



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

深圳地铁盾构隧道 技术研究与实践

ShenZhen DiTie DunGouSuiDao
JiShu YanJiu Yu ShiJian

主编◎刘建国



人民交通出版社

深圳地铁盾构隧道 技术研究与实践

ShenZhen DiTie DunGouSuiDao
JiShu YanJiu Yu ShiJian

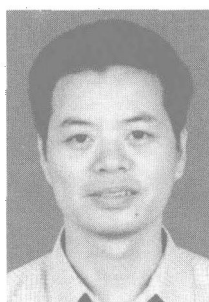
主 编◎刘建国
副主编◎王建新 张 恒
主 审◎陈寿根 郭 海



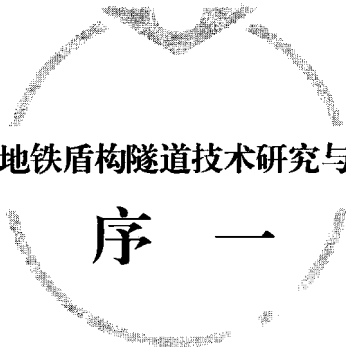
人民交通出版社

深圳地铁盾构隧道技术研究与实践

作者简介



刘建国 从事隧道及地下工程施工、设计和研究工作 27 年。曾担任中铁隧道集团三处总工程师,现任深圳市市政设计研究院副总工程师、中国矿业大学兼职教授等职。主持或参加了许多大型铁路、公路、市政地铁工程施工技术工作,主持深圳地铁 5 号线的设计、科研和管理工作。获国家科技进步二等奖 1 次,省、部级科技进步奖多次,国家专利 3 项等。在国家级杂志发表论文 20 余篇,主编并已出版著作 1 本。1999 年和 2000 年,分别荣获中国中铁、铁道部“青年科技拔尖人才”称号,2009 年获深圳市“高层次人才”称号,2010 年获得深圳市政府特殊津贴。



深圳地铁盾构隧道技术研究与实践

序 一

当前我国的城市轨道交通建设方兴未艾,北京、上海、广州等城市已经开通运营的地铁线累计里程均在 200km 以上,目前全国已批准建设地铁的城市近 30 个,每年投入地铁建设的资金在数千亿元以上,地铁建设市场前景广阔。在建筑物密集的繁华市区和复杂地质地铁隧道的施工方法中,盾构法与浅埋暗挖法相比,更具有优势,盾构法的应用会越来越广泛。盾构法具有对周围环境影响小、自动化程度高、施工快速、质量好、安全环保等优点,但是盾构法施工也有其自身的短处,与常规设备不同,盾构机是根据具体施工对象定制的特种设备,盾构的设计和施工必须与工程地质紧密结合,与工程特点相匹配,才能充分发挥盾构的优势,保证盾构法施工的工程质量和安全。在盾构隧道施工实践中也会出现各式各样的问题,因此,盾构施工同样需要不断提高其施工技术,不断总结经验,这样才能充分发挥盾构法的优势,不断克服自身的缺点和不足。

深圳地铁的地质状况及周边环境特点突出,尤其其地层非均质差异性大、软硬不均的特点在其他城市地铁建设中是未曾遇到过的,该复合地层对于盾构施工来讲是极其困难的,而且没有太多类似工程经验,所带来的施工风险和施工难度是相当大的。在深圳地铁一、二期建设中,遇到了很多困难,取得了许多宝贵的成功经验和失败教训,值得认真研究总结。《深圳地铁盾构隧道技术研究与实践》一书,是一本专业性、技术性、实践性很强的专著,本书着重总结了十几年来深圳地铁盾构施工的实践经验,真实地介绍了不同地质和不同环境条件下盾构法施工技术的宝贵经验和教训,并通过理论研究分析,总结出了一系列技术理论,极大地丰富了我国特殊复杂地层盾构设计施工技术。

该书理论紧密联系实际,图文并茂,深入浅出,展现了盾构法施工的最新技术并突出工程应用,可参考性强,是盾构法施工技术领域的一部力作,对国内盾构法施工具有很好的指导、借鉴作用,可供从事盾构隧道设计、施工的同行人学习借鉴。

本书作者付出了智慧和汗水,认真钻研,和相关单位和人员紧密协作,攻克了盾构隧道设计、施工技术难题,安全、优质地建成了深圳地铁一、二期工程,取得了丰硕的技术成果。本书交付出版,为我国的地铁和隧道工程技术发展作出了贡献,应著作者之约作序以表祝贺之意。

中国工程院院士 王梦恕

2011 年 5 月



深圳地铁盾构隧道技术研究与实践

序 二

随着中国城市化的高速推进,开发城市地下交通是实施中国城市可持续发展的必然选择和重要途径。地下铁道因其运输能力大、速度快等特点,在人们的日常生活中发挥着越来越重要的作用,尤其在人口密集的大城市,其对于缓解地面交通压力,效果更是不可替代的。盾构施工法作为一种安全而又环保的施工方式得到了广泛的应用。目前,我国城市轨道交通正面临着史无前例的发展高潮,北京、上海、广州等城市在已经开通运营多条地铁线的基础上以每年 40~50km、近百亿元的投资速度推进,同时还有已经批准建设地铁的 25 个城市也在同时进行紧张的地铁建设,每年总投入达数千亿元以上。

