

水下交通隧道的设计与施工

王梦恕

(北京交通大学,北京 100044)

[摘要] 综合论述了水下隧道在穿越江河湖海时所有的优势,介绍了水下交通隧道的设计与施工概况,讨论了水下隧道勘察设计、施工的几项关键技术,详细介绍了水下隧道施工的常用方法。

[关键词] 水下隧道;设计;施工

[中图分类号] U459.5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0004-07

就跨越江河湖海的可选方式而言,目前主要有轮渡、水下隧道与桥梁。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。

1 水下隧道穿越江河湖海的综合优势

选择水下隧道还是选择桥梁,主要依据航运、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。经过论证得出水下隧道与桥梁相比有以下几项显而易见的优势。a. 很强的抵抗战争破坏和自然灾害的能力。b. 不侵占航道净空,不影响航运,不干扰岸上航务设施。c. 水下隧道能全天候越江通车,不受气候变化的影响,有稳定、畅通无阻的通行能力。d. 具有很强的超载能力,不像桥梁通行车辆载重受设计荷载的限制。e. 结构耐久性好,维护保养费用比桥梁低很多。f. 建设时钢用量比桥梁少,且只需普通建筑钢,比桥梁造价更低。g. 在建设时能做到不拆迁或少拆迁,占地少,不破坏环境,从而降低建设成本。h. 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。i. 对生态环境影响小,能避免噪声尘土对周围环境的影响。

近 20 年来,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。随着我国经济的高速发展、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 国内外水下隧道技术发展现状

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,其中挪威所建跨海隧道占大多数。国外著名的跨海隧道有:日本青函海峡隧道、英吉利海峡隧道、日本东京湾水下隧道、丹麦斯特贝尔海峡隧道、挪威的莱尔多隧道等。这些已建的跨海隧道对我国类似工程的建设具有很好的参考作用。

我国建成的水下隧道有很多条,但跨海隧道只有 6 条,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、南京、武汉及厦门等地,有多条隧道穿越黄浦江、长江。建设中的水下隧道有:厦门翔安海底隧道(中国大陆第一条跨海隧道)、胶州湾湾口海底隧道以及广州生物岛——大学城隧道等。拟建的水下隧道有: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、大连湾水下隧道、台湾海峡跨海隧道(实施尚有待时日)等。表 1 至表 4 为部分国内外建成、在建、拟建的水下隧道一览表。

[收稿日期] 2009-03-16

[作者简介] 王梦恕(1938-),男,河南温县人,中国工程院院士,北京交通大学教授,博士生导师,研究方向为隧道及地下工程设计、施工技术;E-mail:wms3273@263.net

表1 国外水下隧道

Table 1 List of some foreign underwater tunnels

跨海通道名称	国家	全长/km	通车时间	技术类型	交通类型	投资方式	备注
新关门铁路隧道	日本	18.7	1975	钻爆法	铁路隧道	政府投资	
青函海底隧道	日本	54	1998	钻爆法	铁路隧道	政府投资	
日韩海底隧道	日本、韩国	230~250		沉埋法	铁路隧道		拟建
釜山—济州连线隧道	韩国	4	2009	沉埋法			在建
马六甲海峡海底隧道	马来西亚、印尼	91					拟建
马尔马拉海底隧道	土耳其	13.3	2010	沉埋法		国际合作银行贷款	在建
英法海峡海底隧道	英国、法国	50.5	1994	盾构法	公路隧道	BOT	
来尔多(Laerdal)隧道	挪威	24.5	2000	钻爆法	公路隧道	政府投资	最长公路隧道
赫尔辛基过港隧道—SAVIO单孔铁路隧道	芬兰	13.5	2008	钻爆法	铁路隧道		在建中
旧金山海湾隧道	美国	5.825	1972	沉埋法	铁路隧道		

表2 国外跨海桥隧

Table 2 List of foreign underwater tunnels and bridges crossing seas

跨海通道名称	国家	全长/km	技术类型	交通类型	造价/亿美元	投资方式
东京湾桥隧道路	日本	15.1			135	民间出资
海底隧道		9.4	盾构法	公路隧道		
西部跨海大桥	丹麦	4.4	梁式桥	公路桥		
大贝尔特桥隧		17.5			61	政府投资
海底隧道		8.02	盾构法	铁路隧道		
西部跨海大桥		6.61	梁式桥	公铁两用桥		
东部跨海大桥		6.79	悬索桥	公路桥		
厄勒海峡桥隧	丹麦	16			37	丹、瑞两国政府合资
海底隧道		4.06	沉埋法	公铁两用隧道		
跨海大桥	瑞典	7.85	斜拉桥+高架桥	公铁两用桥		
切萨皮克湾桥隧系统	美国	28			2	发行债券
海底隧道		3.2	沉埋法	公路隧道		
跨海大桥		20.9	梁式桥	公路桥		

