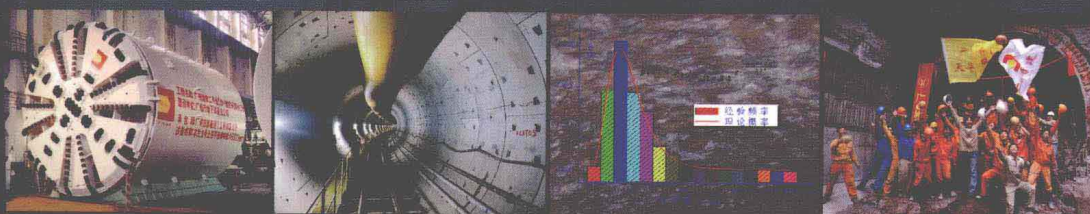


盾构隧道

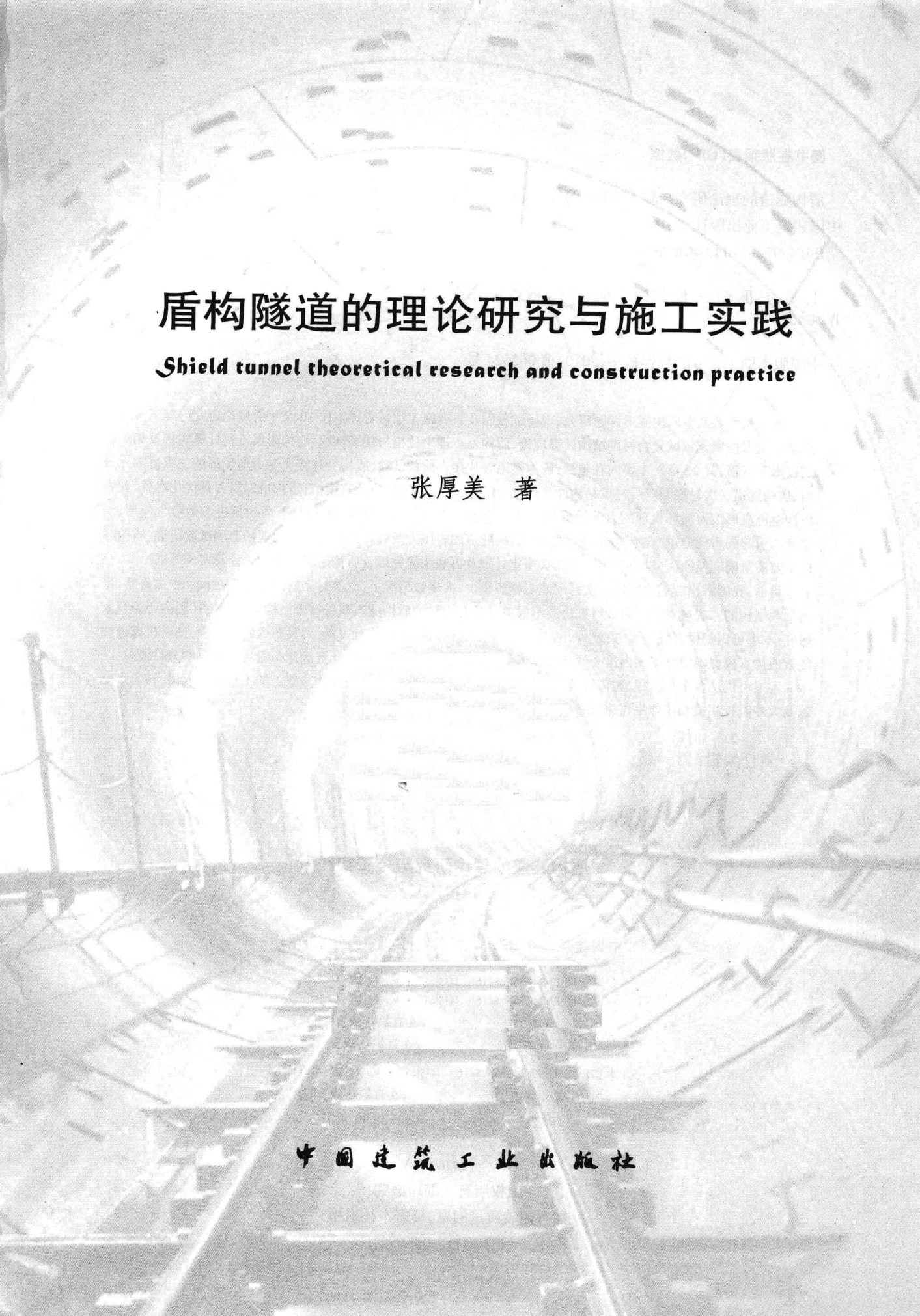
的

理论研究与施工实践



○ 张厚美 著

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS



盾构隧道的理论研究与施工实践

Shield tunnel theoretical research and construction practice

张厚美 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

盾构隧道的理论与施工实践 / 张厚美著 —北京:
中国建筑工业出版社, 2010
ISBN 978-7-112-12005-5

I. 盾… II. 张… III. 隧道工程—盾构(隧道)—研究
IV. U455.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 062524 号

本书是作者从事盾构隧道课题研究、现场试验以及盾构施工项目管理 10 余年的理论与施工实践的总结。全书按研究领域分为衬砌结构计算理论、盾构施工理论分析与现场试验、盾构附属工程计算实例及相关应用技术等三篇,共 26 章。主要内容包括:盾构隧道管片接头荷载试验、盾构管片接头受力与变形的三维有限元分析、盾构隧道一次衬砌和双层衬砌结构计算理论、掘进机掘进性能数值仿真模拟、盾构机刀盘刀具优化布置、硬岩盾构隧道盘形滚刀损坏机理的力学分析与应用、盾构施工引起的地面沉降数学模型、盾构掘进参数数学模型、线路转弯引起的盾构隧道衬砌环扭转力学分析、盾构隧道围岩压力及管片内力与变形的现场监测试验研究、盾构隧道主要质量问题及原因分析、盾构施工废水净化处理及再利用研究以及盾构附属工程相关计算实例等。

目前,我国盾构隧道中采用二次衬砌的工程还很少,大多数情况下,二次衬砌的内力计算在设计中被省略,作为承载结构的二次衬砌的受力计算方法还不成熟。具有内衬的盾构隧道双层衬砌结构计算理论在国内还少有人研究,本书可以提供有益的参考;此外,国内盾构机绝大部分依靠进口,对刀盘、刀具布置研究很少,掘进机掘进性能数值仿真模拟则填补了国内这个领域的技术空白,对盾构机刀盘刀具设计及优化布置具有重要参考价值。

本书可供从事土木工程、城市轨道交通、隧道工程、盾构机制造等领域设计与施工的工程技术人员、科研人员以及大专院校相关专业师生作为技术参考资料。

* * *

责任编辑:常 燕

盾构隧道的理论与施工实践

张厚美 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

广州友间文化有限公司制版

北京京丰印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:20% 字数:496 千字