盾构施工虽然具有很多优点,而且在一百多年的发展过程中盾构机性能不断改进,设计和施工技术理论不断完善,但是由于施工引起的地层移动会影响周围建筑、道路、管线等,这种危害和事故仍时有发生,同时隧道自身也因施工不当而容易产生不良后果。深圳地铁二期工程盾构法隧道施工长度可观,下穿工程多且复杂,包括穿越铁路、公路、各种管线、河流、建筑物等,还有穿越淤泥、黏土、砂卵石、孤石、硬岩和软硬不均等多种复杂地层;盾构法隧道工程所在的深圳地区雨量充沛,地下水丰富,地下水位高,施工难度极大,比其他城市施工风险更高。

《深圳地铁盾构隧道技术研究与实践》一书比较全面、透彻地阐述了盾构隧道的起源及发展历史、盾构施工原理、盾构选型、盾构施工技术,研究和总结了深圳地铁盾构穿越复杂地层和复杂建(构)筑物施工技术。该书理论紧密联系实际,图文并茂,深入浅出,突出工程实用性,可参考性强。本书的出版将极大地丰富和完善中国在各种复杂地层条件下的盾构施工技术,为我国今后在各种复杂地质条件下应用盾构法施工奠定了坚实的基础。

相信读者能从本书中得到借鉴和参考,本书的出版为提高和完善盾构法隧道施工技术作出了贡献!

西南交通大学教授 麦侑曾

2011 年 5 月



深圳地铁盾构隧道技术研究与实践

前言

深圳地铁开始建设十多年来,一直在进行着盾构施工的实践,我们也一直在从事着深圳地铁的技术研究工作,希望能总结出具有深圳特色的盾构隧道施工技术和经验,出版一本著作。机缘于深圳地铁5号线,该线路是我国一次性建成盾构法隧道最长的城市轨道交通项目,基于该线路盾构工程“施工距离长,地质条件复杂多变,线路周边建(构)筑物密集,地下水位高”等工程特点,开展深圳地铁穿越复杂地层和建(构)筑物以及盾构在特殊条件下的施工方法等关键技术研究。研究中采用技术调研、理论分析、计算机数值模拟、现场试验和归纳总结等手段,针对盾构穿越复杂地层和浅建构筑物施工关键技术作了深入细致的研究,攻克了“地层结构复杂、近接盾构隧道建(构)筑物多和空推施工距离长”等技术难题,取得了“穿越复杂地层盾构隧道施工控制技术”、“下穿复杂建(构)筑物盾构隧道施工控制技术”、“复杂地质条件下盾构机选型及刀具配置优化技术”、“管片结构力学特性及拼装质量控制技术”、“盾构始发和到达施工关键技术”、“矿山法施工段盾构空推技术研究”、“盾构隧道施工孤石综合处理技术”等一系列技术成果。这些技术成果的研究成功及在施工中的应用,为实现深圳地铁5号线盾构工程安全、快速、高效、优质地完成合同节点目标及确保施工工期发挥了非常重要的作用,保护了城市环境,确保了人民生命和财产的安全,显著增加了土压平衡盾构法隧道施工对复杂地质条件的适应性,提高了盾构机在城市建(构)筑物密集地区施工的安全性;同时,为国内外类似盾构隧道工程的设计与施工提供了非常有价值的参考和借鉴。

本书以介绍深圳地铁二期工程5号线盾构隧道设计、施工技术为主线,结合工程科研和工程实践,作一全面和系统的论述,力求做到理论和实践的统一。全书分五章,由刘建国教授级高工主编并统稿,王建新、张恒副主编,陈寿根、郭海主审。中国中铁5号线参建单位技术人员、深圳市地铁公司、中铁西南科学技术研究院、西南交通大学等单位提供了部分基础资料。在编著本书的过程中,参考了有关单位和学者的技术资料,并引用了其中部分内容及试验数据,在此一并表示感谢!

我们在研究过程中,得到了王梦恕院士、麦倜曾教授等专家学者的具体指导和帮助;在现场调研、理论分析、试验和技术总结过程中,得到了中铁南方投资有限公司等单位 and 同仁的大力支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢!

尽管付出大量心血,但书中不妥之处在所难免,恳请专家及同行批评指正。

作者

2011年5月于深圳



深圳地铁盾构隧道技术研究与实践

目 录

第 1 章 盾构技术概述	1
1.1 盾构技术发展历程	1
1.2 盾构隧道施工原理	4
1.3 盾构隧道施工主要技术环节	4
1.4 盾构分类	6
1.5 盾构隧道建设风险管理	7
1.5.1 风险管理的概念	9
1.5.2 地铁盾构隧道工程风险识别	9
1.5.3 地铁盾构隧道工程风险分析及防治	9
第 2 章 深圳地质特点及盾构机选型	12
2.1 深圳复杂的地层特点	12
2.2 深圳地铁盾构机选型及适应性	14
2.2.1 盾构机选型原则	14
2.2.2 盾构机选型依据	15
2.2.3 复合式土压平衡盾构机的针对性功能	18
2.3 刀盘刀具磨损规律研究	18
2.3.1 刀盘磨损规律及控制对策	18
2.3.2 刀具的种类与破岩机理	20
2.3.3 刀具磨损规律及控制对策	23
2.4 特定地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	30
2.4.1 淤泥地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	30
2.4.2 黏土地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	30

