

高速铁路

水下隧道研究与设计

肖明清 邓朝辉 赵勇 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高速铁路水下隧道研究与设计

肖明清 邓朝辉 赵 勇 编著

中国铁道出版社

2015年·北京

内 容 简 介

作者结合广深港客运专线狮子洋水下隧道的建设条件与运营要求,针对各项技术难题,采用理论分析、模型试验、现场测试等多种手段相结合的方法开展科研攻关,提出了多项创新技术,包括复合地层高速铁路特长水下隧道的总体设计技术、复合地层高速铁路水下隧道结构动—静力学优化设计技术、双孔单线特长铁路隧道的气动效应缓解技术、特长高速铁路水下隧道防灾与疏散技术、盾构机一字形地中对接和洞内拆解技术、施工材料计量及控制技术等。

本书反映了课题研究成果及其在狮子洋水下隧道工程设计中的具体应用情况,可供从事隧道及地下工程修建的设计、施工、科研技术人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路水下隧道研究与设计/肖明清,邓朝辉,赵勇编著. —北京:中国铁道出版社,2015. 8

ISBN 978-7-113-20637-6

I. ①高… II. ①肖… ②邓… ③赵… III. ①高速铁路-水下隧道-隧道施工-研究 IV. ①U459. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 142553 号

书 名:高速铁路水下隧道研究与设计

作 者:肖明清 邓朝辉 赵 勇

策 划:傅希刚

责任编辑:傅希刚 编辑部电话:(010)51873142 电子信箱:532544186@qq.com

封面设计:崔丽芳

责任校对:马 丽

责任印制:陆 宁

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:北京盛通印刷股份有限公司

版 次:2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷

开 本:880 mm × 1 230 mm 1/16 印张:32 字数:968 千

书 号:ISBN 978-7-113-20637-6

定 价:160.00 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

序

水下隧道是穿越江河湖海等水域的重要手段,盾构法因其在安全、环保、质量、工期、造价等方面的优势已成为水下隧道最重要的修建方法。尽管绝大多数水下隧道采用盾构法修建,但以往主要用于单一软弱地层。随着“复杂地质、大直径、高水压、长距离”隧道建设的需要,上世纪末出现了现代盾构技术,国内外也相继修建了英法海峡隧道、东京湾海底隧道、荷兰绿心隧道、南京长江隧道等一些代表性工程,但缺少高速铁路水下隧道的案例。我国江河湖海众多,桥位资源越来越少,交通需求越来越大,未来对大型水下盾构隧道需求巨大。

广深港客运专线狮子洋隧道是世界上行车速度最高、国内最长的水下盾构隧道,也是我国第一座铁路水下隧道,工程地质条件复杂、技术难度极大。前期研究中,对桥隧方案、隧址方案、主要技术标准等进行了深入研究与比选。在工程设计与施工阶段,各参建单位与研究人员开展了大量的试验与研究,国内外许多专家学者也亲临施工现场指导,协助解决施工中的难题。本书作者及研究团队长期从事水下隧道的设计与研究,具有扎实的理论基础和丰富的实践经验,并全程参与了狮子洋隧道的论证、研究、设计与施工,为狮子洋隧道的设计方案优化、技术难题处理、保证施工与运营安全提供了强有力的技术支撑。

本书系统总结和提炼了狮子洋隧道的设计关键技术,很多成果具有创新性,主要有:

一、提出了“隧道荷载与施工进舱作业安全双控制”的水下盾构隧道基岩覆盖厚度确定方法,提出了基于围岩稳定性与结构抗灾可靠性相匹配的单、双层衬砌结构选型技术,开发了降低软弱地层列车振动响应的空间结构设计方法,创新了盾构地中对接技术,据此建立了复合地层特长高速铁路水下盾构隧道工程多因素耦合总体设计技术体系,解决了列车高速运行、地层复杂多变、盾构段超长所带来的难题,实现了工程施工与运营风险、工期风险、造价等因素的合理平衡与综合优化。

二、建立了单、双层衬砌相结合的结构体系及力学模型,开展了隧道—地层相互作用的物理模型和原型试验,结合现场测试,揭示了衬砌结构的力学特性,合理确定了结构参数。

三、首次对时速 350 km 双孔单线特长高速铁路隧道气动效应进行了系统的模型试验与分析,提出了洞口缓冲结构的设计方法,开发了洞口缓冲结构,有效减少了隧道净空面积与隧道直径,提高了工程经济性。

