

大断面水下盾构隧道 结构力学特性

何 川 张建刚 苏宗贤/著



科学出版社
www.sciencep.com

大断面水下盾构隧道 结构力学特性

何 川 张建刚 苏宗贤 著

国家自然科学基金 (50778154)

国家杰出青年科学基金 (50925830)

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA11Z116)

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2010CB732105)

联合资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以著者近年在大型水下盾构隧道领域的研究成果为主要内容,以管片衬砌的结构力学特性分析为主线,系统地阐述了大断面水下盾构隧道的结构理论体系及分析方法,详细地介绍了相似模型试验、结构原型试验及现场测试的具体细节和相关研究成果。全书依托具体工程实例,对大断面水下盾构隧道管片衬砌结构的设计和施工方面的诸多理论与技术问题进行了剖析,对实际工程具有参考价值。

本书可供从事盾构隧道设计、施工、建设管理的科技人员使用,也可作为高等院校隧道工程专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大断面水下盾构隧道结构力学特性/何川,张建刚,苏宗贤著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027526-4

I. ①大… II. ①何…②张…③苏… III. ①水下隧道-隧道工程-盾构(隧道)-结构力学 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 084188 号

责任编辑:韦 沁 胡晓春 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 8 月第一次印刷 印张:17 1/2 插页:1

印数:1—2 000 字数:420 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,盾构法在世界范围内得到了快速发展。随着现代盾构装备技术的进步,盾构法在大型水下隧道工程中得到了大量应用。近年我国大型跨江海水下盾构隧道的高速发展时期已经来临,一大批在国际上具有重大影响性的大型跨江海水下盾构隧道建成或正在建设中,如武汉长江隧道、上海长江隧道、南京长江隧道、杭州钱江隧道和珠江狮子洋隧道等。我国已成为世界上大型水下盾构隧道工程建设数量最多的国家。

大型水下盾构隧道的断面直径从地铁区间的6m左右跃升至10m以上,加之特殊的水下环境,工程建设难度很大。原有的小直径盾构隧道的建设经验不足以满足大断面水下盾构隧道的需要,相关理论与技术水平有待进一步提高,值得进行深入理论研究和技术开发。在此背景下,我们近年来针对大断面水下盾构隧道的结构设计和施工过程控制开展了相关研究。本书主要内容取材于国家自然科学基金项目“大型跨江海盾构法隧道施工期流固耦合问题研究”、国家杰出青年科学基金项目“长大交通隧道建设与营运关键科学问题”、国家高技术研究发展计划(863计划)“大型跨江海隧道结构力学特征及整体化设计方法研究”以及国家重点基础研究发展计划(973计划)“复杂环境作用下地下结构的长期安全性及其预测方法”的相关成果,同时结合了近年来针对武汉长江隧道、南京长江隧道、珠江狮子洋隧道、沪通铁路黄浦江隧道及重庆主城长江排水隧道等多项工程专题研究的相关成果。全书以管片衬砌的结构力学特性分析为主线,系统地阐述了大断面水下盾构隧道的结构理论体系及分析方法,详细介绍了相似模型试验、结构原型试验及现场测试的具体细节和相关试验研究成果,希望能供国内同行参考。

感谢中铁第四勘察设计院集团有限公司、南京长江隧道有限责任公司、中铁十四局集团有限公司、中铁隧道集团有限公司、中铁十二局集团有限公司和重庆排水有限公司等单位对相关课题研究提供的协助和经费资助,感谢以上单位的相关技术及管理人员对研究工作的大力支持。同时,还要感谢参与相关课题研究的西南交通大学博士及硕士研究生在现场试验和模型试验等方面所做的大量协助工作。

鉴于著者的水平及认识的局限性,书中如有不妥之处,望批评指正。

作 者

2010年6月于西南交通大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水下盾构隧道	1
一、国外概况	1
二、国内现状与发展趋势	2
第二节 盾构隧道衬砌结构体系与分析方法	3
一、结构体系	4
二、分析理论	9
三、研究方法	12
第三节 需解决的问题及途径	14
第四节 研究思路和对象	16
第二章 管片接头数值模拟与加载试验	22
第一节 接头连接方式和构造	22
一、接头构造	22
二、接头连接方式	24
三、接头防水	27
第二节 接头力学性能数值分析	29
一、接头分析模型的发展	29
二、有限元模型的建立	30
三、计算结果与分析	37
四、小结	46
第三节 管片接头加载试验	47
一、试验装置与准备	47
二、抗弯试验	51
三、抗剪试验	56
四、螺栓抗拔试验	60
五、小结	62
第三章 管片结构的理论分析与数值模拟	63
第一节 概述	63
一、分析方法	63
二、影响管片衬砌结构内力与变形的因素	66
第二节 经典梁-弹簧模型	68

