

厦门翔安海底隧道工程技术丛书

上册 设计与施工

主 编 潘世建

副主编 黄灵强 曾 超 程正明



人民交通出版社
China Communications Press

厦门翔安海底隧道工程技术丛书

上册 设计与施工

主 编 潘世建

副主编 黄灵强 曾 超 程正明



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本丛书分上、下两册,上册包括设计篇和施工篇,下册包括机电篇和建设管理篇。丛书主要结合厦门翔安海底隧道工程难点和应对措施,对工程勘察、设计、施工、运营管理过程中的工程建设经验和创新技术进行系统地总结提炼,写作中力求真实,突出创新。

图书在版编目(CIP)数据

厦门翔安海底隧道工程技术丛书. 上册 设计与施工
/潘世建主编. —北京:人民交通出版社,2011.5

ISBN 978-7-114-09184-1

I. ①厦… II. ①潘… III. ①水下隧道—隧道工程—
设计—厦门市②水下隧道—隧道工程—工程施工—厦门市
IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 107964 号

书 名: 厦门翔安海底隧道工程技术丛书 上册
设计与施工

著 作 者: 潘世建

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969,59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 28.75

字 数: 840 千字

版 次: 2011 年 5 月第 1 版

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09184-1

定 价: 180.00 元(上、下册)

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

厦门翔安海底隧道工程技术丛书

上册 设计与施工

编 委 会

顾 问：王梦恕 杨盛福

主 编：潘世建

副主编：黄灵强 曾 超 程正明

委 员（按姓氏笔画为序）：

王明年	王学斌	甘奋明	江孔雀	朱光仪	孙振川	苏文德
吴仕书	吴生金	吴 驰	张顶立	李治国	陆采荣	李建斌
张建斌	陈 智	郭小红	郭衍敬	梁敬昆	管 磊	梁 巍
彭道富	谭忠盛					

主 审：	曾 超	王明年	张建斌	张顶立	李治国	陆采荣	郭小红
	梁 巍	惠建永	潘建立	孙 斌	孟维孝	谭忠盛	瞿守信

序 一

厦门,美丽的海上花园城市;其独特的山海地理环境和生机勃勃的城市发展,孕育了中国内地第一条海底隧道、也是目前世界上最大断面的海底公路隧道——厦门翔安隧道。它的建成通车,打破了厦门岛与翔安区隔海相望的地理屏障,完善了厦门进出岛交通布局,大大拓展了城市发展空间,有力推进了厦门岛内外一体化和城乡一体化进程,对实现厦门科学发展新跨越,构建闽南金三角厦漳泉大都市区,加快福建跨越式发展,更好更快建设海峡西岸经济区,具有重大而深远的意义。

厦门翔安隧道是一项富有开创性意义的工程。其前期决策充分体现了科学发展的理念,它是我国跨海工程桥隧建设方案比选中,最终以隧道方案胜出的第一个项目,事实证明,翔安海底隧道是综合效益最佳、经得起历史考验的正确抉择。

厦门翔安隧道以地质条件复杂、技术难度大、施工风险高而闻名。其中穿越海底风化深槽更是国内外罕见,极具挑战性,被业内专家称之为“世界级的工程”。在缺少成熟经验借鉴的情况下,建设者们以敢为天下先的大胆创新,以头顶大海的谨小慎微,以只能一次性成功穿越的必胜信条,坚持“安全高于一切、质量同于生命、防患胜于补救、责任重于泰山”的理念,历经4年8个月的艰苦奋战和攻坚克难,于2010年4月26日胜利建成通车,取得了创优质工程和施工亡人零事故的佳绩,为我国海底隧道建设事业树立了一座不朽的丰碑。现在,建设者们本着“不断总结、不断进取”的精神,将工程建设中积累的宝贵经验和取得的创新成果编写成丛书正式出版,以期在同行之间进行交流,相互促进,这是一件对促进我国海底隧道建设事业发展极为有利的好事。

厦门翔安隧道的成功修建,堪称世界隧道建设史上的壮举,更是我国公路隧道发展的里程碑。隧道建设过程异常艰辛,建设者们以攻坚克难、永不言弃的拼搏精神,以科学求实、勇于开拓的创新精神,以戮力同心、众志成城的团结精神,以埋头苦干、艰苦奋斗的奉献精神,铸就了这一宏伟工程,为我国海底隧道建设事业的发展翻开了从无到有的崭新篇章。

