

港珠澳大桥岛隧工程 外海沉管安装

林鸣 王强 尹海卿 刘晓东 宿发强 著

科学出版社



港珠澳大桥岛隧工程

外海沉管安装

林鸣 王强 尹海卿 刘晓东 宿发强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书依托港珠澳大桥沉管隧道工程,对外海沉管安装关键施工技术和
管理技术进行总结,包括自主研发具有国际领先水平的数字化、信息化和
集成化的专用技术装备系统,自主开发大型沉管外海拖航、锚泊定位、深
水无人沉放对接成套施工技术,自主创新包含外海深水作业保障、决策指
挥管理、长大隧道线形管理、全面风险管理等标准化、系统化、流程化综
合施工管理系统。通过提炼总结工程沉管安装成功经验,以期为类似工程
提供有益借鉴。

本书可作为从事沉管隧道施工技术和项目管理人员的实操参考书,也
可以作为高等院校水下隧道相关专业师生的课外工程实例参考书。

审图号:GS(2018)5375号

图书在版编目(CIP)数据

港珠澳大桥岛隧工程外海沉管安装/林鸣等著. —北京:科学出版社,
2019.2

ISBN 978-7-03-060303-6

I. ①港… II. ①林… III. ①跨海峡桥—桥梁工程—工程施工②沉管
隧道—隧道工程—工程施工 IV. ①U4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 297144 号

责任编辑:郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对:杨聪敏

责任印制:张克忠 / 封面设计:黄华斌

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

*

2019 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 2 月第一次印刷 印张:34 1/4 插页:4

字数:794 000

定价:218.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

港珠澳大桥岛隧工程外海沉管安装

主 编 林 鸣 王 强 尹海卿 刘晓东 宿发强

副 主 编 黄维民 刘亚平 高纪兵 王彰贵 翟世鸿

刘德进 梁 桁

编写人员（以姓氏笔画排序）：

马宗豪 王 伟 毛剑锋 尹朝晖 宁进进

吕勇刚 伍绍博 刘兆叔 关秋枫 汤慧驰

孙 健 花田幸生 苏长玺 李金峰 李建宇

李春初 李哈汀 李家林 李 超 李德辉

李 毅 杨永宏 杨 华 杨秀礼 杨树生

吴建新 邹纪祥 辛文杰 张志刚 张秀振

张建军 张 洪 陈伟彬 邵新慧 林 巍

尚乾坤 岳远征 周相荣 郭旭理 黄丁想

黄凯彬 韩西军 窦从越 鞠小刚

序 言

根据国际隧道和地下空间协会（International Tunnelling and Underground Space Association, ITA）沉管隧道和悬浮隧道工作组 1993 年报告，沉管隧道（immersed tunnel）就是在拟修建隧道的江河、海湾或海峡的水底下预先挖掘好一条沟槽，把若干预制的管节分别浮运至现场，一个接一个地沉放安装，在水下将其相互连接并正确定位在沟槽内，其后辅以相关工程施工，使这些管节组合体成为连接水体两端陆上交通的隧道型交通运输载体，故沉管法又称沉埋管节法或预制管节沉放法。

自 1910 年世界上首条铁路沉管隧道在美国诞生以来，沉管法水下隧道已广泛用于穿越江河湖海的公路隧道、铁路隧道、地铁隧道、人行隧道等交通基础设施和输水、渡槽、管线等公用管道设施的建设。据统计，截至目前全世界已建成各类沉管隧道 150 多条，各类公共事业用沉管隧道约 40 条，其中美国、日本和荷兰建造的沉管隧道数量最多，中国已建成和在建沉管隧道数量暂居世界第四位。

从世界范围看，自 20 世纪末开始，沉管隧道施工技术得到了长足发展，朝着外海环境、大型化、长距离和深水化方向不断进步。2000 年建成的长约 3.5 km 的连接丹麦和瑞典的厄勒海峡沉管隧道，2008 年贯通的长约 1.4 km 的连通欧亚大陆的土耳其博斯普鲁斯海峡沉管隧道，2010 年建成的长约 3.24 km 的韩国釜山—巨济沉管隧道，是三项具有较高国际影响力的外海大型沉管隧道工程项目，无论是隧道规模（长度和水深），还是采用的施工技术都代表了该领域当时的最高水平。