一、概况	68
二、管片厚度	75
三、分块方式	76
四、拼装方式	79
五、小结	82
第三节 三维壳体结构计算模型	83
一、计算模型	83
二、成果分析	90
三、配筋问题	101
四、小结	103
第四节 管片结构三维局部结构施工分析	105
一、工程现象和分析	105
二、计算模型的建立	108
三、主要成果分析	111
四、局部应力场分布	118
五、小结	120
第四章 管片衬砌结构相似模型试验	121
第一节 概述	121
一、模型试验概况	121
二、对高水压问题的认识	122
第二节 相似模型试验	122
一、相似关系	123
二、相似材料的研制	125
三、接头模拟和模型制作	130
四、试验装置和工作原理	132
五、量测项目	139
六、试验分组和试验步骤	140
第三节 隧道结构与地层相互作用特征	148
一、水压	148
二、土压	151
三、非均布水压	154
四、地层条件	155
五、小结	159
第四节 不同水压下隧道管片衬砌结构分块方式和拼装方法	160
一、分块方式	160
二、拼装方法	164
三、小结	170
第五节 施工中壁后注浆缺陷对管片衬砌结构的力学影响	171

一、试验概况	171
二、周边全注浆与无注浆的试验结果比较	172
三、不同部位的注浆缺陷的试验结果比较	174
四、小结	179
第五章 管片衬砌结构原型加载试验	180
第一节 试验装置及试验方法	180
一、试验装置及加载原理	180
二、量测项目	184
三、试验准备	186
第二节 原型组合环管片加载试验	191
一、衬砌形式及加载过程	191
二、试验内力分析	193
三、数值内力分析	201
四、位移分析	207
五、接缝张开	211
六、小结	213
第三节 原型单环管片加载试验	213
一、衬砌形式及加载过程	213
二、试验内力分析	215
三、数值内力分析	223
四、位移分析	225
五、接缝张开	227
六、小结	229
第四节 破坏特征分析	230
一、错缝拼装	230
二、通缝拼装	236
三、小结	239
第六章 管片衬砌结构现场试验	241
第一节 概述	241
一、工程地质概况	241
二、试验断面	244
第二节 现场试验设备和量测项目	246
第三节 现场试验设备安装与测试	249
一、设备的安装	249
二、数据采集与处理	253
第四节 现场试验结果分析	254
一、地中位移分析	254
二、地层孔隙水压力分析	256

三、地层土压力分析	258
四、整环结构弯矩分析	260
五、整环结构轴力分析	264
六、隧道纵向应力变化规律分析	267
七、小结	267
参考文献	269

第一章 绪 论

盾构法施工的主要过程是在隧道一端建造竖井或基坑，然后盾构从竖井安装和始发。周边土层在盾构钢筒结构保护下不会发生坍塌，前方土体掘削面在盾构钢面板支撑下与舱内土压或泥水压始终保持压力平衡和稳定。前方采用盾构刀盘开挖土体，然后通过螺旋出土器或专用钢管道从后方出土，并同步在盾尾拼装管片衬砌环和向土层与衬砌的空隙中高压注浆。每当拼装完管片衬砌环就通过千斤顶推动盾构前进，继续进行下一循环作业。

第一节 水下盾构隧道

大型水下隧道工程的修建技术主要有盾构法、矿山法和沉埋管段法。矿山法造价较低但应对突涌水灾难的能力差，仅适于有安全保障的完整岩质深埋水底隧道；沉埋管段法存在问题较多，应用未能普及。世界上最早的盾构法隧道就是为穿越江河而设计的，是为克服海底或河底等非常恶劣的地质条件而开发的。随着封闭式盾构机的研制成功，盾构法成为了施工最安全、掘进速度快、适应复杂地层和地表沉降最小的优秀施工工法，已成为当今城市和水下隧道工程的主要施工方法^[1~3]。

盾构法具有以下优点^[4]：第一，施工安全。始终在密闭盾壳的保护下施工作业，基本避免了高压涌水和软土塌陷等重大施工灾难的发生。第二，施工速度快。盾构法施工的机械化程度最高，前方掘进、后方出土和安装管片作业均可自动化。第三，地表沉降小。能够更好地控制堤坝塌陷和变形，防止扰动决堤，前方土体掘削面始终在盾构面板保护下保持与舱内土压或泥水压的压力平衡，可以较好地控制地表沉降。第四，占用场地小。减小了两岸拆迁数量，除竖井外，其余的施工作业可以完全在地下进行。

