



# 沉管隧道设计与施工

陈韶章 主编  
陈越 副主编  
张弥 审校

科学出版社

103

U459.5  
C47

# 沉管隧道设计与施工

陈韶章 主 编  
陈 越 副主编  
张 弥 审 校

科学出版社

2002

## 内 容 简 介

本书全面地介绍了建设沉管隧道所需的基本资料,沉管隧道的可行性论证、几何设计、基础设计、结构与防水设计、管节预制、基槽开挖,以及管节浮运、沉放和水下对接,岸上段、口部附属建筑及内装,还讨论了沉管隧道的照明、通风、交通及其设备监控、给排水、消防及供电系统等。

本书可供从事隧道工作设计、施工的科技人员和高等院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

沉管隧道设计与施工/陈韶章主编,陈越副主编,张弥审校.—北京:科学出版社,2002  
ISBN 7-03-010112-X

I. 沉… I. ①陈…②陈…③张… III. ①水下隧道—隧道工程—设计②水下隧道—隧道工程—工程施工 IV. U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 006123 号

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>

西源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年5月第一次印刷 印张:28¼

印数:1-2 500 字数:652 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

## 序


沉埋管段法(简称沉管法)是20世纪初发展起来的一种修建水下隧道的新工艺。从1910年美国底特律河用此工法修建的第一座水下隧道算起,目前全世界已建成沉管隧道超过100座,沉埋管段法也已成为跨越江河(海)通道的主要经济技术比选的工法。

沉管隧道的横断面从早期圆型钢壳结构,发展到当今广泛采用的矩形钢筋混凝土结构,隧道的最大宽度达到48.8m,使用功能也从单一向多用途发展;管节预制方面,混凝土裂缝控制技术得到很大的提高,在传统的技术措施上采用了纵向预应力、钢纤维或化学纤维混凝土,改善了管节的抗渗能力;较新的钢筋混凝土管节预制已由传统干坞预制发展到工厂化流水线生产。应该说,各国在沉管隧道技术的研究和应用方面,正在不断创新并改进技术,使该工法的技术体系更加完善。

从隧道建设的统计数据来分析,经济越发达的国家和地区采用该工法建造水下隧道的数量就越多,主要的原因是沉管隧道具有独特的优势:由于隧道顶的覆土厚度可达到零覆盖,使隧址两岸经济高速发展、社会活动频繁地区的交通疏解能得到最大限度的优化和解决;使用功能的多元化和隧道宽度的增大,达到了大容量机动车的通行和轨道交通高速通行的目的;建设期间实现多工作面同时作业的工程策划,使沉管隧道的施工工期通常控制在三年以内;对于沉管隧道水中段的结构设计必须考虑结构的抗浮问题,使它对地基承载力无特殊要求,有利于该工法在软弱地层中的应用,特别在江河下游地区更适宜用沉管法修建水底隧道。

陈韶章教授级高级工程师从1974年开始就在广州黄沙至芳村的珠江水下隧道工程中从事设计与研究,是享受政府特殊津贴的专家,并在1987~1992年主持了该项目的初步设计和施工图设计。在他的带领下,全体设计人员克服重重困难,进行了40多项实验研究和大量的理论、数据分析。1993年12月28日我国大陆第一座公路与地铁两用沉管隧道建成,该项目于1996年获国家科学技术进步二等奖。陈韶章教授级高级工程师在总结该隧道设计与施工经验的基础上,吸取国内外有关成果,组织有关人员编写了我国第一本《沉管隧道设计与施工》专著,为我国沉管隧道建设的发展起到推动作用,为我国沉管隧道建设的设计和施工人员提供一本较完整而系统的参考书。

张弥教授主审了本书,使本书趋于完善。

中国工程院院士 

2002. 2. 15

# 前 言

沉管隧道在我国起步较晚,除台湾省及香港地区之外,目前大陆只有两座沉管隧道在20世纪90年代初投入运营,另外两座正在建设之中。随着我国国民经济的发展,在江河湖中修建高速公路、城市道路、地铁或高速铁路的水下沉管隧道必然会越来越多。为了促进我国在这一技术领域的发展,在北方交通大学张弥教授的倡议下,我们编写了《沉管隧道设计与施工》这本书。

本书由陈韶章担任主编,陈越担任副主编,刘应海、李满航、任孝思、王爱仪、黄旭东、任江等分别参加了有关的章节编写。这些作者大部分均为广州市地下铁道设计研究院参加广州黄沙至芳村珠江水下隧道的主要设计人员。张弥教授对全书进行审查并定稿。

本书也得到施仲衡、刘建航、王梦恕三位中国工程院院士的指导,以及广州市建设委员会的大力支持,特对此深表感谢。

由于理论水平不高及工程实际经验不足,本书难免存在不足之处,希望读者批评指正。同时恳切希望国内从事这一技术领域设计、科研及施工的同行,提出宝贵意见,以便通过我们共同努力,尽快使我国在这一技术领域赶上和超过国际先进水平。

