

水下隧道设计技术

Design Technology of Underwater Tunnels

肖明清 编著



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

Design Technology of Underwater Tunnels

水下隧道设计技术

肖明清 编著

中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 简 介

本书系统总结和提炼了中铁第四勘察设计院集团有限公司多年来对我国多座水下隧道的研究、设计和建设成果,并融入了作者及研究设计团队对大型复杂水下隧道修建技术的认识和体会,也融入了多项专利技术。全书共分九章,内容包括水下隧道工程整体耦合设计方法、水下隧道工程整体耦合设计方法的应用、水下隧道多维度结构安全保障技术、各种水下隧道(盾构法、沉管法、钻爆法、围堰明挖法)设计技术以及水下隧道两岸接线工程设计技术等。

本书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

水下隧道设计技术/肖明清编著. —北京:中国铁道出版社,2016. 1

ISBN 978-7-113-21271-1

I. ①水… II. ①肖… III. ①水下隧道-隧道工程-设计 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317073 号

书 名:水下隧道设计技术
作 者:肖明清

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:郑春鹏

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:2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

开 本:880 mm × 1230 mm 1/16 印张:32 字数:995千

书 号:ISBN 978-7-113-21271-1

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

前 言

水下隧道是穿越水域阻隔的重要手段,是人类克服自然障碍、与自然和谐共处的重大技术发明。水下隧道具有对通航影响小、不受恶劣气候影响可全天候通行、占地拆迁少、维护费用低、利于战备、不破坏美好的自然景观等优点。

自19世纪中叶以来,世界上已修建各种用途的水下隧道近千座。20世纪初,世界发达国家开始修建海峡水下隧道。到目前为止,水下隧道主要分布在美国、英国、日本、法国、澳大利亚、丹麦、挪威、冰岛等国家。我国水域面积辽阔,具有修建水下隧道的优越条件。近年来,随着我国城市建设和交通发展,陆续开工和建设了一批大型跨江海水下隧道,这些隧道涵盖了铁路、公路、地铁、输水管道等使用领域,包括万里长江第一隧——武汉长江隧道、世界上在高水压强渗透地层修建的直径最大隧道——南京长江隧道、世界上行车速度最高的广深港高铁狮子洋隧道、世界首座公铁合建盾构隧道——武汉三阳路长江隧道等。据不完全统计,我国已建、在建和规划的水下隧道逾百座,其中包括琼州海峡隧道、渤海湾隧道、台湾海峡隧道等世界级水下隧道工程。

然而,水下隧道或位于茫茫大海之中,或位于滔滔江水之下,其修建难度要远大于同规模的陆域隧道。面临水下复杂地质环境、结构大型化的挑战时,原有隧道设计经验、理论、技术及方法都呈现出一定的不适应性,也出现了一些争议不休的技术问题,如盾构隧道单层衬砌和双层衬砌选择问题、横通道设置与否问题、设计方案优选问题、结构安全保障问题,等等。如何完善水下隧道设计理论和设计方法,保障工程安全、经济、耐久、环保,已成为亟待解决的关键问题。本书作者结合中铁第四勘察设计院集团有限公司多年来对我国多座水下隧道的研究、设计及建设成果,对水下隧道的设计理念、设计思路、设计方法、结构安全保障技术、不同修建方法(盾构法、沉管法、钻爆法、围堰明挖法)的技术难点及创新技术进行了系统总结和提炼,并融入了作者及研究设计团队多年来对大型复杂水下隧道修建技术的认识和体会,也融入了作者及研究设计团队所形成的多项专利技术。希望本书的出版能对提高我国水下隧道修建技术水平有所帮助。

本书包括水下隧道工程整体耦合设计方法、水下隧道工程整体耦合设计方法的应用、水下隧道多维度结构安全保障技术、各种水下隧道(盾构法、沉管法、钻爆法、围堰明挖法)设计技术以及水下隧道两岸接线工程设计技术等内容。本书由肖明清主编,参加编写的还有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水下隧道技术湖北省工程实验室的部分人员,具体为:孙文昊(参与第5章第5.1、5.3、5.4、5.6节和第9章第9.4节编写)、邓朝辉(参与第5章第5.2、5.5、5.7节编写)、王克金(参与第7章第7.2、7.3节编写)、焦齐柱(参与第6章第6.1节编写)、张迪(参与第3章第3.1节编写)、宁茂权(参与第6章第6.2、6.3、6.4节编写)、薛光桥(参与第9章第9.1、9.3节编写)、彭长胜(参与第8章第8.1、8.2、8.3和8.4节编

