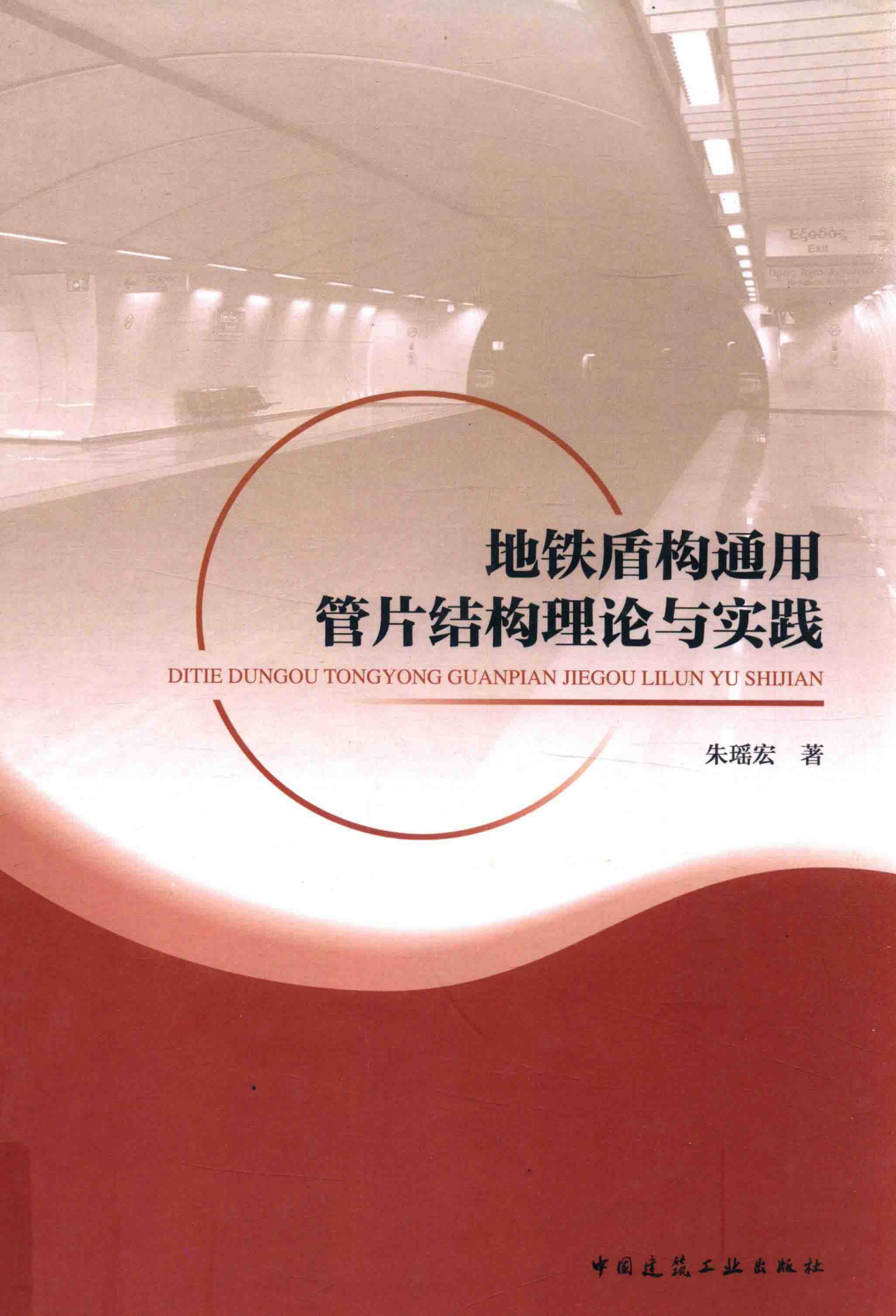




地铁盾构通用 管片结构理论与实践

DITIE DUNGOU TONGYONG GUANPIAN JIEGOU LILUN YU SHIJIAN

朱瑶宏 著

中国建筑工业出版社

地铁盾构通用管片结构 理论与实践

朱瑶宏 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地铁盾构通用管片结构理论与实践/朱瑶宏著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-112-20222-5

I. ①地… II. ①朱… III. ①地铁隧道-隧道施工-盾构法-研究 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 004664 号

本书从盾构管片结构设计、盾构隧道施工关键技术、盾构隧道结构的运营及维护等方面进行研究和探讨, 结合工程实践进行分析, 解决软土地区进行盾构隧道建设、运营及维护的技术难题。全书共分为 5 章, 包括地铁隧道结构概述、盾构管片结构设计、盾构隧道施工关键技术、盾构隧道结构的运营及维护、通用环管片结构在宁波的应用。

本书适合从事地铁隧道设计、施工、运营与管理的人员参考, 也可供高等院校相关专业师生参考。

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 李美娜

地铁盾构通用管片结构理论与实践

朱瑶宏 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{3}{4}$ 字数: 363 千字

2017 年 7 月第一版 2017 年 7 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-20222-5

(29708)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

谨以此书献给不盲从规范，寻求自然规律的“盾构”工程师

——致敬林同炎先生

前 言

近年来,盾构法作为隧道工程的主流工艺,在城市轨道交通工程中广泛应用,随着国内城轨的快速发展,盾构技术不断进步,从1966年上海打浦路隧道开始,历经近半个世纪的变革,盾构从装备到结构理论再到施工和运维,都有了突飞猛进的发展。在盾构装备方面,我国已经逐渐从完全依赖进口,通过持续的研发和技术积累,实现了盾构装备的国产化,在部分领域已经走在了世界前列,如在宁波应用的“阳明号”是目前世界上最大断面的类矩形盾构,该盾构是完全自主研发的,充分体现了我国盾构装备较高的生产水平。