一、国外概况

国外在跨江海盾构水下隧道建设上起步较早，自 1843 年第一座盾构法隧道——Times 河水底隧道完工以来，在世界范围内盾构法隧道从城市地铁到跨越江海交通的建设领域得到了快速发展。其中最具代表性的有 1993 年贯通的外径 8.4m 的英法海峡隧道、1995 年竣工的外径 8.5m 的丹麦斯多贝尔特大海峡隧道、1997 年建成的外径 13.9m 的日本东京湾横断公路隧道、2003 年建设的外径 13.75m 的德国易北河第四隧道和 2004 年建设的外径 14.5m 的荷兰绿色心脏隧道等。

日本盾构法发展最快^[5~8]。从 20 世纪 80 年代以来，日本无论是新型盾构法的开发，还是盾构机机械制作数量、盾构法建造隧道总长度、承包海外盾构隧道工程的数量

和地区、刊登有关盾构工法的刊物的数量以及向国际隧道学会历届学术会议提交的论文数量等均名列前茅。但因经验不足,研究也曾付出巨大代价^[9]。元山宏^[4]给出了 1995 年之前的日本 19 条大型水下盾构隧道建设实绩。之后最受瞩目的是东京湾横断公路隧道,整条长度为 9.1km 的海底隧道建造,是由 8 台直径为 14.14m 的超大型泥水加压式盾构在海底地层中穿越接通;衬砌环由 11 块组成,环宽 1.5m、厚度 0.65m,内部浇筑二次衬砌,厚度为 0.3m;其作用是增加整个衬砌环的自重,以作抗浮所需,此外还有利于防灾。

英法美等国家的盾构技术也并不示弱^[10]。英法两国集英法日美德等国的先进盾构施工技术于一体,联合建造了世界上最长的第一条海峡隧道,西起英国的福克斯通、东到法国的加来,全长 50km,水下长度 38km,最大深度 100m,由中间直径 4.8m 的服务隧道和两侧直径 7.8m 的铁路隧道组成。1999 年,英法两国又开始设计建造第二条英吉利海峡隧道(外径 15m)。表 1.1 为部分国外大型水下盾构隧道主要情况统计。

表 1.1 部分国外大型水下盾构隧道主要情况汇总

	埃及苏伊士运河 水下隧道	丹麦斯多贝尔 特大海峡隧道	日本东京湾 横断公路隧道	德国易北河 第四隧道	第二座英法 英吉利海峡隧道
建成时间	1980	1995	1997	2003	2008
工程地质	硬泥岩	冰碛和泥灰岩	冲积土	硬黏土砾石	—
施工机械	机械式	土压平衡	泥水平衡	复合式	土压平衡
盾构长度/km	5.912	7.500	15.000	2.560	50.500
水压/MPa	0.46	0.75	0.60	0.60	1.00
衬砌外径/m	11.60	8.50	13.90	13.75	15.00
管片厚度/m	0.60	0.40	1.00 (双层衬砌)	0.70	1.00 (双层衬砌)
管片幅宽/m	1.20	1.65	2.00	2.00	--
分块方式	13+2+1	6+1	11 等分	8+2+1	—

纵观国外水下隧道建设的历史和现状,虽然其起步较早,但真正的大型跨江海水下隧道工程并不多,依然缺乏水下隧道工程的建设经验,许多设计和施工关键难题还没有获得圆满的解决。

二、国内现状与发展趋势

我国的盾构技术研究在新中国成立前是个空白。新中国成立后,在阜新煤矿的输水道工程以及 1957 年的北京市下水道工程中进行过小口径盾构施工法的尝试,但系统全面的网格式挤压盾构法试验是 1963 年于上海塘桥正式起步的。上海隧道公司于 1966 年采用网格式盾构开始正式建造外径为 10m 的打浦路隧道,由此开始了我国大型水下隧道建设的历史^[11],而采用盾构法施工的大规模建设是从 20 世纪 90 年代以后开始,随

着经济迅速崛起,交通、运输基础设施蓬勃发展,极大地促进了水下隧道修建技术的进步。2004年开工的武汉长江隧道被誉为“万里长江第一隧”,近期开工建设的南京长江隧道工程 and 上海崇明长江隧道工程,标志着我国盾构施工技术进入了世界前列。表 1.2 为我国部分大型水下盾构隧道主要情况统计。