从国内范围看，沉管隧道在我国内地起步较晚，20 世纪 90 年代中期建成的广州珠江隧道是国内首条交通沉管隧道。迄今虽然已先后在广州、宁波、上海、天津、舟山、南昌等地建成十几条内河沉管隧道，但大多长度较短，规模较小，施工整体水平与国际同类工程相比尚有一定的差距。

随着我国经济的不断发展，内地基础建设不断发力，拟建的水下隧道数量众多，由于沉管隧道具有对地基适应能力强、埋深浅长度短、断面灵活多样、防水性能好、工法安全环保等优点，国内一批跨江河、河口、海湾和海峡的重大通道工程纷纷酝酿采用沉管隧道的方式，为我国沉管隧道施工技术赶超国际水平提供了平台，于 2010 年开工的港珠澳大桥沉管隧道即是这新一轮大规模水下交通基础建设的标志性工程。

港珠澳大桥沉管隧道是国内首条外海沉管隧道，是目前世界上最长的公路沉管隧道，也是目前世界上首条深埋大回淤节段式沉管隧道，其具有工程规模大、外海作业环境复

杂、技术难点多、施工工期紧、环保要求苛刻、安全风险高等特点，是公认的世界综合技术难度最高的沉管隧道之一。作为国内外海沉管施工领域的先行者，中国交通建设者不畏艰难，勇挑外海沉管隧道设计和施工技术攻关重担，开展了大量科学和技术研究工作，建立了一套具有我国自主知识产权的外海沉管成套施工技术体系。

本书依托已成功实施的港珠澳大桥沉管隧道工程，对外海沉管安装关键施工技术和管理技术进行总结，内容主要包括自主研发具有国际领先水平专用装备系统，自主开发大型沉管外海拖航、锚泊定位、深水无人沉放对接成套施工技术，自主创新包含外海深水作业保障、决策指挥管理、长大隧道线形管理、全面风险管理等在内的综合管理系统。通过提炼总结港珠澳大桥沉管隧道工程沉管安装的成功经验，以期后续国内外类似工程和日益增多的外海工程提供有益借鉴。

作 者

2018 年 12 月

目 录

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 水下隧道简述	1
1.2 沉管隧道简介	7
1.3 外海沉管隧道研究综述	12
第 2 章 港珠澳大桥沉管隧道工程概况	17
2.1 工程项目简介	17
2.2 总体施工安排	21
2.3 总体组织管理	27
2.4 工程特点和难点	29
2.5 项目背景和要求	31
第 3 章 外海沉管安装作业限制条件	33
3.1 自然环境限制条件	33
3.2 设计要求限制条件	43
3.3 作业窗口限制条件	44
第 4 章 外海沉管安装作业保障系统	64
4.1 概述	64
4.2 作业窗口预报管理系统	65
4.3 对接窗口预报保障系统	76
4.4 基槽回淤泥沙预警预报系统	81
4.5 沉管运动姿态实时监测系统	88

4.6 封门结构安全实时监测系统	93
4.7 异常波实时监测和预警系统	96
第5章 外海沉管浮运关键技术和装备	102
5.1 概述	102
5.2 临时通航和浮运航道设计	103
5.3 浮运控制参数研究	113
5.4 浮运操控方案研究	126
5.5 通航安全保障和管理	151
第6章 外海沉管系泊关键技术和装备	160
6.1 概述	160
6.2 系泊定位方式研究	161
6.3 系泊控制参数研究	172
6.4 锚泊设备选型	182
6.5 系泊操控方案研究	203
第7章 外海沉管沉放和对接关键技术和装备	209
7.1 概述	209
7.2 沉放对接控制参数研究	210
7.3 沉放对接系统研制	243
7.4 沉放对接操控方案研究	279
7.5 特殊管节安装技术	294
7.6 深水沉管回填技术	323
第8章 外海沉管隧道新型最终接头关键技术和装备	326
8.1 概述	326
8.2 新型最终接头总体方案研究	327
8.3 新型最终接头总体设计	339
8.4 新型最终接头工厂制造	367
8.5 新型最终接头安装对接	388

