

国家自然科学基金面上项目（51278099）资助

盾构隧道施工 环境适应性的流固耦合分析

宋锦虎 缪林昌 著



中国矿业大学出版社

国家一级出版社 全国百佳图书出版单位

国家自然科学基金(51278099)资助

盾构隧道施工环境适应性的流固耦合分析

宋锦虎 缪林昌 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书针对盾构在水下地层中的施工难点问题,基于流固耦合理论,分析了盾构隧道施工参数的环境适应性问题。首先通过盾构施工的三维流固耦合数值计算,分析了根据孔压监测数据分析盾构施工参数环境适应性的方法。然后进行了干砂和饱和砂的对比模型试验,结合楔形体模型计算分析了地下水对开挖面最小支护力的影响。最后根据盾构隧道实际施工情况,指出开挖面支护力是一个随时间波动变化的力。通过计算得到了分层土模型中波动力在开挖面前方产生超静孔压的大小,以及此超静孔压对开挖面稳定性的影响。本书分析结果可为盾构隧道施工参数的合理制定提供依据。

图书在版编目(CIP)数据

盾构隧道施工环境适应性的流固耦合分析/宋锦虎,缪林昌

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4105 - 4

I. ①盾… II. ①宋…②缪… III. ①隧道施工—盾构法—研究 IV. ①U455.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 220240 号

书 名 盾构隧道施工环境适应性的流固耦合分析

著 者 宋锦虎 缪林昌

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 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字

版次印次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

盾构在水位下地层中的施工参数与环境适应性问题是城市地铁施工中的难点问题,由于地下水导致的开挖面坍塌、地表沉降、管片破裂等工程问题经常发生,针对此问题的相关研究理论往往将应力分析和渗流分析单独进行,两者相结合的流固耦合研究工作较少,而土体中超静孔压的产生和消散均与此密切相关。因此,本书基于流固耦合理论,针对盾构隧道的施工参数环境适应性问题,采用理论解析、数值模拟、模型试验以及现场工程实测等方法进行了研究,包括盾构施工的孔压扰动规律、开挖面稳定性以及管片承载规律等方面。通过研究得到了如下结论:

(1) 结合上海虹桥迎宾三路隧道工程,采用所编制的 ABAQUS 辅助分析程序,建立了包括各种盾构施工参数影响的三维流固耦合分析模型,并将不同施工参数情况下超静孔压计算结果与实测值进行了对比,验证了模型的合理性。之后分析了开挖面推力、注浆压力、开挖速度、开挖面水头、隧道埋深以及土体渗透系数等参数对隧道周围最大超静孔压的影响,获得了最大超静孔压拟合计算公式,与现场实测和解析解的对比说明三维流固耦合计算可更合理分析盾构施工对孔压的扰动。同时,较大的超静孔压值对应于较大的地表沉降,因此可将实测孔压值与数值计算结果进行对比,从而进行施工参数的调整。在上海虹桥迎宾三路隧道工程试验段的施工过程中,现场监测数据表明可根据孔压监测值调整施工参数,最终减小地面沉降。

(2) 针对地下水对开挖面上方土拱的影响,进行了干砂和饱和砂的对比模型试验。实验结果显示,地下水的存在减缓了土拱随开挖面变形的形成过程;并减小了土拱发展的高度,在相同的开挖面变形时,相对于干砂时地下水减小土拱高度的比例为 10%~15%。同时,地表沉降的发展过程与开挖面上方土拱的形成具有对应关系,地下水的存在通过降低土拱发展高度最终减小了地面沉降。根据实验结果结合楔形体模型提出了计算开挖面最小推力时

的修正系数,即需对方棱柱体受到的侧土压力系数进行修正。

(3) 盾构施工过程中地质条件变化、刀盘循环转动切割土体、停盾拼装管片等因素对开挖面推力值的稳定性将产生影响,因此结合现场监测数据,指出开挖面推力是一持续波动的力,此波动力将在开挖面前方产生可累积的超静孔压,最终对开挖面稳定性产生影响。通过建立简化的分层土分析模型,得到了开挖面前方超静孔压计算方法;进而采用楔形体模型,给出了超静孔压对开挖面稳定性影响的计算方法。计算结果显示超静孔压将显著降低开挖面的稳定性,因此在开挖面支护力的计算中需考虑推力波动变化的影响。通过参数分析给出了不同情况下产生的超静孔压大小以及对开挖面稳定性影响的计算结果。

(4) 土体渗透系数与其承载时孔隙比的变化存在对应关系,基于此给出了简化的分段孔隙比—渗透系数关系曲线,用于管片整体渗透时的流固耦合计算。首先建立了包括管片和土体的流固耦合分析模型,包括渗流模型和力学模型;力学模型中土体分为弹性区和塑性区,其中弹性区根据孔隙比—渗透系数关系曲线进一步分区,从而考虑土体渗透系数变化的影响。通过各分区半径取值在渗流计算和力学计算之间建立起联系,从而得到了流固耦合计算方法。计算结果为实际管片承载设计提供了参考。

