



高速铁路

大断面城市隧道

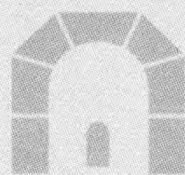
施工技术研究

GAOSU TIELU
DA DUANMIAN CHENGSHI SUIDAO
SHIGONG JISHU YANJIU

吴波 著



时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社



高速铁路

大断面城市隧道

施工技术研究

GAOSU TIELU
DA DUANMIAN CHENGSHI SUIDAO
SHIGONG JISHU YANJIU

吴波 著

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路大断面城市隧道施工技术研究/吴波著. —
合肥:安徽科学技术出版社,2016.5
ISBN 978-7-5337-6921-5

I. ①高… II. ①吴… III. ①高速铁路-铁路隧
道-城市隧道-隧道施工-研究 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 011459 号

高速铁路大断面城市隧道施工技术研究

吴 波 著

出版人:黄和平 选题策划:陶善勇 吴 夙 责任编辑:吴 夙 陶善勇
文字编辑:戚革惠 责任校对:王 静 责任印制:梁东兵
封面设计:王 艳

出版发行:时代出版传媒股份有限公司 <http://www.press-mart.com>
安徽科学技术出版社 <http://www.ahstp.net>

(合肥市政务文化新区翡翠路 1118 号出版传媒广场,邮编:230071)

电话:(0551)63533323

印 制:合肥华云印务有限责任公司 电话:(0551)63418899

(如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂商联系调换)

开本:787×1092 1/16

印张:29

字数:742 千

版次:2016 年 5 月第 1 版

印次:2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5337-6921-5

定价:118.00 元

版权所有,侵权必究

序

21 世纪是地下空间作为资源开发的世纪,这已成为全球的普遍共识。地下空间的开发利用已经成为 21 世纪的一个重大技术领域。

地下工程是公路、铁路交通路网和城市地铁的重要组成部分,具有占地少、无污染、与自然环境协调等优点,被誉为“绿色工程”。地下工程在可持续发展战略中的重要性已成为国际普遍共识。目前,中国已成为世界上地下工程数量最多、规模最大、建设发展最快的国家。随着我国经济的快速发展、城市化进程的加快和国家“一带一路”战略的实施,必将有大量的高速铁路隧道、高速公路隧道、地下铁道和地下综合管廊等亟待建设的工程,因此,未来若干年都将是我国地下工程建设的高潮期。

据规划,至 2040 年,我国主要城市都将通过高速铁路连接起来,高速铁路进入城市的时代已经到来。高速铁路采用隧道方式进城,具有抗震性好、节地、环保等诸多优点,因此,针对高速铁路下穿城市的关键技术进行研究,对促进我国高速铁路技术进步、城市安全快速发展以及打响我国高铁技术的国际品牌具有重大意义。

吴波教授长期从事城市地下工程技术与实践工作,是一位快速成长、具有较大发展潜力的杰出地下工程科技工作者,他在施工力学与安全风险管控研究方面造诣深厚。吴波教授所著的《高速铁路大断面城市隧道施工技术研究》一书,以金沙洲隧道和浏阳河隧道工程作为示范,系统地研究了高铁城市隧道高效施工、地层变形控制和施工安全风险管理等最为关键的技术难题,开发了多项国家级和省部级工法,获得了多项专利、著作权等,首次形成了高铁城市隧道施工成套技术,技术经济效益显著,推广应用前景好,研究成果具有重要的现实意义和学术价值。该书逻辑性强、知识系统、图文并茂,是作者多年的研究探索和宝贵实践经验的总结,相信该书对推动我国地下工程技术进步必将做出贡献。

高铁城市地下工程在蓬勃发展和走向世界的同时,还将面临很多挑战,实现工程本质安全、保证良好运营条件和满足耐久性要求的任务依然艰巨。希望广大地下工程科技工作者不断地努力和创新,早日实现我国地下工程强国梦,这是我的殷切期盼。谨以此序向本书作者和读者致意。

中国工程院院士

杨永斌

前 言

至 2040 年,我国主要城市都将通过高速铁路连接起来,因此高速铁路进入城市的时代已经到来。与路桥相比,高速铁路采用隧道方式进城,具有抗震性好、节地、环保等诸多优点。但我国高速铁路建设正处在大规模发展的初期,对于“高铁城市隧道”这一新的工程现象缺乏工程经验,因此,针对高速铁路下穿城市的关键技术进行研究,对促进我国高速铁路技术进步和城市发展具有重大意义。

