

水下交通隧道发展现状与技术难题

——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”

王梦恕

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 与跨越江河湖海的其他交通方式相比, 水下隧道有其独有的优势, 因此近些年来在国内外发展迅速。然而与一般的山岭隧道不同, 水下隧道又有其自身的特点和难点。在深入比较分析水下隧道相比桥梁方案的巨大优势后, 论述国内外水下隧道的发展现状; 详细阐述钻爆法、盾构法、沉管法及悬浮隧道等水下隧道修建方式的特点、技术难点、适用条件以及应注意的相关问题, 并比较这几种修建方法的优缺点; 总结分析水下隧道设计、施工的重难点及其关键技术; 基于上述施工要点, 深入讨论台湾海峡海底铁路隧道的建设方案, 阐述了台湾海峡海底铁路隧道的合理性、断面设计和施工要点。最后, 提出修建水下隧道等大型地下工程的新理念, 并概括其重大关键技术。这些技术要点和建议对中国水下隧道建设特别是大型跨海隧道建设具有一定的指导意义。

关键词: 海底隧道; 水下隧道; 台湾海峡海底隧道; 钻爆法; 盾构法; 沉管法; 悬浮隧道

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)11 - 2161 - 12

CURRENT DEVELOPMENTS AND TECHNICAL ISSUES OF UNDERWATER TRAFFIC TUNNEL—DISCUSSION ON CONSTRUCTION SCHEME OF TAIWAN STRAIT UNDERSEA RAILWAY TUNNEL

WANG Mengshu

(*Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: Compared with other means of transportations, underwater tunnel has its own advantages, so it has been developed quickly at home and abroad in recent years. However, unlike mountain tunnel, underwater tunnel has its own characteristics and technical challenges. After in-depth analysis of the huge advantage of underwater tunnel compared with bridge, the current development stage of underwater tunnel at home and broad is introduced. The construction types of underwater tunnels including drill and blast method, shield method, immersed tube method and submerged floating tunnel are particularly illuminated. The scopes include their characteristics, technical difficulties, application conditions and some related problems; and their advantages and disadvantages are also discussed. The difficulties and key technologies in design and construction of underwater tunnel are summarized. Based on above-mentioned construction outlines, the construction scheme of Taiwan Strait subsea railway tunnel is thoroughly discussed, including the rationality of underwater railway tunnel, cross-section design and construction key points. Finally, some new concepts of underground projects construction such as underwater tunnel are put forward; and their key major technologies are summarized. These above-mentioned key technical points and suggestions will provide valuable references to the construction of underwater tunnel, especially for the construction of large subsea tunnel in China.

收稿日期: 2008 - 09 - 19; **修回日期:** 2008 - 10 - 09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA11Z119)

作者简介: 王梦恕(1938 -), 男, 1961年毕业于唐山铁道学院桥隧系, 现任中国工程院院士、教授、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: wms32730@263.net

Key words: subsea tunnel; underwater tunnel; Taiwan Strait Subsea Tunnel; drill and blast method; shield method; immersed tube method; submerged floating tunnel

1 引言

就跨越江河湖海的可选方式而言，目前主要有轮渡、桥梁与水下隧道。轮渡方式虽然投资少，但由于其受交通运输量小、等候时间长、气候影响大等不利因素的限制，与现代城市快节奏交通运输不相适应，所以现在选用较少。跨越江河湖海的方式越来越多地在水下隧道与桥梁之间做出选择。选择桥梁还是选择水下隧道，主要应依据航运、水文、地质、生态环境以及工程成本等具体建设条件进行全面的比较、论证而定^[1~5]。经论证，水下隧道与桥梁相比有以下优势：

(1) 具有很强的抵抗战争破坏、自然灾害(如地震)和突发事件的能力。

(2) 不侵占航道净空，不破坏航运，不干扰岸上航务设施，不影响海域生态环境，能避免噪声尘土对周围环境的影响，有利于环境的保护。

(3) 不受天气和气候变化的影响，有稳定畅通的通行能力。

(4) 具有很强的承载能力，一般无通行车辆载重限制。

(5) 结构耐久性好，可以做到百年一遇工程，且结构维护保养费用一般比桥梁低很多。

(6) 在建设时能做到不拆迁或少拆迁，占地少，不破坏环境，引线比桥梁短；建设钢用量比桥梁少，且只需普通建筑钢，工程总造价低于桥梁。

(7) 设计可以做到一洞多用，可以把城市供水、供电、供气和通讯等设施安排在一个比较安全稳定的环境中。

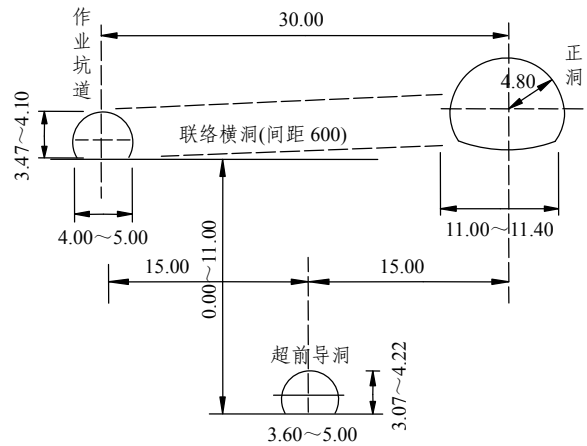
(8) 易于和两端交通接线，形成路网。在市区修建过江、过海隧道时这一点更为明显。

近 20 a 来，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。随着中国经济的高速发展、隧道修建技术的日臻完善以及人们环保意识的不断增强，水下隧道也逐渐被国人所接受，并付诸建设。

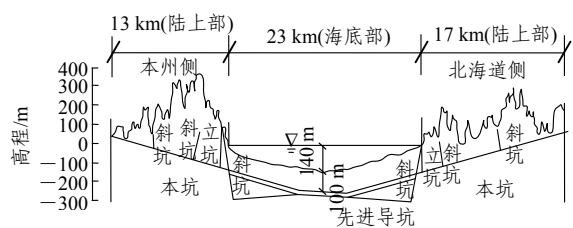
2 国内外水下隧道发展现状

据不完全统计，国外近百年来已建的跨海和海

峡交通隧道已逾百座，其中，挪威所建隧道占大多数。国外著名的跨海隧道有：(1) 日本青函海峡隧道(见图 1)；(2) 英吉利海峡隧道(见图 2)；(3) 日本东京湾水下隧道(见图 3)；(4) 丹麦斯特贝尔海峡隧道；(5) 挪威的莱尔多隧道等。这些已建的跨海隧道对中国类似工程建设具有很好的参考价值。



(a) 青函海底隧道横断面(单位: m)



(b) 青函海底隧道纵断面

图 1 青函海峡隧道断面图

Fig.1 Cross-sections of Seikan subsea tunnel

中国建成的水下隧道有很多条，而跨海隧道只有 6 条，且它们均集中在港澳台地区，大陆建成的水下隧道均为跨越江域的水下隧道，它们主要集中在上海地区，有多条隧道穿越黄浦江；正在建设中的水下隧道：中国第一条跨海隧道——厦门翔安海底隧道、胶州湾湾口海底隧道、广州生物岛—大学城隧道以及狮子洋海底铁路隧道等。拟建的水下隧道：琼州海峡跨海工程、渤海湾(大连—蓬莱)跨海工程(含隧道和海中悬浮隧道桥方案)、杭州湾(上海—宁波)外海工程以及大连湾水下隧道和台湾海峡跨海隧道(实施尚有待时日)等。表 1~3 为国内外建成、在建、拟建的水下隧道和跨海桥隧结合工程一览表。