本书共6章,由河南城建学院宋锦虎和东南大学缪林昌共同撰写,具体分工为:第1章由缪林昌撰写,第2、3、4章由宋锦虎撰写,第5、6章由缪林昌、宋锦虎撰写。宋锦虎计15万字,缪林昌计5万字。

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目“地铁移动荷载作用下软土的软化机理与长期沉降预测技术研究”(51278099)的资助。

作者

2017年10月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	水下盾构隧道施工研究中存在的问题	14
1.4	本书的主要工作	14
2	盾构施工对孔压扰动的三维流固耦合分析	16
2.1	概述	16
2.2	工程概况	16
2.3	三维流固耦合数值模型的建立	17
2.4	ABAQUS 盾构隧道三维辅助分析程序的研制	25
2.5	数值计算模型的验证	26
2.6	参数计算分析	27
2.7	计算结果与实测和解析结果的对比分析	34
2.8	孔压变化值与地面沉降之间关系的讨论	36
2.9	本章小结	37
3	地下水对开挖面上方土拱效应影响的实验研究	40
3.1	概述	40
3.2	试验设计	41
3.3	地下水对开挖面上方土拱效应影响的分析	47
3.4	砂土地层中开挖面最小支护力计算方法的修正	57
3.5	本章小结	63
4	波动推力引起的超静孔压对开挖面稳定性的影响分析	65
4.1	概述	65
4.2	波动推力作用下开挖面前方超静孔压的计算方法	68
4.3	超静孔压对开挖面稳定性影响的计算方法	72

4.4	工程算例分析	75
4.5	参数分析	79
4.6	本章小结	85
5	渗流作用下管片承受压力的流固耦合分析	86
5.1	概述	86
5.2	不同压力下土体渗透系数的变化规律	87
5.3	分析模型及其基本假设	88
5.4	衬砌及周围土体渗流场的分析	90
5.5	衬砌及周围土体应力和位移场的分析	94
5.6	衬砌及周围土体应力和位移的流固耦合分析	101
5.7	本章小结	108
6	结论与展望	109
6.1	结论	109
6.2	展望	111
	参考文献	112

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

地铁作为一种解决城市交通拥堵,减轻城市交通压力的有效方法已经被我国的许多城市所采纳。目前我国已有 30 个城市的地下轨道交通项目投入运营,总里程超过 3 000 公里。目前,获得地铁建设批复的城市有 58 个,规划线路总长超过 7 000 km,总投资超过 35 000 亿元,我国已进入城市地铁建设的高潮时期^[1]。尽管盾构施工技术在我国得到了迅速发展,但与欧洲、美国、日本等发达国家相比,我国使用盾构技术的历史还比较短,施工经验比较较少,尚无全国性的盾构隧道设计和施工的专门规范^[2]。

盾构法隧道第一次使用是 1825 年英国工程师 Brunel 在英国伦敦泰晤士河下用一台矩形盾构修建一条行人隧道^[3]。在此以后的约 180 年间,盾构法隧道经历了巨大的进步,应用非常广泛,在很多地质环境中得到了成功应用,包括含水量极大的砂砾石层^[4,5]。盾构法是暗挖法施工中的一种全机械化施工方法,它是将盾构机械在地下推进,通过盾构外壳和管片支承四周围岩防止发生往隧道内的坍塌,同时在掘进面前方用切削装置进行土体开挖,通过出土机械运出洞外,靠千斤顶在后部加压顶进,并拼装预制混凝土管片,形成隧道结构的一种机械化施工方法^[2]。与传统的隧道掘进技术相比,盾构法施工具有安全可靠、机械化程度高、工作环境好、土方量少、进度快等优点,尤其在地质条件复杂、地下水位高而隧道埋深较大时,只能采用盾构法施工。

我国幅员辽阔,地质条件复杂多变,地下水广泛存在于地下岩土体中。隧道施工地下水渗流与掘进面失稳破坏是高地下水位地层施工中普遍存在的重要问题,在一些盾构法工程应用较多的国家,如英国、日本、德国等,其关于掘进面稳定相关理论研究已经取得不少成果,对施工中由于地下水渗流引起的掘进面稳定相关方面的分析方法及理论也在不断发展。与之相比,国内盾构施工技术刚刚起步,对隧道掘进面失稳和破坏机理研究仍然处于过分依赖工程经验阶段,对于复杂地质条件如大量含水砂砾层、无黏聚力的极不稳定土层以及高地下水位情况下盾构隧道的施工尚未展开深入的研究。

盾构开挖过程中超孔隙水压的存在使土体当中有效应力降低,从而降低其抗剪能力^[6];水向开挖边界的渗流形成对土体的渗透力,影响开挖面的稳定性;同时,地下水的

存在对地表沉降和支护结构荷载均产生影响。国内外有关这方面的研究成果很少,薄弱的理论与蓬勃发展的工程实践是极不相称的。因此,地下水对盾构施工的影响需进行系统分析,从而对施工参数进行优化。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 开挖面稳定性研究现状

保持开挖面稳定是隧道盾构施工中关键要素之一,对盾构隧道的安全施工具有重要作用。开挖面稳定相关研究主要包括掘进面破坏模式及机理研究、掘进面支护压力大小的确定以及施工对周围环境影响的研究等。研究的方法及手段主要有经验公式或解析计算方法、现场资料实测分析、室内物理模型试验研究及计算机数值模拟等^[7]。