2009 年开通运营的武广高速铁路是我国首条最长、设计时速最快的高速铁路,在我国高速铁路建设史中具有里程碑意义。金沙洲隧道和浏阳河隧道是武广高速铁路分别下穿广州市区和长沙市区的城市隧道,是我国也是世界上首次在城市复杂环境和复杂地质条件下长距离下穿的特大断面隧道。本书以武广高速铁路金沙洲隧道和浏阳河隧道两个具有代表性的高铁城市隧道作为工程载体,系统地研究了高铁城市隧道高效施工、地层变形控制和施工安全风险管理等关键的技术难题,并系统地形成了高铁城市隧道施工成套技术,不仅对工程本身具有重要指导意义,而且具有重要的现实意义和学术价值,技术经济效益显著,推广应用前景好,对推动我国地下工程技术进步具有重要意义。

本书以金沙洲隧道和浏阳河隧道工程作为示范,所形成的研究成果先后获中国铁路工程总公司科技成果一等奖、中国建筑业施工协会科技创新一等奖、安徽省科技成果一等奖、国家新技术应用示范工程、中国土木工程詹天佑大奖等荣誉,并形成了多项国家和省部级工法,还获得了多项专利、著作权等。本书得到了国家自然科学基金项目(51478118)和福建省自然科学基金项目(2014J01170)的资助。

全书分 5 篇共 21 章,第 1 章、第 2 章主要介绍了高铁城市隧道工程和研究概况,第 3 章、第 4 章主要介绍了高铁大断面城市隧道斜井和竖井等辅助坑道施工技术,第 5 章至第 11 章主要介绍了大断面隧道快速高效施工方法及应用,第 12 章至第 17 章主要介绍了富水岩溶地层隧道施工技术、防排水技术及渗漏治理,第 18 章至第 21 章主要介绍了高铁大断面城市隧道安全风险管理技术及应用。

本书参阅了大量相关文献和研究成果,在此谨向这些文献和成果的作者表示感谢。在本书的撰写过程中,中南大学彭立敏教授、阳军生教授、杨小礼教授、施成华教授、安永林博士、陈洁金博士等,中铁四局集团公司伍军总工程师、杨仲杰副总工程师、王圣涛副总工程师、周振强教授级高工、罗传义教授级高工、薛模美教授级高工、孙爱军教授级高工等,合肥工业大学朱大勇教授、

钱德玲教授、白瑞雪硕士、赵文娟硕士等,福建工程学院蒋新华校长、吴仁华书记、蔡雪峰教授、黄建华教授、臧万军副教授、杨枫副教授、李志高副教授、王启云博士、张丙强博士、赵卫华博士、崔双双博士、姚志雄博士、陈军浩博士、李静高工等,广西大学邓志恒教授、周东教授、梅国雄教授、蓝文武副教授等,都给予了许多指导、帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

《高速铁路大断面城市隧道施工技术研究》一书中涉及的研究内容,尽管形成了很多创新成果,但许多问题还需要在实践中进一步探索和深化研究,加之时间和水平有限,因此书中难免有疏漏与不足之处,恳请大家批评指正。

吴 波

2015 年 12 月于福州

目 录

第 1 篇 工程与研究概述	1
第 1 章 工程概述	3
1.1 工程背景	3
1.2 工程简介	3
1.3 工程技术特点与难点	6
1.4 工程对策	7
第 2 章 研究概述	8
2.1 任务来源及组织研究过程	8
2.2 研究规划与总体构思	9
2.3 主要研究内容	10
2.4 主要技术创新	11
2.5 主要研究成果	13
2.6 与国内外同类研究的综合比较	14
2.7 第三方评价、推广应用情况与实施效果	15
2.8 社会、经济效益	16
第 2 篇 辅助坑道施工技术研究	17
第 3 章 斜井施工技术研究	19
3.1 斜井的优化设计	19
3.2 斜井施工主要技术	21
3.3 总结	31
第 4 章 竖井施工技术研究	33
4.1 概述	33
4.2 复合地层深大竖井支护方案研究	35
4.3 复合地层深大竖井施工技术研究	43
4.4 深大竖井快速出碴技术研究	66
4.5 基于 QC 法的深大竖井施工管理技术研究	73
4.6 总结	79
第 3 篇 大断面隧道快速施工方法研究	81
第 5 章 大断面隧道施工工法优化	83
5.1 隧道施工工法概述	83
5.2 大断面隧道施工工法与机械化、工期的矛盾	84