四、首次开展了高速铁路水下隧道火灾烟气蔓延规律数值模拟与模型试验,获得了火灾设计关键技术参数,为防灾通风与结构防火设计提供了依据;构建了基于火场环境人员行为特征和动车组人员疏散模型,建立了首个水下隧道防灾救援定点,实现了防灾措施效率的最大化。

五、针对国内首次采用大直径复合式泥水平衡盾构穿越全断面岩层,从理论和实践上探明了盾构施工主要耗材与地质条件、埋深、水压力、掘进长度、开挖面积之间的关系,为复合地层泥水盾构施工定额标准的制定提供了技术支撑。

本书将高速铁路技术、现代盾构技术与狮子洋隧道的工程实践有机结合,具有较高的理论水平和实用价值,它的出版有助于提高我国复杂地质超长高标准水下隧道的修建水平,也为今后隧道向更长更大水深发展奠定了坚实基础。

中国工程院院士



2015 年 7 月

前 言

广深港客运专线狮子洋隧道是世界上行车速度最高、长度居第二的水下盾构隧道,全长10800 m,双孔单线,直径为10.8 m。隧道于2006年5月开工建设,2011年12月建成通车。

狮子洋位于珠江的入海口,隧址处江面宽6100 m,隧道工程建设面临行车速度快、掘进距离长、地层复杂多变、盾构地中对接、水压力大、安全标准高等六大技术挑战。为修建广深港客运专线,对如何穿越狮子洋以及如何确保隧道工程的安全性及经济性进行了多次论证,原铁道部科技司和设计单位(中铁第四勘察设计院集团有限公司)也立列了多项课题对相关工程技术进行研究,对设计方案进行优化。作者结合工程的前期研究、勘察设计、科研、施工建设等,对狮子洋隧道的关键设计技术进行系统总结,编撰成《高速铁路水下隧道研究与设计》一书。书中融入了作者多年来对复合地层盾构隧道修建技术的认识。

本书共分成十章。第一章介绍了工程概况和所开展的相关专题研究工作。第二章介绍了工程建设条件。第三章介绍了桥隧比选、隧道方案比选及实施方案的设计情况。第四章介绍了复合地层盾构隧道埋置深度选择技术。第五章介绍了狮子洋隧道净空面积及气动效应与缓解措施的研究与设计成果。第六章介绍了盾构隧道衬砌结构选型、结构参数优化、结构模型试验、原型试验以及现场测试等方面的研究与设计成果。第七章介绍了隧道动力响应以及减振措施研究与设计成果,包括地震和列车振动。第八章介绍了隧道火灾排烟与疏散方面的研究与设计成果。第九章介绍了隧道结构的抗灾技术,包括火灾、列车脱轨撞击、洞内爆炸等。第十章介绍了工程施工概况、泥水盾构在复合地层长距离掘进时的主要材料消耗计算方法与实际消耗。

本书在编写过程中,引用了科研合作单位大量的研究成果,参考了国内外部分技术资料及文献。特别感谢西南交通大学何川教授、高波教授、封坤讲师,中南大学徐志胜教授、彭立敏教授,中铁西南科学研究院有限公司万晓燕研究员、吴剑研究员等为本书编写提供的协助与指导,感谢中铁十二局集团有限公司和中铁隧道集团有限公司在现场试验研究中给予的大力协助,也诚挚感谢中国工程院何华武院士、王梦恕院士、梁文灏院士、周丰峻院士在狮子洋隧道设计和施工过程中提供的指导和宝贵意见。中铁第四勘察设计院集团有限公司水下隧道研究设计团队和 underwater tunneling technology laboratory of hubei province engineering laboratory of zhao wencheng, qin daxue, yao jian, sun wenwu, zhang huilan, liu hao, jiang qiao, wang chunmei等参与了部分内容的编写及制图工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有差错、遗漏和不足,敬请专家和读者不吝赐教,多提批评指导意见,以利改正。

作 者

2015年6月

目 录

1 概 述	1
1.1 水下盾构隧道的发展	1
1.1.1 国外水下盾构隧道的发展	1
1.1.2 国内水下盾构隧道的发展	1
1.2 狮子洋隧道概况	1
1.2.1 隧道技术标准与建设规模	1
1.2.2 主要工程特点及设计难点	2
1.3 狮子洋隧道主要专题研究与科研工作	4
1.3.1 主要专题研究与论证工作	4
1.3.2 主要科研工作	4
2 隧道建设环境	5
2.1 地形地貌	5
2.2 港口、锚地、水运与航道情况	5
2.2.1 港口现状及规划	5
2.2.2 航道及规划	5
2.3 工程与水文地质条件	6
2.3.1 工程勘察方案	6
2.3.2 工程地质条件	7
2.3.3 地质构造	9
2.3.4 水文地质条件	9
2.3.5 工程地质性能分析评价	12
2.3.6 不良地质及特殊岩土	14
2.4 场地与地基的地震效应	15
2.4.1 地震动参数	15
2.4.2 砂土液化	15
2.4.3 软土震陷	15
2.4.4 场地稳定性评价	16
2.5 河床演变分析	17
2.5.1 河道历史演变	17
2.5.2 河床近期演变分析	18
2.5.3 工程附近河道冲淤分析	22
2.5.4 人类活动对河道演变的影响	25
2.5.5 河道演变趋势预测	25