厦门翔安隧道建设过程中,得到了许多国内著名专家、学者的悉心指导和帮助。在此,特别感谢中国工程院院士王梦恕先生和交通运输部原总工程师杨盛福先生,他们作为厦门翔安隧道政府工程顾问在项目前期研究论证和工程实施过程中帮助解决了许多重大技术难题。同时,也衷心感谢厦门翔安隧道的建设者们,特别是奋战在施工第一线的同志们,他

们为成就这一伟大工程作出了不可磨灭的贡献。历史不会忘记这些知名和不知名的建设功臣们,他们的丰功伟绩,将如同“永不言弃”隧道工人群雕一样永远屹立在隧道洞口,将如同厦门翔安隧道工程实体一样永远镌刻在厦门的山海之间。

正如厦门翔安隧道两端通风塔建筑造型采用灯塔和帆船所蕴含的深远寓意,中国的海底隧道建设事业,正沿着厦门翔安隧道引领的方向,扬帆,起航,并将不断超越。我相信,本书一定能为我国海底隧道修建技术进步和后续工程建设提供有益的参考与借鉴。



2011 年 5 月

序 二

厦门岛是座美丽的海湾型城市,在翔安隧道修建之前,用两座大桥和大陆相联,每当台风季节,大桥停运就变成了孤岛。厦门市委、市政府早在 1997 年就启动海中水文、地质勘探,准备在厦门岛东部建一座通道,做到抗震性能好,战时抗损毁能力强,不受台风、大雾影响,可全天候运行的世界级翔安海底隧道。厦门市委、市政府大胆英明的超前理念,得到了广大市民的支持和赞赏,得到了各方专家的科学评价和肯定。方案前期由工程建设经验十分丰富且项目管理水平很高的厦门路桥建设集团有限公司作为建设主体单位,代表政府进行全过程管理,整个过程是在交通运输部领导直接关心指导下进行的。2005 年 9 月 6 日开工建设,2010 年 4 月 14 日交工验收,2010 年 4 月 26 日顺利建成通车,历时 4 年 8 个月,顺利安全、优质高效建成,标志着我国水下隧道的技术水平达到了国际领先地位。

翔安隧道是我国第一条海底隧道,是一座双向六车道的特大断面公路隧道。隧道在陆域地段要穿越软弱富水不稳定全风化地层,隧道在浅滩地段又穿越透水砂层,在深水段要多次穿越花岗岩风化深槽等不良复杂区段,是世界级规模巨大工程,是世界级技术难题,是世界级风险隧道。工程前期经过全方位的综合比选和科学论证,决定采用钻爆法开挖硬岩,用浅埋暗挖法开挖软弱围岩,用超前周边预注浆法进行开挖面超前预加固,用复合式衬砌形式作为百年隧道支护结构,整个工程采用信息化施工和动态信息化快速反馈设计。

作为具有里程碑意义的国内第一条海底隧道,建设者们紧密依靠科技攻关和技术创新去攻克十多项技术难题。建设方在施工前、施工中投入科研费用约 2500 万元,为精确进行水文、地质勘测,支护结构防腐蚀,防排水设计,安全施工方法,辅助工法确定等组成 30 多项科研专题进行现场攻关。具有强势能力的四大施工集团也紧密结合各个施工地段的地质特点、工程类型,分别投入 3000 万元以上的资金进行施工全过程的工艺、工序、施工组织、施工机械、非标设备研制等领域进行施工技术难点的攻关。他们用“严格纪律、严格工艺、严格管理”认真落实每项工序技术标准的实现,他们以“边研究、边试验、边施工”的科学态度,不放过每个可能危及风险、影响安全、影响工程质量的任何细小环节。他们奋战在 1700 多天的日日夜夜中,很少休息,很少回家,克服了一个个艰难险阻,攻克了一道道难关,历尽千辛万苦,用集体的智慧创造了一个个奇迹,赢得了绝对的安全,高质量、高速度、高效益建成了我国第一条不愧为世纪工程的海底隧道。

翔安隧道在修建过程中,涌现出许多可歌可泣的英雄诗篇,在翔安海底隧道建设者感

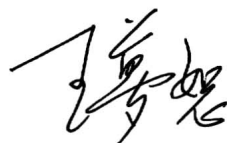
情的天平上,祖国重于一切,他们有愧于父母,有悔于妻子,有悔于儿女,但他们无愧于祖国,无愧于人民,无愧于自己所从事的事业。