(1) 理论分析研究现状

盾构掘进施工中,掘进面的破坏失稳主要表现为整体破坏,大量研究都着重于掘进面整体破坏失稳。整体稳定分析主要有两种分析方法^[8]:一类是利用塑性极限理论分析计算,另一类是利用掘进面前方滑动体力的平衡进行稳定分析。

塑性极限分析通过计算中假定掘进面前方滑动边界的形状,利用上、下边界定理计算掘进面极限最大及最小支护压力。B. Broms 和 H. Bennermark^[9]于 1967 年提出了不排水黏性材料无支护开挖中描述掘进面状态的稳定系数概念:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma(C + D/2) - \sigma_T}{C_u}$$

式中, σ_s 为地面超载; γ 为黏土的容重; σ_T 为隧道掘进面支护压力(无支护则为零); C_u 为隧道轴心处土体的不排水抗剪强度; C 为隧道埋深; D 为隧道直径。

通过实际现场开挖工程的实测统计及室内简单的实验研究得到稳定系数 N 大于 6 时掘进面将失去稳定。

E. Leca 和 L. Dormieux^[10]提出用一个或两个圆锥形块体圆弧滑动的上限解法分析 Mohr-Coulomb 材料中盾构隧道掘进面的稳定性,其研究假设掘进面有 3 种破坏机制,分别如图 1-1(a)、图 1-1(b)及图 1-1(c)所示。根据上下限理论得出盾构隧道掘进面最大最小支护力,如下式所示:

$$\sigma_{Tmin} = N_s^- q_s + N_r^- \gamma D + (N_s^- - 1) \cdot c \cdot \cot \phi \quad (1-1)$$

$$\sigma_{Tmax} = N_s^+ q_s + N_r^+ \gamma D + (N_s^+ - 1) \cdot c \cdot \cot \phi \quad (1-2)$$

式中, γ 为土体容重; q_s 为地表超载; D 为隧道直径; σ_T 为支护压力; N_s^+ 、 N_r^+ 、 N_s^- 、 N_r^- 为稳定系数。

基于 Janseen 的筒仓理论^[11],Horm 最早提出了三维楔形体模型的概念^[12],如图 1-2 所示。它由一个位于掘进面前方的楔形体和掘进面上方的棱柱体两部分组成,假设地层均匀,楔形体上部土柱考虑土体的松动土压力,采用该模型来分析盾构隧道掘进面的极限支护压力。Anagnostou^[13]利用同样的计算模型,把理想状态下的泥膜看作不透水的

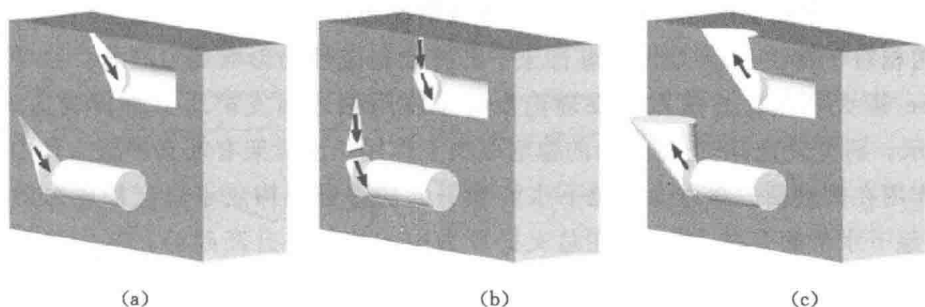


图 1-1 Leca-Dormieux 提出的掘进面的破坏形式

(a) 塌落破坏 I ; (b) 塌落破坏 II ; (c) 鼓出破坏 III

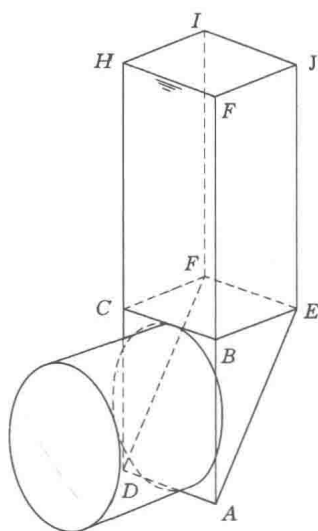


图 1-2 三维楔形体计算模型

“密封”，研究了地层的抗剪强度、地层渗透系数、泥水黏度、泥水重度、泥水压力、隧道的几何尺寸及掘进面稳定性安全系数的相互关系，并重点分析了泥水渗入地层的时间效应。

在楔形体分析模型中，开挖面前方楔形体受到上覆土体的压力作用，如何确定此压力的大小，不同学者提出了不同的研究方法，主要包括：全覆土重理论、普氏土压力理论和太沙基松动土压力理论三种方法^[7]。其中太沙基松动土压力理论认为在上部土体当中沿开挖面两侧形成了剪切面，下部土体受到的压力为土体自重减去剪切面上所受到的滑动阻力，由此可近似考虑开挖面上方土拱的影响。