2.5.6	河床演变分析结论	26
2.6	河床最低冲刷高程数值模拟计算与河工模型试验	26
2.6.1	工程附近的水动力特性计算分析	26
2.6.2	极限冲刷深度数值模拟计算	29
2.6.3	河床最低冲刷高程的河工模型试验	30
2.7	工程沿线地面及地下建(构)筑物分布	31
2.7.1	沙仔岛码头	31
2.7.2	虎门港沙田港区码头	31
3	隧道工程设计方案	33
3.1	主要技术标准与内净空	33
3.1.1	主要技术标准	33
3.1.2	隧道限界及内净空	33
3.2	前期方案研究与比选	33
3.2.1	桥隧论证概况	33
3.2.2	隧道线路方案研究与比选	35
3.3	隧道总体设计方案研究	40
3.3.1	隧道施工方法研究与比选	40
3.3.2	隧道结构断面方案研究与比选	42
3.3.3	隧道施工组织方案比选	45
3.4	隧道工程总体设计	47
3.4.1	隧道平面设计	47
3.4.2	隧道纵断面设计	47
3.4.3	隧道横断面设计	48
3.4.4	总体布置及建设规模	49
3.5	盾构法隧道段结构设计	49
3.5.1	衬砌管片模板设计	49
3.5.2	管片结构配筋	50
3.5.3	盾构机地中对接设计	51
3.6	明挖法隧道段结构设计	52
3.6.1	明挖围护结构设计	52
3.6.2	明挖主体结构设计	53
3.6.3	抗浮与地基处理	55
3.7	隧道防水设计	55
3.7.1	盾构隧道防水等级	55
3.7.2	盾构隧道接缝防水	55
3.7.3	其他防水措施	56
3.8	洞口缓冲结构设计	56
3.8.1	洞口微压波峰值标准	56
3.8.2	洞口缓冲结构	57

3.9 横通道及海底泵房设计	58
3.9.1 横通道处特殊管片设计	58
3.9.2 横通道结构设计	58
3.9.3 海底泵房设计	59
3.10 隧道内部结构设计	60
3.10.1 隧道内部设施布置	60
3.10.2 内部结构设计	60
3.11 通风与防灾设计	61
3.11.1 防灾疏散及水下疏散救援定点设计	61
3.11.2 通风系统设计	63
3.12 盾构机选型	64
3.12.1 盾构机械选型条件	64
3.12.2 盾构机械选型原则	64
3.12.3 盾构机类型选择	64
4 隧道埋置深度研究	68
4.1 概 述	68
4.2 复合地层盾构法水下隧道最小覆盖层厚度计算方法	68
4.2.1 考虑开挖面稳定性的覆盖层厚度	68
4.2.2 考虑隧道抗浮的覆盖层厚度	74
4.2.3 考虑开挖面劈裂的覆盖层厚度	78
4.2.4 河道条件对埋深的影响	80
4.3 不同埋置深度盾构隧道横向计算分析	81
4.3.1 对比分析对象选择	81
4.3.2 荷载—结构模式	81
4.3.3 计算结果及分析	82
4.4 影响岩石地层盾构隧道埋置深度的其他因素	84
4.4.1 进舱作业时的舱内渗水量	84
4.4.2 软弱围岩的形变压力	87
5 隧道净空面积及气动效应与缓解措施研究	88
5.1 概 述	88
5.2 隧道长度对瞬变压力的影响规律	89
5.2.1 瞬变压力计算模型和计算方法	89
5.2.2 隧道长度对车外瞬变压力的影响规律	90
5.2.3 长及特长单线隧道中列车内外气压的传递规律	91
5.3 水下隧道净空面积优化研究	93
5.3.1 隧道长度和列车密封性能对瞬变压力的综合影响	93
5.3.2 隧道净空面积优化的可能性	95
5.4 辅助坑道对特长隧道瞬变压力影响分析	96