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月第一次印刷

印数:1—2600 册 定价:38.00 元

ISBN 978-7-112-12005-5

(19260)

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)

序 一

张厚美作者,是从事地铁盾构隧道施工技术项目管理工作和研究的教授级高工。十多年来参加过广州地铁二号线、三号线、五号线、二八号线延长线等许多盾构施工项目的建设,并进行工程的研究和创新。尤其可喜的写出了这本以工程为依托,从实践上升到理论真谛总结的书,是很有价值的。

一个工程,就是一个1:1的科学实验,这种实验是可信的,远远优于小比例的模拟试验,因每项工程都可总结出“对”与“错”,该修改的、有创新的、产生新理念的许多可贵的知识火花。及时把这些总结出来是我们的责任,是对工程科学的贡献,作者这种精神是可敬的,是值得学习的。

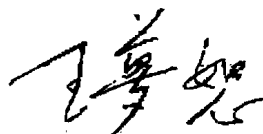
我愿意为这样的书写“序”,其意义、水平远大于在计算上拼凑的文章和快速出的书。

作者集博士、博士后期间的研究内容和水平,结合在第一生产线,不怕辛苦、滚爬在工地上去解决一个个难题,研发出一系列成果,这种学习是为了应用,应用是为了干好工程,这才是一个工程科技人员生长之路,我很欣赏这样的模式,希望广大读者都能像作者那样勤学、勤用、勤思考、勤总结、多创新的工作和生活。

全书内容丰富、图文并茂、论述流畅,尤其广州一批有志之士对广州这个地质相当复杂的地铁工程,应用盾构和浅埋暗挖法配合,解决了属于世界性的一系列技术难题,他们在困难折磨,施工艰辛的过程中,享受到了探索难题过程的兴趣和自豪。一本书不追求系统性、要追求一个个技术难题的提出背景和解决思路办法;不追求理论的深奥,而追求从工程实践中找出规律、找出简单的理论去解决复杂的问题;一本书的印出要给人启示,给人应用而不是束之高阁。

作者这本书,在装配整体式双层衬砌荷载试验方面;在盾构刀盘及刀具优化配置、刀具磨损检测方面;在盾构机姿态参数测量、计算方法和应用方面;在盾构施工废水净化处理应用方面等都有很大创新,并具有国际先进水平的工程范例。

希望广大青年的科技作者,多读书,但一定要读好书,读有利于启示思考方法的好书。“盾构隧道的理论研究与施工实践”是一本好书。可供从事隧道及地下工程、轨道交通、盾构制造等领域的设计、施工、管理人员、科技人员及大专院校师生的技术参考和应用指南。



2010年元月
(中国工程院院士)

序 二

欣闻广州市盾建地下工程有限公司总工程师张厚美博士《盾构隧道的理论与实践与施工实践》一书已编著完成并将付梓,作为广州地铁建设的管理者和盾构隧道工法的推广者,今有幸拜读并为其作序,首先致以诚挚的祝贺!