作者以科学、实事求是的态度和精神,论述了隧道建设的各个阶段、各个过程,写的是科学技术的书稿,在内容上是真实的,是丝毫没有感情成分的,该书是否有价值留给后人,是否给后人以启迪,会随着工程的不断增多和实践得出正确的回答。但我相信,这本书的内容对读者肯定是有启迪价值的。同时我也相信,书中许多珍贵的历史资料和经验,都不应成为妨碍前进的桎梏,也应力戒被成功经验所束缚而故步自封。

最后,用我过去曾说过的话来结束这个序。

历史的脚步往往是毫不留情地把千千万万人筑起的一座座里程碑抛在后面,使它们很快就变得朦胧不清,年青一代的神圣职责就是在新跨越中去矗立更高的丰碑。不过我相信,厦门翔安海底公路隧道修建技术这座里程碑毕竟还是清晰地屹立着。

作者用最清晰的笔调在写作过程中还探索着、思考着,使我清醒的感到今天的隧道事业已攀登到如此的高度,在享受事业的同时,传承与创新隧道事业的责任感,自然又压在了我们每个人的肩上。



2011年5月

前 言

厦门翔安隧道是我国大陆地区第一条海底隧道,也是当今世界上断面最大的钻爆法海底公路隧道,采用设置服务隧道的三孔隧道形式,左右为行车隧道,设双向六车道,由我国自主完成勘测、设计、施工,在我国隧道建设史上具有里程碑式的意义。修建厦门翔安隧道的构想始于20世纪80年代,随着厦门经济特区的蓬勃发展,项目建设显得日益迫切,而突飞猛进的工程建设技术进步也使得修建大规模跨海通道成为可能。由此,自1997年起全面启动项目前期工作。经过8年科学、系统的前期研究和方案论证,最后采用钻爆法海底隧道建设方案,于2005年9月6日正式开工建设。历经4年8个月的艰苦鏖战,厦门翔安隧道于2010年4月26日胜利通车,实现了创优质工程和施工亡人零事故的建设目标。

厦门翔安隧道地质条件十分复杂,需穿越陆域全强风化浅埋地层、浅滩富水砂层、海底风化深槽等不良地质段,项目建设规模大、工程经验少、技术难度高、施工风险大,尤其海底风化深槽更是被业内专家称为世界级难题。工程建设过程中,建设者们面对国内第一条海底隧道,迎难而上,大力倡导自主创新,牢牢依靠科技进步,积极研制和应用新技术、新材料、新工艺,攻克技术难关,最终成就了厦门翔安隧道这一宏伟工程。为更好地总结海底隧道工程建设经验,促进技术交流和成果推广应用,由各参建单位参与,共同编写完成了《厦门翔安海底隧道工程技术丛书》。

该丛书分上、下两册,上册包括设计篇和施工篇,下册包括机电篇和建设管理篇。丛书主要结合厦门翔安海底隧道工程难点和应对措施,对工程勘察、设计、施工、运营管理过程中的工程建设经验和创新技术进行系统地总结提炼,写作中力求真实,突出创新。

丛书是全体编审人员共同完成的作品,是单靠任何个人力量所无法取得的集体成果,也是翔安隧道全体参建单位齐心协力不懈探索凝聚出的智慧结晶,更是千百个工程一线不知名也未署名的工程技术人员和工人、农民工的默默奉献与伟大力量的真实写照。在此,感谢为厦门翔安隧道建设付出努力和心血的所有建设者,感谢关心和支持厦门翔安隧道的社会各界人士,感谢为丛书编写、审核、出版付出辛勤劳动的每一位工作人员。丛书中引用其他文献的基本理论、图表和数据也在此一并感谢原作者。

