

# 北京地铁盾构隧道 设计与施工技术

杨秀仁 等 著

BEIJING DITIE DUNGOU SUIDAO  
SHEJI YU SHIGONG JISHU



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 北京地铁盾构隧道设计与施工技术

杨秀仁 刘国琦 杜文库 华东 黄美群 著

中国铁道出版社

2016年·北京

## 内 容 简 介

本书是结合北京首次采用盾构法施工地铁隧道的系统研究成果撰写,内容从研究和工程应用的角度,对盾构法技术在北京应用,从工程设计、构件制造、工程施工、工程监测和测量等方面进行详尽的介绍,并进行有价值的创新和探索,可供从事地下工程设计、施工、监理和建设管理的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

北京地铁盾构隧道设计与施工技术/杨秀仁等著. —北京:  
中国铁道出版社,2016. 1  
ISBN 978-7-113-21311-4

I. ①北… II. ①杨… III. ①地铁隧道—隧道施工—盾构法—北京市  
IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 002659 号

书 名: 北京地铁盾构隧道设计与施工技术  
作 者: 杨秀仁 刘国琦 杜文库 华 东 黄美群

策 划: 江新锡  
责任编辑: 张卫晓 编辑部电话: 010-51873193  
封面设计: 郑春鹏  
责任校对: 苗 丹  
责任印制: 陆 宁 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>  
印 刷: 中煤(北京)印务有限公司  
版 次: 2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 16 字数: 387 千  
书 号: ISBN 978-7-113-21311-4  
定 价: 80.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)  
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

## 作者介绍

杨秀仁,男,1964年11月出生,天津市人,西南交通大学主修隧道及地下铁道专业,北京交通大学主修道路与铁道工程专业。从事城市轨道交通工程设计和科研工作29年,现为北京城建设计发展集团总工程师,北京市轨道结构工程技术研究中心主任,教授级高级工程师,享受国务院政府特殊津贴专家,北京市有突出贡献的科学、技术、管理专家,北京市百千万人才,首都劳动奖章获得者。

获授权国家发明和实用新型专利35项,获国家及省部级科技进步和优秀设计奖励30余项,核心期刊发表学术论文30篇。国标《地铁设计规范》的主编人之一,国标《盾构隧道设计规范》主编,北京市地方标准《城市轨道交通工程设计规范》主编,共主编和参编国家标准和地方标准15部。近年来主持开展了多项城市轨道交通科研攻关项目,其中包括“城市轨道交通预制装配式地下车站综合技术研究”等。

主要社会兼职有住建部城市轨道交通质量安全专家委员会委员,中国土木工程学会常务理事,土木学会城市轨道交通工作委员会副主任,中国建筑业协会深基础施工分会副理事长,中国城市轨道交通学会专家委员会委员,中国勘察设计协会市政分会城市轨道交通发展委员会主任,西南交通大学、北京交通大学、北京工业大学、北京建筑大学兼职教授,上海市科技委委员等。



# 序

当我看到这本《北京地铁盾构隧道设计与施工技术》时,脑海里第一时间浮现出来的是,20世纪90年代针对北京地铁5号线区间隧道到底是采用浅埋暗挖法还是采用盾构法施工的讨论。

在北京地铁5号线之前,北京地铁区间隧道全部都是采用明挖法和浅埋暗挖法施工,而当时在我国上海和广州等城市的地铁工程中,盾构法已经得到了大量的应用。在北京城建集团和北京城建设计研究总院的推动下,1995年在北京召开了“中法盾构及地下工程技术研讨会”,算是启动北京地铁盾构法施工技术讨论的里程碑式活动,会上专门就北京的工程地质与采用盾构法的适用性等有关问题进行了深入的研讨。之后,杨秀仁同志及研究团队作为北京地铁5号线工程设计的项目主持人和设计总体,在北京城建集团刘国琦总工程师和杜文库部长的领导下,对推动盾构技术在北京应用方面做了大量的准备工作。最终由时任北京市副市长的汪光焘同志批复了在北京地铁5号线开展地铁盾构试验段的研究工作。

北京市的地质条件与上海等城市的地质条件不同,北京地下大部分浅层覆盖层中广泛分布着砂卵石地层,在采用盾构法施工时存在很多的工程技术问题需要进行专门探索,这些问题包括盾构机的选型,北京特有地层对盾构隧道的作用特性,管片接头的力学特性,各施工环节的工艺、材料,以及构件制造技术等。

北京地铁5号线雍和宫站—北新桥站盾构试验段工程,是北京市采用盾构法施工地铁隧道的先河。由于开展了大量的试验和研究工作,试验段的工程进展非常顺利,并取得丰富的第一手资料,为大规模推广应用创造了条件。在北京地铁5号线盾构试验段工程之后,后续线路大量采用盾构法施工,取得非常好的技术、经济和社会效益。

这本《北京地铁盾构隧道设计与施工技术》,从研究的角度,全面阐述了当时主要的研究内容和研究成果,对在北京和具有类似地质条件的城市开展盾构隧道设计施工工作有一定的指导意义,希望能够对大家的工作有所帮助。

中国工程院院士

杨秀仁

2015.12.16.