5.4.1	辅助坑道对瞬变压力影响模型试验	96
5.4.2	基于瞬变压力的辅助坑道设置原则	102
5.4.3	狮子洋水下隧道运营时辅助坑道的开闭	106
5.5	狮子洋隧道微压波问题的基本分析	106
5.5.1	微压波的影响因素	106
5.5.2	微压波的减缓措施	108
5.5.3	狮子洋隧道微压波控制标准和缓解措施	109
5.5.4	狮子洋隧道微压波初步分析	111
5.6	狮子洋隧道微压波与洞口缓冲结构模型试验研究	114
5.6.1	物理模型的建立	114
5.6.2	断面积不变开口型缓冲结构的初步试验	116
5.6.3	狮子洋隧道缓冲结构的模型试验优化	117
5.7	狮子洋隧道微压波与洞口缓冲结构数值计算研究	122
5.7.1	数值计算基本理论	122
5.7.2	数值计算模型	124
5.7.3	狮子洋隧道无缓冲结构时的数值模拟	125
5.7.4	狮子洋隧道开口型缓冲结构数值模拟	127
5.8	压缩波在板式道床长隧道中的变化规律	131
5.8.1	数值计算采用的方法	131
5.8.2	采用板式道床隧道内压缩波的变形	132
6	隧道结构力学特征及关键技术参数研究	137
6.1	衬砌结构选型	137
6.1.1	盾构法隧道衬砌结构类型	137
6.1.2	国内外盾构法隧道衬砌选型实例分析	137
6.1.3	狮子洋隧道衬砌结构选型	138
6.2	复合地层盾构隧道荷载模式	141
6.2.1	考虑盾构隧道开挖效应的连成模式	141
6.2.2	荷载结构模式	143
6.2.3	盾构隧道常用的荷载理论	145
6.2.4	荷载计算模式的拟定	146
6.3	复合地层盾构隧道计算模型	147
6.3.1	常用结构计算模型	147
6.3.2	常用管片衬砌计算模型比较	148
6.3.3	管片结构计算模型的选定	149
6.3.4	双层衬砌计算模型	151
6.4	狮子洋隧道管片衬砌结构设计参数	153
6.4.1	管片的厚度与幅宽	153
6.4.2	管片衬砌环类型与分块方式	153
6.4.3	管片衬砌拼装方式	155

6.4.4	管片接头形式	156
6.4.5	管片衬砌的楔形量	158
6.4.6	管片衬砌结构参数比选	158
6.5	狮子洋隧道管片接缝力学试验	164
6.5.1	接缝力学行为试验	164
6.5.2	接头的数值仿真模拟	172
6.6	狮子洋隧道管片衬砌结构模型试验	179
6.6.1	模型试验研究的内容	179
6.6.2	模型试验理论基础及相似原理	179
6.6.3	试验原型管片衬砌	180
6.6.4	模型相似材料与制作	181
6.6.5	水压加载模型	184
6.6.6	内衬试验模型	185
6.6.7	试验测点布置	186
6.6.8	试验联合加载模型	187
6.6.9	模型试验分组	189
6.6.10	模型试验结果分析	192
6.7	狮子洋隧道管片衬砌结构原型试验	197
6.7.1	原型管片结构加载原理	197
6.7.2	原型管片结构加载试验装置及量测系统	198
6.7.3	原型管片单环(通缝)加载试验	202
6.7.4	原型管片组合环(错缝)加载试验	205
6.7.5	原型管片结构加载试验结果分析	205
6.7.6	基于原型管片结构加载试验的结构安全性测评	210
6.8	狮子洋隧道结构受力与变形现场测试	211
6.8.1	现场监测断面总体说明	211
6.8.2	量测项目与测点布置	212
6.8.3	现场试验结果分析	213
6.8.4	狮子洋隧道管片结构安全性综合评价	231
6.9	狮子洋隧道纵向不均匀沉降分析	234
6.9.1	盾构隧道纵向沉降综合分析	234
6.9.2	盾构隧道纵向分析模型	235
6.9.3	梁—弹簧模型及三维有限元的纵向分析	237
6.9.4	盾构隧道纵向模型试验	238
6.9.5	盾构隧道纵向不均匀变形处理措施	244
7	隧道结构动力响应分析	246
7.1	隧道地震响应分析	246
7.1.1	动力响应计算方法及计算参数	246
7.1.2	盾构隧道典型横断面地震响应平面分析	249