表3 国内水下隧道

Table 3 List of underwater tunnels in China

跨海通道名称	地区	全长/km	海面 长/km	通车时间	技术类型	交通类型	工程造价/ 亿人民币	投资方式
港九中线水下隧道	香港	1.886	1.6		沉埋法	公路隧道	17.6	BOT
地铁水下隧道	香港	2	1.4		沉埋法	铁路隧道		BOT
港九东线水下隧道	香港	4	2.2		沉埋法	公铁两用	35.3	BOT
港九西线公路隧道	香港	2	1.36		沉埋法	公路隧道	46.7	BOT
港九西线铁路隧道	香港	2	1.26	1998	沉埋法	铁路隧道	9.3	BOT
高雄水下隧道	高雄	2.25	1.06	1984	沉埋法	公路隧道		政府投资
厦门水下隧道	厦门	9	6	2009	钻爆法	公路隧道	39.5	银行贷款
大连水下隧道	大连	6	3	2011	钻爆法	公路隧道		
胶州湾口水下隧道	青岛	6.17	3.3	2009	钻爆法	公路隧道	31.8	BOT企业投资
台湾海峡水下隧道	台湾	130						
琼州海峡水下隧道	海南	34	18		盾构法	铁路隧道	200	
港岛—北京大屿山水下隧道	香港	10				公路隧道		
孙逸仙大马路—友谊大马路水下隧道	澳门					公路隧道		
长江口水下隧道	上海	8.9			盾构法	公路隧道		

表4 国内跨海桥隧

Table 4 List of underwater tunnels and bridges crossing seas in China

跨海通道名称	地区	全长/km	技术类型	交通类型	工程造价/亿人民币	投资方式
长江口隧桥工程	上海	25.5			123	
海底隧道	上海	8.9	盾构法	公路隧道		拟建
跨海大桥	上海	10.3		公路桥		
大连—烟台胶州湾	烟台	130				
海底隧道	辽宁	123		铁路隧道		拟建
跨海大桥	大连	7		公铁两用隧道		
港澳海上通道	香港	36	沉管法			
海底隧道	珠海	16		公路隧道	400	BOT 拟建
跨海大桥	澳门	20	盾构法 钻爆法			

3 水下隧道设计施工技术特点

跨海隧道设计施工具有以下技术特点:a. 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。b. 饱和岩体强度软化,其应力降低,使围岩稳定条件恶化。c. 高渗透性岩体施工开挖所引发涌或突水(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十分困难。d. 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。e. 全水压衬砌与限压/限裂衬砌结构的设计要求高。f. 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。g. 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,同时缺乏系统的风险评估方法,给水下隧道施工风险管理带来了很大的困难。h. 长(大)跨海隧道的运营通风、防灾救援和交通监控,需要有周密的设计与技术保障措施。

4 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,有时根本不可能做到。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。

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(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、突水患的险情将加大,在辅助工法(如注浆封堵、各种预支护及预加固等^[1])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,隧道支护结构需大大加强,为施工带来不便,建设投资也相应需要增加。因此如何确定最优的覆盖层厚度是设计、施工的关键。

3) 隧道掘进方法与掘进设备。修建较长隧道的最佳方式一般趋向于采用钻爆法或硬岩隧道掘进机,在软弱不稳定地层中,由撑踏引起的局部应力可能造成岩层松弛而使围岩强度降低,此时多采用泥水式盾构机法。在足以承受撑踏压力的硬岩中通常选用开敞式硬岩掘进机,不宜采用双护盾掘进机和单护盾掘进机。硬岩隧道掘进机有较高的掘进速度,可缩短工期。

4) 衬砌荷载确定。水下隧道设计的另一个重要问题之一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(如青函水下隧道、直布罗陀水下隧道)会产生很高的静水压,衬砌上的荷载会很大。尽管这种荷载是均匀的,并不会引起弯矩,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是非常重要的。近期,从百年寿命考虑,采用增设二次钢筋混凝土衬砌是安全、可靠的方案。

5) 施工探水与治水技术。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。

6)地质超前预报技术。由于地勘资料的缺失和不足,水下隧道施工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。

7)耐腐蚀高性能海工混凝土。海洋大气和水环境使隧道衬砌钢筋混凝土长期受到含盐水质、生物、矿物质、高水压等的持续作用,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)都影响隧道的耐久性。采用不设或少设钢筋的素混凝土、合成纤维混凝土,保护层厚度 ≥ 7 mm 等方案可满足耐久性要求。

