

盾构隧道施工 临近土体力学特性及 环境影响

黎春林·著

DUNGOUSUIDAO
SHIGONG
LINJINTUTI
LIXUETEXINGJI
HUANJING
YINGXIANG

合肥工业大学出版社

本书得到安徽省质量工程项目(2015zy062)、安徽省自然科学基金项目(1408085ME98)和安徽省教育厅高校自然科学研究项目(KJ2015A255)基金的资助

盾构隧道施工 临近土体力学特性及 环境影响

黎春林·著



合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

盾构隧道施工临近土体力学特性及环境影响/黎春林著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5650-4027-6

I. ①盾… II. ①黎… III. ①盾构隧道—盾构法—环境影响—研究
IV. ①U459.9②X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 124429 号

盾构隧道施工临近土体力学特性及环境影响

黎春林 著

责任编辑	张择瑞
出版发行	合肥工业大学出版社
地 址	(230009)合肥市屯溪路 193 号
网 址	www.hfutpress.com.cn
电 话	理工编辑部:0551-62903204 市场营销部:0551-62903198
开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
印 张	9.5
字 数	160 千字
版 次	2018 年 6 月第 1 版
印 次	2018 年 6 月第 1 次印刷
印 刷	安徽昶颀包装印务有限责任公司
书 号	ISBN 978-7-5650-4027-6
定 价	28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

前 言

盾构掘进施工时,在隧道周边土体中产生应力扰动并引发土体变形,进而对邻近建筑物、构筑物和管线造成危害。因此,揭示盾构施工隧道周边扰动土体力学特性,构建合理的施工扰动评价方法,在保证设计和施工质量、降低工程造价等诸多方面都意义重大。为揭示盾构施工对隧道周边地层的扰动和变形规律,笔者对施工现场原状土进行了多种不同应力路径的试验,在此基础上采用解析法和土拱效应理论对盾构施工扰动土体力学性质进行了分析研究,具体包括以下几个方面:

(1)应用圆孔扩张理论对盾构隧道周边土体的扰动情况进行了分析,研究了注浆压力、注浆量等施工参数与施工扰动的关系;

(2)根据盾构施工土拱效应不能充分发挥的特点,对拱顶压力和管片支护力进行了研究,提出考虑土拱效应不完全发挥时盾构隧道拱顶松动土的压力计算方法;

(3)根据盾构施工特点进行了一系列室内应力路径实验,研究了不同应力路径下土体的力学特性;

(4)根据应力路径试验结果,构建合适的本构方程,提出盾构施工塑性区的解析计算方法;

