

国内外水下隧道修建技术发展动态及其对渤海海峡跨海通道建设的经验借鉴

宋克志^{1,2}, 王梦恕³

(1. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200090;

3. 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:基于对国内外越江、跨海通道的调查分析及对比, 论述了国内外水下隧道修建技术的发展动态, 及其对渤海海峡跨海通道建设的经验借鉴。从水下隧道的主要成就、施工方法及断面形式论述了国内外隧道的发展现状, 比较分析了各种施工方法的特点及其水下隧道中的应用; 从地质勘探、设计及施工三个方面分析了水下隧道的优越性、设计和修建的关键技术及应注意的相关问题; 最后, 就前期准备、工程理念、总体规划、方案及施工等方面, 分析了一些对渤海海峡跨海通道建设值得考虑和借鉴的经验。渤海海峡跨海通道建设必须未雨绸缪、及早准备、详细勘探、周密安排, 规划、设计应按照安全、可靠、适用、经济、先进的次序进行。

关键词:水下隧道; 渤海海峡跨海通道; 修建技术; 发展动态

中图分类号: U459.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2009)02-0182-06

跨海大桥、海底隧道等现代海洋通道的出现, 到现在不过是 150 多年的历史。这在历史长河中可能只是沧海一粟, 但对于跨海通道的发展来说, 却经历了一个波澜壮阔的历程。从 19 世纪初拿破仑的英法海底隧道梦想, 到 20 世纪初美国金门大桥的设计, 以海底隧道和跨海大桥为代表的跨海通道, 在世界各地以前所未有的速度发展。二战后, 随着经济和社会的高速发展, 对跨海通道建设不断提出了新的更高的要求, 世界跨海通道发生了一次又一次的飞跃, 带给世人一次又一次的惊喜。各种各样的跨海通道, 将五大洲、四大洋越来越多的地区连在了一起。世界从来没有像现在这样, 让人感觉距离越来越近。在 21 世纪里, 世界经济、科技发展将达到一个前所未有的高度, 而跨海通道的发展也必将进入一个全新的时期。渤海海峡跨海通道是一项跨世纪的宏伟工程, 开辟渤海海峡跨海通道对于疏通我国南北交通、促进经济发展将具有重要的战略意义。作者不揣浅陋联系国内外水下隧道建设的经验和教训, 期望对渤海海峡跨海通道的建设能起到一点推动作用和借鉴意义。

1 国内外水下隧道修建技术发展动态

1.1 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^[1-5], 挪威所建隧道占大多数。其中, 国外著名的长、大跨海隧道(按长度)有: (1) 日本青函海峡隧道(长 53.86 km); (2) 英吉利海峡隧道(长 50.5 km); (3) 日本新关门铁路隧道(长 18.70 km); (4) 日本东京湾海底隧道(长 9.1 km); (5) 丹麦斯特贝尔海峡隧道(长 7.9 km)。近年来, 在酝酿之中的长大海底隧道还有英吉利海峡第二条隧道、连接欧非的直布罗陀海峡隧道、连接日本和韩国的日韩海底隧道、连接美俄的白令海峡隧道等。

我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: 武汉长江第一隧(长 3.7 km)、中国第一条跨海隧道——厦门翔安海底隧道(长

收稿日期: 2009-03-17; 修回日期: 2009-05-08

基金项目: 国家社科基金特别委托项目(2007@ZH005)

作者简介: 宋克志(1970—), 男, 山东济宁人。副教授, 博士, 同济大学博士后, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: songkezhi@ldu.edu.cn; 王梦恕(1938—), 男, 河南温县人。教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为隧道与地下工程, E-mail: wm32730@263.net

5.9 km)、青岛胶州湾海底隧道(长 6.17 km)、南京长江隧道(长 6.0 km)、上海崇明越江隧道(长 8.95 km)以及狮子洋海底铁路隧道(长 10.8 km)等。这些已建的跨海隧道对中国类似工程建设具有重要的借鉴意义。拟建的水下隧道有:琼州海峡跨海工程、渤海海峡跨海通道工程、杭州湾(上海—宁波)跨海工程、大连湾水下隧道以及港珠澳海底隧道和台湾海峡跨海隧道(实施尚有待时日)等。

1.2 水下隧道修建方法

水下隧道的主要修建方法有以下几种: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^[1,4,6-8]。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,目前尚无成功实例。水下隧道施工经常使用的方法有钻爆法、盾构或掘进机法和沉管法。

1.2.1 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^[1-3,9]。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(图 1)。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。采用钻爆法施工挪威已建成了约 100 km 的水下隧道,其中最长一座隧道为 7.90 km,位于海平面下 264m。挪威采用钻爆法修筑水下隧道的技术发展

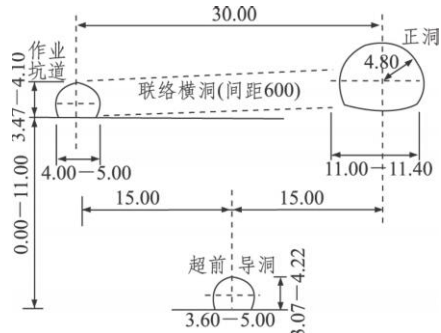


图 1 日本青函海底隧道横断面图(钻爆法)

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。

1.2.2 盾构法

盾构法最初是用于在软土地层中,随着加压方式和刀盘、刀具型式的创新,盾构法也在岩石地层中得到成功应用,如英吉利海峡隧道(图 2)、丹麦斯特贝尔海峡隧道(图 3)、日本东京湾海底隧道、德国易北河水下隧道、新加坡 DTSS 污水隧道及我国广州地铁隧道、重庆越江排水隧道等。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,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公路隧道,近 10a,又在黄浦江底用盾构法修建了 6 条公路隧道。目前我国用盾构法建造大型水下隧道有:即将完工的武汉长江第一隧道、南京长江隧道、上海崇明越江隧道、狮子洋海底铁路隧道、南水北调中线穿黄隧道等。因此,盾构法在各类水下地层中都有广泛的应用前景。