盾构工法发明至今已有 150 多年历史,第二次世界大战之后,城镇化的步伐加快,城市越来越庞大,地面资源越来越紧缺,交通成为制约城市进一步发展的重要因素。发达国家诸如欧洲、美国、日本等开始大规模开发地下空间、发展轨道交通,随后开挖隧道的机械掘进工法也得到长足的发展,从早期的手掘式盾构机、挤压式盾构机、气压式盾构机演变到现代的基本全自动的泥水或土压盾构机。中国上海 60 年代初,开创在软土地层应用简易的挤压式盾构机的历史,完成了第一条隧道。到 20 世纪 90 年代,随着改革开放深入,技术引进、吸取和消化,上海和广州率先于全国其他城市,开始有规模地应用现代的盾构机,但总数也仅有 10 余台。随着广州地铁一号线盾构施工技术在复合地层的成功应用,及广州地铁大胆创新和有力推动,盾构工法突破了只应用于软土地层的传统观念,全国各地迅速推广,盾构机台数超过 300 台。德国、日本、美国、加拿大等著名的盾构厂家纷纷落户中国,短短 10 年,中国一跃成为全世界最大的盾构机产业基地和应用盾构开挖隧道最多的国家。

随着盾构工法广泛应用于城市轨道交通、公路、铁路、水利、电力等各个地下空间开发领域,针对不同地质条件的盾构选型和参数控制等技术得到迅速发展,达到世界先进水平。但是,盾构隧道双层衬砌的结构计算理论研究、盾构机掘进性能的数值仿真研究、盾构机掘进参数优化研究等重要专题少有人涉及,以致这些领域发展滞后,最终也将影响盾构应用领域的拓宽及其盾构工法的纵深发展!

令人称佩和高兴的是张厚美博士,他不仅具有隧道结构理论造诣,更难能可贵的是,其 10 年来一直默默无闻地在盾构隧道施工一线工作,并且放弃大量休息时间,总结研究提升。如盾构隧道双层衬砌相互作用模型和力学计算模型,又如盾构机掘进性能的数值仿真研究、硬岩中盾构机的刀具磨损检测方法,盾构隧道衬砌环扭转机理,地面沉降数学模型等方面等,在前人研究的基础上,提出新的思路和方法,有了重要进步。

本书是作者理论联系实践的结晶,又是从实践中提升的产物。书中数据翔实、依据充分、可读性强,无论是对于工程设计人员、施工技术人员,还是对盾构机设计制造人员,都具有很强的借鉴与指导意义。

21 世纪是地下空间开发和地下工程技术的世纪。近年来,盾构工程技术在我国得到了突飞猛进的发展,这无疑给工程技术人员提供了更广的平台和机遇。希望张博士等技术人员继续理论联系实践,又从实践中创新理论,百尺竿头、更进一步,为中国的盾构事业作出更大的贡献!

张维彬

教授级高级工程师
广州地铁建设事业总部总经理
广州市地下铁道总公司副经理
二〇〇九年十二月三十日

前 言

“世界各国城市建筑历史表明,继 19 世纪的城市桥梁和 20 世纪的摩天大楼之后,21 世纪将是地下空间开发利用的新纪元。”这个于 20 世纪末提出的、富有预见性的论断,已被我国刚跨入新世纪最近 10 年热火朝天的地铁建设高潮所印证,也成为推动越来越多的专业人士积极研究、探讨地下工程技术尤其是盾构隧道技术的重要动力。

隧道是地下工程的重要组成部分。由于盾构施工法的安全性和先进性,盾构技术在我国城市地铁、公路、铁路、电力、通信以及市政污水隧道施工中都得到了越来越广泛的应用。盾构机也已由原先很多业内人士都感到陌生的“高技术”,成为当下大城市街头小巷妇孺皆知的“地老鼠”。

尽管近 10 多年来盾构施工技术在我国得到了迅速发展,但由于我国的盾构施工法起步较晚,各地工程地质条件差异又很大,在盾构工程设计计算理论和施工技术方面还存在许多需要研究解决的问题。