(5)将蠕变方程与圆孔扩张理论相结合,提出了一种可考虑时间效应的围岩特征曲线分析方法。

目 录

前 言

绪 论	(1)
-----------	-----

第一章 盾构施工扰动解析法研究	(8)
-----------------------	-----

1.1 引言	(8)
--------------	-----

1.2 盾构施工扰动塑性区与注浆参数关系	(9)
----------------------------	-----

1.2.1 注浆压力	(14)
------------------	------

1.2.2 注浆量的取值	(19)
--------------------	------

1.3 盾构施工扰动范围数值分析	(19)
------------------------	------

1.3.1 土体塑性区范围与地层损失参数关系	(20)
------------------------------	------

1.3.2 土体应力比 F_v 在扰动范围判定中的应用	(23)
-------------------------------------	------

1.3.3 土体扰动度 λ_d 在扰动范围判断中的应用	(24)
---	------

1.3.4 理论分析和数值计算结果比较	(24)
---------------------------	------

1.4 盾构施工扰动范围现场测试	(25)
------------------------	------

1.4.1 工程概况及测点布置	(26)
-----------------------	------

1.4.2 静力触探试验分析	(27)
----------------------	------

第二章 盾构施工土拱效应及松动土压力研究	(33)
----------------------------	------

2.1 土拱效应概述	(33)
------------------	------

2.2 太沙基松动土压力理论	(33)
----------------------	------

2.3 土拱效应下土中侧向压力系数变化规律	(35)
-----------------------------	------

2.4	不完全土拱效应下土体竖向应力及管片支护力的计算	(37)
2.4.1	不完全土拱效应下松动土压力公式推导	(37)
2.4.2	推荐公式和太沙基公式的比较	(40)
2.4.3	地层损失对拱顶土压力的影响	(41)
2.4.4	埋深对拱顶土压力的影响	(43)
2.4.5	土质条件对拱顶土压力的影响	(43)
2.4.6	隧道直径对拱顶土压力的影响	(44)
2.5	土拱效应发展高度	(45)
2.6	管片刚度对其支护力的影响	(47)
第三章	盾构施工扰动特征及室内应力路径试验研究	(49)
3.1	盾构施工土体扰动特征	(49)
3.2	应力路径试验研究	(49)
3.2.1	盾构开挖过程土体的应力路径试验设计	(50)
3.2.2	应力路径试验步骤	(50)
3.3	应力路径实验结果及分析	(52)
3.3.1	固结不排水三轴试验	(54)
3.3.2	固结排水三轴试验	(63)
3.3.3	有效应力路径	(66)
第四章	复杂荷载环境下盾构穿越扰动控制技术研究	(69)
4.1	复杂荷载环境下的盾构隧道开挖塑性区范围确定	(69)
4.1.1	塑性区大小的确定方法	(70)
4.1.2	塑性区范围曲线的绘制流程	(70)
4.2	盾构复杂荷载环境下施工土体应力的解析解	(71)
4.2.1	地表荷载作用下土体应力分布	(71)
4.2.2	土体内部荷载作用下土体中应力	(72)
4.3	盾构施工扰动引起的土体附加应力的解析解	(74)
4.3.1	土体应力扰动影响因素	(74)
4.3.2	地层损失引起的土体位移与应力	(74)
4.3.3	盾构正面推力引起的土体附加应力	(76)

4.3.4	刀盘切削土体引起的附加应力	(78)
4.3.5	盾壳与周围土体之间的摩擦力引起的土体附加应力	(80)
4.3.6	盾构推进方向改变、倾斜或偏航引起的土体附加应力	(81)
4.3.7	应力释放引起的土体附加应力	(84)
4.3.8	注浆引起的土体附加应力计算	(85)
4.4	结构性软黏土的屈服面选择	(87)
4.4.1	软黏土的屈服面性状	(87)
4.4.2	屈服面的选择	(88)
4.4.3	无锡地铁一号线沿线软黏土本构模型的建立	(89)
4.5	复杂环境下土体塑性区域范围算例分析	(98)
第五章	土体蠕变对管片受力及隧道周边土体变形影响	(107)
5.1	概述	(107)
5.2	蠕变试验	(108)
5.2.1	试验仪器、方法和思路	(108)
5.2.2	试验步骤和内容	(109)
5.3	考虑围岩蠕变的隧道施工扰动分析研究	(110)
5.3.1	蠕变模型	(111)
5.3.2	考虑蠕变的隧道周边地层特征曲线研究	(115)
5.3.3	三轴蠕变试验结果及分析	(120)
5.3.4	管片受力和土体变形随时间的变化	(126)
参考文献		(133)
后 记		(142)

绪 论

1. 研究背景和意义

随着我国现代化建设水平的不断提高,合理开发利用地下空间已逐渐成为目前国内外公认解决建设用地与土地资源日益严重不足问题、促进社会可持续发展和环境保护的最佳途径。地铁作为轨道交通的重要组成部分,具有节省土地、减少噪声、减少干扰、节约能源等优点,对解决交通堵塞问题起着举足轻重的作用,对城市的经济发展、居民生活水平的提高有着不可估量的意义,地铁的发展已是现代化都市的重要标志。我国的轨道交通建设已进入高速发展时期,很多城市制定了或正在制定其发展规划。截至目前,全国已经开通和待开通地铁的城市有 28 个,正在建设中、获得审批及规划中的有 31 个,地铁的发展已成为现代化都市的重要标志。

然而,采用盾构法进行隧道掘进施工时,隧道周边土体将受到扰动,土体经历复杂的应力路径,会造成土体结构的破坏或变化,并产生相应的变形和位移,危及周边建筑物、构筑物或管线等的安全。因盾构施工对土体扰动机理的复杂性,当前的研究,大多集中于地表变形的经验预估和数值模拟,而对引起地层移动和变形的土体扰动机理及应力历史对盾构施工扰动的影响研究较少,同时,土体材料本身性质的复杂性更是增加了人们正确评估扰动的难度,导致近年来地铁施工中事故频发。

