

水平定向钻进孔壁

稳定性和地面变形评价方法与应用

Shuiping Dingxiang Zuanjin kongbi

Wendingxing He Dimian Bianxing Pingjia Fangfa Yu Yingyong

程远泽 陈善雄 Samuel T. Ariaratnam 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

水平定向钻进孔壁稳定性和 地面变形评价方法与应用

程远泽 陈善雄 Samuel T. Ariaratnam 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书建立了水平定向钻进施工中泥浆压力作用下的地面位移计算模型,提出了可考虑土体软化效应的水平定向钻进施工最大允许注浆压力计算模型。通过现场试验和数值模拟,阐明了埋深、注浆类型、钻孔埋深、钻孔孔径、黏聚力等因素对最大允许注浆压力和地面变形的影响规律。基于上述计算模型,提出了孔壁稳定性与地面变形的评价方法。借鉴美国、加拿大等国家的经验,提出了孔壁稳定性与地面变形的评价标准。依托实际工程,给出了对该方法进行应用的实例。

图书在版编目(CIP)数据

水平定向钻进孔壁稳定性和地面变形评价方法与应用/
程远泽,陈善雄,(美)塞缪尔·T.阿里亚特纳姆
(Samuel T. Ariaratnam) 著.—徐州:中国矿业大学
出版社,2017.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3665 - 4

I. ①水… II. ①程… ②陈… ③塞… III. ①水平—
定向钻进—稳定性—研究 IV. ①P634.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 197441 号

书 名 水平定向钻进孔壁稳定性和地面变形评价方法与应用

著 者 程远泽 陈善雄 Samuel T. Ariaratnam

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 7.5 字数 188 千字

版次印次 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

孔壁失稳和地面变形过大是水平定向钻进施工中最突出的问题之一,因孔壁失稳和地面变形过大导致的地面开裂、冒浆、孔壁失稳等问题严重影响施工安全和周期,并对附近构筑物 and 环境保护产生不利影响。因此,开展最大允许注浆压力和地面变形的理论、数值和试验研究以及孔壁稳定性和地面变形的判断方法与标准研究对于正确理解水平定向钻进施工中孔壁失稳机理,进而采取有针对性的处理对策,以确保施工安全和保护环境具有重要意义。

针对水平定向钻进孔壁失稳和地面变形评价难题,采取现场试验、理论分析与数值模拟相结合的研究手段,开展最大允许注浆压力预测模型和地面变形计算模型以及孔壁稳定性和地面变形的判断方法与标准研究。本书的主要工作和成果如下:

(1) 将 Mindlin 解应用于水平定向钻进施工泥浆压力作用下的地面位移计算方法研究。基于 Mindlin 解,建立了可考虑不同钻孔孔径、埋深和土体类型的水平定向钻进施工中泥浆压力作用下的地面位移计算模型。利用该模型计算了不同的孔径、埋深和不同类型土体中的地面变形值,研究了孔径、埋深和土体类型对地面变形的影响规律。利用有限差分方法(FLAC3D)进行了相应的数值模拟,并将两者的结果进行了对比,分析了结果的差异性和引起结果差异性的原因,结果表明,该预测模型可用来计算注浆压力较小时浅层水平定向钻进施工中的地面变形。

(2) 将水平定向钻进施工中注浆压力对孔壁的作用简化为柱形小孔扩张问题,引入土体软化系数,利用弹塑性边界条件对水平定向钻进施工中最大允许注浆压力计算公式进行推导,提出可考虑土体注浆软化作用的基于小孔扩张理论的水平定向钻进施工中最大允许注浆压力计算模型。该模型可计算不同埋深、钻孔直径、土体黏聚力、内摩擦角、重度、泊松比、弹性模量、软化系数等条件下的最大允许注浆压力值。将该模型与现有的理论模型、室内和现场试验数据、数值计算模型进行对比,进一步验证了模型的有效性和适用性。研究表明,本书提出的计算模型和数值模拟、室内模型和现场试验的结果较为接近,能较准确地预测水平定向钻进施工中的最大允许注浆压力值,而相同条件下 Delft 计算模型的预测结果偏大。

(3) 借助 FLAC3D 计算软件,建立了数值计算模型,开展了水平定向钻进施工最大允许注浆压力影响因素数值模拟研究。采用 Delft 预测模型中的最大允许注浆压力判断标准和塑性区的扩展情况作为判定最大允许注浆压力的方法,假设当塑性区半径扩展为钻孔埋深的三分之二时的压力值为最大允许注浆压力值,全面揭示了孔径、埋深、土体重度、内摩擦角、黏聚力、弹性模量、泊松比等多个因素对水平定向钻进施工中最大允许注浆压力和孔壁稳定性的影响规律。研究表明,弹性模量对水平定向钻进施工中最大允许注浆压力的影响很小;在其他条件不变时,最大允许注浆压力分别随着土体重度、内摩擦角、黏聚力、泊松比、