广州是国内地铁发展最快的城市之一,也是盾构技术应用最活跃、发展最快的城市之一。广州地区地质条件复杂,素有“地质博物馆”之称,三大岩类齐全(即沉积岩、岩浆岩、变质岩),存在富水砂层、软弱淤泥层、土洞、溶洞、高抗压强度硬岩、球状风化体、断层破碎带、煤层等复杂地质问题。盾构施工技术在复合地层中的应用遇到了严峻的挑战。广州盾构施工过程所遇到的各种各样问题在世界范围都具有一定代表性,同时也不失其特殊性。

地下工程这种地质条件复杂多变以及“看不见、摸不着”的特点,注定了盾构工程的复杂性和艰巨性,也让这个专业领域充满了活跃的学术、技术交流探讨氛围。使从事这个领域的工程技术人员在倍受各种困难折磨、深感解决问题过程艰辛的同时,也领略了从事这个专业的挑战和享受了探究难题过程的乐趣。正是这种乐趣吸引了许多人十几年如一日、不知疲倦地去探索、解决难题。广州市地下铁道总公司副总经理竺维彬先生和广州轨道交通建设监理有限公司顾问鞠世健先生正是这样两位值得我们学习、尊敬的先行者和探索者,他们在复合地层盾构施工技术领域作出了开创性的贡献。

本书是作者从事盾构隧道课题研究、现场试验以及盾构施工项目管理工作 10 余年的理论研究与施工实践的总结。成书过程力图追求两个原则:一是兼顾各篇内容的尽可能系统性和各章内容的相对独立性;二是兼顾研究内容的理论性和实用性。



全书按研究对象和应用领域分为三篇,主要内容如下:

第一篇为盾构隧道管片接头荷载试验与结构计算理论,介绍南水北调中线穿黄盾构隧洞管片接头荷载试验方法及试验结果,提出了管片接头刚度的计算模型、一次衬砌管片环受力计算的梁-非线性弹簧模型以及含有内衬的水工盾构压力隧洞双层衬砌的受力计算模型。第二篇主要为理论分析、数值仿真和现场试验,重点介绍了隧道掘进机掘进性能的数值仿真技术及其在刀具优化布置、刀具磨损检测以及硬岩盾构隧道盘形滚刀损坏机理的力学分析等方面的应用。理论分析主要介绍线路转弯引起的衬砌环扭转的力学机理分析,盾构施工引起的沉降槽的数学模型,盾构掘进参数数学模型等理论分析结果;现场试验研究主要包括盾构隧道围岩压力以及隧道管片内力与变形的现场监测和结果;第三篇介绍盾构相关附属工程设计计算、评估分析等实例;盾构机姿态参数的测量、计算方法及其应用技术以及盾构施工废水净化处理及再利用技术研究。

本书的主要特色如下:

第一,我国盾构隧道中采用二次衬砌的工程还很少,大多数情况下,二次衬砌的内力计算在设计中被省略,作为承载结构的二次衬砌的受力计算方法还不成熟。具有内衬的水工盾构压力隧洞双层衬砌结构的计算理论目前国内还少有人研究,本书可以提供有益的参考。

第二,目前我国盾构机绝大部分依赖进口,对盾构机刀盘、刀具布置研究还很少,掘进机掘进性能数值仿真模拟和刀具磨损检测方法则填补了国内这个领域的技术空白,为盾构机刀盘刀具设计和刀具优化布置提供了设计依据,对硬岩或复合地层中刀具磨损的检测也具有较高的参考价值。

第三,在盾构施工过程中采用污水处理及循环利用技术,在国内尚属首次应用,填补了国内盾构施工污水处理及回用技术的空白。研究成果对今后我国盾构施工乃至建筑业施工中推广污水处理与回用技术、加强环境保护、实行绿色施工等都具有较好的推广应用价值。

地下工程是一门实践性和经验性很强的技术。当今工程界对理论计算多倾向于持保留态度,而更加侧重于经验论。事实上,大量工程现象或施工数据中蕴含着很多内在规律性,有时通过简单的数学统计模型即可揭示出其规律,例如,本书的地面沉降数学模型、盾构掘进参数数学模型等都与现场实测数据高度吻合(见图 15-1、图 15-3 以及图 17-5)。力学分析方面,也存在着理论曲线与实际值或实验值的高度一致性,例如,管片接头荷载试验中实测的应变分布曲线与三维有限元分析结果基本一致(图 7-6);隧道围岩土压力实测值与计算值分布规律基本一致(图 18-10)。数值仿真模拟也很好反映了实际规律,例如,TB880E 掘

