隧道开挖失水引起的地层变形	92
4.3.3	盾构法施工引起的总地层变形	92

4.4	盾构施工地层损失的确定	92
第五章	基于时空统一预测理论的地层变形可靠性计算	94
5.1	概述	94
5.2	可靠性分析的基本理论	95
5.3	隧道施工地层变形可靠度的计算	97
5.3.1	抗力效应 R	97
5.3.2	荷载效应 S	98
5.4	计算参数的蒙特卡罗试验法	98
5.5	蒙特卡罗-随机介质法的实施	99
第六章	计算软件的编制及工程实例分析	101
6.1	软件系统设计简介	101
6.1.1	软件的设计语言	101
6.1.2	软件系统的设计方法	101
6.1.3	软件系统的功能	102
6.2	柳州桐油山隧道计算实例	103
6.2.1	工程概况	103
6.2.2	计算结果及分析	104
6.3	深圳地铁大科区间隧道计算实例	119
6.3.1	工程概况	119
6.3.2	计算结果及分析	121
6.4	南京地铁许南区间隧道计算实例	125
6.4.1	工程概况	125
6.4.2	计算结果及分析	126
6.5	上海地铁区间隧道计算实例	131
6.6	小结	134
第七章	基于时空统一预测理论的地层变形可靠性计算实例	136
7.1	矿山法施工隧道地层变形可靠性计算分析	136
7.1.1	计算参数的确定	136
7.1.2	横断面地层变形的概率分布	137
7.1.3	纵断面地层变形的概率分布	140
7.1.4	可靠度计算结果及分析	143
7.2	盾构法施工隧道地层变形可靠性计算分析	146
7.2.1	计算参数的确定	146
7.2.2	盾构施工地层变形的概率分布	147
7.2.3	可靠度计算结果及分析	150

7.3 小结	153
第八章 隧道施工地层变形的影响因素分析	154
8.1 隧道纵向施工工序对地层变形的影响分析	154
8.1.1 单隧道对向和背向施工对地层变形的影响	154
8.1.2 盾构隧道对向施工对地层变形的影响	157
8.1.3 隧道不同开挖分部纵向间距对地层变形的影响	159
8.2 隧道横断面施工分块对地层变形的影响分析	161
8.3 隧道施工速度对地层变形的影响分析	164
8.4 隧道施工降水对地层变形的影响分析	165
8.4.1 隧道施工降水深度对地层变形的影响	166
8.4.2 降水井距隧道的距离对地层变形的影响	168
8.5 盾构隧道施工参数对地层变形的影响分析	170
8.5.1 工作面附加推力对地层变形的影响	170
8.5.2 壳壁与地层的摩擦力对地层变形的影响	172
8.6 小结	174
参考文献	177

第一章 绪 论

1.1 目的与意义

随着我国城市建设的快速发展,城市规模不断扩大,城市人口密度持续增长,许多大城市存在人口膨胀、建筑空间狭小、城市绿化减少、交通拥挤、环境污染等一系列问题,其中交通阻塞已成为我国许多城市的突出问题。一方面经济与社会的发展对城市集约化程度和提高效率要求越来越高;另一方面城市建设迅速发展的结果使得城市市区可供利用的地面面积越来越少。要解决城市建设与土地资源不足的矛盾,以促进城市的可持续发展和环境保护,合理地开发利用地下空间是一条非常有效的解决这些问题的途径。

1863年,英国伦敦建成了世界第一条地铁,此后各国开始大力发展城市地铁建设。城市地铁安全可靠、方便、舒适,少占用城市土地,不破坏地面景观,能够快速大量的输送乘客,极大的缓解城市交通拥挤问题。目前国外很多大城市都已经形成了四通八达的地下交通网线,如纽约的地铁长度达到416.3km,伦敦为414km,莫斯科为270km,东京为200km,另外有许多大中城市正在修建或续建地铁。总之,向地下发展,建设地下交通网线是城市发展的一种趋势。