# 前 言

自 2003 年盾构隧道技术第一次应用于北京地铁 5 号线雍和宫站—北新桥站区间盾构试验段工程并获得成功后,北京地铁采用盾构法施工的区间隧道比例超过 60%,盾构隧道设计与施工技术在北京得到了广泛的推广应用,对北京城市轨道交通工程建设、实现快速安全的施工起到至关重要的作用。

北京地铁 5 号线盾构试验段工程作为盾构隧道技术在北京应用具有里程碑的意义,这是北京第一次研究和尝试应用盾构法施工地铁区间隧道。在此之前,北京地铁的区间隧道都是采用明挖法和矿山法(浅埋暗挖法)施工,尽管这两种工法在北京地铁早期的建设中起到了至关重要的作用,但随着城市的发展和城市中心区轨道交通线网分布的加密,城市环境已经不再接受开膛破肚的明挖法,矿山法施工的低作业效率、地面沉降以及施工安全等问题也使其应用受到了限制,因此,对于先进、快捷的盾构法施工在北京地铁隧道建设中的讨论应运而生。在经历了国内和国际学术交流、工程方案设计研究、派员到国内外学习培训以及报请市政府批准等过程后,在北京市各政府主管部门、建设单位的支持下,在北京城建集团领导的推动下,力排众议,终于在 1999 年底启动了北京地铁 5 号线盾构试验段工程,全面开展了覆盖设计、施工、构件制造、试验监测和工程测量等多环节的系统性研究工作。通过努力,试验段工程和各项研究工作均取得了圆满成功,形成并掌握了整套关键技术,为北京地铁全面推广盾构隧道技术奠定了坚实的基础。

经过十余年的不断应用、不断研究和技术发展,盾构隧道技术已经成为北京乃至全国地铁普遍采用的技术。

本书的主要内容,是对北京首次全面开展的地铁盾构隧道综合技术研究成果的进一步提炼,其中的主要技术内容来自于作者和研究团队亲身实践和工程测试,并且得到了大量工程实际应用的检验。希望本书能够对从事地下结构设计、施工、建设管理、教学等方面的专业技术工作者有所裨益。

应该指明的是,我们的研究工作和成果是一个团队共同努力、共同参与的结果,团队主要单位和人员如下:

北京地铁总公司:谢正光、邵为民等组成的团队,对于推动北京地铁 5 号线盾构法以及盾构试验段工程的确立等方面起到了重要作用。

北京首创集团:李跃宗、夏永德、成树全等组成的建设管理团队,首创集团是当时工程的建设管理方。

北京城建集团:刘国琦、杜文库等组成的试验段工程项目建设和试验段项目领导团队,北京城建集团是试验段工程项目的施工总包单位。

北京城建设计发展集团:杨秀仁、黄美群、陈曦、鲁卫东、余乐、李泽光、李松梅等多人组成的设计研究团队,北京城建设计发展集团(原北京城建设计研究院)是北京地铁5号线工程的设计总体单位和试验段工程的设计单位。

北京城建盾构基础公司:朱建春、华东、王海、恽军等多人组成的施工技术研究团队,北京城建盾构公司是试验段工程的施工单位。

北京城建构件厂:韩先福、汪恭胜、刘宁等多人组成的构件制造研究团队。

西南交通大学:何川、林刚等组成的室内模型试验团队。

北京交通大学:王哲、张弥等组成的室内构件试验团队。

北京城建勘察测绘设计研究院:秦长利、方成等组成的工程监测和测量研究团队。

北京城建工程研究院:韩继峰等人组成的现场结构监测团队。

在此,对以上单位和工作人员在完成北京地铁5号线盾构试验段工程研究,以及对本书涉及的研究成果贡献方面作出的努力表示衷心感谢!