# 目 录

## 序

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 沉管隧道的发展历史 .....	1
1.2 沉管隧道的技术发展 .....	5
1.3 选择沉管隧道的原则 .....	10
1.4 圆形钢壳管节沉管隧道简介 .....	15
<b>第二章 基础资料</b> .....	20
2.1 气象资料 .....	20
2.2 水文和水质资料 .....	21
2.3 工程地质及地震资料 .....	23
2.4 地形与测量 .....	24
2.5 沿线地面、地下构筑物资料 .....	25
2.6 环境资料 .....	25
2.7 交通调查 .....	27
2.8 基础资料调查小结 .....	28
<b>第三章 工程可行性研究报告的编制</b> .....	35
3.1 概述 .....	35
3.2 建设必要性及建设规模的论证 .....	36
3.3 工程技术可行性论证 .....	43
3.4 工程经济可行性论证 .....	48
3.5 附录:道路沉管隧道采用的主要设计规范 .....	56
<b>第四章 沉管隧道的几何设计</b> .....	59
4.1 道路沉管隧道的几何设计 .....	59
4.2 地下铁道沉管隧道的几何设计 .....	74
4.3 铁路或高速铁路沉管隧道的几何设计 .....	87
<b>第五章 沉管隧道的结构与防水设计</b> .....	89
5.1 结构设计荷载和组合 .....	89
5.2 结构静力计算 .....	92
5.3 柔性接头的结构设计 .....	123
5.4 柔性接头处剪切键设计 .....	131
5.5 最终接头的处理 .....	134
5.6 管节之间采用水力压接实现初始水密封的刚性接头 .....	137

5.7	结构防水	138
5.8	端钢壳、钢底板、外防水层和施工缝防水设计	139
5.9	端钢壳与防水底钢板的防护	143
<b>第六章</b>	<b>抗震设计</b>	<b>145</b>
6.1	沉管隧道抗震设计依据	145
6.2	沉管隧道抗震设计的主要步骤及理论基础	153
6.3	沉管隧道抗震设计实例之一——日本东京港沉管隧道抗震设计	157
6.4	沉管隧道抗震设计实例之二——广州黄沙至芳村珠江水下隧道地震应力研究	165
<b>第七章</b>	<b>管节预制</b>	<b>188</b>
7.1	管节预制场地之一——干坞	188
7.2	管节预制场地之二——船台	192
7.3	浮力设计	193
7.4	管节预制技术要求	196
7.5	管节预制场地(干坞)施工平面布置	200
7.6	管节预制施工工期及施工进度	205
7.7	管节预制施工主要设备和工序	208
7.8	金属构件及预埋件安装	217
7.9	安装 GINA 橡胶止水带	221
7.10	混凝土防锚层的构造	227
7.11	工厂化生产管节的实例	228
<b>第八章</b>	<b>沉管段基槽开挖</b>	<b>229</b>
8.1	沉管段基槽开挖方案设计	229
8.2	基槽开挖需考虑的问题	232
8.3	基槽开挖船舶选择	234
8.4	基槽开挖施工	236
8.5	管节沉放对接临时支座的放置施工	239
<b>第九章</b>	<b>管节浮运、沉放及水下对接</b>	<b>241</b>
9.1	概述	241
9.2	管节浮运、沉放各工况的结构安全性检算	243
9.3	管节浮运沉放试验研究	248
9.4	管节浮运、沉放、对接施工	265
<b>第十章</b>	<b>基础设计及处理</b>	<b>278</b>
10.1	概述	278
10.2	基础处理方法的选择原则	279
10.3	沉管隧道沉管段的基础设计	290
10.4	回填处理	312
<b>第十一章</b>	<b>岸上段、口部附属建筑及内部装修</b>	<b>313</b>
11.1	岸上段	313
11.2	道路沉管隧道的口部建筑	326

11.3	洞内结构处理 .....	328
11.4	道路沉管隧道内部装修 .....	330
<b>第十二章</b>	<b>道路沉管隧道照明系统</b> .....	<b>332</b>
12.1	概述 .....	332
12.2	道路沉管隧道照明系统设计 .....	333
<b>第十三章</b>	<b>沉管隧道通风系统</b> .....	<b>361</b>
13.1	概述 .....	361
13.2	道路沉管隧道通风设计的基础资料调查 .....	363
13.3	道路沉管隧道通风系统设计 .....	363
13.4	通风量的计算 .....	365
13.5	通风方式选择 .....	371
13.6	道路沉管隧道口部及通风竖井周围环境控制 .....	397
13.7	快速轨道交通运输系统沉管隧道的通风系统简介 .....	403
<b>第十四章</b>	<b>道路沉管隧道的交通与设备监控系统</b> .....	<b>406</b>
14.1	概述 .....	406
14.2	中央计算机控制系统 .....	408
14.3	交通设备监控系统 .....	412
14.4	收费管理系统 .....	415
14.5	通风、照明、供电、排水等设备监控系统 .....	417
14.6	火灾报警系统 .....	419
14.7	通讯系统 .....	420
14.8	CCTV 系统 .....	421
14.9	中控室 .....	423
<b>第十五章</b>	<b>道路沉管隧道的给排水、消防及供电系统</b> .....	<b>426</b>
15.1	给、排水系统 .....	426
15.2	消防系统 .....	427
15.3	供电系统 .....	428
15.4	动力和照明系统 .....	431
15.5	电缆敷设与接地 .....	432
15.6	电力监控(SCADA)系统 .....	433
15.7	供电主要设备与要求 .....	435
<b>参考文献</b>	.....	<b>438</b>



# 第一章 绪 论

## 1.1 沉管隧道的发展历史

西方国家早在 18 世纪就开始了工业化起步,到了 19 世纪由于工业化促进了经济的发展,大量农村人口迁居城市,开始步入城市化的时代,人们产生了大量的出行需求,城市道路及轨道运输系统(包括有轨电车及地铁)、城间公路及铁路随之兴起,由此带来跨越江河及海湾(峡)的问题。钢铁工业的发展,在 19 世纪修建了大量钢桥。因此,在工程界把 19 世纪称为桥梁时代。

