

轨道交通建造关键技术研究丛书

地铁场段出入线超大断面 隧道群施工关键技术

DI TE CHANGDUAN CHURUXIAN CHAODA DUANMIAN
SUIDAOQUN SHIGONG GUANJIAN JISHU

任立志 白伟 李围 段景川 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

非外借

轨道交通建造关键技术研究丛书

地铁场段出入线超大断面隧道群 施工关键技术

任立志 白 伟 李 围 段景川 著

中国铁道出版社

2018年·北京

内 容 简 介

本书依托深圳地铁7号线安托山停车场和深云车辆段出入线,采用数值模拟方法、现场监测与工艺试验,进行了超大断面浅埋、小间距、偏压和非对称连拱隧道施工技术研究,解决了地铁场段出入线超大断面隧道群施工关键技术难题。

本书为城市轨道交通土建工程专业书籍,可为从事轨道交通工程施工、设计、监理和建设管理技术人员的指导用书和继续教育用书,也可作为高校教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地铁场段出入线超大断面隧道群施工关键技术/任立志等著. —北京:中国铁道出版社,2018.6

(轨道交通建造关键技术研究丛书)

ISBN 978-7-113-24518-4

I. ①地… II. ①任… III. ①地铁隧道-大断面
地下建筑物-隧道施工 IV. ①U231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 102643 号

书 名: 轨道交通建造关键技术研究丛书
地 铁 场 段 出 入 线 超 大 断 面 隧 道 群 施 工 关 键 技 术
作 者: 任立志 白 伟 李 围 段景川

策 划: 傅希刚
责任编辑: 曹艳芳
封面设计: 郑春鹏
责任校对: 胡明锋
责任印制: 高春晓

编辑部电话: 010-51873162

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: 中国铁道出版社印刷厂
版 次: 2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
开 本: 880 mm×1 230 mm 1/32 印张: 5.5 字数: 143 千
书 号: ISBN 978-7-113-24518-4
定 价: 26.00 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

丛书编委会名单

(按姓名拼音字母排序)

主 任:范富国

副主任:和孙文

张业勤

委 员:白 伟

刁目国

段志宏

高 朗

胡德华

黄 武

靳利安

李金武

刘才平

刘雪峰

毛宇飞

秦 俊

孙成山

薛清伟

耶律根迪

张述毕

赵新杰

李 围

蒋宗全

赵春生

陈 娇

董发俊

房俊凯

高玉生

胡卫国

惠世前

柯昌喜

李彦臣

刘福贵

刘永波

梅伏明

任晓龙

孙宏江

杨光武

张虎成

张 涛

周建伟

任立志

孟庆明

朱瑞喜

陈克强

段景川

房师涛

郭建光

胡志华

蒋 俊

李 博

李 泽

刘琨阳

马健军

庞林军

任彦顺

魏百术

杨国忠

张 磊

张 陶

王 成

陈天平

段汝健

付艳军

郭振华

黄 胜

靳方罗

李光耀

梁高峰

刘学生

马克乾

祁海峰

沈国成

徐有亮

杨永杰

张书起

张应盛

作者简介

任立志,男,1967年3月出生,河北磁县人,汉族,中共党员,上海铁道学院铁道工程专业学士、英国格林威治大学项目管理硕士,教授级高级工程师。现任中国电建集团铁路建设有限公司副总经理、中国土木工程学会城市轨道交通分会理事、世界轨道交通发展研究会理事、深圳土木建筑学会轨道交通专业委员会理事、中国施工企业管理协会科学技术奖评审专家、上海应用技术大学兼职教授、深圳市市政设计研究院高级顾问。自1991年7月参加工作以来,先后参加或主持了广梅汕铁路、广州地铁1号线、内昆铁路、渝怀铁路、北京地铁5号线、青岛海底隧道、深圳地铁7号线、深圳地铁4号线三期、深圳地铁5号线南延线、深圳地铁9号线支线、深圳地铁10号线等工程的建设,对铁道工程、城市轨道交通设计与施工有深入的研究和见解。获得各级科学技术奖15项,获得专利36项,获得中国施工企业管理协会2015年度科技创新先进个人称号,出版专著3部。

白伟,男,1973年11月出生,中国水利水电第七工程局南方分公司副总经理、总工程师、高级工程师。先后参建深圳地铁1号线、深圳地铁5号线、深圳地铁7号线、福州地铁1号线、福州地铁6号线、武广高铁等工程项目。主持了“深圳地铁七号线复合地层盾构选型及分体始发空推技术”、“复杂地质条件下地铁隧道施工关键技术”、“地铁特大断面关键技术”等科研项目,获得中国施工企业管理协会科学技术奖科技创新成果二等奖,并获得两项国家专利。参

