



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

谭立新 李玉峰 雷明锋 刘 灿 著

复杂条件下城市轨道交通隧道 设计与施工技术

Design and construction
technology of urban
rail transit tunnels under
C omplicated
condtions



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

复杂条件下城市轨道交通隧道 设计与施工技术

谭立新 李玉峰 雷明锋 刘 灿 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书针对复杂条件下城市轨道交通隧道设计与施工技术进行了系统研究。全书共 8 章,分别介绍了城市轨道交通长大隧道线型设计与行车安全、暗挖车站隧道施工方法、超深明挖车站施工技术、城市闹区隧道微震爆破技术、岩溶富水区隧道注浆技术以及长大陡坡地铁隧道运营防灾技术等主要内容。

本书可供从事隧道及地下工程设计、施工和科研的专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂条件下城市轨道交通隧道设计与施工技术/谭立新等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.6

ISBN 978-7-114-12342-9

I. ①复… II. ①谭… III. ①城市铁路—铁路隧道—设计 ②城市铁路—铁路隧道—隧道施工 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 141894 号

书 名: 复杂条件下城市轨道交通隧道设计与施工技术

著 作 者: 谭立新 李玉峰 雷明锋 刘 灿

责任编辑: 温鹏飞 卢 珊

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

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: 9.25

字 数: 220 千

版 次: 2015 年 8 月 第 1 版

印 次: 2015 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12342-9

定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

作者简介



谭立新,1966年生,湖南湘乡人,教授级高级工程师,现任中国建筑第五工程局有限公司副总经理兼总工程师。长期从事土木工程施工与管理工作,先后主持或参与完成省部级科研项目等各类课题十余项,获省部级等各类科技进步奖多项,在各级学术期刊上发表科研论文十多篇,主编国家标准一部,出版专著一部,国家级工法评审专家。



李玉峰,1971年生,河北沧州人,高级工程师,一级建造师,现任中国建筑第五工程局有限公司基础设施事业部副总经理。从事铁路、公路、轨道交通、水利等行业的隧道与地下工程施工与管理工作二十余年,曾先后主持过特长隧道、高海拔隧道、高风险隧道的施工与管理工作,主持和参与多项科技研发工作,获省部级科技成果一等奖一项、二等奖两项,发表论文二十余篇,编撰省部级工法六项,授权国家专利十余项,出版学术专著一部。



雷明锋,1982年生,湖南祁东人,在站博士后,讲师。从事隧道及地下工程专业的教学与科研工作,主持或参与完成包括“973”项目在内的各类科研项目三十多项,发表学术论文七十多篇,其中四十多篇被SCI、EI收录,授权国家专利、软件著作权二十多项,参与出版专著两部,获省部级科技奖励四项。



刘灿,1969年生,湖南慈利人,高级工程师,全国优秀一级建造师。从事公路、铁路、市政、水利等行业的隧道与地下工程施工与管理工作二十余年,主持和参与过多项科技研发工作,获省部级科技成果三等奖一项,发表论文十余篇,获省部级工法两项,授权国家专利两项。

前 言

随着我国城市轨道交通的快速发展,山地城市的轨道交通工程也越来越多,与一般城市轨道交通相比,山地城市轨道交通所处的环境条件及地质条件更加复杂多变,地势起伏大,工程建设更加困难。轨道交通将面临长大坡度隧道运营风险控制、穿越复杂岩溶及高压富水断层以及超浅埋特大断面车站修建等难题。

本书依托重庆轨道交通中梁山隧道、小什字站、工贸站及南坪站等工程,经过5年的联合攻关,分别针对城市轨道交通长大隧道线型设计与行车安全、暗挖车站隧道施工方法、超深明挖车站施工技术、城市闹区隧道微震爆破技术、岩溶富水区隧道注浆技术以及长大陡坡地铁隧道运营防灾技术等问题开展了系统的研究。基于超大断面暗挖地铁车站多分部施工的特点,提出了考虑施工过程的结构荷载计算方法及计算公式。研发了组合型钢支撑开挖法及特大断面隧道立体式回旋分部开挖法,有效控制了特大断面隧道施工变形,保证了稳定性,加快了施工进度。创建了车站逆作法超高超大衬砌结构支模体系,解决了上下层同时施工、结构安全稳定性及防水质量控制的技术难题。研究提出了空气弹簧减震爆破技术及大直径螺旋掏槽爆破技术,有效降低了城市隧道施工爆破振动的影响,保护了周边构筑物的安全。分析了岩溶及高压富水断层特点,提出了信息化注浆技术,研改了高效快速的注浆设备和工艺,实现了快速注浆,减少了对环境的影响,保证了施工安全。采用设置中隔墙、无竖井的单洞双线隧道结构模式等措施,解决了山地城市轨道交通长大隧道运营通风和防灾疏散的难题。研究成果攻克了复杂条件下轨道交通隧道建造的关键技术难题,可为我国类似工程的设计施工提供参考。