写)、何应道(参与第5章第5.5节和第9章第9.2节编写)、姚捷(参与第5章第5.7节编写)。

本书在编写过程中引用了科研合作单位的部分研究成果,参考了国内外部分技术资料 and 文献。特别感谢西南交通大学何川教授、高波教授、晏启祥教授、封坤副教授,同济大学朱合华教授、廖少明教授、蔡永昌教授、刘学增教授,中南大学徐志胜教授、冷伍明教授,北京交通大学张顶立教授、袁大军教授,东南大学钱春香教授等为本书编写提供的协助及指导,也诚挚感谢中国工程院王梦恕院士、钱七虎院士、梁文灏院士、周丰峻院士、何华武院士,中国铁路总公司教授级高级工程师赵勇、田四明、唐国荣、倪光斌、林传年,中国铁建股份有限公司夏国斌副总裁、韩风险总工程师、教授级高级工程师王清明、沙明元,中铁第四勘察设计院集团有限公司总工程师朱丹、教授级高级工程师韩向阳、资谊等,以及各项目业主和施工单位在多座水下隧道设计及施工过程中提供的指导和宝贵意见。

由于作者水平有限,书中难免有差错和不足之处,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 11 月

目 录

1 概 述	1
1.1 水下隧道修建方法	1
1.1.1 盾 构 法	1
1.1.2 沉 管 法	1
1.1.3 钻 爆 法	2
1.1.4 围堰明挖法	3
1.1.5 悬浮隧道法	3
1.1.6 伏贴式隧道法	3
1.2 水下隧道发展历史	3
1.2.1 盾 构 法	3
1.2.2 沉 管 法	6
1.2.3 钻 爆 法	8
1.2.4 围堰明挖法	11
1.3 水下隧道技术展望	11
1.3.1 在建和拟建代表性工程概况	11
1.3.2 技术发展趋势	20
2 水下隧道工程整体耦合设计方法	22
2.1 水下隧道的特点及设计中存在的问题	22
2.1.1 水下隧道的特点	22
2.1.2 水下隧道设计中存在的问题	22
2.2 整体耦合设计方法概述	25
2.2.1 工程整体耦合设计概念	25
2.2.2 工程整体耦合设计架构	25
2.2.3 工程整体耦合设计原则及系统考量	29
2.3 水下隧道工程整体耦合设计中若干关键问题分析	33
2.3.1 双管隧道合理净距	33
2.3.2 隧道施工对邻近建(构)筑物的影响	40
2.3.3 水下段合理埋置深度	44
2.3.4 隧道横断面合理布置	57
2.3.5 衬砌结构类型选择	65
2.3.6 火灾规模和防火保护措施的选择	72
2.3.7 水下隧道疏散救援方式选择	79
2.3.8 水下隧道防灾设施及救灾对策	91
2.3.9 水下隧道施工组织方案	94

3 水下隧道工程整体耦合设计方法的应用	103
3.1 盾构法水下隧道应用案例	103
3.1.1 武汉长江隧道	103
3.1.2 武汉三阳路公铁两用长江隧道	107
3.1.3 南京长江隧道	111
3.1.4 南京纬三路长江隧道方案	115
3.1.5 广深港高铁狮子洋隧道	119
3.1.6 沪通铁路长江隧道方案	126
3.1.7 佛莞城际铁路狮子洋隧道	130
3.1.8 扬州瘦西湖隧道	133
3.1.9 杭州环城北路地下快速路隧道	135
3.1.10 厦门地铁2号线跨海隧道	139
3.1.11 常德沅江隧道	143
3.2 钻爆法水下隧道应用案例	146
3.2.1 武广高铁浏阳河隧道	146
3.2.2 长沙市湘江大道浏阳河隧道	149
3.3 沉管法及围堰明挖法水下隧道应用案例	153
3.3.1 舟山沈家门港海底隧道	153
3.3.2 澳门大学横琴校区海底隧道	159
3.4 整体耦合设计方法在盾构隧道衬砌结构设计中的应用	163
3.4.1 模糊综合评价模型的建立	163
3.4.2 结构整体耦合设计的模糊综合评判	164
3.4.3 综合分析及建议	171
4 水下隧道多维度结构安全保障技术	172
4.1 水下隧道结构安全保障的目标及方法	172
4.1.1 水下隧道结构安全保障的目标	172
4.1.2 水下隧道结构安全保障的方法	173
4.2 结构设计计算中的安全保障	174
4.2.1 结构安全保障设计的主要内容	174
4.2.2 结构工作环境和荷载分析	174
4.2.3 计算模型选择	174
4.2.4 模型计算参数选择	176
4.2.5 安全性校核方法	180
4.2.6 其他影响因素分析	181
4.3 结构耐久性安全保障	181
4.3.1 隧道结构耐久性基本要求	181
4.3.2 水下隧道混凝土抗渗性和防水耐久性预测	183
4.3.3 拉应力对混凝土抗碳化性能的影响	184