埋深的增大而增大,随着孔径的增大而减小,这些因素对最大允许注浆压力和孔壁稳定性影响较大。

(4) 设计并开展了浅层水平定向钻进施工中最大允许注浆压力、地面变形现场试验研究。首次利用现场试验揭示孔壁失稳机制,以及注浆类型、埋深对最大允许注浆压力、地面变形的影响规律。在试验中,考虑了两种不同的埋深和注浆材料来研究埋深和注浆材料对最大允许注浆压力的影响。首次采用了美国 DCI 公司最新研发的监测水平定向钻注浆压力的传感器来监测试验过程中的注浆压力,并首次将三维激光扫描仪(3D laser scanner)应用在水平定向钻进施工地面变形监测上,该新注浆压力传感器和三维激光扫描仪实时监测了整个试验过程中的注浆压力值和地面变形,其精度较高,使用方法和操作过程较为简单,后续数据处理较为方便,可在水平定向钻进施工过程中推广使用。基于现场试验,利用有限差分法建立了数值计算模型,并利用 Delft 模型和本书提出的新模型对试验中的最大允许注浆压力进行了计算,最后将试验结果与数值计算结果、理论计算结果进行了对比,进一步验证理论模型和数值模型的有效性和适用性。研究表明,本书提出的新模型能较好地预测水平定向钻进施工中的最大允许注浆压力,Delft 模型过大地预估了该值。

(5) 利用本书提出的最大允许注浆压力计算模型作为判定一般土体中水平定向钻进孔壁稳定性的标准之一,并综合前人提出的 Delft 模型、Kennedy 模型、Ariaratnam 模型,分类考虑了水平定向钻进在一般土体、岩石和埋深较深的硬质土体施工中,由于注浆压力过大导致孔壁失稳时岩土体的两种破坏模式(拉裂破坏和剪切破坏),提出了每类问题中的最大允许注浆压力、最小注浆压力计算方法和孔壁稳定性的判断标准、方法和解决措施。结合水平定向钻进施工中地面变形计算方法和美国、加拿大等国家的经验,提出了水平定向钻进施工中地面变形评价标准、方法和控制措施。结合水平定向钻进实际施工工程,介绍了上述方法的使用方式,验证了上述方法的有效性和适用性。

作 者

2017 年 4 月

目 录

1 绪论	1
1.1 选题背景与研究意义	1
1.2 水平定向钻进施工地面变形研究现状	4
1.2.1 地面变形理论研究	4
1.2.2 地面变形数值模拟研究	5
1.2.3 地面变形试验研究	6
1.3 水平定向钻进孔壁稳定性研究现状	7
1.3.1 水平定向钻进最大注浆压力研究	7
1.3.2 水平定向钻进最小注浆压力研究	13
1.4 研究内容与技术路线	14
1.4.1 研究内容	14
1.4.2 技术路线	16
2 水平定向钻进施工引起土体变形的理论解	17
2.1 引言	17
2.2 预测水平定向钻进施工中土体变形的新技术	18
2.2.1 注浆压力作用下土体位移计算	18
2.2.2 自重应力引起的土体位移计算	20
2.3 数值模拟与理论方法对比	21
2.3.1 有限差分方法(FLAC3D)简介	21
2.3.2 数值模拟基本假设	21
2.3.3 模型边界条件	22
2.3.4 计算参数与模拟工况	22
2.3.5 数值模拟和理论计算结果对比	23
2.3.6 塑性区发展	26
2.4 水平定向钻进施工中土体位移计算新方法的应用	29
2.5 本章小结	30
3 最大允许注浆压力影响因素数值模拟研究	36
3.1 引言	36
3.2 数值模拟模型建立	37

3.2.1	数值模拟基本假设	37
3.2.2	模型边界条件	37
3.2.3	计算参数与模拟工况	38
3.2.4	数值计算过程	38
3.2.5	最大允许注浆压力判定方法	38
3.2.6	塑性区发展情况	39
3.3	最大允许注浆压力影响因素研究	40
3.3.1	土体弹性模量影响因素分析	40
3.3.2	土体重度影响因素分析	40
3.3.3	土体泊松比影响因素分析	42
3.3.4	土体内摩擦角影响因素分析	43
3.3.5	土体黏聚力影响因素分析	44
3.3.6	孔径影响因素分析	47
3.3.7	埋深影响因素分析	47
3.4	本章小结	49
4	考虑土体软化作用的最大允许注浆压力预测模型	50
4.1	引言	50
4.2	模型建立	51
4.2.1	基本假定	51
4.2.2	弹性平衡方程和边界条件	52
4.2.3	莫尔—库仑屈服条件	54
4.2.4	圆孔受到泥浆压力扩张后的半径	55
4.2.5	塑性区内的应力和位移	55
4.3	模型应用与对比	56
4.3.1	理论模型、数值模拟和试验结果对比分析	56
4.3.2	理论模型与数值模拟对比分析	57
4.4	本章小结	60
5	水平定向钻进现场试验研究	61
5.1	引言	61
5.2	影响孔壁稳定性的因素	62
5.3	试验方案设计	63
5.4	试验设备与仪器	64
5.4.1	水平定向钻机	64
5.4.2	泥浆压力监测系统	66
5.4.3	三维激光扫描仪	68
5.5	土体参数	69
5.6	试验过程	70

5.6.1	试验前准备工作	70
5.6.2	试验具体过程	72
5.6.3	试验后续工作	73
5.7	试验结果分析	73
5.7.1	试验一结果分析	73
5.7.2	试验二结果分析	76
5.7.3	试验三结果分析	78
5.7.4	试验四结果分析	80
5.8	试验结果与理论、数值计算结果对比	82
5.8.1	最大允许注浆压力试验结果与理论、数值计算结果对比	82
5.8.2	最大地面变形试验结果与理论、数值计算结果对比	84
5.9	本章小结	85
6	水平定向钻进施工中孔壁稳定性与地面变形评价标准与方法	87
6.1	引言	87
6.2	孔壁稳定性评价标准与方法	88
6.2.1	最大允许注浆压力计算方法和评价标准	88
6.2.2	最小注浆压力计算方法和评价标准	90
6.3	地面变形计算方法	91
6.4	孔壁稳定性与地面变形评价、控制方法和标准	92
6.5	应用实例	94
6.6	本章小结	95
7	结论与展望	96
7.1	主要结论	96
7.2	主要创新点	97
7.3	展望	98
	参考文献	99
	致 谢	110