进机边缘滚刀实际磨损形状与模拟的切削槽形状基本一致(图 9-11、图 9-12), 滚刀实际磨损量分布曲线与滚刀计算破岩体积分布曲线高度相似(图 9-14)。这种自然的规律性有时都令人难以置信, 甚至都给人以有人为编造数据的“嫌疑”, 似乎是有一双无形的手把这些数据点一一移动到理论曲线周围! 可以说盾构施工中的大量工程实例和海量数据像一座座宝藏, 有待于我们去探索、开发, 以便更好地为今后的应用起到有益的指导作用。正是这种认识, 鼓舞着作者将自己的一些粗浅的研究成果加以整理、出版, 以便与感兴趣的同行们一起交流、探讨, 以期起到抛砖引玉之用。

本书可供从事城市轨道交通、隧道工程、盾构机制造等领域设计与施工的工程技术人员以及大专院校相关专业师生作技术参考资料, 也可从事盾构工程研究工作的科研人员的交流、探讨提供借鉴。

在本书整理过程作者虽然力求使本书内容尽可能系统化, 但也保持各章内容的相对独立性, 这可能使得本书的某些篇章内容看起来有点松散, 同时由于作者个人能力和认知水平的局限, 书中一定还存在许多不足和错误之处, 在此恳请各位读者、同行予以批评指正!

张厚美

二〇〇九年十二月一日

目 录

第一篇 盾构隧道管片接头荷载试验与结构计算理论

绪 论	1
第 1 章 圆形隧道衬砌结构计算理论概述	4
1.1 衬砌结构计算理论的发展历史	4
1.2 衬砌结构设计模型的分类	5
1.3 衬砌结构计算模型的评析	6
1.4 衬砌结构设计现状及研究方向	8
1.5 本章小结	10
第 2 章 盾构隧道管片接头荷载试验研究	13
2.1 接头荷载试验概况	13
2.2 试验设备与方法	14
2.3 管片接头试验成果分析	20
2.4 接头抗弯刚度的经验公式	29
2.5 本章小结	35
第 3 章 盾构隧道管片接头试验的数值模拟	37
3.1 衬垫材料的压缩回弹试验	37
3.2 接头力学模型的建立	39
3.3 接头力学模型的验证	42
3.4 接头力学特性的模拟	45
3.5 本章小结	46
第 4 章 盾构隧道一次衬砌力学计算模型	48
4.1 常用计算方法概述	48
4.2 梁 - 非线性弹簧模型的建立与验证	49
4.3 穿黄隧洞一次衬砌受力计算	53
4.4 若干参数对衬砌内力的影响	57
4.5 本章小结	59
第 5 章 双层衬砌接头荷载试验及相互作用模型	61
5.1 双层衬砌接头荷载试验设计	61
5.2 双层衬砌接头试验结果分析	65
5.3 内外衬砌截面内力分配计算	68
5.4 接合面相互作用模型的提出及验证	73
5.5 不同模型对计算结果的影响	76
5.6 本章小结	78
第 6 章 盾构隧道双层衬砌力学计算模型	80
6.1 双层衬砌设计技术现状	80



6.2	双层衬砌力学模型的建立	82
6.3	穿黄隧洞双层衬砌联合受力计算	84
6.4	不同模型的计算结果对比	88
6.5	考虑内外衬顶拱初始缝隙的内力计算	92
6.6	本章小结	95
第7章	盾构隧道管片接头三维有限元分析	98
7.1	概述	98
7.2	有限元分析软件的选取及简介	99
7.3	有限元分析模型的建立	100
7.4	计算结果分析	107
7.5	本章小结	117
第8章	研究成果总结及展望	119
8.1	主要研究成果	119
8.2	主要研究结论	120
8.3	发展趋势及有待研究的内容	122

第二篇 盾构施工的理论分析、数值仿真及试验研究

第9章	硬岩掘进机(TBM)的掘进性能数值仿真	124
9.1	常用预测模型简介	125
9.2	切削力模型	125
9.3	掘进参数计算	127
9.4	计算实例——秦岭隧道 TB880E 隧道掘进机	128
9.5	关于 TB880E 滚刀布置优化的讨论	133
9.6	本章小结	134
第10章	混合式盾构机的掘进性能数值仿真	136
10.1	混合式盾构机的特点及应用情况	136
10.2	切削力计算模型	137
10.3	仿真计算实例	139
10.4	本章小结	145
第11章	盾构机刀盘刀具优化布置探讨	147
11.1	盾构机及使用概况	147
11.2	1638 号盾构机刀具布置存在的问题	150
11.3	刀具布置调整方案	153
11.4	纯滚刀方案切削参数计算结果	157
11.5	混合刀具方案切削参数计算结果	159
11.6	本章小结	161
第12章	硬岩中盾构机刀具磨损的检测方法	163
12.1	刀具失效的判断方法	163