5.3	软弱围岩大断面隧道施工工法的选择	85
5.4	工法优化的稳定性分析	87
5.5	施工工法的比较	104
5.6	总结	106
第6章 大断面隧道大管棚超前支护技术		107
6.1	概述	107
6.2	管棚的分类、作用及其应用条件	107
6.3	加密大管棚超前支护方案的确定	110
6.4	加密大管棚施工技术	114
6.5	金沙洲隧道大管棚预支护技术的应用	118
6.6	总结	121
第7章 隧道动态分部开挖工法研究		122
7.1	概述	122
7.2	隧道动态分部开挖工法及其力学机制分析	126
7.3	隧道动态分部开挖工法力学的平面数值分析	144
7.4	隧道动态分部开挖工法力学的三维分析	160
7.5	隧道动态分部开挖工法与其他工法的对比研究	177
7.6	隧道动态分部开挖下穿排水箱涵段	188
7.7	隧道动态分部开挖工法的现场监测	194
7.8	总结	204
第8章 偏压段进洞施工技术		206
8.1	地质概况	206
8.2	地形地貌	206
8.3	隧道进口偏压段施工工法的比选和论证	208
8.4	现场监测与施工效果评价	213
8.5	总结	216
第9章 隧道下穿水塘段施工技术		217
9.1	工程概况	217
9.2	施工方案及方法	218
9.3	穿越水塘段隧道施工数值分析	222
9.4	总结	227
第10章 隧道下穿立交枢纽施工技术		229
10.1	工程概况	229
10.2	施工技术方案的优化和比选	231
10.3	隧道衬砌结构	237
10.4	隧道现场监测及分析	238
10.5	总结	246
第11章 大断面隧道铣挖法施工技术		247
11.1	铣挖法国内外运用现状	247
11.2	铣挖法施工机械设备配套	247
11.3	铣挖法工艺试验研究	248