1 绪 论

1.1 选题背景与研究意义

随着由日益增长的城市人口和能源供给而引起的对地下空间系统需求的不断增加,保证地下管道系统可以跟上这些需求的发展步伐是非常关键和必要的^[1-5]。目前,在世界范围内,供水管网系统、污水排放系统以及石油天然气输送管道系统的发展状况有着很大的不均衡性。特别是作为世界上最大发展中国家的中国,目前面临着如何科学、快速、有效地排出雨后积水、城市生活污水以及供应油、气等资源的严峻挑战^[6-10]。

非开挖施工技术,例如顶管施工技术、箱涵顶进施工技术、水平定向钻进施工技术及管幕法施工技术、CIPP 管道修复技术是在新建管道系统的施工及旧管道的修复中广泛使用的技术。它具有经济、环保、高效且由于极小的开挖对地面扰动小的特点,在管道工程中发挥着重要作用^[11-14]。在地下设施繁杂、地面交通系统广布的城市中,非开挖技术由于具有对地面和地下设施扰动较小的特点,在城市管道建设中具有特别的吸引力。在需要穿越公路、江河的管道建设中,非开挖技术也被广泛使用。非开挖技术也经常被应用于对环境保护要求较为严格区域的新建管道施工、旧管道修复工程中,且在复杂的施工环境中,有时是唯一可采用的管道铺设、更换技术。非开挖技术通常还是施工成本最低且对环境干扰最小的一项管道铺设、置换施工技术^[15-16]。

水平定向钻进技术(Horizontal Directional Drilling)是在不开挖地表面的条件下,铺设多种地下公用设施(管道、电缆等)的一种施工技术,广泛应用于供水、电力、电讯、天然气、煤气、石油等管线铺设施工中,它适用于砂土、黏土、卵石等地况。它是将石油工业的定向钻进技术和传统的管线施工方法结合在一起的一项施工新技术,具有施工速度快、施工精度高、成本低等优点。水平定向钻进技术于 20 世纪 70 年代第一次被成功应用在穿越河流的管道施工中,取得了很好的效果,之后被逐步推广,在十几年间获得了飞速发展,成为发达国家中新兴的产业。目前水平定向钻进设备的发展趋势正朝着大型化和微型化、适应硬岩作业、自备式锚固系统、钻杆自动堆放与提取、钻杆连接自动润滑、防触电系统等自动化作业功能、超深度导向监控、应用范围广等特征发展^[17-18]。

水平定向钻进施工技术具有以下特点:

① 水平定向钻穿越施工基本不会阻碍交通,不会破坏地面绿地和植被,不会影响商店、医院、学校和居民的正常生活和工作秩序,解决了传统开挖施工对居民生活的干扰,对交通、环境、周边建筑物基础的破坏和不良影响的难题。

② 现代化的穿越设备的穿越精度高,易于调整敷设方向和埋深,管线弧形敷设距离长,完全可以满足设计要求埋深,并且可以使管线绕过地下的障碍物。

③ 城市管网埋深一般达到 3 m 以下,穿越河流时一般埋深在河床下 9~18 m,所以采用水平定向钻进穿越技术,对周围环境影响较小,不破坏地貌,能更好地适应环保的各项要求。

④ 采用水平定向钻进穿越施工时,没有水上、水下作业,不影响江河通航,不损坏江河两侧堤坝及河床结构,施工不受季节限制,具有施工周期短、所需施工人员少、成功率高、施工安全可靠等特点。