本书在完成过程中,得到诸多领导和朋友的鼓励与支持,参考了国内外同行的有关论文、著作,在此一并表示最诚挚的谢意。

鉴于作者的水平及认识的局限性,书中难免还会存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者
2015 年 2 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	10
1.3 本书的主要研究内容	14
第2章 城市轨道交通长大隧道线型设计及行车安全	16
2.1 工程概况	16
2.2 城市轨道交通长大隧道线型及坡度设计	16
2.3 长大陡坡隧道行车安全问题研究	22
第3章 城市轨道交通暗挖车站隧道结构荷载计算	32
3.1 车站隧道常用荷载计算方法	32
3.2 考虑施工过程的车站隧道结构荷载计算方法	36
3.3 重庆轨道交通小什字车站过程荷载计算实例	40
第4章 城市轨道交通特大断面隧道施工技术	43
4.1 隧道洞口条石挡墙托置式大管棚进洞施工技术	43
4.2 城市风景区隧道出洞施工技术	45
4.3 斜井至正洞转换技术	48
4.4 特大断面回旋分部施工方法	56
4.5 组合型钢支撑施工技术	61
第5章 复杂周边环境下超深明挖隧道施工技术	66
5.1 概述	66
5.2 城市中心区基坑工程施工方案优化	66
5.3 基坑主体结构部分逆作法施工技术	67
5.4 超高超大侧墙无拉结单面支模体系	70
5.5 临近建筑物超深基坑支护技术与安全性评价	76
第6章 城市轨道交通隧道微震爆破施工技术	90
6.1 概述	90

6.2 大直径螺旋掏槽爆破施工技术..... 90

6.3 空气弹簧减震爆破技术..... 94

6.4 浅埋隧道减震爆破技术..... 98

第7章 隧道岩溶高压富水区信息化注浆技术..... 103

7.1 概述 103

7.2 城市隧道防排水标准 104

7.3 排水量监测 104

7.4 动水动态信息化注浆方法 106

7.5 注浆设备的改进及选型配套技术 114

7.6 无止浆墙深孔注浆技术 117

7.7 动水动态信息化注浆技术在岩溶高压富水段的工程应用 118

第8章 城市轨道交通长大隧道运营防灾设计..... 124

8.1 城市轨道交通长大隧道通风排烟技术 124

8.2 城市轨道交通长大隧道运营防灾技术 129

参考文献..... 138

第1章 绪 论

1.1 研究背景

重庆市已建成并投入运营的轨道交通线路有1号线、2号线、3号线和6号线,如图1-1所示。轨道分别采用两种制式:跨座式单轨,应用于2号线和3号线;传统轮轨铁路,应用于1号线和6号线。两种制式在建设成本、适宜环境、噪声控制、速度运力等方面各有不同。2004年开通运营的重庆轨道交通2号线,不仅是国内首条跨座式单轨线路,也是西部地区第一条城市轨道交通线路。