引发这些事故的直接原因是在隧道掘进施工过程中,隧道周边土体受到施工扰动,其应力状态发生了改变,并产生相应的变形和位移,进而危及周边建筑物、构筑物或管线等的安全。因此,根据盾构施工特点,开展盾构施工对土体的扰动机理研究并建立施工安全评价体系,就显得极为紧迫和必要了。

由于软土性质多变及盾构施工对其扰动机理更加复杂,当前有关盾构施工对软土及周边环境影响的研究,大多集中于地表变形的经验预估和数值模拟,而对引起地层移动和变形的土体扰动机理、预测及施工扰动评价体系的建立等方面的理论研究相对滞后,现有理论尚无法为工程施工安全提供有力的技术保障,这也是近

年来地铁施工中事故频发的主要原因。在软土地质条件下积累盾构施工的经验,针对盾构施工对软土的扰动特点,揭示盾构施工的扰动机理,正确判断不同施工环境下盾构隧道施工的扰动程度和范围,并建立盾构隧道施工扰动评价体系是迫切需要解决的重要课题,对控制隧道施工质量,节省工程投资,推进隧道设计理论的发展等方面都有着相当大的实用价值。

2. 国内、外技术发展现状

目前,尽管国内外盾构法的施工技术日趋成熟,盾构数量逐年上升,应用的地质条件也越来越广泛,但其理论研究却明显地滞后于工程实践,回顾国内外近年来关于盾构施工对周边环境扰动的研究现状,主要成果如下:

盾构施工扰动引起的地面沉降历来是人们关注的重点。1969年,美国著名科学家 Peck^[1]在大量地表沉降实测数据及工程资料统计分析的基础上,提出地层移动是由地层损失引起的,假定地面沉降槽的面积等于地层损失,并认为横向沉降槽近似成正态分布。Peck 公式因其应用方便,且沉降分布曲线形状与实际情况较吻合,而被广泛地应用。为推广其应用,国内外诸多学者对 Peck 公式进行了进一步的研究^[2-10],做了大量卓有成效的工作。阳军生^[11]将随机介质理论与地层损失的概念相结合,系统地研究了隧道施工引起的地表移动和变形,并分析了地表移动和变形对建(构)筑物的影响及评价方法。1998年,Loganathan 和 Poulos^[12]推导了地表沉降和地层沉降的解析解。在 Peck 公式中,横向沉降槽宽度系数是一个非常重要的参数,它决定了盾构施工对周围土体的扰动范围,为此,Mair 等人^[12]曾做过较为详细的分析,认为沉降槽宽度系数可表示为盾构隧道深度的函数,沉降槽宽度一般为沉降槽宽度系数的 5 倍。

在纵向沉降槽方面,国外以 Grant^[13]为代表,建议用经验公式来描述盾构隧道施工引起的纵向地表或地层沉降槽;我国刘建航院士提出了负地层损失的概念^[4],并将地层损失分成开挖面和盾尾后的地层损失两部分,对计算纵向沉降的 Peck 公式进行了修正。为定量研究盾构施工引起的纵向地表沉降,可根据盾构施工沉降机理的不同将其分成几个不同的阶段,分别研究每个阶段导致沉降的原因以及每个阶段的沉降量占总沉降量的比例。有学者将其分成四个阶段^[14-15],也有学者将其分为五个阶段^[16-17],即盾构到达前地表沉降,有时表现为隆起,在总沉降量中占的比例小于 5%;盾构到达时的地表沉降,占总沉降量的 10%~15%;盾构通过时的地表沉降,占总沉降量的 10%~25%;盾尾建筑空隙引起的沉降,占总沉降量的 20%~30%;后期地表固结沉降,占总沉降量的 25%~40%。从中可以看出,盾构

施工引起的纵向地表沉降以盾尾建筑空隙引起的沉降及后期地表固结沉降为主。将纵向沉降分阶段并估算其比例,对分析了解各种因素引起地表沉降的机理和及时采取相应措施有着非常重要的作用。