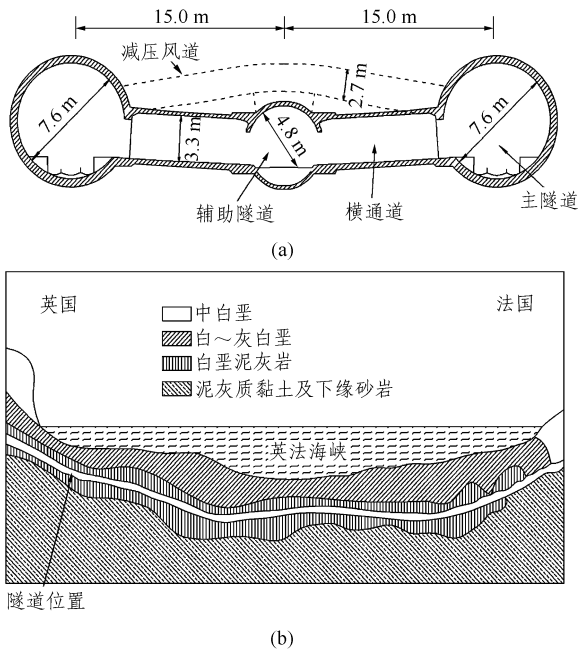


图 2 英吉利海峡隧道横纵断面图
Fig.2 Cross-sections of English Channel Tunnel

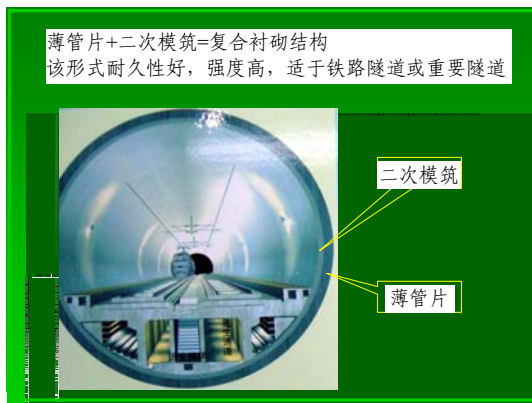


图 3 东京湾海底公路隧道结构横断面图
Fig.3 Transect cross-section of Tokyo Bay subsea road tunnel

3 水下隧道的修建方法

水下隧道的主要修建方法^[6~8]有以下几种：围堤明挖法、钻爆法、TBM 全断面掘进机法、盾构法、沉管法和悬浮隧道。围堤明挖法受到地质条件限制，且生态环境破坏严重，不经常采用。而水中悬浮隧道现在还停留在研究阶段。到目前，还没有一项成功实例。水下隧道施工经常使用的方法有钻爆法、盾构法、TBM 法和沉管法。

3.1 钻爆法

人们一般把埋置于基岩，用传统钻爆法或臂式掘进机开挖隧道的方法称为钻爆法(也称矿山法)，这些隧道被称为深埋隧道或暗挖法隧道。钻爆法在

国外水下隧道施工中的应用很多，20 世纪 40 年代日本修建的关门海峡水下隧道，是世界最早用钻爆法修建的水下隧道，之后又用钻爆法修建了世界闻名的青函海底隧道。作为世界上最长的水下隧道，日本青函海底隧道穿过津轻海峡，全长 53.85 km，海底段长 23.30 km，该隧道在水平钻探，超前注浆加固地层，喷射混凝土等技术上有巨大发展，尤其在处理海底涌水技术方面，独具一格，为工程界所津津乐道。挪威已建成的约 100 km 的水下隧道均采用钻爆法施工，最长一座隧道为 4.70 km，最大水深达 180 m。挪威采用钻爆法修筑水下隧道的技术发展迅速，在应对海底不良地质段的施工方面，除应用注浆法之外，还针对不同地质情况和围岩条件，有的隧道可设或不设二次混凝土衬砌。

中国目前也在积极修建水下隧道，以缓解交通压力。基于多年山岭隧道和城市浅埋暗挖地铁隧道施工的经验以及国外水下隧道成功经验，目前正在采用钻爆法和浅埋暗挖法修建厦门东通道翔安水下隧道以及青岛—黄岛水下隧道，还有些隧道正在商议拟建当中。

随着钻爆技术的发展完善，钻爆法和沉管法、盾构法一样，已经成为独具特点的修筑水下隧道的一种方法，其技术难点主要有：

(1) 通过深水进行海底地质勘测比在陆地地质勘测更困难、造价更高，而且准确性相对较低，所以遇到未预测到的不良地质情况风险更大^[2, 3]。因此，在隧道施工时必须进行超前地质预报^[9]。