我国自1965年开始在北京修建地铁,至今已有北京、天津、上海、广州、深圳、南京等城市的地铁线路投入运营,这些地铁线路的开通极大地缓解了交通拥挤状况。正在修建地铁的城市有成都、青岛、重庆、沈阳、武汉等。此外,国家已经批准和正在筹建地铁的还有杭州、西安等20多个城市,因而城市地铁的建设将是我国21世纪城市地下空间开发的重点^[1]。与此同时,市政公路隧道、各种市政地下工程在城市中也获得了大量发展。随着城市现代化程度的提高,各种管线种类和密度将会大量增加,为消除城市上空电线、电杆盘旋的状况,提高城市的抗灾能力,城市电缆隧道、市政管线共同沟等必将越建越多。

1998年,中国工程院正式立项研究中国地下空间的开发与利用。该立项报告指出:城市交通阻塞、空气污染,生存空间已经面临危机,要把地下空间的开发与利用提高到人类发展的战略高度来考虑。因此,人们已经逐渐将地下岩土体作为一种新的国土资源,把对地下空间的开发利用作为解决人口、环境、资源危机的重要措施,隧道工程必将有更大的发展。

隧道工程施工是在岩土体内部进行的,施工不可避免地会对岩土体产生扰动,

引起隧道周边岩土体的移动与变形。城市隧道工程的显著特点是埋深浅,围岩软弱,地质条件差,地表建筑物及地下管线密集,多数地区地下水水位较高。城市浅埋隧道工程的这些特点决定了隧道施工中可能会产生较大的变形,并传递至地表。地表建筑物及地下管线设施可以承受的地表变形是有限的,随着变形的发展,建筑物及其他设施与地基之间的原有平衡被打破,在原有建筑物中会产生附加应力,这就会影响地面建筑物的安全及地下管线的正常使用,严重时会使它们遭到破坏,引起一系列岩土环境问题,从而造成严重的经济损失,国内外已有较多的这方面的工程实例,上海地铁建设中就曾出现了隧道上部地层塌陷的严重工程事故。目前人们的环保意识不断增强,市区隧道施工引起的地表位移与变形及其对周围环境的影响问题已经越来越引起人们的重视。为控制和减少由于隧道施工引起的地层移动和变形,降低它们对地面建筑物及地下设施所造成的损害以及对周围环境的不良影响,必须对隧道施工引起的地层移动和变形问题进行研究,并提出较为可靠的预计和控制方法^[2]。

如何减少浅埋隧道施工对周围地层的扰动程度,最大限度的降低隧道施工对邻近建筑物及管线的影响,以及对受影响的建筑物如何采取保护措施,是加固还是搬迁等,一直是业主和承包商们所关心的问题。浅埋隧道施工引起的岩土体的移动和变形与很多因素有关。在隧道的埋深、断面尺寸及地层条件等影响因素确定的情况下,施工方法以及支护方式对隧道周边岩土体的变形有很大的影响,合理的施工方法和施工工序可以有效的减小和控制地层的变形,从而有效的保护地表建筑及地下管线设施。同时,在施工过程中,根据预计结果和实测结果的对比,可为进一步采取工程措施,控制地层的移动和变形提供依据。因此在浅埋隧道开挖施工中,通过对地层变形的时间-空间发展规律进行研究,对进一步实行隧道施工的动态调整与控制,具有非常重要的意义。

1.2 隧道施工地层变形的时空效应及变形机理

1.2.1 地层移动与变形的时空效应

隧道施工引起的地层移动与变形,其发展规律随隧道开挖工作面所处的位置、历经的时间、地层与隧道工作面的相对位置等的不同而变化,表现出强烈的时空效应,时间与空间的交互作用,反映了隧道施工地层移动与变形的发展规律和特征。