特别感谢厦门市人民政府副市长、厦门翔安隧道工程建设领导小组组长潘世建先生和中国工程院院士、厦门翔安隧道政府工程顾问王梦恕先生在百忙之中分别为本书撰写

序言。

谨以此书纪念厦门翔安隧道的胜利通车,并希望能为我国海底隧道修建技术进步和后续工程建设提供有益的参考与借鉴。

由于厦门翔安隧道作为国内首条海底隧道探索工程,加之编写时间较紧和编写人员水平所限,书中难免有不全或疏漏之处,敬请有关专家和同行们予以批评指正。

编委会

2011 年 5 月

目 录

上 册

第一篇 设 计 篇

第 1 章 国内外海底隧道工程概述	3
1.1 国内外海底隧道工程建造历史与展望	3
1.2 海底隧道工程特点与修建方法概述	8
第 2 章 项目背景与建设方案比选	15
2.1 项目背景	15
2.2 建设条件概述	16
2.3 建设方案比选	19
2.4 建设方案决策	22
第 3 章 工程测量与勘察	26
3.1 海底地形图及控制网测量	26
3.2 工程地质及水文地质勘察	33
第 4 章 土建工程设计	50
4.1 土建工程设计概述	50
4.2 路线设计	53
4.3 结构设计	59
4.4 防排水设计	86
4.5 特殊地段工程方案	96
4.6 超前地质预报及监控量测	114
4.7 隧道耐久性设计	119
4.8 隧道健康监测与诊断	123
4.9 两岸互通立交设计	124
第 5 章 景观设计	127
5.1 概述	127
5.2 隧道主体景观设计	128
5.3 周边景观设计	134

第二篇 施 工 篇

第 1 章 翔安隧道施工概况	143
1.1 工程特点及难点、重点	143
1.2 隧道施工安排及组织	144
1.3 隧道开挖方法概要	146
第 2 章 海底隧道超前地质预报技术	153
2.1 超前地质预报技术简介	153

2.2	翔安隧道地质分析	158
2.3	翔安隧道长期超前地质预报	161
2.4	翔安隧道短期超前地质预报	167
2.5	翔安隧道超前钻探	170
2.6	翔安隧道地质灾害临近警报	170
2.7	翔安隧道超前地质预报综合技术应用	171
第3章	陆域段全强风化地层施工技术	173
3.1	概述	173
3.2	陆域全强风化地层施工方法	174
3.3	全强风化地层施工过程中地层的响应规律	180
3.4	陆域段全强风化异常变形原因及对策	185
3.5	陆域全强风化段施工要点	199
3.6	施工机械配置要点	228
第4章	浅滩段富水砂层施工技术	232
4.1	概述	232
4.2	施工方案比选	233
4.3	施工技术	241
4.4	施工机械	252
第5章	海底硬岩段施工技术	254
5.1	控制爆破设计原则	254
5.2	爆破方案及爆破参数的选择	255
5.3	爆破开挖围岩松动圈现场测试	264
5.4	注浆加固体的爆破机理和控制爆破技术	268
5.5	爆破对二次衬砌影响分析	274
5.6	爆破对海洋生物影响监测	275
第6章	海底风化深槽施工技术	283
6.1	概述	283
6.2	风化深槽段地层变形控制基准	284
6.3	注浆堵水施工技术	290
6.4	大管棚施工技术	309
6.5	开挖支护技术	310
6.6	主要施工机具配置	314
6.7	工程实例	315
第7章	海底隧道通风竖井与斜井施工技术	330
7.1	概述	330
7.2	竖井设计及施工方案	332
7.3	施工技术	333
7.4	施工机械	344
第8章	海底隧道防排水系统与施工通风技术	346
8.1	海底隧道防排水系统	346
8.2	海底施工排水技术	351
8.3	海底隧道施工通风技术	354
第9章	海底隧道衬砌施工技术	362
9.1	概述	362