表 1.2 部分国内大型水下盾构隧道主要情况

	上海打浦路 隧道	上海延安东路 南线	上海大连路 隧道	武汉长江 隧道	南京长江 隧道	上海长江 隧道
建成时间	1970	1996	2003	施工中	施工中	施工中
工程地质	粉黏土	粉黏土	粉黏土	粉砂土	粉黏土、粉砂土	粉黏土
施工机械	网格式	泥水式	泥水式	复合式	复合式	泥水式
盾构长度/km	1.322	1.311	1.280	2.550	2.925	7.472
水压/MPa	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6
衬砌外径/m	10.0	11.0	11.0	11.0	14.5	15.0
管片厚度/m	0.60	0.55	0.48	0.50	0.60	0.65
管片幅宽/m	0.9	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0
分块方式	5+2+1	5+2+1	5+2+1	9等分	7+2+1	7+2+1
拼装方式	通缝	通缝	错缝	错缝	错缝	错缝
管片接头	双排,外弯内直	单排直螺栓	—	单排弯螺栓	单排斜螺栓	单排斜螺栓

据不完全统计,在未来 10 年内,我国将有数十座大型水下隧道开工建设^[3]。地域分布上从长江流域、珠江流域的近海城市向黄河流域、淮河流域和松花江流域等内陆或近海城市延伸,涉及铁路水下隧道、公路水下隧道、都市快轨水下隧道、城际专线水下隧道、磁悬浮交通水下隧道以及公铁合用水下隧道等,它们主要有:南水北调穿黄工程、杭州庆春路公路水下隧道、武汉—汉阳二次越江隧道、青岛—黄岛胶州湾海底隧道、沪通铁路越长江隧道、港—珠—澳海上通道、上海浦东—长兴岛水底隧道、大连海湾海底隧道、大连—烟台跨海铁路隧道、台湾海峡海底隧道、钱塘江第十通道隧道工程、哈尔滨松花江越江隧道、长沙湘江隧道及上海市长江西路、军工路、龙耀路越江隧道等。随着盾构设备质量的提高和成本的下降,盾构法已经成为目前穿越江海大型隧道的主流施工方法,正朝着大断面、高水压、大埋深、长距离和高速化施工的方向发展。然而目前盾构设计无规范可循,在设计和施工方面均面临着许多亟待解决的关键技术问题。

第二节 盾构隧道衬砌结构体系与分析方法

盾构隧道衬砌结构采用装配式拼装,与一般工法的隧道结构形式有很大不同。同时考虑到盾构施工法对结构的影响,隧道衬砌结构的构造需与之相匹配,而衬砌的力学分析方法需考虑结构特点和工程影响等因素。本节对盾构隧道衬砌的常见结构组成和一般分析和研究方法进行介绍。

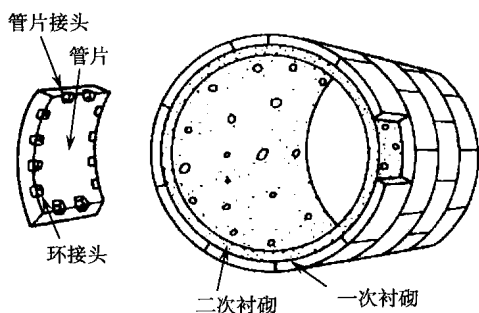


图 1.1 盾构隧道衬砌结构示意图

一、结构体系

盾构隧道的衬砌通常如图 1.1 所示，由一次衬砌和二次衬砌所组成。一般情况下，一次衬砌是将管片预制构件在接头处通过螺栓连接而成，而二次衬砌是在一次衬砌内侧现浇混凝土而成。具体看，盾构隧道衬砌结构体系主要分以下几方面：管片、接头、衬砌环分块方式和拼装方式、结构防水、二次衬砌和壁后注浆层。

(一) 管片

管片是盾构隧道衬砌结构体系的受力主体，除了支承衬砌结构周围的水、土压力外，还需承受盾构推进时千斤顶推力和施工期间其他特殊荷载，并要防止外界泥、水等物质的渗入，以满足预期使用要求。