4.3.4 公路隧道内酸性气体条件下混凝土中性化试验	185
4.3.5 聚丙烯纤维对管片混凝土耐久性的影响	186
4.3.6 考虑环境作用的复合式衬砌结构设计方法探讨	188
4.3.7 水下隧道主要耐久性措施	191
4.4 结构抗灾性分析	192
4.4.1 隧道地震响应分析和抗减震措施	192
4.4.2 火灾对隧道结构的影响及灾后承载能力分析	203
4.4.3 列车脱轨撞击对结构安全性的影响分析	215
4.4.4 爆炸事故对隧道结构的影响分析	221
4.5 基于结构安全保障的防排水技术	223
4.5.1 防排水对水下隧道结构安全的影响	223
4.5.2 隧道防排水标准及要求	225
4.5.3 隧道防排水类型选择	227
4.5.4 隧道防排水措施	229
4.6 施工中的结构安全保障	234
4.6.1 施工对盾构法隧道结构安全的影响及控制	234
4.6.2 施工对沉管法隧道结构安全的影响及控制	260
4.6.3 施工对钻爆法隧道结构安全的影响及控制	264
4.7 运营中的安全保障	271
4.7.1 结构健康监测技术	271
4.7.2 运营维护技术	279
5 盾构法水下隧道设计技术	287
5.1 盾构法隧道主要设计内容及方法	287
5.1.1 管片结构设计	287
5.1.2 防水设计	290
5.1.3 盾构始发及到达加固设计	292
5.1.4 监控量测	294
5.1.5 施工筹划	295
5.2 岩石地层盾构隧道围岩压力	295
5.2.1 围岩压力计算模型	295
5.2.2 岩石地层盾构法隧道围岩压力计算	298
5.2.3 岩石地层盾构法隧道围岩压力现场测试	299
5.3 结构计算方法	317
5.3.1 盾构法隧道结构计算理论发展过程	317
5.3.2 荷载结构模型	317
5.3.3 连续介质模型	321
5.3.4 结构安全可靠性检算方法探讨	324
5.3.5 隧道纵向计算	326
5.4 接缝设计	334
5.4.1 纵缝设计	334

5.4.2 环缝设计	334
5.5 结构空间化设计	336
5.5.1 狮子洋隧道减振空间化设计	337
5.5.2 常德沅江隧道抗浮空间化设计	341
5.6 盾构始发和到达	343
5.6.1 双道围护结构的始发和到达技术	343
5.6.2 泥水平衡盾构水中到达技术	344
5.7 特殊地层段的处理	346
5.7.1 软土地层列车振动响应和沉降处理	346
5.7.2 上软下硬地层处理	349
5.7.3 溶洞处理	352
5.7.4 孤石处理	354
6 沉管法水下隧道设计技术	357
6.1 沉管法隧道主要设计内容及方法	357
6.1.1 沉管法隧道总体设计注意事项	357
6.1.2 沉管隧道段设计	357
6.1.3 附属工程设计	368
6.2 不均匀沉降对沉管接头设计方案影响分析	368
6.2.1 管节沉降分析	369
6.2.2 GINA 橡胶止水带选型计算	370
6.3 岸边止水井合龙接头技术	372
6.3.1 合龙接头位置及方式选择	372
6.3.2 合龙接头止推承台设计	372
6.3.3 合龙接头止水井设计	372
6.4 新型护岸结构	373
6.4.1 沉管施工期临时护岸结构	373
6.4.2 隧道出入口兼做永久护岸结构	383
7 钻爆法水下隧道设计技术	387
7.1 钻爆法水下隧道主要设计内容及方法	387
7.1.1 支护结构设计	387
7.1.2 防排水设计	392
7.1.3 超前支护设计	397
7.1.4 开挖方法设计	399
7.1.5 辅助坑道设计	400
7.1.6 超前地质预报设计	401
7.1.7 监控量测设计	402
7.2 防水型隧道衬砌结构及防水设计方法	402
7.2.1 支护结构设计原则	402
7.2.2 二次衬砌结构计算方法	403