随着内河及远洋航运事业的发展,在江河下游、海湾(峡)通行轮船的吨位和密度越来越大,要求桥下通行的净空越来越高,跨度越来越大,使修建桥梁的造价及难度大增。由于受到城市规划的限制,不管是修建铁路还是道路桥梁,两岸线路的衔接随着城市发展更为困难。因此,人们不得不寻求另一种跨越江河及海湾(峡)的新方式。这就是用水下隧道来实现跨越江河及海湾(峡)的方式。目前修建水下隧道有如下几种施工方法:

1) 矿山法——一般适用于基岩中的地下工程,并采用传统钻爆法或臂式掘进机开挖。直到现在这种方法还在继续使用,比较典型的实例就是 1964 年动工,1985 年建成的日本青函海底隧道。

2) 盾构法——这是 1810 年由英国人 Brunel 发明的一种工法。从简单的人工(或带压缩空气)盾构,发展到今天的全断面机械掘进的土压或泥水平衡盾构,并可实施局部气压,由原来主要适用于软弱地层,发展到既能掘进软弱地层又能掘进中软岩层的混合盾构。盾构与全断面掘进机的结合成为今天的双护盾掘进机。管片材料由铸铁发展到钢筋混凝土。此工法在我国上海用来修建了多座穿越黄浦江的水下隧道。世界著名的英吉利海峡隧道也是用此工法修建的。

3) 围堰明挖法——这是一种较为简易的工法,主要用于水深不大或有枯水期出现的江河。我国山西省太原市在 20 世纪 70 年代建成的汾河水下公路隧道就是采用此工法。

4) 沉埋管段法(简称沉管法)——这是 20 世纪初发展起来的一种修建水下隧道的新工法。从 1910 年在美国底特律河用此工法修建第一座用于交通运输的水下隧道算起,已有整整 92 年的历史。根据国际隧协(ITA)在 20 世纪 90 年代中的统计,目前全世界已建成沉管隧道有 107 座。按国别(或地区)分布见表 1.1,按长度分见表 1.2,长度在 1 400m 以上的见表 1.3。

表 1.1 各国(或地区)修建沉管隧道座数

国家(地区)	美国	荷兰	日本	德国	加拿大	法国	比利时
数量	25.5	22	20	7	2.5	5	3
国家(地区)	瑞典	丹麦	阿根廷	俄罗斯	英国	希腊	澳大利亚
数量	2	3	1	1	2	1	1
国家(地区)	爱尔兰	古巴	西班牙	中国			
数量	1	1	1	8			

注:中国 8 座,其中 5 座为香港跨海隧道,1 座为台湾省高雄市的高雄隧道,1 座为广州珠江隧道,1 座宁波为甬江隧道。

表 1.2 各国(或地区)修建的沉管隧道的长度情况

长度/m	数量/座	长度/m	数量/座	长度/m	数量/座
小于 100	11	101~500	35	501~1 000	33
大于 1 000	27	大于 1 500	11	大于 2 000	5

表 1.3 长度在 1 400m 以上的沉管隧道

国家(地区)	隧道名称	长度/m	修建年代
美国	Baltimore Harbor	1 920	1957
美国	Hampton Road Bridge No. 1	2 091	1957
美国	Chesapeake Bay Bridge	1 750	1964
美国	Bay Area Rapid Transit(BART)	5 825	1970
中国香港	Cross Harbor	1 600	1972
美国	Hampton Road Bridge No. 2	2 229	1 976
中国香港	Mass Transit	1 400	1979
荷兰	Hemspoor	1 475	1 980
美国	Fort Mchenry	1 646	1987
中国香港	东区海底隧道	1 859	1989
中国香港	西区海底隧道	2 000	1997
丹麦、瑞典	Resund	3 510	1995 动工
日本	多摩川	1 649	1994

表 1.4 为世界各国已建和在建的沉管隧道目录(摘自铁道部科学研究院西南分院《世界沉管隧道工程技术信息研究》课题组:世界沉管隧道技术第二期——国际隧协 1997 年沉管隧道报告,121~125 页)。

我国早在 20 世纪 60 年代初,就曾在上海开展过此工法的理论研究。1976 年在我国杭州湾的上海金山石化工程中首次用此工法建成了一座排污水下隧道。我国香港地区于 1972 年建成了跨越维多利亚港的城市道路海底隧道。受此影响,广州市于 1974 年正式开始了用此工法修建城市道路水下隧道的研究。进入了 20 世纪 80 年代,我国广州、宁波两市用沉管法修建城市道路水下隧道项目进入了基本建设程序,在此期间相继完成了项目的立项、可行性研究报告的编制及审批、初步设计,并正式动工兴建。与此同时,我国台湾省于 1984 年亦在高雄市建成了高雄港道路沉管隧道。到了 20 世纪 90 年代初我国广州、宁波两市的沉管隧道相继建成通车。其中于 1993 年底建成通车的广州黄沙至芳村珠江水下隧道,成为我国大陆首次用此工法建成的第一座大型道路与地下铁道共管设置的水下隧道。广州珠江、宁波甬江水下隧道的建成,标志着我国在这一技术领域进入一个新的发展阶段。建设中的上海黄浦江下游环城高速公路的八车道水下隧道和拟建中的武汉跨越长江的城市道路与地下铁道共管的水下隧道、京沪高速铁路在南京市跨越长江的水下隧道(桥隧方案比较中的隧道方案),无论在工程规模、技术难度和科技含量等方面都远高于珠江、甬江水下隧道。这些隧道将于 21 世纪初建成,到时我国在这一技术领域将赶上世界先进水平。