盾构法隧道的衬砌要点是拼装化,于是发明了管片,具体管片的形式有标准环和通用环之分,拼装方式又有通缝和错缝的区别,具体实践中,只有少数城市全线采用通用环管片,而且在盾构设计、施工和运营方面的研究不够全面,本书试图弥补此类不足。

在衬砌管片结构方面,通过学习德、日等国的先进的经验,国内已逐步形成了以修正惯用法、均质圆环法为主的结构设计理论,同时以同济大学朱合华教授、西南交大何川教授为代表的学者和技术人员,也研究发展了梁-接头模型和壳-弹簧模型等计算模型;以上理论的研究,多以单环作为研究对象,考虑纵向接缝对结构性能的影响;对环与环之间作用、环缝对整体受力影响等方面的研究还不够深入和系统。本书在第2章中对以错缝拼装通用管片为例,对整环的受力机制、破坏行为进行了详尽的阐述。该部分内容对后续工程具有很强的参考价值和借鉴意义。

在盾构隧道施工和盾构隧道的长期运营维护方面,随着盾构在全国范围的不断应用,不同地区的地质、水文、环境甚至人文环境的差异,将会对施工和运营带来差异化的影响,寄希望于用一贯的经验解决所有地区城市在施工和运营中存在的问题将会愈发的困难,本书在第3章和第4章主要就软土地区通用环管片施工中存在的纠偏、拼装、上浮、隧道提升等问题开展的研究和成果,运营期管片结构耐久性研究成果和加固技术进行了阐述。

本书取材于宁波地铁,内容新颖、资料丰富,包含了许多罕见的管片结构试验的数据和成果,以及宁波地铁施工过程中许多难得的数据,理论结合实践,书中给出的许多案例,可以为软土地区城市的类似工程实例提供借鉴。

本书的编写得到了同济大学白云教授的支持。此外,同济大学地下建筑与工程系柳献副教授及中国海洋大学刘涛副教授及上海岩土工程勘察设计研究院有限公司苏秀婷工程师参与了本书部分章节的编写;上海隧道院地下院院长杨志豪教授级高级工程师、副总工沈张勇高级工程师分别对书稿提出了宝贵的意见,这里一并致以深切的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不足,恳请读者批评指正。

目 录

第1章 地铁隧道结构概述	1
1.1 盾构发展史	2
1.1.1 国际发展概况	2
1.1.2 国内发展概况	4
1.2 盾构隧道设计理论概况	6
1.2.1 盾构隧道管片选定及设计	6
1.2.2 盾构的构造、设计与选型	7
1.2.3 盾构掘进控制设计	8
1.3 盾构法隧道结构形式	9
1.3.1 管片衬砌	9
1.3.2 复合衬砌	9
1.4 盾构隧道衬砌结构体系	10
1.4.1 管片	10
1.4.2 接头连接方式与构造	12
1.4.3 衬砌环分块方式和拼装方式	14
1.4.4 结构防水	16
1.5 需解决的问题及研究思路	17
参考文献	18
第2章 盾构管片结构设计	19
2.1 地铁盾构隧道结构体系	19
2.2 管片结构设计理论及荷载研究	26
2.2.1 区间隧道设计标准	26
2.2.2 计算理论和方法	27
2.2.3 设计荷载	33
2.2.4 管片截面内力计算	37
2.2.5 管片纵缝张开验算	39
2.3 管片结构的受力性能试验分析	39
2.3.1 管片纵缝的受力性能	40
2.3.2 管片环缝的受力性能	53
2.3.3 衬砌结构及通用环管片结构的受力性能	65
2.4 管片结构的设计	72

参考文献	77
第3章 盾构隧道施工关键技术	79
3.1 引言	79
3.2 通用环管片施工存在问题	80
3.2.1 管片破损渗漏问题	80
3.2.2 通用环管片排版与纠偏控制难问题	81
3.2.3 盾尾上下左右侧单侧间隙量较小问题	81
3.2.4 盾构隧道上浮控制问题	82
3.2.5 盾构隧道精细化施工问题	82
3.3 通用环管片拼装技术	82
3.3.1 通用环拼装质量影响因素分析	82
3.3.2 通用环管片排版技术	83
3.3.3 盾构机位自动化导向系统	92
3.3.4 通用环管片自动选环系统适用性研究	101
3.4 通用环管片动态纠偏	106
3.4.1 偏差成因分析	107
3.4.2 通用管片纠偏原理	108
3.4.3 通用环管片分级纠偏技术	110
3.4.4 考虑盾尾间隙的盾构纠偏掘进方法	118
3.5 盾构隧道施工管片上浮控制	124
3.5.1 管片上浮原因分析	124
3.5.2 管片上浮控制目标值的研究	128
3.5.3 控制管片上浮措施	130
3.6 盾构施工全过程精细化管理	133
3.6.1 设定盾构施工参数预警值	133
3.6.2 施工过程精细化管控	133
3.6.3 管片作业管理框架及流程	134
3.6.4 盾构“三图四表”管理	135
参考文献	137
第4章 盾构隧道结构的运营及维护	139
4.1 引言	139
4.2 隧道管片耐久性演化规律	139
4.2.1 盾构隧道混凝土管片的耐久性失效机理与模型	140
4.2.2 盾构隧道管片的承载能力退化模型	147
4.2.3 提高盾构隧道管片耐久性的综合措施	150
4.2.4 小结	151
4.3 周边环境扰动下隧道结构的受力机制及其控制	152