7.2.3 防水型复合式衬砌隧道防排水设计	404
7.3 隧道开挖技术	408
7.3.1 控制爆破	408
7.3.2 铣挖法开挖	409
7.4 水下浅埋暗挖隧道现场测试	411
7.4.1 测试断面布置	411
7.4.2 现场测试成果	412
8 围堰明挖法水下隧道设计技术	420
8.1 围堰明挖法隧道主要设计内容及方法	420
8.1.1 围堰特点及要求	420
8.1.2 围堰设计内容及方法	420
8.2 软土地层深水围堰设计	422
8.2.1 围堰设计基本资料	422
8.2.2 设计标准	423
8.2.3 围堰形式的选择及确定	423
8.2.4 围堰布置	424
8.2.5 围堰结构设计	425
8.2.6 围堰基础处理	427
8.2.7 围堰监测	427
8.2.8 围堰拆除设计	427
8.3 海中软土地层围护结构反演分析	428
8.3.1 有限元二维分析计算原理及模型参数	428
8.3.2 反分析计算	433
8.4 大覆土明挖隧道沉降控制技术	439
8.4.1 明挖隧道地基沉降原因及处理方法	440
8.4.2 地基沉降理论分析及经验计算	441
8.4.3 明挖隧道沉降二维有限元分析	448
8.4.4 明挖隧道沉降三维有限元分析	453
8.4.5 明挖隧道沉降计算方法对比	455
9 水下隧道两岸接线工程设计技术	457
9.1 接线工程主要设计内容及方法	457
9.1.1 接线工程结构分段	457
9.1.2 明挖法接线工程设计总体要求	457
9.1.3 明挖法接线工程基坑设计	458
9.1.4 明挖法接线工程主体结构设计	463
9.2 高承压水超强渗透性地层基坑设计	466
9.2.1 基坑工程概况	466
9.2.2 基坑围护形式选择	468
9.2.3 基坑防水	468

9.2.4 基坑施工组织	470
9.3 水下隧道与周边道路地下立交工程设计技术	471
9.3.1 南京青奥轴线地下工程概况	471
9.3.2 非对称异形基坑内的深浅坑力学特征	474
9.3.3 新型围护结构设计技术	478
9.3.4 地下立交系统防灾疏散设计技术	490
9.4 公铁合建隧道接线工程设计技术	495
9.4.1 接线工程纵断面设计	495
9.4.2 接线段结构设计	496
参考文献	499

1 概 述

1.1 水下隧道修建方法

江湖河海在为人类带来丰富水资源和美好自然景观的同时,也导致了地理单元的天然分割。水下隧道是人类克服自然障碍、与自然和谐共处的重大技术发明。水下隧道的修建方法主要有盾构法、沉管法、钻爆法和围堰明挖法。此外,国内外学者还对悬浮隧道法、伏贴式隧道法进行了研究,但其技术目前尚不成熟,暂未应用于工程实践。

1.1.1 盾 构 法

盾构法也称为全断面掘进机法,是一种全机械化的暗挖施工方法,它是依靠盾构机(或掘进机)在地层中推进和用切削装置进行地层开挖,通过出土机械或泥水循环系统将渣土运至洞外,并逐环拼装预制管片来支承四周围岩防止其坍塌,进而形成隧道衬砌结构的一种机械化施工方法(图 1.1.1)。早期的盾构法主要适用于单一的软弱地层,且断面较小;随着“复杂地质、大直径、高水压、长距离”隧道建设的需要,20 世纪末出现了现代盾构技术。

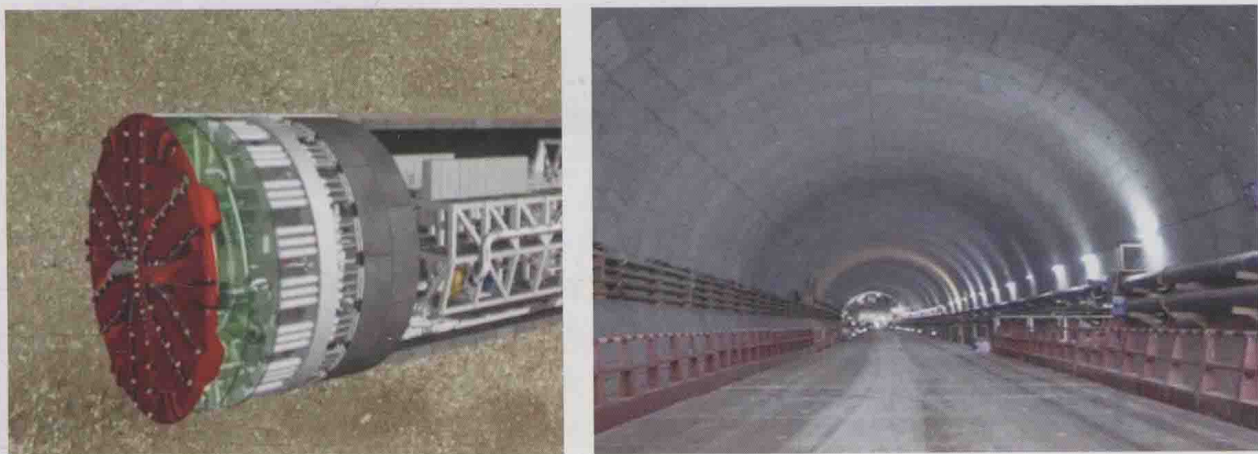


图 1.1.1 盾构法隧道概略图

盾构法的主要优点是机械化和自动化程度高、掘进速度快、施工安全、有利于环境保护和劳动保护,且盾构法对水深、隧道埋深、地层条件的适应性很大,可以适应松软土层和岩层。其主要缺点是结构整体性相对较差,接缝多。英法海峡隧道、日本东京湾海底隧道等著名的海底隧道便采用此工法修建;我国现阶段修建的(或在建的)大江大河水下隧道也绝大部分采用此工法,如武汉长江隧道、南京长江隧道、上海长江隧道、广深港高铁狮子洋隧道等。