采用离心模型试验和数值分析方法研究盾构施工扰动是近年来的热点,在离心模型试验方面,日本做了大量卓有成效的工作^[18-19],Toshi Nomoto 等人用离心模型试验对砂性土中盾构施工过程中土压力、纵向横向地表沉降等进行了研究,发现衬砌周围的土压力与盾尾建筑空隙有关,空隙越大,土压力越大,横向沉降槽可用 Peck 公式描述,纵向沉降槽可用与盾尾建筑空隙有关的多项式描述。Kuwano 等人利用离心模型试验研究了土钉加筋黏土中的隧道施工引起的土体变形。

利用有限元方法研究盾构施工引起的土体变形方面也取得了显著的成果^[20-24],Ezzelding 开发了三维数值模型,能够考虑盾构施工过程,隧道周围土体采用非线性本构模型,得出了地表最大位移和沉降槽的分布规律;Swoboda 等人开发了三维有限元程序,研究了盾构施工引起的周围土体超孔隙水压力的分布规律及其随时间的消散过程,并且发现泥水压力与注浆压力对超孔隙水压力的影响很大,为优化盾构施工参数提供了依据。

张业炜、杨新安^[25](2011)以狮子洋隧道砂性地层段地质条件和施工资料为基础,建立有限差分数值计算模型,对不同断面监测点随开挖进程的位移值进行了研究,并研究了渗流对围岩变形的影响,提出了开挖面前方土体扰动的累积效应,给出了累积效应曲线的确定方法。

胡云世、谢俊^[26](2011)基于 ANSYS 通用有限元软件,利用应力释放理论对盾构法施工的全过程进行了动态的三维数值模拟,研究了地层位移在盾构施工中的动态变化规律。

本文作者在前期对盾构施工对环境的扰动方面也做了很多的工作,其中利用有限元方法分析了渗流、固结等因素对隧道周边环境的影响^[27-29],研究成果为盾构高水位下安全施工提供参照。

另外,许多学者从施工扰动的角度来研究盾构施工对周围环境的影响。徐永福^[30]将盾构施工对土体的影响分为应力扰动和应变扰动,并结合施工影响度的定义以及盾构施工对周围土体的影响范围,依托上海观光隧道对其进行了研究。张孟喜^[31]用 $p-q-e$ 平面上的施工扰动度对盾构施工引起的土体特性的变异进行了研究。

孙红、赵锡宏^[32](1999)在热力学理论的基础上建立了软土的弹塑性各向异性损伤模型,分析了软黏土的结构性及其在受力过程中的损伤特性。

Bernat、Cambou 和 Dubois^[33](1999)在实测数据和数值模拟的基础上,提出盾构施工扰动引起的地面沉降可分为 4 个阶段,并对各阶段沉降产生的原因及沉降大小做了描述。

张庆贺、朱忠隆^[34](1999)等通过现场静力触探试验对盾构推进对土体的扰动机理进行分析,研究了盾构引起周围土体应力状态的变化,总结了盾构施工对地层扰动的影响规律,研究结果表明盾构靠近时,正前方土体压缩模量呈现增加的趋势,盾构通过后,压缩模量逐渐下降,并渐渐趋近初始状态。

易宏伟、孙钧^[35](2000)就盾构施工对周围土体的扰动机理进行了分析,根据对周围土体的扰动情况进行了扰动分区,分析了不同扰动区内土体经历的应力路径,建议采用现场比贯入阻力和孔隙水压力作为土体扰动评价指标。

徐永福、孙钧等^[36](2002)根据上海外滩观光隧道盾构掘进时的周围土体变形,孔隙水压力、土压力和隧道衬砌应力的实测结果,分析了盾构施工对周围土体的影响。

Martin、John 和 Carter^[37](2003)基于扰动状态概念提出一各向同性压缩模型,模拟结构性对岩土材料的影响,并将模型用于砂土、黏土、软岩、非饱和土等多种岩土介质,研究结果表明所提出的模型能较好地模拟结构性岩土材料的压缩性状。