4.3.1 盾构隧道结构的整体安全性	152
4.3.2 通用环管片结构的极限承载能力	155
4.3.3 内张钢圈加固技术	167
4.4 隧道纵向变形影响分析及其控制	173
4.4.1 隧道纵向变形特点与机理	174
4.4.2 通用环管片结构纵向受力机制	176
4.4.3 运营期不均匀沉降治理技术	177
参考文献	192
第5章 通用环管片结构在宁波的应用	194
5.1 宁波市轨道交通盾构施工现状及问题	194
5.1.1 宁波轨道交通项目概况	194
5.1.2 宁波轨道交通项目的盾构施工条件	196
5.1.3 宁波市轨道交通项目盾构机选型	198
5.2 宁波轨道交通盾构隧道通用管片关键技术施工	200
5.2.1 自动化导向系统和排版系统应用技术	200
5.2.2 信息化自动采集系统与选环系统应用技术	205
5.2.3 盾构隧道施工期上浮控制技术	214
5.3 宁波轨道交通盾构隧道通用管片运营及维护区间案例	217
5.3.1 工程背景	217
5.3.2 注浆抬升方案	219
5.3.3 监测方案	221
5.3.4 注浆抬升控制标准	222
5.3.5 注浆效果分析	222

第 1 章 地铁隧道结构概述

随着社会经济的发展、城市化进程的加快以及城市人口的迅速增长,地面交通难以满足发展需求,大范围地开发地下空间、建造地下隧道成了缓解交通压力的重要手段。目前,世界上 40 多个国家 80 多个城市已开通了城市地铁线路,发达国家均拥有高度发达的城市地铁设施。在欧洲,英国于 1863 年和 1870 年先后建成了伦敦大都会铁路 (Metropolitan Railway) 和伦敦塔地铁 (Tower Subway),现存最早的盾构法地铁隧道亦位于伦敦。法国于 1900 年开通巴黎地铁,并于 2005 年底建成了以地铁线路为主体的全区快速铁路网 (Réseau Express Régional)。俄罗斯莫斯科到 2007 年底共修建了 12 条总长度约 292.2km 的地铁线路。此外,德国、荷兰、意大利、西班牙等国的 30 多个主要城市均建有完备的地铁系统。在美洲,美国 100 万以上人口的大城市都拥有城市地铁,纽约地铁线路总长度达 443km;巴西里约热内卢目前也建成了 42km 的地铁线路。在亚洲,日本东京、横滨、大阪、名古屋等 10 座 100 万以上人口的城市在不足 5500km² 的土地上,共建地铁车站 715 座,地铁线路 738.5km,其中东京的线网密度居世界之首。此外,印度加尔各答、德里,泰国曼谷,土耳其伊斯坦布尔,阿联酋迪拜以及新加坡等地均于 20 世纪末至 21 世纪初进行了城市地铁建设。在经济并不发达的非洲,埃及、南非等也相继于 1987 年、2010 年开通了长达 69.8km 的开罗地铁和长达 80km 的约翰内斯堡地铁。

近三十年来,中国城市地铁正逐步进入稳定、有序和快速发展阶段,尤其是近 10 年来,由于国家政策的正确引导和相关城市对规划建设地铁的积极努力,在发展速度、规模和现代化水平方面,突显了后发优势。但是,与世界发达国家城市的地铁发展现状相比,差距还是很大,中国城市还均未形成有效的地铁运行网络,总体规模不大。

截至 2015 年末,我国累计有 26 个城市建成投运城轨线路 116 条,运营线路长度 3612km。2015 年新增青岛、南昌、淮安和兰州 4 个运营城市;全国新增 15 条运营线路,438km 运营线路长度。在 3612km 运营线路长度中,地铁 2658km,占线路总长的 73.6%;轻轨 239km,占线路总长的 6.6%;单轨 89km,占线路总长的 2.5%;现代有轨电车 161km,占线路总长的 4.5%;磁浮交通 49km,占线路总长的 1.4%;市域快轨 412km,占线路总长的 11.4%;APM 线 4km,占线路总长的 0.1%。

城市地铁隧道工程的修建技术主要有盾构法、矿山法、新奥法。与其他方法相比,盾构法有如下特点。优点在于:(1)施工时对地面环境以及周边环境影响小,不需要大面积的围蔽施工,可以在建筑、河流下施工,没有噪声和振动的施工污染,所以在城市密集的建筑、地下管网密集的地方尤其合适;(2)施工速度快、节省人力、机械化自动化程度高、不受天气影响;(3)在富水软弱地层中施工相对于矿山法更具优越性。盾构技术的缺点在于:(1)一次性投入大,盾构机购置费用较高;(2)覆土较浅时,地表沉降较难控制;(3)用于施工小曲率半径 ($R < 20D$) 隧道时掘进较困难。

到 20 世纪初,针对公路隧道、地铁和地下管线的施工,美国、英国、德国等国开始

大量使用盾构法,盾构施工工艺如加气压施工和盾尾注浆工艺也有了突破。20世纪60年代后,盾构法在日本大量用于东京、大阪的城市地铁工程。20世纪50年代开始,我国首先在煤矿巷道的修建工程中使用盾构法施工,20世纪50~60年代以来,上海、广州、深圳等沿海城市以及北京、南京等内陆城市渐渐开始使用盾构法施工,主要用于地铁、公路、能源方面的工程,施工总里程达500km以上。1963年上海对盾构技术进行了开发,将其与地下铁道的建设相结合,在1990年将盾构法首次应用于城市地铁项目——上海地铁1号线。