1.1.2 沉 管 法

沉管法就是在水底预先挖好沟槽,将在陆地或其他地点预制的适当长度的管段,浮运至沉放现场,依次沉放在沟槽中并连接起来,然后回填覆盖而成为隧道的方法(图 1.1.2)。沉管法修建水下隧道的主要优点是:(1)隧道埋置深度浅,长度短;(2)沉管管段采用工厂化方法预制,质量好,并具有良好的水密性;(3)对地基承载能力要求低,基本不受地质条件的限制;(4)隧道断面形状无特殊限制,可根据需要自由选择,断面

利用率高,特别适用于较宽的断面;(5)随着施工技术水平与装备的进步,在相对较大的水深条件下也能安全施工;(6)因采用预制方式施工,可多工区平行作业,效率高,工期短。其主要缺点有:(1)基槽开挖和浮运沉放需短期占用一定水域,可能会影响通航;(2)基槽开挖量大,隧道弃渣量大;(3)水流速度大于 3.0 m/s ,或水流方向不稳定,或河床有深沟、地形陡峭,或回淤量大时,会造成管节浮运、沉放、对接困难。荷兰和日本是修建沉管隧道最多的国家,其他著名的沉管隧道还有美国海湾地铁隧道、丹麦—瑞典的 Oresnd 隧道,我国香港西区隧道、上海外环隧道、广州珠江隧道、宁波甬江隧道、港珠澳大桥隧道段等隧道均采用沉管法修建。



图 1.1.2 沉管法隧道管节预制厂概略图

1.1.3 钻爆法

钻爆法也称矿山法,是采用传统钻爆法或臂式掘进机开挖,利用喷射混凝土、锚杆、钢架、现浇混凝土等对围岩进行支护并形成隧道结构的施工方法(图 1.1.3)。钻爆法是修建山岭隧道常用的方法,将其用于水下隧道修建时,需特别注意强大的水压力会增加坍塌的可能性以及可能发生涌水,因而一般需要超前探明地质情况并准备充分的围岩加固和止水措施,其余与普通山岭隧道无太大差异。



图 1.1.3 钻爆法隧道概略图

由于水压力的危害是钻爆法修建水下隧道的主要控制因素,因此,钻爆法主要适用于在围岩稳定性较好的基岩中开挖隧道,且需要一定的基岩覆盖厚度,隧道长度也因此加长。挪威国内地形、地貌、地质条件较为适合采用钻爆法修建水下隧道,迄今为止采用此种工法已经修建了 100 多公里的水下隧道。钻爆法的典型实例还有日本青函海底隧道和新关门隧道,我国厦门东通道翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道、武广高铁浏阳河隧道、长沙湘江大道浏阳河隧道也采用了钻爆法施工。

1.1.4 围堰明挖法

围堰明挖法是首先在水域修筑围堰进行隔水,然后在围堰保护下采用传统的明挖法(基坑法或放坡开挖)修建隧道(图 1.1.4)。常用的围堰有模袋砂围堰、土围堰、双层钢板桩围堰、格型钢板桩围堰等。该工法工艺简单,主要用于不通航、水深不大或有枯水期出现的江河与湖泊。我国澳门大学横琴校区海底隧道、武汉东湖隧道等工程均采用此工法修建。



图 1.1.4 围堰明挖法隧道概略图

1.1.5 悬浮隧道法

悬浮隧道英文为 Submerged Floating Tunnel,简称“SFT”,在意大利又称“阿基米德桥”,简称“PDA”桥,一般由浮在水中一定深度的管状结构(该结构的空间很大,足以适应道路和铁道交通的要求)、锚固在水下基础的锚缆杆(或水上的浮箱)装置(该装置可防止隧道产生过大的位移)及与两岸相连的构筑物组成(图 1.1.5)。它是一种新的跨越海峡、大江湖泊的交通结构物。国内外已经有多家研究单位对此进行了研究,也逐步形成了一套新的理论,但是目前尚未有修建的实例。一般认为,悬浮隧道主要适用于两岸地势较高、河床或海底有局部深切冲沟的地形条件。