与编写《地铁工程施工技术》，近5年来发表专业论文多篇。

李围,男,1979年7月出生。2006年毕业于西南交通大学桥梁与隧道工程专业,获工学博士学位,现任上海应用技术大学轨道交通学院教授、铁道工程专业责任教授。先后工作于贵州大学、浙江大学宁波理工学院、中国电建铁路建设有限公司,分别任副教授、教授、副总工,荣获贵州省优秀青年科技人才、瑞士联邦理工大学访问学者,师从国际著名的岩石力学和隧道工程专家J. ZHAO教授。担任国家自然科学基金同行评议专家、《工程力学》和《岩土工程学报》EI收录期刊审稿人。截至目前,先后主持省部级课题4项,主持地铁和公路隧道施工技术研究横向项目10余项,发表论文40余篇(其中,第一作者EI收录9篇,第一作者核心期刊20余篇),出版专著及教材5部,获省部级科技进步奖1项。

段景川,男,1987年7月出生,湖南常德人,汉族,中共党员,西南交通大学桥梁与隧道工程专业硕士,工程师。现供职于中电建南方建设投资有限公司工程管理部。自2013年7月参加工作以来,先后参与了深圳地铁7号线、深圳地铁4号线三期、深圳地铁5号线南延线、深圳地铁9号线支线、深圳地铁10号线等工程的建设工作,对岩土工程及铺轨施工有深入的研究与见解。参与获得省政府、行业协会、电建集团等各级科学技术奖7项,获得专利9项,由科学出版社等出版专著《地铁隧道下穿公路诱发地层变形理论与控制技术》等3部,在公路交通科技、隧道建设等学术期刊上发表《盾构隧道施工近接下穿水工结构物施工力学特性分析》等论文11篇,获得中国电建铁路建设有限公司2016年度优秀科技先进个人称号。

前 言

在城市地铁建设中,因车辆段与停车场占地大而需远离地铁线路设置,导致场段出入线隧道与区间相互交叉,且断面种类多。由中国水利水电第七工程局有限公司承建的深圳地铁7号线7302标包括三站三区间及两条场段出入线隧道工程,正线全长5371双延米,地下区间及出入线洞长13280单延米,车站总长768 m。采用矿山法施工的隧道总长10260 m,占7号线矿山法隧道总长度的70%,6条隧道在这里互连缠绕,分分合合,形成形式复杂、四通八达的隧道洞群,具有隧道线路长、工作面多、断面结构复杂、穿越地层地质变化多、穿越广深高速公路和北环大道等城市主要干道等特点。总共有77种断面,单洞小断面 33 m^2 ,单洞断面 282 m^2 。有浅埋隧道埋深仅6 m,有大断面偏压隧道与地面距离薄处仅150 cm,有单洞隧道两隧洞间距小到30 cm,有隧道相互跨越,有单洞变双洞,有双洞变单洞,有双洞变三洞再变双洞等,在国内地铁隧道领域尚属首次,施工安全风险高。开设了21个开挖工作面,分别采用了全断面法、台阶法、CD法、CRD法、中洞法等施工方法。经过700多个日夜不间断施工,矿山法隧道贯通误差均在10 mm内,比规范要求贯通精度提高了50%。施工过程无任何伤亡事故,也没有对城市地下地上复杂环境造成不利影响,工程合格率100%。

本书针对超大断面浅埋(埋深11.6 m、断面 102.23 m^2)、小间距(开挖断面宽13.4 m、高10.091 m、净距4.0 m)、浅

埋偏压(高差 15 m、开挖断面 200 m^2)和非对称连拱(大断面跨度为 15.10 m、高 11.2 m,小断面跨度为 12.63 m、高 9.57 m)隧道施工难点,采用数值模拟方法、现场监测与工艺试验,进行了超大断面浅埋、小间距、偏压和非对称连拱隧道施工技术研究,解决了地铁场段出入线超大断面隧道群矿山法施工关键技术难题,为我国今后地铁车辆段和停车场出入线隧道群多种断面的施工提供技术支撑。

研究成果“地铁出入线超大断面隧道群施工关键技术”获得中国铁道学会铁道科技奖三等奖和中国电力建设集团科学技术奖一等奖,矿山法隧道超长管棚定向施工工法获批中国电力建设集团工法。

本书第 1 章~第 3 章和结论由任立志撰写,第 4 章由白伟撰写,第 5 章由李围撰写,第 6 章由段景川撰写,全书由李围统稿。

本书在撰写过程中,参阅了许多专家学者发表的论文,在此向他们表示真诚的谢意!

