

轨道交通建造关键技术研究丛书

盾构隧道孤石地层 探测及处理关键技术

DUNGOU SUIDAO GUSHI DICENG
TANCE JI CHULI GUANJIAN JISHU

白伟 张业勤 黄胜 胡志华 著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

轨道交通建造关键技术研究丛书

盾构隧道孤石地层探测及 处理关键技术

白 伟 张业勤 黄 胜 胡志华 著

中国铁道出版社

2018年·北京

内 容 简 介

本书依托中国电建集团深圳地铁7号线BT项目7302标桃源村站—深云站区间工程,采用数值模拟结合现场测试、监测等方法,研究了孤石微动探测技术、引孔预裂爆破孤石处理技术和紧贴盾构刀盘孤石定向控制爆破技术以及由孤石预爆破地层注浆保压、刀盘刀具配置及其磨损和换刀组成的盾构安全掘进技术,最后建立了主要刀具的破岩机理、刀盘的有限元分析模型、静力特性和动力模态,解决了盾构隧道孤石地层探测及处理技术难题。

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

盾构隧道孤石地层探测及处理关键技术/白伟等著. —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 978-7-113-24541-2

I. ①盾… II. ①白… III. ①隧道施工-盾构法-地层学 IV. ①U455.43②P53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 110056 号

书 名: 轨道交通建造关键技术研究丛书
盾构隧道孤石地层探测及处理关键技术
作 者: 白 伟 张业勤 黄 胜 胡志华

策 划: 傅希刚
责任编辑: 冯海燕 编辑部电话: 010-51873065
封面设计: 郑春鹏
责任校对: 孙 玫
责任印制: 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: 5.375 字数: 140 千
书 号: ISBN 978-7-113-24541-2
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	李 围	任立志	
副主任:	和孙文	蒋宗全	孟庆明	王 成
	张业勤	赵春生	朱瑞喜	
委 员:	白 伟	陈 娇	陈克强	陈天平
	刁目国	董发俊	段景川	段汝健
	段志宏	房俊凯	房师涛	付艳军
	高 朗	高玉生	郭建光	郭振华
	胡德华	胡卫国	胡志华	黄 胜
	黄 武	惠世前	蒋 俊	靳方罗
	靳利安	柯昌喜	李 博	李光耀
	李金武	李彦臣	李 泽	梁高峰
	刘才平	刘福贵	刘琨阳	刘学生
	刘雪峰	刘永波	马健军	马克乾
	毛宇飞	梅伏明	庞林军	祁海峰
	秦 俊	任晓龙	任彦顺	沈国成
	孙成山	孙宏江	魏百术	徐有亮
	薛清伟	杨光武	杨国忠	杨永杰
	耶律根迪	张虎成	张 磊	张书起
	张述毕	张 涛	张 陶	张应盛
	赵新杰	周建伟		

作者简介

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。

张业勤,男,1974年1月出生,中国水利水电第七工程局副总经理、南方分公司总经理。先后参建彭水电站、三峡工程,指挥建设亭子口水利枢纽、深圳地铁7号线7302标段等工程项目,其中深圳地铁7号线获得国家优质工程金质奖;先后主持和参与完成“盾构隧道孤石地层探测及处理关键技术”、“填海区复杂地层盾构连续穿越近接同步施工建筑群关键技术”等科研项目。近5年来发表专业论文多篇,具有丰富的地铁施工技术和管理经验。

黄胜,男,1979年1月出生,湖北黄冈人,汉族,中国地质大学(武汉)土木工程专业学士,高级工程师。现任中电建南方公司工程部副主任。自2002年参加工作以来,先后参与南京地铁、广州地铁、成都地铁、深圳地铁施工,地铁工程盾构施工经验丰富,负责过100余台次盾构施工技术指导,对硬岩、软土、上软下硬、淤泥质等复杂地层盾构施工有

