



中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

富水砂卵石地层 盾构施工技术

杨书江 孙 谋 洪开荣◎编著

FuShui ShaLuanShi DiCeng DunGou ShiGong JiShu



人民交通出版社
China Communications Press



中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

富水砂卵石地层 盾构施工技术

杨书江 孙 谋 洪开荣 © 编著

FuShui ShaLuanShi DiCeng DunGou ShiGong JiShu



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以成都地铁隧道工程为依据,系统介绍了富水砂卵石地层盾构施工成套技术。全书共分12章,主要包括富水砂卵石地层的地质特性、两种不同类型盾构机的应用、盾构井端头地层加固、盾构施工控制、盾构同步注浆浆液配制及施工技术、渣土改良技术研究与应用、泥水平衡盾构开挖面稳定技术、泥水系统应用及改进、进舱技术、盾构通过重要建(构)筑物的施工技术、大漂石的处理、监控量测和信息化施工技术。

本书给出的实例均为工程实践总结,数据齐全,资料翔实,条理清晰,对盾构隧道工程的设计、施工和管理都有较高的借鉴价值。

本书可作为城市地铁隧道、越江越海隧道和取排水隧道等盾构法隧道工程施工技术人员和科研人员的参考书,亦可作为高等院校相关专业师生的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

富水砂卵石地层盾构施工技术/杨书江,孙谋,洪开荣编著. —北京:人民交通出版社,2011.4

ISBN 978-7-114-08922-0

I. ①富… II. ①杨…②孙…③洪… III. ①富水—卵石—地层—盾构法 IV. ①U455.43

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第030699号

书 名:富水砂卵石地层盾构施工技术

著 者:杨书江 孙 谋 洪开荣

责任编辑:刘彩云

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:19

字 数:407千

版 次:2011年4月 第1版

印 次:2011年4月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08922-0

定 价:68.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

为了缓解交通拥堵、提升人民生活质量,我国城市轨道交通建设步入了快速发展的时期,目前全国已有 28 个城市获批修建地铁。盾构法因对周边环境影响小、掘进速度快、质量优良、安全环保等优势,在城市地铁隧道建设中正扮演越来越重要的角色。盾构针对不同地层有着不同的适应性,在盾构选型、刀盘刀具设计、掘进参数配置、风险规避等方面有不同的要求,虽然国内盾构法施工技术在很多方面取得了突破性的成就,但在富水砂卵石地层中采用不同类型的盾构施工尚属首次,总结性的专著还属空白。

本书作为国内第一本论述富水砂卵石地层盾构施工技术的专著,紧密结合成都地铁一号线试验段工程施工案例,系统介绍了富水砂卵石地层的地质特性、不同类型盾构的应用、土压及泥水盾构的掘进控制、渣土改良、泥浆配置、泥水系统应用、带压进舱技术、对建筑物的保护、大漂石处理、监控量测和信息化施工技术等内容。本书内容阐述条理清晰、图文并茂、资料翔实,详细介绍了富水砂卵石地层盾构施工的经验与教训。本书实用性强,参考价值大,它的出版将进一步完善和丰富我国复杂地层的盾构施工技术,在该领域具有较大的指导和借鉴作用。

本书三位主编均是在施工一线从事盾构施工多年的技术管理人员,有着丰富的盾构施工管理经验和娴熟的技术能力,先后参与了广州地铁、南京地铁、上海地铁、成都地铁等城市地铁及西康铁路秦岭隧道 TBM、广深港铁路客运专线狮子洋隧道大直径泥水盾构等工程建设,掌握了多种复杂地层的盾构应用技术,尤其在富水砂卵石地层盾构施工技术方面具有独到的见解和成功的经验。编者在繁忙工作之余能够及时总结出版本书,为类似工程施工提供借鉴,这种锲而不舍、孜孜以求的探索精神正是广大工程技术人员的真是写照。