我国幅员辽阔,工程地质水文条件复杂,盾构施工技术在各种复杂地层中的使用技术需要提高并达到成熟。比如:盾构穿越硬岩、断层、溶洞、卵石地层,盾构穿越砂层、淤泥层、煤层等,应制定相应的工法和标准。盾构在特殊环境中的使用技术需要系统总结和提高,如盾构下穿铁路、河流、建筑物,大坡度、小半径条件下的施工。现有的土压平衡盾构、泥水盾构技术,有些技术细节还需改进和完善,如舱内注入泥水、泥土成分和配比、注入压力、出泥出渣速度等参数的优化选取,泥浆的处理和再利用等。近年来由于市政给排水、沿海交通的发展需求,盾构技术正向着大断面化、工程的大深度化、高地下水压、长距离化、施工自动化、高速化发展,施工技术也越来越多样化。盾构施工安全和灾害防治是盾构隧道参建单位和政府管理部门重视的重要方面,每年我国都有大量因此造成的人员伤害和财产损失案例,甚至出现隧道报废和河堤塌陷的严重事故。如何在高速发展的条件下减少事故和灾害带来的损失是盾构技术发展的一个重要方向。

1.1 盾构发展史

1.1.1 国际发展概况

18世纪末英国人提出在伦敦地下修建横贯泰晤士河隧道的构想,并对具体的掘削工法和使用机械等问题做了讨论。到1798年开始着手希望实现这个构思,但由于竖井挖不到预定的深度,故计划受挫。但横贯泰晤士河隧道的设想与日俱增,4年后Torevix决定由另一地点建造连结两岸的隧道,随后工程再次开工。施工中克服了种种困难,当掘进到最后30m时,开挖面急剧浸水隧道被水淹没,横贯泰晤士河的设想再次破灭,工程从开工到被迫终止用了5年时间。横贯泰晤士河的计划在以后10年中未见显著进展。

1818年Brunel观察了小虫腐蚀木船底板成洞的经过,从而得到启示,在此基础上提出了盾构工法,并取得了专利。这就是所谓的开放型手掘盾构的原型。Brunel对自己的新工法非常自信,并于1823年拟定了伦敦泰晤士河两岸的另一条道路隧道的计划。随后,这个计划由当时的国会确认,工程于1825年动工。隧道长458m,隧道断面为11.4m×6.8m。工程进展顺利,但因地层下沉,致使工程被迫中止。但Brunel并没有因此而灰心失望,他总结了失败的教训,对盾构做了7年的改进,后于1834年工程再次开工,又经过7年的精心施工,终于在1841年贯通隧道。Brunel在该隧道中采用的是方形铸铁框盾构。自Brunel向泰晤士河隧道挑战到隧道竣工前后经历了20个春秋,Brunel经过不懈的努力,克服了种种困难,最后终于取得了胜利。此时,他已是72岁的老人。Brunel对盾

构工法的贡献极为卓著,这是后人的一致公论。

自 Brunel 的方形盾构以后,盾构技术又经过了 23 年的改进,到 1869 年建造横贯泰晤士河上的第二条隧道,首次采用圆形断面,外径 2.18m,长 402m,这项工程由 Burlow 和 Great 两人负责。Great 采用了新开发的圆形盾构,使用铸铁扇形管片直到隧道掘削结束未出任何事故。随后 Great 在 1887 年南伦敦铁道隧道施工中使用了盾构和气压组合工法获得成功,这为现在的盾构工法奠定了基础。从起初 Torevix 反复失败和受挫折,到引出 Brunel 的盾构工法,及进而改进成为 Great 的盾构工法前后经过 80 年的漫长岁月。

19 世纪末到 20 世纪中叶盾构工法相继传入美国、法国、德国、日本、苏联等国,并得到不同程度的发展。美国于 1892 年最先开发了封闭式盾构;同年法国巴黎使用混凝土管片建造了下水道隧道;1896~1899 年德国使用钢管片建造了柏林隧道;1913 年德国建造了断面为马蹄形的易北河隧道;1917 年日本采用盾构工法建造国铁羽越线,后因地质条件差而停止使用;1931 年苏联用英制盾构建造了莫斯科地铁隧道,施工中使用了化学注浆和冻结工法;1939 年日本采用手掘圆形盾构建造了直径 7m 的关门隧道;1948 年苏联建造了列宁格勒地铁隧道;1954 年中国阜新建造 $\phi 2.6\text{m}$ 的圆形盾构疏水隧道;1957 年中国北京建造了 $\phi 2\text{m}$ 、 $\phi 2.6\text{m}$ 的盾构下水道隧道;1957 年日本采用封闭式盾构建造东京地铁隧道。总之在这 50~60 年的时间里盾构工法虽然也有进步,但这一时期的特点是盾构工法在世界各国得以推广普及。

20 世纪 60~80 年代盾构工法继续发展完善,成绩显著。1960 年英国伦敦开始使用滚筒式挖掘机;同年美国纽约最先使用油压千斤顶盾构;1964 年日本埼玉隧道中最先使用泥水盾构;1969 年日本在东京首次实施泥水加压盾构施工;1972 年日本开发土压盾构成功;1975 年日本推出泥土加压盾构成功;1978 年日本开发高浓度泥水盾构成功;1981 年日本开发气泡盾构成功;1982 年日本开发 ECL 工法成功;1988 年日本开发泥水式双圆搭接盾构工法成功;1989 年日本开发 HV 工法、注浆盾构工法成功。总之这一时期的特点是开发了多种新型盾构工法,以泥水式、土压式盾构工法为主。

1990 年之后,盾构工法的技术进步极为显著。归纳起来有以下几个特点:

(1) 盾构隧道长距离化、大直径化

首先是英法两国共同建造的英吉利海峡隧道(长 48km)采用 $\phi 8.8\text{m}$ 的土压盾构工法于 1993 年竣工;日本东京湾隧道(长 15.1km)采用泥水盾构($\phi 14.14\text{m}$)于 1996 年竣工;丹麦斯多贝尔特海峡隧道(长 7.9km)采用 $\phi 8.5\text{m}$ 土压盾构工法于 1996 年竣工;德国易北河第 4 条隧道采用复合盾构($\phi 14.2\text{m}$)于 2003 年竣工;荷兰格雷恩哈特隧道($\phi 14.87\text{m}$ 、泥水式)2004 年竣工;第 2 条英吉利海峡隧道($\phi 15\text{m}$ 、土压盾构)于 2003 年动工,2008 年竣工。

(2) 盾构多样化

从断面形状方面讲出现了矩形、马蹄形、椭圆形、多圆搭接形(双圆搭接、3 圆搭接)等多种异圆断面盾构;从功能上讲出现了球体盾构、母子盾构、扩径盾构、变径盾构、分岔盾构、途中更换刀具(无需竖井)盾构、障碍物直接切除盾构等特种盾构;从盾构机的掘削方式上出现了摇动、摆动掘削方式的盾构,打破了以往传统的旋转掘削方式。

(3) 施工自动化

施工设备出现了管片供给、运送、组装自动化装置；盾构机掘进中的方向、姿态自动控制系统；施工信息化、自动化的管理系统及施工故障自诊断系统。

技术现状：

(1) 当前是泥水盾构、土压盾构技术的普及和推广时期，但有些技术细节有待完善及改进。如舱内注入泥水、泥土成分配比，注入压力；出泥、出土的速度等参数的优化选取。排出泥水的分离处理；排出废泥的处理及再利用。

(2) 多种特种盾构工法的相继问世，大大地扩展了盾构工法的应用范围，使盾构工法的前景更加宽广美好。但由于这些特种工法问世的时间不长，存在的施工实例不够多，细节仍有待改进。

(3) 近年交通工程、下水道工程、共同沟工程存在大直径盾构隧道的构建需求，所以大直径、长距离、高速施工等施工措施、施工设备的研发和成功应用也较为迫切。

发展动向：总起来说，盾构工法今后的开发动向有以下几点：

(1) 完善近年推出的新工法、新工艺的技术细节，使之提高成熟。

(2) 加速盾构工法的自动化进程。

(3) 为适应大深度、高地下水压、大口径化、长距离化、施工自动化、施工高速化、断面多样化等社会需求，开发崭新概念的工法、工艺、材料、管理系统。

1.1.2 国内发展概况

20 世纪 50 年代初，东北阜新煤矿用直径 2.6m 的手掘式盾构及小混凝土预制块修建疏水巷道，这是我国首条用盾构掘进机施工的隧道。1957 年，北京市下水道工程采用直径 2.0m 和 2.6m 的盾构进行施工。

60~80 年代，上海盾构隧道率先发展且成绩显著。1963 年，上海隧道股份结合上海软土地层对盾构掘进机、预制钢混凝土衬砌、隧道掘进施工参数、隧道接缝防水进行了系统的试验研究，研制了 1 台直径 4.2m 的手掘式盾构进行浅埋和深埋隧道掘进试验，隧道掘进长度 68m；1965 年，由上海隧道工程设计院设计、江南造船厂制造的 2 台直径 5.8m 的网格挤压型盾构掘进机，掘进了 2 条地铁区间隧道，掘进总长度 1200m；1966 年，上海打浦路越江公路隧道工程主隧道采用由上海隧道工程设计院设计、江南造船厂制造的我国第一台直径 10.2m 超大型网格挤压盾构掘进机施工，辅以气压稳定开挖面，在黄浦江底顺利掘进隧道，掘进总长 1322m；70 年代，采用 1 台直径 3.6m 和 2 台 4.3m 的网格挤压型盾构，在上海金山石化总厂建设 1 条污水排放隧道和 2 条引水隧道，掘进了 3926m 海底隧道，并首创了垂直顶升法建筑取排水口的新技术；1980 年，上海市进行了地铁 1 号线试验段施工，研制了一台直径 6.41m 的刀盘式盾构掘进机，后改为网格挤压型盾构掘进机，在淤泥质黏土地层中掘进隧道 1230m；1985 年，上海延安东路越江隧道工程 1476m 圆形主隧道采用上海隧道股份设计、江南造船厂制造的直径 11.3m 网格型水力机械出土盾构掘进机；1985 年，上海芙蓉江路排水隧道工程引进一台日本川崎重工制造的直径 4.33m 小刀盘土压盾构，掘进 1500m，该盾构具有机械化切削和螺旋机出土功能，施工效率高，对地面影响小；1987 年上海隧道股份研制成功了我国第一台 $\phi 4.35\text{m}$ 加泥式土压平衡盾构掘进机，用于市南站过江电缆隧道工程，穿越黄浦江底粉砂层、掘进长度 583m，技术成果达到 80 年代国际先进水平，并获得 1990 年国家科技进步一等奖。

90年代之后,盾构隧道技术在国内进入飞速发展的阶段。1990年,上海地铁1号线工程全线开工,18km区间隧道采用7台由法国FCB公司、上海隧道股份、上海隧道工程设计院、上海船厂联合制造的 $\phi 6.34\text{m}$ 土压平衡盾构掘进机。每台盾构月掘进200m以上,地表沉降控制在 $+1\sim-3\text{cm}$;1996年,上海地铁2号线再次使用原7台土压盾构,并又从法国FMT公司引进2台土压平衡盾构,掘进24km区间隧道,上海地铁2号线的10号盾构为上海隧道股份自行设计制造;1996年,上海延安东路隧道南线工程1300m圆形主隧道采用从日本引进的 $\phi 11.22\text{m}$ 泥水加压平衡盾构掘进机施工;1996年,广州地铁1号线8.8km区间隧道由日本青木建设施工,采用2台 $\phi 6.14\text{m}$ 泥水加压平衡盾构和1台 $\phi 6.14\text{m}$ 土压平衡盾构;1999年5月,上海隧道股份研制成功国内第1台 $3.8\text{m}\times 3.8\text{m}$ 矩形组合刀盘式土压平衡顶管机,在浦东陆家嘴地铁车站掘进120m,建成2条过街人行地道。