限于作者的水平,书中肯定还有写的不到位的地方,甚至可能还存在一些错误,希望广大读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 项目和技术背景 .....	1
1.2 盾构法技术应用于北京地区的关键技术研究 .....	2
1.3 研究工作的主要成果和效益 .....	3
<b>第 2 章 盾构隧道结构设计</b> .....	9
2.1 国内外的盾构隧道设计研究现状 .....	9
2.2 盾构隧道设计研究的技术路线和研究内容 .....	13
2.3 试验段盾构隧道的初步计算 .....	14
2.4 盾构隧道支护结构的现场试验 .....	25
2.5 盾构隧道的模型试验 .....	32
2.6 管片接头刚度试验研究 .....	37
2.7 盾构管片内力的修正计算 .....	40
2.8 主要结论 .....	49
<b>第 3 章 预制混凝土盾构管片生产技术</b> .....	50
3.1 概 述 .....	50
3.2 管片高性能混凝土的研制 .....	51
3.3 计算机自动控制混凝土蒸养系统的开发 .....	56
3.4 盾构管片生产工艺 .....	60
3.5 试验段管片生产 .....	64
<b>第 4 章 盾构隧道施工技术</b> .....	66
4.1 盾构始发技术 .....	66
4.2 盾构隧道开挖面稳定措施 .....	79
4.3 盾构管片拼装技术 .....	92
4.4 盾构隧道地表沉降控制技术 .....	100
4.5 盾构隧道壁后注浆技术 .....	118





第 5 章 盾构隧道施工监测与测量技术 .....	128
5.1 盾构隧道施工监测技术 .....	128
5.2 盾构隧道施工测量技术 .....	138
附件一:地铁 5 号线工程中的管片环向接头弯曲变形特性试验研究 .....	151
附件二:预制盾构管片质量检验评定标准 .....	228
参考文献 .....	243
编    后 .....	244

# 第1章 绪论

## 1.1 项目和技术背景

将时间回溯到2000年,在北京地铁5号线开工建设之前,北京地铁仅有1号线、2号线、13号线和八通线四条运营线路,总长度为114 km。早期的1号线和2号线基本全部采用明挖法施工地下结构,13号线绝大部分采用地面、高架线路形式。随着城市的发展,全线性(包括车站和区间隧道)采用明挖法施工对城市环境的影响逐步受到人们的关注,尤其是当时复八线规划沿长安街敷设,全线开膛破肚式的施工方法无法实施,于是北京地铁率先开展浅埋暗挖法施工的研究和工程尝试。以王梦恕院士为首的中铁隧道集团(当时的名称是中铁隧道局)团队在经过大同一秦皇岛铁路的军都山隧道浅埋暗挖研究试验,以及国家纪委地下停车库工程的历练后,基本掌握在北京地层中进行隧道浅埋暗挖施工的技术,并成功实施北京地铁复兴门折返线工程。以铁道部第三勘测设计院史玉新大师为首的设计团队在大同一秦皇岛铁路的西坪隧道成功采用眼镜法通过隧道塌方地段后,为地铁车站采用暗挖法施工奠定了坚实的基础,之后成功实施了我国第一座浅埋暗挖地铁车站——北京地铁复八线西单车站。

浅埋暗挖法在实现地铁隧道施工不影响地面道路交通和地下管线方面体现出了非常强的优势,复八线全部的区间隧道均采用浅埋暗挖法施工,取得非常好的经济和社会效益。浅埋暗挖工法在北京地铁中的突破,已经成为地铁地下工程建设技术的里程碑,随后在全国得到广泛的推广。

盾构法自1818年发明之后,经过近200年的发展,已经形成多系列、多种类型盾构机并存,分别适用于不同地质条件,并在隧道工程中普遍应用的局面。与浅埋暗挖法相比较,盾构法在地面沉降控制、施工速度、施工作业安全性、施工环境、施工人员的数量和劳动强度等方面具有显著的优势。2000年以前,在国内(如上海、广州等城市)已经被大量用于地铁隧道的施工,其优势得到了充分的体现。

在北京,一直有业内人士呼吁地铁工程引进盾构法设计与施工技术,呼声最为强烈的是北京城建集团和北京城建设计发展集团(原北京城建设计研究总院),北京城建设计发展集团是当时北京地铁5号线工程的总体设计单位。

北京城建集团和北京城建设计发展集团作为北京地铁一期工程的设计和施工单位,早在20世纪60年代就开展了盾构机的研制工作,是我国最早开展盾构机研制的单位。1967年研制的我国第一台盾构机为网格式挤压混凝土衬砌(ECL)盾构,盾构机直径为7.1 m,在北京宋家庄进行试验施工,共推进87 m隧道,取得成功,这台盾构是我国第一台自行研制的盾构机,后来因为其他非技术原因,该盾构机未能投入正常工程施工应用。图1-1为当时的盾构机实景照片。