8.6 新型最终接头焊接合龙	407
8.7 新型最终接头基础后注浆	417
第9章 外海沉管安装全过程监控管理	429
9.1 概述	429
9.2 沉管基础监控管理	434
9.3 沉管舾装监控管理	445
9.4 沉管结构监控管理	450
9.5 沉管线形监控管理	477
9.6 沉管测量监控管理	487
9.7 沉管安装指挥决策管理	499
第10章 外海沉管安装全面风险管理	507
10.1 概述	507
10.2 风险管理一般规定	509
10.3 风险管理组织体系	514
10.4 风险管理文件体系	517
10.5 风险管理运行体系	518
10.6 风险管理主要成果	520
10.7 风险管理经验总结	525
参考文献	531
彩图	

第1章 绪 论

人类生活的陆地被众多的江河湖海所分割,历数有史以来人们跨越宽阔水域的方式,除了利用飞机和轮船等交通工具从空中和水面直接穿越外,主要通过修筑水上桥梁和水下隧道等交通设施将水域的两岸直接连接,从而天堑变通途,两岸人们可以随时往来交流,社会经济随之快速发展。

我国现代桥梁隧道已历经半个世纪的发展,特别是 20 世纪 90 年代以来,桥梁隧道建设进入了快速发展时期,目前我国已是世界上桥梁及地下工程规模最大和施工技术发展速度最快的国家,桥梁和隧道的技术水平和建设成就已走在世界前列。

1.1 水下隧道简述

水下隧道可以作为铁路、公路、地铁和人行隧道,也可作为给排水用输送管道。与桥梁工程相比,水下隧道具有隐蔽性好、抗自然灾害能力强、对水面航行无妨碍等优点,纵观桥梁隧道工程发展史,国外有优先考虑采用水下隧道作为跨越江河湖海方式的趋势。据不完全统计,国外近百年来已建的跨海和海峡交通隧道超过百条,著名的跨海隧道有日本青函隧道、英国英吉利海峡隧道、日本东京湾临海公路沉管隧道、丹麦大贝尔特(Great Belt)海峡隧道等,其中挪威近 30 年来修建了 40 多条海底隧道,积累了丰富的海底岩石隧道开掘经验,形成了被称为“挪威海底隧道概念”的一整套技术。

随着我国经济的快速发展及大众环保意识的增强,水下隧道的建设方式也逐渐被接受并开始得以推广应用,包括厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道、广州狮子洋海底隧道等陆续建成开通,港珠澳大桥沉管隧道建设基本竣工,深中通道海底沉管隧道、大连湾海底隧道即将进入实施阶段,跨越渤海海峡、琼州海峡和台湾海峡三大海峡的隧道规划也已展开,可以预见,在 21 世纪我国的交通建设中,水下隧道将会越来越受到人们的青睐,港珠澳大桥沉管隧道即是这一发展趋势下的一标志性工程,集桥、岛、隧一体的超级工程在继续展示我国造桥能力的同时,也给水下隧道在我国的发展提供了一个全新的平台。

1.1.1 水下隧道和桥梁的比较

跨越水域的交通方式是选择桥梁还是隧道，需要从航运、地质、水文、环境及工程成本等多方面进行综合比较，进行详细的工程技术经济比较分析，方能针对不同的条件得出最优的选择方案。图 1-1 给出了一般意义上的桥梁、暗挖隧道和沉管隧道纵向立面布置上的比较图，其中单从长度而言，对跨越同一水域而言，桥梁的长度显然是最长的，而沉管隧道由于可以紧贴海床面附近布置，长度可以做到最短，暗挖隧道（盾构法和钻爆法）的长度一般介于二者之间。下面从航运要求、建设用地、运营管理和使用功能 4 个方面简单分析比较水下隧道和桥梁的优缺点。