关于开挖面前方滑动面的具体形状，一些学者做了不同的假设并进行了分析。其中 Mollon^[14]假设滑动面为具有一定规律的三角柱体形成的曲面，进而进行了开挖面稳定性的分析。

对于地下水对开挖面稳定性的影响，许多学者进行了研究^[15-18]。Broere^[15]在其研究成果中给出了地下水条件下影响隧道掘进面稳定的超静孔隙水压力的经验表达式；Park

和 Blackburn^[16] 采用上限分析法针对考虑渗流情况下的开挖面稳定性进行了分析, 分析结果表明相对于黏性土, 渗流对无黏性土下开挖面稳定性的影响更为显著。在考虑渗透力时, Lee 等^[18] 利用塑性极限上限理论推导了隧道掘进面支护压力解析表达式, 如式 (1-3) 所示。研究发现, 隧道掘进面的稳定取决于作用于土骨架有效支护压力和由水头差引起的作用在掘进面的渗透力。地下水流动引起的渗透力构成了总支护压力的主要部分, 随着地下水位的升高, 渗透力在总支护压力中的比值呈升高趋势。文中将理论分析结果与离心实验结果相对比, 两者取得较好的一致性。

$$N_s \left[(K_P - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_r (K_P - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_P - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{s,F}}{\sigma_c} + 1 \quad (1-3)$$

式中, σ_s 为地表超载; $\sigma_{s,F}$ 为作用在隧道掘进面渗透力的水平分量; σ_T 为隧道掘进面支护压力; C 为隧道埋深; D 为隧道直径。

由于可考虑到渗透的作用, 使得理论分析方法得到深入发展, 但由于不能得出土体变形情况, 不能够对施工参数对周围土体变形的影响做出判断, 并且渗流作用下盾构穿越复合土层的掘进面稳定性分析比较复杂, 限制了理论分析方法的应用。

(2) 模型试验研究现状

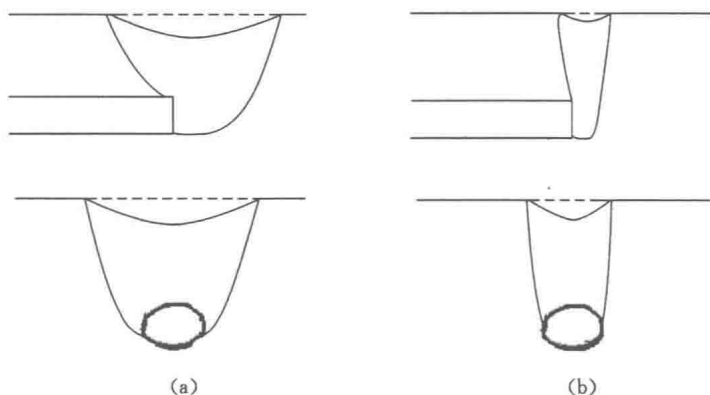
盾构施工时现场监测受到实际施工条件的限制, 往往难以得到全面的分析数据, 而室内模型试验可以很好地解决此问题。因此模型试验作为盾构隧道研究的重要手段得到广泛应用, 尤其在破坏实验中研究滑动面的形状具有重要作用。

早期学者通过简单的室内小尺寸模型研究了隧道掘进面的破坏问题, 试验中普遍在地表施加超载以使掘进面土体出现破坏状态。Chambon 和 Corte^[19] 通过在砂土地层中逐渐减小支护力, 研究了不同埋深情况下掘进面的破坏形式, 得知: ① 掘进面前方破坏形状为楔形体, 破坏区域上方基本表现为筒仓状, 随着埋深的增大, 破坏面反应不到地表面; ② 极限最小支护压力的大小与埋深关系不大。Hisatake^[20] 和 Atkinson^[21] 的试验也得到同样的破坏形式。

Mair 在对文献评述的基础上^[22,23], 给出了黏土和砂土隧道开挖面破坏机理更为一般的概念解释, 如图 1-3 所示。认为黏土和砂土的工作面破坏机理研究有显著的区别, 在黏土中, 工作面失稳的扩展规律是自隧道向上部和两侧变得明显较隧道直径宽; 而在砂土中, 与这种情况相反的是其扩展近似沿垂直方向从隧道一直发展到地表, 呈狭窄的“烟囪形”。

在常重力情况下可采用缩尺模型研究砂土地层中的开挖面变形破坏情况。Kirsch^[24] 在常规重力场环境下采用缩尺模型, 研究了浅埋盾构隧道所需支护力的大小, 将试验结果与理论计算结果进行了对比, 得知理论解均过高估计了最小支护力。Ahmed 和 Iskander^[25] 采用透明相似材料, 在常重力情况下模拟了开挖面的破坏发展过程。

许多学者采用离心机模型试验的方法研究了开挖面的变形破坏情况。在离心模型试验中, 需要解决开挖模拟与支护、注浆过程及精确的检测仪器的布置等关键技术。Idinger^[26] 采用离心模型试验, 结合数字照相量测技术, 研究了隧道开挖面在不同荷载作用下的破坏情况, 分析了开挖面破坏机理、地表沉降、开挖面支护力等数据, 并将试验结