在本书出版之际,欣闻成都地铁一号线一期工程已于 2010 年 9 月 28 日开通运营,地铁二号线一期工程即将全线贯通,感动由衷的高兴。我将本书推荐给大家,希望对我国盾构法施工技术水平的提高起到促进作用。

施仲珩

2011 年 2 月

前 言

21 世纪是地下空间大开发的世纪。我国城市轨道交通建设步入了快速发展的阶段,盾构法因具有对周围环境影响小、施工速度快、工程质量优良、施工安全环保、适应范围广等优势,在城市地铁隧道建设中正扮演越来越重要的角色。我国北京、上海、广州、深圳、天津、南京等十多个城市已经成功采用盾构法技术修建了大量地铁工程。截至 2010 年 10 月,广州地铁通车总里程约 240km;2010 年底,北京地铁通车总里程也已超过 300km;世博会闭幕后,上海将全面实施公交优先战略,到 2015 年,全市地铁总里程将由目前的 400 多公里延伸突破 600km。这些城市地铁隧道绝大部分采用盾构法施工,大大丰富和完善了盾构法施工技术;越来越成熟的盾构技术将在城市地铁等各类地下工程建设中得到广泛的应用和推广。

盾构法施工虽然具有对地层适应性广、施工安全系数高等优点,但因地质情况的千变万化、施工环境的复杂性,在施工中仍存在盾构适应性和施工方法、措施的调整。以广州为代表的上软下硬复合地层,以上海为代表的软土地层,以及以北京为代表的无水砂卵石地层,对盾构法施工的要求和对盾构机的磨损也不尽相同。成都作为近几年开始采用盾构法修建地铁的城市之一,有着与其他城市不同的地质条件。成都地铁穿越的地层主要为富水砂卵石地层并夹杂有粉细砂层透镜体,地下水丰富、水位高、补给迅速,在这种地质条件下长距离实施盾构隧道施工,国际上尚不多见,在国内属于首次。

富水砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层,其结构松散,卵石含量高达 55%~86%,大漂石分布随机性强,局部富集成层高达 20%~30%,且地下水位高,渗透性强。在这种地层中实施盾构隧道施工,面临盾构刀盘刀具磨损严重、带压进舱困难等难题,经常发生工程事故,且施工风险和工程费用加大。在富水砂卵石地层中采用盾构法施工极具挑战性,业界对此也一直存在争论。为进行施工工法的探索,在同一地层采用土压平衡盾构和泥水平衡盾构两种不同类型的盾构施工在国内尚属首例。

成都地铁一号线一期工程共采用 8 台盾构机施工,其中 7 台土压盾构机、1 台泥水盾构机,全部由海瑞克隧道设备有限公司(Herrenknecht AG)生产制造,通过地铁公司和参建各单位的努力,克服了重重困难,相关的科研工作已取得了实质性突破,换刀距离从最初不足百米甚至几十米提高到平均 204.5m,月掘进进度从最初不足百米提高到平均 237m,最高达 357m;攻克了富水砂卵石地层带压换刀、盾构端头井玻璃纤维筋桩围护、长距离快速掘进、大漂石处理、渣土改良等技术难题,初步实现了盾构在富水砂卵石地层的快速掘进。成都地铁一号线已于 2010 年 9 月 27 日开通运营,国庆长假第一天即发送乘客 257 291 人次。成都地铁二号线一期工程共采用 15 台土压盾构机,其中海瑞克盾构机 13 台。截至 2010 年 12 月 15 日累计掘进

25.5km,完成该工程总工程量的76%,预计2011年5月份洞通,2012年12月开通运营。富水砂卵石地层盾构技术日渐成熟,填补了我国盾构施工技术的一项空白,进一步完善了我国盾构施工的技术体系,提升了我国盾构技术的水平,具有很高的技术经济价值和应用前景。基于以上所述,系统地进行富水砂卵石地层盾构施工技术的总结已经具备了条件,本书将为此做出努力。