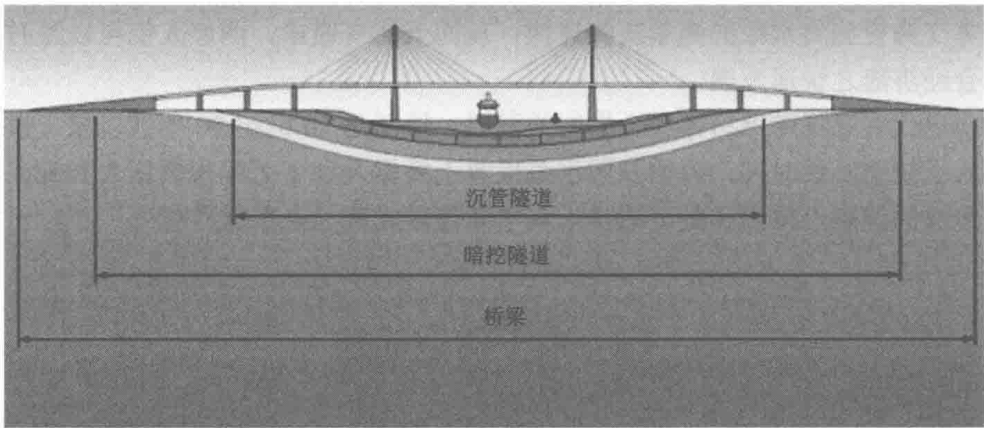


图 1-1 桥梁、暗挖隧道和沉管隧道比较图

1. 航运要求

为满足通航要求，桥梁需要足够的垂直净空，而隧道则不牵涉航道净空问题。1968 年建成的南京长江大桥限于历史条件设计通航净高只有 24 m，使得南京以上长江段只能通行 3000 吨级以下船舶。总体而言，对通航密度高和船舶吨位大的水域隧道方案一般要优于桥梁，香港维多利亚港的多条跨越港湾通道采用隧道方案而不用桥梁即为实际例证。

2. 建设用地

由于桥梁所需引桥长度较长，会涉及大量拆迁和土地占用，工程造价增加，工程建设难度大。水下隧道长度短，占地少，还容易实现隧道与地下空间一体化，提高地下空间综合利用率，社会综合效益好。

3. 运营管理

水下隧道运营期间基本不受恶劣天气影响，车辆可全天候运行，而桥梁在恶劣天气时需要封闭通行，同时极易受到失控船舶的碰撞，存在重大安全隐患，近几年国内多座

桥梁发生因船撞而垮塌的事故即是明证。此外,水下隧道抵御自然灾害和战争破坏的防护能力较桥梁强,能有效地抵御台风、海啸等自然灾害的破坏。

4. 使用功能

水下隧道可以做到一洞多用,公路、铁路、地铁和市政管道等皆可灵活组合,实现多用途发展,并且安装和维护比较方便;比较而言,桥梁的功能比较单一,市政管道的安排布设不如水下隧道灵活和方便。

随着现代航运业的快速发展,船型尺寸越来越大,对航道净空的要求也越来越高,桥梁对航运的限制也越加明显。我国的“黄金水道”——长江由于受南京长江大桥的限制一直未能得以充分发挥,不能不说是一个遗憾。反观欧洲、美国等发达国家和地区,近几十年来均以桥梁和隧道并举的方式跨越江河湖海,纽约曼哈顿岛跨越哈德逊河直接连接新泽西州的工程解决方案,选择了先后建桥 10 余座、水下隧道 41 条,水下隧道数量远超桥梁数量。鉴于此,应该说水下隧道在我国的发展才刚刚起步,在现代交通路网的建设中尚大有作为。

1.1.2 水下隧道发展简况

目前世界上有 500 多条水下隧道已建成或正在修建,其中主要分布在欧洲、美国和日本等发达国家和地区,隧道总长度方面日本最长,数量方面则美国最多。

17 世纪欧洲修建了许多运河隧道,其中法国朗格多克(Languedoc)运河隧道长 157 m,属于近代较早使用火药利用矿山法凿建的隧道。1825~1843 年,英国工程师布鲁内尔建成穿越泰晤士河的水下人行隧道,隧道长约 366 m,后被改建成铁路隧道,这是世界第一条水下盾构法铁路隧道。1910 年建成的连接美国和加拿大的底特律河水底铁路隧道是世界上第一条沉管铁路隧道。1941 年建成的荷兰马斯河水下公路隧道是欧洲第一条钢筋混凝土沉管隧道。1980 年建成的穿越苏伊士运河的埃及艾哈迈德·哈姆迪隧道是第一条连接亚非大陆的盾构隧道。