图 1-3 黏土和砂土隧道工作面失稳破坏机理^[22]

(a) 黏土; (b) 砂土

果与理论结果进行了对比。Nomoto^[27]在离心机中进行了盾构开挖过程的模型试验,监测了施工过程中土压力、地表沉降等数据,并将试验结果与现场监测数据进行了对比,说明了采用离心机模型试验可合理模拟实际盾构的施工过程。徐东^[28]利用离心模型试验针对上海黏土的成拱能力做了研究。研究认为:对于无支护情况,开挖双孔隧道,隧道底部以上 8 m 厚的土层不能形成稳定的天然拱,成拱厚度至少需要 12 m。李君、陈仁朋和孔令刚等^[29]利用大型模型试验对开挖面支护力与开挖面位移的关系曲线进行研究,并通过对开挖面前方土体应力状态变化监测,揭示了基于土拱效应的开挖面破坏模式,并将试验结果和楔体模型计算结果进行对比,对模型存在的问题及参数的选取提出了建议。程展林^[30]通过小尺寸模型试验(直径 0.2~0.3 m)提出了泥水平衡盾构在中粗砂地基中临界泥浆压力公式;周小文^[31]通过离心试验研究了砂土中隧洞开挖支护力与地面沉降关系;李昀^[32]利用小型盾构模型研究了动态开挖过程对泥水盾构开挖面稳定性的影响。

对于地下水的影响, Lee 和 Nam^[33]通过一系列模型实验模拟隧道开挖过程中的地下水流动,度量作用在隧道掘进面上的渗透力大小。实验结果与数值分析结果取得较好的一致性,结论指出,由地下水流动引起的渗透力构成了总体支护压力的主要部分,随着地下水位的升高,渗透力逐渐增大。

离心模型试验在研究盾构施工掘进面失稳破坏与变形方面具有一定的优势,但是由于模拟实际掘进过程的困难、试验数据不易监测、模型尺寸因素、土与结构共同作用的考虑、难以模拟复杂的地层条件和地下水环境以及设备造价与试验经费等方面的原因,阻碍其在相关研究中的普及与深入。

(3) 现场实测研究现状

现场实测资料的分析是最能反映工程实际的研究方法,但是由于地层条件和施工参数的千变万化,使得实测分析只适应于某些具体工程情况,难以套用到其他的工程情况,并且由于施工现场复杂,使得对许多测点的监控难以实现,给分析研究带来了许多不便。

许多学者针对开挖面的稳定性与地表沉降的关系进行了现场实测研究。徐永福^[34]根据上海外滩观光隧道盾构掘进时周围土体孔隙水压力、土压力、衬砌压力及周围地基

变形的实测结果,提出了施工扰动影响度的定义反映盾构掘进施工对周围土体的影响。Chen^[35]针对并行盾构隧道的施工过程,现场监测了地表沉降、土层变形、孔隙水变形等数据,分析盾构开挖对周围环境的影响,得知在盾构施工过程中土体中孔隙水压力显现出Z形变化。Clough和Leca^[36]对复合土层中盾构施工参数对地表沉降的影响进行了现场实测,分析了不同复合土层情况下的施工应对措施。

现场实测分析往往是在盾构正常施工状态时进行的,此时掘进面支护压力处于较为理想的状态。而需要研究的重点在于盾构开挖面处于不平衡的临界状态,在现场此情况是禁止出现的,因此掘进面临界状态的监测数据相当缺乏。

(4) 数值分析研究现状

随着现代计算机性能的不断提高以及计算力学的不断发展,20世纪80年代开始数值计算技术在隧道开挖工程中的应用越来越深入,采用有限元、边界元或有限差分技术反映实际盾构开挖效应的三维有限元仿真技术得到大量的应用。

在不考虑地下水情况下,许多学者针对开挖面稳定性进行了研究。Chen和Huang^[37]采用三维数值模拟方法,计算了隧道在连续开挖过程中土拱的形成过程,并分析了侧压力系数对土拱的影响,给出了计算模型的土拱范围。Franzius^[38]和Shin^[39]总结了在以往学者对于隧道施工的三维数值模拟计算结果的区别,分析了模型尺寸和单元划分尺寸对计算结果的影响。Jirina和Petr^[40]分析了均匀介质掘进面的稳定性。Maynar^[41]则采用离散元技术模拟了隧道开挖面稳定。杨洪杰^[42]建立了模拟盾构掘进的有限差分模型,研究盾构周围土压力及刀盘开口率的变化对土舱内外土压力的影响,也给掘进面稳定性的数值模拟分析提供了思路。朱伟^[43]通过FLAC^{3D}对支护压力与开挖面土体变形的关系进行了数值计算。姜忻良^[44]以广州地铁工程为背景,利用有限元程序ABAQUS针对地铁施工过程进行了计算分析,并将计算结果与现场实测结果进行了对比,得知在盾构通过的不同阶段,平行于隧道方向的水平位移 U_1 与垂直于隧道方向的水平位移 U_2 呈现出不同的变化规律,在1倍隧道直径的区域内, U_1 位移最大值大于 U_2 位移最大值,两相位移均不可忽略。