蒋洪胜、侯学渊^[38](2003)通过现场测定超孔隙水压力和位移,研究了盾构隧道穿越地下污水管道时盾构推进与地层移动的相关性,分析了在盾构接近、穿越以及远离测孔区时,各施工阶段隧道周围不同区域土层的移动特征。

Karakus 等^[39](2003)认为盾构施工地层损失包括两部分:一是盾构施工时产生的地层损失,没有考虑土体的排水固结和压缩变形;二是土体因固结和蠕变引起的体积变化而产生的地层损失。

李大勇等^[40](2004)针对盾构掘进引起的深层土体位移进行了现场实测和分析,认为盾构的掘进姿态、隧道埋深、土压舱压力和土层性质等因素对土层变形有较大的影响。

——缪林昌、王非和吕伟华^[41](2008)认为城市隧道施工引起的地表沉降应包括施工地层损失和地层固结引起的地表沉降,推导了隧道施工在新的应力状态下土体内部的超孔隙水压消散公式,并将研究成果应用于南京地铁 1 号线,取得了较好的效果。

刘纪峰、陶龙光和刘波^[42](2009)通过对盾构隧道施工土体扰动机理分析,提出盾构上方一定范围内的被扰动土体为欠固结土,应用欠固结土的沉降计算理论,提出考虑盾构扰动周边土体固结影响的隧道沉降计算修正方法。

文献[43—46]应用非线性黏弹性模型,采用数值方法对围岩的变形特性及衬砌受力进行了分析。王中文、方建勤、夏才初^[47](2010)通过对考虑隧道围岩蠕变特性衬砌变形的理论公式的分析,利用现场实测数据拟合公式,确定了围岩的流变参数,并给出衬砌合理的支护时机。

土体在不同的应力路径下其力学特性会有很大的不同^[48—50],研究土的性质,不仅需要知道土的初始和最终应力状态,还需要知道其应力的变化过程。近年来,许多学者基于应力路径试验^[51—54]研究了土体的应力应变特性,并建立了相应的本构模型。本文作者^[55](2011)也通过室内应力路径实验模拟盾构施工周边不同区域内土体的扰动特征,开展了一系列不同应力路径下原状软黏土固结不排水三轴试验,并对不同应力路径下土体强度和变形特性进行了详细分析研究。

刘铭、刘印、王志良^[56](2012)以上海地铁为背景,基于 Winkler 弹性地基梁理论,同时考虑土的扰动程度,得到了隧道弹性沉降与土体扰动度的关系,并基于隧道上部荷载、土体初始弹性模量及隧道弯曲刚度的不同取值对隧道弹性沉降进行了修正。

当前的研究取得了很多的成果,但因施工和土体的复杂性,以下几个方面仍需要进一步的研究:

(1)土体的力学特性与其应力历史关系密切。盾构施工对土体扰动和塑性区的分析,传统方法一般是基于等向固结试验和常规三轴试验建立本构模型和获得相关力学参数的,试验时,土体经历的应力历史和工程实际存在很大的区别,因而会带来较大的误差。

(2)当前解析法对盾构施工土体扰动范围和塑性区的研究,主要集中于地表没有建筑物、构筑物的自由地层下隧道的开挖,而随着城市地铁建设规模的迅猛发展,盾构经常要穿越城市复杂的荷载环境,解决盾构在复杂荷载环境下施工扰动和变形问题变得日益迫切。

(3)施工扰动后,土体力学参数会发生很大的变化,对土体的扰动程度和范围进行分析,必须以扰动后土体的力学参数来分析土体的应力、变形和塑性区,而当前对盾构施工扰动的研究都是以土体受扰动以前的状态作为分析对象的,这必将使得计算结果和实际情况存在较大的差别。

(4)土体特别是软土的蠕变会改变衬砌和围岩的应力,从而影响到隧道的长期稳定性。而管片支护力和管片变形因土体蠕变随时间增长这一问题没有引起业内人士足够的重视,该问题会对隧道的营运期间的安全性带来不利影响,在管片设计时必须予以考虑,否则可能引起隧道的垮塌。