⑤ 与其他施工方法比较,进出场地速度快,施工场地可以灵活调整,尤其在城市施工时可以充分显示出其优越性,并且施工占地少工程造价低,施工速度快。

⑥ 大型河流穿越时,由于管线埋在地层以下 9~18 m,地层内部的氧及其他腐蚀性物质很少,所以起到自然防腐和保温的功用,可以保证管线运行时间更长。

水平定向钻进施工技术的工作过程一般分为以下三个部分^[19-24],如图 1-1 所示。

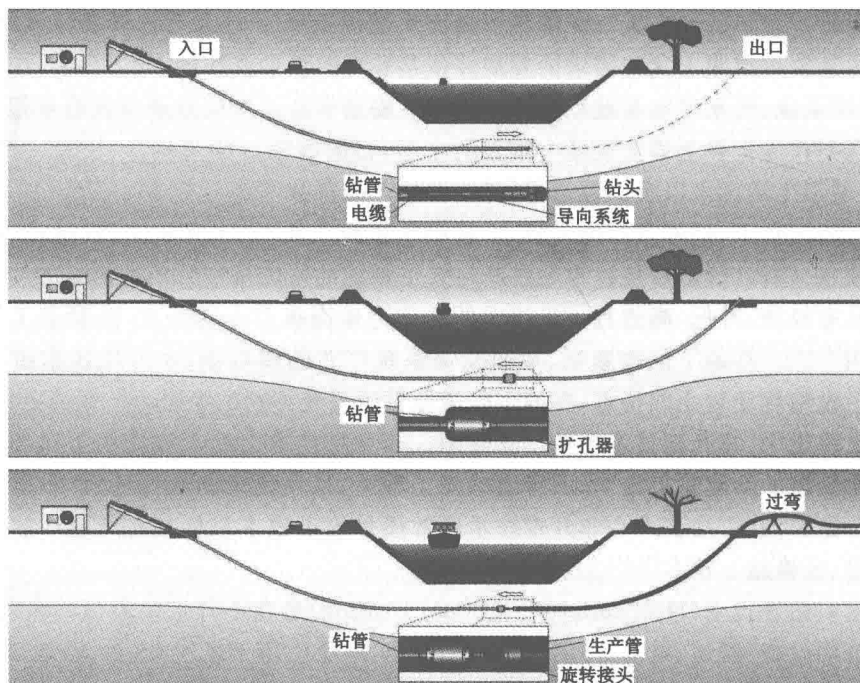


图 1-1 水平定向钻进工作过程 (Bayer, 2006)^[23]

(1) 钻导向孔

在水平定向钻进施工中,首先是沿所需的轨迹从工作井向接收井钻导向孔,在此过程中钻进泥浆不断地从钻头上的小孔喷出,充满在导向孔和钻杆之间的空隙中并回流到导向孔的起始端。泥浆具有润滑钻杆并降低其温度的作用,并且泥浆可以将钻头切削下的土体排出孔外,另外泥浆还可以形成泥浆护壁,从而起到提高孔壁稳定性的作用。

(2) 扩孔

在导向孔钻进结束时,将钻杆通过旋转接头与扩孔钻头连接,并随着钻杆的回拖扩大钻孔的直径。在复杂地层条件下或孔径需增加很大时,可采用多级扩孔的方法将孔径逐步扩大。在此过程中泥浆也不断从钻头喷出,并起到润滑和降温钻杆,运输排出切削土体、维持孔壁稳定性的作用。

(3) 回拖安装管道

将管道通过旋转接头安装在扩孔钻头上,并随着钻杆的回拖不断使管道回拖安装在孔壁中。在此过程中,泥浆不断地从钻头喷出,并起到润滑和降温钻杆,减小管道和孔壁摩擦力,运输排出切削土体,维持孔壁稳定性的作用^[24-26]。

可以看出,在水平定向钻进施工导向孔钻进、扩孔和管道回拖的整个过程中,泥浆对施工的成败具有至关重要的作用,它不断切削土体,将土体不断排出,并可降低钻杆和管道温度,润滑钻杆和管道,减小管道和孔壁之间的摩擦力,另外泥浆还可以形成泥浆护壁起到加强孔壁稳定性的作用^[27-34]。虽然一定的泥浆压力可以加强孔壁的稳定性,但过大的泥浆压力可使孔壁周围土体发生较大的塑性变形,从而有可能造成泥浆流失和过大的地面变形,对环境和地面建筑物产生不利影响。水平定向钻进施工现场的孔壁失稳、冒浆现象如图 1-2 所示^[35-37]。

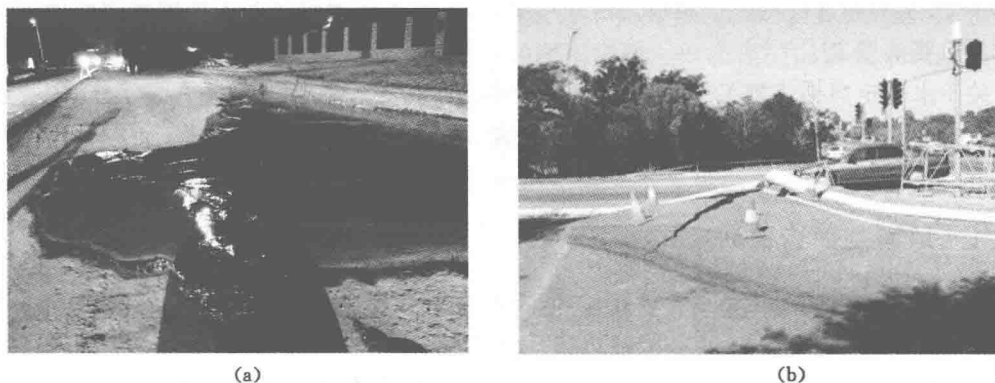


图 1-2 水平定向钻进施工现场的孔壁失稳、冒浆现象

研究表明,在水平定向钻进施工的第一过程即钻先导孔过程中,地面位移的大小和泥浆从地面流失的可能性最大,因为在这一过程中,泥浆的压力相对较大。而在水平定向钻进施工的第二个过程中,泥浆压力、地面位移和泥浆流失的可能性相对较小。在水平定向钻进施工的第三个过程中,泥浆压力、地面位移和泥浆流失的可能性相对第二个过程较大^[38-41]。在水平定向钻进施工的整个三个过程中,保证工程顺利进行和成功的一个重要因素就是确保孔壁的稳定性。较大的地面位移、泥浆流失、孔壁失稳会对地面构筑物、地下原有管线系统及生态环境产生不利影响。一项调查研究表明,随着水平定向钻进技术的广泛应用,越来越多的承包商发现并意识到这一问题对工程质量和工程安全的重要性,而且越来越多的施工承包商更加关注水平定向钻进施工过程中的地面变形问题^[42-45]。