20 世纪 60 年代我国开始研究用盾构法修建黄浦江水下隧道。上海第一条越江隧道——打浦路隧道于 1965 年开始施工,并于 1971 年建成通车;同期上海也开展了沉管隧道技术研究,并于 1976 年在上海金山石化工程首次应用沉管法建成了第一条排污水下隧道。20 世纪 80 年代后期,我国水下隧道的修建进入快速发展时期。目前,我国已经建成和正在建设的水下公路隧道有 30 余条,已建成通车的跨越长江的大型隧道有武汉长江公路隧道、南京长江隧道、上海崇明长江隧道三条,已建成的跨海峡隧道有厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道、香港红磡海底隧道和香港东区海底隧道、西区海底隧道等,其中 2010 年建成长 8.695 km 厦门翔安海底隧道是中国内地第一条海底隧道,正在建设和准备开工建设的海底隧道有港珠澳大桥沉管隧道、深中通道海底沉管隧道和大连湾海底隧道等。

1.1.3 水下隧道施工方法

水下隧道常用施工方法有钻爆法（包括传统矿山法和新奥法）、盾构法（shield tunnel method）和隧道掘进机（tunnel boring machine, TBM）法、沉管法（immersed tunnelling method）等，其中硬质岩基中水下隧道常采用钻爆法和 TBM 法，软土地基中水下隧道常采用盾构法或沉管法。

1. 钻爆法

钻爆法一般针对基岩中的隧道，用传统钻眼爆破法或臂式掘进机开挖隧道，按照支护方式的不同分为传统矿山法和新奥法两种（图 1-2）。

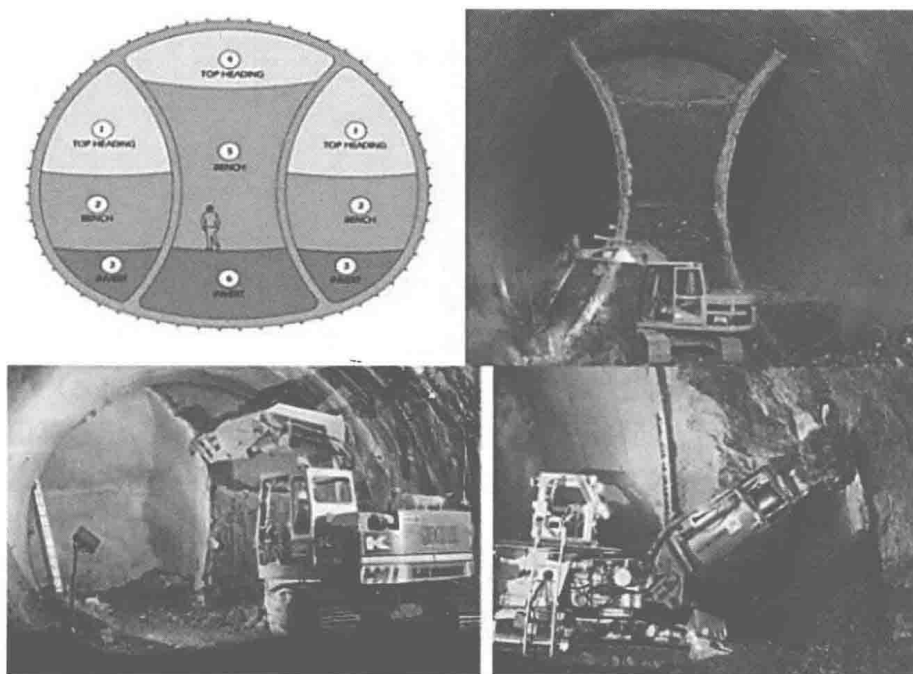


图 1-2 钻爆法开挖示例图

传统矿山法（mine tunnelling method），采用木构件或钢构件作为临时支撑，抵抗围岩变形和承受围岩压力，待隧道开挖成形后，再逐步将临时支撑撤换，代之以整体式单层衬砌作为永久性支护。如日本穿越津轻海峡的青函隧道即采用传统矿山法施工，隧道全长为 53.85 km，其中海底部分为 23.3 km，是目前世界上最长的海底铁路隧道。

传统矿山法施工的典型工程还包括：日本关门海峡隧道（3.6 km，1944 年）、新关门隧道（18.7 km，1974 年），挪威海底隧道（100 km，180 m 水深），中国浏阳河隧道（10.115 km，2009 年）、青岛胶州湾海底隧道（3.95 km，2011 年）。