表 1.4 世界各国已建和在建的交通运输沉管隧道目录

编号	隧道名称	国家(地区)	完工年代
T·1	Detroit River	美国	1910
T·2	La Salle St.	美国	1912
T·3	Harlem River	美国	1914
T·4	Friedrichshagen	德国	1927
T·5	Oakland-Alameda(Posey)	美国	1928
T·6	Detroit Windsor	美国	1930
T·7	Bankhead	美国	1940
T·8	State Street	美国	1942
T·9	Maas	荷兰	1943(1941)
T·10	Aji River	日本	1944
T·11	Washburn	美国	1950
T·12	Elizabeth River No. 1	美国	1953
T·13	Baytown	美国	1957
T·14	Baltimore Harbor	美国	1957
T·15	Hampton Roads No. 1	美国	1957
T·16	Havana	古巴	1958
T·17	Deas Island	加拿大	1959
T·18	Rndsburg	德国	1961
T·19	Webster Street	美国	1962
T·20	Elizabeth River No. 2	美国	1962
T·21	Chesapeake Bay	美国	1964
T·22	Liljeholmsviken	瑞典	1964
T·23	羽田(公路)	日本	1964
T·24	羽田(单轨铁路)	日本	1964
T·25	Coen	荷兰	1966
T·26	Wolfburg Pedestrian	德国	1966
T·27	Rotterdam Metro	荷兰	1966(1968)
T·28	Benelux	荷兰	1967
T·29	Lafontaine	加拿大	1967
T·30	Vieux-Port	法国	1967
T·31	Tingstad	瑞典	1968
T·32	Ij	荷兰	1968(1969)
T·33	J. F. Kennedy(Scheldt E3)	比利时	1969
T·34	Heinenoord	荷兰	1969
T·35	Limfjord	丹麦	1969
T·36	Parana(Hernandias)	阿根廷	1969
T·37	堂岛河	日本	1969
T·38	道顿堀河	日本	1969
T·39	羽田(多摩川)	日本	1970
T·40	羽田(京滨海峡)	日本	1970
T·41	Bay Area Rapid Transit	美国	1970

续表 1.4

编号	隧道名称	国家(地区)	完工年代
T·42	Charles River	美国	1971
T·43	跨港	中国香港	1972
T·44	63rd Street	美国	1973
T·45	Interstate Route 10(Mobile)	美国	1973
T·46	衣浦港	日本	1973
T·47	大仪真	日本	1974
T·48	Elbe River	德国	1975
T·49	Vlake	荷兰	1975
T·50	Kanonerski	俄罗斯	1975
T·51	隅田川	日本	1976(1975)
T·52	Hampton Roads No. 2	美国	1976
T·53	Paris Metro	法国	1976
T·54	东京港	日本	1976
T·55	Drecht	荷兰	1977
T·56	Prinsess Margriet	荷兰	1978
T·57	Kil	荷兰	1978
T·58	WMATA Washington(DC)	美国	1979
T·59	香港地铁	中国香港	1979
T·60	Hemspoor	荷兰	1980
T·61	Botlek	荷兰	1980
T·62	大马	日本	1980
T·63	东京第二航路	日本	1980
T·64	川崎	日本	1980
T·65	Rupel	比利时	1982
T·66	Metropolitan Rail Main	德国	1983
T·67	Bastia Old Harbour	法国	1983
T·68	S-Bahn Rein-Main	德国	1983
T·69	Coolhaven	荷兰	1984
T·70	高雄港	中国台湾	1984
T·71	Spijkenisse Metro	荷兰	1985(1984)
T·72	Fort McHenry	美国	1985(1987)
T·73	Second Downtown	美国	1988
T·74	Guldborgsund	丹麦	1988
T·75	Ems	德国	1989
T·76	Marne River	法国	1989
T·77	Zeeburger	荷兰	1989
T·78	东区跨港	中国香港	1989(1990)
T·79	Conwy	英国	1991
T·80	Liefkenshoek	比利时	1991
T·81	Monitor-Merrimac	美国	1992
T·82	Sydney Harbour	澳大利亚	1992

续表 1.4

编号	隧道名称	国家(地区)	完工年代
T·83	Grouw	荷兰	1992
T·84	Noord	荷兰	1992
T·85	珠江	中国	1993
T·86	Météor	法国	1994
T·87	Ted Williams	美国	1994
T·88	Willemspoor	荷兰	1994
T·89	机场路先行段	中国香港	1994
T·90	Bilbao Metro	西班牙	1994
T·91	多摩川	日本	1994
T·92	Schiphol	荷兰	1995(1994)
T·93	Medway	英国	1996(1995)
T·94	Wijker	新西兰	1996
T·95	甬江	中国	1996
T·96	Piet Hein	荷兰	1997
T·97	机场隧道	中国香港	1997
T·98	西区跨港	中国香港	1997
T·99	Aqueduct	荷兰	1997
T·100	新泻港路	日本	在建
T·101	川崎航道	日本	在建
T·102	大阪南港	日本	在建
T·103	Aktion-Preveza	希腊	在建
T·104	River Lee	爱尔兰	在建
T·105	Fort Point Channel	美国	在建
T·106	Drogden	丹麦	在建
T·107	东京港海滨路	日本	在建
T·108	神户港岛	日本	在建

## 1.2 沉管隧道的技术发展

自 1910 年在美国首次用沉管法建成了穿越底特律河的铁路隧道,至 1980 年为止,在北美共修建了 23 座沉管隧道。美国在海湾修建的隧道较多,由于海湾的水深一般大于内河,采用钢壳或双层钢壳的结构(钢壳一般为圆形),从受力角度考虑比矩形有利。另外,在 20 世纪初,水下管节间的连接技术及混凝土结构防水技术未取得重大突破,而钢壳隧道无论在接头或防水方面都易于解决且较为可靠,因此可以说沉管隧道最早起源于钢壳管节的结构形式。20 世纪 30 年代初在美国修建底特律至加拿大 Windsor 市隧道时就确定了钢壳隧道结构的一般形式,直至现在其结构形式并无多大变化。例如,我国香港地区 1972 年建成的穿越维多利亚港的第一座沉管城市道路海底隧道,是由美国纽约的 Parsons Brinckerhoff Quade 和 Douglas 公司负责设计,由英国伦敦 Constain 国际有限公司及美国纽约 Raymond 国际公司和香港保华工程有限公司所组成的集团负责施工。由于