从以上分析可以看出,影响水平定向钻进施工技术在各种不同类型土质中应用的一个挑战就是如何有效地避免过大的地面变形和保证施工过程中孔壁的稳定性。避免过大的地面变形和孔壁失稳的一个重要措施就是在施工前预测地面将要发生的位移大小,有效地评估孔壁的稳定性^[46-48]。而有效评估孔壁稳定性的关键就是预测不同土体条件和不同施工状况中的最大注浆压力的大小,保证施工过程中的注浆压力不大于最大注浆压力,从而避免孔壁失稳和泥浆流失^[49-50]。在大多数情况下,评估孔壁稳定性需要考虑两个极限注浆压力,即最大允许注浆压力和最小注浆压力。最大允许注浆压力是为了避免地面发生较大的

位移和泥浆流失,而最小注浆压力是为避免孔壁发生坍塌,保证泥浆在孔洞中正常流动和钻杆顺利钻进和回拖。本书主要研究如何预测、评估水平定向钻进施工过程中的地面位移、孔壁稳定性和最大注浆压力。

1.2 水平定向钻进施工地面变形研究现状

在水平定向钻进施工中,具有一定压力泥浆的作用非常关键。但在浅层水平定向钻进施工中,如果泥浆压力过大,很容易造成地面产生较大变形,从而影响管道附近地面和地下构筑物的安全。Allouche 等做的一项调查研究表明,89%的水平定向钻进管道施工单位,74%的水平定向钻进管道设计院在市政管道施工和设计中遇到过因为地面变形过大而带来的各种问题^[42]。而且,95%的施工和设计人员认为地面变形过大是严重影响水平定向钻进施工安全、工期和造价的一个难题。由此可见,研究水平定向钻进施工中的地面变形问题具有重要的意义^[43,51,52]。

关于水平定向钻进施工中的地面变形等问题的相关研究,前人做了大量工作,主要包括理论研究、数值模拟研究和试验研究,以及将这三种方法中的两种或三种进行综合利用和对比分析,具体如下所述。

1.2.1 地面变形理论研究

水平定向钻进施工中地面变形理论研究较少,部分学者在研究这一问题时参考了其他非开挖施工技术如顶管施工、小型隧道施工中地面变形的相关研究成果。比较典型的有 Peck^[53]通过对大量盾构隧道地面变形数据及工程数据的研究,认为地面变形是由土体损失引起的,地面变形槽呈拟正态分布,并假定土体不排水和土体在施工过程中不可压缩,提出了隧道施工中地面变形的经验计算方法,横向地面变形的计算公式如式(1-1)所示。

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1-1)$$

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

式中 $S(x)$ ——地面变形量, m;

x ——距隧道轴线的横向水平距离, m;

$S_{\max}$ ——隧道轴线上方的最大地面沉降量, m;

V_{loss} ——盾构隧道单位长度体积损失量, m^3/m ;

i ——地面变形槽宽度系数, m, 即沉降槽曲线拐点距隧道轴线的水平距离。

Peck(1969)通过现场试验得出 i 与隧道外半径 R 之间的关系见式(1-3):

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

式中 R ——隧道外半径, m;

h ——隧道轴线至地面深度, $h=0.8\sim1.0$ m, 土越软, h 取值越大。

Peck 公式非常简单,可计算隧道、顶管等施工时的地面变形时存在一些问题,如仅考虑了土体瞬时变形,不能考虑土体受扰动引起的二次固结沉降;参数 i 和 V_{loss} 较难准确确定,对计算结果的影响较大;没有考虑施工工艺等。

之后,许多学者对 Pack 公式进行了完善。如 Atkinson 和 Potts^[54]、Clough 和 Schmidt^[55]、O'Reilly 和 News^[56]、Loganathan 和 Poulos^[57]、刘建航等^[58]对地面变形槽宽度系数 i 的取值方法进行了研究;Attewell 和 Farmer^[59]、Attewell 和 Woodman^[60]提出了 $S_{\max}$ 及 V_{loss} 不同的取值方法;Attewell 和 Selby^[61]对 Peek 公式进行了修正。

上述这些方法的提出仅仅是用来计算隧道施工中发生的沉降,由于非开挖技术特别是水平定向钻进技术的施工原理和过程与隧道有很大不同,不能把上述计算方法直接用来计算水平定向钻进施工的地面变形。Bennett^[62]提出了计算非开挖技术如顶管施工、微型隧道施工、水平定向钻进施工过程中的地面变形的的方法,但在他的研究中未考虑注浆压力对土体变形的影响。而从现场经验来看,在水平定向钻进施工中,注浆压力对地面变形影响较大,地面隆起主要是由注浆压力引起的,故该方法不能用于计算水平定向钻进施工中的地面变形问题。

魏刚等^[63-65]对顶管施工中的地面变形问题进行了研究,并重点考虑了顶推力、管道和土体之间的摩阻力、开挖土体损失对地面变形的影响规律。但在他们的研究中依然没有考虑注浆压力引起的地面变形。

Lueke 和 Ariaratnam^[44]运用神经网络的方法对水平定向钻进中的地面隆起问题进行了研究,并提出了一个计算模型,但该模型仅考虑了埋深对地面隆起的影响,不能综合考虑影响地面隆起的其他因素如钻孔孔径、注浆类型、土体参数等对地面隆起的影响,也不能直接根据这些参数来计算土体变形。

李方楠等^[66]考虑了注浆压力对顶管施工中地面变形的影响,提出了考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法,但该方法是基于 Verruijt^[67]解提出的,在计算时需利用复变函数解答,计算过程较为复杂,且其能否在水平定向钻进中进行应用需要进一步进行探讨。