2.4.3 砂卵石地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	30
2.4.4 硬岩地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	31
2.4.5 软硬不均地层条件下盾构掘进合理刀具配置技术	31
第3章 深圳地铁盾构隧道技术研究	32
3.1 深圳地铁盾构隧道施工工法研究	32
3.1.1 盾构始发施工技术	32
3.1.2 管片拼装质量控制技术	44
3.1.3 盾构到达施工技术	66
3.1.4 盾构平移施工技术	72
3.2 盾构机掘进参数选择研究	75
3.2.1 不同地层盾构土压力和推力分析研究	75
3.2.2 特定地层土压力计算方法适应性分析	81
3.2.3 盾构推力的计算及影响因素	91
3.2.4 盾构掘进参数对地表沉降的影响分析	97
3.3 矿山段盾构空推施工技术	101
3.3.1 盾构过矿山段施工流程	101
3.3.2 施工重难点	101
3.3.3 过矿山段盾构设计技术	102
3.3.4 过矿山段盾构施工技术	103
3.3.5 盾构空推时的注意事项	107
3.4 盾构施工辅助工法研究	108
3.4.1 盾构出洞竖立冻结加固技术	108
3.4.2 端头墙玻璃纤维筋格栅加固技术	120
3.5 盾构管片结构力学特性	125
3.5.1 测试准备、元件安装和数据采集	125
3.5.2 软硬不均地层试验成果及分析	130
3.5.3 黏土地层试验成果及分析	135
3.5.4 近接桩基管片力学特性试验成果及分析	138
第4章 深圳地铁盾构隧道技术应用工程实例	142
4.1 黏土地层应用工程实例	142
4.1.1 工程概况	142
4.1.2 盾构掘进技术措施	142
4.1.3 形成泥饼的原因及防止对策	143

4.2 上软下硬地层应用工程实例	144
4.2.1 工程概况	145
4.2.2 盾构施工主要难点及原因分析	145
4.2.3 穿越软硬不均地层盾构施工技术措施	146
4.3 花岗岩球状风化体地层应用工程实例	147
4.3.1 工程概况	147
4.3.2 孤石的物理性质及主要特征	147
4.3.3 孤石形成的原因及其探测	148
4.3.4 孤石对盾构施工的影响	151
4.3.5 孤石处理方法	151
4.3.6 孤石处理方法的比较	161
4.4 全断面硬岩地层应用工程实例	163
4.4.1 工程概况	163
4.4.2 盾构掘进主要困难及原因分析	163
4.4.3 硬岩地段盾构掘进施工对策	165
4.5 长距离基岩隆起地段应用工程实例	168
4.5.1 工程概况	168
4.5.2 基岩处理措施	168
4.6 穿越建(构)筑物盾构施工工程实例	169
4.6.1 盾构下穿管线施工关键技术	170
4.6.2 盾构下穿广深准高速铁路施工关键技术	173
4.6.3 盾构下穿公路施工关键技术	179
4.6.4 盾构下穿立交桥施工关键技术	182
4.6.5 盾构下穿河流施工关键技术	196
4.6.6 盾构下穿浅基建筑物施工关键技术	203
4.6.7 盾构下穿构造物保护技术研究	209
第5章 经验总结	213
参考文献	216
后记	218

第1章 盾构技术概述

1.1 盾构技术发展历程

盾构是一种钢制的活动防护装置或活动支撑。在它的掩护下,头部可以安全地开挖地层,尾部可以装配预制管片、砌块或现浇钢筋混凝土,迅速、安全地形成隧道的永久衬砌。它借助于支撑在已拼装衬砌上的千斤顶不断前进。如果采用装配式衬砌,当盾构推进时,要及时将衬砌与土层之间的空隙用浆液填实,防止周围地层的继续变形和围岩压力增长^[1-3]。

1818年,法国工程师布鲁诺尔(Mare Isambard Brunel)在伦敦从船蛀在船板上蛀孔,再用分泌物涂在孔的四周中得到启示,发现了盾构法掘进隧道的原理并注册了专利,所谓的敞口式手掘盾构的原型问世(图1-1)。布鲁诺尔专利盾构由不同的单元格组成,每个单元格可容纳一个工人独立工作并对工人起到保护作用(图1-2)。布鲁诺尔于1823年拟定了横贯伦敦泰晤士河的一条道路隧道的计划。1825年英国国会通过该计划后工程动工,中途因地层下降致使工程终止。布鲁诺尔总结了失败的教训,制作了一个改进型的方形铸铁框盾构,于1834年再次动工,经过7年的精心施工,在1841年终于贯通了横贯泰晤士河的隧道^[4-6]。