丰富经验。

胡志华,男,1985年12月出生,江西新余人,汉族,石家庄铁道学院机械工程及自动化专业学士,工程师。现任中电建南方建设投资有限公司工程部区间科副科长。自2006年7月参加工作以来,先后参与了成都地铁1号线以及深圳地铁2号线、5号线、7号线、4号线延长线等地铁工程建设工作,对复杂地质条件下盾构的施工技术有深入的研究和见解,成功解决了多项施工技术难题。针对工程实践经验,在国家级核心期刊发表《地铁隧道盾构施工风险分析及对策探讨》等学术论文多篇,参与的科技项目获得集团公司等各级科技进步奖10余项、工法3项,获得专利2项。

前 言

孤石是指存在于软质风化层中的花岗岩球状风化体,球状风化是花岗岩层中十分常见的现象,属于花岗岩的不均匀风化。盾构在孤石地层中掘进遇到的主要问题:盾构掘进困难并频繁卡刀盘;盾构姿态难以控制;刀具磨损非常严重、更换困难;刀盘磨耗导致刀盘强度和刚度降低,刀盘变形;刀盘受力不均匀导致主轴承受损或主轴承密封被破坏;被刀盘推向隧道侧面的大漂石甚至导致盾构偏离隧道轴线;掘进振动大,对保护地面建筑物不利等。

本书依托中国电建集团深圳地铁7号线BT项目7302标桃源村站—深云站区间工程,采用数值模拟结合现场测试、监测等方法,研究了孤石微动探测技术、引孔预裂爆破孤石处理技术和紧贴盾构刀盘孤石定向控制爆破技术以及由孤石预爆破地层注浆保压、刀盘刀具配置及其磨损和换刀组成的盾构安全掘进技术,最后建立了主要刀具的破岩机理、刀盘的有限元分析模型、静力特性和动力模态,解决了盾构隧道孤石地层探测及处理技术难题。

研究成果“城市地铁孤石深孔爆破预处理施工工法和紧贴盾构刀盘孤石定向爆破处理施工工法”获中国电力建设集团工法。

本书第1章、第4章和结论由白伟撰写,第3章由张业勤撰写,第5章5.4节~5.8节由黄胜撰写,第2章、第5章5.1节~5.3节由胡志华撰写,全书由白伟统稿。

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,得到了李围和龚姝华的帮助。中国铁道出版社的傅希刚、陈小刚和冯海燕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	2
1.3 研究现状	3
第 2 章 依托工程概况	6
2.1 工程概况	6
2.2 工程地质与水文地质	8
第 3 章 孤石探测技术研究	15
3.1 桃深盾构区间孤石分布情况	15
3.2 不同孤石探测方法的适应性分析	20
3.3 孤石微动探测方法与探测原理简介	28
3.4 孤石微动探测成果解释原则	34
3.5 孤石微动探测方法适应性现场试验论证	37
3.6 孤石与基岩微动探测方案及数据解译结果	43
3.7 钻孔取芯与微动探测结果对比分析	55
3.8 小结	62
第 4 章 孤石处理技术研究	63
4.1 国内外孤石处理概述	63
4.2 桃深区间孤石与基岩分布及处置对策	75
4.3 已探明孤石引孔预裂爆破施工技术	81
4.4 紧贴盾构刀盘孤石定向控制爆破技术	98

4.5 小结	108
第5章 孤石地层盾构安全掘进技术研究	110
5.1 概述	110
5.2 桃深区间盾构刀盘配置及参数	110
5.3 盾构刀盘刀具及破岩机理	117
5.4 基岩与孤石地层下刀盘的有限元分析	123
5.5 孤石地层盾构安全掘进技术	133
5.6 孤石地层盾构刀具磨损与换刀技术	140
5.7 地表沉降监测控制技术	150
5.8 小结	154
结 论	155
参考文献	157