1.2.2 地面变形数值模拟研究

对于水平定向钻进施工中的地面变形问题,前人利用有限单元法和有限差分法等数值模拟方法建立了数值计算模型,做了大量研究。部分学者还将数值模拟方法与理论计算方法和试验结果做对比,以验证数值计算模型的准确性。关于水平定向钻进施工过程中的地面变形问题数值模拟研究现状表述如下。

利用二维有限差分计算软件 FLAC, Duyvestyn、Knight^[68]和 Duyvestyn^[69],建立了水平定向钻进中地面变形数值模拟模型,分析了部分影响地面变形的因素和变形大小之间的关系。他们还利用室内模型试验来验证数值模拟结果,研究表明数值模拟结果和试验结果较为接近,所建立的数值计算模型可有效地计算地面变形。此外,他们还使用表格给出了特定土体中地面变形和注浆压力之间的关系。但在他们的研究中只考虑了一种类型的土体——无黏性的砂土,而忽略了其他土体力学参数对地面变形的影响,故其研究结果能否在其他类型土体中应用还需要进一步的研究。

基于现场试验数据,Lueke 和 Ariaratnam^[44]建立了数值计算模型来研究水平定向钻进管道回拖过程中的地面隆起问题,但他们的模型仅根据较少量的数值计算结果建立起来的,其适用性有待于进一步研究。且在他们的现场试验和数值模型中,只考虑了管道埋深、钻进(回拖)速度、钻头类型、泥浆流速等部分因素,而管道直径、注浆压力、土体力学参数等对地面变形有重要影响的参数并没有考虑进去。

Wang 和 Sterling^[46]考虑了注浆泥浆对土体的渗透作用,利用有限单元法,建立了可考虑注浆浆液和土体耦合的水平定向钻进施工数值模型,但在他们的数值模拟中没有对地面变形进行监测,仅研究了注浆压力对孔壁周围土体塑性区发展规律和最大注浆压力的影响规律。

Xia^[70-71]、Elwood、Moore^[72-73]等基于室内模型试验,利用有限单元法同样建立了一系列数值计算模型来研究水平定向钻进施工钻孔阶段的地面变形问题,并将数值模拟结果与试验结果进行了对比,研究表明,数值模拟计算结果远远小于室内试验监测到的结果。另外,在他们的数值模拟中并没有考虑埋深和钻孔直径等对地面变形的影响规律。

Sun 等^[74]利用三维有限差分软件(FLAC3D)建立了数值计算模型。在他们的模型中重点考虑了土体力学参数如内摩擦角、黏聚力、重度、弹性模量等对地面变形的影响规律。研究表明,土体弹性模量对水平定向钻进施工中地面变形的影响较为明显,而内摩擦角、黏聚力等对土体变形的影响作用较小。但在他们的研究中,并没有考虑可能对地面变形影响较大的因素如钻孔孔径、埋深等的影响。

1.2.3 地面变形试验研究

Lueke 和 Ariaratnam^[43]等在加拿大阿尔伯塔大学校园试验场地上开展了不同工况条件下的水平定向钻进现场试验。他们设计了 4 组不同的试验,重点考虑了埋深、钻进速度和钻头类型等因素对地面变形的影响。但限于试验条件和经费,每种因素仅仅考虑了两种情况,忽略了钻孔孔径、土体类型、泥浆压力等因素的影响。

针对水平定向钻进施工中的地面变形和孔壁稳定性问题,Xia(2009)^[71]、Elwood^[72]、Elwood 和 Moore^[73]等做一系列室内模型试验。他们使用美国 TSI 粒子图像速度场仪(Particle Image Velocimetry)来监测了试验过程中的地面位移。为确保试验的准确性,他们在试验中使用了两个成 90°布置的速度场仪来监测地面位移。另外,他们通过有限单元法对室内模型试验进行了模拟,建立了和室内试验相匹配的数值模型。但研究表明,试验中测得的地面变形要远远大于数值模拟结果,这可能是由于室内模型试验箱尺寸太小而引起的边界效应造成的。

Cholewa^[75]等做了一系列关于砂土中 PVC 管被混凝土管置换施工对地面变形影响规律的研究。在试验中,他们监测了地面的位移和应变变化,为管道置换中的地面变形研究提供了宝贵试验资料。这些规律虽然不能直接应用于水平定向钻进施工技术研究中,但同样作为一种非开挖技术,可对水平定向钻进施工中的地面变形问题研究提供一定参考。

Lueke 等^[76]运用数字照相测量技术对非开挖施工中的变形进行了监测,并将监测结果与数值模拟结果进行了对比。虽然两者结果较为接近,但在本次监测中只有一组试验,监测结果与数值模拟的匹配需要进一步的研究。

通过以上分析可看出,目前关于水平定向钻进施工中地面变形的现场数据还比较少,试验结果和数值模拟结果匹配度较差,且可直接计算水平定向钻进施工中地面变形的理论方法也不成熟,在后续研究中需通过开展数值模拟、现场试验和建立理论模型等多种方法相结合的方式研究该问题。