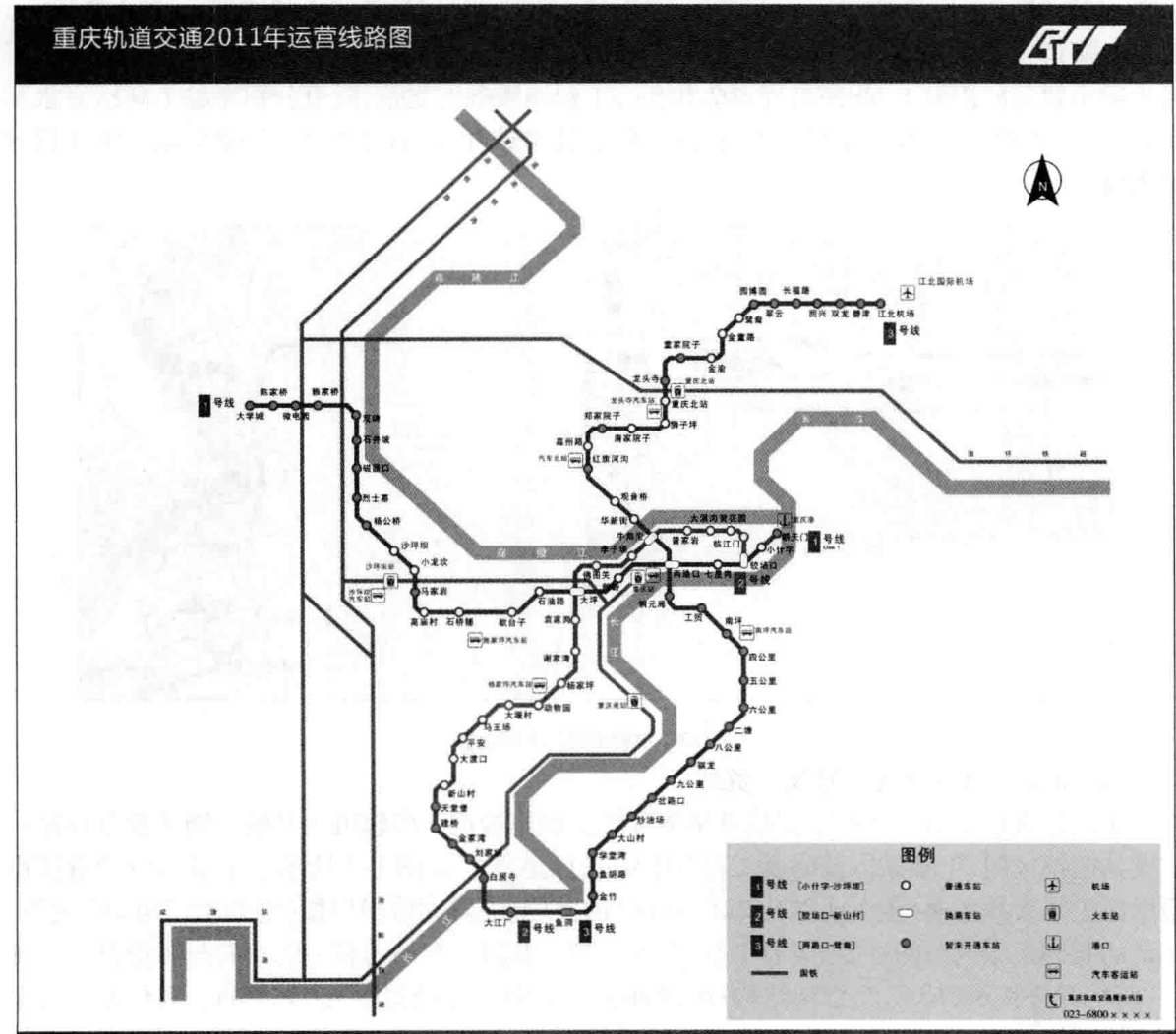


图 1-1 重庆已建轨道交通线路

重庆市地理条件复杂,以长江干流为轴线,众多支流汇入,主城区坐落在长江、嘉陵江汇合处,以及明月山、铜锣山、中梁山、缙云山之间,被两江四山分割成为五大部分。地势沿河流、山脉起伏,构成以山地、丘陵为主的地形状态,且地形高低悬殊,地貌结构分明,南部最高处为南桐矿区鸡公岭,海拔 1973m,东北部最低处是长寿大江水面,海拔仅 154m。重庆市的地质条件及环境条件复杂多变,轨道交通线路要穿越各种不良地质区,如高压富水岩溶区、高瓦斯地层、断层破碎带、软硬不均地层、软弱地层、房屋密集区等,工程建设难度极大。

1.1.1 依托工程概况

本研究依托在建的重庆市轨道交通 1 号线中梁山隧道、3 号线工贸站及南坪中心交通枢纽、6 号线小什字车站等工程进行。

(1) 重庆市轨道交通 1 号线中梁山隧道^[1]

中梁山隧道是重庆市轨道交通 1 号线(沙坪坝—大学城段)双碑北站—赖家桥站区间的一部分,两侧与高架桥线路连接,隧道进口起点里程为 K23 + 808.000,隧道出口终点里程为 K28 + 137.000,全长约 4329m,是目前国内城市轨道交通领域最长的山岭隧道,如图 1-2 所示。隧道进洞口位于沙坪坝区中梁山的东麓山坡,线路高程 232.060m,出洞口位于西永镇陈家湾社中梁山西麓的山坡上,线路高程 302.080m,工程地质条件复杂,隧道分别穿越了高压富水断层破碎带、各种溶洞、煤系地层等不良地质,施工技术难度大,不可预见性因素多成了本项目的最大特点。



图 1-2 中梁山隧道平面位置

(2) 重庆市轨道交通 3 号线工贸站

重庆市轨道交通 3 号线工贸站及相邻区间工程包括重庆市轨道 3 号线一期工程南坪站—工贸站暗挖区间、工贸站以及附属工程(出入口、风道等),如图 1-3 所示。工贸站位于重庆市南岸区工贸大楼主楼(混凝土结构 22F/-1F)的南侧,工贸大楼裙房楼(混凝土结构 2F)之下,车站的北侧是海铜公路、国际会展中心,东侧为南坪北路。车站总长 187.6m,分明挖及暗挖部分,明挖部分长 63.65m,为框架结构;暗挖部分长 129m,开挖宽度为 19.55m。南坪站—工贸站暗挖区间长 66.777m,为双洞双线暗挖隧道结构。

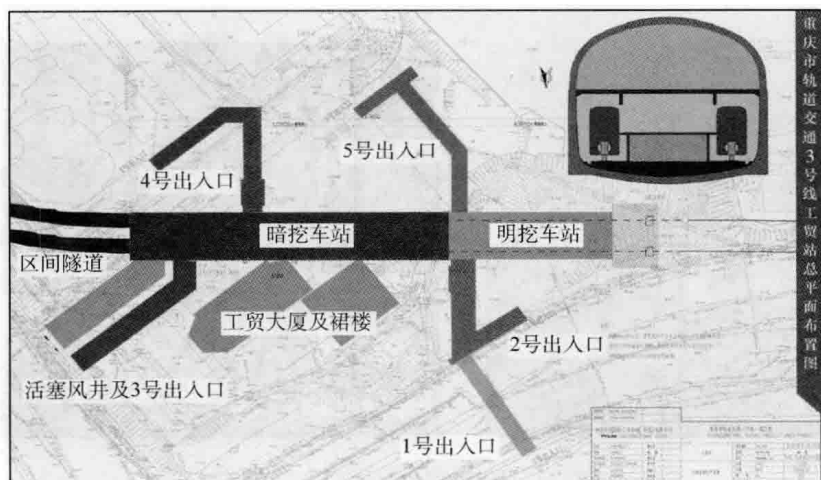


图 1-3 轨道交通 3 号线工贸站平面

(3) 重庆市轨道交通 6 号线小什字车站

小什字车站为 6 号线与 1 号线的换乘站,车站起点里程 YDK13 + 881.078, 终点里程 YDK14 + 138.626, 轨顶设计高程 214.568 ~ 214.052m, 总长 257.548m, 位于渝中半岛中央商务区。车站在里程 YDK13 + 978.209 处与 1 号线成十字相交, 1 号线在上, 6 号线在下, 上下轨面设计高程相差约 8.3m, 如图 1-4 所示。