本书结合成都地铁一号线试验段工程施工案例,系统介绍了富水砂卵石地层盾构施工技术。全书共12章,阐述条理清晰、图文并茂、资料翔实,为类似工程的施工提供了参考依据,对广大工程技术人员具有切实的实用和参考价值。

本书由中铁隧道股份有限公司杨书江、孙谋及中铁隧道集团有限公司洪开荣编著,其中第一章富水砂卵石地层的地质特征由洪开荣编写,第二章两种不同类型盾构机的应用由杨书江、程俊瑞、瞿加俊编写,第三章盾构井端头加固由杨书江、陈中编写,第四章盾构施工控制由杨书江、张灿峰编写,第五章盾构同步注浆浆液配制及施工技术由孙谋编写,第六章渣土改良技术研究与应用由孙谋编写,第七章泥水盾构泥浆的配制和开挖面的稳定技术由杨书江、洪开荣编写,第八章泥水系统应用及改进由洪开荣、杨书江编写,第九章盾构进舱技术由孙谋、杨书江编写,第十章盾构通过重要建(构)筑物的施工技术由杨书江、赵丽编写,第十一章大漂石的处理由杨书江编写,第十二章监控量测和信息化施工技术由杨书江、孙谋、曹大明编写,全书由洪开荣修改完善成稿。

本书在编写过程中,得到了有关建设管理、施工、设计、科研、院校等单位的专家、学者、工程技术人员的大力支持和帮助。中铁隧道集团有限公司罗琼、陈建、赵华,中铁装备制造有限公司韩亚丽,盾构及掘进技术国家重点实验室陈馈,成都轨道交通有限公司肖中平、闫勇建、马文义、吕强,西南交通大学何川、晏启祥,中铁二院地下铁道设计院罗世培,广州地铁设计研究院黄威然,中铁隧道股份有限公司吴全中、赵全民、周红芳等提出了诸多中肯的意见或建议;许发成、段绍和、侯刚、任国青及中铁隧道股份有限公司的很多同事提供了资料;刘东双在书稿排版、图表绘制等方面做了大量工作;罗松、赵丽整理了部分资料,在此一并表示感谢!同时衷心感谢施仲衡院士在百忙之中为本书作序!

富水砂卵石地层盾构施工技术处于不断发展和完善过程中,实践中存在的一些问题仍值得我们去深入探讨和交流,书中会存在一些不足之处,敬请读者批评指正。

作者
2011年2月

作者简介



杨书江(1973.3—) 男,硕士,高级工程师,中铁隧道股份有限公司副总工程师,中国土木工程学会隧道及地下工程分会隧道掘进机专业委员会秘书长,中铁隧道集团科技拔尖人才,中国中铁优秀项目经理,成都市优秀项目经理;先后主持过“盾构机在硬岩地层掘进技术研究及盾构空载通过矿山法隧道施工技术研究”和“富水含大漂石砂卵石地层盾构法施工关键技术研究”课题,获中国中铁股份科技进步奖;主持编写的“盾构机通过矿山法开挖段管片衬砌施工工法”和参与编写的“复合盾构施工系列工法”均被评为国家级工法;开发的“新型耐磨滚刀刀体”被授予实用新型专利;公开发表论文 18 篇。



孙 谋(1970.8—) 男,硕士,在读博士,教授级高级工程师,中铁隧道股份有限公司总经理,中国土木工程学会隧道及地下工程分会隧道掘进机专业委员会主任委员,中国中铁青年科技拔尖人才,茅以升铁道工程师奖获得者;参与的“长大隧道全断面岩石掘进机掘进技术与应用”课题获 2005 年度国家级科技进步二等奖,主持的“南京地铁区间盾构法施工关键技术研究”课题获南京市科技进步一等奖,主持的“土压平衡盾构在软弱富水层中穿越建(构)筑物施工技术”课题获铁道学会科学技术二等奖,参与的“重庆主城排水工程过长江盾构隧道修建关键技术研究”课题获重庆市科技进步二等奖,参与的“建筑群下富水全强风化花岗岩地层浅埋大跨隧道双洞隧道修建技术”课题获洛阳市科技进步一等奖;近六年来公开发表论文 9 篇。