3. 研究内容

(1) 盾构施工扰动解析法研究

许多学者以弹塑性理论为基础的解析法来研究隧道开挖周边土体的应力和稳定情况,分析塑性区范围和隧道支护压力的关系。解析法求解迅速,计算量小,在进行盾构施工各扰动因素对土体扰动程度和范围影响的敏感性分析时,解析法有着明显的优越性。但是解析法也有其固有的缺点:①只能解决边界条件较为简单的问题,不能考虑复杂的地质条件和荷载环境;②对影响施工扰动的诸多因素往往需要作简化处理,难以获得精确的结果,使其应用受到限制;③在进行解析解推导时,为简化计算,认为土体是均质的,并且没有考虑施工扰动后土体性质发生的变化。本书在前人的基础上,期望在以下几个方面有所突破:①在解析解中引入环境荷载因素;②考虑土体的各向异性;③考虑土体的黏弹塑性;④考虑施工扰动对土体性质的改变。并结合压力拱理论,从盾构隧道开挖塑性区形成机理方面着手,探讨盾构施工的塑性区范围解析计算式,在此基础上进一步分析注浆压力、注浆量和注浆时机等施工参数对塑性区范围的影响。

(2) 盾构施工扰动特征及室内应力路径试验研究

盾构施工时其周边不同区域土体受到的应力扰动是不同的,本书根据盾构施工对土体扰动的特点设计一系列应力路径试验,通过应力路径试验对不同应力路径下土体的力学特性进行系统的研究,分析在不同应力路径下土的强度、变形规律和屈服特征,从而为盾构施工扰动塑性区的判定提供依据。

(3) 城市复杂荷载环境下盾构穿越扰动控制技术研究

当前的研究主要是集中在自由地层下盾构施工对土体及周边环境扰动的影响,而在实际工程中,盾构经常需要穿越复杂的上覆荷载环境。本书将根据应力叠加原理采用解析法计算不同荷载环境下盾构施工周边土体的应力,并以应力路径试验所获取原状土的屈服面方程为判据计算土体塑性区;并拟对塑性区解析计算过程用计算机程序语言进行编写,实现复杂荷载环境下土体塑性区的自动计算与绘图;根据塑性区和扰动区的内在关系可进一步确定盾构施工扰动范围,若以施工扰动为控制目标进行反演则可实现施工参数的最优化控制。

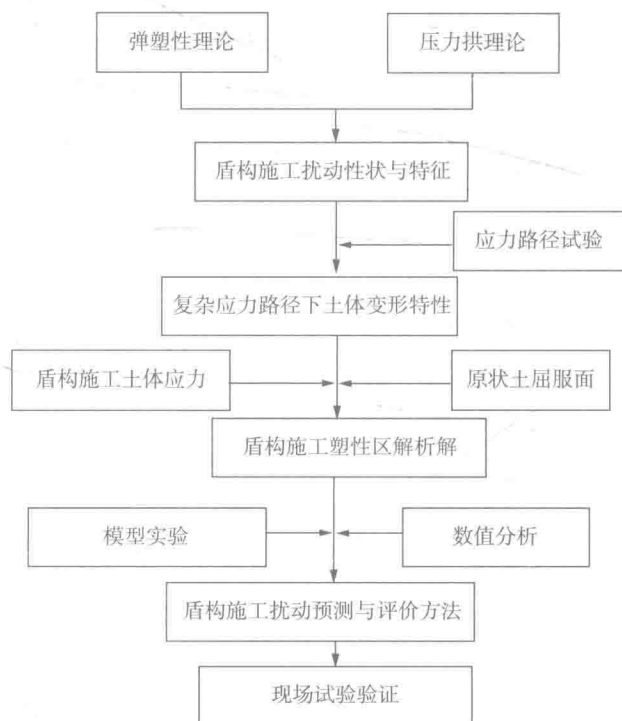
(4) 软体蠕变对隧道管片受力与变形影响研究

根据原状土体的室内三轴蠕变试验数据,采用最小二乘法拟合蠕变方程,获取蠕变参数,并将蠕变方程与小孔扩张理论相结合,推导可以表征时间因素的围岩特征曲线方程解析解,提出求解隧道周边变形和支护力随时间变化的一种简便实用