委托了美国顾问工程公司负责设计,其结构形式及工法与美国在 20 世纪 30 年代确定的钢壳沉管隧道结构的一般形式及施工工艺无根本差异,见图 1.1。

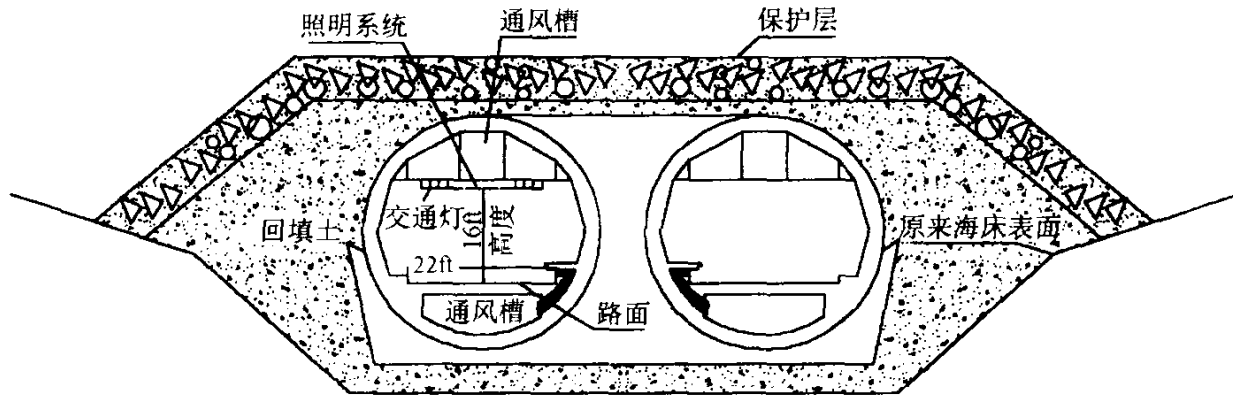


图 1.1 香港海底跨港隧道横断面图

日本于 1935 年开始修建沉管隧道。据不完全统计,就沉管的结构形式来说,约 60% 是矩形钢筋混凝土结构,40% 是圆形钢壳混凝土结构。日本沉管隧道的修建技术,也是从钢壳结构形式开始,后逐步被矩形钢筋混凝土的结构形式(见图 1.2)所代替。

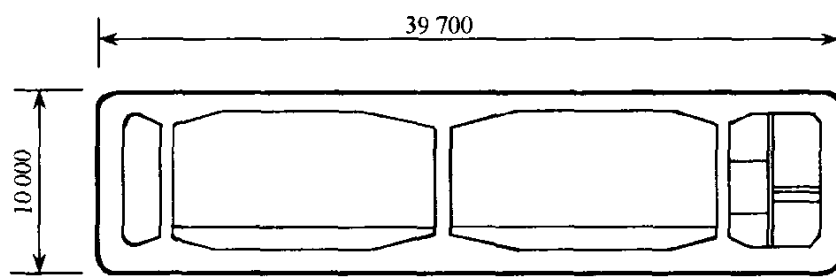


图 1.2 日本大马隧道横断面图(单位:mm)

荷兰于 1942 年修建位于鹿特丹的 Mass 河隧道,这是荷兰的第一座沉管隧道,也是世界上首次采用矩形钢筋混凝土管节的沉管隧道,它代表了西欧在这一领域的技术特点,与美国形成了鲜明的对比。管节之间水压接头的发明(这种水下水压接头普遍采用 GINA 橡胶止水带作为初始密封, $\Omega$  橡胶止水带作为永久性密封)、大体积钢筋混凝土浇注裂缝的控制、混凝土抗渗能力的提高等都促进了沉管隧道修建技术的高速发展,荷兰的这些技术在世界上处于领先地位,见图 1.3。