7.1.3	典型联络通道与隧道连接处地震响应三维分析	258
7.1.4	竖井与隧道结构连接处地震响应三维分析	261
7.2	狮子洋隧道列车振动响应分析方法	269
7.2.1	无砟轨道列车振动荷载确定方法	269
7.2.2	流固耦合动力分析本构模型及边界条件	275
7.3	均匀地层下盾构隧道列车振动三维动力响应分析	278
7.3.1	模型构建	278
7.3.2	地层位移及速度响应分析	279
7.3.3	动力响应时程分析	283
7.3.4	地层应力及孔隙水压分析	287
7.4	列车振动饱和砂土动力响应及长期振动特性	289
7.4.1	模型构建	289
7.4.2	动力响应时程分析	289
7.4.3	地层应力及孔隙水压分析	296
7.4.4	列车往复作用下动力响应时程分析	299
7.4.5	列车往复作用下地层应力及孔隙压变化规律	303
7.5	盾构隧道设内衬时的列车振动响应三维分析	305
7.5.1	列车振动荷载模型	305
7.5.2	计算模型	306
7.5.3	孔隙水压力变化分析	306
7.6	列车荷载反复作用下地基土累积变形分析	309
7.6.1	反复荷载作用下地基土的累积应变模型	309
7.6.2	计算断面及计算参数	310
7.6.3	计算结果及分析	312
8	隧道火灾排烟与疏散技术	318
8.1	概 述	318
8.1.1	国内外铁路隧道火灾概况	318
8.1.2	国内外铁路隧道防灾关键技术研究	320
8.2	狮子洋隧道火灾蔓延规律数值模拟研究	320
8.2.1	隧道火灾蔓延规律数值模拟关键参数选取	320
8.2.2	隧道无通风排烟下隧道火灾蔓延规律数值模拟研究	326
8.2.3	隧道纵向通风排烟下火灾烟气蔓延及控制数值模拟研究	334
8.3	狮子洋隧道火灾排烟模型试验	344
8.3.1	火灾模型试验方案	344
8.3.2	无通风排烟下隧道火灾蔓延规律模型试验研究	346
8.3.3	纵向通风排烟下火灾烟气蔓延及控制模型试验研究	349
8.4	火灾蔓延规律数值模拟及模型试验对比分析	356
8.4.1	数值模拟及模型试验结果对比	356
8.4.2	隧道拱顶最高温度	357

8.4.3	隧道火灾临界风速	359
8.5	狮子洋隧道人员疏散数值模拟研究	361
8.5.1	人员疏散数值模拟研究方法	361
8.5.2	车厢内人员疏散数值模拟	361
8.5.3	隧道内整体人员全程疏散数值模拟	366
8.5.4	人员疏散数值模拟结果分析	376
8.6	狮子洋隧道人员疏散试验研究	382
8.6.1	火车站问卷调查分析	382
8.6.2	动车组人员逃生疏散试验方案	385
8.6.3	普通列车人员逃生疏散试验方案	386
8.6.4	隧道横通道人员通过能力试验方案	387
8.6.5	人员疏散试验结果分析	389
8.7	人员疏散数值分析及试验结果对比分析	404
8.7.1	普通列车车厢人员疏散时间分析	404
8.7.2	动车组车厢人员疏散时间分析	404
8.7.3	横通道人员疏散时间分析	405
8.7.4	列车隧道全程安全疏散时间关系式	405
8.7.5	数值分析及试验分析结果比较	406
9	隧道结构抗灾性能分析	407
9.1	火灾对隧道结构的影响及灾后承载能力分析	407
9.1.1	火灾场景设计	407
9.1.2	火灾影响的研究方法概况	408
9.1.3	温度—荷载耦合作用下隧道结构力学行为分析	411
9.1.4	火灾后隧道结构承载能力分析	420
9.1.5	火灾对隧道结构影响分析主要结论	428
9.2	列车脱轨撞击对结构安全性的影响分析	429
9.2.1	列车脱轨事故分析	429
9.2.2	列车—刚性墙撞击仿真分析	430
9.2.3	撞击作用下管片衬砌动力响应分析的数值模型	432
9.2.4	不同衬砌形式下的列车撞击管片动力响应分析	434
9.2.5	列车撞击对结构安全性影响分析的结论	439
9.3	客车爆炸事故对隧道结构的影响分析	440
9.3.1	铁路列车爆炸事故案例	440
9.3.2	爆炸类型选择	440
9.3.3	炸药爆炸对隧道结构影响分析	441
10	隧道施工概况及主要材料消耗	444
10.1	隧道施工组织设计方案	444
10.1.1	工程规模	444