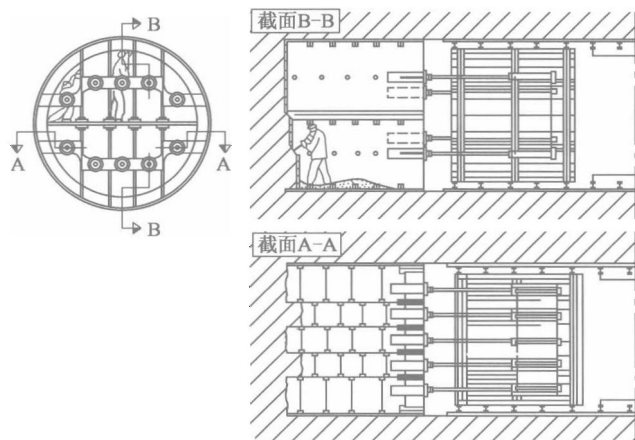


图1-1 布鲁诺尔注册专利的盾构

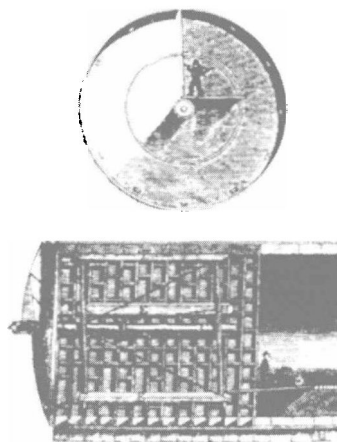


图1-2 布鲁诺尔螺旋盾构

1869年,工程师詹尼斯·亨利·格瑞海德(Janes Heary Greathead)负责建造横贯泰晤士河的第二条隧道。格瑞海德采用新开发的圆形盾构,扇形铸铁管片,工程进展顺利,如图1-3所示。1874年,格瑞海德发现在强渗水性的地层中很难用压缩空气支撑隧道工作面,因此,开发了用液体支撑隧道工作面的盾构,通过液体流,土料以泥浆的形式排出,如图1-4所示。

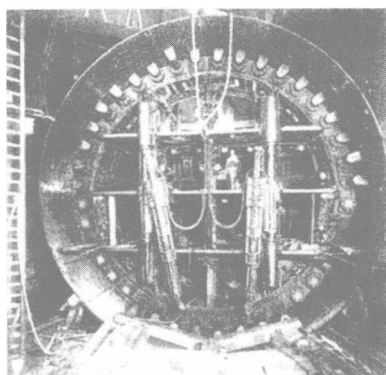


图1-3 格瑞海德圆形盾构

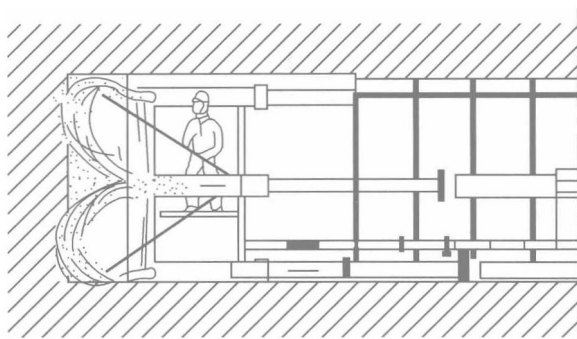


图1-4 格瑞海德泥浆盾构

随后格瑞海德在1887年南伦敦铁道隧道施工中采用了盾构和压气组合法获得成功,为现在的盾构工法奠定了基础。

布鲁诺尔发明盾构法之后的另一个技术进步是用机械开挖代替人工开挖。第一个机械化盾构专利可追溯到1876年,英国人John Dickinson Brunton和George Brunton申请了该项专利。这台盾构有一个由几块板构成的半球形的旋转刀盘,开挖的土料落入径向装在刀盘上的料斗中,料斗将渣料转运至皮带输送机上,再将它转到后面从盾构中运出。这一构想后来被用于修建地铁隧道工程。

1959年,用液体泥水支撑隧道工作面的想法由Elmer C. Gardner成功地试用于一条直径为3.35m的排污隧道。

1960年,斯内德瑞特(Schneidereit)提出了用膨润土悬浮液的活动工作面支撑。在这之后,罗瑞兹(H. Lorenz)申请了用加压膨润土浆来稳定隧道工作面的专利。

1963年,土压平衡盾构,首先由日本Sato Kogyo公司开发出来。当时Sato Kogyo公司正寻求在地下水位以下松软且流动的地层中掘进隧道的方法。

1964年,英国人摩特·亥(Mott. Hay)、安德森(Anderson)及约翰·巴勒特(John Bartlett)申请了泥水加压平衡盾构掘进机原理专利。

1974年,第一台土压平衡盾构在东京被采用。该盾构由日本制造商IHI(石川岛播磨重工)设计,其外径为3.72m,用它掘进了1900m的主管线。在以后的年代里,很多制造厂商生产了土压盾构、压力保持盾构、软泥盾构、土壤压力盾构、受压的土壤盾构、泥压盾构,或泥浆状的土壤盾构等名称各异的“土压平衡盾构”。所有这些名称的盾构基本上都应用了同一种工法,国际上称之为“土压平衡系统”(EPBS)。

1986年,日本研制了世界上第一台双圆泥水加压式盾构,如图1-5所示。该盾构又称双头型泥水盾构或双联体泥水盾构,由日本日立造船株式会社为日本熊谷组承包商制造。这台双圆泥水加压式盾构由两个直径为7.42m的盾构组合而成,盾构横向总宽度为12.19m,刀盘呈