新奥法（new austrian tunnelling method）是在传统矿山法基础上发展而来的，主要采

用锚杆和喷射混凝土作为维护围岩稳定的初期支护，帮助围岩获得初步稳定，在此基础上再施以内层混凝土衬砌作为安全储备，同时锚喷支护也是永久性承载结构的一部分，锚喷支护、混凝土衬砌和围岩三者共同构成了隧道永久结构承载体系。我国第一条海底隧道厦门翔安海底隧道即采用该工法建成（图 1-3）。



图 1-3 厦门翔安海底隧道

2. 盾构法和TBM法

笼统来说，盾构法和 TBM 法皆属于隧道全断面掘进，是指利用回转刀具开挖隧道整个断面的施工方法，二者的主要区别在于工作对象不同，一般 TBM 法适用于硬质岩基，而盾构法适用于软土地基。

盾构法是利用盾构机在地面以下暗挖隧道的一种施工工法（图 1-4）。由于盾构施工对周边环境影响小、施工速度快且安全，故成为在软土（软黏土、砂质粉土等）中施工隧道特别是在城市地下施工的一种主要工法。日本东京湾海底隧道、上海崇明越江通道、南京长江隧道、南京扬子江隧道和南水北调穿黄隧道等都是采用盾构法施工。

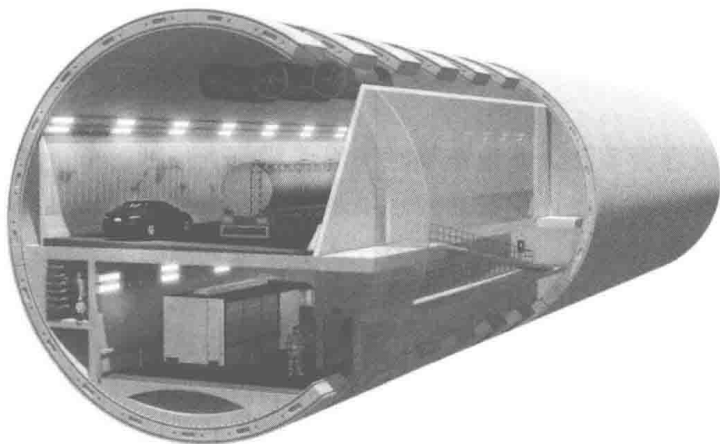


图 1-4 盾构法隧道效果图

TBM 通常是指岩石隧道全断面掘进机,它是一种集掘进、出渣、支护和通风防尘等多种功能为一体的大型高效隧道施工机械。TBM 法适用于中硬岩地质的隧道施工,采用机械破碎岩石的方法进行开挖(图 1-5)。