1. 地层移动的时间效应

通过对隧道施工地表沉降进行实际观测,可得沿隧道纵向轴线所产生的地表变形的一般规律如图 1.1 所示。地表点的变形经历三个阶段,即前期变形阶段、施

工变形阶段和后续变形阶段。前期变形是指隧道开挖工作面尚未到达该点时的变形,它是由于工作面支护力不足等原因,导致工作面前方岩土体向后向下移动,在地表表现为微小下沉。在施工阶段,由于隧道开挖,隧道周边的岩土体必然向隧道内移动,一方面隧道开挖后不可能马上提供支护,另一方面支护也不可能完全阻止地层向隧道内的变形,在此阶段地表必然出现较大的下沉,这一阶段的下沉通常在1个月左右完成。在隧道开挖工作面通过后的很长一段时间内(有时在几年以上),地表下沉仍在不断发展,这部分变形属于后续变形,这主要是由于岩土体的次固结沉降和蠕变变形引起的。

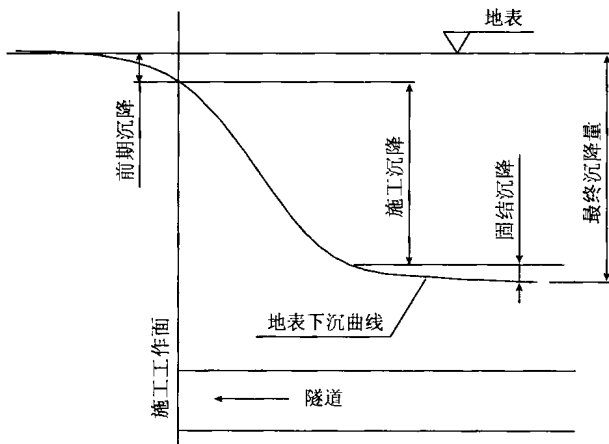


图 1.1 隧道开挖地表变形的一般规律

因此,隧道施工引起的地层变形从开始到最终稳定需要经历很长一段时间。在这个过程中,地层变形随隧道的开挖掘进不断发生变化,有时变形的性质(如拉伸变形和压缩变形等)还会发生改变。对于隧道周边的地表建筑物及地下管线而言,如果单从最终稳定的移动盆地看,所受到的变形均有可能在允许范围之内,但如果从隧道掘进的过程来看,则建筑物及管线所受到的变形有可能超过其允许范围。

2. 地层移动的空间效应

隧道施工所引起的地层移动在空间上具有三维性,它随着隧道工作面的推进沿隧道纵向不断向前发展,出现的地表沉陷槽也随之扩大和发展。地层的空间移动状况如图 1.2、图 1.3 所示。

隧道开挖引起的地层的空间移动具有如下规律:

- 1) 地层移动以隧道开挖工作面为起始点向上向前或侧向上扩展,其影响范围

自隧道位置起从下到上逐渐增大,具有扩散性。

2) 沿竖向地层移动量的大小与距隧道工作面的距离有关,在衬砌的拱顶,下沉量最大,随着与隧道工作面距离的加大,下沉量逐渐减小,具有衰减性。

3) 隧道施工引起的沉降槽在地表面上产生的沉降等高线呈锥形,锥尖顺着隧道前进的方向。随着隧道工作面的向前延伸,锥形沉降等高线向前扩展。

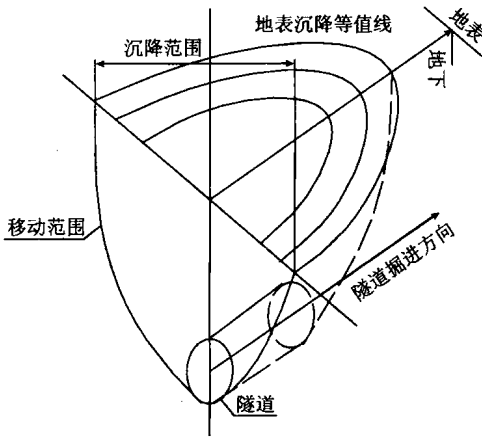


图 1.2 地层变形的空间形态

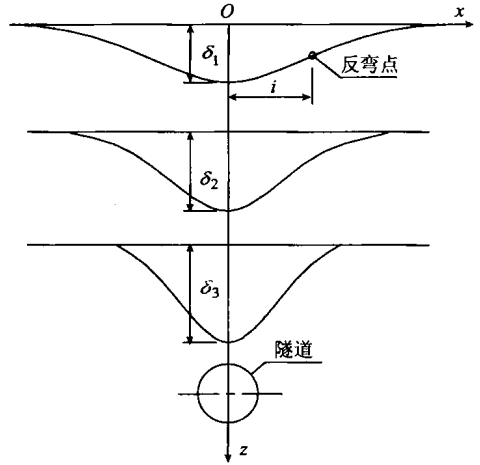


图 1.3 横向断面地层沉降形状

1.2.2 地层移动与变形的理论基础

地球表层岩土体以及地表变形,乃是亿万年地质构造运动作用的产物,在隧道开挖施工之前,它们处于平衡状态,极为缓慢的大陆漂移及造山运动对工程的影响可以忽略不计。由隧道施工引起的地层移动与变形主要体现在以下几个方面。

1. 地层损失理论

美国的 Peck^[3]在对隧道施工引起的大量地表沉陷数据进行分析的基础上,首先提出了地表沉降槽似正态分布以及地层损失的概念。他认为地层移动由地层损失引起,并认为隧道施工引起的地表沉降是在不排水条件下发生的,所以地表沉陷槽的体积应等于地层损失的体积。

地层损失是指隧道施工掘进过程中,实际开挖土体体积与竣工隧道体积(包括隧道周边包裹的压入浆体体积)之差。隧道作为土体在弥补地层损失的过程中,必然导致地层移动,从而引起地表沉降。该法的理论基础是:在隧道施工过程中产生了一定的地层损失,相当于从地层中挖去一块岩土体,形成一个空洞,从而导致上部的岩土体产生移动和变形,最终该空洞被填充,而在地表则形成体积等于空洞体

积的沉降槽。该理论在不排水固结的条件下,对隧道施工期间的变形做出了较为满意的解释。

隧道开挖施工所引起的地层损失是多种因素作用的结果,隧道开挖卸载时开挖面岩土体会向隧道内移动,隧道支护结构刚度偏低从而在围岩压力的作用下产生变形,支护结构的未及时闭合造成的围岩的挤入,隧道支护结构背后存在一定的空隙,隧道施工方法不当造成的围岩失稳以及隧道结构的整体下沉等都会产生地层损失,并最终导致地层发生移动和变形。

2. 孔隙水压力及固结压密理论

土体是由土颗粒(固相)、气体(气相)和水(液相)所组成的三相体系,土体介质的力学行为受土体颗粒间压力、孔隙水压力及气压力的控制。在含水地层中进行隧道施工时,地层中的地下水位会产生变化,当土体颗粒骨架之间的孔隙水逐渐被排出,地层中的地下水位降低时,会引起土体内部孔隙水压力的降低,而土体颗粒间的应力,即有效应力相应会增加。

假定地表下某深度处地层总应力为 σ ,有效应力为 σ' ,孔隙水压力为 p ,根据太沙基有效应力原理,地下水位下降前应满足

$$\sigma = \sigma' + p \quad (1.1)$$

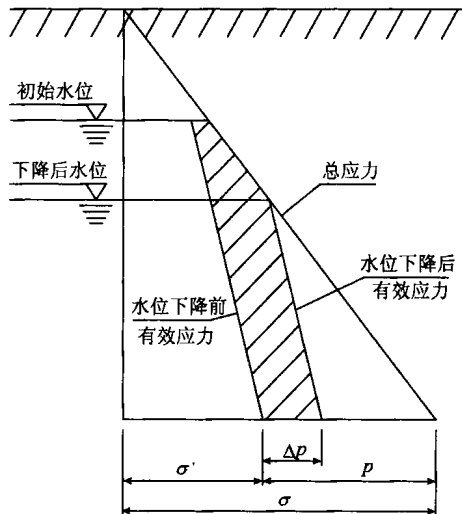


图 1.4 水位下降前后土中有效应力的

随着地下水位的下降,孔隙水压力也随之减小,在降水前后地层中的总应力应保持不变,孔隙水压力的减少量 Δp 相应转化为粒间有效应力的增加量 Δp (如图 1.4所示),因此有