半重叠状。1988年,该盾构用于日本新建京叶线的京桥双线隧道施工,长度约620m。

1992年,日本研制成世界上第一台三圆泥水加压式盾构(图1-6),并成功用于大阪市地铁7号线商务公园车站工程施工。

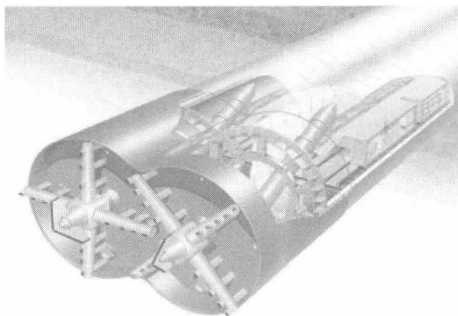


图 1-5 双圆盾构

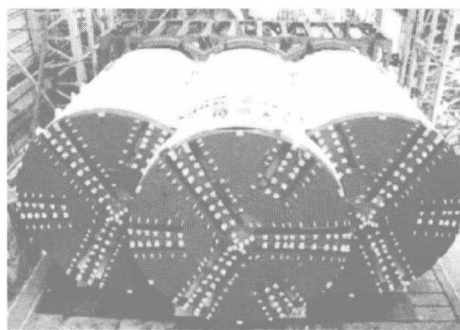


图 1-6 三圆盾构

20世纪60年代以来,盾构工法得到了很大发展,其特点是完善了圆形断面的各种平衡方式的盾构工法——压气盾构、挤压盾构(网格盾构)、土压盾构、泥土加压盾构、泥水盾构等,但以泥水盾构和土压盾构工法为主。

盾构法在我国起步较晚,但近年来取得了迅猛发展。在我国的第一个五年计划期间,阜新煤矿的疏水道工程及1957年的北京市下水道工程中进行过小口径盾构技术的尝试,但系统全面的盾构试验是1963年于上海塘桥正式起步的。上海1966年开始的 $\phi 10.22\text{m}$ 的打浦路过江隧道工程、1988年建成的 $\phi 11.3\text{m}$ 的延安东路过江隧道工程等都是应用盾构技术在软土地层施工的成功例子。20世纪90年代以来,仅上海用盾构技术建造的各类隧道总长度已超过100km。此外,近年上海还开发了矩形盾构、双圆搭接土压盾构;广州地铁公司建造了广州地铁1号、2号线(复合盾构);深圳地铁公司建造了深圳地铁1号线(复合盾构);南水北调工程中线建造了穿越黄河河底的引水隧道($\phi 8.8\text{m}$);南京地铁公司建造了南京地铁1号线($\phi 6.34\text{m}$);天津地铁公司建造了天津地铁1号线($\phi 6.34\text{m}$);北京地铁公司建造了北京地铁5号线($\phi 6.2\text{m}$);2003年6月,上海翔殷路隧道开工,采用 $\phi 11.58\text{m}$ 的超大型泥水平衡盾构掘进;近年来建成的上海上中路隧道工程盾构直径达14.87m,如图1-7所示;上海长江隧道盾构机直径15.43m,是目前世界上最大的盾构隧道,如图1-8所示。由于我国南水北调隧道、武汉越江隧道,尤其是地铁隧道的建设,盾构技术在全国范围内得到飞快的发展,这充分说明我国

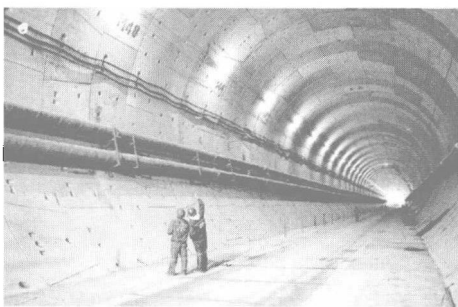


图 1-7 上海上中路盾构隧道

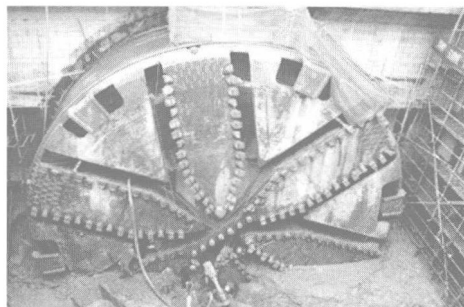


图 1-8 上海长江隧道盾构

已跻身世界盾构技术的先进行列。但是我国盾构技术的发展还存在着许多不足,如盾构工法种类不多,各种特种异形断面及特种功能盾构工法应用少;地中盾构对接技术、竖井隧道的一体化施工技术、盾构直接切削竖井井壁的进出洞技术等,目前仍属空白。

1.2 盾构隧道施工原理

盾构隧道施工原理就是利用盾构的盾壳在开挖隧道时充作临时支护,然后在盾壳的保护下拼装管片,形成永久衬砌。盾构法的主要施工工序是:开挖、支护、注浆。图 1-9 为盾构施工示意图。