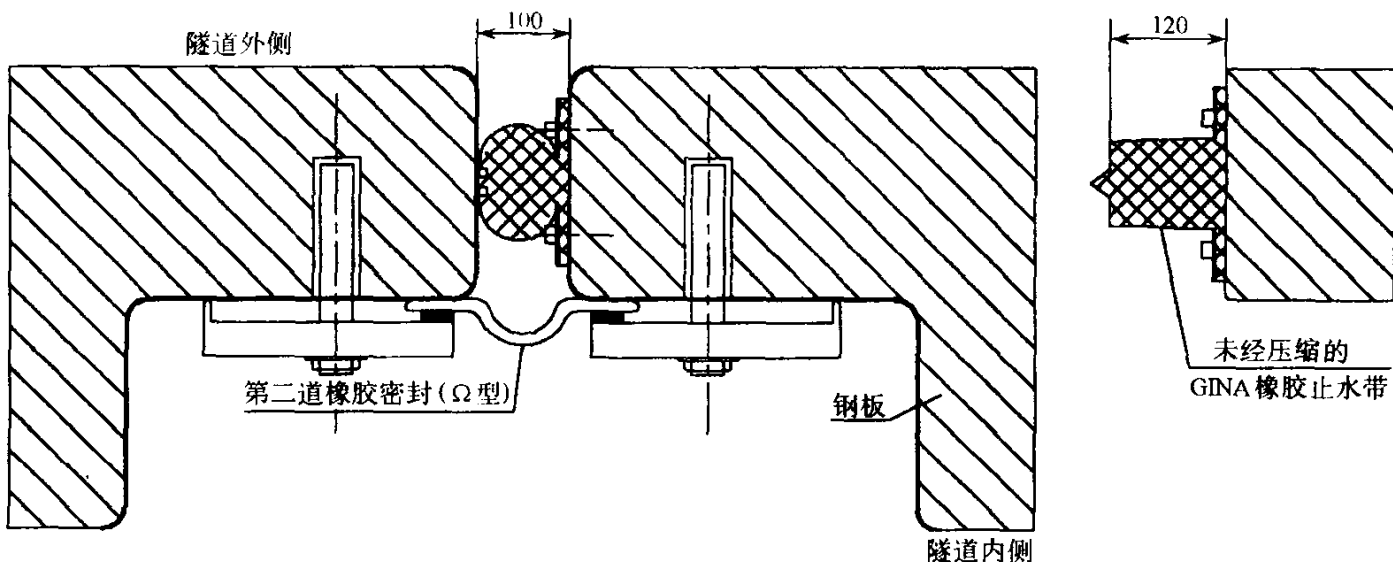


图 1.3 荷兰管节之间水下水压接头典型结构横断面图(单位:mm)

圆形钢壳混凝土结构与矩形钢筋混凝土结构沉管隧道在抗浮层设置上有较大差异。圆形钢壳混凝土结构的管节,在浮态时干弦高度较大,因此压重层一般设在钢壳的外顶部;而矩形钢筋混凝土结构的管节,在浮态时干弦高度较小,因此压重层一般在管节内底部。

从美、日、荷沉管隧道工程发展历史中,大致可以看出世界沉管隧道的技术发展趋势:

(1)每节管节长度越来越长,每节管节中的车道数越来越多。1910年在美国底特律河下用沉管法施工的隧道全长只有782m,由10节管节组成,每节长78.2m。而后来1970年在旧金山建成的海湾地区快速交通运输系统(BART)海底隧道全长5825m,由57节管节组成,每节长102.2m。目前世界上的沉管隧道每节管节长一般在100~130m,最大重量一般在30000~40000t范围之内。而荷兰京斯麦尔隧道仅有4节管节,每节长度268m,重达50000t。

城市道路或公路的沉管隧道,过去多为二车道,目前普遍为四、六车道,但也有采用八车道的。如美国采用钢壳结构形式的Fort McHenry隧道,以及荷兰采用矩形钢筋混凝土结构形式的Drecht隧道,其结构横断面形式见图1.4。这两条结构形式截然不同的沉管隧道是迄今为止世界上车道数最多的水下道路隧道。我国上海即将修成的黄浦江下游城市高速公路的沉管隧道,将成为世界上第三座八车道的 underwater 沉管隧道。

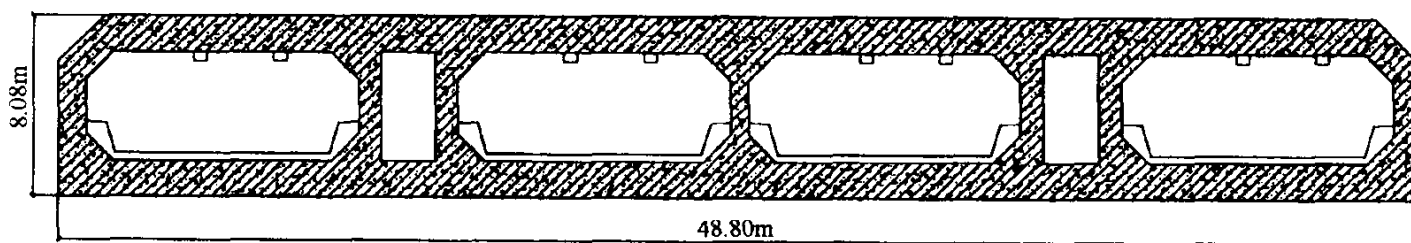


图 1.4 荷兰 Drecht 隧道结构横断面图

(2)从单一用途向多用途发展。最初的沉管隧道亦像用矿山法或盾构法修建的隧道一样,用途较为单一,即为城市道路(公路)或为铁路(地铁)水下隧道。随着沉管技术发展,特别是矩形钢筋混凝土结构形式沉管隧道出现,其横断面宽度尺寸可以较大,这样就出现了城市道路与地铁、公路与铁路共管设置,甚至可同时设置公共管廊。通行轨道运输系统的沉管隧道最近亦发展为能通行高速铁路的水下隧道,隧道内的行车速度最大可达200km/h,平均达160km/h。

(3)沉管隧道的地基适应性越来越广。沉管隧道可修建在较坚硬地基(河、海床)上,亦可修建在软弱地基(河、海床)上。世界上已建成的107座沉管隧道中,不少是修建在软弱地基上,见表1.5。

上面讲到的世界车道数最多的沉管隧道之一——荷兰的Drecht隧道,1977年建成,其单节管节横断面为8.08m(高)×48.80m(宽),4孔,每孔2车道,单节管节重达47000t,河床底主要为亚粘土质砂土沉积物。从这一工程实例可以看出,大断面沉管隧道主要的问题在于抗浮,对地基承载能力要求并不高,只要有先进的清淤技术(包括设备和工艺),同时采用合适的基础处理工艺,就能顺利在软弱地基上修建沉管隧道。Drecht隧道的隧址处水流速度达3.0m/s,平均潮位4.8m,最高潮位8.86m,由于流速大,回淤严重,曾采用底部设置“挡裙”的办法但未能成功,最后采用Christiani和Nielsen设计的喷砂基础处理专利技术工艺,才顺利地将淤泥清除,并用砂垫层置换淤泥,其施工工艺示意