12.2	运用掘进参数检测滚刀失效的原理	164
12.3	滚刀磨损或失效的判断方法	168
12.4	应用实例	169
12.5	本章小结	172
第 13 章	硬岩盾构隧道滚刀损坏机理的力学分析与应用	173
13.1	引言	173
13.2	滚刀损坏的主要形式及原因	174
13.3	滚刀损坏机理的力学分析	176
13.4	滚刀不转或过载的临界贯入度计算	179
13.5	计算结果分析及应用示例	180
13.6	本章小结	186
第 14 章	线路转弯引起的盾构隧道衬砌环扭转机理分析	188
14.1	概述	188
14.2	施工条件及衬砌环扭转概况	188
14.3	弯道段衬砌环扭转机理分析	190
14.4	计算结果及分析	193
14.5	本章小结	196
第 15 章	盾构隧道施工引起的地面沉降数学模型研究	197
15.1	工程背景	197
15.2	沉降观测方法	198
15.3	沉降槽分布模型	198
15.4	沉降随时间的发展模型	203
15.5	沉降量概率分布的统计分析	204
15.6	本章小结	207
第 16 章	硬岩盾构隧道主要质量问题及原因分析	208
16.1	概述	208
16.2	硬岩盾构隧道常见质量问题	208
16.3	质量问题的原因分析	209
16.4	减少隧道质量问题的主要措施	213
16.5	本章小结	215
第 17 章	土压平衡式盾构掘进试验及数学模型研究	216
17.1	工程概况	216
17.2	盾构掘进试验	217
17.3	盾构掘进速度数学模型推导	220
17.4	刀盘扭矩数学模型推导	223
17.5	掘进参数对掘进速度和扭矩的影响分析	225
17.6	本章小结	226
第 18 章	盾构隧道围岩压力的现场监测试验研究	228
18.1	研究背景	228



18.2	监测断面的地质条件·····	228
18.3	监测元件及布置·····	229
18.4	监测结果及分析·····	232
18.5	围岩压力监测值与理论值的对比·····	234
18.6	本章小结·····	236
第19章	管片内力与变形的现场监测试验研究·····	238
19.1	概述·····	238
19.2	管片衬砌结构·····	238
19.3	监测断面的布置·····	240
19.4	测量元件及埋设·····	242
19.5	试验监测结果·····	243
19.6	监测结果的计算分析·····	248
19.7	本章小结·····	251

第三篇 盾构隧道附属工程及相关应用技术研究

第20章	盾构施工对建筑物基础沉降影响的评估·····	253
20.1	工程概况·····	253
20.2	地表沉降常用计算方法评析·····	254
20.3	地表沉降影响范围计算·····	258
20.4	本章小结·····	261
第21章	地铁车站顶部龙门吊轨道基础设计计算·····	263
21.1	工程概况·····	263
21.2	车站顶板上部龙门吊轨道基础设计计算·····	264
21.3	车站结构外侧龙门吊桩基轨道梁设计计算·····	266
21.4	本章小结·····	268
第22章	大跨度地铁车站顶板临时支撑设计与安装·····	269
22.1	工程概况·····	269
22.2	加固方法·····	270
22.3	设计计算·····	270
22.4	钢管支撑的制作、安装·····	272
22.5	本章小结·····	272
第23章	地下连续墙泥浆槽壁稳定的分析·····	273
23.1	破坏体模型及其受力分析·····	273
23.2	破坏体尺寸及安全系数的计算·····	276
23.3	不同方法计算结果的对比·····	277
23.4	各种因素对槽壁稳定的影响·····	278
23.5	本章小结·····	279
第24章	盾构机姿态参数的测量及计算方法研究·····	280
24.1	概述·····	280

24.2	盾构姿态参数的描述·····	280
24.3	盾构姿态的常用测量方法·····	281
24.4	盾构姿态的测量及计算方法·····	282
24.5	测量精度评价·····	286
24.6	应用实例·····	288
24.7	本章小结·····	289
第 25 章	盾构施工污水净化处理及再利用研究 ·····	290
25.1	研究背景·····	290
25.2	研究内容及技术指标·····	291
25.3	污水处理试验及处理工艺选择·····	291
25.4	施工污水处理流程设计·····	293
25.5	实施情况及主要技术创新·····	296
25.6	效益分析及应用前景分析·····	297
25.7	项目推广应用可行性研究·····	298
25.8	本章小结·····	300
第 26 章	盾构技术在广州地铁的应用与发展 ·····	301
26.1	盾构的起源及发展·····	301
26.2	广州地铁的规划及发展回顾·····	302
26.3	广州地铁盾构技术的特点与发展·····	303
26.4	本章小结·····	308
后记	·····	310