最早研制的盾构机未能投入正常使用,成为“城建人”的一个“心结”。然而,在北京浅埋暗挖法应用效果良好的情况下,引进一种从未正式在北京地铁使用过的技术,必然将面临种种质疑。事实上,北京要推进盾构法的应用,也需要做好充分的技术准备。

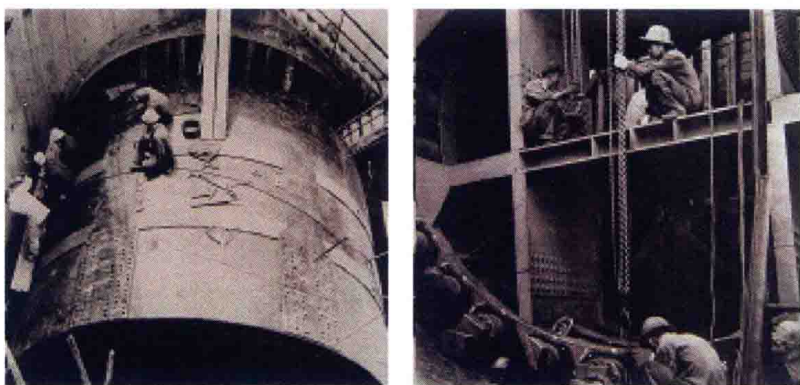


图 1-1 北京最早研制的盾构机

为促进盾构法在北京的应用,在北京城建集团的推动下,1995年由中国国家科学技术委员会、北京市科学技术委员会、法国驻中国大使馆、法国领土整治·装备及交通部主办,中国地铁工程咨询公司、法国地下工程协会(AFTES)在北京承办了“中法盾构及地下工程技术研讨会”,会上多位专家专门就盾构法在北京地区应用问题进行一系列的讨论。其中,杨秀仁发表的《北京地区地下工程盾构法施工初探》一文,首次对北京地铁采用盾构法施工的关键技术问题进行全面探讨。这次会议正式启动了北京地铁采用盾构法施工的实际推进节奏。随后由北京城建设计研究总院完成的《北京地铁5号线可行性研究报告》正式将盾构法写入了建议的隧道施工方法,并顺利地得到上级部门的审查批复。

北京地铁5号线南起丰台区的宋家庄,北至昌平区的太平庄,线路全长27.6 km,在北四环路以南采用地下线路型式,以北采用地面及高架线路型式,其中南段的地下线长16.9 km,北部的地面和高架线10.7 km。全线共设22座车站,其中地下站16座,高架和地面站6座。

为给北京推广应用盾构技术做好充分的准备,探索北京地区特有地质条件下采用盾构法从设计、施工到管片制造等各环节的技术问题,1999年北京城建集团、北京城建设计发展集团与北京地铁总公司联合完成了“北京地铁5号线采用盾构施工的可行性研究报告”,并上报市政府,从技术、经济上做了全面分析和研究,认为在北京地铁5号线上应用盾构技术的条件已经成熟。报告很快得到了时任北京市副市长的汪光焘同志批示:“引进盾构施工技术和设备完全必要,请加快开展,请建委组织协调,具体工作由城建总负责,要为5号线地铁和其他管线施工采用盾构方式抓紧准备。”1999年4月,北京地铁总公司和北京城建集团联合向市政府提交“关于北京地铁5号线盾构试验段的安排”的报告,选定北京地铁5号线雍和宫站—北新桥站之间的区间隧道作为盾构试验段工程。报告得到市领导和市计委的批准,同年11月,经国家计委审批,同意开展北京地铁5号线盾构法施工试验段工程,试验段工程选在北京地铁5号线工程正线的北新桥—雍和宫段线路的左线,试验段长度约688 m。由此,北京地铁正式开始了采用盾构法施工的新纪元。

## 1.2 盾构法技术应用于北京地区的关键技术研究

在1995年时,国内(尤其是上海)已经对盾构隧道设计、施工技术进行了比较多的研究和应用,但这些研究基本上是以类似于上海和广州地区的特有地层为基础进行,而北京地区的地

层与上海、广州的差异极大,虽然有些成果可以参考,但无法全部照搬,需要有针对性地开展相关的研究工作,以解决盾构技术在北京特有地质条件下应用的关键技术问题,防止盲目使用出现“水土不服”。