管片从材料上分为钢、铸铁、钢筋混凝土以及钢壳与钢筋混凝土复合结构等。钢管片结构重量小、承载能力高，但其刚度小、耐腐蚀性差；铸铁管片耐腐蚀性较好，机械加工后精度较高，但因其金属消耗量较大、材料易呈脆性破坏等缺点近年极少采用；目前国内外普遍采用钢筋混凝土结构，因为其经济性和耐腐蚀性相对较好。

管片从形式上分主要有箱型和平板型结构两种，如图 1.2 所示。箱型管片是指带肋板型结构的管片，在日本习惯上将由钢和铸铁制造的薄壁肋型管片称为箱型管片，由混凝土制作的厚肋箱型管片也称为中子型管片。平板型管片是指具有实心矩形截面的板状管片，一般由混凝土制作。有时会有管片表面用钢板覆包或用钢材代替钢筋的做法，在日本习惯称之为复合型管片。各种管片相应具有不同的断面形式，如图 1.3 所示。

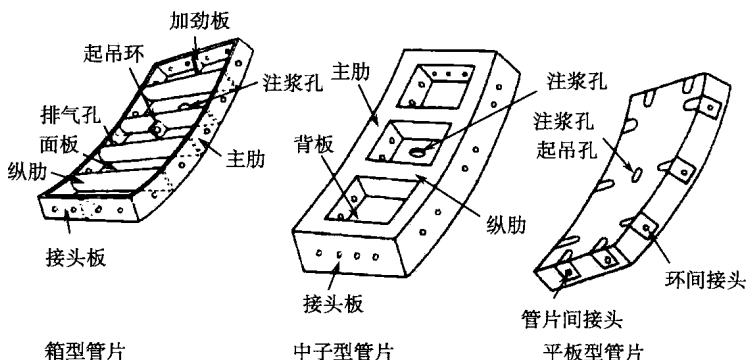


图 1.2 管片不同结构形式图

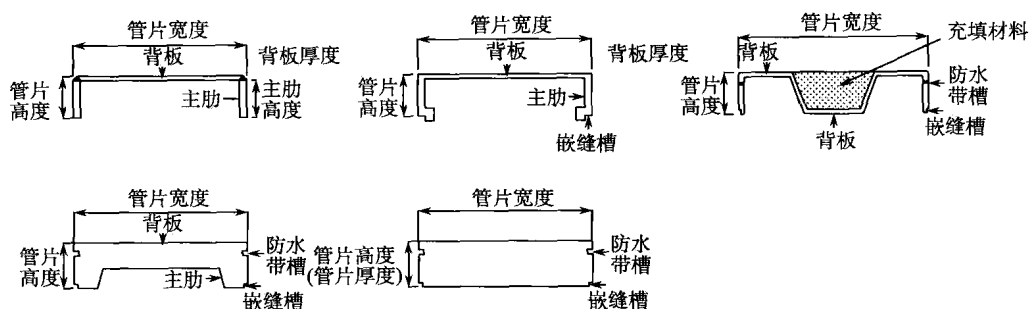


图 1.3 管片不同断面示意图

管片厚度由隧道外径、土质条件、覆盖土厚度及结构耐腐蚀性等因素共同决定，同时其厚度必须能够承受住施工时的千斤顶推力。还应注意，当管片厚度太薄时，施工时容易产生损伤，这也将成为结构不稳定的因素之一。

从搬运、拼装和曲线部位的施工性来看，管片宽度小较为有利。但是，从降低管片制作成本、提高施工速度和提高止水性等角度分析，宽度大较为有利。不仅如此，管片宽度的确定还应考虑到盾构机长度和千斤顶行程等因素。随着施工技术水平提高，管片幅宽有逐渐加大的趋势。

(二) 接头

接头是连接管片与管片的结构部位，包括接缝、螺栓及螺栓孔等，其连接方式和构造形式将影响着管片内力的传递与分布。此外，接缝被认为是防水的薄弱环节，因此它的另一个重要任务是防水。连接环内管片的接头称为环向接头，对应的接缝面为纵缝；连接环与环管片的接头称为纵向接头（有称环间接头），对应的接缝面为环缝，如图 1.4 所示。在力学上，为保持结构的稳定性，接头需能传递和承受一定的弯矩、轴力和剪力。

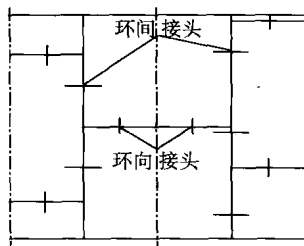


图 1.4 接头布置示意图

在过去管片接头多设计为刚性，认为刚度越大强度越大，经过长期的实践和研究，

这种观念逐渐被柔性结构思想所取代，接头连接从刚性向柔性过渡，有的甚至趋向于铰接。目前有观点认为这种结构的接头应是铰接性质的，否则如果没有地层的有效约束则容易成为非稳定结构，其安全性将会降低。