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

中国东南部沿海城市的花岗岩地层中都不同程度地存在球状风化岩体(孤石)和基岩局部侵入隧道开挖断面,盾构在此地层中施工,盾构刀具无法有效地破除该高强度岩体;且由于岩体上部或周围存在软弱地层,人工破除操作困难,盾构掘进风险极大,严重的会导致盾构施工失败。

孤石是指存在于软质风化层中的花岗岩球状风化体,球状风化是花岗岩层中十分常见的现象,属于花岗岩的不均匀风化。花岗岩球状风化体在珠三角地区常见于广州北部、深圳的大部分地区以及珠海沿岸大部分地区,搬迁作用在广东台山海底淤泥层,成都、长沙的少数卵石地层中被发现,但分布数量较少。孤石的成因有自然风化产物和搬迁作用两种,花岗岩球状风化体以及大型卵石都可能成为孤石,成为盾构法隧道掘进过程中的巨大障碍。由于孤石埋藏分布是随机的,且形状各异,大小不一,强度可达到 200 MPa 以上,对地铁盾构工程施工极为不利。

深圳地铁 7 号线桃源村站—深云站盾构区间地质条件复杂,部分里程段揭露有球状风化体(孤石)及蜂窝状孤石集群。孤石大部分分布在全~强风化花岗岩中,少数分布在砂质黏性土中。孤石较为集中,且侵入隧道内,其强度高,孤石集群的存在,为盾构施工带来了极大不确定性。

在盾构隧道施工过程中,由于孤石的影响可能出现的主要问题:盾构掘进困难并频繁卡刀盘;盾构姿态难以控制;刀具磨损非常严重、刀座变形、更换困难;刀盘磨耗导致刀盘强度和刚度降低,刀盘变

形;刀盘受力不均匀导致主轴承受损或主轴承密封被破坏、刀盘堵塞开口率降低、盾构负载加大;被刀盘推向隧道侧面的大漂石甚至导致盾构转向,偏离隧道轴线;掘进振动大,对保护地面建筑物不利等问题。

因此,在珠三角地区以及珠海沿岸大部分地区城市轨道交通建设中通过盾构隧道孤石地层探测,采用合理的技术方案进行孤石预处理并最终解决孤石,对减少施工成本,保证盾构工法优越性和盾构在孤石地层的安全掘进提高盾构本身在孤石与基岩地层的适应性,在孤石地层下能够实现安全又高效的施工,有着极其重要的意义。

1.2 主要研究内容与方法

1.2.1 主要研究内容

通过对深圳地铁7号线桃深区间盾构隧道孤石与基岩地层的探测与处理关键技术研究,得出的主要研究内容如下:

(1)提出微动探测与加密地质补勘钻探相结合的地铁隧道盾构孤石探测方法,并应用于深圳地铁7号线盾构施工中,取得了很好的效果。采用微动探测判断“孤石”准确率高达80%,为盾构隧道基岩的精细化探测提供了一种全新的、准确的、科学合理的指导。

(2)在探明孤石的基础上利用封闭岩体与周边围岩介质的差异性,采用引孔预裂爆破技术,通过控制性地引孔下药,有效实现了基岩及孤石的破碎预处理,减小了刀具的损耗和施工风险,保证了施工周期和盾构工法的安全性与优越性。

(3)采用孤石爆破后钻孔取芯、盾构掘进时出渣粒径检查与掘进参数统计分析的方法对孤石的爆破效果进行了验证,发现孤石爆破效果良好,保证了盾构在复杂地层中施工的有效性和施工周期。

(4)爆破后地层的注浆回填加固,采用袖阀管注浆工艺,提高了地层的稳定性,提高了盾构通过的安全性;采用旋喷桩加固方法实现了风化岩软弱地层的加固,保证了盾构在复合地层掘进过程中开舱