研究的主要目的是密切结合北京地区工程地质和水文地质特点,全面开展盾构隧道设计与施工综合技术研究,其中包括盾构隧道管片设计计算方法、连续介质模型试验、管片接头试验、管片纯弯曲受力试验、管片局部承压试验、管片生产技术和盾构隧道施工中的始发技术、开挖面稳定措施和方法、管片拼装技术、地表沉降控制技术、壁后注浆技术、盾构施工监测技术、盾构施工测量技术等,从而探索出适合北京地区特有地层条件下的一整套盾构隧道设计与施工技术,掌握盾构隧道设计、管片生产和盾构施工技术,优化盾构管片设计参数、保证管片生产精度,使盾构施工更便捷、成本更低、工效更高、工程质量和地表沉降控制更好,形成完备的盾构隧道设计与施工技术,并能够在北京地铁建设中得以全面推广。这些研究成果对北京地铁应用和推广盾构施工技术起到了至关重要的作用,具有里程碑意义。

盾构隧道技术首次应用于北京地铁的关键技术研究要点包括:

#### 1. 盾构隧道管片设计计算分析及与地层的相互作用研究

在研究分析常规多种盾构隧道设计方法的基础上,结合室内连续介质模型试验、管片构件及其连接接头的力学试验、现场施工完成隧道的结构内力和结构与土体相互作用特性实测等,研究北京特有地层条件下结构与地层的相互作用规律及盾构隧道设计方法和设计参数。

#### 2. 管片生产技术的研究

管片构件制造是确保隧道结构质量、承载特性和工艺合理性的关键环节,其主要的研究点包括:

- (1)高性能混凝土配合比;
- (2)混凝土构件自动蒸养系统开发;
- (3)盾构管片生产工艺及试验设施、施工机具;
- (4)管片生产企业标准和预制混凝土盾构管片操作质量标准。

#### 3. 盾构施工技术的研究

施工技术和施工环节控制是盾构法成功运用的关键,其研究点包括:

- (1)盾构始发和接收技术;
- (2)开挖面稳定措施;
- (3)管片拼装技术;
- (4)地表沉降控制技术;
- (5)壁后注浆技术;
- (6)盾构施工监测技术;
- (7)盾构施工测量技术。

上述关键研究要点在北京地铁5号线盾构试验段工程中得以全面展开,并取得丰富的成果,对推动北京地铁大规模应用盾构法技术起到了至关重要的作用。

## 1.3 研究工作的主要成果和效益

### 1. 盾构隧道管片设计计算分析及与地层的相互作用研究

开展了大量的现场监测和室内试验,主要试验项目有:1:12连续介质中的隧道衬砌模型

试验、管片接头刚度试验、管片纯弯受力试验、管片局部承压试验、管片吊装孔埋件拉拔试验等。

通过试验研究和理论分析,提出区别于其他地区的北京地区盾构隧道设计方法和设计参数。提出北京特有地层盾构隧道设计荷载分布特性,此特性与上海等地区有较大的区别,尤其侧压力分布形式与理论分布形式是不同的。在此基础上,对地铁盾构隧道设计进行优化,每立方米混凝土钢筋用量减少 45 kg。

## 2. 管片生产技术研究

预制混凝土盾构管片是一种应用于地下隧道工程的高精度装配式混凝土预制构件。盾构隧道内径 5.4 m、外径 6.0 m,管片厚度 300 mm、环宽 1 200 mm,管片宽度、内弧弦长尺寸误差仅为  $\pm 1$  mm。盾构法施工对混凝土管片内在、外观质量要求很高,技术问题解决不好,管片生产中极易出现混凝土开裂等质量问题。为生产出高精度、高质量的混凝土管片,展开如下研究并取得系列成果:

### (1) 高性能混凝土配合比

根据北方地区材料特性、气候特点、盾构掘进速度等综合因素,在对砂石等原材料和配合比进行研究的基础上,通过对比试验,优选某种级别的磨细矿渣,应用大掺量矿物掺合料掺加技术,设计出单方混凝土胶凝材料总量 380 kg 内掺 40% 磨细矿渣的 C50、P10 高性能混凝土,混凝土坍落度控制在 40~60 mm,施工性能良好,混凝土强度发展快。经过实验,该混凝土配比符合工程设计要求,能有效防止碱集料反应的产生,降低因胶凝材料水化热过高对管片养护的不利影响,混凝土硬化后各项物理指标优良。

### (2) 计算机自动控制蒸养系统开发

蒸汽养护是混凝土制品生产过程中的一道重要工序,多少年来蒸汽养护没有先进的控温装置,混凝土制品蒸养过程中一般都是由人工测量控制温度,并在较大空间的养护窑内或简单帆布覆盖养护混凝土构件。采用传统的养护方法,在管片试生产期间管片养护结束频繁出现管片大面积开裂现象。为解决混凝土管片在蒸汽养护过程中的质量问题,组织开发计算机自动控制蒸养系统。该系统包括计算机自动控温装置(实用新型专利,编号:03240620.7)和单模位式保温养护罩(实用新型专利,编号:03240619.3)。