(2) 水下隧道施工的主要困难是突然涌水，特别是断层破碎带的涌水。因此，必须加强施工期间对不良地质体和涌水点的预测，并采取针对性措施提前整治。

(3) 水下隧道的单口掘进长度很大，从而对施工期间的通风有更高的要求。

(4) 很高的孔隙水压力会降低隧道围岩的有效应力，造成较低的成拱作用，从而影响地层的稳定性。

(5) 水下隧道不能自然排水，堵水技术是关键技术。先注浆加固围岩，堵住出水点，然后再开挖。在堵水的同时加强机械排水，以堵为主，堵抽结合。

(6) 由于受长期较大的水压力作用，衬砌结构设计应遵循一次支护承受全部水压力，二衬只承受水压力的设计理念进行。

表1 国外水下隧道一览表
Table 1 Lists of foreign underwater tunnels

序号	跨海通道名称	国家	全长/km	海面下长度/km	开工时间	通车时间	施工方法	隧道交通类型	工程造价/(10 ⁸ USD)	投资方式	备注
1	关门铁路隧道	日本	3.60	1.14	1939年	1994年	盾构	铁路		政府投资	
2	关门公路隧道	日本	3.46	0.78	1953年	1958年	盾构	公路			
3	新关门铁路隧道	日本	18.70	0.90		1975年	钻爆	铁路		政府投资	
4	青函海底隧道	日本	54.00	23.30	1964年5月	1998年3月	钻爆	铁路	37.000	政府投资	二战前提出构想
5	日韩海底隧道	日本、韩国	230.00~250.00				沉管	铁路	200.000~700.000		20世纪80年代提出构想
6	日俄海底隧道	日本、俄国	51.40	42.00							1994年提出构想
7	釜山—济州连线隧道	韩国	4.00	3.38	2004年	2009年(预计)	沉管				在建中
8	马六甲海峡海底隧道	马来西亚、印尼	91.00						30.000		拟建
9	巽他海峡海底隧道	印尼	39.00						150.000		拟建
10	马尔马拉海底隧道	土耳其	13.30	1.80	2006年3月	2010年(预计)	沉管		25.000	日本国际合作 银行40a期贷款	1985年提出构想
11	英法海峡海底隧道	英国、法国	50.50	37.00	1987年1月	1994年5月	盾构	铁路	128.000	BOT企业投资	1751年提出构想
12	苏格兰—赫市里底群岛海底隧道	英国	约24.00								拟建
13	苏格兰—奥克尼群岛海底隧道	英国	约10.00								拟建
14	安斯特岛—耶尔岛海底隧道	英国	2.60				钻爆		0.210		拟建
15	耶尔岛—设得兰岛海底隧道	英国	4.50				钻爆		0.350		拟建
16	Vardø 隧道	挪威	2.60			1983年	钻爆	公路		政府投资	海面下88m
17	Elling sØy 隧道	挪威	3.50			1987年	钻爆	公路		政府投资	海面下140m
18	Valde rØy 隧道	挪威	4.20			1987年	钻爆	公路		政府投资	海面下145m
19	Kvalsund 隧道	挪威	1.60			1988年	钻爆	公路		政府投资	海面下56m
20	God Øy 隧道	挪威	3.80			1989年	钻爆	公路		政府投资	海面下153m
21	Hvaler 隧道	挪威	3.80		1989年	1989年	钻爆	公路		政府投资	海面下121m
22	Nappstrtaume 隧道	挪威	1.80			1990年	钻爆	公路		政府投资	海面下60m
23	Fannefjord 隧道	挪威	2.70			1990年	钻爆	公路		政府投资	海面下100m
24	Maurundet 隧道	挪威	2.30			1990年	钻爆	公路		政府投资	海面下132m
25	Freifjord 隧道	挪威	5.20			1992年	钻爆	公路		政府投资	海面下132m
26	次峡湾(Byfjord)隧道	挪威	5.86			1992年	钻爆	公路		政府投资	海面下223m
27	主峡湾(Mastrafjord)隧道	挪威	4.50			1992年	钻爆	公路		政府投资	海面下132m
28	来尔多(Laerdal)隧道	挪威	24.50		1995年3月	2000年11月	钻爆	公路		政府投资	世界最长公路隧道
29	马格尔岛隧道	挪威	6.98				钻爆	公路		政府投资	
30	奥斯陆湾海底隧道	挪威	7.23			2000年	钻爆	公路		政府投资	海面下134m
31	Tromsoysand 公路隧道	挪威	3.40			1994年	钻爆	公路		政府投资	海面下102m
32	Hitra 公路隧道	挪威	5.60			1994年	钻爆	公路		政府投资	海面下275m
33	斯塔万格(Stavanger)峡湾隧道	挪威	1.40					公路	1.360		拟建
34	赫尔辛基过港隧道—PORVARINLAHTI 双管隧道	芬兰	1.60		2004年	2008年(预计)	钻爆	铁路			在建中
35	赫尔辛基过港隧道—LABBACKA 单管隧道	芬兰	0.62		2004年	2008年(预计)	钻爆	铁路			在建中
36	赫尔辛基过港隧道—SAVIO 单孔铁路隧道	芬兰	13.50		2004年	2008年(预计)	钻爆	铁路			在建中
37	Hvalfjrdur Fjord 隧道	冰岛	5.48			1998年7月	钻爆				
38	费马恩海峡隧道	丹麦、德国	19.00					铁路			拟建
39	VAGAR 隧道	丹麦	4.90			2003年	钻爆				
40	EYSTUROY-BORDOY 隧道	丹麦	6.20		2004年	2006年8月	钻爆		0.413		在建中
41	直布罗陀海峡隧道	西班牙、墨西哥	39.00~50.00					铁路			1869年提出构想
42	意大利—突尼斯海底隧道	意大利、突尼斯	136.00						240.000		拟建
43	白令海峡海底隧道	俄国、美国	60.00~113.00						500.000		1894年提出构想
44	刻赤海峡隧道(克里米亚隧道)	乌克兰、俄国	约4.00					铁路	4.500		拟建
45	旧金山海湾隧道	美国	5.83	5.79	1970年	1972年	沉管	铁路			
46	诺森伯兰海峡隧道	加拿大	13.00								拟建
47	墨西哥海峡隧道	墨西哥	23.00								拟建
48	悉尼海港海底隧道	澳大利亚	2.30	0.96	1979年	1992年	沉管	公路	5.500	BOT企业投资	

表 2 国内水下隧道一览表

Table 2 List of domestic underwater tunnels

序号	跨海通道名称	地区	全长/km	海面下长/km	开工时间	通车时间	施工方法	隧道交通类型	工程造价/(10 ⁸ RMB)	投资方式	备注
1	港九中线水下隧道	香港	1.886	1.60			沉管	公路	17.6	BOT 企业投资	
2	地铁水下隧道	香港	约 2.000	1.40			沉管	铁路		BOT 企业投资	
3	港九东线水下隧道	香港	4.000	2.20			沉管	公铁两用	35.3	BOT 企业投资	
4	港九西线公路隧道	香港	2.000	1.36			沉管	公路	46.7	BOT 企业投资	
5	港九西线铁路隧道	香港	2.000	1.26	1995 年	1998 年	沉管	铁路	9.3	BOT 企业投资	
6	高雄水下隧道	台湾高雄	2.250	1.06		1984 年	沉管	公路		政府投资	
7	厦门翔安海底隧道	福建厦门	9.000	6.00	2005 年 4 月	2009 年 (预计)	钻爆	公路	39.5(含配套工程)	银行贷款	20 世纪 80 年代提出构想
8	大连湾水下隧道	辽宁大连	6.000	3.00	2007 年	2011 年	钻爆	公路			2003 年提出构想
9	胶州湾湾口水下隧道	山东青岛	6.170	3.30	2006 年 6 月	2009 年	钻爆	公路	31.8	BOT 企业投资	20 世纪 80 年代提出构想
10	台湾海峡水下隧道	福建—台湾	约 130.000				TBM	铁路	1 000.0		1948 年提出构想
11	琼州海峡水下隧道	广东—海南	34.000	18.00	约 2010 年		盾构	铁路	200.0		1980 年提出构想
12	港岛—北京大屿山水下隧道	香港	10.000					公路			拟建
13	狮子洋铁路水下隧道	深圳—东莞	10.800				盾构	铁路			在建
14	汕头市内海底隧道	广东汕头						公路			预可研
15	杭州湾水下隧道	浙江杭州					TBM 钻爆	铁路			拟建
16	长江口水下隧道	上海	8.900				盾构	公路			拟建

表 3 国内外跨海桥隧结合工程一览表

Table 3 List of projects of combination between bridge and tunnel at home and abroad

序号	跨海通道名称	国家(地区)	全长/km	开工时间	通车时间	交通类型	工程造价	投资方式	跨海隧道部分		跨海大桥部分	
									长度/km	施工方法	长度/km	施工方法
1	东京湾桥隧工程	日本	15.1	1989 年	1996 年 8 月	公路	135 亿美元	各方集资	9.40	盾构	4.40	梁式
2	大贝尔特桥隧工程	丹麦	17.5	1988 年 6 月	1998 年 8 月	-	61 亿美元	政府投资	6.61	盾构	13.40	梁式—悬索
3	厄勒海峡桥隧工程	丹麦、瑞典	16.0	1993 年	2000 年 7 月	公铁两用	37 亿美元	两国合资	4.06	沉管	7.85	斜拉—高架
4	切萨皮克湾桥隧工程	美国	28.0	1960 年 9 月	1964 年 4 月	公路	2 亿美元	发行债券	3.20	沉管	20.90	梁式
5	长江口隧桥工程	中国(上海)	25.5			公路	123 亿人民币		8.90	盾构	10.30	
6	大连—烟台胶州湾工程	中国(烟台—大连)	130.0			公铁两用						
7	港珠澳海上通道	中国(香港—珠海—澳门)	36.0									

