

轨道交通建造关键技术研究丛书

地铁车站岩溶高承压 强富水带处理关键技术

DITIE CHEZHAN YANRONG GAOCHENGYA
QIANGFUSHUIDAI CHULI GUANJIAN JISHU

宋卫强 刘文丽 姜在明 刘金明 著



张十信

中国铁道出版社有限公司
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO., LTD.

轨道交通建造关键技术研究丛书

地铁车站岩溶高承压强富水带 处理关键技术

宋卫强 刘文丽 娄在明 刘金明 著

中国铁道出版社有限公司

2019年·北京

内 容 简 介

依托武汉地铁 11 号线东段未来三路站工程,通过资料调研、水文地质详勘、现场试验、实际施工和效果评价相结合的方法,开展地铁车站岩溶高压强富水带处理关键技术的研究,在分析区域地质及水文特征基础上,进行了高压强富水带岩溶注浆材料试验和工艺试验,设计了岩溶处理方案,提出了岩溶高压强富水带处理工艺,借助于地质雷达探测进行了处理效果分析,建立了地铁车站岩溶高压强富水带处理关键技术。经地铁车站岩溶高压强富水带现场施工安全监测结果分析,验证了该技术的实用性,确保了未来三路站的施工安全,并取得了良好的经济社会效益。本书可作为城市轨道交通土建工程施工、设计、监理和建设管理技术人员以及高校和高职师生的参考用书、继续教育和选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

地铁车站岩溶高压强富水带处理关键技术/宋卫强等著. —北京:中国铁道出版社有限公司,2019.9

(轨道交通建造关键技术研究丛书)

ISBN 978-7-113-26096-5

I. ①地… II. ①宋… III. ①地下铁道车站-岩溶水文学-承载力-研究
IV. ①U231.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 164169 号

书 名: 轨道交通建造关键技术研究丛书
地铁车站岩溶高压强富水带处理关键技术
作 者: 宋卫强 刘文丽 娄在明 刘金明

策 划: 傅希刚 陈小刚

责任编辑: 冯海燕

编辑部电话: 010-51873017

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 孙 玫

责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社有限公司(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: 2019年9月第1版 2019年9月第1次印刷

开 本: 880mm×1230mm 1/32 印张: 5.25 字数: 136千

书 号: ISBN 978-7-113-26096-5

定 价: 30.00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	任立志	朱瑞喜	
副主任:和孙文	蒋宗全	靳利安	李 围
孟庆明	王 成	张业勤	赵春生
委员:白 伟	陈 娇	陈克强	刁目国
董发俊	段景川	段汝健	段志宏
房师涛	付艳军	高 朗	郭建光
郭振华	胡德华	惠世前	蒋 俊
李 博	李光耀	李彦臣	李 泽
梁晓亮	刘 邦	刘才平	刘福贵
刘金明	刘琨阳	刘文丽	刘学生
刘永波	娄在明	马健军	马克乾
毛宇飞	梅伏明	庞林军	祁海峰
秦 俊	任晓龙	沈国成	宋卫强
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	张应盛	周建伟

作者简介

宋卫强,男,1983年7月出生,河南省林州人,2004年毕业于黄河水利职业技术学院公路与桥梁专业,高级工程师,现任中国电建市政建设集团轨道工程公司总经理。先后参与了安徽沿江高速公路工程、陕西商界高速公路工程、山东德商高速公路工程、山东青岛滨海海底隧道连接线工程、山东青岛双积公路和海湾大桥红岛连接线工程、天津市外环线东北部调线工程、武汉地铁11号线工程、深圳地铁12号线工程,发表论文数篇,获授权实用新型专利10项,省部级工法8项。先后担任工程部部长、项目副总工、项目总工程师、项目经理、分公司副总经理、分公司总经理,曾荣获全国优秀项目经理、公司优秀项目经理、公司劳动模范、公司先进工作者、地铁优秀建设者和优秀管理者。

刘文丽,男,1983年11月出生,陕西省榆林人,2005年毕业于黄河水利职业技术学院公路与桥梁专业,高级工程师,现任中国电建市政建设集团轨道工程公司副总工程师、深圳地铁12号线土建七工区项目总工程师。先后参与了内蒙古海满一级公路工程、内蒙古拉黑公路工程、内蒙博牙高速公路工程、青岛女岛疏港公路工程、深圳地铁7号线工程、武汉地铁11号线工程、深圳地铁12号线工程,发表论文数篇,获授权发明专利1项、实用新型专利16项,公司级经济技术创新成果12项,省部级工法8项,中国施工企业管理协会科学技术创新成果2项,QC成果3项。先后担任工程部部长、项目总工程师、项目经理、分公司副总工程师,曾荣获公司先进生产工作者、公司青年岗位能手、公司优秀