该套系统能够自动准确的按蒸养工制度蒸养管片,可以执行 10 种不同的蒸养工艺曲线。温度控制灵敏、稳定,控制误差为  $\pm 1$  °C,养护蒸汽用量比传统方法降低 26% 左右。管片单模位式独立养护生产能够实现管片生产流水化操作,极大的提高劳动生产效率,产生较好的经济社会效益。

### (3) 盾构管片生产工艺及试验设施、施工机具研制

为确保管片成品内外在质量及管片、钢筋骨架加工尺寸精度符合设计要求,通过对管片养护升降温速度、恒温温度、恒温时间及出池强度等制品养护工艺参数的探索研究,结合北京地区及计算机自动控制养护系统的特点,确定养护制度为:升降温速度不大于 15°C,恒温温度为 45°C,恒温时间为 3.5 h,直径 6 m 的管片生产周期控制在 12 h。结合北京地区的气候特点,摒弃传统的造价高、工序繁杂的水池养护方法,安装自动喷淋养护装置,成功解决管片成品后期储存养护干缩开裂的问题。设计加工管片橡胶止水带挤压架、钢筋骨架成形胎具、管片翻转架、管片水平拼装实验台等生产、检验机具,加强管片质量检验,保证管片生产尺寸精度。尤其是设计生产的尼龙材质吊装孔埋件(抗拉拔力达到 37.0 t)和管片胶条挤压机在国内尚属首

次,取代进口部件,成功应用于管片生产,有效地降低管片生产成本。

(4)为了严格保证管片的生产质量,依据国家现行有关的标准规范制定出城建构件厂企业标准“预制混凝土管片生产质量检验标准”。

经过上述研究,试验段管片外观圆滑平整,颜色亮白一致,气泡很少,无缺棱掉角现象,无裂缝。管片宽度、内弧弦长尺寸误差实际控制达到 $\pm 0.8$  mm的水平(国标规定为 $\pm 1$  mm)。

### 3. 盾构施工技术的研究

开工前委托上海隧道施工技术研究所,进行“盾构施工模拟实验”,对盾构穿越的砂、砾石地层施工过程中如何添加适量的塑化材料,改善砂砾石土层的物理状态进行研究。

#### (1)盾构始发技术的研究

针对北京地铁5号线盾构试验段的始发施工场地面积小(仅 $2\,200\text{ m}^2$ ),布局不利于充分发挥盾构施工效率的情况,收集和学习国内外盾构始发施工技术,对盾构始发方案进行分析和比选,采用盾构主机与后配套设备分离的始发方式,确定该情况下始发施工合理的运输与组织模式,解决始发施工阶段的水平和垂直运输问题。同时通过对始发基座、反力架、洞门密封装置、负环钢管片等始发设施的研究和优化,自行设计制造施工简单、造价较低的盾构始发设施,并运用计算机及信息化技术进行盾构始发时的施工参数进行优化,保证盾构安全、经济、快速、优质的始发施工要求,为全线施工奠定基础。

#### (2)开挖面稳定措施的研究

结合北京地铁盾构试验段工程沿线的工程地质和水文地质条件,通过研究现有的盾构施工开挖面土压力计算理论、开挖面稳定措施和地层处理技术,选用适当的理论,自编 Excel 程序对开挖面土压力进行计算,确定北京地区盾构施工开挖面稳定措施和地层处理方案,并结合北京地铁盾构试验段工程,将计算出的开挖面土压力值和制定的开挖面稳定措施及地层处理方案用于生产实践。结合地表沉降监测结果,修正理论计算值,改进开挖面稳定措施和地层处理方案。施工过程中,不同地层采取不同的土压力目标值来控制土仓内土压力。开挖面的稳定措施除严格控制土压力和出土量以外,还采取向土仓和开挖面注入泡沫、膨润土浆液等地层处理剂的手段。通过研究和总结,取得保持盾构机前方开挖面稳定和地层处理的施工经验,并得出一整套盾构施工土仓土压力控制和维持开挖面稳定的方法。

#### (3)管片拼装技术的研究

密切结合北京地铁5号线盾构试验段工程,研究确定盾构施工过程中结合盾构机和管片的姿态、管片楔形量、不同管片拼装形式下管片的纠偏量来选择管片的类型、确定楔形块拼装位置的方法,准确地对管片类型和拼装形式进行预测。同时在拼装过程中总结保证管片拼装质量的方法和管片拼装施工的技术要领,使成形隧道管片的错台小于 $5\text{ mm}$ ,拼缝小于 $4\text{ mm}$ ,确保成形隧道的质量。