的方法,并应用于无锡地铁 1 号线工程实例中。

4. 研究思路和方案

本书以无锡地铁一号线盾构隧道区间为依托,采用室内试验(应力路径试验、室内模型试验、三轴蠕变试验)、理论分析、数值模拟和现场观测相结合的技术路线,研究盾构施工临近土体的力学特性及对周边环境的扰动影响。基于无锡地铁一号线施工现场采集的相邻建筑物、构筑物、管线、桥梁及地面变形等大量现场实测数据,充分研究盾构到达前阶段、盾构经过阶段、衬砌注浆阶段和固结沉降阶段的扰动土体力学参数的变化规律,并进一步评价盾构推进过程中对地层扰动的影响范围,结合室内试验和数值模拟结果,总结盾构法施工对周围地层扰动的一般影响规律,在此基础上提出盾构隧道施工控制指标与措施,总结盾构施工对周围地层扰动的一般规律,并进一步探讨预测盾构施工扰动量的方法,合理地评价这些扰动对已有建(构)筑物的影响,最后将研究成果应用于盾构施工现场以检验其有效性。论文研究思路如下图所示。



研究技术路线框图

第一章 盾构施工扰动解析法研究

1.1 引言

盾构掘进时,隧道周边地层受到扰动,其应力状态发生改变,临近隧道土体内应力值有可能大于屈服应力而成为塑性区。塑性区的出现,使洞周应力集中区向纵深方向转移,使塑性区不断向纵深发展,并使得土体出现过大变形。因此,要减小隧道周边土体的变形,就必须控制塑性区的发展范围。而控制塑性区的发展范围和地层沉降,应对盾尾空隙进行及时注浆回填,壁后注浆控制技术是盾构施工的关键^[57]。注浆控制技术涉及注浆压力和注浆量两个非常重要的参数,注浆压力和注浆量过小,不能满足填充盾尾空隙的要求,将会引起地面产生明显的沉降,并导致隧道周边地层应力场的改变,在一定范围内出现塑性区;过大又会造成土体的被动挤压破坏和浆液的浪费。

目前对盾构隧道注浆参数的控制已有一些研究,文献[58—59]根据工程实践经验对注浆技术进行了分析总结,文献[60—62]则采用数值分析的方法对注浆效果进行了研究,但这些研究没有从理论上对注浆的作用机理及注浆参数与土体塑性区及土体变形的关系进行分析。

在分析塑性区内的应力状态时,首先需要解决下述三个问题:①确定形成塑性变形的判别依据或破坏准则;②确定塑性区内的应力应变状态;③确定塑性区范围。盾构隧道常设计为圆形,芬纳公式、修正的芬纳公式和卡柯公式给出了深埋圆形隧洞土体塑性区范围与材料抗剪强度、初始地应力及洞内周边荷载的关系,这些公式在隧道工程中已广泛应用,其推导采用 Mohr-Coulomb 强度准则。下面结合传统的小孔扩展理论,针对注浆压力和注浆量这两个施工参数与施工扰动塑性区分布范围的关系进行分析。

1.2 盾构施工扰动塑性区与注浆参数关系

盾构施工使得周围地层应力状态发生了变化,并引起土体出现过大大变形。统计资料显示,已建和在建的隧道中,超过 35% 的隧道会产生沉降^[63]。注浆不但可以降低地层损失,而且可在隧道周围土层中形成一个加固支撑圈,提高了土体本身的承载能力,减小隧道周边土体的变形。

在进行注浆操作时,注浆压力和注浆量是非常重要的施工参数,注浆压力和注浆量过小,不能满足填充盾尾空隙的要求,过大又会造成土体的被动挤压破坏和浆液的浪费。所以,在盾构施工过程中,注浆压力和注浆量是否合理对管片支护力的设计和土体内塑性区范围的扩展都会产生很大的影响。