进入21世纪,盾构法隧道已经成为我国城市地铁隧道的主要施工方法,且在此期间攻克了很多技术性难题。2003年,上海地铁8号线首次采用双圆隧道新技术,从日本引进2台 $\phi 6520\times W11120$ 双圆形土压盾构,掘进黄兴路站——开鲁路站2.6km区间隧道;2004年,上海上中路越江隧道工程引进世界最大直径的 $\phi 14.87\text{m}$ 泥水加压盾构,如图1-1所示,在黄浦江掘进施工2条隧道,隧道结构为双层4车道;2008年,武汉长江隧道贯通,武汉长江隧道长3.3km,直径11.38m;2009年,上海长江隧道贯通,隧道自开工起就因其“长、大、深”的特点吸引着业界同行的目光:长——盾构一次性掘进距离长达7.5km,世界上绝无仅有;大——两台超大盾构直径达15.43m,堪称世界之最,如图1-2所示;深——江底高水压施工,最深处覆土达55m;2010年,南京长江隧道贯通,南京长江隧道直径 $\phi 14.5\text{m}$,如图1-3所示,当时列全球盾构隧道第二,该隧道当年作为地质条件最复杂、技术难题最多和施工风险最大的工程,被称为“万里长江第一隧”;2014年,扬州瘦西湖隧道贯通,其盾构段全长1.2km,直径14.5m,如图1-4所示,采用盾构的工艺,采用单管双层方案,上下层各布置两条车道;2015年,南京扬子江隧道顺利实现全线贯通,隧道直径为 $\phi 14.93\text{m}$,这是世界上同类隧道中规模最大、长度最长、地质最复杂、水压最高的隧道。

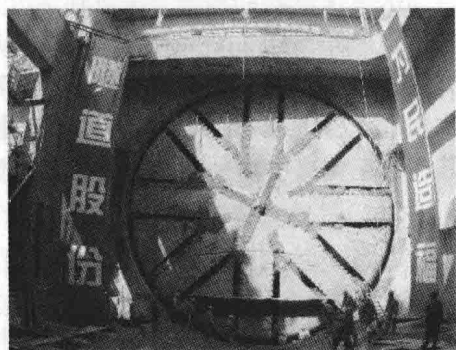


图1-1 上海上中路越江盾构隧道

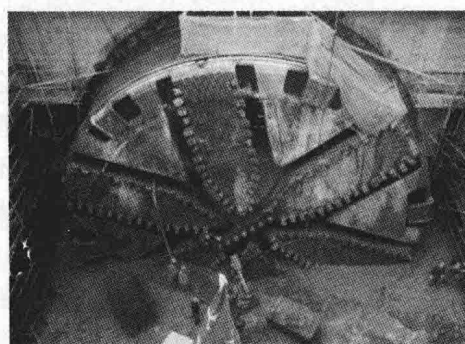


图1-2 上海长江盾构隧道

随着盾构设备质量的提高和成本的下降,盾构法已经成为目前穿越江海大型隧道及城市地铁隧道的主流施工方法,正朝着大断面、高水压、长距离、复杂地层和精细化施工方

向发展。然而目前盾构隧道设计无规范可循，在设计和施工方面均面临许多亟待解决的关键问题。

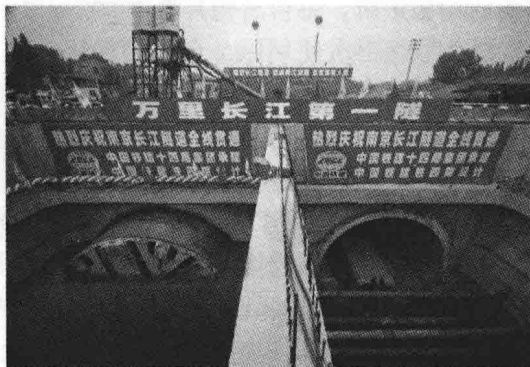


图 1-3 南京长江隧道盾构施工

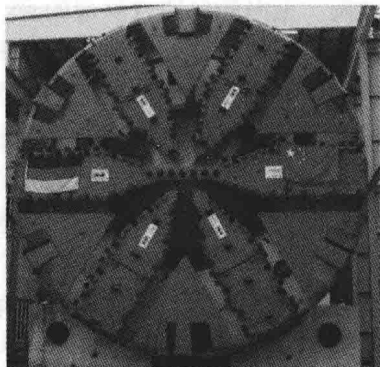


图 1-4 扬州瘦西湖盾构

1.2 盾构隧道设计理论概况

盾构工法主要是通过盾构及内部的土压力或者泥水压力与作业在开挖面上的土压力和水压力保持平衡的方法取得开挖面的稳定，同时使用坚固的盾构外壳支撑着隧道周边地层，在盾构内部进行开挖和衬砌的施工，通过重复这样的过程建造隧道的一种施工方法。盾构隧道设计主要包括管片设计、盾构选型及其始发到达井的设计、盾构的构造及设计等。