接头的连接方法有很多种，图 1.5 给出了应用较多的几个接头紧固方法，如图 1.6 给出了接头表面对接的几个主要方法。

接头的选型不但要考虑到接头承载能力，防水能力，与整环匹配性、经济性和易施工性等方面，还要使管片接头和环间接头相互协调、使接头紧固措施和接头面对接方法相协调。表 1.3 给出了目前使用的管片接头和环间接头的结构组合的实例。

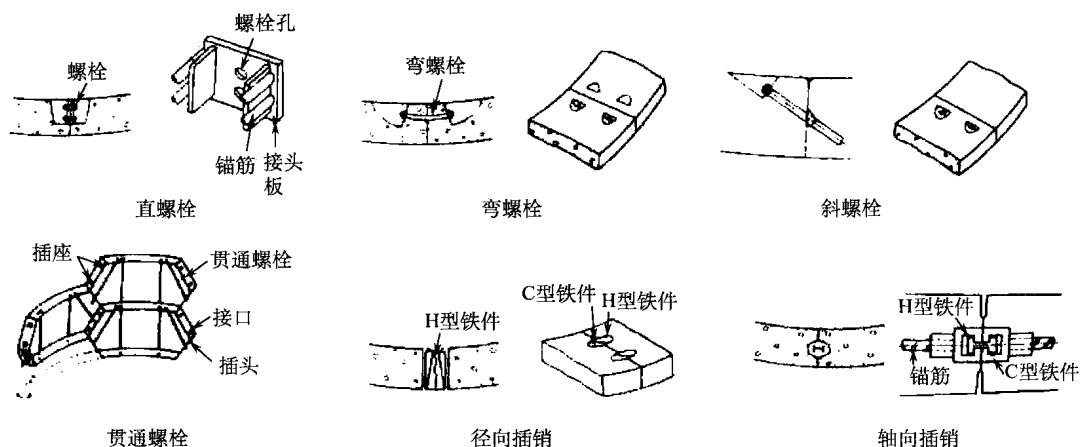


图 1.5 接头主要紧固方法

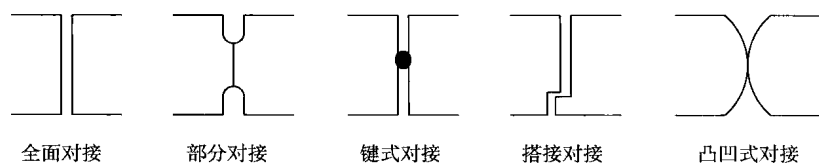


图 1.6 接头面主要对接方法

表 1.3 接头构造实例及特征

	管片接头		环间接头		特征
	对接方法	紧固方法	对接方法	紧固方法	
平板螺栓接头	全面对接	直螺栓	全面对接	直螺栓	—
有榫管片	部分对接	斜螺栓	键式	斜螺栓	环刚度小、不需紧固、斜螺栓施工用
高刚性构件与带销螺栓并用	全面对接	高刚性构件	全面对接	并用带销螺栓	环刚度大、拼装作业快速
开尾销与快速接头	全面对接	开尾销	全面对接	快速接头	环刚度大、拼装机械化快速化
KL管片	键式	弯螺栓	键式	弯螺栓	环刚度小
凸凹型与销榫	凹形接头	销子	键式	销榫	环刚度小、拼装作业快速
长螺栓	全面对接	长螺栓	全面对接	长螺栓	环刚度大
内表面光滑管片	全面对接、部分对接、键式	水平开尾销	键式	销榫	环刚度可调、拼装机械化快速化

(三) 衬砌环分块方式和拼装方式

将管片通过管片接头和环间接头拼装成一个整体就形成了管片衬砌环,如图 1.7 所示。从环向看,衬砌环的管片间需讨论如何分块;从纵向看,衬砌环间需讨论何种拼装方式。

通常情况下,一次衬砌环如图 1.8 所示,由标准块(A)、临接块(B)和封顶块(K)组成,其中 K 式管片因其拼装方法不同又可分为由隧道内侧半径方向插入的半径方向插入型、由隧道轴向插入的轴向插入型以及两者并用型。较少的管片分块具有降低施工制造成本、加快拼装速度和提高止水性等优势,但是单块管片尺寸和重量将会增大,给管片搬运拼装等施工带来诸多问题。因此,管片分块数量必须充分研究后综合决定。