1.3 水平定向钻进孔壁稳定性研究现状

在水平定向钻进施工中,孔壁稳定性是影响工程安全、施工进度和地面建筑物安全的一个重要的问题。如果施工过程中发生孔壁失稳、冒浆、地面变形过大等现象,将严重危害施工安全,延长施工工期和增加施工费用,影响地面邻近建筑物的安全,并对环境产生不利影响。而孔壁失稳问题主要是由于孔壁中的注浆压力过大或过小造成的。在水平定向钻进施工的整个过程中,泥浆的作用非常关键。一定压力的泥浆可以起到切削、运输土体,降低钻头温度,减小钻杆、钻头与土体之间的摩阻力,维护孔壁稳定性的作用。但如果过大的泥浆压力作用在孔壁上时,会对造成孔壁周围土体的破坏,从而引起孔壁失稳、地面变形过大、冒浆等问题。而当注浆压力过小,没有足够的压力来支撑孔壁上方的土体时,同样可能会引起孔壁塌陷等问题,增大钻杆或管道负重,从而导致钻进和回拖时的阻力变大,严重时甚至会压弯、压坏钻杆或管道;过小的注浆压力还会影响泥浆流动,从而使土体不能正常排出。因此,在水平定向钻进施工时,为保证孔壁稳定性,需满足注浆压力小于最大允许注浆压力且大于最小注浆压力。

1.3.1 水平定向钻进最大注浆压力研究

水平定向钻进孔壁失稳一般有两种破坏模式——拉裂破坏和剪切破坏,如图 1-3 所示。

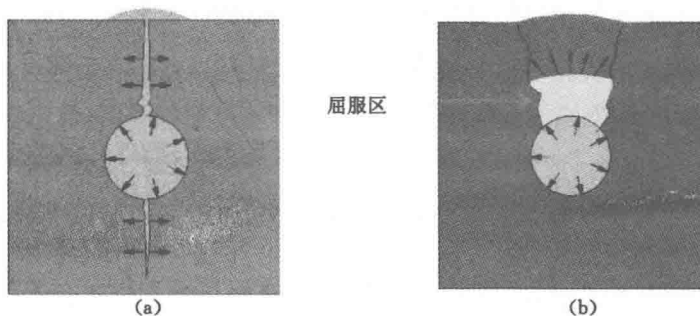


图 1-3 水平定向钻进施工中孔壁失稳破坏模式(Lan 和 Moore,2016)

(a) 拉裂破坏;(b) 剪切破坏

当一定压力的注浆浆液作用在孔壁岩土体上时,随着注浆压力的增大,一般会发生两种破坏模式,即岩土体剪切破坏和张裂破坏。在一般土体或硬质浅层土体中进行水平定向施工时,孔壁由于注浆压力过大而引起的孔壁失稳往往是土体剪切破坏。而在岩石或较深层的硬质土体中,孔壁在注浆压力过大失稳时往往是由岩土体的张拉破坏引起的^[77-80]。

1.3.1.1 水平定向钻进最大注浆压力理论研究

在水平定向钻进施工技术的发展中,理论计算模型已经被用来预测最大注浆压力,而几乎所有的这些理论计算模型都是基于小孔扩张理论提出的。在过去几十年,小孔扩张理论已在解决岩土工程问题中有了广泛应用(Yu)^[81]。Carter 等^[82]假设土体是理想弹塑性体,土体材料服从 Tresca 或 Mohr-coulomb 屈服准则,根据弹塑性理论给出了具有初始半径的球形孔或柱形孔中,孔壁上有压力均匀分布的无限体内扩张的一般近似解^[83]。

Yu 和 Houlsby^[84]、Yu^[81]将 Carter 等^[82]提出的小孔扩张理论进行了改进和扩展,给出了各向异性岩土体中、饱和岩土体中、半无限空间岩土体中的小孔扩张一般解,并在打入桩施工工程中进行了应用,成功地计算、评价了桩基的最大承载力和工程安全性。这是小孔扩张理论在岩土工程中的一个很好的应用实例,为后续小孔扩张理论在岩土工程其他方面进行应用打下了基础。之后,小孔扩张理论广泛地应用于石油勘探钻孔、桩基施工等工程中。

在 1988 年的国际非开挖大会上,Luger 和 Hergarden^[85]首次提出了一个计算水平定向钻进施工中预测最大允许注浆压力的计算模型,他们的计算模型和理论是在 Vesic 小孔扩张理论基础上加以改进提出的。在该理论中,Vesic^[86]假设小孔的长度远大于小孔半径,小孔呈轴对称,土体材料为均匀各向同性体,且不考虑土体的软化和硬化,将该问题简化为二维小孔平面应变问题。在塑性区出现之前,土体材料呈弹性状态,当塑性区开始发展后,土体材料服从莫尔—库仑屈服准则。弹性位移的增长遵守胡克定律,塑性区中的弹性变形忽略不计^[90]。在 Luger 和 Hergarden 提出的理论中,小孔孔壁在注浆压力过大时的失稳问题被假设是由于岩土体的剪切破坏引起的。当注浆压力施加在钻孔孔壁上时,孔壁周边的土体首先发生弹性变形,随着注浆压力的增大,弹性变形不断增大。当注浆压力超过一定值时,土体塑性变形开始出现,并开始向孔壁周围进行发展。随着注浆压力的进一步增大,当塑性区扩展到地面时,注浆液将流出,孔壁将发生失稳,此时的注浆压力被称为最大允许注浆压力,此时的半径被称为最大塑性半径。所以,为了保证施工中孔壁的稳定性,避免冒浆、地面开裂等现象发生,需要控制注浆压力大小,从而将塑性半径控制在安全范围内。该计算模型和理论提出后,在水平定向钻进技术领域得到了较为广泛的应用,一般被称为 Dleft 计算模型(Keulen)^[87]。Dleft 模型的计算公式如式(1-4)所示。

$$p_{\max} = u + [p_0(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi + c \cot \varphi] \cdot \left[(r_0/r_{\max})^2 + \frac{p_0 \sin \varphi + c \sin \varphi}{G} \right] \frac{-\sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - c \cot \varphi \quad (1-4)$$