本书在整理过程中,得到了朱慧坤和张梦恒的帮助。中国铁道出版社的傅希刚、陈小刚和曹艳芳等编辑对本书的修改和完善提出了大量宝贵意见和建议。在此向他们一并表示感谢!

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中如有不妥之处,恳请同行专家及读者给予批评和指正。

作 者

2018 年 5 月

出版说明

截至 2017 年,我国城市轨道交通开通运营线路总长度达 3 862 km(118 条),开通城市 29 个,其中步入网络化运营的城市共有 13 个,客运量达 176.8 亿乘次,全国共有 9 个城市网络日均进站量超过 100 万人次,共有运营员工 20.8 万人,平均每公里线路 54 人。

我国城市轨道交通占公共交通比例还很小(见表 1),与国际化大都市差距大,轨道交通发展潜力还很大。例如,尽管上海运营里程突破了 680 km,为世界上轨道交通运营里程最多的城市,但其轨道交通占公共交通比例仅刚过 50%,其中多条线路已经超负荷运营,上下班时间拥挤不堪。而深圳已经完成了三期建设运营,轨道交通仅占公共交通的三分之一还不到。

表 1 世界各国大都市轨道交通占公共交通的比例

东京	伦敦	巴黎	莫斯科	上海	北京	深圳
86%	70%	70%	55%	54.6%	45%	32%

当前,我国轨道交通还处于高速发展期,特别是由于我国幅员辽阔,各区域地质差异较大,导致地铁的施工难易也不相同,因此,需要解决不同城市地质环境条件下地铁施工技术问题。

我国城市地质条件主要有:以上海、杭州等为代表的深厚软土层,以西安为代表的黄土地层,以成都为代表的砂卵

石和漂石地层,以深圳、广州为代表的不同风化花岗岩组成的混合地层,以重庆、青岛为代表的岩石地层,以贵阳为代表的岩溶地层。其中,深圳混合地层主要为第四系全新统人工堆积层、海积层、海冲积层、冲洪积层、洪积层、上统更新坡积层、残积层震旦系混合岩和花岗片麻岩、震旦系混合岩和花岗片麻、燕山期花岗岩和加里东期混合花岗岩,地下水位位于地面以下 0.7~12.1 m。混合地层地铁施工难度最大,其主要地质问题如下:

1. 车站

范围内岩面高,基岩侵入车站范围内最大厚度达 14 m,地下连续墙入岩最大深度为 17.5 m,强度最高达 132 MPa,大倾角陡坡硬岩(45°)分布广泛。基坑控制爆破困难,成槽困难。

2. 盾构区间隧道

穿越地段基岩面起伏大、变化剧烈,硬岩、上软下硬、富水砂层、孤石、掘进中存在盾构机姿态难以控制、坍塌、涌水,地面沉降难以控制而造成地面建筑物开裂损坏、盾构机易被卡住等。

3. 矿山法区间隧道

位于全强风化花岗岩中,顶部主要为砂质黏性土、素填土、中砂、粗砂等富水软土层,施工失水极易引起隧道变形、地面塌方等风险。再加上在深圳主城区修建地铁地上地下环境条件复杂,例如三期重大工程 7 号线穿越深圳主城区,全线正下穿既有建筑物 20 余栋,5 次下穿河流和湖泊,1 次上穿高速铁路,2 次下穿既有铁路,4 次下穿已运营地铁线,8 次下穿(或侧穿)既有桥梁,在华强北商圈核心地段与 7 号

线同步实施华强北地下空间工程。

本套丛书结合我国目前正在大力修建的城市地铁重大工程,及时总结施工中研究形成的新技术并出版,为同城后期地铁工程的建设提供技术支撑和其他城市类似工程提供技术参考有其重要意义。

因此,中国铁道出版社与地铁建设相关单位合作,出版《轨道交通建造关键技术研究丛书》,期待为我国地铁工程新技术的进步贡献一份力量。

丛书策划:李围、傅希刚

2018年1月1日

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 主要研究内容与方法	1
1.3 研究现状	2
第 2 章 依托工程概况	7
2.1 场段出入线隧道群概况	7
2.2 工程地质概况	8
2.3 不同隧道类型概况	12
第 3 章 超大断面浅埋隧道施工技术	15
3.1 施工工艺流程及重难点	15
3.2 隧道开挖	16
3.3 初期支护	25
3.4 施工数值模拟	30
3.5 监控量测与地表沉降分析	37
3.6 小 结	44
第 4 章 超大断面小间距隧道施工技术	46
4.1 施工工艺流程及重难点	46
4.2 隧道开挖	47
4.3 施工数值模拟	53
4.4 监控量测与地表沉降分析	63
4.5 小 结	74