洪开荣(1965.8—) 男,1990 年兰州铁道学院硕士研究生毕业,教授级高级工程师,中铁隧道集团有限公司总工程师,盾构及掘进技术国家重点实验室主任,中国土木学会隧道及地下工程分会常务理事、秘书长,《隧道建设》编委会副主任;长期从事隧道及地下工程的技术研究和管理工作,主持和参加了多项国家重点工程建设和七项省部级以上的科研项目,公开发表论文二十余篇,出版专著三本(合作),开拓了我国复合地层中盾构隧道修建技术,并获国家科技进步二等奖,获省级及中国铁路工程总公司科学技术特等奖两项、一等奖一项;先后荣获中国铁路工程总公司有突出贡献中青年专家称号,获得了第七届詹天佑青年奖和第九届詹天佑成就奖,享受国务院政府特殊津贴。

目 录

第一章 富水砂卵石地层的地质特征	1
一、地质构造	2
二、岩土分层及其特征	3
三、土、石可挖性分级及隧道围岩分类(级)	7
四、水文地质条件	8
五、岩土工程分析.....	10
六、工程地质条件评价.....	10
七、环境工程地质.....	11
八、施工中可能出现的工程地质问题.....	11
九、典型地质特征在设计施工中的体现.....	13
第二章 两种不同类型盾构机的应用	15
第一节 地质因素对盾构机功能的要求	15
一、基本功能要求.....	15
二、盾构机选型.....	16
第二节 盾构机工作原理和工作模式	17
一、泥水平衡盾构机的工作原理及工作模式.....	17
二、土压平衡盾构机的工作原理及工作模式.....	19
第三节 泥水平衡盾构机关键部件及主要部件	21
一、关键部件.....	21
二、主要部件.....	24
第四节 土压平衡盾构关键部件及主要部件	28
一、关键部件.....	29
二、主要部件.....	30
第五节 盾构机主要尺寸和技术参数	32
第六节 刀盘选型及应用	34

一、刀盘的功能及设计要点·····	34
二、泥水平衡盾构刀盘磨损及修复·····	36
三、土压平衡盾构刀盘磨损及修复·····	39
四、刀盘的改进·····	41
第七节 螺旋输送机选型及应用·····	42
一、螺旋输送机选型·····	42
二、螺旋输送机使用状况分析·····	43
三、螺旋磨损与渣土改良的关系·····	46
第八节 刀具设计及适应性分析·····	46
一、刀具破岩原理·····	46
二、盘形滚刀·····	48
三、刀具选择及布置·····	50
第九节 不同类型刀具的应用·····	51
一、刀具失效形式·····	51
二、盾构刀具消耗统计·····	56
三、不同类型刀具(除滚刀外)的试验·····	59
四、滚刀的对比试验·····	61
五、刀具的优化改进·····	62
第十节 刀具检查、更换·····	66
一、刀具更换的理论研究·····	66
二、刀具检查·····	67
三、刀具更换原则·····	67
四、刀具更换程序·····	68
五、刀具更换作业·····	68
第十一节 刀具维修·····	69
一、刀具维修的关键技术·····	70
二、刀具检测·····	70
三、刀具维修·····	70
四、刀具的标记存放·····	71
第十二节 两种类型盾构机的应用效果比较及选型建议·····	72
一、盾构机实际应用效果比较·····	72
二、盾构机选型建议·····	74