(7) 由于单口连续掘进的距离很长而导致工期较长, 财政投资很高, 因此必须采用快速掘进设备。因此, 采用小直径 TBM(直径小于 $\phi 5\text{ m}$)超前支护, 后部钻爆法扩大是既快又便宜, 且较为安全的施工方法。大断面 TBM 掘进机^[10]造价贵、风险大, 不宜采用。

3.2 盾构法

盾构施工法是用被称作盾(shield)的钢壳在保持掌子面稳定的同时进行安全掘进, 而后面则装上

管片衬砌组件, 利用其反作用力掘进的一种隧道施工方法。盾构法也是修建水下隧道的一种重要施工方法, 尤其是在软土地层中。自从 1843 年第一条盾构法隧道在伦敦泰晤士河建成以来, 盾构法隧道的设计和施工技术得到了很大发展, 出现了泥水加压式和土压平衡式盾构, 衬砌由铸铁转向钢筋混凝土或钢材组成。用盾构法施工的世界著名水下隧道有英吉利海峡隧道和后来日本东京湾水下隧道。中国在 20 世纪 50 年代就开始研究盾构法施工, 1962

年用气压盾构，采用铸钢管片+钢筋混凝土衬砌建成了上海市第一条黄浦江越江道路隧道。目前用盾构建造水下隧道的案例很多，如武汉长江第一隧道(见图 4)。表 4 为国内外部分已(在)建成的大直径盾构水下隧道。



图 4 武汉长江第一隧道平面图

Fig.4 Plan of the 1st tunnel of Wuhan Yangtze River

表 4 国内外部分大直径盾构隧道

Table 4 Some large-diameter shield tunnels at home and abroad

隧道名称	长度 /km	埋深 /m	盾构外径 /m	水压力 /MPa
日本东京湾隧道	9.500	50~60	14.14	0.60
荷兰 Westerschelde 隧道	6.600	60	11.33	0.65
武汉长江第一隧道	2.700	12~30	11.40	0.60
丹麦大带桥海底盾构隧道	7.410	55	8.78	0.60
上海大连路隧道	1.275	30~50	11.22	0.40

盾构法采用现代化的生产手段，速度快，效率高，工作人员作业环境较好，安全保证程度高。但是盾构掘进机构筑的隧道断面形式和线型受限，灵活性不大，曲线半径不能太小；机件复杂，设备昂贵，建设成本中设备费用占用比率较高；对地层地质和水文情况敏感度极高，在掘进前方不良地质、严重水害和障碍物难以探明的情况下，建设风险较大；在隧道掘进中途需要更换刀具和整修刀盘，工艺复杂，操作困难；隧道洞口附近需要有较大的施工整备场地，包括预制管片的场地，代价较高。

另外，水底盾构隧道与一般陆地地铁、市政管线盾构隧道相比，有其自身特点^[11, 12]有：

(1) 隧道施工过程中承受较大水压力、土压力，盾构施工需克服高水压，尤其是大直径盾构推进中需克服顶底压差，保持工作面稳定，其施工难度较大。

(2) 隧道出露海底后两端斜坡段类型复杂，盾构在人工岛、海堤或河堤中穿越，且存在软硬围岩的交界面，因此纵坡转换和地层突变处盾构推进难度较大，海底盾构隧道设计包括人工岛的结构及功能，并满足桥隧转换功能和环保要求。

(3) 海底盾构隧道需要着重考虑隧道抗浮、管片耐久性、防水、抗渗等关键技术的设计、施工及效果评估。工程经验表明，在管片内增设混凝土衬砌对减小运营风险有好处。目前，中国狮子洋铁路盾构隧道已在管片内增设混凝土衬砌。

(4) 受航道及海(江、河)口天然口门宽度控制，水下隧道一般较长，盾构机设计需考虑长距离掘进、海底检修和海中对接等因素；隧道结构设计需充分考虑通风、照明、消防及防灾等因素。

(5) 环境评价、风险性评估也是海底盾构隧道建设的突出特点。

3.3 沉管法

沉管法是在海岸边的干坞里或在大型船台上将隧道管节预制好(见图 5)，再浮拖至设计位置沉放对接而后沟通成隧。沉管隧道一般由敞开段、暗埋段及沉埋段等部分组成，部分工程在沉埋段两端设置岸边竖井，供通风、供电和排水等使用。

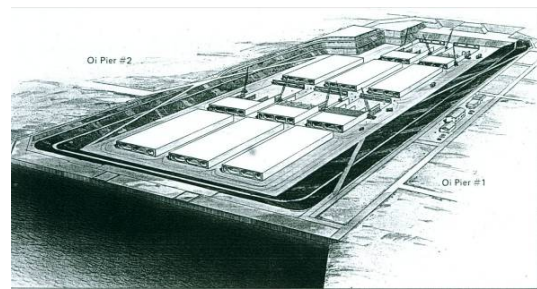


图 5 沉管隧道示意图

Fig.5 Schematic diagram of immersed tube tunnel

自 1910 年在美国首次兴建沉管隧道以来，长盛不衰。世界各国，特别是美国、荷兰和日本等几个国家在沉埋技术领域有了长足的进展。中国建成的有广州珠江、宁波甬江和常洪以及上海外环线沉管隧道等。上海外环线沉管隧道，其规模位居世界第二位。表 5 为国内外部分沉管隧道的建设情况。同钻爆法和盾构法修建水下隧道相比，沉管法有以下特点：

(1) 地质条件。沉管隧道的基槽开挖较浅，且沉管由于受到水浮力的作用，作用于地基的荷载较小，因而对基础承载力的要求较低，对各种地质条件的适应能力较强，但基槽开挖与基础处理的施工技术非常复杂，尤其遇到坚硬的岩石时，水底爆破开挖技术要求高，且破坏了海洋生态环境。

(2) 隧道埋深。沉管隧道埋深只要 0.5~1.0 m 即可，也可为零覆盖，甚至可凸出河床面，而盾构隧道的埋深至少为 1D(D 为隧道洞径)以上，钻爆隧

表 5 国内外部分沉管隧道的建设规模和关键技术

Table 5 Construction scales and key technologies of some immersed tube tunnels at home and abroad