总工程师、中电建南方公司先进个人、中电建武汉公司先进个人、公司优秀科技工作者、公司优秀项目经理、天津市职工技术创新先进个人。参与的科学技术研究项目“岩溶承压强富水地铁基坑施工关键技术研究”和“地下连续墙预制钢套筒导向嵌岩施工工艺”获得了中电建科学技术进步奖。

娄在明,男,1989年9月出生,山东省沂源人,2013年毕业于山东交通学院土木工程专业,工程师,现任中国电建市政建设集团轨道工程公司深圳地铁12号线土建七工区项目副总工程师。先后参与了深圳地铁7号线工程、武汉地铁11号线工程、深圳地铁12号线工程,发表论文2篇,获授权实用新型专利11项、省部级工法6项,参与的科学技术研究项目“岩溶承压强富水地铁基坑施工关键技术研究”获得了中电建科学技术进步奖。先后担任项目技术员、工程部长、副总工程师,荣获公司优秀科技工作者、公司青年岗位能手、中电建武汉公司先进个人。

刘金明,男,1983年4月出生,山东省诸城人,2006年毕业于三峡大学水利水电工程专业,高级工程师,现任中国电建市政建设集团轨道工程公司总经理助理,先后参与了陕西商界高速公路工程、福建武邵高速公路工程、山东青岛双积公路和海湾大桥红岛连接线工程、重庆梁忠高速公路工程、海南红岭灌区工程、武汉地铁11号线工程、深圳地铁4号线工程,发表论文数篇,获授权发明专利1项、实用新型专利11项,公司级经济技术创新成果11项,省部级工法6项,中国施工企业管理协会科学技术创新成果2项,QC成果3项。先后担任工程部部长、项目副总工程师、项目总工程师、项目经理、分公司总经理助理,曾荣获公司先进生产工作者、优秀工程技术人员、优秀科技工作者、优秀项目经理。

前 言

随着城市规模的日益扩大,各大城市的交通压力也陡然增加,各国政府在大力提倡环保出行、增加地面交通工具的同时,也在不断地发展地下交通。地铁作为城市轨道交通具有运量大、快速、准时、舒适、安全与环保等优点,成为了世界各国解决城市交通压力的首选方式。虽然我国的地铁起步较晚,但是经过 50 多年的飞速发展,城市地铁不管是技术上还是运营里程上,都已经处于世界领先的位置。截至 2017 年底,我国城市轨道交通开通城市 29 个,运营线路 118 条,总里程 3 862 km。到 2020 年,将有 33 个城市共投运 177 条地铁线,总运营里程将达到 8 500 km。

随着地铁建设规模不断扩大,遇到的地质条件也越来越复杂,如岩溶地层。我国岩溶分布广泛,除了西部的贵阳和重庆等地广泛分布岩溶外,广州、武汉、大连、无锡、南京、深圳和长沙等城市都遇到岩溶地质问题,岩溶条件下隧道工程施工难度大,特别是在城市地铁建设中因既有建构筑物密集导致岩溶隧道施工风险极高,需要研究提出具有针对性的岩溶处理措施,确保隧道施工期间及运营期间的安全。

武汉地铁 11 号线东段工程未来三路站为地下两层车站,总长约 327.6 m,标准段宽度 23.1 m,基坑深度 17~21 m,采用明挖法施工。未来三路站位于岩溶极为发育区,有溶洞的钻孔共 23 个,揭露溶洞共计 40 个,见洞率为 60.5%。

且岩溶呈上下珍珠串,左右连通,结成暗河。地下水丰富,且为承压水涌出地表 2.4 m,出水量为 11.2 L/s,全国罕见。

根据岩溶发育和地下水承压情况,未来三路站施工过程中容易在车站围护结构和基坑开挖施工过程中出现地面塌陷、围护结构失稳、基底岩溶突水等危险,施工难度大,安全风险高,对后期地铁运营也是极大的安全隐患。且在站点区域内有一处历史悠久的泉眼——活灵泉,是附近区域重要的生活水源,具有重要的历史文化价值,需进行专门保护,对设计和施工提出了重大挑战。因此,开展地铁车站岩溶高承压强富水带处理关键技术的研究具有重要的意义。