第十三节 国产盾构刀具的研发及应用	75
一、成都探矿机械厂盾构滚刀产品研究及应用	75
二、山东天工刀具在盾构领域的应用	77
三、聊城瑞钻盾构刀具产品研发及使用	79
第三章 盾构井端头地层加固	81
第一节 盾构始发到达的土工问题	81
第二节 三重管高压旋喷桩与袖阀管注浆法	82
一、适用地层	82
二、加固总体方案	82
三、主要技术参数	83
第三节 压密注浆法	84
一、适用地层	84
二、加固总体方案	84
三、主要技术参数	85
四、施工技术要求	85
第四节 水平冻结法	86
一、适用地层	86
二、加固总体方案	87
三、主要技术参数	87
四、拔管和盾构始发的安全保证措施	89
五、对地面环境的保护措施	90
第五节 单重管高压旋喷桩结合三轴搅拌桩法	90
一、适用地层	90
二、加固总体方案	91
三、主要技术参数	92
第六节 双重管旋喷桩法	93
一、适用地层	93
二、加固总体方案	94
三、主要技术参数	95
第七节 降水结合玻璃纤维筋挖孔桩法	95
一、计算参数的选定	96

二、GFRP 圆形围护桩的计算方法	100
三、工程设计及现场测试情况	101
第四章 盾构施工控制	102
第一节 盾构掘进控制	102
一、泥水舱压力、土舱压力控制	102
二、推进速度	103
三、渣土改良	103
四、泥浆质量、出渣量控制	103
五、盾构姿态控制	104
六、同步注浆控制	104
七、管片拼装质量控制	104
八、测量和量测控制	109
第二节 盾构始发掘进控制	109
一、盾构始发方向确定	109
二、端头加固措施	109
三、延伸洞门、密封橡胶安装	110
四、始发台、反力架加固	110
五、导轨安装	112
六、负环拼装	112
七、掘进破除玻璃纤维桩	112
八、盾构始发姿态控制	113
九、盾构始发注意事项	113
第三节 盾构到达掘进控制	114
一、到达端头地层加固	114
二、测量和姿态调整	114
三、到达段掘进施工控制	114
四、到达掘进注意事项	116
第四节 地表滞后坍塌控制	116
一、坍塌机理	116
二、坍塌主要原因	117
三、坍塌多发位置分析	118



四、坍塌防控措施	120
第五章 盾构同步注浆浆液配制及施工技术	123
一、同步注浆浆液的填充机理	123
二、盾构同步注浆的目的	125
三、盾构同步注浆系统	125
四、同步注浆主要技术参数	126
五、浆液配比及技术参数	127
六、同步注浆施工工艺	128
七、同步注浆效果评价	129
第六章 渣土改良技术研究与应用	131
一、渣土改良目的	131
二、渣土改良系统	131
三、渣土改良方法	133
第七章 泥水平衡盾构开挖面稳定技术	136
第一节 泥水的作用机理及性能要求	136
一、泥水平衡盾构工作方式	136
二、泥水平衡盾构开挖面稳定机理	137
三、泥水基本性能要求	138
第二节 泥浆配料及配比确定方法	139
一、可渗比及其与泥膜的关系	139
二、泥浆配料	140
三、泥浆配比确定方法	140
四、富水砂卵石地层对泥浆指标的要求	140
五、实施效果	144
第八章 泥水系统应用及改进	145
第一节 泥水系统综述	145
一、泥水处理系统	145
二、泥水循环系统	147

三、综合管理系统	148
第二节 泥浆输送系统流量	150
一、泥浆输送系统流量计算	150
二、泥浆输送系统流量选择	151
第三节 泥浆处理系统选型及应用	153
一、泥浆分离系统	153
二、调浆系统	156
三、泥水分离、调浆集中控制系统	157
四、ZDJ-40 全自动制浆系统	159
五、使用中存在的问题	160
第四节 泥水循环系统故障及处理	162
一、泥水循环模式	162
二、泥水舱系统故障及处理	164
三、气压舱泥水循环系统	165
四、泥浆泵故障及处理	166
五、管路堵塞的处理	167
第五节 碎石机	168
一、碎石机运动原理	169
二、液压系统故障及排除	170
三、碎石机构故障及处理	172
第九章 进舱技术	175
第一节 常压进舱地层加固技术	175
一、有工程实例的盾构换刀辅助措施	175
二、富水砂卵石地层常压换刀地层加固措施	177
三、地层加固体裁	181
第二节 带压进舱基本知识	181
一、带压进舱设备	181
二、带压作业专业培训	183
三、进舱人员选拔	183
四、后勤保障	184
五、带压进舱、出舱作业	185