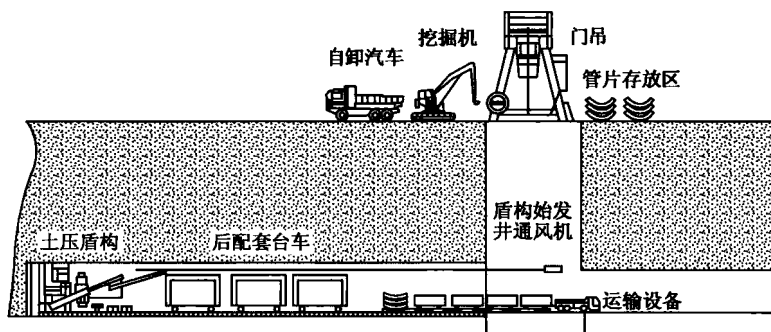


图 1-9 盾构施工示意图

施工过程大致是先在隧道某段的一端建造竖井(盾构始发竖井和接收竖井)或基坑(始发基坑和接收基坑);把盾构主机和配件分批调入始发竖井中,在预定始发位置上组装成整机,并调试设备;从竖井或基坑的墙壁开孔处始发,在地层中沿着设计轴线,向另一竖井或基坑的设计孔洞推进;盾构推进中所受到的地层阻力,通过盾构千斤顶传至盾构尾部已拼装的预制隧道衬砌结构,再传到竖井或基坑的后侧壁上;盾构机掘进到预定接收竖井或基坑时,掘进结束。在盾构钢筒中段周圈内面安装顶进所需的千斤顶,钢筒的尾部是具有一定空间的壳体,在盾尾内可以拼装一两环预制的隧道衬砌环。盾构每推进一环距离,就在盾尾支护下拼装一环衬砌,并及时向紧靠盾尾后面的开挖坑道周边与衬砌环外周之间的空隙中压注足够的浆体,以防止隧道及地面下沉。盾构在推进过程中不断从开挖面排出适量的土方。

1.3 盾构隧道施工主要技术环节

盾构法施工是一个非常复杂的工程过程,它对周围环境的影响与施工的主要技术环节密切相关。早在 1969 年 Peck 就指出盾构法施工引起的地层损失以及对相邻结构的影响与施工的具体细节是分不开的。因此,理论分析时只有准确把握盾构施工的主要因素才能得出符合实际情况的结果。盾构施工包括以下几个主要技术环节。

(1) 盾构机的安装

这是盾构施工的重要环节之一,其主要任务是完成盾构机的拼装、调试和初始推进,为进入正常施工循环做准备。拼装作业在专门的工作井中进行,其中主要设施包括:能使盾构准确

就位的拼装台、为盾构起始推进提供支撑的后背和临时装置、能使盾构准确开始掘进的进洞口、井内垂直运输系统等。

(2) 盾构机的推进

盾构机推进主要依靠千斤顶推力的作用。首先要解决的问题是根据地质条件采用适当的开挖面保护措施,控制施工速度,保证施工安全并将对地面设施的影响控制在预定范围。盾构在前进过程中要克服正面土体的阻力和盾壳与土体之间的摩擦力,总推力要大于正面推力和四周摩擦力之和。推力过大会使正面土体因挤压而前移和隆起,过小会影响盾构的推进速度。

盾构的推进速度由千斤顶的推力和进出土量决定,速度过快会使盾构上抛,过慢会使盾构下沉,不利于盾构姿态的(包括推进坡度、平面方向和自身转角)控制。盾构后退易引起土体损失,从而造成切口上方的土体沉降。在土压平衡盾构施工中,密封舱内的土体压力要求与开挖面的土压力大致平衡。盾构推进的轨迹一般为蛇形,在推进中要随时测量和控制好盾构前进的方向,及时发现和纠正偏差。纠正偏差的基本方法是调整千斤顶推进的顶力分布。此外,配合调整盾构后部的注浆压力和注浆部位也有助于纠偏。

(3) 衬砌的拼装

衬砌拼装由盾构机内专门的起重和移动机构来完成,盾构每推进一环衬砌宽度,即进行一环管片拼装。管片拼装过程中要减小盾构的后退量,关键是保证环面的平整度以及管片与管片之间、管片与盾尾之间的密封性。施工中应随时修正拼装误差,防止误差过度积累;在隧道转弯段,调整衬砌环的厚度也是保证设计轴线的措施之一。

盾构隧道衬砌是在盾构机盾尾拼装而成的,是盾构隧道主要的受力结构,当省略二次衬砌时,为隧道唯一的支撑结构。盾构法隧道管片式衬砌结构是由若干弧形的管片拼装成环,然后每环之间逐一连接而成的,管片与管片、环与环之间通过螺栓或其他方式连接。