序号	隧道名称	国家	竣工时间	宽×高/(m×m)	节段长度/m	管段数	沉管总长/m	接头型式	基础处理	管段沉放	通风方式
1	迪斯岛隧道	加拿大	1959 年	23.80×7.16	104.9	6	629.0		喷砂	双方驳自抬式	半横向
2	旧金山海湾地铁隧道	美国	1970 年	14.58×6.55	58.0	111	5 825.0	柔性	先铺刮平	双方驳自抬式	活塞效应
3	弗拉克隧道	荷兰	1975 年	29.80×8.00	125.0	2	250.0		砂流法	浮筒吊沉	纵向
4	东京港公路隧道	日本	1976 年	37.40×8.80	115.0	9	1 035.0	柔性	注浆基础	双方驳自抬式	半横向
5	高雄跨港隧道	中国	1984 年	24.40×9.35	120.0	6	720.0	柔性	砂流(掺 40 % 颗粒水泥)	双驳船	纵向
6	古尔堡海峡隧道	丹麦	1988 年	20.60×7.59	230.0	2	460.0	柔性	喷砂		纵向
7	埃姆斯河隧道	德国	1989 年	27.50×8.40	127.5	5	639.5	柔性	喷砂	浮筒沉放	纵向
8	香港东区隧道	中国	1990 年	35.00×9.80	122.0~128.0	15	1 859.0	柔性	砂流法	双方驳自抬式	全横向
9	珠江隧道	中国	1993 年	33.00×8.15	22.0~120.0	5	457.0	柔性	砂流法	单起重船	全横向
10	上海市外环线隧道	中国	2003 年	43.00×9.55	100.0~108.0	7	736.0	柔性	砂、水泥熟料混合灌砂	浮箱吊沉	纵向
11	香港西区隧道	中国	1997 年	33.40×8.57	113.5	12	1 363.5				
12	厄勒海峡隧道	丹麦、瑞典		42.00×8.50	178.0	20	3 560.0	柔性	碎石刮平		
13	甬江隧道	中国	1995 年	11.90×7.50	80.0+4×85.0	5	420.0	柔性	抛石回填压浆	吊沉	
14	常洪隧道	中国	2002 年	22.80×8.45	95.0~100.0	4	395.0	柔性	预制混凝土桩、灌浆囊袋	浮箱吊沉	纵向
15	川崎港隧道	日本	1980 年	31.00×8.80	100.0~110.0	8	840.0	刚性			
16	Drecht	荷兰	1977 年	48.80×8.08							
17	斯海尔德	比利时	1969 年	47.85×10.10			1 136.0				

道的埋深则要求更大。因此三者相比，沉管隧道的坡降损失最小，同一隧址处，隧道的长度也最短，运营条件相对较好。

(3) 防水性能。沉管的管段每节长一般超过 100 m，这样沉管隧道的接缝很少，并且管段是在工作条件较好的露天干坞内进行预制的，混凝土浇筑质量易于控制，管段的防水性能有保证。同时管段接头处采用 GINA 和 OMEGA 两道橡胶止水带，经过工程实践验证，管段之间的连接可以做到“滴水不漏”。相比而言，盾构隧道由于采用预制管片作为衬砌结构，因此施工缝分布广泛，尽管采取紧固、密封及防水等各种措施，但保证隧道不发生渗漏或滴水不漏仍然是相当困难的；对于钻爆施工的隧道，由于施工工艺本身的限制，无论是混凝土结构还是外敷防水层在施工过程中都存在一些质量缺陷，隧道漏水是不可避免的。

(4) 断面适应性。沉管隧道可根据使用功能需要确定断面大小和形状，断面利用率较高，且沉管隧道断面的增大对工程的单位工程量造价影响不大，因此沉管隧道的断面适应性最好：断面越大，沉管的优势越明显。比较而言，钻爆法修建的隧道断面越大，单位造价越高，尤其是在围岩较差时，

需要特别采用强支护与超前支护手段，进一步增大工程造价，而且施工难度与风险很大。同样，在水底条件下盾构法修建的隧道断面越大，需要的盾构直径越大，从而引起设备购置费用大幅上升，直接提升工程造价。另外，钻爆隧道根据施工工艺以及结构稳定的需要，一般为似马蹄形或拱形；盾构隧道受盾构机制约一般为圆形，如采用异形断面，则盾构机需要专门订购和加工，工程造价和成本将增加更多。

(5) 作业环境。盾构隧道和钻爆隧道施工时，作业人员大部分作业时间在河床下面进行，其安全性和作业条件较差，不确定因素较多；而沉管隧道的主要作业是在陆上露天进行的，水面作业和水下作业周期均较短，安全可控性较好。

(6) 工序衔接。沉管隧道施工时，平行作业点比盾构隧道和钻爆隧道多，如管段预制可以和基槽开挖以及岸上主体结构等工序平行作业。这样，沉在管隧道施工组织上，其时间、空间和人员的安排及工期上有一定的优越性和灵活性。而盾构隧道和钻爆隧道由于作业空间、施工工艺的限制，很多工序无法平行作业。

(7) 工程量。沉管隧道与另外两种隧道形式相比,其主要缺点是基槽(呈倒梯形状)开挖的土方量大,相应的回填量也较大;另一个缺点是主体结构的圬工量较大,一般而言,比钻爆隧道衬砌结构工程造价要高出 20%~30%。

(8) 航运干扰。沉管隧道在基槽开挖、管片浮运、沉放和对接阶段都将对航道产生一定的影响,一些地区需要采取封航措施才能保证施工的顺利进行,而盾构隧道和钻爆隧道则对航道则没有任何干扰。

3.4 悬浮隧道

悬浮隧道(submerged floating tunnel, SFT),在意大利又称“阿基米德桥”,简称“PDA”桥。悬浮隧道是通过水浮力和锚固力的平衡作用使隧道悬浮在适当水深位置的管状结构物,如图 6 所示。该方法已经有几十年的研究历史,遗憾的是截至目前还没有一项成功案例。悬浮隧道结构在技术上具有以下特点:

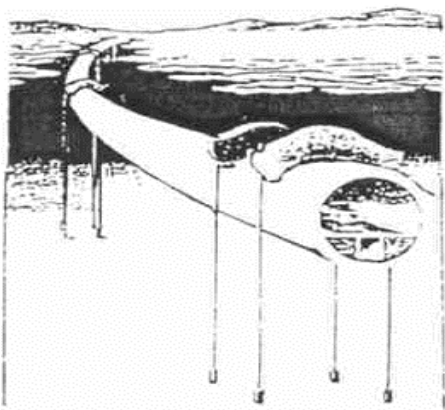


图 6 悬浮隧道示意图

Fig.6 Schematic diagram of submerged floating tunnel

(1) 对结构物周围的环境影响很小。

(2) 与钻爆法、盾构法、TBM 法以及沉管隧道等其他方法修建的隧道相比,悬浮隧道坡度更小,通行车辆的能量消耗大大减少。

(3) 可以方便铺设跨江、海峡的各种供水、电力管线。对于长度超过 1 000 m 及水深超过 50 m 的连接工程,采用悬浮隧道比其他解决方案可能更具有竞争力。另外,作为临时隧道、观光隧道很有推广价值。

(4) 土方开挖量最小,如果悬索锚固技术突破的话,悬浮隧道将成为修建成本最低的隧道,但需要考虑运营中安全风险问题,如大型动物袭击等。

4 水下隧道设计、施工重难点分析及关键技术

4.1 水下隧道设计、施工重难点分析

(1) 深水海洋地质勘察的难度高、投入大,漏勘与情况失真的风险程度增大。

(2) 饱和岩体强度软化,其有效应力降低,使围岩稳定条件恶化。

(3) 高渗透性岩体施工开挖所引发涌/突水(泥)的可能性大,且多数与海水有直接水力联系,达到较高精度的施工探水和治水等均较为困难。

(4) 海上施工竖井布设难度高,致使堵头单口掘进的长度加大,施工技术难度增加。

(5) 全水压衬砌与限压/限裂衬砌结构的设计要求高。

(6) 受海水长期浸泡、腐蚀,高性能、高抗渗衬砌混凝土配制工艺与结构的安全性、可靠性和耐久性,以及洞内装修与机电设施的防潮去湿要求严格。

(7) 长(大)水下隧道的运营通风、防灾救援和交通监控,需有周密设计与技术保障措施。

(8) 水下隧道是一项高风险的地下工程,存在较高的风险源,而同时缺乏系统的风险评估方法,为水下隧道施工风险管理带来很大的困难。

4.2 水下隧道设计、施工的关键技术

(1) 海床基岩工程地质与综合地质勘察

修建水下隧道时,在深水和厚覆盖层下有计划地钻探到隧道深度比较困难,有时根本是不可能的。采用其他的地质勘探方法(如物探、地面抽样勘探和深海测量法等)目前都不可能给出隧道线路上详细的地质剖面^[10~13]。