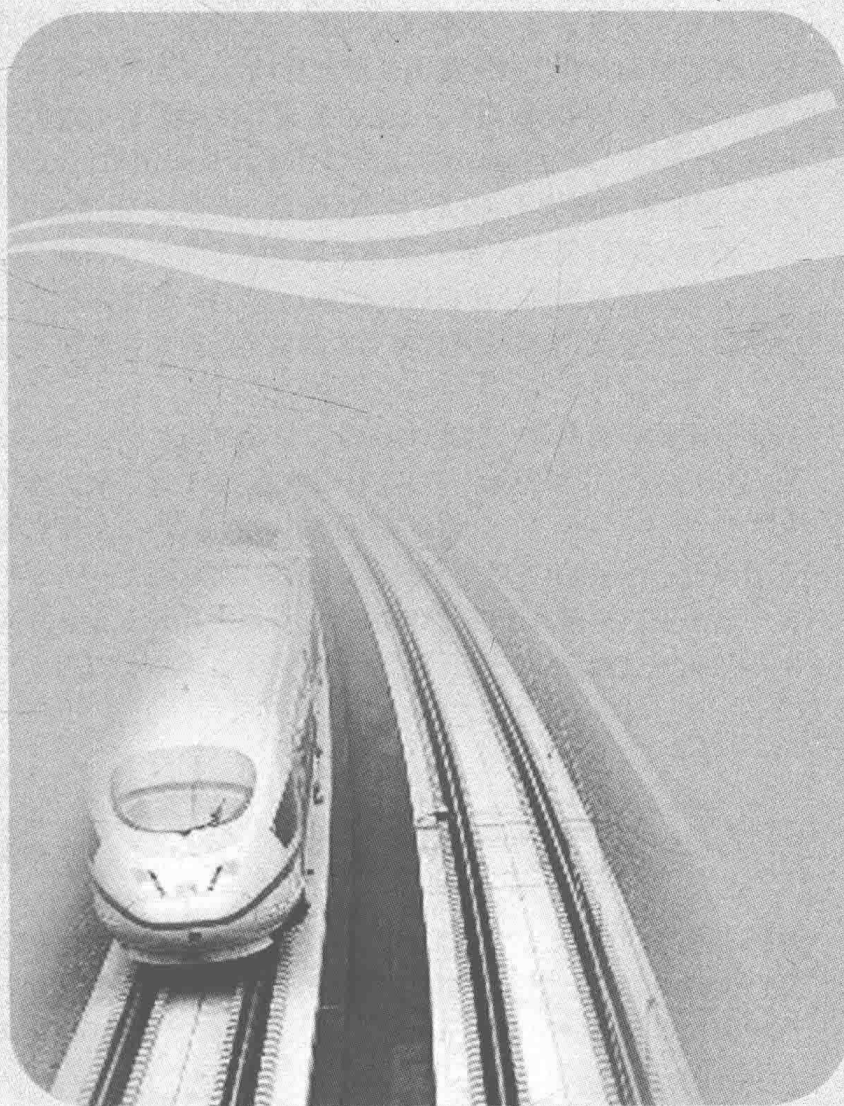
11.4	铣挖法施工技术优化研究	256
11.5	施工效果检验	263
11.6	总结	263
第4篇	岩溶地层施工技术研究	267
第12章	H型注浆加固技术	269
12.1	岩溶发育地段辅助工法的优化	269
12.2	浅埋岩溶地层 H 型止水帷幕和加固技术	270
12.3	旋喷桩、搅拌桩施工技术	273
12.4	注浆技术	275
12.5	H 型注浆技术分析和效果	276
12.6	金沙洲隧道岩溶地层 H 型辅助工法的实施	277
12.7	总结	278
第13章	软弱地层改良加固技术	280
13.1	概述	280
13.2	淤泥质地层改良加固室内试验	280
13.3	淤泥质地层改良加固现场施工技术	285
13.4	淤泥质地层改良加固效果	288
13.5	总结	289
第14章	岩溶地层大断面隧道施工技术	290
14.1	工程概况	290
14.2	岩溶发育形态特征及规律	291
14.3	施工过程中出现的问题	291
14.4	岩溶发育地段施工方案的选择	292
14.5	岩溶发育地层施工技术和工法	293
14.6	总结	307
第15章	隧道防排水技术	309
15.1	概况	309
15.2	防排水设计	309
15.3	初期支护背后回填注浆	310
15.4	防排水材料及性能指标	311
15.5	隧道防水层施工技术	312
15.6	隧道排水系统施工技术	314
15.7	防水混凝土施工	317
15.8	二次衬砌背后回填注浆堵水技术	318
15.9	渗漏水病害处理措施	318
15.10	总结	321
第16章	岩溶地层围岩注浆防水技术	322
16.1	围岩注浆防水理论分析	322
16.2	围岩注浆防水方法研究	325
16.3	围岩注浆防水参数研究	329

16.4	注浆材料比选试验分析	332
16.5	注浆质量检测标准分析	337
16.6	工程实例	338
16.7	总结	344
第 17 章 衬砌混凝土裂缝渗漏水治理技术		345
17.1	隧道衬砌裂缝成因分析	345
17.2	隧道及地下工程衬砌混凝土结构裂缝渗漏水特征分析	351
17.3	注浆法治理衬砌混凝土结构裂缝渗漏水的机制	353
17.4	注浆法治理渗漏水的适用条件	354
17.5	注浆法治理渗漏水施工工艺研究	355
17.6	现场试验及工程实例	357
17.7	隧道典型部位渗漏水整治实施方案	362
17.8	总结	367
第 5 篇 城市隧道施工安全风险管理		369
第 18 章 城市隧道施工安全风险管理基础		371
18.1	城市隧道施工安全风险管理基本理论	371
18.2	城市隧道施工安全风险等级标准	381
第 19 章 城市隧道施工安全风险管理技术		385
19.1	规划阶段风险管理技术	385
19.2	可行性研究阶段风险管理技术	388
19.3	勘察与设计阶段风险管理技术	393
19.4	招投标与合同签订阶段风险管理技术	403
19.5	施工阶段风险管理技术	405
第 20 章 城市隧道施工安全风险管理应用研究		414
20.1	工程简介	414
20.2	隧道施工安全风险管理内容	414
20.3	隧道主要安全风险分析	415
20.4	下穿立交桥施工安全风险管理	416
20.5	下穿地下管线施工安全风险管理	424
20.6	施工安全风险管理软件开发	428
20.7	总结	432
第 21 章 城市基坑安全风险管理应用研究		433
21.1	基坑施工风险评估的意义	433
21.2	金沙洲隧道淤泥质地层明挖基坑工程概况	433
21.3	深基坑风险因素辨识	439
21.4	深基坑风险发生概率估计	443
21.5	深基坑风险发生后损失估计	449
21.6	金沙洲隧道明挖段深基坑风险评估结论	452
21.7	金沙洲隧道明挖段深基坑风险控制措施	452
参考文献		454