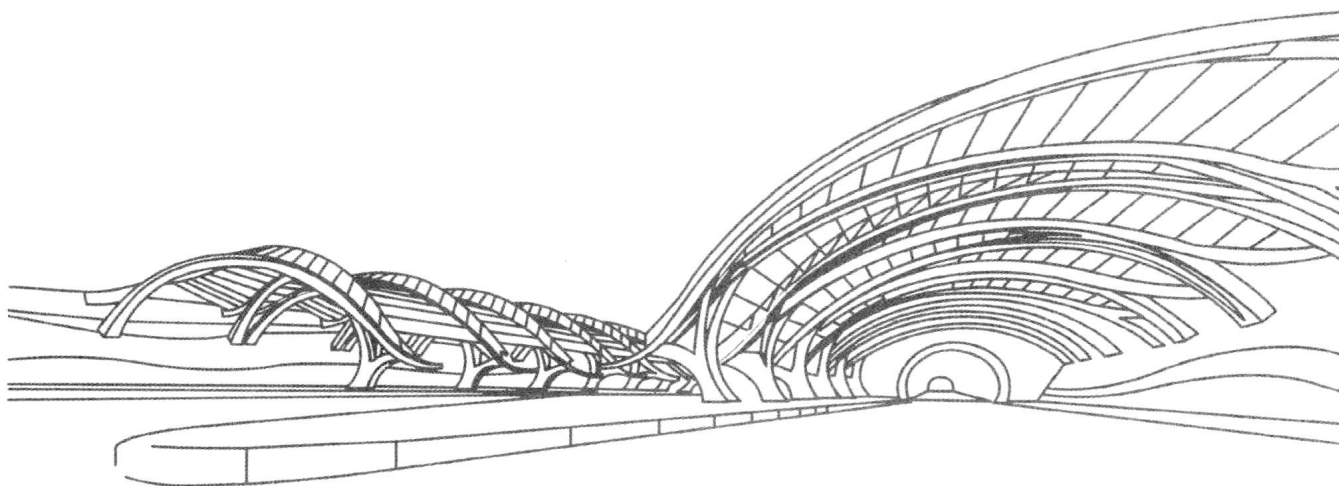
9.2	海底隧道二衬混凝土耐久性设计及对策	362
9.3	二衬混凝土灌注施工工艺	380
9.4	施工机具	387
第 10 章	海底隧道施工监测技术	428
10.1	监控量测目的和意义	428
10.2	监控量测系统组成	429
10.3	监控量测项目及布置	430
10.4	监控量测方法	443
10.5	监控量测数据采集	390
10.6	监控量测数据分析及信息反馈	390
10.7	监控量测工作制度和质量保证措施	390
第 11 章	海底隧道突发事件处理技术	391
11.1	突发事件风险特点及认识	397
11.2	突发险性事件处理的原则与程序	403
11.3	典型突发险性事件的处理	407
11.4	险性事件处理经验小结	427

厦门翔安海底隧道工程技术丛书

上册

第一篇 设计篇

- ⊕ 国内外海底隧道工程概述
- ⊕ 项目背景与建设方案比选
- ⊕ 工程测量与勘察
- ⊕ 土建工程设计
- ⊕ 景观设计



第 1 章 国内外海底隧道工程概述

1.1 国内外海底隧道工程建造历史与展望

1.1.1 海底隧道工程建造历史

1. 海底隧道建造历史

地球上由于海洋的存在,陆地被分割,形成不同条件下的若干区域,并造成交通障碍及文化差异。现今,世界各国生活、经济联系日益加深,这对修建海底隧道、实现各大陆陆路相通,不失为一个良好的契机。工程界认为:19 世纪和 20 世纪是长大桥梁、高层建筑发展的时代,而 21 世纪将是长大隧道工程发展、大力开发利用地下空间的时代。

海底隧道的发展是从 1751 年提出英法海底隧道设想开始的,但限于当时技术和资金上的困难,直至 1994 年这一伟大的构想才得以成为现实。日本 20 世纪 40 年代(1939 年动工,1944 年竣工)在关门海峡修建的海底隧道是世界上最早的海峡隧道。20 世纪的 70 年代之后,在日本、挪威、英国等国家大量的海底隧道相继建成。日本于 1988 年贯通了穿越津轻海峡的青函海底铁路隧道,全长 53.85km。日本青函隧道与英法海峡隧道堪称 20 世纪最宏伟的隧道建设壮举。以青函隧道的建成为契机,世界各国横断海峡的热情迅速高涨。许多被视为“梦想”的横断海峡的宏伟计划,都呈现出一片“现实”的曙光。比如丹麦大海峡铁路隧道,全长 7.9km,于 1995 年贯通,1996 年对外运营开放。国外部分海底隧道情况见表 1-1-1。