(2) 水下隧道最小覆盖层厚度——隧道最小埋置深度确定

跨海线路走向方案大致确定后,在隧道纵剖面设计时对隧道上方岩体最小覆盖层厚度,也即隧道最小埋深的拟选,密切关系到隧道建设的经济和安全问题。覆盖层厚度过薄,隧道施工作业面局部或整体性失稳与涌、突水患的险情加大,在辅助工法(如注浆封堵、各种预支护及预加固等)上的投入将急剧增加。覆盖层过厚,水下隧道长度加大,作用于衬砌结构上的水头压力增大。如何确定最优的覆盖层厚度是设计、施工的关键。对远离城市长距离过海隧道的埋深,从减少不可控的工程地质出发,应深埋(>50 m)在未风化的岩石内。

(3) 衬砌荷载确定

水下隧道设计的另一个重要问题是衬砌设计时要考虑静水荷载。与陆地隧道相比,水下隧道除了实际的覆盖层以外还有很高的静水荷载。隧道掘进机实际上只能采取预制的管片衬砌,对很深的水下隧道(如青函海底隧道、直布罗陀水下隧道)会产生很高的静水压力,衬砌上的荷载会很大。尽管这种荷载是均匀的,并且不会引起弯矩,但最终产生的轴向力可能要求采用的混凝土管片厚度大于 600 mm。在很长的水下隧道中,庞大而笨重的管片运输与装卸非常麻烦。因此,尽可能降低管片上的静水压力是非常重要的。近期,从百年一遇的设计考虑,采用增设二次钢筋混凝土衬砌是安全、可靠的方案。

(4) 地质超前预报技术

由于地质勘探资料的不足,水下隧道施工中,需通过各种地质超前预报技术预报前方的地质情况,以便指导设计和施工,并及时调整隧道设计施工方案。其中施工探水与治水是水下隧道施工的重要环节,是关系到工程建设成败的主要因素之一。

(5) 海底隧道衬砌结构防渗防腐技术

海底隧道钢筋混凝土衬砌长期受到含盐水质、生物、矿物质及高水压力等的持续作用,锚杆、喷层、防水薄膜和高碱性混凝土与钢筋等材料因物化损伤的积累与演化(腐蚀)而影响其耐久性。采用加入少量粉煤灰和矿粉等防腐剂的耐腐蚀高性能海工合成纤维混凝土、少设钢筋并保证钢筋保护层厚度不小于 7 cm 等方案可满足海底隧道衬砌结构耐久性要求。

(6) 长大水下隧道通风技术

在长大水下隧道的建设中,通风方案的优劣及通风运营效果的好坏,将直接关系到隧道的工程造价、运营环境、救灾功能及运营效益。长大水下隧道宜采取双洞单向方案,以利于施工和运营通风。另外,长大水下隧道通风方案宜采取纵向通风方案,尽管该方案在隧道内的卫生状况保持和防排烟效果方面不如横向通风方案好,可是纵向通风土建工程量小,设备运营费用低,布置方式灵活多样,且对长大水下隧道可采取分段纵向通风方案,必要时可以增设静电除尘器以改善通风效果。

(7) 大断面隧道开挖方法及设备

一般来讲,在围岩条件较好时,修建长大水下隧道的最佳方式趋向于采用钻爆法施工。但有时在围岩足以承受撑靴压力的硬岩中可采用硬岩隧道掘进机施工,它有较强的掘进速度,可缩短工期。在

掘进机的选择上应优先选用开敞式(TBM)硬岩掘进机(见图 7),不宜采用双护盾掘进机(见图 8)和单护盾掘进机。



图 7 开敞式(TBM)硬岩掘进机

Fig.7 Opened(TBM) hard rock boring machine

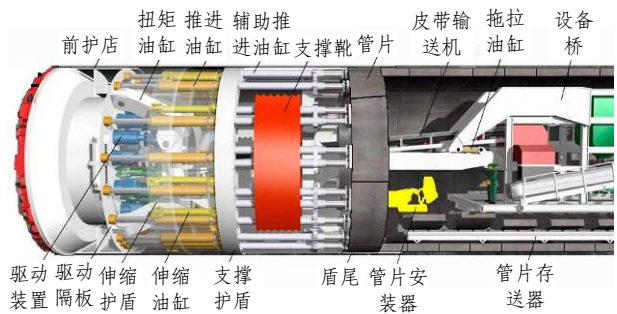


图 8 双护盾掘进机纵断面图

Fig.8 Vertical cross-section of double-shielded TBM

虽然双护盾式 TBM 有圆筒形护盾保护结构,可在掘进同时进行了管片的安装,但是它适用的地层是相对稳定、岩石抗压强度适中、地下水不太丰富的条件,护盾式 TBM 的高速掘进记录也都在这类地质中创造的。当它通过地应力变化大、破碎以及块状围岩时,如不能及迅速通过,则护盾有被卡住的危险。采用双护盾施工时,由于施工经验及对护盾姿态控制等原因,会产生盾尾管片拼装空隙不足,从而引起管片错台、管片裂缝,严重时甚至导致隧道轴线偏离,应引起注意。此外追求掘进速度而忽视管片背后吹注豆砾石、灌浆,也会带来严重的质量事故。

开敞式(TBM)硬岩掘进机具有以下特点:① 长度/直径 ≤ 1 、灵敏度高,易于调整方向,且精确度高(可在 $\pm 30\text{mm}$ 内)。而双护盾、单护盾 TBM 则灵敏度较低,很难精确快速调整到位。② 能够及时对不良地层进行支护,时空效应好,不易塌方。而双护盾、单护盾 TBM 由于后盾较长,不易及时支护,易塌方,易卡死,如台湾坪林隧道就出现了护盾被卡的问题。③ 工程造价相对于护盾 TBM 较低,前者约为后者的 0.7 倍。

敞开式 TBM 在对付较完整、有一定自稳性的

围岩时,能充分发挥出优势,特别是在硬~中硬岩石掘进中,强大的支撑系统为刀盘提供了足够的推力;使用敞开式 TBM 施工可以直接观测到被开挖的岩面,从而方便对已开挖的隧道进行地质描述。由于开挖和支护分开进行,使敞开式 TBM 刀盘附近有足够的空间用来安装一些临时、初期支护的设备,如钢拱架安装器、锚杆钻机、超前钻机及喷射混凝土设备等,应用新奥法原理使这些辅助设备可及时地、有效地对不稳定围岩进行支护。以维护和利用围岩的自稳能力为基点,将锚杆和喷射混凝土集合在一起为主要支护手段,及时进行支护,以便控制围岩的变形与松弛,使围岩成为支护体系的组成部分,形成了以锚杆、喷射混凝土和隧道围岩三位一体的承载结构,共同支承山体压力。