10.1.2	工程地质概况	444
10.2	狮子洋隧道施工概况	445
10.2.1	施工总体布置及施工组织	445
10.2.2	盾构机械性能及主要技术参数	447
10.3	泥水盾构在狮子洋隧道复合地层中施工适应性及难点分析	456
10.3.1	泥水盾构在狮子洋隧道的地质适应性	456
10.3.2	狮子洋隧道盾构施工的难点分析及对策	460
10.4	复合地层中泥水盾构施工造价影响因素及材料消耗分析方法	462
10.4.1	盾构隧道断面大小对工程造价影响分析	462
10.4.2	地质条件对盾构隧道工程造价影响分析	465
10.4.3	水土压力对盾构隧道工程造价的影响	474
10.4.4	掘进长度对盾构隧道工程造价的影响	475
10.4.5	盾构机刀盘修复对工程造价的影响	477
10.4.6	盾尾刷更换对工程造价的影响	483
10.4.7	带压进仓作业对工程造价的影响	488
10.5	狮子洋隧道盾构掘进主要材料及能量消耗	490
10.5.1	盾构掘进进度概况	490
10.5.2	耗电量计算	490
10.5.3	刀盘焊接次数	491
10.5.4	送排浆泵数量计算	491
10.5.5	泥浆管道及排浆泵磨损	491
10.5.6	刀具消耗	492
10.5.7	盾尾密封油脂消耗	492
10.5.8	盾构隧道掘进主要能源及材料消耗	492
	参考文献	495

1 概 述

1.1 水下盾构隧道的发展

1.1.1 国外水下盾构隧道的发展

国外盾构法越江海水下隧道建设起步较早,其中最具代表性的三大海底隧道是1993年竣工的英法海峡隧道(长49.5 km,由两孔内径7.8 m的主隧道和一孔内径4.8 m的服务隧道组成,设计行车速度160 km/h)、1995年竣工的丹麦斯多贝尔特海峡隧道(长7.26 km,由两孔内径7.7 m、外径8.5 m的隧道组成,设计行车速度160 km/h)、1996年竣工的日本东京湾横断公路隧道(长9.6 km,由两孔外径13.9 m的隧道组成,设计行车速度80 km/h),其他已建成的代表性隧道还有2003年建设的外径13.8 m的德国易北河第四隧道、2004年建设的外径14.5 m的荷兰绿色心脏隧道等。纵观国外盾构法水下隧道建设的历史和现状,虽然其起步较早,大型盾构法水下隧道工程实例也不少,但没有水下高速铁路隧道的建设经验,且复杂地质隧道也较少。

1.1.2 国内水下盾构隧道的发展

我国上海市于1966年和1984年分别修建了外径10.22 m的打浦路越江隧道和外径11.30 m的延安东路越江隧道,由此开始了我国大型水下隧道建设的历史。20世纪90年代,上海又先后修建了外径均为11.0 m的延安东路南沿线隧道、大连路隧道、复兴东路隧道三条越江公路隧道,近年又完成了外径11.36 m的翔殷路和外径14.5 m的上中路两条越江公路隧道;位于长江上游的重庆也在2005年建成了外径6.32 m的越江市政排水隧道。

近年来,一大批公路与市政用途的大型盾构法越江隧道建设,把我国水下隧道的建设规模和修建技术推上了新的高度,其中最具代表性的三大长江隧道是2008年12月通车的武汉长江隧道(长3630 m,由两孔外径11.0 m隧道组成,双向四车道,设计行车速度60 km/h)、2009年10月通车的上海长江隧道(长8740 m,由两孔外径15.0 m隧道组成,双向六车道,设计行车速度80 km/h)和2010年5月通车的南京长江隧道(长3905 m,由两孔外径14.5 m隧道组成,双向六车道,设计行车速度80 km/h),其他已建成的代表性隧道还有2010年12月通车的外径11.3 m的杭州庆春路钱塘江隧道(长3765 m,双向四车道)、2014年5月通车的外径15.0 m的杭州高速公路钱江隧道(长4250 m,双向六车道)、2011年12月通车的外径6.2 m的武汉地铁2号线越江区间隧道(长3100 m,双孔)、2014年9月通车的外径14.5 m的扬州瘦西湖隧道(长2230 m,双向四车道,单孔双层)等。

从国内盾构隧道的建设成果看,盾构隧道虽应用较多,特别是在城市地铁、污水管道等城市隧道中,但主要以小直径(小于7 m)盾构隧道居多;大直径盾构隧道虽发展较快,但数量仍相对较少,大直径复合地层盾构隧道经验则更少,且缺少在铁路隧道中的应用。