第一篇 盾构隧道管片接头荷载试验 与结构计算理论

本篇内容提要:穿黄隧洞是南水北调中线总干渠上穿越黄河的水工输水隧洞,隧洞使用双层衬砌结构。由于内衬要承受内水压力作用,如何评价双层衬砌相互作用是设计的关键问题。

本篇从介绍衬砌接头荷载试验入手,通过对大量试验数据的整理、分析,对接头的受力机理和接缝受力与变形规律有了较深刻的认识。在此基础上,抽象出接头的力学模型,对接头的荷载试验进行数值模拟,建立了接头抗弯刚度的理论评价方法和双层衬砌接头的相互作用模型,并用试验数据对模型的正确性和准确度进行对比验证;将管片接头试验和双层衬砌接头试验中建立的接头力学模型推广应用到整环衬砌受力计算中,从而得到了圆形装配式一次衬砌的计算模型和装配整体式双层衬砌的受力计算模型。

我国盾构隧道中采用二次衬砌的工程还很少,大多数情况下,二次衬砌的内力计算在设计中被省略,作为承载结构的二次衬砌的受力计算方法还不成熟。具有内衬的水工盾构压力隧洞双层衬砌结构的计算理论目前国内还少有人研究,本书可以提供有益的参考。

绪 论

0.1 研究背景

为了解决我国北方缺水的问题,长江水利委员会(原长江流域规划办公室)就如何从长江流域向黄淮海流域跨流域调水的问题作了长期的研究^{[1]~[3]}。1959年长委会完成的《长江流域综合利用规划要点报告》中提出了分别从长江上中下游引水以解决黄淮海流域的缺水问题,亦称南水北调西线、中线、东线调水工程。

南水北调中线工程即从长江中游引水,供水主要目标为华北京、津、冀地区,同时考虑鄂、豫两省汉江唐白河流域和淮河流域需水要求的战略性工程。近期从长江中游最大支流汉江丹江口水库引水,年平均调水量 147 亿 m^3 ,简称“引汉”;远期视发展需要再从长江干流引水,简称“引江”。

“引汉”总干渠始于湖北丹江口水库,经南阳盆地,黄淮平原及黄海平原西部至北京,全线长达 1240 余公里,沿线计有各类建筑物 800 余座。其中穿黄工程是总干渠跨越黄河干流的交叉建筑物,是总干渠上规模最大、技术最复杂的关键工程。

穿黄总干渠在河南郑州以西穿越黄河干流,线路选定在祁山头以西至记河口以东约 30km 的范围内。在此范围内曾研究过祁山头、桃花峪、牛口峪和孤柏嘴四条线路,通过各方面的综合考虑,确定在孤柏嘴布置穿黄工程。

长委会于 1991 年对穿黄工程进行了初步可行性研究,1992 年进行可行性研究,1993 年

提出了可行性研究补充报告^[4],开展了大量试验研究和优化设计工作^{[5]、[6]}。

穿黄工程虽经许多专家多年的研究论证,在线路地质调查、穿黄建筑物形式选择、线路多方案对比等方面都开展了深入研究^{[7]、[8]},取得了大量成果,完成了初步设计工作。但在许多具体设计技术方面还需要进行研究和优化。

(1) 国内外水工隧洞多在山地,以新奥法施工居多,在《水工隧洞设计规范》中没有关于盾构装配式衬砌的设计规定;盾构法多用于城市软土地区的地铁隧道、公路隧道、市政隧道等工程的施工,隧道内部无水压力作用。隧道多设计成单层结构,有一些在内部施作二次衬砌,但主要是用于防水以及内部装饰,多不接受力结构设计。而穿黄隧洞为水工隧洞,除了降低糙率,防渗漏外,还应承担内水压力作用。对于这种受有内水压力作用的双层衬砌结构的设计,国内外目前虽有一些计算方法,但还很不完善,没有形成统一的规范。

(2) 对于盾构式隧道的结构设计,在《地下铁道设计规范》中是按照弹性均质圆环法或弹性铰圆环法计算。均质圆环法不考虑实际管片接头的存在,所求得的内力偏于安全。大量的工程实测结果也表明实际内力远比按均质圆环法计算的结果小。弹性铰圆环法考虑了衬砌接头降低了衬砌整环的刚度,将接头当作弹性铰进行计算可大大减小衬砌断面的弯矩,给工程带来较大的经济效益,但弹性铰法假定接头的变形与内力成线性关系,实际的接头性能则明显地具有非线性性质。

(3) 装配式衬砌的重要特点是具有接头,接头的性质影响着结构的整体受力情况。一般大型工程都要进行接头的荷载试验,以确定接头的刚度系数和承载能力,为设计提供依据。目前对于装配式管片接头的荷载试验国内外已进行了很多研究,但对具有内衬的双层衬砌接头,国内还未进行过研究。