GONGCHENG YU YANJIU GAISHU

第1篇

工程与研究概述



第 1 章 工程概述

1.1 工程背景

根据我国铁路网发展规划,到 2020 年,我国将建成高速铁路(简称“高铁”) 5×10^4 km 以上,实现北京到全国绝大部分省会城市形成 8 h 以内交通圈、邻近的省会城市形成 1~2 h 交通圈、省会与周边城市形成 0.5~1 h 交通圈的目标,将会使越来越多的人享受高铁带来的便捷。因此,高铁进入城市的时代已经到来。

高铁线路设计标准高、轨面平顺性要求严。高铁进入城市采用路基时具有控制沉降难度大且增加了市区平交道口等缺陷,为了弥补这些缺陷,设计者常常采用高架桥上跨或隧道下穿两种方式。高架桥在城区上跨时,具有影响城市发展规划和景观协调、占用地面空间和土地资源多、建(构)筑物征拆量大、噪声污染较严重、对周围居民的生活和城市功能影响较大、不利于抗震等弊端。而高铁进入城市选用隧道下穿的方式时,具有少征拆、环保、节地、不影响环境协调、抗震性好、受天气影响小等诸多优点,又因为各个城市正在大力发展城市地下铁道(简称“地铁”)工程,为了实现城市地铁和高铁之间零换乘的需要,高铁进入城市选择隧道下穿方式已成为发展的必然趋势,连接城市之间的高铁在引入城市时从地下穿越的情况将会越来越多,高铁城市隧道的建设高潮也随之来临。

随着高铁下穿城市的工程越来越多,会产生许多新的工程技术难题。高铁由地面下穿引入城市时,都存在隧道埋深浅、开挖断面大、地下水丰富、地质条件差、周围敏感结构物多等问题,因此,如何确保隧道施工安全和周围环境安全,成为亟待解决的现实难题。

当今世界上高铁技术比较领先的日本、法国、德国等国家,高铁建设规模相对不大,还未曾有高铁下穿城市的文献报道,而我国高铁建设正处在大规模发展的初期,对于高铁城市隧道这一新的工程现象缺乏工程经验。因此,针对高铁下穿城市的关键技术进行研究,对促进我国高铁技术进步和城市发展具有重大意义。

1.2 工程简介

武广高铁是中国高铁规划网络中南北大动脉的重要组成部分,北起武汉新客站,南达广州新客站,全长 1069 km,设计时速 350 km,是我国首条长度最长、设计时速最快的高铁,是我国高铁建设史中的里程碑。金沙洲隧道和浏阳河隧道是武广高铁分别下穿广州市区和长沙市区的城市隧道。

1.2.1 金沙洲隧道简介

金沙洲隧道段原设计采用高架桥跨越,地方政府因占地过多、拆迁范围大、与城市景区不协调、影响城市发展等原因,强烈要求下穿通过,遂改为浅埋隧道下穿。

金沙洲隧道是武广客运专线穿越广州市区的大型地下工程,位于广州市区西侧及南海市境内,北起南海市里水镇洲村,呈 NS 走向。隧道全长为 4 469 m,其中北侧 3 469 m 为暗挖段,南侧 1 000 m 为明挖段,辅助坑道设一个斜井和两个竖井,后因工期需要在明暗分界处增设一个临时竖井。隧道由北向南依次下穿或紧邻采石坑、水塘、高速公路沙贝立交桥、凤岐里居民区、广州西环高速公路、煤气管线、建设大道等重要建(构)筑物,兼具山岭隧道及城市地铁的特点。金沙洲隧道平面位置示意如图 1.2-1 所示。