对盾构隧道注浆参数的控制是当前研究的一个研究热点。刘健等^[64]通过试验对盾构壁后注浆浆液的扩散规律及因注浆而造成的管片压力进行了研究,研究成果可用于指导盾尾注浆工艺参数的选择;朱才辉等^[65]将间隙参数归纳为注浆填充率、支护压力比和偏心超挖率等 3 个参数的影响,并采用有限元方法对其进行地表沉降规律的量化分析;VERRUIJT 等^[66-71]应用镜像法建立了地层损失和地面沉降关系的解析公式;黎春林^[72]通过有限元软件研究了不同注浆压力下隧道周边土体超孔隙水压的分布和消散规律;苟长飞等^[73]采用流体力学理论对盾尾同步注浆浆液充填压力环向分布模型及相关参数进行了分析;叶飞等^[74]将同步注浆对地层的影响简化为半无限弹性体中的柱形孔扩张问题,推导了同步注浆对地表变形影响公式;邱明明等^[75]采用力学方法研究了盾构同步注浆压力分布统一计算模型。

近年来,虽然盾构注浆取得了很多研究成果,但在实际工程中,尚缺乏简便实用的定量化分析盾构施工土体强度及变形与施工参数关系的理论公式。本书根据土体强度理论,通过分析注浆的作用机理及注浆参数与土体变形的关系,提出易于施工人员理解和工程应用推广的盾构施工注浆参数计算公式。

1.2.1 注浆压力

许多学者基于弹塑性理论,研究了深埋圆形隧洞围岩应力和稳定情况,分析了塑性区范围和隧道支护压力的关系,其中应用最广泛的就是芬纳公式和卡斯特奈公式^[16]。根据芬纳公式,假定隧道受力呈轴对称,塑性区范围 R 为:

$$R = a \left[(1 - \sin\varphi) \left(\frac{\sigma_0 + c \cdot \cot\varphi}{\sigma_a + c \cdot \cot\varphi} \right) \right] \frac{1 - \sin\varphi}{2 \sin\varphi} \quad (1-1)$$

式(1-1)中, a 为塑性区的内半径(相当于管片的外半径), σ_a 为管片支护力, c, φ 为土体强度参数。

1.2.1.1 塑性区范围与注浆压力关系

盾尾注浆后, 浆液开始时呈流动状态, 注浆压力直接作用在土体上阻止土体下沉; 随后浆液逐渐固化, 浆液主要起充填作用, 将其承受的土压力传递给管片, 固化后的注浆体和管片一起支撑土体阻碍其进一步变形。

(1) 最小注浆压力下塑性区半径

最小注浆压力必须维持土块的稳定, 使之不下塌出现主动松弛破坏, 即:

$$\sigma_a = H\gamma \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2c \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (1-2)$$

式(1-2)中, H 为隧道埋深, γ 为土层的重度。

将式(1-2)代入式(1-1)得到周边土体主动破坏时塑性区半径:

$$R = a \left[\frac{(1 - \sin\varphi) \left(\frac{\sigma_0 + c \cdot \cot\varphi}{H\gamma \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2c \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + c \cdot \cot\varphi} \right)}{1} \right] \frac{1 - \sin\varphi}{2\sin\varphi} \quad (1-3)$$

若使隧道周围不存在塑性区, 即 $R' \leq a$, 由式(1-1)可求得注浆压力:

$$\sigma_a \geq (1 - \sin\varphi)\sigma_0 - c \cdot \cos\varphi \quad (1-4)$$

在实际工程中采用由式(1-4)得到的最小注浆压力是偏于安全的, 一般情况下土体内是允许出现塑性区的, 只要控制塑性区的发展不超过一定的区域就能保证施工安全。

(2) 最大注浆压力下塑性区半径

最大注浆压力必须限制在某一范围内, 使土体不出现隆起发生被动(挤压)破坏, 即:

$$\sigma_a = H\gamma \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (1-5)$$

在注浆压力大于地层原始应力时, 因为土体被挤压, 径向应力很大, 而切向压应力较小, 甚至成为拉应力, 假定压应力为正, 这时径向正应力 σ_r 和切向正应力 σ_θ 分别为最大、最小主应力。根据小孔扩张, 可得盾构隧道施工的扰动半径为:

$$R = a \left[(1 + \sin\varphi) \left(\frac{\sigma_0 + c \cdot \cot\varphi}{\sigma_a + c \cdot \cot\varphi} \right) \right] - \frac{1 + \sin\varphi}{2\sin\varphi} \quad (1-6)$$