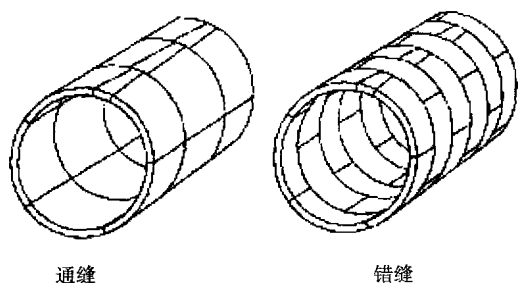


图 1.7 管片衬砌环示意图

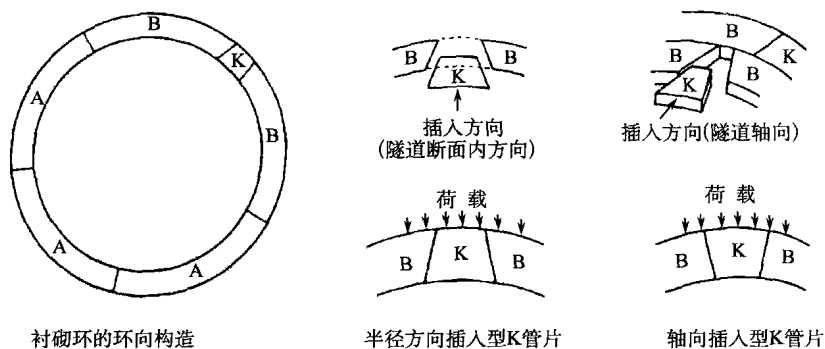


图 1.8 一次衬砌环环向构造示意图

管片的拼装方式有两种:通缝和错缝。上海的盾构隧道大部分采用通缝拼装;广州地铁、深圳地铁、北京地铁五号线试验段和南京地铁一号线皆采用错缝拼装。错缝拼装可提高管片接头刚度,加强结构的整体性。从结构受力考虑,采用错缝拼装的管片相对于通缝拼装的内力要大;从施工看,错缝拼装相对复杂,开裂也偏多。通过采取适当措施,这些缺点逐步得到克服。

(四) 结构防水

从环境保护和设施养护维修等角度看,隧道防水是重要命题。盾构隧道防水主要包括以下几个方面:管片体防水、壁后注浆层防水、接缝密封垫和嵌缝槽防水、螺栓孔和

注浆孔防水及二次衬砌防水等,如图 1.9 所示。管片体和接缝防水是主体,壁后注浆和二次衬砌是辅助手段^[7]。

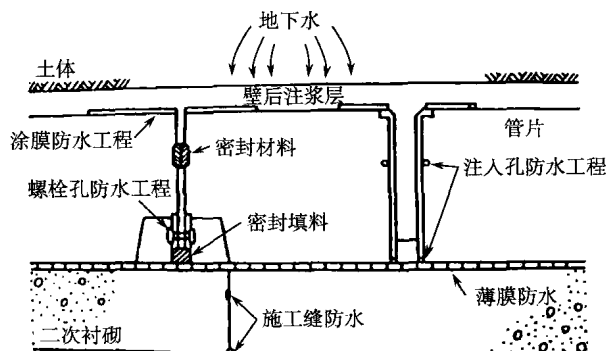


图 1.9 盾构隧道结构防水模式

接缝防水密封材料大致可以分为黏着性、弹性回弹力和遇水膨胀性三类。从应用实例看,使用黏着性为主的材料漏水较为严重,而使用遇水膨胀性密封材料的隧道漏水量会有大幅减少。近年来,采用遇水膨胀性密封材料或者复合密封材料的工程实例大量增加。遇水膨胀性密封材料虽然防水效果好,但开发时间尚短,对其耐久性有待进一步深入研究。

(五) 二次衬砌

当仅靠一次衬砌难以达到隧道的使用目的时,就会在一次衬砌内侧浇筑混凝土来满足设计要求,这就是二次衬砌。我国大多数盾构隧道均是省略二次衬砌的。

设置二次衬砌的思想有 4 种:一是,将一次衬砌作为隧道主体结构,二次衬砌作为对一次衬砌的补强、防蚀、防渗、减糙、修整和校正中心线偏离所用的构件来考虑;二是,将二次衬砌作为结构主体,一次衬砌作为某一特定时期使用的临时结构物考虑;三是,将二次衬砌和一次衬砌合为一体看做隧道主体结构;四是一次衬砌承受外荷载,二次衬砌承受内荷载。虽然人们对二次衬砌的看法和做法差别较大,但多数看法是不将二次衬砌作为隧道结构受力体。