图 1.1.5 悬浮隧道概略图

1.1.6 伏贴式隧道法

伏贴式海底隧道构想者是中国海军隧道与地下工程专家何益寿。他结合渤海海峡隧道的地形条件,在沉管法隧道基础上,设计了“伏贴式隧道”方案:将隧道横截面模仿乌龟壳形状预制,用锚索将隧道固定在基岩上,以抵御海流对隧道的冲击;隧道贴着海床修建,使隧道长度达到最短,根据海底不同地形,设计配套方案“水下隧道桥”——在几条很深的海沟,用在水下建桥的方式跨越,可使整个隧道的坡度符合规范要求。该方案仅为一个设想,也缺少更深入的针对性研究。

1.2 水下隧道发展历史

1.2.1 盾构法

1. 国外情况

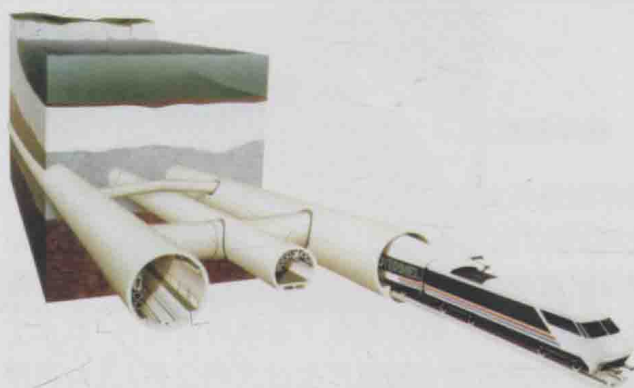
19 世纪 40 年代,英国首次采用盾构法修建了穿越伦敦泰晤士河的水下人行隧道,标志着水下盾构法

隧道的诞生。自 20 世纪 60 年代开始,英国首创泥水加压盾构,至 70 年代日本在泥水加压盾构方面取得很大进展,而且出现了一种更新颖的土压平衡式盾构。盾构法在深堆积中等软弱的地层中最为适用,因而在港湾下的浅水区和沿海地带经常采用。世界上已修建了大直径盾构隧道(直径大于 10 m)数百座,盾构法水下隧道最为集中的地点在纽约,其在赫德森河、东河、哈莱姆河下采用盾构法施工了 39 座隧道。

近几十年来,随着跨越江河、海湾建造大型通道工程需求的增多,大型、超大型盾构设计、制造、施工更臻成熟、可靠,并不断有新的突破和发展,盾构法应用越来越广。其中最具代表性的三大海底隧道(图 1.2.1~图 1.2.3)是 1993 年竣工的英法海峡隧道(长 49.5 km,由两孔内径为 7.8 m 的主隧道和一孔内径为 4.8 m 的服务隧道组成,设计行车速度为 160 km/h)、1995 年竣工的丹麦斯多贝尔特海峡隧道(长 7.26 km,由两孔内径为 7.7 m、外径为 8.5 m 的隧道组成,设计行车速度为 160 km/h)、1996 年竣工的日本东京湾横断公路隧道(长 9.6 km,由两孔外径为 13.9 m 的隧道组成,设计行车速度为 80 km/h)。其他已建成的代表性隧道还有 1997 年修建的德国汉堡易北河第四孔隧道(采用直径为 14.2 m 的盾构机进行施工,该隧道内径为 12.25 m、外径为 13.75 m,所用盾构机为海瑞克公司制造的混合式盾构掘进机,能承受 60 m 的水压)和 2005 年建成的荷兰阿姆斯特丹—鹿特丹高速铁路上的“绿色心脏”隧道(内径为 13.3 m、外径为 14.5 m,是当时世界上直径最大的盾构隧道)。