见图 1.5。中国香港地区 1987 年建成的东区隧道,亦用喷砂工艺进行基础处理,成功解决了回淤问题。

表 1.5 世界上部分修建在软弱地基上的沉管隧道

国家(地区)	隧道名称	长度/m	基底河床描述	建成时间
美国	Bay Area Rapid Transit	5 825	砂、泥软土地基	1970
美国	Hampton Road Bridge No. 2	2 229	砂、泥软土地基	1976
中国香港	东区隧道	1 859	淤泥、泥砂	1989
中国香港	Mass Transit	1 400	软土地基厚达 30m	1979
荷兰	Zeeberger	336	淤泥软土厚 46m	1989
瑞典	Tingstad	454	后冰川期粘土	1968
丹麦	Limfjord	510	软粘土层	1969
美国	Elizabeth River No. 2	1 010	非常软弱土层	1962
日本	大马	672	软弱的冲积粘土层, 粘土 50%,粉砂土 40%	1980
日本	多摩川	1 550	粉砂质粘土	1994
日本	川崎航路	1 187	细砂	1994

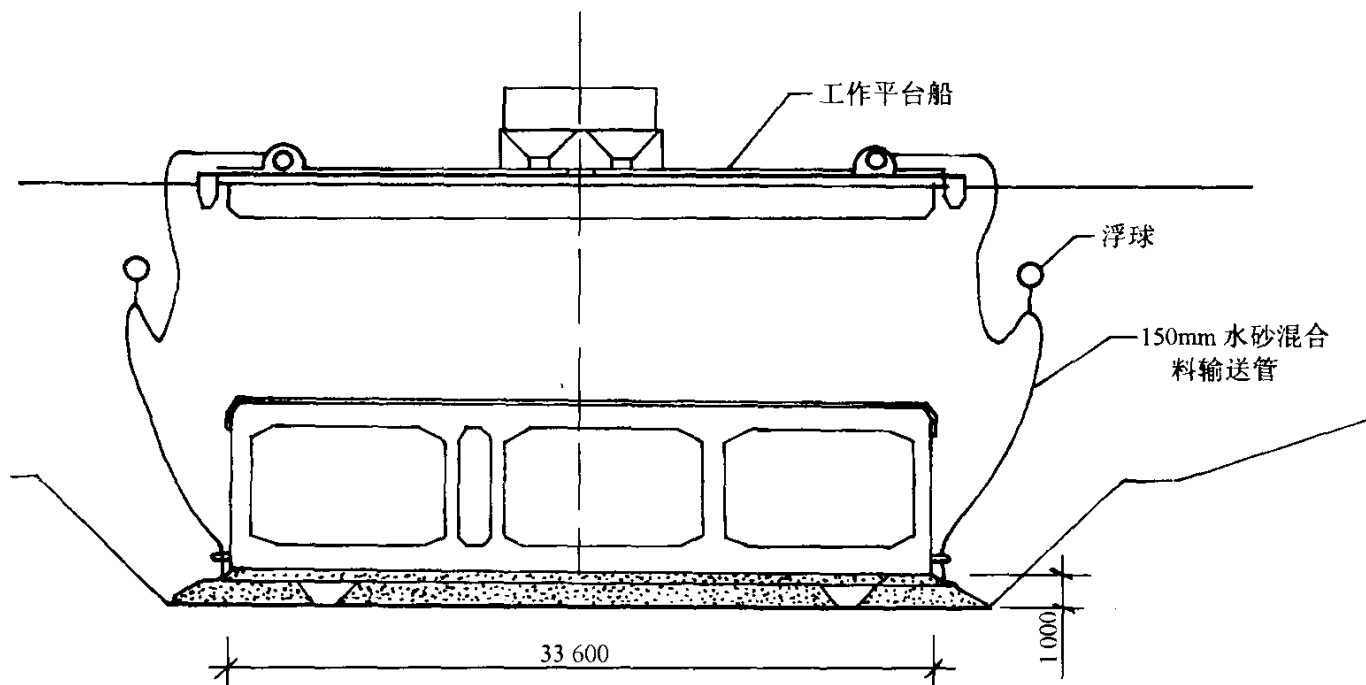


图 1.5 喷砂基础处理工艺示意图(单位:mm)

(4)制造管节材料逐步由钢筋混凝土取代,从管节制作方式和材料来看,圆形钢壳混凝土结构往往先在岸边的预制场制造钢壳后再下水,然后在水中处于浮态下浇注内衬混凝土。这种圆形隧道内一般只能设置两车道,在建造四车道隧道时就需制作两管并列管节。此结构形式的优点在于横断面接近圆形,受力较好,因而在水深大时比较经济。圆形管节底面较小,基础易于处理,钢壳既是浇注内衬混凝土的外模又是防水层,在浮运过程中不易破损,预制管节场地也易于解决。但圆形横断面的空间常不能充分利用。在钢壳下水及浮态下浇注内衬混凝土时,应力状态复杂,必须加强结构,故用钢量大,管节造价高。而且钢壳本身防锈问题尚未得到完全解决,手工焊接也不可能完全避免,防水质量难以保证,如有渗漏则不易补救。