1.2 狮子洋隧道概况

1.2.1 隧道技术标准与建设规模

广深港铁路客运专线是连接广州、深圳、香港的快速铁路通道,是我国高速铁路干线网和珠三角地区城际铁路网的重要组成部分。线路途经广州、东莞、深圳、香港,设计线路长度约140 km,其中内地段长约114 km[广州南至深圳北(含)段长102.45 km、深圳北至深港分界段(深圳福田站及相关工程)长11.4 km]、

香港段长 26 km(全为隧道和地下车站)。内地段设有东涌、虎门、光明、深圳北、福田五座车站。

狮子洋隧道位于广深港客运专线东涌站至虎门站之间,穿越珠江入海口的狮子洋(图 1—2—1),是广深港铁路客运专线中的重大技术难题。隧址处狮子洋江面宽 6 100 m(含两个江心洲总宽 1 770 m),隧道建筑全长 10.8 km,暗洞段长 10.49 km,最大水压力 0.67 MPa。基础设施按速度目标值 350 km/h 设计,最大纵坡 20‰。全隧道除出口段 120 m 为设中柱的单孔双线结构外,其余地段均由两条单线隧道组成,越江段采用盾构法施工,盾构段总长 9 340 双洞米。盾构隧道外径 10.8 m,轨面以上净空有效面积 66 m²(局部设内衬段为 60 m²)。隧道内设置框架式板式轨道,轨道结构高度为 656 mm。盾构段采用四台泥水平衡式盾构施工。四台盾构两两相向掘进,地中对接,洞内解体。单台盾构最大掘进长度预计 4 900 m(实际最大掘进长度 5 200 m)。工程于 2005 年 3 月完成工程可行性研究,2006 年 5 月开工,2011 年 12 月开通运营。

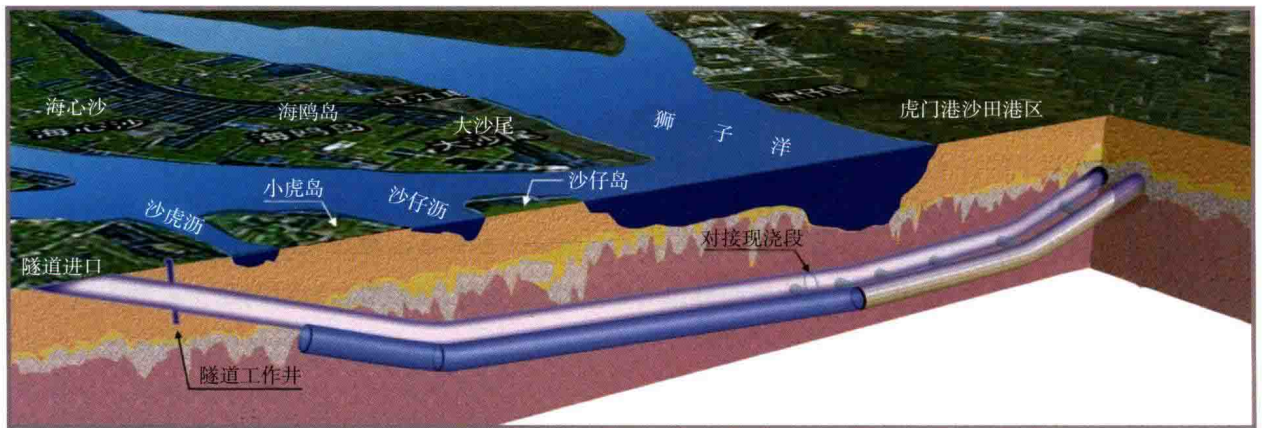


图 1—2—1 狮子洋隧道概况

隧道建设规模见表 1—2—1。

表 1—2—1 狮子洋隧道建设规模

项 目	里 程	长度(m)
进口引道段	DIK33 + 000 ~ DIK33 + 130	130
进口明挖暗埋段	DIK33 + 130 ~ DIK33 + 637	507
进口工作井	DIK33 + 637 ~ DIK33 + 660	23
盾构段	DIK33 + 660 ~ DIK43 + 000	9 340
出口工作井	DIK43 + 000 ~ DIK43 + 023	23
出口明挖暗埋段	DIK43 + 023 ~ DIK43 + 620	597
出口引道段	DIK43 + 620 ~ DIK43 + 800	180
隧道全长		10 490
建筑总长		10 800