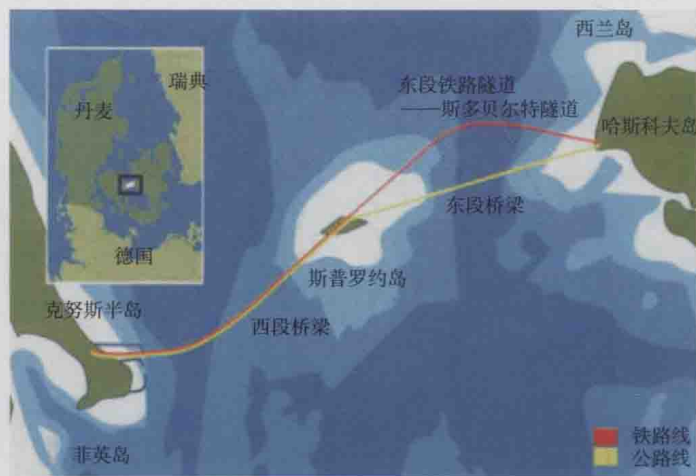


(a)地理位置

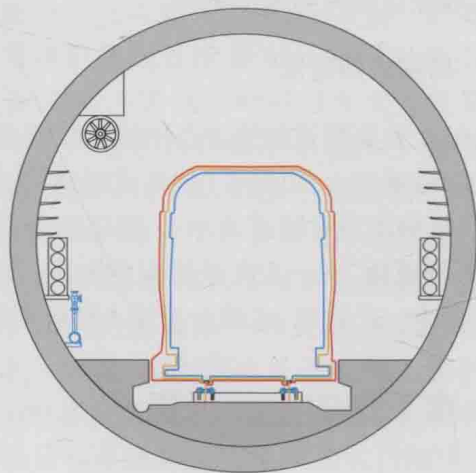


(b)结构布置

图 1.2.1 英法海峡隧道概况



(a)隧道平面



(b)隧道横断面

图 1.2.2 斯多贝尔特海峡铁路隧道概况

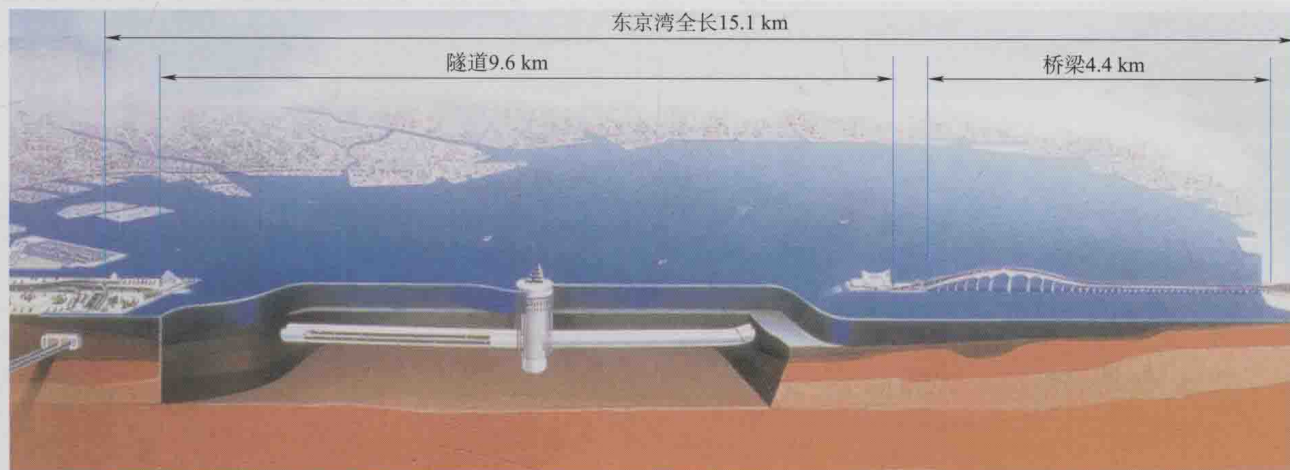


图 1.2.3 日本东京湾海底隧道工程概况

2. 国内情况

我国上海市于 1966 年和 1984 年分别修建了外径为 10.22 m 的打浦路越江隧道和外径为 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,上海市又先后修建了外径均为 11.0 m 的延安东路南线隧道、大连路隧道、复兴东路隧道三条越江道路隧道;近年又完成了外径为 11.36 m 的翔殷路隧道和外径为 14.5 m 的上中路隧道。位于长江上游的重庆也于 2005 年建成了外径为 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,将我国水下隧道的建设规模和修建技术推进到了新的高度。目前国内已在黄浦江、长江、珠江、钱塘江、湘江等河流采用大直径盾构修建了数十条水下隧道,其中直径最大的盾构隧道是上海长江隧道(长 8 740 m,双向六车道,设计行车速度为 80 km/h)和杭州钱江隧道(长 4 250 m,双向六车道,设计行车速度为 80 km/h),隧道外径为 15.0 m;长度最大和水压力最高的隧道是广深港高铁狮子洋隧道(长 10 800 m,双孔单线,设计行车速度为 350 km/h),盾构段长度为 9 340 m,水压力为 67 m;在全断面砂层中掘进最长的隧道是南京长江隧道(长 3 905 m,双向六车道,设计行车速度为 80 km/h),直径为 14.5 m,盾构段长 3 022 m;在长江上开工和贯通最早的大直径盾构隧道是 2008 年 12 月通车的武汉长江隧道(长 3 630 m,由两孔外径为 11.0 m 的隧道组成,双向四车道,设计行车速度为 60 km/h)。其他已建成的代表性隧道还有 2010 年 12 月通车的外径为 11.3 m 的杭州庆春路钱塘江隧道(长 3 765 m,双向四车道)、2011 年 12 月通车的外径为 6.2 m 的武汉地铁 2 号线越长江区间隧道(长 3 100 m,双孔)、2014 年 9 月通车的外径为 14.5 m 的扬州瘦西湖隧道(长 2 230 m,双向四车道,单孔双层)等。