矩形钢筋混凝土管节先在临时干坞内制作,制成后往坞内灌水,使之浮起并拖运至预定位置沉放。在同一横断面内可以容纳4~8条车道,这种管节优点是横断面空间利用率较高,建造多车道隧道时尤为突出;车道的标高可以抬高,隧道埋深较浅,隧道长度也相应较短,因而工程量及造价较低,并可节省大量钢材。但由于管节宽度较大,基础处理不如圆形横断面简便,同时为保证防水、抗渗及干舷高度要求,对钢筋混凝土管节制作工艺要求高。但采用钢筋混凝土管节是大势所趋。

(5)在钢筋混凝土管节预制过程中,需采取多种混凝土裂缝控制的技术措施,以确保钢筋混凝土管节的质量,特别要防止贯穿裂缝的出现。在最近世界上一些新建的沉管隧道中,除采用传统控制混凝土裂缝产生的技术措施外,为了增加管节结构的抗拉强度,还采用了纵向预应力措施。另外,也有采用钢纤维或化学纤维混凝土的,例如采用Dura纤维——美国Hill兄弟化工公司生产的高强聚丙烯单丝或网状纤维,可以极为有效地控制管节混凝土塑性收缩及离析裂缝,大大改善钢筋混凝土管节的抗渗能力。

(6)钢筋混凝土管节的预制,由传统干坞预制发展到工厂化流水线生产。例如1995年7月动工修建、2000年6月建成通车的丹麦哥本哈根到瑞典Malmö之间的Dragden海峡沉管隧道,沉管段长3.5km,由20节钢筋混凝土管节组成,每节管节长175m,宽42m(分八个施工段浇注)。预制厂濒临海边,东西向布置(东面临海),西端设预制车间,内有两条平行的浇注管节生产作业线。预制场东面设置高低两蓄水区(高蓄水区底的标高在海平面之上,低蓄水区底的标高在海平面以下,两蓄水区的水深都能保证管节起浮的吃水深度),高蓄水区西端设置滑行闸门,低蓄水区东端设置浮运闸门,滑行道延至高蓄水区内(超过一节管节长度)。当浇注完成的管节滑至高蓄水区内,关闭两端闸门,往高蓄水区注水,管节起浮后,浮运至低蓄水区,然后打开东端的浮运闸门,高蓄水区的水排至海中,管节即可浮运出低蓄水区,见图1.6。

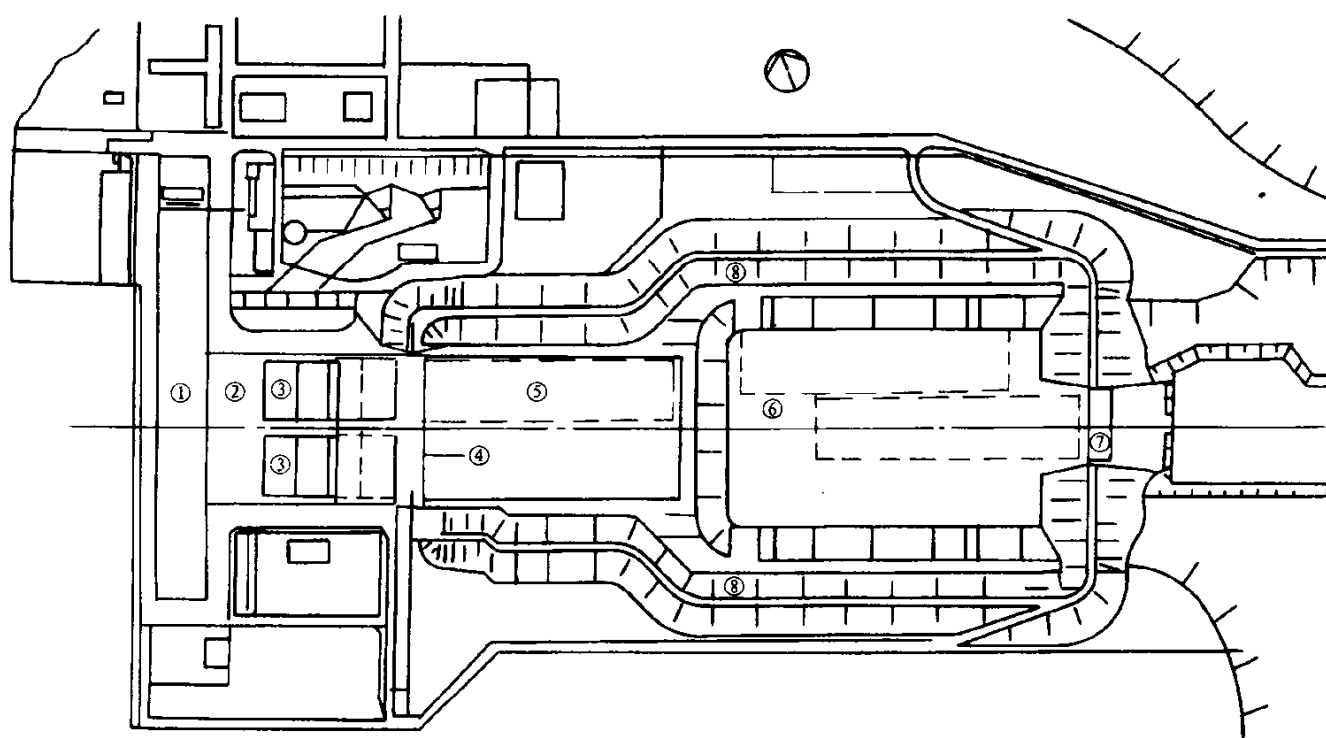


图 1.6 Dragden 海峡沉管隧道施工平面图

- ①钢筋预制车间 ②预浇筑车间 ③浇筑底座 ④滑动门  
⑤高蓄水区 ⑥低蓄水区 ⑦坞门 ⑧干坞围堰