在考虑地下水的情况下,Lee^[45,46]采用数值模型的方法分析了地下水流向掘进面所产生的渗流力的影响:假定渗流力水平向分量影响掘进面的稳定,进而计算掘进面极限支护力的大小。黄正荣和朱伟^[47]研究了地下水位对掘进面极限支护压力和稳定安全系数的影响。Lee^[48]分析了开挖面前方注浆对阻止地下水渗透和提高开挖面稳定性的效果。

在三维分步开挖计算方法中,在开挖面附近的土体的应力、变形、水头梯度的变化非常大,因此在有限元计算模型中,开挖面附近的单元尺寸需划分得非常小,同时由于隧道开挖的连续性,造成在隧道开挖范围内的单元尺寸均非常小,这就造成有限元模型的单元数量巨大,计算量非常大。即使对于弹性材料模型,计算也需要很长时间。Anagnostou^[49]提出了一种新的计算方法,可以在一个计算步中得到应力、变形和孔隙水压力计算结果,从而解决了分步开挖的缺点。此方法在隧道开挖面中心建立局部坐标系,通过变量变换,将动态的开挖过程转化为静态的计算,同时,考虑土体的应力应变方程,可考虑

应力路径对变形的影响。此方法相比于传统的分步开挖方法,可显著减小计算时间,因此在此在隧道开挖问题的分析中具有广泛的应用前景。高健^[50]采用基于固定在隧道掘进面上参照坐标系,推导了考虑隧道开挖速度、土体的渗透系数以及土体贮水系数的稳态地下水流动偏微分方程,通过伽辽金有限元法推导考虑盾构掘进速度的三维稳态渗流有限元方程,编写计算程序 TME 计算地下水参数和盾构掘进速度的变化对隧道掘进面附近水头场改变的影响;结果发现,低渗透性土层中,盾构掘进速度的增加将导致掘进面附近总水头等值线重新分布,水头下降趋势更加明显,作用在隧道掘进面渗透力显著增加。

由于数值计算方法可以得到土体变形,因此基于变形的分析是数值计算方法的优点之一。Kim 和 Tonon^[51]通过三维数值模拟方法,计算开挖面变形与支护力之间的关系,并根据开挖面变形确定最小支护力,如图 1-4 所示。由此分析了水下隧道不同隧道直径、埋深、侧压力系数、土体力学参数等因素对盾构开挖面的影响,并给出了开挖面所需最小支护力的计算公式;此计算公式与理论解进行了比较,对于无黏性土,隧道埋深小于 $1D$ 时,数值解与理论解吻合,但当埋深大于 $1D$ 时,数值解比理论解大;对于黏性土,数值解均比理论解大。

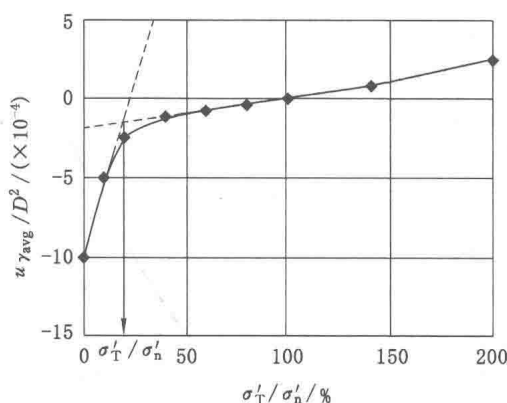


图 1-4 根据开挖面变形确定最小支护力

开挖面的稳定性与地下水密切相关,特别是与开挖面周围超静孔隙水压力的大小密切相关,较大的超静孔压会降低土体的有效应力,从而降低开挖面的稳定性,而目前相关数值计算分析较少考虑此超静孔隙水压力的影响。

1.2.2 盾构施工对土体扰动的研究现状

盾构施工对土体的扰动主要是由于土体开挖、地层损失以及地下水渗流固结所造成^[2]。一方面,隧道开挖造成地层损失,周围土体在弥补地层损失的过程中发生地层移动,引起土体应力发生变化。另一方面,隧道施工扰动土体,造成地下水流失,破坏原始水土平衡,引起周围土体内部孔隙水压力的变化,使地层发生排水固结引起土层变形。

一些学者在现场进行了测试,记录了盾构施工过程中孔隙水压的变化过程。易宏伟和孙钧^[52]通过现场测试,得到了在盾构推进过程中对周围土体孔隙水压力的影响过程,并分析了对土体的扰动机理。蒋洪胜和侯学渊^[53]经过现场测试,综合分析了盾构施工时

对周围土体孔隙水压力和变形的影响,得知在盾构掘进接近、穿越以及远离测孔区 3 个施工阶段,隧道周围不同区域的土层呈现各自不同的移动特征;袁大军等^[54]针对超大直径泥水盾构掘进对周围土体的土体扰动进行了现场监测。