本书的主要内容:在分析区域地质及水文特征基础上,进行了高承压强富水带岩溶注浆材料试验和工艺试验;设计了岩溶处理方案,提出了岩溶高承压强富水带处理工艺,借助于地质雷达探测进行了处理效果分析,建立了地铁车站岩溶高承压强富水带处理关键技术;经地铁车站岩溶高承压强富水带现场施工安全监测结果分析,验证了该技术的实用性;最后分析了活灵泉的历史和现状,研究了活灵泉的形成机制和补给特征,提出了泉水保护与利用方案。

本书第 1 章、第 4 章、第 6 章和第 9 章由宋卫强撰写,第 3 章和第 5 章由刘文丽撰写,第 2 章和第 8 章由娄在明撰写,第 7 章由刘金明撰写,全书由刘文丽统稿。

撰写过程中,参阅了许多专家学者发表的论文,在此表示真诚的感谢!

李围教授对本书的撰写进行了指导,并提出了修改意见,中国铁道出版社有限公司的傅希刚、陈小刚和冯海燕编辑也对本书的修改提出了宝贵的建议,在此对你们的辛勤

劳动深表谢意!

由于时间仓促和水平所限,书中的错误或表述不妥之处,期望同行专家及读者提出批评意见和修改建议,以便在本书再版中修改和完善。

作者

2019年3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,但其轨道交通仅占公共交通比例刚过 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,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,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 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容和技术路线	10
第 2 章 依托工程概况	12
2.1 工程概况	12
2.2 工程地质与水文地质	14
2.3 车站设计	18
2.4 周围环境条件	21
第 3 章 区域地质及水文特征分析	27
3.1 未来三路站地质特征分析	27
3.2 岩溶地质特征勘察分析	32
3.3 水文特征分析	50
3.4 高承压强富水带车站施工难度分析	56
第 4 章 高承压强富水带岩溶处理方案设计	59
4.1 设计思路与要求	59
4.2 岩溶处理方案	62
4.3 溶洞处理要点	65
第 5 章 高承压强富水带岩溶处理试验	67
5.1 高承压强富水带岩溶注浆材料试验	67

5.2	钻孔灌注桩成桩试验·····	76
5.3	岩溶超前处理试验·····	79
5.4	止水帷幕与基底注浆试验·····	87
5.5	试验小结·····	88
第6章	岩溶高承压强富水带处理技术 ·····	89
6.1	处理范围及准备·····	89
6.2	处理工艺·····	93
6.3	处理效果分析·····	101
6.4	小结·····	108
第7章	车站岩溶高承压强富水带施工监测分析 ·····	110
7.1	监测项目及方法·····	110
7.2	监测要求·····	124
7.3	监测结果分析·····	127
第8章	泉水和地下水保护与利用 ·····	137
8.1	活灵泉的历史和现状·····	137
8.2	活灵泉的形成机制和补给特征·····	139
8.3	地下水及泉水保护与利用·····	140
第9章	主要研究成果 ·····	146
9.1	主要研究结论、创新点及研究成果·····	146
9.2	经济效益与推广应用分析·····	149
	参考文献 ·····	151

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

随着城市规模的日益扩大,各大城市的交通压力也陡然增加,各国政府在大力提倡环保出行、增加地面交通工具的同时,也在不断地发展地下交通。地铁作为城市轨道交通具有运量大、快速、准时、舒适、安全与环保等优点,成为了世界各国解决城市交通压力的首选方式。虽然我国的地铁起步较晚,但是经过 50 多年的飞速发展,城市地铁不管是技术上还是运营里程上,都已经处于世界领先的位置。截至 2017 年底,我国城市轨道交通开通城市 29 个,运营线路 118 条,总里程 3 862 km。到 2020 年,我国将有 33 个城市共投运 177 条地铁线,总运营里程将达到 8 500 km。

随着地铁建设规模不断扩大,遇到的地质条件也越来越复杂,如岩溶地层。我国岩溶分布广泛,除了西部的贵阳和重庆等地广泛分布岩溶外,广州、武汉、大连、无锡、南京、深圳和长沙等城市都遇到岩溶地质问题,岩溶条件下隧道工程施工难度大,特别是在城市地铁建设中因既有建构筑物密集导致岩溶隧道施工风险极高,需要研究提出具有针对性的岩溶处理措施,确保隧道施工期间及运营期间的安全。