由于任何隧道的地质状况、围岩性质都存在不一致性、以及不对应性,因此选择开敞式掘进机除发挥出其所具备的硬岩掘进性能外,还应具备在不借助其他手段和措施的情况下,有通过软弱围岩、断层等不良地质的能力,并独立地完成不良地质隧道的掘进。敞开式 TBM 既适用于硬岩,也很适用于软岩地层,已在大伙房供水工地 87 km 长的隧道中推广应用。另外,在软弱不稳定地层中,由撑靴引起的局部应力可能造成岩层松弛而使围岩强度降低时,多采用泥水式盾构机施工。

(8) 采用超大型盾构机长距离掘进设计与施工的若干关键问题

超大型盾构机长距离掘进设计施工存在的问题有:① 饱水松散砂性地层、高水压力条件下,大断面隧道浅层掘进,泥水加压超大型盾构开挖作业面的稳定与安全性问题。② 长距离掘进中,盾构机行进姿态的控制与自动化纠偏,以及行进中在高压条件下的刀盘检修,刀具更换,故障处理与排险。③ 隧道纵向不均匀沉降和整体侧移、超大型管片接头刚度不足导致环向弯曲变形过大,防范管片纵缝、环缝渗漏水/泥的接头防水密封材料、工艺及其构造,以及管片自防水工艺等。这些施工风险很大,另外大直径(>12 m)盾构机造价很贵,要慎用、少用。

(9) 深水急流海底沉管隧道设计施工技术

深水急流海底沉管隧道应注意:① 水深流急、波高浪涌,海中自然条件恶劣,海底挖沟成槽施工中的防塌和防淤问题,尤其是海底为砂性土质时。② 沉管隧道受河床冲刷的顶板最小埋置深度,及对局部冲刷防护的设计与施工。③ 沉管隧道与桥梁相接时,需要设置人工岛,在技术和造价上是不推荐的,即沉管隧道与桥梁相接方案不可取。

5 台湾海峡海底铁路隧道建设方案

为了沟通海峡两岸,加强经济、文化联系,方便老百姓,修建海底隧道十分必要。台湾海峡隧道工程线路有 3 个方案(见图 9): (1) 北线方案: 福清—平潭岛—新竹,长约 122 km。(2) 中线方案: 莆田笏石—南日岛—苗栗,长约 128 km。(3) 南线方案: 厦门—金门—澎湖—嘉义,长约 174 km。

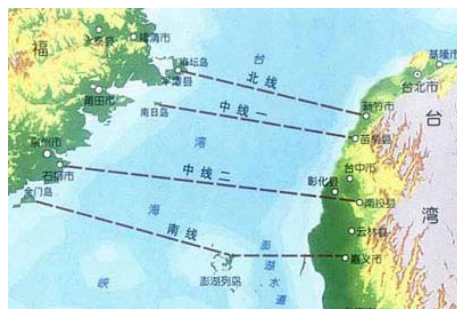


图 9 台湾海峡海底隧道建设方案

Fig.9 Construction schemes of Taiwan Strait Subsea Tunnel

对上述 3 个方案的优化、比选,海峡两岸专家及技术人员做了大量工作。目前看来,大陆专家倾向于选择北线方案,原因是这条通道路程最短,海底地质结构较稳定,未发现有断裂带,且水深较浅,为 40~60 m,工程造价最低。另外,北线方案两端分别靠近福建和台湾两省的政治经济文化中心福州市和台北市,可以最大限度发挥其辐射作用,提升海峡隧道的价值。台湾专家考虑到海床较浅及经济效益等因素,倾向选择南线方案,此线路涵盖澎湖、金门,串连台湾及离岛地区,对整体经济的贡献较大。该方案须采用分阶段建造方式,选用隧道群或桥隧结合方案。无论是哪个方案,海峡隧道一旦开工,将成为世界级特大工程。

3 个方案从技术上讲都是没问题的,关键是政治问题,因为至今两岸政府部门还没有对海峡隧道工程建设做出实质性的表态,整个设想仍停留在民间学术交流上。另外,筹集巨额资金也是一个难题,是否借鉴欧洲隧道的做法,采用建设—经营—转让(BOT)方式,发行股票,向国际金融市场筹资等,都需要做深入的研究。

5.1 台湾海峡海底铁路隧道方案的合理性

当今世界上已修建了许多海峡隧道,正在筹建的也很多,下面重点介绍已建的 6 座长大隧道:

(1) 1940 年,日本在关门海峡用盾构法修建世界上最早的海峡铁路隧道,长 3.6 km。

(2) 1975 年, 日本利用钻爆法在关门建成了长 18.7 km 的第二座海峡铁路隧道。

(3) 1988 年, 日本在津轻海峡用钻爆法建成了至今世界上最长的海峡隧道——青函海底隧道, 长 54 km, 是台湾海峡隧道的一半。

(4) 1994 年, 英法两国用盾构法和 TBM 硬岩掘进机法建成了英法海底铁路隧道, 长 50.5 km, 是世界第二长海底铁路隧道。

(5) 1991 年, 丹麦修建斯多贝尔海峡公路隧道, 长 7.9 km, 其中盾构法施工长 7.26 km, 盾构直径 $\phi 8.782$ m, 管片厚 0.4 m, 海峡工程总长 18 km, 总造价约 40 亿美元。修建过程中曾被水淹, 工期拖的很长。

(6) 1986 年, 日本东京湾海底公路隧道开工建设, 1996 年 8 月建成, 工期为 10 a, 工程全长 15.1 km, 其中海底盾构隧道长 9.12 km, 是世界上最长的海底公路隧道。8 台泥水加压盾构, 直径 $\phi 14.14$ m, 双向 6 车道, 一次衬砌管片厚 65 cm, 二次衬砌钢筋混凝土厚 35 cm。根据运营通风需要在海中筑岛修建通风竖井, 造价相当高, 技术难度大。不宜采用。

修建隧道的工程实例证明, 隧道长度大于 20 km 的应用铁路隧道方案, 电力牵引, 这样可长距离不设通风竖井、运营安全、风险小、运营费低, 且汽车可以坐火车跨越海峡。

5.2 台湾海峡海底铁路隧道通风、出渣及断面设计

(1) 长大隧道宜采用双洞单向方案, 以利于隧道施工和运营通风, 且施工通风宜采用巷道式射流方式。

(2) 出渣运输采用大容量电力机车牵引, 也可采用皮带机输送。

(3) 隧道有效内净空面积, 根据空气动力学原理, 单线隧道断面宜大于 55 m^2 , 同时为减小列车高速行驶造成洞内列车空气阻力过大, 列车运营速度以 200 km/h 左右为宜。

5.3 台湾海峡海底铁路隧道穿越地震带安全性评估

与桥梁等地面结构相比, 隧道等地下结构具有很强的抗震性能, 四川汶川 8.0 级地震中隧道结构基本安全无恙再次说明了这一点。但是长大隧道洞口段、主隧道 - 横向疏散通道交叉口部位, 地面通风井结构及其与隧道连接处是隧道抗震的薄弱环节, 这些地段的抗震设计需要加强。另外, 由于台湾海峡隧道属于世界罕见的长大隧道, 且不可避免地穿越地震带, 因此对长大隧道的抗震性还需做专门的论证分析, 并采取必要措施增强海峡隧道的抗