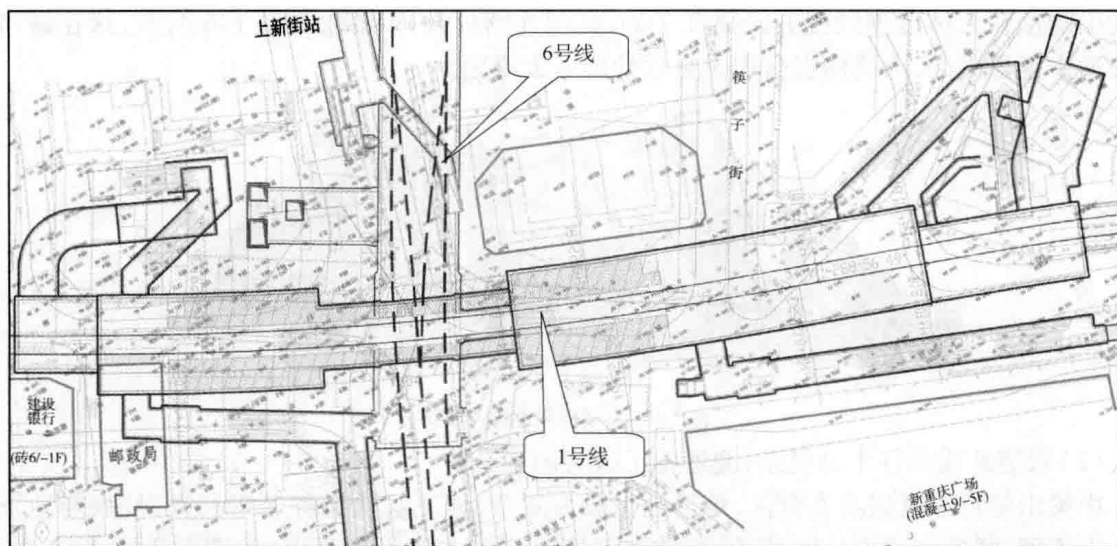


图 1-4 轨道交通 6 号线小什字车站平面

(4) 重庆市轨道交通 3 号线南坪中心交通枢纽

重庆南坪中心交通枢纽工程位于南坪长途汽车站至辅仁路口一带, 地处城市中心区, 建筑物密集。该工程的主要结构形式为地下四层(其中负一层为商业层, 负二层为商业及办公层, 负三层为设备层及轻轨交通层, 负四层为下穿车行道层) 框架剪力墙结构, 为全市首创的“四层立体交通体系”, 如图 1-5 所示。其基坑长 1500m, 宽 48m, 最大开挖深度 30m, 基坑周边高层建筑多, 且与临边建筑最小距离仅 1.5m。设计基坑为直立高切坡, 基坑支护形式主要是板肋锚杆挡墙和锚拉桩及桩间喷射挡墙相结合的形式。

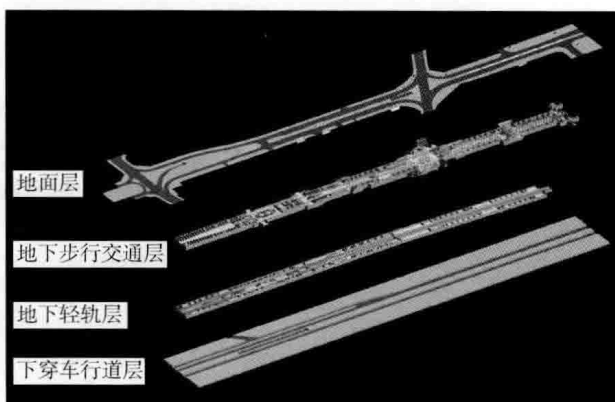
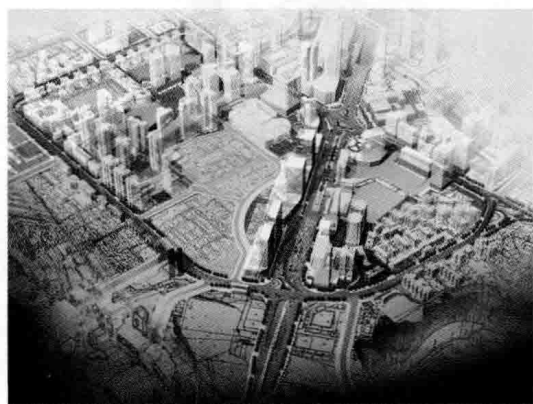


图 1-5 重庆南坪中心交通枢纽工程

1.1.2 工程建设难点

由于重庆市地貌、地质及环境条件复杂,轨道交通建设极为困难。通过分析依托工程的建设条件,总结出以下难点:

(1) 山地城市轨道交通长大坡度隧道运营防灾困难

重庆的地形地貌复杂,起伏变化频繁,城市轨道交通需要克服长大坡度安全运营的难题。中梁山隧道长大坡度连续提升距离 2.7km,高度连续提升达 70m,如图 1-6 所示,这在城市轨道交通中是最大的,为确保运营防灾是设计的一大难题。