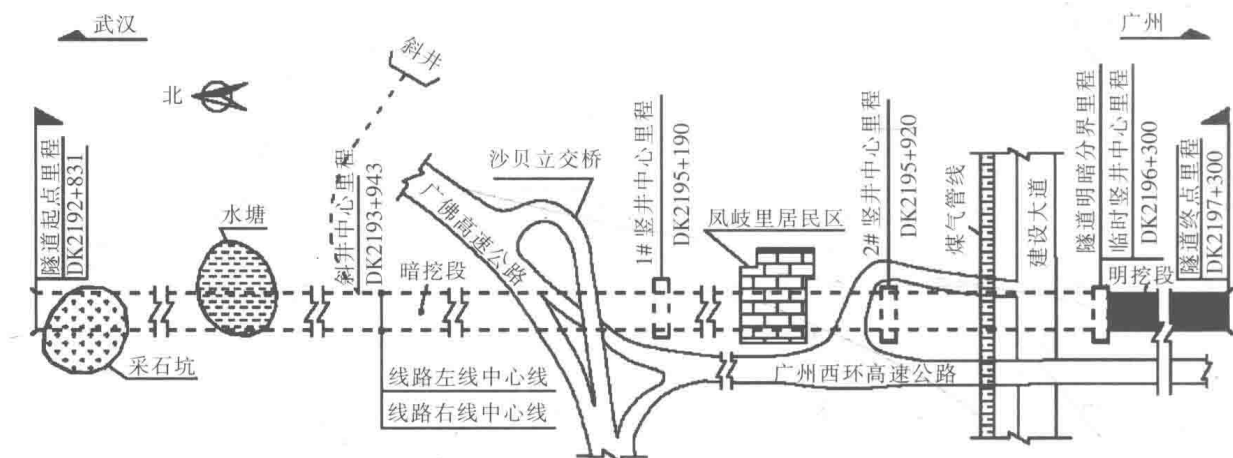


图 1.2-1 金沙洲隧道平面位置示意图

隧道纵坡设计为“V”字坡,分别为长 2 359 m 的 20‰下坡和长 2 110 m 的 20‰上坡,1#竖井为整座隧道的变坡点。隧道洞身主要穿越灰岩和粉砂岩,灰岩段长 1 820 m,粉砂岩段长 1 451 m;还穿越淤泥质地层、断层破碎带、溶洞发育区、可溶岩与非可溶岩接触带等不良地质和特殊岩土。金沙洲隧道纵剖面示意如图 1.2-2 所示,隧道分段概况如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 隧道分段概况

项 目	里 程		长度(m)
	起始里程	终止里程	
进口洞口段	DK2192+831	DK2192+849	18
洞身暗挖段	DK2192+849	DK2196+300	3 451
明挖暗埋段	DK2196+300	DK2196+893	593
出口 U 形槽段	DK2196+893	DK2197+300	407