$$\sigma = (\sigma' + \Delta p) + (p - \Delta p) \quad (1.2)$$

土层有效应力的增加相当于在降水地层上方施加了一有效外荷载,在这种外载的作用下,地层相应会产生固结压密,降水范围内土体的固结压密向上传播并进行叠加,导致了地层的移动和变形,传递到地表,便形成了地表沉降槽。

3. 次固结沉降理论

隧道开挖以及降水必然会对地层产生或大或小的扰动,在这种扰动作用后,土体骨架还会发生持续很长时间的压密变形,在土体蠕变过程中产生的沉降成为次固结沉降。在孔隙比和灵敏度较大的软塑和流塑性黏土中,次固结沉降往往要持续几年以上,且其所占总沉降的比例也较大;而在一般性地层中,次固结沉降所占比例较小。

1.3 隧道施工地层变形预计方法研究综述

地层变形包括了地层下沉、水平位移以及由不均匀地层沉降和不均匀水平位移所形成的地层倾斜和水平变形,以及地层的弯曲变形。城市隧道施工引起的地层变形,尤其是在地面建筑设施密集的城市中进行的隧道施工,一直是人们十分关心的课题。国内外科技工作者对地层变形的预计也发展了很多方法,主要有建立在现场实测资料基础上的经验公式法、以理论分析为基础的解析模型法、以有限元计算为主要手段的数值分析方法,建立在模型试验基础上的物理模型法等,近年来,神经网络方法和随机介质方法也开始在隧道开挖地层变形预计中得到应用。

1.3.1 经验公式法

经验公式法主要是根据隧道开挖后地表沉降槽的形状,认为可以采用一定的曲线形式表示,再根据地表沉降实测结果或已有的资料,确定曲线的具体特征参数。在隧道施工引起的地层移动和变形中,地表沉降的大小和分布是最受关注的。

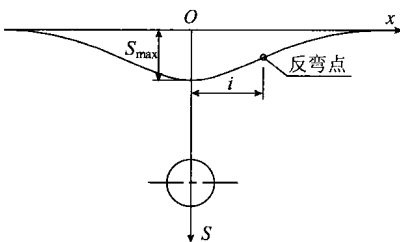


图 1.5 地表横向沉降

美国的 Peck 较早对隧道施工引起的地面沉降问题进行了研究,在对大量隧道开挖地表沉降的实测数据进行分析的基础上,他于 1969 年系统地提出了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^[3]。此后,Peck 本人及其他学者和工程技术人员做了大量工作,使之成为目前应用最为广泛的预计隧道施工地表沉降的方法。Peck 认为在不排水的情况下,地表沉降槽的体积应等

于地层损失的体积,并假定地层损失在整个隧道长度上均匀分布,隧道施工所产生的地表沉降的横向分布近似为一正态分布曲线,由此提出地表沉降横向分布的预计公式为(如图 1.5 所示)

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1.3)$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i \sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (1.4)$$

式中, $S(x)$ 为距离隧道中心轴线为 x 处的地表沉降(mm); S_{\max} 为隧道中心线处的地表最大沉降(mm); i 为地表沉降槽宽度系数(m),也即隧道中心至沉降曲线反弯点的距离; V_i 为施工引起的隧道单位长度的地层损失(m^3/m),也即隧道施工中实际开挖的岩土体的体积与竣工隧道的体积之差。

式(1.3)和式(1.4)中,需要确定 i 和 V_i 两个参数,这些参数与隧道开挖深度、断面尺寸、地层条件和施工条件等密切相关,Peck 及其他学者对参数的取值进行了大量研究,给出了不同地层及不同埋深条件下对应的地表沉降槽宽度系数 i 的经验取值。