基于上述情况,长江水利委员会与同济大学、上海隧道公司等单位开展了“穿黄隧洞管片接头荷载试验”合作研究。作者参与了此项试验研究工作,并在此基础上完成了题为“装配整体式双层衬砌接头荷载试验与结构计算理论——南水北调中线穿黄隧洞结构计算模型研究”的博士学位论文。

0.2 主要研究内容

穿黄隧洞管片接头荷载试验的主要研究内容如下:

- (1) 接缝受力与变形规律研究;
- (2) 接头抗弯刚度的试验测定;
- (3) 双层衬砌的内力分配研究;
- (4) 接头的承载力及破坏形式研究。

作者在参与完成室内试验的基础上,重点对预制式管片接头的受力机理及双层衬砌的结构计算模型进行研究,主要的研究内容如下:

(1) 对管片接头荷载试验数据进行整理、分析,找出接缝的受力和变形规律,并对穿黄隧洞管片接头的抗弯刚度和承载力进行定量评价;

(2) 对接头的受力机理进行分析,建立接缝的力学模型,研究接缝受力的数值模拟方法,并提出接头刚度的理论评价方法;

(3) 在充分考虑接缝受力与变形非线性关系前提下,提出盾构隧道一次衬砌的力学计

算模型,并对穿黄隧洞一次衬砌结构内力进行计算;

(4) 建立双层衬砌相互作用模型,提出受有内水压力作用的圆形双层衬砌结构的计算方法,并对穿黄隧洞双层衬砌结构内力进行计算;

(5) 对穿黄隧洞管片接头进行三维有限元受力分析。

0.3 研究思路及内容组织

在广泛进行资料调研后,从接头荷载试验入手,通过对大量试验数据的整理、分析,以对接头的受力机理和接缝受力与变形规律有感性认识。在此基础上,抽象出接头的力学模型,建立接头抗弯刚度的理论评价方法和双层衬砌的相互作用模型,并用试验数据对模型的正确性和准确度进行对比验证;将试验中建立的接头力学模型推广应用到整环衬砌受力计算中,得到了圆形装配式一次衬砌计算的梁-非线性弹簧模型和装配整体式双层衬砌的三种受力计算模型,并编制了相应的有限元计算程序,然后应用所编程序对穿黄隧洞一次衬砌结构和双层衬砌结构的受力进行计算。在研究过程注重从试验数据出发,结合试验建立理论模型,然后再尽可能将理论计算结果与试验结果对比。

本篇研究内容按逻辑关系分章组织,前面章节一般是后续章节的基础和准备,各章节内容之间又有一定的相对独立性。全文共分8章,第1章文献综述,回顾了圆形衬砌的各种结构计算理论,提出了衬砌结构计算模型的发展方向;第2章管片接头荷载试验研究,分析了接缝受力与变形的各种试验结果,这一章为后续各章提供了必不可少的试验数据;第3章研究接头荷载试验的数值模拟方法,得到了接头抗弯刚度的计算模型,为一次衬砌的受力计算提供了接头的非线性本构关系;第4章研究了圆形装配式一次衬砌的受力计算方法,得到了穿黄隧洞一次衬砌施工期的内力计算结果,这也是双层衬砌结构内力叠加的一部分;第5章研究双层衬砌接头荷载试验并提出了双层衬砌相互作用的三种模型,为双层衬砌整环受力计算提供了基础;第6章研究双层衬砌整环受力计算方法,得到了穿黄隧洞双层衬砌最终(运行期)的内力计算结果,第5、6两章是本篇的重点研究内容;第7章对管片接头进行三维有限元分析,由于试验应变测点有限,可将计算结果作为试验测量数据的补充。第8章总结了论文的研究工作、结论及有待研究的内容。

本章参考文献:

- [1] 过迟. 南水北调穿黄工程总体布置研究. 人民长江, 1994, 25(1): 12-17.
- [2] 洛叙六. 南水北调中线工程概况. 人民长江, 1993, 24(10): 1-8.
- [3] 王方清. 南水北调引汉总干渠工程布置. 人民长江, 1994, 25(1): 2-5.
- [4] 长江水利委员会. 南水北调中线穿黄工程汇报材料, 1997. 8.
- [5] 过迟, 吕国梁. 穿黄工程盾构隧洞衬砌结构计算模型研究. 岩土力学, 1997, 18(增刊): 203-207.
- [6] 岳中明, 程德虎. 南水北调中线穿黄工程隧洞结构设计. 岩土力学, 1997, 18(增刊): 209-212.
- [7] 过迟, 尹旅超. 从河势影响论穿黄工程方案选择. 人民长江, 28(7).
- [8] 杜忠信. 南水北调中线总干渠工程地质. 人民长江, 25(1): 6-11.