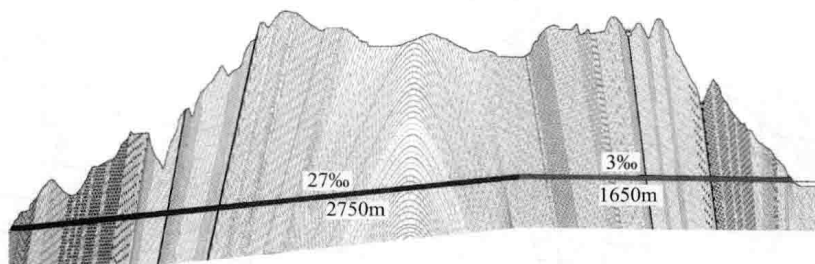


图 1-6 中梁山隧道长大坡度

(2) 岩溶地质条件十分复杂,隧道施工极为困难

中梁山隧道穿越岩溶发育区,地形地貌极为复杂,地下隐伏各种岩溶洞穴,地表与地下岩溶上下连通,隧道穿越十分困难,施工稍有不慎就可能造成灭顶之灾,如图 1-7、图 1-8 所示。世界上尚没有能准确预报岩溶地质的设备,溶洞、暗河、溶隙的位置无法预测,岩溶的形态及填充物性质无法确定,施工过程中存在很大的不确定性。

隧道还下穿上堰水库、余家湾水库,岩层裂隙发育,施工中地下水处治难度大、水保要求高,如何防止地下水系失衡和保护地表水是本工程面临的巨大挑战。

(3) 隧道穿越高压富水断层,注浆堵水十分困难

中梁山隧道穿越多条高压富水断层,管道岩溶极为发育,观音峡背斜轴部最大水压达 2.2MPa,最大流量达 26000m³/d,见图 1-9。传统的全断面注浆方式效率低、风险大,无法达到隧道施工预期的注浆效果,因此必须研究新的注浆方法,见图 1-10。



图 1-7 与落水洞相连的地下溶洞



图 1-8 隧道施工突水

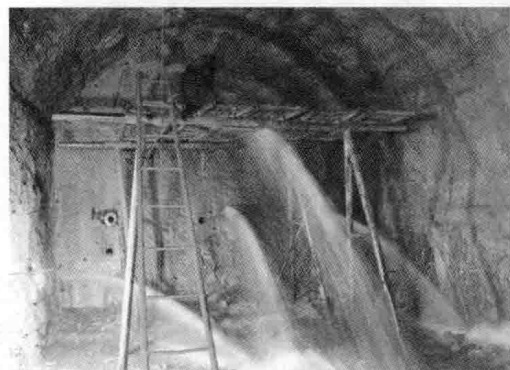


图 1-9 隧道穿越高压富水断层



图 1-10 上堵下排注浆效果

(4) 车站埋深浅、覆跨比小,开挖稍有不慎极易产生土体坍塌

小什字车站埋深 8.0 ~ 14.0m,而最大跨度将近 26m,覆跨比最小仅为 0.31m,为典型的超浅埋、超大断面隧道,见图 1-11。由于车站断面大、跨度大、覆跨比小,施工过程中上覆土体极易失稳,因此对施工方法的选择、施工过程中的变形控制等都十分困难。

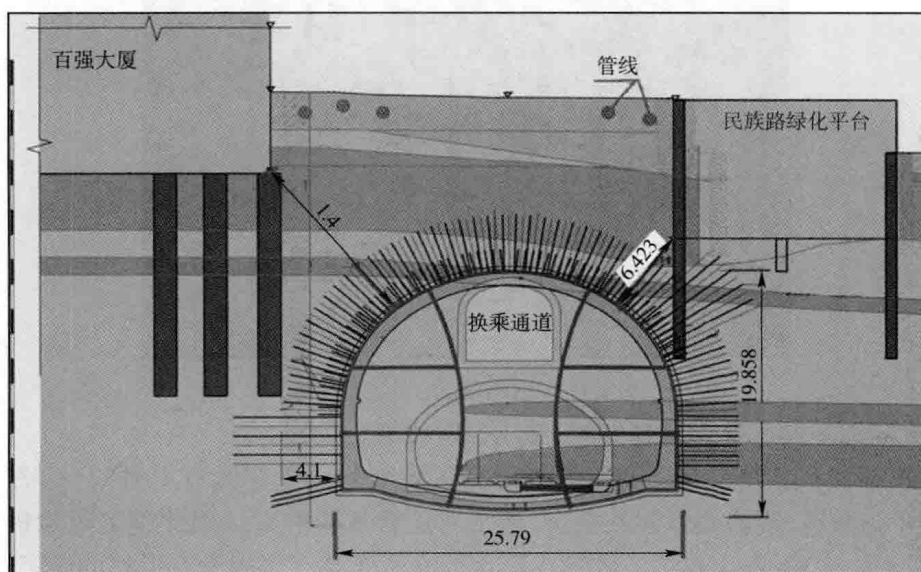


图 1-11 小什字站横断面(尺寸单位:m)

(5) 车站断面大、断面变化频繁,施工难度极大

小什字车站最大开挖断面达 430m^2 , 断面转换达 7 次, 见图 1-12, 拱形断面组成由小里程到大里程分布情况: A 型断面(轮廓宽 19.818m , 高 17.772m)→B 型断面(轮廓宽 25.570m , 高 19.608m)→C 型断面(轮廓宽 16.1m , 高 10.596m , 换乘通道在 C 型断面上部)→B 加强型断面(轮廓宽 25.970m , 高 20.008m)→A 型断面(轮廓宽 19.818m , 高 17.772m)。埋深情况: A 型断面埋深 $9 \sim 14\text{m}$; B 型断面(B 加强型断面)埋深 $9 \sim 13.5\text{m}$; 换乘通道埋深约 11.2m 。