2010 年 11 月 27 日上午,广埠屯站—虎泉站区间隧道大里程方向左线掌子面突然发生突泥(砂)涌水现象。由于该区间位于灰岩岩溶发育区域,溶蚀区域分布大小不等的溶洞,部分溶洞内填充黏土或砂,地下水位较高,开挖导致溶洞揭穿,发生了突泥(砂)涌水。由于采取了临时的封堵措施,因此险情得到了有效控制,初期支护稳定。28 日开会讨论提出了采用“五道扇形工字钢支撑与钢格栅拱架焊接

“喷射混凝土”的处理措施。而且,突泥(砂)涌水位置对应地表为建筑物,施工安全要求高,所幸的是此次险情未造成人员伤亡和机械损失。由此可见,岩溶条件下地铁工程施工安全风险大。

武汉地铁 11 号线东段工程未来三路站为地下两层车站,总长约 327.6 m,标准段宽度 23.1 m,基坑深度 17~21 m,采用明挖法施工。未来三路站位于岩溶极为发育区,有溶洞的钻孔共 23 个,揭露溶洞共计 40 个,见洞率为 60.5%。且岩溶呈上下珍珠串,左右连通,结成暗河。地下水丰富,且为承压水涌出地表 2.4 m,出水量为 11.2 L/s,全国罕见。

根据岩溶发育和地下水承压情况,未来三路站施工过程中容易在车站围护结构和基坑开挖施工过程中出现地面塌陷、围护结构失稳、基地岩溶突水等危险,施工难度大,安全风险高,对后期地铁运营也是极大的安全隐患。且在站点区域内有一处历史悠久的泉眼“活灵泉”,是附近区域重要的生活水源,具有重要的历史文化价值,需进行专门保护,对设计和施工提出了重大挑战。

1.1.2 研究意义

随着我国城市轨道交通的蓬勃发展,岩溶作为一种典型的不良地质现象,在地铁隧道及站点施工建设中的危害日益凸显,突水、突泥等地质灾害频发。目前,已开展地铁建设的城市中,广州、武汉和长沙等城市都遇到了岩溶地质问题,其中武汉市尤为突出。武汉市自北向南分布有 6 条碳酸盐岩条带,历史上曾发生过多处大规模的岩溶地面塌陷,建设及规划中的地铁 2 号线、3 号线、6 号线、7 号线、8 号线、11 号线、21 号线、27 号线及机场线都穿越岩溶条带,受岩溶地质的影响极大。

目前,国内已实施多起地铁站点及盾构区岩溶处理工程,但类似武汉地铁 11 号线东段未来三路站岩溶强发育且岩溶强承压和强富水特点的地铁站点建设工程尚属首次,而且还需要兼顾地下水环境和泉水通道保护的需求。因此车站设计和施工组织的难度极大,急

需对施工技术进行创新研究。

随着我国地铁建设进一步发展,地铁建设里程的不断增加,遇到类似高承压强富水岩溶地质的工程将会越来越多。因此,开展地铁车站施工中以高承压强富水区岩溶处理、地下水保护为目标的关键技术研究具有重要意义。

在岩溶区修建地铁,施工过程中突泥、突水、大型溶洞、塌方构成了严重的工程灾害,严重影响了施工进度,如果对岩溶地质灾害处治不当,将严重影响地铁施工安全和结构的稳定。针对未来三路站岩溶实际情况,建立一套系统的针对性较强的岩溶处治技术,其成果除了直接用于指导本标段车站的施工外,还可为今后类似工程的设计和施工积累极具价值的经验。

同时,随着我国城市轨道交通的持续发展,具有类似环境的工程将不断涌现,本研究成果将具有广阔的应用前景。也为集团公司大力开拓城市轨道交通市场提供技术支撑,从而产生良好的经济效益。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 研究现状

1. 关于岩溶隧道探测与设计技术

广州地铁2号线中山纪念堂—越秀公园区间隧道采用矿山法施工,该区间已发现溶洞约23个,最大的高达6~8m,最大延伸范围12.5m,其余溶洞则相对较小。溶洞主要位于隧道高度范围内,少量位于隧道顶底部,溶洞内大多充填有粉质黏土。罗俊成和史海欧^[1]根据该区间隧道岩溶分布特点,提出了“在地面先期对溶洞进行填充、隧道开挖前洞身两侧设止水帷幕”的岩溶处理技术,其处理范围为隧道周边3m、底板以下3~7m,该技术的应用成功解决了中山纪念堂—越秀公园区间岩溶矿山法施工技术难题。

黄焰和伍永胜^[2]结合广州地铁2号线三元里折返线工程,研究了岩溶条件下浅埋矿山法隧道技术,提出了采取各种水文、地质、物