六、带压作业注意事项	186
七、应急措施	186
第三节 泥水盾构带压进舱技术	188
一、施工工艺流程	189
二、操作要点	189
三、材料与设备	191
第四节 土压平衡盾构带压进舱技术	192
一、带压进舱原理	192
二、准备工作	193
三、带压进舱	195
四、经验总结	195
第五节 中铁二局盾构带压进舱研究	196
一、前期基础研究	196
二、现场试验研究	199
三、关键施工技术	200
四、带压进舱体会	202
第六节 中铁十三局带压换刀试验与实践	203
一、气压加压试验	203
二、带压换刀实践	205
三、结论及建议	208
第十章 盾构通过重要建(构)筑物的施工技术	209
第一节 盾构下穿火车南站股道	209
一、沉降分析	210
二、扣轨加固	212
三、盾构掘进控制要点	213
四、监控量测措施	215
五、应急措施	216
六、施工效果	218
第二节 近距离穿越成都信息港施工技术	218
一、盾构隧道近接信息港基础分析	219
二、预加固施工措施	222



第三节	通过二环路南立交桥施工技术 ·····	223
一、	计算分析·····	223
二、	预加固施工措施·····	227
第四节	通过 $\phi 1\ 200\text{mm}$ 污水干管施工技术 ·····	227
一、	污水干管形式·····	227
二、	施工技术措施·····	228
三、	施工管理措施·····	230
四、	监控量测·····	231
五、	通过 $\phi 1\ 200\text{mm}$ 污水干管施工效果·····	232
第五节	盾构下穿南河、侧穿锦江大桥桥基施工 ·····	232
一、	南河、锦江大桥调查·····	232
二、	盾构穿越前阶段的准备·····	234
三、	高压旋喷桩加固隔离·····	234
四、	盾构穿越控制施工技术·····	235
第六节	盾构过四川省经委、安监局办公楼和冶金宾馆 ·····	236
一、	工程概况·····	236
二、	数值模拟计算·····	237
三、	建筑物加固措施·····	239
四、	盾构掘进措施·····	243
五、	施工监测·····	243
六、	盾构通过情况·····	244
第十一章	大漂石的处理 ·····	245
一、	大漂石破碎原理·····	245
二、	大漂石对盾构选型的影响·····	246
三、	盾构选型上的针对性设计·····	246
四、	大漂石处理措施·····	247
第十二章	监控量测和信息化施工技术 ·····	251
第一节	地层位移的影响因素分析 ·····	251
一、	盾构掘进对地层位移的影响·····	251
二、	其他因素对地层位移的影响·····	252



第二节 地面沉降预测	253
一、Peck 法	253
二、有限单元法	254
三、藤田法	254
四、双线隧道地面沉降的预测	256
第三节 盾构掘进沉降监测及控制	258
一、监测项目	258
二、监测方法	258
三、测量精度	264
四、量测频率	265
五、监控项目控制值	265
第四节 监测数据的处理及分析评价	266
一、必测项目监测分析	266
二、选测项目监测分析	276
三、监控量测体会与认识	279
参考文献	282

第一章 富水砂卵石地层的地质特征

采用盾构法施工的富水砂卵石地层隧道以成都地铁工程为典型代表。下面以成都平原的地质情况为例来叙述富水砂卵石地层的地质特征,如图 1-1 所示。富水砂卵石地层的典型特征如下:



a) 基坑开挖出的砂卵石



b) 挖孔桩挖出的卵石



c) 泥水舱内清出的卵石



d) 刀具破碎后的卵石

图 1-1 砂卵石