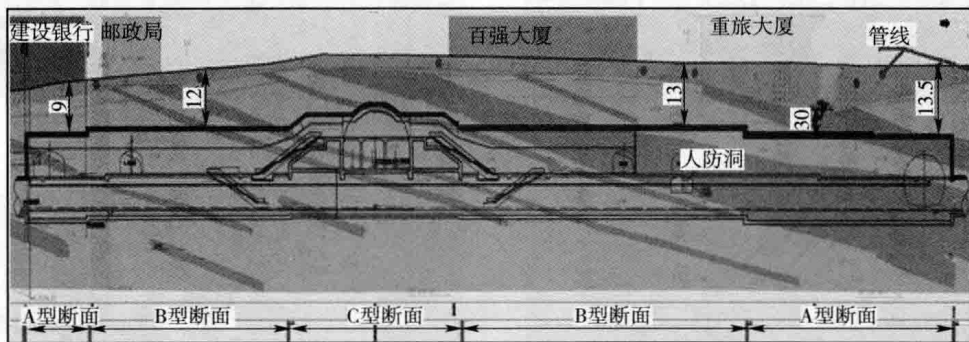


图 1-12 不同的断面形式(尺寸单位:m)

(6) 周边建筑物密集,施工爆破控制难度极大

小什字站周边建筑物密集、文物古迹遍布、地下管线网复杂,而且埋深仅 $8 \sim 14\text{m}$, 开挖边线距高层建筑基础仅 2.8m , 建(构)筑物保护难度大, 见图 1-13。工贸站暗挖段($\text{SK}5 + 684.639 \sim \text{SK}5 + 808.589$)位于工贸大厦裙房之下, 距北侧工贸主楼高层建筑物较近(图 1-14), 最小距离为距该高楼基础近 6m , 且车站开挖断面较大, 跨度约 22m , 高度 19m , 施工过程中极易对周边建筑物产生影响, 暗挖段总长 123.96m 。如何保护建筑物安全, 控制施工爆破的影响是工程施工的难点。

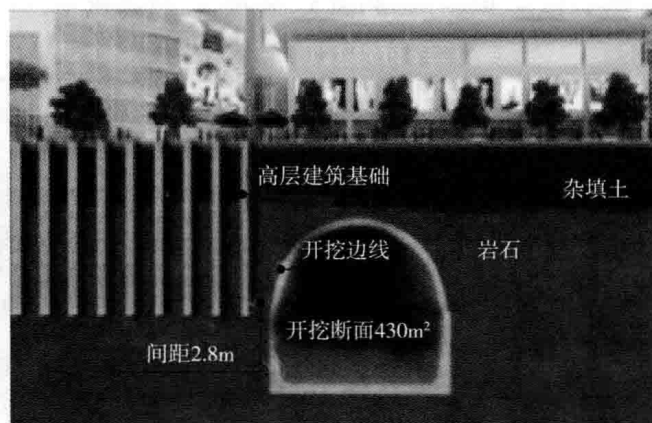


图 1-13 小什字站近距离穿越桩基

(7) 特大断面车站下穿运营地铁线,施工风险极大

小什字车站为 1 号线与 6 号线十字交叉换乘站, 6 号线下穿既有 1 号线, 见图 1-15, 施工的时空效应十分显著, 受力体系转换复杂, 施工对运营线影响大。因此施工风险极大, 稍有不慎, 就会造成围岩失稳, 甚至塌方。如此大断面的交叉车站在国内没有成熟的施工经验可以借鉴, 选择适合的开挖方法十分关键。

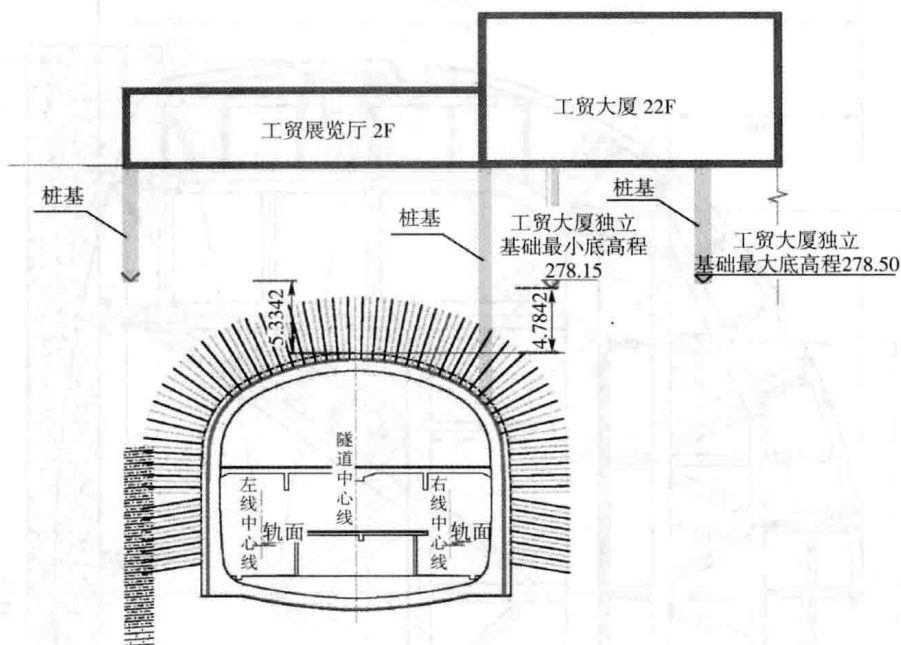


图 1-14 工贸站近距离穿越房屋建筑(尺寸单位:m)