3. 国内外代表性盾构法水下隧道

国内外代表性盾构法水下隧道见表 1.2.1。

表 1.2.1 国内外代表性盾构法水下隧道

序号	隧 道 名 称	国家或地区	隧道外径(m)	建成时间	隧道长度(km)	备 注
1	苏伊士运河隧道	埃 及	11.6	1980	5.90	公路
2	英法海峡隧道	英国—法国	8.32, 8.68	1994	49.5	铁路
3	斯多贝尔特海峡隧道	丹 麦	8.5	1995	7.917	铁路
4	东京湾海底隧道	日 本	13.9	1996	9.6	公路
5	西斯海尔特河隧道	荷 兰	11.3	2002	6.60	公路
6	易北河第四隧道	德 国	13.8	2003	2.56	公路

续上表

序号	隧 道 名 称	国家或地区	隧道外径(m)	建成时间	隧道长度(km)	备 注
7	绿色心脏隧道	荷 兰	14.5 m	2004	7.155	铁路
8	东京神田川调水隧道	日 本	13.94	一期1998年, 二期2007年	4.50	水工
9	格劳后之隧道	瑞 士	11.6	—	5.50	公路
10	打浦路隧道	中国上海	10.0	1971	2.7	公路
11	大连路隧道	中国上海	11.0	2003	1.26(盾构段)	公路
12	延安东路隧道	中国上海	11.0	1988	1.38(盾构段)	公路
13	复兴东路隧道	中国上海	11.0	2004	1.28(盾构段)	公路
14	翔殷路隧道	中国上海	11.2	2005	1.43(盾构段)	公路
15	上中路隧道	中国上海	14.5	2007	1.61(盾构段)	公路
16	武汉长江隧道	中国武汉	11.0	2008	2.55(盾构段)	公路
17	南京长江隧道	中国南京	14.5	2010	3.022(盾构段)	公路
18	上海长江隧道	中国上海	15.0	2009	7.60(盾构段)	公路
19	杭州庆春路钱塘江隧道	中国杭州	11.3	2010	1.765(盾构段)	公路
20	钱江隧道	中国杭州	15.0	2013	3.45(盾构段)	公路
21	广深港狮子洋隧道	中国广州	10.8	2011	9.34(盾构段)	铁路
22	扬州瘦西湖隧道	中国扬州	14.5	2014	1.20(盾构段)	公路

1.2.2 沉 管 法

1810年, Charles Wyatt 首次在伦敦进行沉管隧道施工试验, 但未能解决防水问题; 1885年在西特奈建成了自来水管, 1894年美国在波士顿建成下水管线。但真正意义上的沉管隧道是1910年美国建成的底特律水底铁路隧道(钢壳), 这标志着沉管隧道技术的诞生。此后, 在沉管隧道发展史上具有里程碑意义的有: 1942年荷兰建成鹿特丹马斯河隧道, 为世界首次采用矩形钢筋混凝土管段; 1959年加拿大成功采用水力压接法建成迪斯岛沉管隧道; 20世纪60年代荷兰发明了GINA止水带; 20世纪40年代丹麦发明了喷砂法、瑞典60年代发明了灌囊法、荷兰70年代发明了压砂法、日本70年代发明了压注混凝土和压浆法。由于技术上的突破, 使沉管隧道的建设进入了一个迅速发展的新纪元。尤其进入20世纪70年代以后, 沉管隧道发展十分迅速, 在修建长度、断面、水深、工艺等方面均有新的突破。到目前为止, 全球有大约150座交通隧道和45座市政隧道采用沉管法修建, 以北美、欧洲和亚洲应用较多。

截至2015年底止, 世界上最长的沉管隧道是美国旧金山海湾地铁隧道(1970年), 沉管总长度为5825 m, 由58节管节组成; 单管节最长的是荷兰阿姆斯特丹海斯普尔姆隧道(1980年), 单管节长度为268 m, 重量达5万 t; 沉管断面最宽的是荷兰多德雷赫特隧道(1977年), 断面宽度为48.6 m; 水流速度最大的是比利时安特卫普斯海尔德隧道(1969年), 水流速度达3 m/s。在水深方面, 水深最大的沉管隧道是土耳其的博斯普鲁斯隧道, 最大深度达58 m; 其次是韩国釜山—巨济岛隧道(图1.2.4), 最大水深达50 m; 水深第三大的沉管隧道是美国旧金山海湾地铁隧道, 最大水深达41 m。近年来建设的断面大、长度长的隧道还有日本东京港隧道(双向六车道公路隧道, 长1.035 km)、香港东区跨港公铁两用隧道(双向四车道和两条铁路轨道通行孔, 长1.859 km)、丹麦厄勒海峡隧道(双向四车道、两孔单轨道和中央服务安全通道, 长3.15 km, 见图1.2.5)等。世界上长度较大的沉管隧道见表1.2.2。