8)采用超大型盾构机长距离掘进设计与施工。超大型盾构机长距离掘进设计施工存在的问题有:a. 饱水松散砂性地层、高水压条件下,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。b. 长距离掘进,盾构机行进姿态的控制与自动化纠偏,以及行进中的刀盘检修,刀具更换,故障处理与排险。c. 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。此施工方法施工风险很大、盾构造价很贵,要慎用、少用。

9)深水急流海底沉管隧道设计施工关键技术。深水急流海底沉管隧道设计施工存在的问题有:a. 砂性土层、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。b. 受河床冲刷的沉管隧道顶板最小埋置深度,及对局部冲刷防护的设计施工。c. 该法一般不应用于对桥隧结合方案,人工岛设置的设计施工等。

5 水下隧道的修建方法

水下隧道主要有以下几种修建方法:a. 围堤明挖法。b. 钻爆法。c. TBM 全断面掘进机法。d. 盾构法。e. 沉管法。f. 悬浮隧道。其中第一种施工方法受到地质条件限制,不经常采用。而水中悬浮隧道现在还停留在研究阶段,目前还没有一项成功实例。水底隧道施工经常使用的方法有钻爆法、盾构法和沉管法。

5.1 钻爆法

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。20世纪40年

代,日本在关门海峡修建的水下隧道,是世界最早用钻爆法修建的水下隧道。世界闻名的青函水下隧道也是用钻爆法修建的。日本青函隧道穿过津轻海峡,全长 53.85 km,海底段长 23.3 km。作为世界上最长的水下隧道,水平钻探,超前注浆加固地层,喷射混凝土等技术在其上有巨大发展,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 100 多千米的水下隧道均采用钻爆法施工,最长的一座隧道为 4.7 km,最大水深达 180 m。国外钻爆法在水底隧道施工中的应用很多,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施工方面,除应用注浆法之外,还针对不同地质情况,成功采用了冻结法,并根据围岩条件有的隧道省略了二次混凝土衬砌。我国目前也在积极修建水底隧道,以缓解交通压力。基于多年山岭隧道和城市浅埋地铁隧道施工的经验及国外水底隧道成功经验,目前正在采用钻爆法和浅埋暗挖法修建厦门翔安水下隧道以及青岛至黄岛水下隧道,还有些隧道正在商议拟建中。

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。钻爆法修建水底隧道有以下几项技术难点^[2~5]: a. 通过深水进行海底地质勘测比在地面的地质勘测更困难、造价更高,而且准确性相对较低,遇到未预测到的不良地质情况风险更大。因此,在隧道施工时必须进行超前地质预报。b. 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和涌水点的预测、预报和提前整治。c. 水下隧道的单口掘进长度很大,从而对施工期间的后勤和通风有更高的要求。d. 很高的孔隙水压力会降低隧道围岩的有效应力,造成成拱作用和地层的稳定性较低。e. 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。f. 衬砌结构长期受较大的水压作用,必须将一次支护做好承受全部水压,二衬只承受水压的施工技术。g. 由于单口连续掘进的距离很长,导致工期较长,财政投资很高,因此必须采用快速掘进设备。采用小直径 TBM (tunnel boring machine)(直径小于 5 m)超前,后部钻爆法扩大是既快、又便宜、安全的施工方法。大断面 TBM 掘进机造价贵、风险大,不宜采用^[6~9]。

5.2 盾构法

盾构法也是修建水底隧道的一种重要施工方

法,尤其是在软土地层中^[10]。自1843年第一条盾构法隧道在伦敦泰晤士河下建成以来,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。世界著名的英法海峡隧道,日本的东京湾隧道都是用盾构法施工的水下隧道。我国在20世纪50年代就开始研究盾构法施工,1962年用气压盾构法采用铸钢管片+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。目前用盾构法建造的水下隧道案例很多。

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。但盾构掘进机构筑的隧道断面形式和线型受限,灵活度不大,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;在隧道掘进中途须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。国内外部分已建成的大直径盾构隧道,如表5所示。

表5 国内外部分已建成的大直径盾构隧道

Table 5 List of some large diameter shield tunnels in China and abroad

名称	长度/km	埋深/m	盾构外径/m	水压/MPa
日本东京湾公路隧道	9.5	50~60	14.14	0.6
荷兰 Westerschelde 隧道	6.6	60	11.33	0.65
武汉长江第一隧道	2.7	12~30	11.4	0.6
丹麦大带桥海底盾构隧道	7.41	55	8.78	0.6
中国上海大连路隧道	1.275	30~50	11.22	0.4