竹山乔^[4]根据日本盾构施工中积累的实际数据,将地面沉降通过回归曲线分析,提出按经验公式估算地表最大沉降为

$$S_{\max} = \frac{2.3 \times 10^2}{E^2} \left(21 - \frac{H}{D}\right) (\text{mm}) \quad (1.5)$$

式中, E 为平均变形模量(MPa); H 为覆土厚度(m); D 为盾构外径(m)。

加拿大的 Rowe 和 Hack 提出了用间隙值来模拟地层损失,间隙值与地层损失的关系为

$$V_i = \frac{\pi}{4} [(D_m + g)^2 - D_m^2] \quad (1.6)$$

式中, D_m 为隧道外径(m)。

英国是世界上最早修建地下铁道的国家,对地铁等浅埋隧道施工地表沉降问题研究较多。1974年 Clough 和 Schmidt 在其关于软黏土隧道工程著作中^[7],提出饱和含水塑性黏土中的地面沉降槽宽度系数 i 可由如下公式求取,即

$$i = R \left(\frac{Z}{2R}\right)^{0.8} \quad (1.7)$$

式中, Z 为地表至隧道中心的深度(m); R 为隧道半径(m)。

1981年英国的 Attewell 等也假定沉降槽曲线为正态分布,并给出了地面沉降槽宽度系数 i 的计算公式为^[6]

$$i = KR \left(\frac{Z}{2R}\right)^n \quad (1.8)$$

式中, K 、 n 为与土体性质和施工因素有关的系数。

1982 英国 O' Reilly 通过对英国黏性土(19 例)、砂性土和回填土(16 例)的沉降槽宽度、最大沉降量及沉降槽体积的实测值进行分析,认为沉降槽宽度与隧道直径没有什么关系,但与隧道埋深关系密切,并给出沉降槽宽度与隧道埋深的统计关系式为^[7]

$$i = KZ \quad (1.9)$$

式中, K 为与土性有关的系数,对于砂性土, $K = 0.2 \sim 0.3$, 对于黏性土, $K = 0.4 \sim 0.7$ 。

同时, O' Reilly 等还根据单孔隧道地表沉降结果,按照叠加原理,得到了双孔隧道开挖引起的地表沉降的计算公式。

1988 年 Attewell 等人还将地表横向沉降曲线的研究成果推广到三维情况,通过假定横向地表沉降为一正态分布曲线,纵向分布为二次抛物线形态,得到了隧道施工引起的三维地表沉降计算公式^[8]。

1992 年 Eisentein 等研究了泥水平衡盾构施工技术对地层的影响以及地层的反应曲线^[9]。

Fang 等 1992 年在实测了台北污水管道施工中的地面沉降后,得出沉降的极大部分发生在盾构通过后的前 4 天内,而最终的沉降槽形状类似于 Peck 曲线。在随后的研究中提出土压平衡盾构纵向沉降随时间的变化曲线呈双曲线型^[10],即

$$S_{\max} = \frac{t}{a + bt} \quad (1.10)$$

式中, S_{\max} 为中线最大地面下沉(mm); t 为开挖后所历经的时间(天); a 、 b 为根据测量数据统计得到的系数。

随后, Fang^[11] 等于 1994 年在 Peck 法和藤田法的基础上提出了估算不同类型盾构法隧道地面沉降量大小和范围的 Peck-Fujita 法,给出了最大和最小沉降曲线。

日本在长期的城市隧道施工中积累了丰富的经验,尤其是在软土地层中进行的隧道建设,许多学者对隧道施工引起的地表沉降问题进行过深入的研究^[12]。1977 年半谷基于实测资料,根据隧道开挖面及隧道上的覆盖条件给出了地表最大沉降量及最大地面沉降范围的预计方法。1982 年藤田对日本国内 1965 年以来发表的有关盾构施工造成地表沉降的 94 例资料加以整理统计,根据围岩的种类、盾构形式及辅助工法的不同,以表格形式给出了最大沉降量的分类估计值,并给出了由最大沉降量反求出沉降槽宽度的计算公式。此外,森氏、岛田等也提出过实用的计算公式。