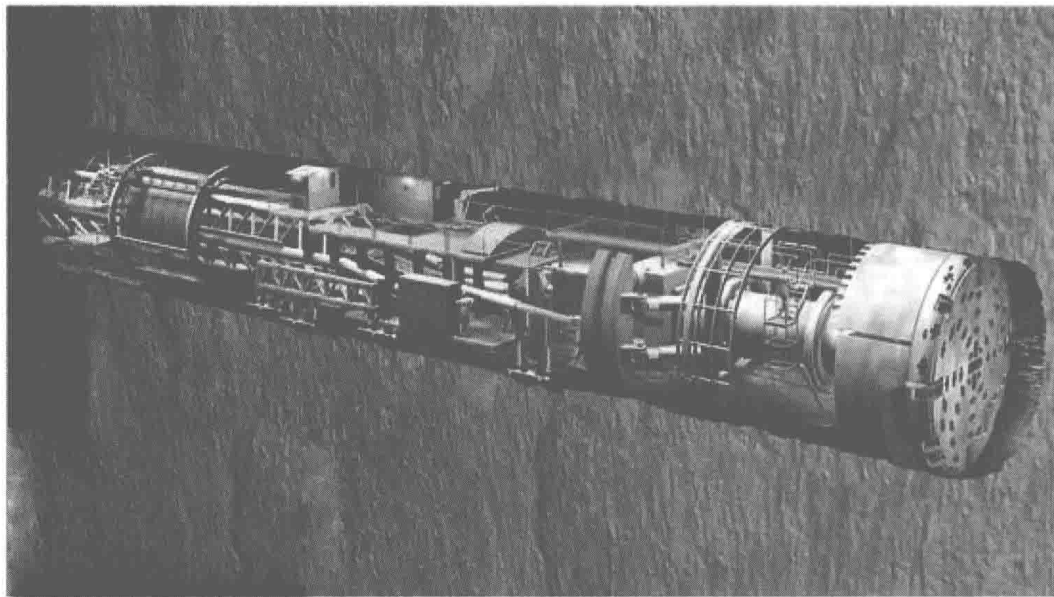


图 1-5 TBM 法隧道掘进效果图

盾构法和 TBM 法典型工程举例如下。

1993 年,英法海峡隧道(channel tunnel), $\phi 8.4 \text{ m} \times 37 \text{ km}$ (总长 50 km);

1995 年,丹麦大贝尔特海峡隧道, $\phi 8.5 \text{ m} \times 7.9 \text{ km}$;

1996 年,日本东京湾横断公路隧道, $\phi 13.9 \text{ m} \times 9.1 \text{ km}$;

2008 年,武汉长江公路隧道, $\phi 11.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ km}$;

2009 年,上海崇明长江隧道, $\phi 15.43 \text{ m} \times 7.5 \text{ km}$;

2011 年,广州狮子洋海底隧道, $\phi 11.18 \text{ m} \times 10.8 \text{ km}$;

2012 年,钱江隧道, $\phi 15.43 \text{ m} \times 3.2 \text{ km}$ 。

3. 沉管法

沉管法,又称沉埋管节法,即先在临时干坞或船台上预制管节,并用临时封门进行封闭形成浮体,同时在隧道设计位置开挖水底基槽铺设隧道基础,然后将管节浮运到位并精确定位沉放至水底基槽内,将相邻管节在水下连接并做防水处理,最后进行基础处理和回填防护,打通临时封门成为水下隧道。

由于沉管法的管节是陆上预制的,施工质量可控,水密性好,水下接头数量少,隧道整体防水性能优良(图 1-6)。此外,由于受水浮力作用,沉管隧道对基础的要求不高,在砂基和软基上都可以适用。

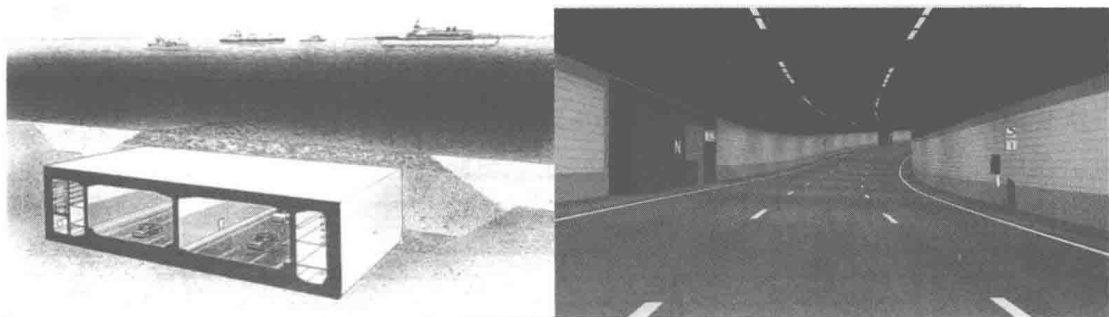


图 1-6 沉管法隧道效果图

沉管法典型工程（国际）举例如下。

1910 年，美国底特律河水底铁路隧道，世界第一条水下交通沉管隧道；

1942 年，荷兰马斯河水下公路隧道，欧洲第一条矩形钢筋混凝土沉管隧道；

1959 年，加拿大迪斯（Deas）沉管隧道，首创水力压接工法；

1972 年，美国旧金山海湾快速交通系统（bay area rapid transit district, BART）水下隧道（以下简称旧金山海湾水下隧道），长 5825 m，世界最长铁路沉管隧道；