水底盾构隧道与一般陆地地铁、市政管线盾构隧道相比,自身有其以下特点。a. 建设难度大。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,施工难度较大。b. 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。海中盾构隧道设计包括人工岛的结构及功能,满足桥隧转换功能和环保要求。c. 海底盾构隧道需着重考虑隧道抗浮、管片耐久性、防水、抗渗等关键技术

设计、施工及效果评估。目前在管片内再增设混凝土衬砌对抗运营风险很有好处,狮子洋铁路隧道已增加。d. 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、防灾等因素。e. 环境影响评价、风险性评估也是海底盾构隧道建设的突出特点。f. 海底盾构隧道具有良好的防御自然灾害和战争破坏的功能。

5.3 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,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、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、排水等使用。如图1所示。

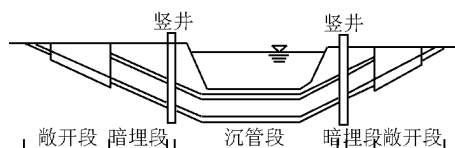


图1 沉管隧道纵断面示意图

Fig. 1 Sketch map of immerse tunnel's vertical section

沉管隧道自1910年在美国首次兴建以来,长盛不衰。世界各国,特别是美国、荷兰、日本等几个国家在沉埋技术领域有了长足的进展。我国大陆建成的有广州珠江、宁波甬江和常洪、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。表6为国内外部分沉管隧道的建设规模和关键技术。

沉管法水下隧道施工有以下优越性:

1)地质条件。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。钻爆法与盾构法隧道则对地质条件的要求相对较高。

2)隧道埋深。沉管隧道的埋深只要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在1倍隧道洞径以上;钻爆法隧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,运营条件也相对较好。

表6 国内外部分沉管隧道的建设规模和关键技术

Table 6 Scales and key techniques of some immerse tunnels in China and abroad

隧道名称	地点	完工年份	宽/m × 高/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
迪斯岛隧道	加拿大	1959	23.8 × 7.16	104.9	6	629		喷砂	双方驳自抬式	半横向
旧金山海湾地 铁隧道	美国	1970	14.58 × 6.55	58	111	5 825	柔性	先铺刮平	双方驳自抬式	活塞效应
弗拉克隧道	荷兰	1975	29.8 × 8.0	125	2	250		砂流法	浮筒吊沉	纵向
东京港公路隧道	日本	1976	37.4 × 8.8	115	9	1 035	柔性	注浆基础	双方驳自抬式	半横向
高雄跨港隧道	中国	1984	24.4 × 9.35	120	6	720	柔性	砂流(掺40% 颗粒水泥)	双驳船	纵向
古尔堡海峡隧道	丹麦	1988	20.6 × 7.59	230	2	460	柔性	喷砂		纵向
埃姆斯河隧道	德国	1989	275 × 8.4	127.5	5	639.5	柔性	喷砂	浮筒沉放	纵向
香港东区隧道	中国	1990	35.0 × 9.8	122 ~ 128	15	1 859	柔性	砂流法	双方驳自抬式	全横向
珠江隧道	中国	1993	33.0 × 8.15	22 ~ 120	5	457	柔性	砂流法	单起重船	全横向
上海市外环线隧道	中国	2003	43.0 × 9.55	100 ~ 108	7	736	柔性	砂、水泥熟料混 合灌砂	浮箱吊沉	纵向
香港西区隧道	中国	1997	33.4 × 8.57	113.5	12	1 363.5				
厄勒海 峡隧道	丹麦 瑞典		42.0 × 8.5	178	20	3 560	柔性	碎石刮平		
甬江隧道	中国	1995	11.9 × 7.5	80 + 4 × 85	5	420	柔性	抛石回填压浆	吊沉	
常洪隧道	中国	2002	22.8 × 8.45	95 ~ 100	4	395	柔性	预制砼桩、 灌浆囊袋	浮箱吊沉	纵向
川崎港隧道	日本	1980	31.0 × 8.8	100 ~ 110	8	840	刚性			

3) 防水性能。沉管的管段每节长一般在 100 m 以上,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,因此管段的防水性能是完全有保证的。同时管段接头处采用 GINA 和 OMEGA 两道橡胶止水带,并已经过工程实践的验证,管段之间的连接完全可以做到“滴水不漏”。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、防水等各种措施,但保证隧道不发生渗漏仍然相当困难。钻爆法施工的隧道,由于施工工艺自身的限制,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。钻爆法隧道的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;施工难度与风险很大,尤其是在水底条件下盾构法施工的隧道断面越大,则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。沉管隧道可根据使用功能需要确定断面大小,基本无大小限制。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。此外,沉管隧道可根据需要改变断面,且断面利用率较高。而钻爆法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;盾构隧道受到的盾构机