管片的拼装方式有通缝和错缝两种。所有衬砌环的纵缝呈一直线的情况称为通缝拼装,如图 1-10 所示。环间纵缝相互错开的情况称为错缝拼装,如图 1-11 所示。

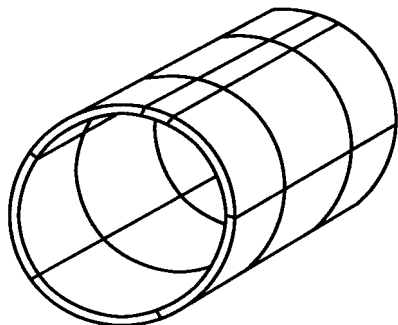


图 1-10 通缝拼装管片

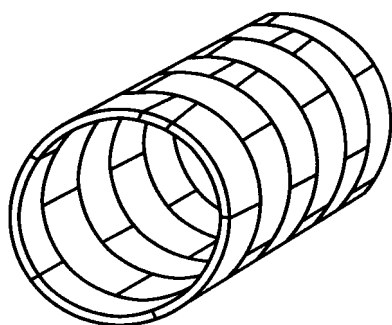


图 1-11 错缝拼装管片

(4) 壁后注浆

盾构外径与衬砌外径大小不等,衬砌管片脱离盾尾后在衬砌外形成间隙。注浆对控制地面沉降、改善衬砌结构的受力、提高衬砌的防水性能均有重要作用。合适的浆体材料、注浆时机、注浆设备对保证工程耐久性、方便施工均有重要意义。注浆压力一般取 1.1 ~ 1.2 倍的静止土压力,通常采用 0.3 ~ 0.4 MPa,为拱顶土压力的 2 倍以上。一般压浆量为理论压浆量(等于施工间隙)的 140% ~ 180%。

1.4 盾构分类

实际上,盾构机的类型很多,按开挖方式不同可将盾构机分为:手掘式盾构机——开挖和出土工作由人工完成,如图 1-12 所示;半机械式盾构机——大部分的开挖和出土工作由机械进行,如图 1-13 所示;机械式盾构机——开挖和出土工作均采用机械方式完成,如图 1-14 所示。从盾构技术的发展进程看,手工挖掘式、半机械挖掘式趋于淘汰,取而代之的是自动化程度非常高的全机械式。按照对开挖面土体支撑稳定方法的不同可将盾构机分为:敞胸式盾构机和闭胸式盾构机,敞胸式盾构机适用于自稳性比较好的土层,闭胸式盾构机依靠气压、液压或土压进行开挖面的压力平衡。按照盾构断面形式的不同可将盾构机分为:矩形、马蹄形、椭圆形、圆形、双圆形、三圆形等多种形式,从而满足了隧道功能对隧道截面的要求,做到经济实用、不浪费空间。

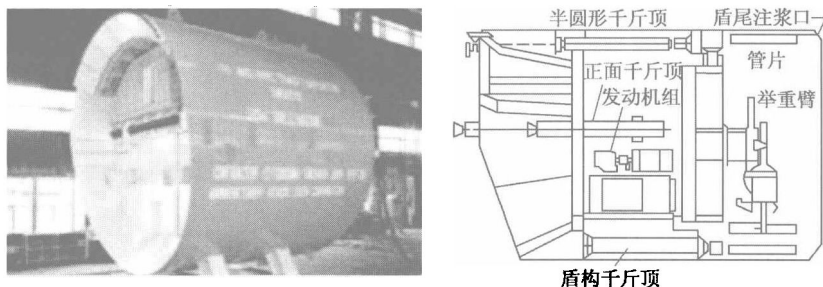


图 1-12 手掘式盾构机及其原理

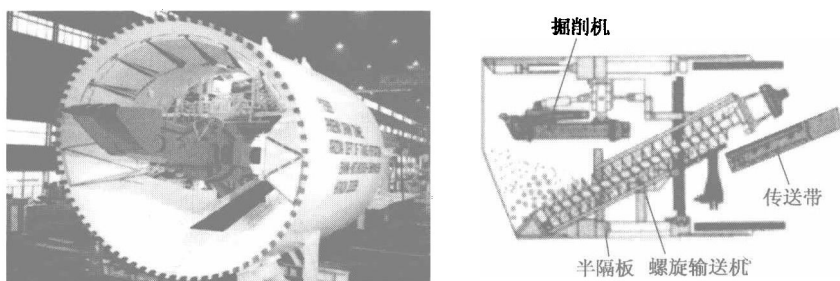


图 1-13 半机械式盾构机及其原理

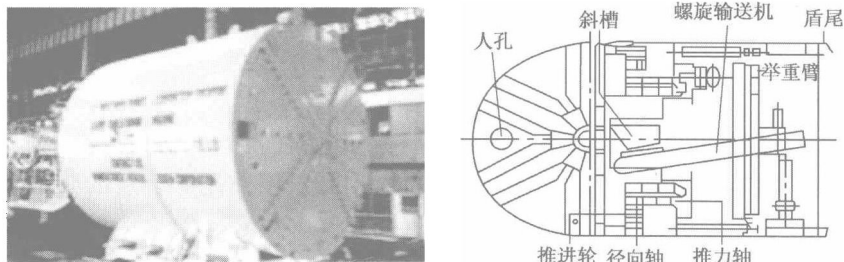


图 1-14 机械式盾构机及其原理

土压平衡式盾构与泥水平衡式盾构是目前最为常用的能够转动掘削的两种盾构类型,并且各自又衍生出许多新的种类来。这两种盾构的区别在于弃土的排出方式不同,土压平衡式盾构与泥水平衡式盾构的工作原理分别如图 1-15、图 1-16 所示。土压平衡式盾构通过向掘削下来的弃土中加入泥浆或气泡等材料,使其具有流塑性从而能被螺旋机排出;而泥水平衡式盾构则是采用水力泥浆排除方式,具有压力的膨润土泥浆从地表泥浆站通过管道向下输送到隧道内盾构机的压力舱室。