2000 年，丹麦厄勒（Oresund）海峡沉管隧道，首创“工厂法”管节预制工法；

2008 年，土耳其博斯普鲁斯（Bosphorus）海峡沉管隧道，深约 60 m，世界最深沉管隧道；

2010 年，韩国釜山—巨济（Busan-Geoje）沉管隧道。

沉管法典型工程（国内）举例如下。

1994 年，广州珠江隧道（大陆首条公路、铁路两用沉管隧道）；

1995 年，宁波甬江水底隧道；

2002 年，宁波常洪隧道；

2003 年，上海外环隧道；

2010 年，广州仑头—生物岛沉管隧道；

2010 年，广州生物岛—大学城沉管隧道；

2012 年，天津中央大道海河沉管隧道；

2013 年，舟山沈家门港海底沉管隧道。

1.2 沉管隧道简介

1.2.1 沉管隧道定义

根据国际隧道和地下空间协会沉管隧道和悬浮隧道工作组 1993 年报告，沉管隧道就是在拟修建隧道的江河、海湾或海峡的水底下预先开挖一条基槽，把若干预制的管节分

别浮运至现场，一个接一个地沉放安装，在水下将其相互连接并正确定位在基槽内，其后辅以相关工程施工，使这些管节组合体成为连接水体两端陆上交通的隧道型运输载体。

沉管隧道一般由沉埋段、暗埋段和敞开段等组成，沉埋段两端通常设置竖井，起到通风、供电、排水和监控等作用，也可根据地形和地质的实际情况取消竖井，将沉埋段与暗埋段直接相接（图 1-7）。

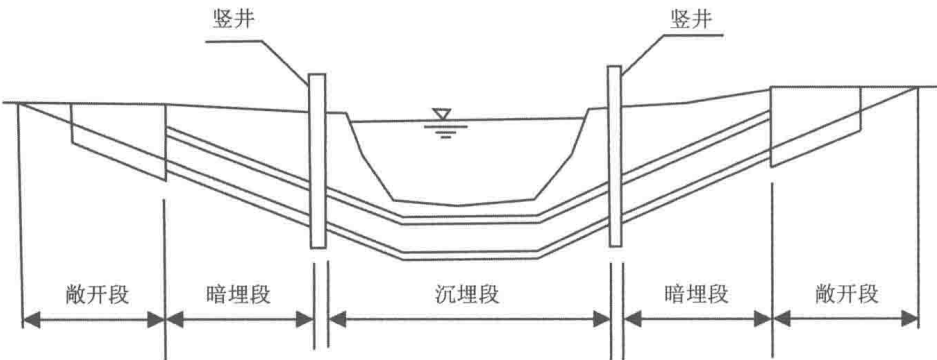


图 1-7 沉管隧道一般组成示意图

1.2.2 沉管隧道发展及现状

世界沉管技术的研究始于 1810 年在伦敦进行的沉管隧道试验，但试验未能解决防水问题，1896 年美国利用沉管法建成穿越波士顿港的雪莉格特（Shirley Gut）虹吸式输水沉管隧道（图 1-8），1910 年使用双线铁路沉管隧道成功穿越美国和加拿大之间的底特律河，宣告沉管法水下交通隧道的正式诞生。

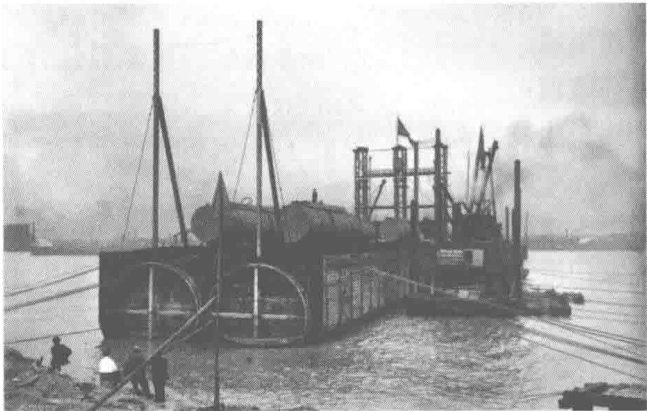


图 1-8 波士顿河输水沉管隧道

1942 年在荷兰建成的马斯河水下公路隧道，为欧洲首条钢筋混凝土沉管隧道，在此之前皆采用北美的钢壳沉管结构形式。1959 年在加拿大建成迪斯沉管隧道成功开发了水力压接法进行沉管对接，标志着沉管隧道关键对接技术的突破，沉管隧道被世界各国普遍采纳，如图 1-9 所示，自 20 世纪 60 年代后沉管隧道进入了一个快速稳定发展的阶段。