1.2.2 主要工程特点及设计难点

1. 主要工程特点

(1) 行车速度高

隧道设计行车速度为 350 km/h,是世界上行车速度目标值最高的水下隧道。

(2) 隧道长度长

每孔隧道长度为 10 800 m,其中盾构段长度达 9 340 m,是国内最长的水下隧道,在世界盾构法水下隧道中长度位居第二,仅次于英法海峡隧道。

(3) 地质条件复杂多变

隧道通过地层主要为素填土、淤泥质土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、全风化~弱风化泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、砂砾岩。盾构隧道大部分处于强风化~弱风化砂岩和砂砾岩中,部分地段位于淤泥质土、粉质黏土及粉细砂中,盾构隧道所穿越的基岩的最大单轴抗压强度为 82.8 MPa,基岩层的渗透系数达 6.4×10^{-4} m/s,基岩的石英含量最高达 55.2%,岩石地层的黏粉粒($\leq 75 \mu\text{m}$)含量为 26.1%~55.3%。盾构穿越基岩(W_2)、半岩半土、第四系覆盖物地层的长度分别占掘进长度的 72.8%、13.2% 和 14.0%,是国内地层强度差别最大的大直径盾构隧道。

(4) 水压力高

隧道承受最大水压达 0.67 MPa,是国内已建成水下隧道中水压最高的隧道。

(5) 施工难度大,需进行地中对接

全隧道采用四台盾构机施工,需进行二次地中对接,是国内首次进行地中对接施工的隧道;每台盾构机均需穿越软土、粉细砂、半岩半土、全断面基岩和基岩风化槽,穿越地层变化大,施工技术极为复杂。

(6) 环境保护要求严

隧道进出口位于规划城市区域,对洞口微压波峰值控制严格。

(7) 防灾救援技术新

狮子洋隧道在隧道最低点前后设置了国内第一个水下防灾救援定点;对于两端处于软弱地层中的盾构隧道段,在国内首次采用了双层衬砌结构进行防火防撞处理。

2. 主要设计难点

(1) 工程经验少

从设计速度看,在该隧道开工之时,世界上已开工建设或建成的高速铁路盾构隧道很少,最著名的是荷兰绿色心脏隧道(外径为 14.5 m,2004 年建成),其设计行车速度为 300 km/h;从大直径泥水平衡盾构穿越全断面基岩看,国内以往没有经验,国外也仅有马来西亚 Smart 隧道(外径为 12.8 m,穿越石灰岩地层,2000 年建成)。狮子洋隧道设计中,国内外可资借鉴的工程经验十分有限,必须依靠自主创新开展设计研究。

(2) 工程总体设计难度大

在纵断面设计方面,由于在狮子洋主河床段,第四系覆盖层的厚度较薄,无法满足隧道埋置的要求,隧道必须埋置于基岩中。对于水下盾构隧道在基岩中的合理埋置深度,世界上不仅案例极少,也没有技术标准。英法海峡隧道选择在透水性极弱的泥灰岩中穿越,避免了地下水对施工安全的不利影响。狮子洋隧道工程主河床段主要穿越风化泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、砂砾岩,基岩面起伏大,透水性中等~强,埋深选择与施工安全、结构受力、防水设计、运营能耗等密切相关。

在横断面设计方面,规范要求隧道内净空面积不小于 70 m^2 ,但这是针对最不利隧道长度提出的,对于特长盾构隧道如能采取适当措施减小内净空面积从而缩小隧道直径,将产生显著的经济效益。

在施工组织方面,盾构隧道一般采用从一个工作井始发到另外一个工作井接收的施工方式,特长隧道需设置多处工作井分段掘进。根据总工期目标,狮子洋隧道需采用四台盾构机掘进。四台盾构机的掘进分段可以采用设置两座竖井盾构机地中对接方案或设置四座竖井每台盾构机分段施工方案。根据国内外工程实例,盾构机本身的性能可靠性差异较大,如何减少这种差异性给总工期带来的不利影响十分重要。显然,盾构机地中对接方案是最优方案,当一台盾构机发生故障停止掘进时,可利用另一台盾构机完成剩余段施工,提高了工期可靠性。但由于每台盾构机掘进速度的不确定性,对接地点也就存在不确定性,在总体设计中必须考虑该问题。

(3) 结构设计难度大

高速铁路水下盾构隧道以及岩石地层中的大直径泥水平衡盾构隧道的设计理论和经验在国内均是空白,国外经验也很少,且没有类似水文、地质和环境条件下的工程经验可以借鉴。同时,隧道两端的盾构段处于粉细砂地层,局部分布有淤泥质土,如何避免高速列车长期振动可能产生的砂土液化或产生的过大沉降也毫无经验。此外,高速铁路水下盾构隧道需考虑火灾、撞击、爆炸等意外荷载对结构的影响,为提高结