国外部分海底隧道一览

表 1-1-1

隧道	类型	建成时间 (年)	长度 (km)	最深点 (m)	埋深 (m)	修建国	断面积 (m ²)	地层条件或纵坡
关门隧道 1	铁路	1944	3.6	-40	最小 9.5	日本	76.9	灰绿凝灰岩、花岗岩
关门隧道 2	双线公路	1958	3.4	-50.1	最小 20.7	日本	95	闪绿岩、玢岩角角岩
新关门隧道	铁路	1975	18.71	-50	68.5	日本	74	海底部分为玢岩、花岗闪绿岩
青函隧道	铁路	1988	53.85	-140	最大 240, 平均 100	日本	37 109.48	安山岩、火成岩、沉积岩
Forsmark1	输水	1985	2.3	-75		瑞典	80	
Forsmark2	输水	1985	2.3	-75		瑞典	80	
(Alesund ~ Ellingsoy)	三车道公路	1987	3.49	-140	最小 40	挪威	68	前寒武纪片麻岩
(Ellingsoy ~ Valderoy)	三车道公路	1987	4.17			挪威	68	前寒武纪片麻岩
Ellingsoy	公路	1987	3.5	-140		挪威	68	片麻岩
Valderoy	公路	1987	4.2	-137		挪威	68	片麻岩
Kvalsund	公路	1988	1.5	-56		挪威	43	片麻岩
Godoy	公路	1989	3.8	-153		挪威	48	片麻岩
Flekkeroy	公路	1989	2.3	-101		挪威	46	片麻岩
Hvaler	公路	1989	3.8	-120		挪威	45	片麻岩
Nappstraumen	公路	1990	1.8	-60		挪威	55	片麻岩

续上表

隧道	类型	建成 时间 (年)	长度 (km)	最深点 (m)	埋深 (m)	修建国	断面积 (m ²)	地层条件或纵坡
Maursundet	公路	1990	2.3	-93		挪威	43	片麻岩
Fannefjord	公路	1992	2.7	-100		挪威	43	片麻岩
Byfjord	公路	1992	5.8	-223		挪威	70	千枚岩
Mastrafjord	公路	1992	4.4	-133		挪威	70	片麻岩
Freifjord	公路	1992	5.2	-130		挪威	70/54	片麻岩
英法海峡隧道 (服务隧道)	服务 通道	1993	48.5	-100	21~70 平均40	英国、 法国	36.17	白垩纪泥灰岩及 泥灰质黏土
英法海峡隧道	铁路	1994	50.5	-100	21~70 平均40	英国、 法国	95.5	白垩纪泥灰岩及泥质黏土
Tromsøysund	公路	1994	3.4	-101		挪威	2×57	闪长片麻岩
Htira	公路	1994	5.3	-267		挪威	70	片麻岩
Troll	输水	1995	3.8	-260		挪威	66	片麻岩
Tromsøysund (两孔)	公路	1994	3.5 3.386	-102		挪威		最大纵坡 8.2%
Bjørøy	公路	1996	2.012	-88		挪威		最大纵坡 10%
Sløverfjord	公路	1997	3.337	-120		挪威		最大纵坡 8.0%
Nordkapp (Magerøysund)	公路	1999.6	6.875	-150		挪威		最大纵坡 10%
Frøya	公路	2000.6	5.305	-164		挪威		最大纵坡 10%
Oslofjord	公路	2000.6	7.39	-134		挪威		最大纵坡 7.0%
Ibestad	公路	2000.12	3.396	-112		挪威		最大纵坡 9.9%
Bømlafjord	公路	2000.12	7.931	-262.5		挪威		最大纵坡 8.5%
Skatestraum	公路	2002.7	1.89	-80		挪威		最大纵坡 10%
Melkøy	公路	2003.11	2.3	-62		挪威		
斯多尔贝特 大海峡隧道	铁路	1996	7.9	-75	平均20	丹麦	56.7	冰碛层和泥灰岩 (盾构法)
东京湾横断 公路隧道	公路	1998	9.1	-50	平均15	日本	151.7	软弱冲积、洪积黏性 土层(盾构法)
卓戈登隧道 (Drogden)	公铁两用	1999	4.05	注: 沉管 隧道	世界最长混凝 土沉管隧道	丹麦	333.682	鄂尔森越海通道 (Oresund Fixed Link) 的一部分

2. 国外著名海底隧道工程简介

(1) 青函隧道。日本青函隧道,为新干线铁路隧道,穿过津轻海峡,全长 53.85km,海底段长 23.3km,采用钻爆法施工。隧道在海面下最大埋深为 240m,其中水深 140m 左右,隧道顶部岩层平均厚度为 100m,隧道设计最大纵坡为 12%。隧道由两条主洞和一条辅助坑道组成,主洞为双线马蹄形断面,内径为 9.6m,与主洞平行,间距 30m 处设辅助施工坑道。辅助坑道直径为 5m,其目的是作为地质探洞进行地质调查、并处理主洞涌水和增开工作面,隧道建成后用作维修坑道及通风坑道。隧道共设斜井 6 座,竖井