1.2.1 盾构隧道管片选定及设计

盾构管片设计一般是通过容许应力设计法来进行的，主要依靠经验进行。极限状态设计法可以依据安全系数直接考虑荷载及材料的不均一性及不确定性，且已逐渐开始在盾构管片设计中应用。盾构隧道的衬砌通常由一次衬砌与二次衬砌组成，其中一次衬砌是由管片在接头处通过螺栓连接而成的，二次衬砌是在一次衬砌内侧现浇混凝土而成。对于管片的设计，要根据不同的地质条件，选择合适的管片类型、接头方式，还需要按隧道的横断面方向及纵断面方向分别来进行设计。管片作为一次衬砌必须具备极强的密封防水性能。目前中国对于二次衬砌的设计及应用并不广泛，但其在修正偏离中轴、防水、防腐蚀、防震，抗浮加重及补强加固等方面都有极大的作用。

1. 管片类型、接头方式的选择

盾构隧道的管片按材质及形状分类，主要有钢管片、球墨铸铁管片、钢筋混凝土(RC)管片和复合型管片等。管片种类的选定必须充分考虑对象隧道的用途及地基条件。这些种类的管片在工程中均已得到广泛应用，例如在武汉地铁越长江盾构隧道江中段联络通道中，钢管片可作为主隧道(柔性结构)与联络通道(刚性结构)的连接部位；球墨铸铁管片具有管壁薄、韧性好、强度高、耐腐蚀等优点，这种新型材料也将逐渐应用于盾构隧道建设中；南京长江隧道采用了钢筋混凝土平板型预制管片。

管片接头方式包括对接方法与紧固方法。管片对接方法主要有全面对接式、部分表面对接、键式、搭接式以及凹式等,紧固方法主要有直螺栓、弯曲螺栓、斜螺栓、贯通螺栓以及榫头连接等。

2. 管片结构设计

通常情况下,管片断面需要按相对于横断面方向的设计来决定。根据设计条件,在已确定荷载作用下,选择一种适当的计算方法,对管片截面进行内力计算及校核。管片截面内力计算是管片设计的核心内容,其主要的计算方法有惯用法、修正惯用法、多铰接环法以及梁弹簧模型方法等。

惯用计算法是将管环作为与管片有相同刚度的刚性均一的环,忽略管片接头的存在来评价管片的,而修正惯用法引入了抗弯刚度的有效率及弯矩的增减率2个参数,计算结果比惯用法更接近实际。多铰接环法是将管片作为铰接来进行评价。梁弹簧模型法是将管片主断面作为梁进行模型化处理,将管片接头作为回转弹簧进行模型化处理,将环接头作为抗剪弹簧进行模型化处理的方法。

3. 管片防水设计

根据防水材料的不同,管片防水方法可分为防水板(膜),混凝土防水和橡胶等密封材料防水。防水板(膜)一般用于复合衬砌防水,防水层设于一次支护与二次模筑衬砌之间。管片自身防水性能主要是依靠高抗渗等级($>P8$)的防水混凝土来实现的。橡胶防水是盾构隧道的主要防水措施之一,可分为三元乙丙弹性橡胶密封垫、遇水膨胀橡胶止水条以及两者复合型止水条,主要通过胶条间的挤压来达到防水效果。

1.2.2 盾构的构造、设计与选型

1. 盾构主体设计

盾构主体设计主要包括盾构外径、长度的设定以及盾尾密封。盾构的外径是由管片外径加上壁后注浆间隙与盾尾钢壳的厚度来决定的。决定壁后注浆间隙大小的要素主要有盾尾的变形量、土水压力下管片的变形量、管片的倾斜、管片外径的容许误差等。盾尾钢壳的厚度,可以按照所产生的土水压力进行设计。盾构的长度是左右盾构推进时灵敏性的重要因素,长径比是评价盾构长度的主要指数之一。盾尾密封应具有耐压性、耐久性、对拼装的管片之间产生错缝的追踪性,以及破损更换时的易操作性。为此开发出了以金属刷为材料的密封技术,现已广泛应用在盾构中,同时也有许多其他材料的盾尾刷不断出现在工程当中。

2. 盾构刀盘刀具的设计

刀盘的设计必须要根据结构强度、耐久性、机能性和土质条件等因素来确定。刀盘按正面形状分主要有面板式和辐条式两种,其对应的地层条件,适用的盾构机种也不同。刀具由钻柄及刀刃所组成,主要种类有滚刀、切刀、先行刀、周边刮刀、仿形刀等。刀具和刀盘构成了盾构的掘进机构。同一时间刀盘刀具磨损程度应尽量相近,为了能够高效、快速地进行掘进,需要对刀盘刀具的布置进行一定的试验和理论分析。