#### (4)地表沉降控制技术的研究

通过分析盾构法隧道施工引起地表沉降的原因、影响因素,以及盾构法施工地表沉降的过程和每一阶段地表沉降形成的原因,总结、分析盾构法施工在北京地区不同地层引起的沉降槽的形状、沉降槽特点、形成的原因和施工过程中施工参数与地表沉降的关系。针对北京地质情况及所使用盾构机的特点,依据分析结果研究出一系列地表沉降的控制措施,并在归纳、总结地表沉降规律的基础上提出对北京地区盾构法隧道施工引起地表沉降的预测公式及相关参数,并将研究成果成功应用于实际施工中的沉降预测和沉降控制,保证了隧道沿线地表沉降量



控制在 $+5\sim-17$  mm之内。

#### (5) 壁后注浆技术的研究

结合北京地铁盾构试验段工程的实际情况,通过研究发明采用生石灰和粉煤灰作为主料的惰性浆液作为盾构隧道壁后注浆的浆液(国家发明专利,专利号 CN02158588.1),通过试验确定浆液的配合比,并选用合理的生产设备,配置出满足使用要求的浆液用于施工。在施工过程中研究确定合理的注浆压力、注浆量等壁后注浆工艺参数,总结出北京地区盾构施工过程中的壁后注浆工艺,取得盾构隧道壁后注浆的施工经验,并得出一整套盾构隧道壁后注浆的质量控制措施。研究确定的浆液不仅减少堵管的发生,提高工效,降低成本,具有良好的经济效益,而且由于壁后注浆工艺和参数控制良好,壁后注浆起到良好的填充空隙、控制沉降和防水的作用,保证施工的安全顺利进行,具有很好的社会效益。

#### (6) 盾构施工监测技术的研究

结合北京地铁盾构试验段工程的实际情况,研究选定盾构隧道施工的监测项目,主要监测项目有:地面沉降监测、地中位移监测、地面建筑物监测、隧道收敛监测、拱顶下沉监测、衬砌钢筋应力量测、螺栓应力量测、衬砌与地层的作用力量测,并确定合理的测点布设方法、监测方法和监测仪器,通过对采集到的监测数据进行系统的分析研究,得出不同地层的地中位移、地表沉降、孔隙水压力、地下水位等各项监测数据随盾构推进而变化的规律及其影响因素,不仅用于指导施工,且为设计进行优化提供依据。

#### (7) 盾构施工测量技术的研究

针对北京地铁5号线盾构施工现场场地狭小,而且仅在雍和宫站和张自忠站设盾构井,中间北新桥站不设施工竖井的情况,研究制定采用GPS平面控制网与二等加密水准线路进行地面控制测量和采用全站电子经纬仪、1/20万垂准仪和陀螺经纬仪联合作业,双投点双定向进行竖井联系测量的新方法。摆脱传统的测量方法的束缚,克服受城市地铁施工场地狭窄制约,测量图形强度不易提高、占用竖井时间过长等缺点,提高测量精度,缩短测量时间,为地铁施工提供了快速、准确的测量保障。同时,在盾构隧道内施工测量控制网布设形式、控制点埋设位置、控制点样式及埋设形式等方面,密切结合盾构施工的特点,研究和分析盾构机本身自动导向系统的使用功能、工作原理及应用,研究出一套对盾构机自动导向系统的准确性进行复核测量,对盾构机和管片进行实时姿态测量的方法以及盾构施工测量信息数据处理及反馈技术。

### 4. 社会经济效益

北京地铁5号线北新桥站—雍和宫站区间盾构试验段工程设计与施工技术研究和工程应用取得成功,积累了相关工程经验,为盾构法施工的进一步推广应用打下良好的基础。大大减少地铁施工对地铁沿线的拆迁,对环境、地面交通的影响;减少施工扰民程度;同时能更快捷、安全地进行施工,加快北京地铁的建设步伐;缓解地面交通的紧张状况。

(1)采用盾构法施工,避免了施工对城市地面、路面的占用,保证了城市地面交通通畅,避免沿线降水,确保城市的生态环境。同时,采用盾构法施工,避免因地面施工产生的振动、噪声、粉尘等公害,不干扰附近居民及企事业单位的正常生活及工作。

(2)通过研究,形成了一整套适合北京地区工程地质和水文地质条件的盾构隧道的设计、管片生产和施工技术,使盾构法在北京地区地铁建设中的首次应用获得成功,圆满地完成盾构试验段工程的施工任务,施工中取得日最高进尺15.6 m,拼装管片13环的好成绩,建成的隧

道质量优良,成形隧道的轴线偏差基本上控制在规范允许范围之内,地表沉降量控制在+5~ -17 mm 之内,隧道基本无大的错台,无渗漏水,得到业主和国内外专家同行的好评,被时任国际隧道协会副主席 Sebastian Pelisse 誉为“世界隧道的精品”。