施做二次衬砌无疑会增加断面直径和材料用量,并且将刚性二次衬砌与柔性一次衬砌嵌套将不利于结构抗震和减弱其适应地层变形的能力,纵向不均匀变形将使其开裂甚至失去防水能力,因此,施做二次衬砌时需考虑好其与一次衬砌的连接以及变形缝的设置。

(六) 壁后注浆层

由于拼装式衬砌在盾尾脱环后与地层开挖轮廓间存在间隙,因此需要注浆填充。注浆层的作用主要有 4 点:① 填充地层,向管片传递地层压力,减少地层扰动和地基沉降;② 使外力作用均匀,确保管片初期的稳定性和密封性;③ 作为管片防水的第一道防线,提高结构的抗渗和防腐能力;④ 作为衬砌结构的加强层,提供富余强度,提高

结构的安全性。在理想状态下,壁后注浆层对结构是有利的,然而在施工过程中,不均匀的注浆压力使得衬砌承受局部偏压,反而对结构不利。在设计过程中对注浆的有利作用一般不作考虑,将其视为安全储备或随时间逐渐失效的临时补强,但对于其不均匀压力造成的不利影响应予以考虑。

二、分析理论

国际隧道协会(International Tunnelling and Underground Space Association, ITA)^[12]在1978年成立了隧道结构设计模型研究组,负责收集各会员国采用的地下结构设计模型,1982年该研究组出版了其所调查的各种问题的汇总结果——《关于隧道工程结构设计模型》一书。入江健二(1993)^[13]根据新的进展汇总了目前各国所用设计模型的调查结果,并加入了1978年ITA的调查结果,见表1.4。从各国使用的衬砌计算模型看,基本特点是采用荷载-结构方法。

表 1.4 各国盾构衬砌设计方法汇总

国名	设计模型	设计水土压	地基抗力系数
澳大利亚	全周弹簧模型法; Muir Wood 法; Curtis 法	$\sigma_v = \text{全覆土重}$ $\sigma_h = \lambda \sigma_v + \text{静水压力}$	平板荷载试验
奥地利	全周弹簧模型法	浅埋: $\sigma_v = \text{全覆土重}, \sigma_h = \lambda \sigma_v$; 深埋: 泰沙基公式	$k = E_s/r$ 仅考虑径向
德国	覆土 $\leq 2D$, 局部弹簧模型法 覆土 $\geq 2D$, 全周弹簧模型法	$\sigma_v = \text{全覆土重}$ $\sigma_h = \lambda \sigma_v (\lambda = 0.5)$	$k = E_s/r, E_s/R_c$ 或 $0.5E_s/R_c$
法国	全周弹簧模型法; 有限元法	$\sigma_v = \text{全覆土重或泰沙基}$ $\sigma_h = \lambda \sigma_v (\lambda \text{ 按经验值})$	$k = E/(1+\mu)r$
中国	匀质圆环法; 弹性铰圆环法; 梁-弹簧模型	$\sigma_v = \text{全覆土重或泰沙基}$ $\sigma_h = \lambda \sigma_v (\lambda \text{ 取试验值})$	垂直或平板荷载试验
日本	惯用法和修正惯用法; 梁-弹簧模型	$\sigma_v = \text{全覆土重或泰沙基}$ $\sigma_h = \lambda \sigma_v (\lambda \text{ 取经验值})$	按照 N 值和土性查表
西班牙	考虑地层与结构相互作用的 Buqera 法	不计黏着力的泰沙基土压力	只考虑径向
英国	全周弹簧模型法; Muir Wood 法	$\sigma_v = \text{全覆土重}$ $\sigma_h = (1+\lambda)/2 \sigma_v \lambda = K_0$	三轴试验
美国	弹性地基圆环法	$\sigma_v = \text{全覆土重}, \sigma_h = \lambda \sigma_v$	室内试验

盾构隧道圆形衬砌作为地下结构的一种,形状具有规则性,在计算理论上有其自己的特点,下面对其发展演变情况做一简述。

1922年 Hewet^[14]和 Johanson 最早提出圆形衬砌考虑弹性抗力,根据圆形衬砌水平直径处位移等于零的条件来计算地层抗力,这个建议的缺点在于未考虑衬砌变形。