由于现场条件复杂,多种因素都可能造成孔隙水压力的变化,仅根据实测值难以判断引起孔隙水压力变化的主要原因,需综合数值模拟和理论分析方法进行对比分析。肖立、张庆贺和朱继文等^[55]采用理论分析的方法分析了盾构施工所产生的超静孔压大小;Bobet^[56]针对盾构开挖速度对周围土体当中孔隙水和衬砌荷载进行了分析,得知不同施工速度情况下衬砌荷载的变化过程是不同的,施工速度较快时,衬砌的长期荷载较短期荷载变化更大;Anagnostou^[13]通过建立于开挖面的局部坐标系进行建模计算,得知对于低渗透性土层,在隧道连续开挖过程中,开挖面附近应力的变化常伴随着土体的固结过程,由此开挖速率将影响地表的沉降,开挖速率越高,地表沉降越小。

隧道施工过程中,土体中孔隙水压力的变化将受两个因素影响^[57,58]:首先会受到土体应力状态变化的影响,隧道施工会引起周围土体应力状态逐渐发生变化,土体中孔隙水压力将会随之改变,在数值计算分析中,也就是流固耦合的影响;其次是受到渗流的影响,隧道施工会使开挖面、隧道表面的渗透边界条件发生变化,使周围土体产生向开挖面和隧道表面的渗流,从而改变土体中孔隙水压力。在针对隧道施工过程与水的相互影响分析中,需综合考虑这两个方面的影响。

不同的盾构施工参数对周围土体的扰动规律是不同的。王洪新和傅德明^[59]通过模型试验研究了盾构在不平衡推进时的挤土作用,得知当出土率小于或大于 100% 时及采用开口率较小的面板式刀盘时,盾构将产生不平衡掘进,会使前方地表产生隆起,并通过现场监测得知盾构产生的超推进量一部分产生了体积应变,一部分产生了正的地层损失,引起了地表隆起;朱合华、徐前卫和郑七振等^[60]采用模型试验方法,进行了在不同埋深、不同刀盘开口率、不同推进速度以及不同螺旋机转速等情况下盾构掘削模型试验,得出了土仓压力与排土效率、单位时间排土量与推进速度、推力和扭矩之间的内在联系,以及隧道埋深、刀盘开口率、推进速度对推力和扭矩的影响。刘铭和王志良^[61]研究了盾构施工扰动引起隧道固结沉降的估算方法。

目前,在考虑地下水情况下分析盾构施工对土体扰动规律的相关研究不充分,特别是在高地下水位情况下,盾构施工将产生显著的超静孔压,此超静孔压与地表沉降和土层变形的关系目前研究工作较少。因此,针对盾构施工过程中的超静孔压的大小及其与地表沉降的关系需进行深入研究。

1.2.3 管片承载规律的研究现状

盾构隧道施工后管片所受土压力和水压力的大小直接影响管片的安全使用^[62,63]。作用于衬砌上的土压力实际上是周围土层与衬砌共同作用面上的接触应力,其大小及分布形式不仅与地层的物理力学性质、衬砌的刚度有关,而且与施工方法、隧道的埋深、直径、形状等几何参数有关。目前常用的管片土压力计算方法以太沙基松动土压力理论为基础,推算管片所受到的土层压力,其不足之处在于它未考虑盾构施工方法及衬砌刚度

等因素对土压力大小和分布的影响,认为不论衬砌的刚度和土层的性质如何,衬砌所受到的土压力的分布形式都是同样的^[64,65]。因此,许多学者针对此问题,进一步采用数值计算、模型试验和现场实测的方法进行了深入研究。

(1) 管片荷载大小的分析

盾构施工过程会对周围土体孔隙水压产生扰动,而孔隙水压力的分布状况对管片长期荷载的变化具有重要影响。对土压平衡和泥水平衡盾构,当盾构推进力大于盾构面前方的静止土压力或注浆压力大于对应位置处的自重应力时就会使周围土体产生加载挤压状态,当开挖面推力较小时将使周围土体产生卸载状态^[66,67]。不同的加卸载状态将在周围土体中产生不同的超孔隙水压力。

Ramoni^[68]通过三维数值模型,分析了土体沿盾构轴向的变形情况,对盾构与土体之间间隙、注浆情况等参数进行研究,分析了盾构施工后管片的承载情况。李宇杰、何平和秦东平^[69]等分析了管片纵缝拼装对管片内力的影响;Ahmad^[70]采用平面应变的轴对称模型和应变软化的材料模型,并考虑流固耦合作用,分析了隧道开挖后的渗流场和应力场分布情况。Bobet^[71]分析了在排水和不排水情况下,矩形隧道和圆形隧道在管片受力和土体变形方面的区别。Moller^[72]分析了不同施工过程对隧道下沉、地表沉降和管片荷载的影响,计算结果表明,注浆压力对于地层和管片的影响较为显著。Carranza^[73]采用理论分析和数值模拟方法,分析了隧道开挖后不同水压条件对管片压力和变形的影响,并研究了土体采用不同弹塑性模型对土体应力、变形、塑性区分布的影响。Lee^[74]针对隧道支护结构与土体的相互作用关系,进行了离心模型试验,分析了两隧道不同间距和不同埋深情况下,隧道周围土体土拱的分布规律。Hwang^[75]采用半解析的方法分析了隧道在强含水地层中渗水量随时间的变化过程。Wilson^[76]在考虑土层剪切强度随深度逐渐增大情况下的管片承载大小以及上覆土层的稳定性。