检查与更换刀具或者遇到孤石后开舱人工洞内处理的安全性,解决了复合地层下盾构开舱换刀的难题,实现了盾构在孤石爆破后地层的安全高效掘进。

1.2.2 主要研究方法

在我国华南地区的隧道施工中多为复合地层,在黏土地层中或者全风化岩与强风化岩层中多存在孤石,给盾构隧道带来了极大的风险和困难。由于地质条件复杂多变,施工时干扰因素的不可排除等原因,地面和井下都存在岩性差异被淡化或完全屏蔽的情况,给工作人员造成难以辨识的假象。此外,由于经验认识不足造成主观淡化或强调地质异常体存在的情况不可避免。所以,为了避免在盾构隧道时出现严重的事故,一般采用探测技术对盾构隧道区域内的孤石和基岩进行探测,探明孤石和基岩的具体位置、形状和尺寸后进行预处理,保证盾构的安全顺利通过。

目前,对孤石和基岩的探测时,单一的探测方法往往会造成误报率高、准确率低,甚至是漏报的现象,而利用物探技术在地面或井下开展地质构造探测和预报的多种探测方法联合探测,可实现孤石与基岩精细化探测,能够提高探测的准确性。

1.3 研究现状

在长期风化过程中,花岗岩岩体因结构和主要矿物成分的不同出现了差异风化,随着花岗岩地区大规模城市地铁建设的发展,花岗岩球状风化问题严重影响了工程建设进度、质量和安全^[1-2]。

李玉春^[3]、李乾^[4]等结合地铁工程的实际地质情况和孤石的成因,根据各方法对地层环境的影响、施工的风险和效果、成本等方面,根据孤石的大小、位置、形状等因素,确定具体处理方法,选用相应的孤石处理施工技术进行破除。

范验曾^[5]、郑礼均^[6]等分析盾构穿越孤石地层的难点和风险,通

过掌握工程地质情况,尽量做到有孤石预先处理,并制定最合理的处理方法。

陈开端^[7]采用“微动探测+地质钻探验证”的方法探测孤石,宗成兵、田恒星^[8]采用“微动探测+加密地质补勘钻探+地面钻孔爆破”的方法,贺朝荣^[9]采取“人工挖孔+劈石机劈裂地下孤石、孔位回填”的措施探测及处理地铁隧道盾构遇到的孤石。Shi Y. Z., Lin S. Z.^[10]等在花岗岩地区地铁建设中,建立了一套完整的探测和处理孤石的方法,包括“三维地震图像探测+用钻孔+处理巨石”确定地质密集区的边界。

党如姣^[11-12]、李洋、朱培民^[11]等针对南方地区花岗岩地层特征及城区环境特点,通过分析,认为浅层地震反射法对于南方城区的孤石探测是有效的。靳世鹤^[13]对广州地铁3号、5号线盾构施工遇到的特殊地质现象进行总结,在孤石地段依据现场情况,采用高压空气或液压锤进行孤石破碎处理。张帆^[14]以厦门地区地铁盾构掘进施工孤石爆破预处理为背景,系统地研究了沿海地区盾构隧道孤石预爆破破碎范围以及其装药结构的设计方法,形成了盾构隧道孤石预爆破破碎在不同工况下的设计方法。古力^[15]以广州地铁3号线某区间施工为例,提出了不能被盾构直接破碎孤石的预处理方法,有效地降低工程风险。

张恒、陈寿根^[16]、戴亚军^[17]等通过对比孤石多种探测方法和处理技术,根据隧道孤石的形成机理和分布规律,总结各优劣势,有针对性地将这些方法应用于不同的工程中。

曹权、项伟^[18]等以深圳地铁11号线某区间孤石探测试验为背景,用跨孔超高密度电阻率法研究两孔间的孤石分布情况,并验证该法的可行性。李术才^[19]、刘征宇^[19-20]等在试验的基础上,提出了地面物探普查与跨孔电阻率CT法相结合的孤石探测方案,并改进了电阻率跨孔CT的观测模式、反演成像方法等方面。刘宏岳、梁奎生^[21]从方法原理、震源选择、观测系统等方面分析海域地震反射波多次覆盖CDP叠加技术,通过钻探验证说明该技术在探测风