第 5 章 超大断面浅埋偏压隧道施工技术	76
5.1 施工工艺流程	76
5.2 预支加固	77
5.3 隧道开挖	82
5.4 初期支护	92
5.5 施工数值模拟	99
5.6 监控量测与地表沉降分析	115
5.7 小 结	124
第 6 章 超大断面非对称连拱隧道施工技术研究	126
6.1 施工特点	126
6.2 超前支护	126
6.3 隧道开挖	131
6.4 施工数值模拟	142
6.5 围岩与监控量测	151
6.6 小 结	158
结 论	159
参考文献	161

第1章 绪 论

1.1 研究背景

深圳地铁7号线7302标由中国电建水电七局承建,包含深云~安托山区间、深云车辆段出入线、安托山停车场出入线以及与2号线的联络线隧道群,总长10 260 m,矿山法隧道特点:

(1)超大断面浅埋隧道,最小埋深11.6 m、毛洞开挖达 102.23 m^2 。

(2)超大断面小间距隧道,最大开挖断面宽13.4 m、高10.091 m,两隧道净距近为4.0 m,Ⅳ级围岩、埋深为15~16.5 m。

(3)超大断面浅埋偏压隧道,最小埋深不足2.5 m,且隧道左右边壁埋深相差超过15 m,属于严重偏压,同时该段为单洞三线隧道,开挖断面超过 200 m^2 。

(4)超大断面非对称连拱隧道,大断面跨度为15.10 m、高11.2 m,小断面跨度为12.63 m、高9.57 m;长30 m、埋深13~15 m。

本工程地形地质条件复杂多变,隧道断面大、形式多样;其中隧道断面形式多达77种,仅超大断面达21种;单洞三线隧道最大开挖断面为 200 m^2 ,连拱隧道最大开挖断面为 424 m^2 ,在国内地铁隧道领域尚属首次,施工安全风险高。

因此,依托深圳地铁7号线场段出入线工程,开展地铁场段出入线超大断面隧道群施工关键技术研究具有重要意义。

1.2 主要研究内容与方法

本书主要基于深圳轨道交通7号线的施工项目,对复杂地质条件下地铁超大断面隧道施工技术进行详细的研究,主要是对超大断

面浅埋隧道、超大断面小间距隧道、超大断面浅埋偏压隧道、超大断面非对称连拱隧道的研究。针对这四种类型的超大断面隧道,本书详细的对每一种隧道的工程概况进行介绍,并且对他们的施工技术进行研究。研究的内容主要为隧道的施工工艺流程、隧道开挖中的爆破及初期支护、施工数值模拟及分析、监控量测及地面沉降分析。其中施工数值模拟运用 FLAC3D 数值模拟软件建立三维地质模型并进行力学分析。监控量测的数据运用 Excel 软件进行画图,使数据更加直观便于分析。

本书采用了基于工程类比和理论分析,提出了不同条件下的超大断面隧道开挖的施工方案和支护措施,在施工中顺利实施,隧道围岩稳定、变形量不大,未发生地表塌陷等事故,确保了施工安全和地表安全,验证了研究成果的正确性,总结出有效的施工方案,对今后类似工程可提出明确指导。

针对不同条件下的超大断面隧道,采用有限元法对暗挖施工方法的各工序进行了数值模拟分析,分析各工序围岩受力和变形的重点部位,预判变形处允许范围,综合考虑施工便利性、投资等多种因素,确定合理施工方案。研究攻克了施工中的关键技术难题,掌握地铁施工成套核心技术,编制系列工法、技术文献等,形成成套的可以用于指导类似工程施工的技术性文献,做好技术储备等基础性工作。

1.3 研究现状

1.3.1 国内研究现状

我国的大断面隧道建设相对国外较晚,从 20 世纪 90 年代开始我国修建大断面隧道,目前大断面隧道主要集中在铁路、公路隧道方面。

颜卫东、孙晓阳,等^[1]以南京牛首山文化旅游区七宝莲道为背景。该地区隧道是典型的超浅埋超大断面隧道,为矿渣堆填区,区内岩堆体松散且位于进山主干道下,易受施工及外部动荷载扰动。为