制约一般为圆形,如采用异形断面,则盾构机需要专门订购加工,工程成本增加更多。

5) 作业环境。采用盾构法及钻爆法修建隧道时,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法隧道多,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,使得沉管隧道在施工组织上,时间、空间、人员的安排及工期上有较大的优越性和灵活性。

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圪工量较大,比钻爆法一般要贵 20% ~ 30%。

8) 航运干扰。沉管隧道在浮运、沉放、对接阶段将对航道产生一定影响,某些地区需要采取封航措施才能保证施工的顺利进行。而盾构隧道和矿山法隧道则对航道没有任何干扰。

6 悬浮隧道

悬浮隧道(submerged floating tunnel, SFT)是通过水的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2所示。该结构已经有几十年的研究历史,目前还没有成功案例。

悬浮隧道结构在技术上具有以下特点:a.对结构物周围的环境影响很小。b.全天工作,不受大江或海峡的风浪、大雾的限制。c.因为悬浮隧道一般的坡度可以比桥梁方案平缓,与桥梁方案相比,汽车能量的消耗较小。d.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,采用悬浮隧道技术比其他的解决方案可能更具有竞争力,作为临时隧道、观光隧道很有推广价值。

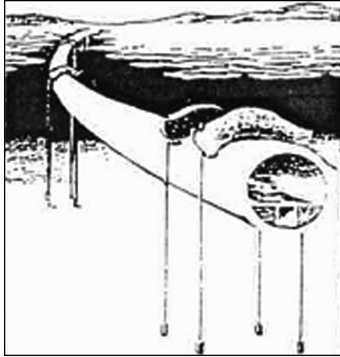


图2 悬浮隧道示意图

Fig.2 Sketch map of submerged floating tunnel

7 结语

1)水下隧道穿越江河湖海方面具有综合的优势,体现在:具有抵抗战争破坏和自然灾害的能力;不干扰航务设施;不受气候变化的影响,有稳定畅通无阻的通行能力;具有很强的超载能力,不受设计荷载的限制;结构耐久性好,结构维护保养费用低;建设时钢用量比桥梁少,造价更低;不拆迁或少拆迁,占地少,不破坏环境,从而降低建设成本;设计可以

做到一洞多用;对生态环境影响小,能避免噪声尘土对周围环境的影响。

2)水下隧道施工方面存在较多难题,具体包括:勘察难度高,投资大,风险大;在高水压下施工探水和治水困难;海上竖井布设难度高;衬砌设计要求高;施工环境复杂,风险高。

3)水下隧道施工方面的关键技术主要包括:海床综合勘探,最小埋置深度确定,隧道掘进方法与掘进设备选择,衬砌荷载确定,施工探水与治水技术,地质超前预报技术,耐腐蚀高性能海工混凝土,深水急流海底沉管隧道设计施工关键技术等。

参考文献

- [1] 卓越. 动水中、细砂层渗透注浆机理探析[J]. 岩土工程技术,2002,5:84-89
- [2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖法技术通论[M]. 安徽:安徽教育出版社,2004
- [3] 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
- [4] 王梦恕. 隧道及地下工程技术及其发展[M]. 北京:北方交通大学出版社,2004
- [5] 王梦恕. 大瑶山隧道——廿一世纪隧道修建新技术[M]. 广东:广东科技出版社,1994
- [6] 王占生. TBM在不良地质地段的安全通过技术[J]. 中国安全科技学报,2002,4:55-59
- [7] 谭忠盛. 复线隧道施工爆破对既有隧道的的影响分析[J]. 岩土力学与工程学报,2003,2:81-85
- [8] 李治国. 圆梁山隧道2#溶洞施工技术[J]. 隧道建设,2004,5:28-30
- [9] 杨小林. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J]. 爆破与冲击,2001,2:111-116
- [10] 洪开荣. 盾构隧道穿越广州火车站站场设计与施工[J]. 现代隧道技术,2002,6:34-37

Design and construction technology of underwater tunnel

Wang Mengshu

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] It is briefly introduced that when passing over or crossing rivers, lakes and seas, underwater tunnel construction method is preferred to be adopted for its summed advantages. The survey of design and construction, key construction technology and frequently-used construction method of underwater tunnel are also discussed in this article.

[Key words] underwater tunnel; design; construction