3. 盾构其他部分的构造与设计

盾构还需要对推进机构、铰接机构、管片拼装装置(举重臂)、后配套台车、附属装置、以及特殊装置进行设计。盾构是一种隧道掘进的专用工程机械,现代盾构集机、电、

液、传感、信息技术于一体，这就要求盾构各部分构造之间必须要相互协调运作，这也是盾构安全掘进的必要条件之一。

4. 盾构选型

盾构选型是盾构法隧道能否安全、环保、优质、经济、快速建成的关键工作之一，所选的盾构形式应尽量减少辅助施工法确保开挖面和适应地层条件。

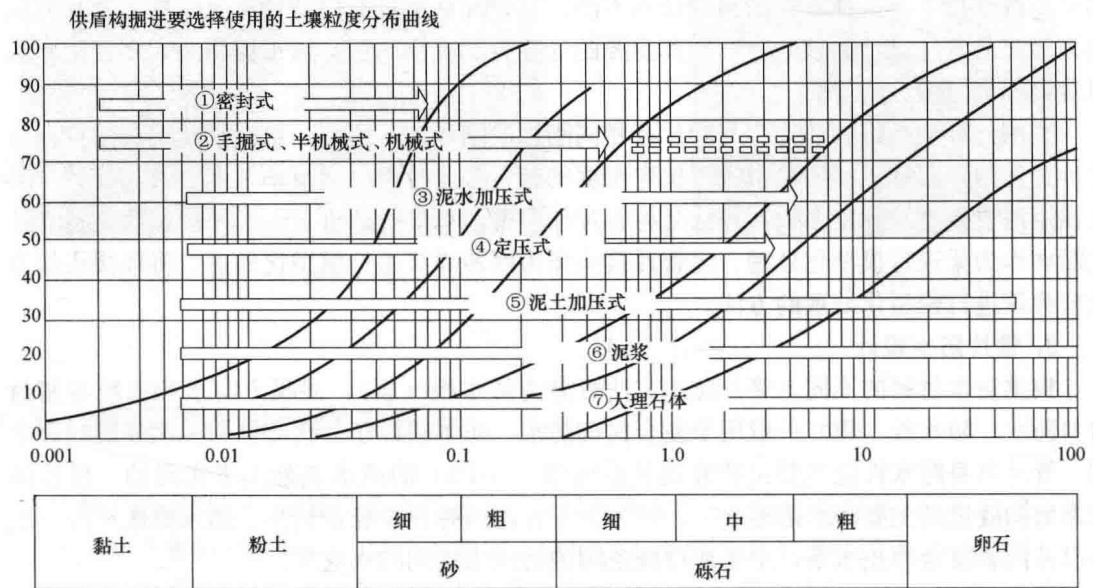


图 1-5 不同地质条件下的盾构选型

盾构选型主要是根据地层渗透系数、颗粒级配等因素决定的，如图 1-5 所示。通常，当地层的渗透系数小于 $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，可以选用土压平衡盾构；当地层的渗透系数在 $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间时，既可以选用土压平衡盾构也可以选用泥水式盾构；当地层的透水系数大于 $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，宜选用泥水盾构。根据地层的颗粒级配进行选型时，黏土、淤泥质土适用土压平衡盾构进行掘进，砾石粗砂适用泥水盾构进行掘进，粗砂、细砂可使用泥水盾构，经土质改良后也可使用土压平衡盾构。以地下水压进行判断依据时，当水压大于 0.3MPa 时，适宜采用泥水盾构。在实际工程中，盾构选型还需要综合考虑经济、安全等因素。

1.2.3 盾构掘进控制设计

1. 盾构掘进参数控制

盾构掘进参数的控制对保证掘进的效率和掘进过程的稳定有很重要的作用。其中掘进参数与地质条件往往具有一定的对应关系，可以利用掘进参数的变化规律和趋势对盾构隧道状况做出正确判断。

2. 盾构掘进姿态控制

盾构的姿态控制是盾构掘进中的一个重要环节。盾构姿态控制的基本原则是以隧道设计轴线为目标，偏差控制在设计范围内，同时在掘进过程中进行盾构姿态调整确保不破坏管片。

1.3 盾构法隧道结构形式

隧道施工中合理选择衬砌结构形式是提高施工质量、缩短工期以及降低事故综合成本的主要措施之一。目前,国内外盾构隧道衬砌结构形式有管片衬砌、现浇混凝土衬砌、挤压混凝土衬砌以及复合衬砌等。在国外,欧美等国家因所处的地层相对稳定,盾构隧道以单层管片衬砌为主,对复合衬砌的应用不多^[1]。而日本的地层复杂,是一个地震多发的国家,在盾构隧道中对复合衬砌、管片衬砌以及挤压混凝土衬砌等都有采用。国内目前以管片衬砌为主。

1.3.1 管片衬砌

盾构隧道施工中,管片衬砌是最为常用的衬砌结构形式,管片由铸铁管片、钢管片、复合管片、钢筋混凝土管片以及钢纤维混凝土管片等。国内外盾构管片施工广泛应用钢筋混凝土管片,其具有以下优点:

- (1) 钢筋混凝土管片的生产与安装已发展到了较高水平^[2];
- (2) 管片衬砌施工工艺简单,施工速度快。随着盾构的推进,管片运至盾尾后由人工操作管片拼装机拼装成环;
- (3) 根据施工实践,施工管片接缝的张开量、混凝土的开裂和防水性能均可控制在预期要求内^[3]。

管片衬砌也存在以下不足:

- (1) 在施工阶段,管片预制必须要修建投资巨大的预制场以及配套设备,使施工成本增加;管片在吊运及拼装过程汇总易出现裂纹、缺角及掉边的问题,会影响衬砌的完整性及防水性能;
- (2) 在运营阶段,管片衬砌隧道一旦因列车碰撞或火灾等意外情况导致衬砌结构损毁,特别是对高水压条件下的受损衬砌,不仅大大降低了结构的承载力和安全性,而且更换、修复非常困难,某些情况下甚至无法修复^[4]。

修建于2007~2012年的北京地铁9号线6标军一东区间采用管片衬砌形式,其施工成功破解了富水大粒径漂石地层盾构施工的世界难题,其中军-东区间盾构穿越的是北京乃至世界盾构施工史上罕见的复杂地层。

1.3.2 复合衬砌

目前,国内外应用盾构隧道施工的复合衬砌结构形式有三种,分别是:初次衬砌为管片且二次衬砌为现浇混凝土;初次衬砌为挤压混凝土且二次衬砌为管片;初次衬砌为挤压混凝土且二次衬砌为现浇混凝土,也称为盾构隧道现浇混凝土复合衬砌系统。复合衬砌结构具有以下优点:

- (1) 可简化对外层衬砌结构的要求,合理减少外层衬砌的厚度;
- (2) 二次衬砌可起到防腐、防水、防火、隧道内表面光滑以及衬砌补强等作用,能有效降低隧道在运营期间的维修成本。