确保施工安全,对地层采取袖阀管分层注浆加固的改良方式及采用早期强度高、刚度大的初期支护,控制围岩早期变形。陈林杰,梁波,王国喜^[2]以重庆地铁6号线五路口地铁车站为依托工程,运用数值计算并结合现场监测成果等手段,开展浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道开挖方法的研究。结合五路口车站工程的地质条件和断面特点,提出开挖浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道的新方法:台阶临时支撑+部分双侧壁法,该方法在国内首次被引入地铁轨道工程施工中。同时还结合具体工程实际情况,对施工过程进行动态模拟,确定了施工开挖方法,同时依据动态监控量测结果对施工参数进行优化调整,达到提高施工安全水平、加快施工进度和降低工程成本的目的。李讯、何川,等^[3]通过数值模拟和现场监控相结合的方式,以广州地铁2号线公园前站—纪念堂站区间隧道工程为背景,研究了地铁区间过渡段浅埋超大断面隧道的破坏形态、开挖工法、施工参数及支护体系力学特性。研究结果表明:应以中风化和微风化岩层的交界处产生向两侧以泰沙基破裂角扩展的破裂面作为荷载设计的依据;不同开挖工序的地表沉降有较大区别,拱部中导洞最后施工对控制地表下沉最有利;管棚直径对地表沉降影响不大,减少管棚环向间距对控制地表沉降更为有效;临时横撑是施工期重要的支护结构,1次拆除长度不宜超过6 m。

石宵爽、曾祥国,等^[4]结合重庆花土岗隧道实际工程,对该大断面小净距隧道开挖过程进行了数值模拟分析,建立了不同开挖间距的隧道模型,通过对比分析围岩变形、应力及地表沉降,得出先行洞超前开挖30 m是可行的,此外还指出了小净距隧道施工过程中应重点监控和关注的位置。杜菊红^[5]在其博士论文中依托平年隧道,对小间距隧道施工特性进行了研究,包括利用室内相似模型试验获得了对小净距隧道围岩应力与变形分布、双线相互影响与力学机理的认识;利用有限元软件分析了不同影响因素下小间距隧道的力学特性等。龚建伍^[6]在2010年对某山区高速公路双洞隧道(长450 m,最大开挖跨度16.7 m,中夹岩柱最小厚度6 m)进行了施工

过程中的围岩变形监测。通过监测数据分析了该大跨小净距隧道施工中的变形特点和规律,为支护合理施作时机和衬砌参数的优化研究做了铺垫。

陈莹、林从谋,等^[7]以国内罕见的大跨度超大断面浅埋偏压隧道——前欧隧道为工程背景,通过现场试验获得围岩变形数据,运用速率上限截断方法及小波理论对数据进行处理,并运用 ANSYS 对开挖过程进行二维模拟,获得了一些变形规律。王维富、梅竹^[8]为探索台阶法在超大断面浅埋偏压隧道施工中的可行性,以蒙华铁路石岩岭隧道为研究对象,对台阶法和传统分部开挖法进行比选,提出三台阶临时仰拱+竖向支撑的开挖工法,并采用 MIDAS 有限元软件建立地层—结构模型,对施工各阶段隧道—围岩体系的应变—应力进行模拟分析,以判断开挖过程的结构风险。对台阶法施工过程中出现的拱顶沉降大、初期支护出现裂缝、爆破对软硬不均地段的影响和地表土体开裂等问题进行分析并提出相应的对策。

高峰,周谊一,胡学兵^[9]针对厦门市东坪山地下立交工程的重点与难点问题进行专项计算分析,采用荷载—结构法对Ⅳ级围岩地下立交分岔处非对称连拱隧道的承载能力与正常使用极限状态进行验算,并给出配筋设计。何珺,张成平,等^[10]针对砂卵石地层特性配制了围岩相似材料,利用自主研发的大型平面模型试验台架,对不同荷载条件下非对称连拱隧道的受力特性进行了深入研究,重点分析了衬砌外表面压力和结构内力的分布及变化特点,总结了隧道裂缝的发展规律和结构破坏过程。试验结果表明:非对称连拱隧道大洞衬砌外表面压力显著大于小洞,但两者分布规律相似,最大值均位于拱顶,其次为内侧拱肩,外侧拱腰处最小;左右洞室受力不对称导致隧道中墙存在明显偏压;注浆加固圈可以有效降低衬砌外表面压力,改善结构受力条件,提高结构稳定性。聂善文,张端良,樊帅,等^[11]根据某高速公路非对称连拱隧道衬砌结构形式,针对地表平、地表顺倾斜和地表逆倾斜等地表倾斜情况建立了相应的有限元分析模型,选取围岩稳定性、衬砌安全性和偏压情况等反映隧道稳定性的性能指标,