欧洲其他许多国家和美国等在大量城市浅埋隧道建设中,对施工引起的地表沉降问题进行了深入研究,积累了丰富的实测资料,他们大都采用 Peck 公式或基于英国学者所提出的以经验公式为主的方法进行预计。

国内众多学者在我国城市隧道建设中对施工引起的地表沉降问题也进行了大量的工作。刘建航^[5]1975年以 Peck 法为基础,根据上海延安东路隧道施工实测资料,提出了“负地层损失”的概念,得到了预测纵向沉降槽曲线的计算公式为

$$S(y) = \frac{V_{L1}}{i \sqrt{2\pi}} \left\{ \varphi \left[\frac{y-y_i}{i} \right] - \varphi \left[\frac{y-y_f}{i} \right] \right\} + \frac{V_{L2}}{i \sqrt{2\pi}} \left\{ \varphi \left[\frac{y-y'_i}{i} \right] - \varphi \left[\frac{y-y'_f}{i} \right] \right\} \quad (1.11)$$

式中, $S(y)$ 为沿隧道纵轴线分布的沉降量; y 为沉降点距坐标原点的距离; V_{L1} 和 V_{L2} 分别为盾构开挖面和盾尾后部间隙引起的地层损失; y_i 和 y_f 分别为盾构推进起始点和盾构开挖面到坐标原点的距离; $y'_i = y_i - L$, $y'_f = y_f - L$ (L 为盾构机的长度); $\varphi(x)$ 为标准正态分布函数。

同济大学侯学渊等人 1987 年结合上海地区饱和土和盾构施工的特点,提出了考虑施工因素和时效(即土体扰动后固结)沉降的修正的 Peck 公式^[5]

$$\begin{cases} S(x,t) = \frac{V_l + H \bar{k} t}{i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \\ 0 \leq t \leq T \quad T = \frac{\sqrt{2\pi} \bar{P}_i}{\bar{E} \cdot \bar{k}} \end{cases} \quad (1.12)$$

式中, $S(x,t)$ 为隧道施工完成后 t 时间的地面沉降量(m); x 为沉降计算点至隧道轴线的距离(m); t 为历经的时间(d); T 为固结时间(s); \bar{P} 为隧道顶部孔隙水压力的平均值(MPa); \bar{E} 为隧道顶部土层的平均压缩模量(MPa); V_l 为由于施工引起的单位长度的地层损失量(m^3/m); H 为超孔隙水压力水头(m); \bar{k} 为隧道顶部至地表土体加权平均渗透系数(m/s)。

经验公式法是以大量的地表沉降实测数据为基础的,其通过回归分析得到的公式具有一定的统计规律,从而能够在一定程度上反映本地区地表移动的客观规律。但是经验公式法计算中不能考虑地层的详细条件,更无法考虑施工条件、衬砌刚度、衬砌与围岩相互作用及施工中采取的一些辅助措施。因此一般情况下其计算结果与现场实测结果相差较大,它们的应用范围受到隧道几何形状、地层条件和施工技术的限制,在一定的地层条件和施工方法下得到的经验公式只能在相似的地层条件和施工方法中才能得到较为理想的结果。另外,经验公式法计算中所需的参数,其物理意义不甚明确,也不便于推广应用。

1.3.2 理论解析法

随着对地层变形研究的深入,许多学者将相关学科的研究成果引入到隧道开挖地层变形的研究中,考虑隧道围岩的变形特点,将围岩作为弹性、弹塑性、黏弹塑性体来看待,取得了一定的研究成果。

1981 年 Resendiz 和 Romo^[13]考虑土体径向位移的影响,得出了软土隧道施工