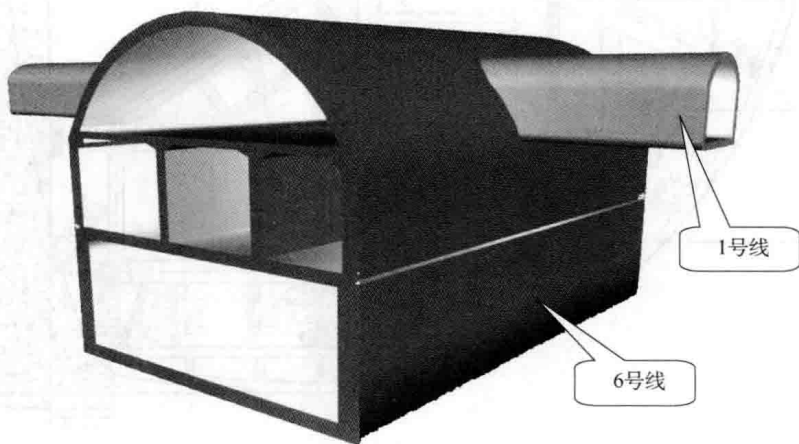


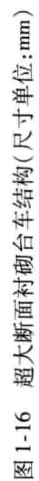
图 1-15 立体交叉车站示意图

(8) 超大断面车站衬砌结构施工十分困难

小什字车站及工贸车站均为超大断面,最大断面达 430m^2 ,最大宽度达 25.57m ,最大高度达 19.61m ,车站衬砌采用整体移动式液压模板衬砌台车施工,见图 1-16,如此大型的整体移动台车在国内隧道施工中使用尚属首次,在台车的设计、制作、拼装和使用过程中,如何保证台车的稳定及衬砌的施工质量是一大难点。

(9) 隧道洞口环境复杂,进出洞施工风险高、难度大

小什字项目周边环境复杂,高楼林立,交通繁忙,见图 1-17,按原设计采用 20m 深的竖井进入暗挖隧道施工,成本高且施工难度大;隧道出洞口位于风景名胜区洪崖洞,洞口距地表高差达 19m ,施工极易扰动洞口周边大型孤石,酿成事故,威胁风景区人员安全。



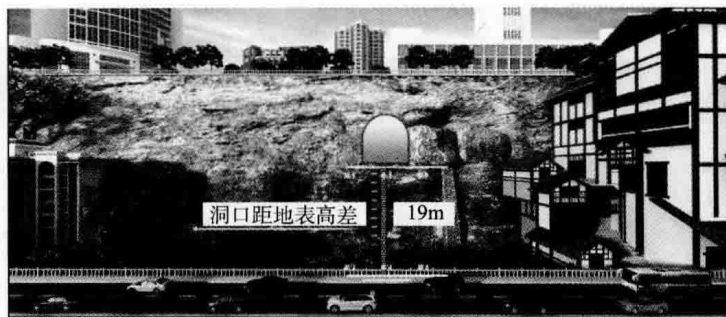


图 1-17 隧道洞口位置

(10) 工程规模大,环境复杂,施工组织难度大

依托工程位于城市中心区,施工干扰大,场地狭小,交通繁忙,出渣和进料受到很大限制。工程线路长,体量大,有多个出渣通道口、出入口,施工工区分散,施工中的安全、环保、资源配置及施工组织要求高,难度大。

1.1.3 研究的必要性

(1)城市轨道交通地铁车站施工主要面临特大断面隧道开挖的难题,需要对隧道开挖和支护的主要设计参数、施工方案、施工工艺进行研究、试验和验证,并根据试验结果进行调整和优化,确保隧道施工安全和支护结构稳定,真正做到动态设计、动态施工。

(2)传统注浆方式费时、费力、效率低,特别在大水量、高水压地区,注浆效果往往不佳。因此,研究一种动态动水地区高效率的注浆方法,以及对注浆设备进行研改十分必要,以解决岩溶高水压区施工速度慢、易发生突水、坍塌现象的难题。

(3)轨道交通1号线通过中梁山隧道衔接中梁山两侧高架区间,中梁山以东地区地面高程约为220m,以西地面高程约为290m,两侧高程相差约70m。因此,合理线型及坡度的选择,以及适合于中梁山隧道防灾模式的确定是中梁山隧道必须解决的首要难题。

(4)常规的钻爆法在城市隧道施工中有很大局限性,尤其是浅埋暗挖隧道施工,地下管线和邻近建(构)筑物对振速控制要求极高,而非爆破施工方法仍有很多弊端,对周边环境的影响大且爆破工效较低,为解决闹市区爆破振动这一难题,并力图缩短工期,实现爆破的高效经济,以南坪中心交通枢纽工程及重庆轻轨1号线8标为试点,进行山地城市建筑密集区地下工程爆破技术的创新研究。

(5)在超大断面隧道二次衬砌施工中,目前大多数采用的是整体模板衬砌台车,它既要保证隧道轮廓线型,又要保证二次衬砌结构观感效果,无论在台车设计、制造,还是在现场拼装、就位、使用等方面都会面临诸多问题。需通过技术研究,研制出功能齐全、操作方便、安全可靠的多断面通用化整体移动式液压模板衬砌台车,以解决浅埋超大断面隧道二次衬砌整体浇筑的施工难题。