(3)由于是在北京首次采用盾构法施工地铁隧道,工程备受市领导、有关部门、国内外同行、新闻媒体和广大市民关注,参观、学习者络绎不绝,工地曾被列为 2002 年“北京市民金秋一日游”的参观景点之一,为在北京地区推广盾构法起到良好的宣传作用。

(4)盾构隧道沿线途径雍和宫等重点文物保护建筑,并穿越大片明清时期的老旧危房,由于设计、施工科学合理,确保了地面建筑物的安全。

### 5. 经济效益

北京地区地下铁道工程以往采用的施工方法基本为明挖法和矿山法两大类,此两类工法已经得到了广泛的应用,并体现出其实用性和经济性。但随着城市的发展以及城市地下工程的逐步增多和向城市中新区的扩张,这两种方法已日益暴露出其局限性,盾构法与这两种方法相比,技术经济效益较好。

(1)结合地铁 5 号线盾构试验段工程的大量现场测试和室内模型试验,通过研究提出适合北京地区地层特点的盾构隧道设计计算分析方法和参数,对现有的设计分析方法和参数进行修正,使盾构隧道管片配筋有了大幅度的减少。优化后的管片配筋情况见表 1-1。

表 1-1 优化前后管片钢筋含量及节省费用

项 目	原配筋 (主筋 $\phi 22$ mm)	优化配筋 1 (主筋 $\phi 18$ mm)	优化配筋 2 (主筋 $\phi 16$ mm)
主筋+构造筋含量(kg/m <sup>3</sup> )	188.70	143.95	124.89
主筋配筋含量(kg/m <sup>3</sup> )	135.45	90.70	71.64
优化后主筋减少量(kg/m <sup>3</sup> )	—	44.75	63.81
每环管片混凝土量(m <sup>3</sup> )	6.443	6.443	6.443
每环管片钢筋减少总量(kg)	—	288.32	411.13
每环管片节省费用(元)	—	865.0	1 233.4
每公里节省费用(万元)	—	72.08	102.78

地铁 5 号线全线盾构隧道总长度为 11.202 km,扣除已经施工的试验段和延伸段后,要建设的盾构隧道长度为 9.863 km,采用优化后的管片,仅钢筋优化一项,总计节约费用 710.9 万元。优化后的盾构隧道由于造价较低,对在北京地区推广该工法十分有利。

(2)由于采用自动蒸养系统,灵敏的蒸养温度控制,大大节约了蒸汽用量。与传统工艺相比,每立方米混凝土可节约蒸汽 26%,降低 26 元。生产 1 000 环管片共计节约成本 16.9 万元。

(3)采用胶凝材料总量为 380 kg(矿渣 40%)混凝土配比,与普通构件 C50 混凝土(胶凝材料总量 480 kg,粉煤灰掺量 20%)相比,每立方米可节约水泥近 156 kg,粉煤灰节约 115 kg,分别降低成本 50 元和 9.2 元,矿渣增加 41 元,总节约成本 21 元。生产 1 000 环管片共计节约成本 13.65 万元。

(4)在盾构始发阶段,通过对比分析多种始发方式,合理选用在当时的场地条件下较为适合的盾构主机与后配套完全分离的方式进行始发,节约资金 7.5 万元。



(5)在盾构掘进过程中通过对比分析,选用生石灰、粉煤灰和砂为主要组成材料的单液惰性浆液进行壁后注浆。该种浆液不仅在地铁5号线盾构试验段中得到应用,在试验段南延工程中也在继续使用。已掘进拼装的1000环,较选用水泥和砂节约成本约14.5万元;将钠土改用钙土加添加剂,较单纯使用钠土节约成本约2.6万元。此外,采用惰性浆液同步注浆,浆液流动性较好,浆液凝结时间较长,有效地防止堵管现象的发生。采用水泥浆液,堵管时管路清洗十分困难,所需时间很长。因此,减少堵管现象,缩短清洗时间,具有潜在的经济效益。采用惰性浆液同步注浆每天可节约清洗时间2h,相当于从掘进到拼装完1环管片所需的时间,即每天可以多完成1环的工程量,按每延米3.8万元计,相当于多创产值 $3.8 \times 1.2 = 4.56$ 万元,则每月多创产值约136.8万元。

(6)选用国产泡沫发生剂进行土体改良,有效控制地表沉降,保证开挖面的稳定,提高效率,节约成本。

(7)盾构法与矿山法比较,造价相当,但具有施工安全、速度快、质量好、土体变形易控制等优点。