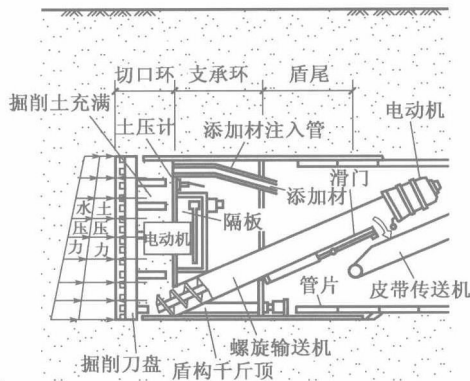


图 1-15 土压平衡式盾构工作原理

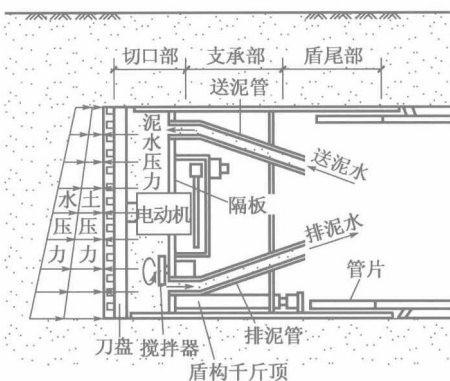


图 1-16 泥水平衡式盾构工作原理

不同类型的盾构机对土体介质的适应情况不同,正确选择盾构机是隧道施工成功的关键。

1.5 盾构隧道建设风险管理

随着我国扩大内需政策力度的进一步加大,地铁建设已成为拉动内需的一股重要力量。预计在 2015 年之前,全国将建成 1700km 的城市轨道交通,总投资将超过 6000 亿元。大规模、高速度的开发建设,必然存在高风险。特别是,地铁施工不仅具有地下工程本身的不确定性,而且沿线建(构)筑物密布、地下管线设施极其复杂,工程地质与水文地质的不确定性和复杂多变,对车站、区间工程实施的安全影响非常大,工程设计与施工技术水平也是影响安全的重要因素。近十年来,地铁施工中出现的安全事故不胜枚举,见表 1-1。比较典型的事故有图 1-17 所示的上海轨道交通 4 号线涌水事故和图 1-18 所示的杭州地铁坍塌事故。



图 1-17 上海轨道交通 4 号线涌水事故



图 1-18 杭州地铁坍塌事故

近年来地铁施工中的安全事故 表 1-1

事故时间	事故地点	事故描述	事故后果
2001-05-25	深圳地铁	竹子林车辆段土石方工地塌方	造成1死1伤
2001-08-20	上海地铁4号线	鲁班路施工突发滑坡	4人被埋而死亡
2002-04-19	深圳地铁	施工现场吊车车臂滑落	造成2死4伤
2003-07-01	上海地铁4号线	旁通道工程涌水、涌沙	3栋建筑物严重倾斜,经济损失约1.5亿元
2003-10-07	北京地铁5号线	崇文门站工地临时钢管架体倒塌	造成3死1伤,直接经济损失达29.7万元
2004-03-17	广州地铁3号线	番禺大石站发生滑坡	1名工人死亡,停工5d
2004-04-01	广州地铁3号线	地下连续墙结构塌方	车站附近民房受到一定影响
2005-05-14	北京地铁5号线	东单工地洞内支架坍塌	造成1死1伤
2005-07-21	广州地铁	海珠广场工地基坑挡土墙突然发生坍塌	部分墙体开裂,5人被困
2005-08-01	北京地铁5号线	和平西桥工地吊车坍塌	1名路人死亡
2005-11-03	广州地铁4号线	新造站右线隧道内一侧壁上的电缆组坠落	2死1重伤
2006-02-27	北京地铁10号线	起重器吊斗坠落	3名工人死亡
2006-06-27	北京地铁10号线	三标段发生坍塌	2名工人死亡
2007-02-05	南京地铁2号线	发生坍塌,自来水管爆裂,燃气管道着火	导致5000多户居民停水、停电、停气
2007-03-28	北京地铁10号线	苏州街车站入口塌方	6名工人死亡
2007-05-28	南京地铁2号线	茶亭站基坑滑坡	2名工人死亡
2008-04-02	深圳地铁3号线	荷坳段工地发生坍塌	3人死亡2人受伤
2008-11-08	南京地铁1号线	高架箱梁浇筑前进行试压的支架坍塌	7名工人被埋
2008-11-15	杭州地铁1号线	大面积塌方事故	21人死亡10人受伤

2003年7月1日,上海轨道交通4号线旁通道工程施工作业面内,因大量水及流沙涌入,引起隧道部分结构损坏及周边地区地面沉降,造成3栋建筑物严重倾斜,防汛墙局部塌陷,直接经济损失约1.5亿元。

2008年11月15日,杭州地铁萧山湘湖站施工现场突然发生路面大面积塌陷事故,导致风情大道75m路面坍塌,并下陷15m,21个鲜活的生命陨落,震惊国内外^[7]。

因此,在地铁建设飞速发展的同时,如何减少地铁施工过程中的事故成为迫切需要解决的问题。

近年来,风险管理的思想逐渐进入研究者视线,根据风险评估发现地铁施工中的复杂问题,并利用风险管理与控制的措施来处理这些问题。在构建科学、合理的安全风险体系的基础上,开展安全风险管理工作,成为解决地铁施工事故频发问题的新思路。