式中 $p_{\max}$ ——水平定向钻进中的最大允许注浆压力,由不同的土体参数、钻孔直径、埋深等不同工况决定;

φ ——土体内摩擦角,岩体在竖向力作用下发生剪切破坏时错动面的倾角,可由三轴压缩试验、直接剪切试验测定;

c ——土体黏聚力,黏性土的特性指标,包括土粒间分子引力形成的原始黏聚力和土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力,可由三轴压缩试验、直接剪切试验测定;

r_0 ——钻孔的初始半径;

G ——剪切模量,又称切变模量或刚性模量,是剪切应力与应变的比值,可由弹性模量和泊松比计算得到;

u ——初始地下水压力,可由 $\gamma_{\text{water}} \cdot h_w$ 进行计算;

$r_{\max}$ ——最大塑性半径,即塑性区可扩展的最大范围,最大允许注浆压力的值与最大塑性半径直接相关;

p_0 ——土体中的原始应力, $\sigma'_0 = \gamma(h - h_w) + \gamma'(h_w)$ 。

其中,

γ ——地下水位以上的土体重度;

γ' ——地下水位以下的土体有效重度, $\gamma' = \gamma - \gamma_{\text{water}}$;

h ——钻孔的埋深, 即钻孔圆心到地面的距离;

h_w ——钻孔到地下水位距离。

由以上公式可知, 为了计算水平定向钻进中的最大允许注浆压力, 首先应确定最大允许塑性半径的大小。根据公式定义, 最大允许塑性半径等于钻孔中心到地面的距离, 也就是钻孔埋深 h 。这就意味着, 在实际施工工程中, 安全系数被设置为 1, 当注浆压力达到通过 Dleft 计算出的最大允许注浆压力时, 会立即发生孔壁失稳和冒浆等现象。为了保证施工安全, 留有一定的安全余地, Luger 和 Hergarde^[85] 建议在实际工程中评估孔壁安全性时, 所使用的最大注浆压力不要大于通过式(1-4)计算得到的结果。

Van 和 Hergarden^[88] 认为不能将最大允许塑性半径和安全系数统一定义, 而应该根据土体类型进行进一步划分。他们通过多次工程实践建议在黏性土中进行水平定向钻进施工时, 最大塑性半径的值应取为钻孔埋深的二分之一, 即 $r_{\text{emax}} = \frac{1}{2}h$; 而在无黏性土中, 最大塑性半径的值应取为钻孔埋深的三分之二, 即 $r_{\text{emax}} = \frac{2}{3}h$ 。这一建议被国际管道研究协会(Pipeline Research Council International)采纳, 作为协会评价水平定向钻进施工孔壁稳定性的一个建议标准^[90]。Keulen 等^[87] 将 Dleft 计算模型应用在了美国军工管道施工中, 成功预测了最大注浆压力的大小并避免了孔壁失稳的发生, 被美国陆军工程兵团(United States Army Corps of Engineers)评价为是最先进水平的施工案例之一, 之后该评价标准在美国军工管道中得到了广泛应用^[89-91]。

虽然 Dleft 计算模型在工程界应用较为广泛, 随着近几年研究的进一步深入和实时注浆压力监测传感器的应用, 大量研究表明, 利用 Dleft 模型计算出的最大允许注浆压力值偏大。在没有达到该值时, 就有可能发生孔壁失稳、冒浆等现象, 故 Dleft 计算模型偏于不安全, 其可靠性、适用性需要进行进一步研究。

Keulen^[87] 尝试取代最大允许塑性半径为最大允许塑性应变作为新的最大允许注浆压力判定标准, 并对 Dleft 模型进行了进一步改进。他认为, 当注浆压力施加在孔壁上之后, 孔壁周围的岩土体可以不断向外进行移动, 即孔壁越来越大。随着注浆压力的增大, 当岩土体移动到一定距离时, 岩土体会形成一个破坏楔体。如果压力进一步增大, 裂缝可能会开始发展, 如图 1-4 所示。

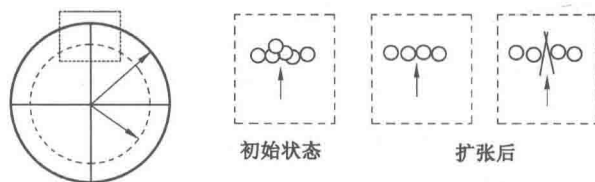


图 1-4 孔壁中岩土体的受力破坏模式(Keulen, 2001)

基于该受力破坏模式和最大塑性应变理论, Keulen^[87] 给出了一个新的最大允许注浆压力计算公式, 如式(1-5)所示。

$$p_{\text{max}} = \left[(\epsilon_{t, \text{max}} \frac{2G}{p_0 + c \cot \varphi} \cdot \frac{1+m}{1-m}) \frac{1-m}{k_{\text{cyl}} + 1} \cdot \frac{2}{1+m} \cdot (p_0 + c \cot \varphi) \right] + c \cot \varphi \quad (1-5)$$