震性能, 尤其隧道处于可液化地层地段、穿越断层破碎带等不良地质体地段更应强化抗震设计。

据相关资料记载, 北线方案线路历史上未有超过 7 级的大地震, 现今地震活动性一般, 仅 5 级左右中等地震, 频度较低; 中线方案线路历史上虽无超过 7 级大地震, 但一般有 5, 6 级中强地震, 现今地震频度略高; 南线方案长度长, 多发 5, 6 级中强地震。

5.4 台湾海峡海底铁路隧道施工要点

(1) 从海底隧道的长度来看, 日本是率先建成和建的最长、最多的国家, 其次是挪威、丹麦等国。另外, 国与国、洲与洲之间的海底隧道也正在筹建。钻爆法施工的隧道占 90% 以上, 如挪威 17 条全部采用该法施工。钻爆法最便宜, 安全风险易控制; 其次为 TBM 和盾构法; 沉管法在特殊情况下采用, 因为其工程造价最高。

(2) 水下隧道衬砌最好采用复合式衬砌; 其次为管片+二次钢筋混凝土; 单层管片衬砌不利于百年以上的服务年限/寿命。

(3) 青函海底隧道设置超前疏水导洞, 提前排水有利于主洞施工。

(4) 水下隧道最小埋深与水文地质、施工方法及支护结构形式有关。一般盾构法、TBM 法和钻爆法洞顶埋深分别为 $1.0D$, $(1.5\sim 2.0)D$, $(2.0\sim 3.0)D$ 。台湾海峡隧道采用深埋方案风险最小。

(5) 台湾海峡隧道穿越硬岩, 采用掘进机施工时, 宜采用全断面开敞式掘进机, 不宜采用双护盾和单护盾掘进机。中间断层、软弱地带、横通道采用钻爆法施工。

(6) 沉管法不适于特长隧道(大于 6 km)、不适于硬岩地层、更不适于台湾海峡隧道。

(7) 在软弱、不稳定地层如无岩石、穿越软弱地层达 34 km 长的琼州海峡隧道宜采用土压平衡复合式盾构法施工, 且盾构直径不宜超过 $\phi 12$ m。

6 理念更新及关键技术总结

6.1 水下隧道修建的理念更新

随着人们环境保护意识的增强, 以及从经济角度和减少设计、施工与今后运营的安全风险出发, 修建隧道跨越江河湖海的方式将越来越为人们所接受, 然而修建一个大型水下隧道工程, 一些理念需要更新:

(1) 审核一个工程修建的好坏应遵守环境效益第一、社会效益第二、工程本身效益第三的次序进

行评定, 确保建一个工程就给人民和后代留下精品遗产, 不要留下让人唾骂的遗憾工程。

(2) 修建任何工程应遵守少拆迁、少占地、少扰民、少破坏周边环境的原则。

(3) 过江、过海隧道方案, 应满足交通宜疏不宜集的原则, 应方便乘客多地点过江, 应安全可靠。

(4) 过江、过海的方案应遵守确保建设全过程的安全风险最小, 应按安全、可靠、适用、经济、先进的次序进行。

(5) 同时, 水下隧道的施工具有环境复杂性、工程动态性和时效性的特点, 是一项高风险的地下工程, 存在较高的风险源, 需要综合考虑安全、经济、耐久性、适用性、生态环境保护等各个因素, 并贯穿于勘察、设计、施工、运营 4 个阶段。

6.2 水下隧道修建的关键技术

(1) 方案选择, 跨海、江的隧道位置选择及两端接线方案。

(2) 海中、江中水文地质的勘测, 河势、河床稳定性、冲刷的规律, 施工中的工程地质预报。

(3) 隧道最佳埋深的确定及断面坡度设计, 不同施工方法有不同埋深, 冲刷线确定埋深及施工方法。

(4) 施工方法的确定, 钻爆法、沉管法、TBM 法、盾构法或小 TBM 外国爆法等。

(5) 隧道建设的合理规模确定, 铁路、公路、复线、双向四车道、六车道。

(6) 隧道建设标准的确定, 设计速度、曲线、竖曲线半径、牵引坡等。

(7) 设计方法, 采用先进的隧道支护和衬砌的设计方法。

(8) 先进隧道施工技术确定。

(9) 隧道的防排水系统确定。

(10) 隧道的运营通风方式的确定, 竖井是否设置及位置。

(11) 隧道防灾、照明、监控的标准确定, 设计原则, 应突出自救、自报、从简、低成本运营。

(12) 隧道项目管理及融资。

(13) 建设过程中对规划、设计、施工、运营 4 个阶段的安全、风险分析。

致谢 本文的修改过程中, 得到李鹏飞博士的大力帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 王梦恕, 皇甫明. 海底隧道修建中的关键问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 1 - 4.(WANG Mengshu, HUANGFU Ming. Key problems on subsea tunnel construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [2] 王梦恕. 蓬勃发展的中国水下隧道[R]. 北京: 北京交通大学, 2005.(WANG Mengshu. Dynamic development of Chinese underwater tunnel[R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [3] 吕明, GRØVE, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(LU Ming, GRØVE, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(in Chinese))
- [4] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的关键[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 513 - 1 521.(SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of subsea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 513 - 1 521.(in Chinese))
- [5] 王梦恕. 隧道与地下工程技术及其发展[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2004.(WANG Mengshu. Tunnel and underground engineering technology and its development[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2004.(in Chinese))
- [6] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.(WANG Mengshu. Technology of shallow-buried tunnel excavation[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2004.(in Chinese))
- [7] 王梦恕. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.(WANG Mengshu. Rock tunnel boring machine(TBM) and engineering projects[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.(in Chinese))
- [8] 王梦恕. 大瑶山隧道——21 世纪隧道修建新技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994.(WANG Mengshu. Dayao Mountain Tunnel —new technology for tunnel construction in the 21st century[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [9] 张项立. 海底隧道不良地质体及结构界面的变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2 161 - 2 169.(ZHANG Dingli. Deformation control techniques of unfavorable geologic bodies and discontinuous surfaces in subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 161 - 2 169.(in Chinese))
- [10] 王占生, 王梦恕. TBM 在不良地质地段的安全通过技术[J]. 中国安全科技学报, 2002, 12(4): 55 - 59.(WANG Zhansheng, WANG Mengshu. Safe driving technology for TBM crossing unfavorable geologic zones[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(4): 55 - 59.(in Chinese))
- [11] 张项立, 王梦恕, 高军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290 - 296.(ZHANG Dingli, WANG Mengshu, GAO Jun, et al. Research on construction technology of large-span tunnel in complex rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 290 - 296.(in Chinese))
- [12] 杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机制[J]. 爆破与冲击, 2001, 21(2): 34 - 37.(YANG Xiaolin, WANG Mengshu. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 34 - 37.(in Chinese))
- [13] 崔玖江. 隧道与地下工程修建技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.(CUI Jiujiang. Tunnel and underground project construction technology[M]. Beijing: Science Press, 2005.(in Chinese))