(6)通过科研攻关和试验开发新方法、新材料、新技术和新工艺,以解决隧道施工中存在的难题,为优化设计参数和施工方案及工艺提供依据,从而保证施工的安全、质量和进度,并且收集和积累数据,为类似工程提供参考和借鉴。

(7)重庆市轨道交通远期计划修建十七条线及一条环线(见图1-18),有大量的超大断面

暗挖车站和复杂条件隧道,因此,该课题的研究成果具有巨大的应用前景。

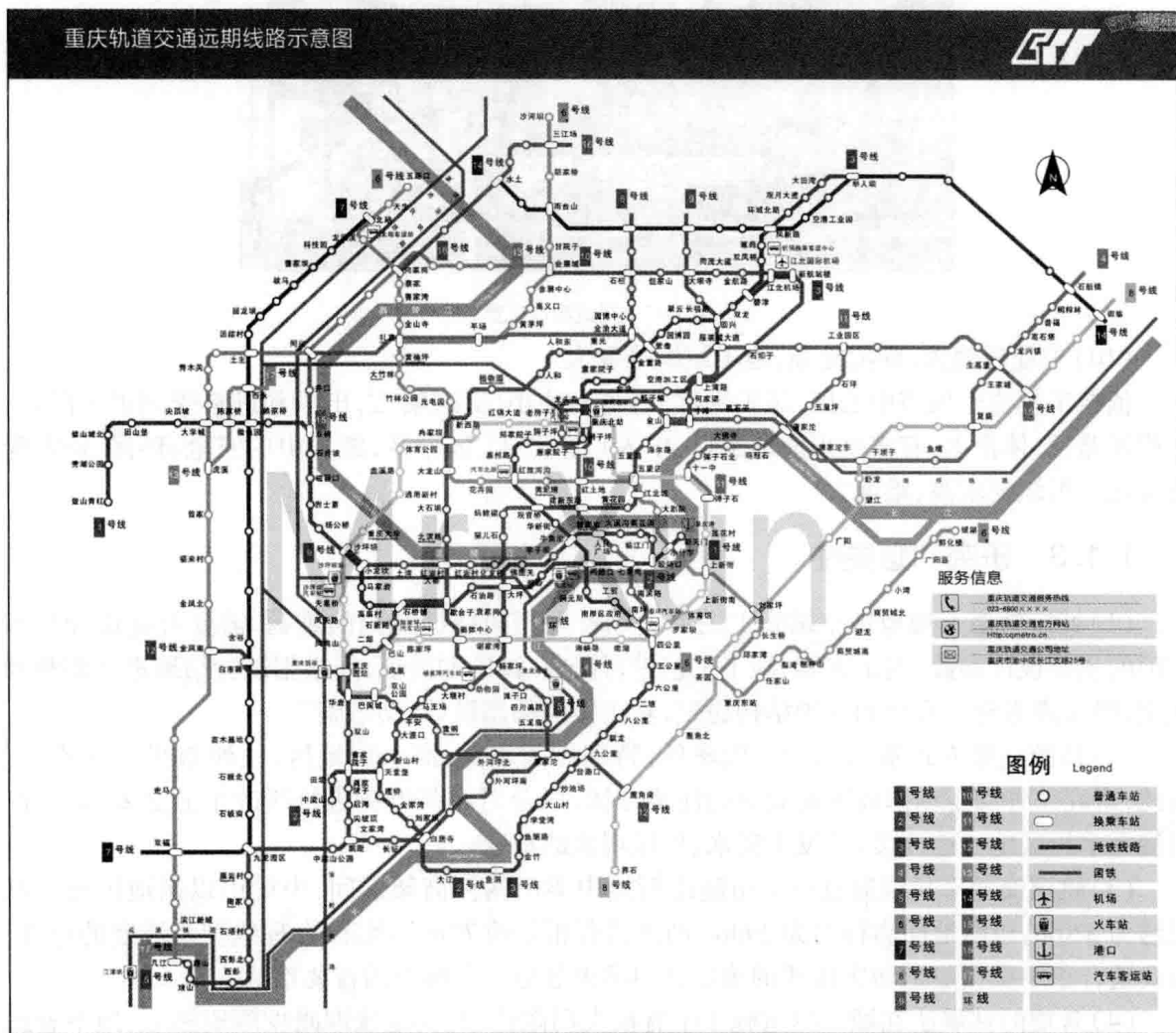


图 1-18 重庆轨道交通远期规划

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩溶隧道修建技术

岩溶地区因受其特殊的地质构造影响,往往具有高水压、富水、溶洞及断层的特征。因此,在岩溶地区隧道施工过程中,经常出现无法预料的地质灾害,如突水、突泥、坍塌、岩爆和有害气体等。灾害一旦发生,轻则冲毁机具,淹没隧道,正常施工被迫中断;重则造成重大的人员伤亡,产生巨大的经济损失,甚至有些地下工程会因此而被迫停建或改线^[2]。如京广线大瑶山隧道班古坳竖井平导施工至 K1994+213 时,突发携带大量泥砂的岩溶水,造成竖井被淹,洞内设备被淹没,中断施工达一年之久^[3-4];成昆线沙木拉达隧道总涌水量最大达 19550m³/d,突水量最大达 36.11m³/min,曾造成停工达 32d 之久;京广线南岭隧道曾发生 3 次较大突泥共