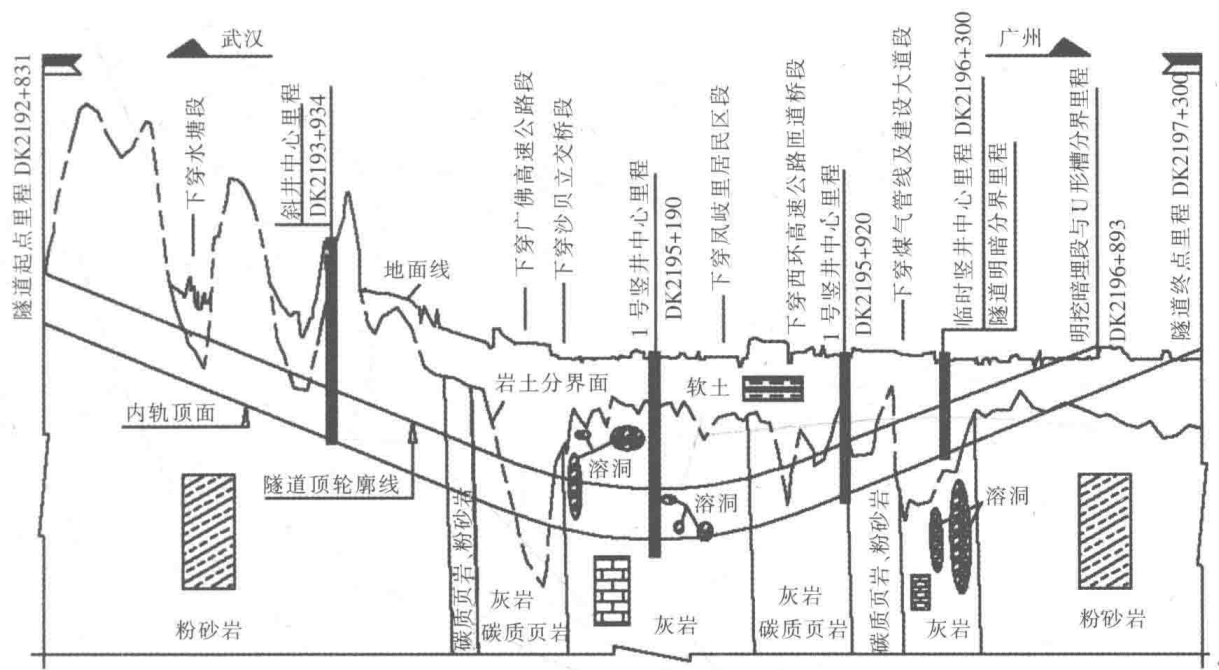


图 1.2-2 金沙洲隧道纵剖面示意图

1.2.2 浏阳河隧道简介

浏阳河隧道位于长沙市区东侧，呈 NS 走向，全长 10115m，由中铁四局和中铁一局分别负责施工。从隧道进口 DK1565+972~DK1570+930 共计 4958m 由中铁四局施工，其中明挖段长 1489m、暗挖段长 3469m，辅助坑道设两个竖井。中铁四局施工段隧道线路位于长沙经济开发区和长沙县星沙镇，沿线下穿地表建筑物、城市道路、管涵和牛角冲互通立交桥等重要构筑物。浏阳河隧道中铁四局施工段平面位置示意如图 1.2-3 所示。



图 1.2-3 浏阳河隧道中铁四局施工段平面位置示意图

中铁四局施工段隧道线路呈单面下坡，洞身穿越地层主要为泥质粉砂岩，围岩软弱破碎，地层风化极不均匀，基岩面起伏较大，在纵断面上围岩级别变化频繁，特别是形成的风化槽谷完全侵入隧道断面，在隧道横断面上呈典型的上软下硬地层。浏阳河隧道中铁四局施工段纵剖面示意如图 1.2-4 所示。

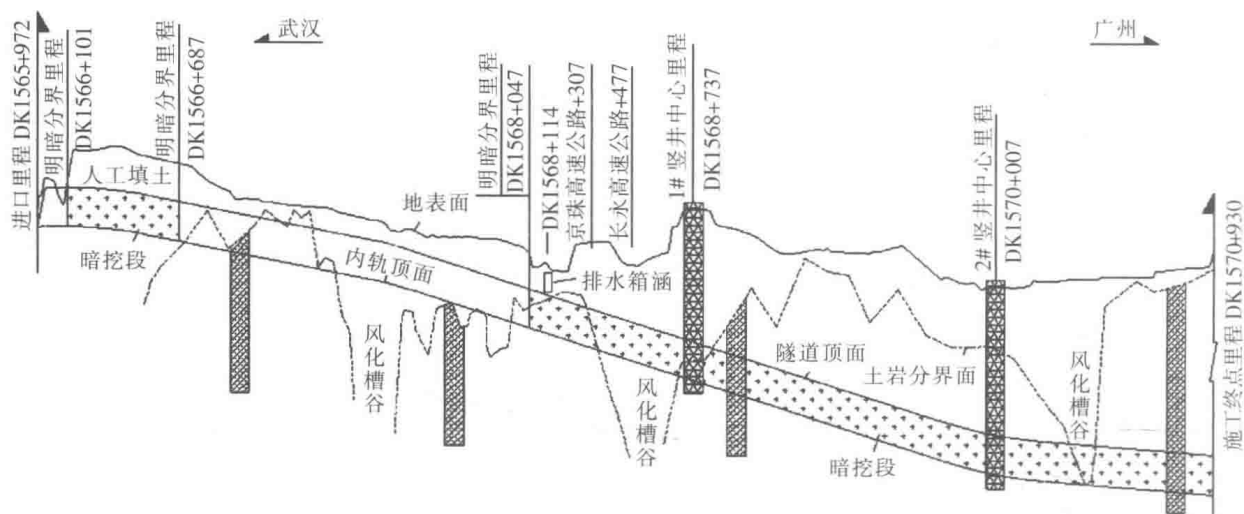


图 1.2-4 浏阳河隧道中铁四局施工段纵剖面示意图

1.3 工程技术特点与难点

金沙洲隧道和浏阳河隧道都位于大城市,两座隧道所处的环境条件、地质条件及其设计特点、工程要求等,决定其具有以下共同的特点和难点:

- (1)隧道埋深浅。埋深小于 2 倍开挖高度的长度分别占全隧长的 81.6%和 67.1%。
- (2)隧道围岩软弱。V、VI级软弱围岩累计长度分别占全隧长的 53.59%和 55.50%。
- (3)隧道开挖断面大。暗挖隧道采用单洞双线大断面复合衬砌型式,隧道开挖宽度约 15 m,高度约 13 m,线间距 5 m,开挖断面面积约 160 m²,属于特大断面(日本 ≥ 140 m²,国际隧道协会 ≥ 100 m²)隧道。隧道VI级围岩横断面设计如图 1.3-1 所示。

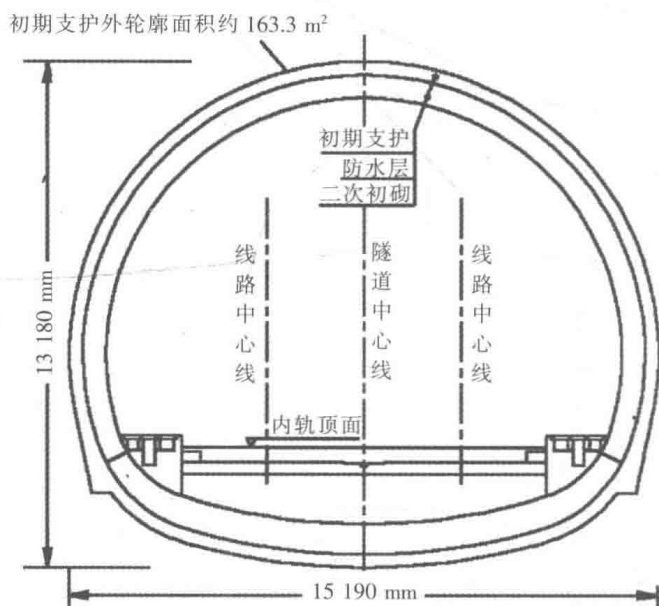


图 1.3-1 隧道 VI 级围岩横断面设计图

(4)隧道环境十分复杂。金沙洲隧道在灰岩地段下穿高速公路立交桥枢纽、地下管线,浏阳河隧道在粉砂岩和风化槽谷中下穿排水箱涵和牛角冲互通立交桥。

(5)隧道地质情况复杂多变。金沙洲隧道和浏阳河隧道基岩面起伏较大,在纵断面上围岩级别变化频繁,在横断面上呈典型的上软下硬地层。金沙洲隧道洞身还穿越1820 m灰岩段,岩溶发育。

(6)水文地质条件差。水塘、水库、水沟、河流等地表水源比较多,孔隙潜水、基岩裂隙水、岩溶水等地下水丰富。

(7)安全风险极大。金沙洲隧道浅埋下穿严重偏压地形、水塘、厂房,在浅埋岩溶地层浅埋下穿广佛高速公路、沙贝立交枢纽、居民区、城市主干道及地下煤气管线等,还穿越淤泥质地层、溶洞发育区等不良地质和特殊岩土;浏阳河隧道在上软下硬复合地层中修建深大竖井,全断面穿越软弱风化槽谷段,超浅埋下穿人工填土段,超浅埋下穿牛角冲互通立交桥等构筑物。又因为两座隧道所处地段地下水丰富,隧道掘进过程中容易发生洞内涌水冒泥,洞内失水过多和开挖方法不当易引起地表塌陷、建(构)筑物开裂、管线爆裂等工程灾害,危及隧道施工和环境安全,安全风险极大。作为铁道部极高风险隧道,其修建期间受到各方的高度重视和关注。

(8)工程主体结构设计寿命100年,一级防水标准,环境保护及水资源保护要求高。二次衬砌(简称“二衬”)根据防水设计措施区别设计:对全封闭防水地段,二次衬砌按承受全部围岩压力和水压力,采用荷载结构模式进行计算;对拱墙设计防水层地段,二次衬砌按承受全部围岩压力,不承受水压力,采用荷载结构模式进行计算。

(9)金沙洲隧道和浏阳河隧道是我国高铁首次在城市复杂富水地层中长距离下穿的浅埋特大断面隧道,项目投资约10亿元,是国内工程规模最大、浅埋暗挖段最长、开挖断面最大的高铁城市隧道工程,如此复杂工程国内外罕见。

1.4 工程对策

面对工程难度极大、安全风险极高、工程经验缺乏等现实难题,希望通过科学研究、技术创新、试验等手段,解决现场技术难题,实现安全快速施工目的,为类似工程积累宝贵经验,围绕该工程的相关研究将具有重要的现实意义和学术价值。