在低渗透性土体中,由于土体变形的时间效应,盾构隧道施工过程对管片承载大小将产生影响。Ramoni^[77]针对盾构施工过程,建立轴对称计算模型,分析了盾构类型、地层条件、注浆层厚度等因素对管片压力的影响,给出了根据相关施工条件下管片压力的估计方法。在特殊地层条件时,特别是周围土体变形时间效应较为显著时,盾构的长度、注浆压力、浆体流动性能等施工参数对管片最终的承载大小具有重要影响。

(2) 管片荷载长期变化规律

管片荷载随时间的发展主要受到以下四个因素的影响^[78]:① 隧道开挖引起的周围土体的超静孔隙水压力大小和分布;② 土体的物理力学和渗透特性;③ 隧道衬砌的渗透性;④ 地下水位的变化。

Reilly^[79]通过对建造在正常固结粉质黏土、直径为3 m的英国 Grimsby 隧道11年的观察,发现 Grimsby 隧道施工引起的地表沉降经历了10年才最终达到平衡。上海打浦路越江隧道投入使用后的16年中,其长期沉降增量达到120 mm,造成隧道的挠曲并发生环向裂缝^[80]。Inokuma^[81]给出了一个现场工程长期监测的完整数据,隧道直径为5 m,埋深为32 m,有泥水盾构施工完成,监测了混凝土衬砌外的土压力和孔隙水压力,从而得出管片所受到的荷载主要来源于孔隙水压力,有效应力所占的比例较少。Clough^[82]

对土压平衡盾构施工引起的隧道周围的孔隙水压力的变化进行观察,发现盾构施工过程中隧道轴线两侧的孔隙水压力有明显升高的趋势。由于对隧道地表沉降和管片荷载长期监测所需要的时间跨度和经济费用较大,使得隧道长期性能的研究也受到很大限制。到目前为止国内外关于隧道地表长期沉降的研究相对较少,而且世界各国关于该问题的认识也存在相当的差异,这些都制约了对隧道长期运营安全的认识和评价。

地下水位的变化同样对管片荷载会产生影响。Anagnostou^[83]分析了地下水位是否下降对地表沉降的影响,通过分析得知,随着地下水位的下降,地表沉降随时间变化量较大。考虑土体固结时,需要注意区分隧道开挖后的两种状态:开挖之后的短期状态($t=0$)和长期状态($t=\infty$)。前者对应于土体的不排水情况,后者对应于土体的排水状态。在地下水的影响下,盾构隧道开挖后所需支护荷载也具有显著的时间效应。隧道开挖后的短时间内,即使隧道没有施加支护,也能够保持稳定;然而在较长时间之后,隧道必须施加足够的支护才能保持稳定。这是由于长时间后孔隙水压力消散造成的影响。

土体变形的时间效应包括土体的蠕变和固结。Sterpi^[84]和 Shalabi^[85]分析了蠕变的影响,Bobet^[86]分析了低渗透性土体中隧道周围土体固结即孔隙水压力的消散过程。张冬梅、黄宏伟和杨峻等^[87]在综合考虑隧道的局部渗透性以及土体时效特性的条件下,采用数值模拟的方法,对隧道长期性态发展过程中衬砌局部渗流对地表沉降、沉降槽及地层损失的影响进行了分析。

(3) 管片渗透性能变化对管片荷载的影响

当衬砌渗透性能发生变化时,管片所受水压将发生变化,从而引起管片内力发生变化^[88-90]。Shinh^[78]分析了当衬砌由于土颗粒堵塞造成衬砌渗透系数下降,从而引起衬砌荷载增大的力学机理,分析了衬砌所受土压力和孔隙水压力在此过程中的变化过程,从而为衬砌初次支护和二次支护的设计提供了参考。

Bobet^[91]通过对深埋隧道的分析认为,在地应力和水压在模型的边界施加时,地层和衬砌之间接触面的排水条件对衬砌中的应力没有影响,然而地层中的应力随排水条件的不同会发生改变。Shin^[92,93]研究了埋深为 20 m、直径为 4 m 的隧道管片所受到的荷载长期变化过程,通过研究指出,管片所受到的土压力主要与土体渗透特性和管片的渗流边界条件有关,分析结果同时显示,周围土体长期的渗流场与土体和管片渗透系数的比值密切相关。

根据上述研究现状可知,盾构施工过程会对管片荷载产生影响,同时管片长期荷载变化与土体孔隙水压力的消散以及管片透水性能的变化密切相关,特别是在管片发生漏水漏泥等情况下,管片荷载的变化对地铁安全运营具有重要影响^[94],因此在这些影响因素作用下管片荷载的变化规律需要深入研究。

1.2.4 基于流固耦合分析的整体数值模型

整体模型是指包括盾构、土体、管片的分析模型,如图 1-5 所示,由此可针对性分析各种因素的影响。以往的文献常将此问题中各种因素分开单独考虑,对盾构施工过程的影