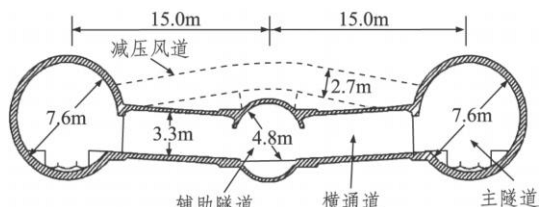


图 2 英吉利海峡隧道横断面图(盾构法和 TBM 法)

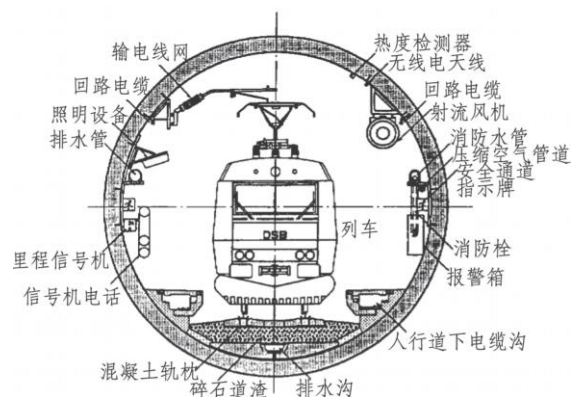


图 3 丹麦斯特贝尔海峡隧道横断面图(盾构法)

1.2.3 沉管法

沉管法是在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成隧道。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。自 1910 年在美国首次兴建沉管隧道以来,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。我国香港

已建成的五座越海隧道及台湾高雄的跨海隧道也都采用的是沉管隧道。国内建成的有广州珠江、宁波甬江和常洪以及上海外环线沉管隧道(规模位居世界第二位)。

1.2.4 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。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。

2 水下隧道的优越性及其设计修建关键技术分析

2.1 优越性

虽然水下隧道存在防水、通风等安全问题,但在维护航运交通、保护水环境和沿岸生态平衡等方面,具有明显的优越性,主要表现在^[10-11]: 1) 不受设计荷载限制和气候变化影响,超载能力强和全天候通车; 2) 对环境景观和生态平衡影响小,能避免噪声、尘土对周围环境影响,对其它运输无干扰作用; 3) 结构耐久性好,维护保养费用低,抗战争破坏和自然灾害能力强; 4) 易于“一洞多用”可建成供电、供水、供油、供气、输液和通讯等多功能隧道。

2.2 设计修建关键技术分析

1) 基岩工程地质与综合地质勘察 修建水下隧道时,在深水 and 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^[1,9,12]。

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安全和造价。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,应根据岩石条件、稳定要求、渗水量及经济性等进行充分论证^[1,12-13]。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(>50m)在未风化的岩石内。

3) 衬砌承受高水压、大荷载 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^[1,3,9]。而在挪威,海底隧道的衬砌都按排水结构设计,而不承受外水压力^[13]。

4) 海底隧道衬砌防水、防腐要求高 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)而影响其耐久年限。因此,高性能、高抗渗衬砌结构的耐久性与混凝土配置工艺及洞内装修、机电设施等的防潮去湿要求严格。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7cm等方案可满足海底隧道衬砌结构耐久性要求。

5) 海底隧道衬砌结构选型 影响隧道衬砌结构型式选择和支护参数设计的主要因素有:隧道使用类型、工程地质和水文地质条件、施工方法等^[14]。埋深大的海底隧道外水压力也大,全封堵隧道宜采用圆形衬砌结构型式;盾构或TBM掘进机适合圆形衬砌结构型式;钻爆法适合各种衬砌结构型式;沉管法一般适用于矩形衬砌结构型式。公路和铁路海底隧道常采用的衬砌结构型式有:马蹄形、椭圆形和圆形。常用的支护方法有注浆、锚杆、喷射混凝土、钢拱架、二次衬砌等单一支护或各种方法联合支护。由于隧道地质复杂性,目前还没有一种非常精确的计算理论和方法。海底隧道设计中常采用工程类比法初步设计,再用荷载结

构法、地层结构法进行验算和优化。解析法只适用于较简单的边界条件和几何形状,所以用得较少。

6) 超前地质预报与防突水、涌水技术 由于地质勘探资料的不足,加之开挖施工对海底水文地质的动态扰动,水下隧道施工时高压突水、涌砂、涌泥等事故时常发生,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。

7) 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、防灾救援功能及运营效益。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。

8) 海底隧道施工方法选择 英吉利海峡隧道、东京湾海底隧道、斯特贝尔海峡隧道、我国南水北调穿黄隧道、武汉长江隧道、南京长江隧道、崇明越江隧道、黄浦江绝大多数隧道等采用盾构法施工;日本的青函海底隧道及新关门海底隧道、我国厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道等均采用钻爆法开挖。其中,钻爆法最经济、灵活,安全风险易控制,适用于各种不同的岩石条件。在恶劣的岩石条件下,如断层、破碎带,需要采用精心设计的施工方法及辅助工法通过^[1,13];盾构法施工适用于软弱富水地层;沉管法在特殊情况下采用,因为其工程造价最高^[1,9,13]。在挪威,所有海底隧道均采用钻爆法施工,考虑到渗水问题,不采用 TBM 掘进。具体选择哪种方法,应学人之长,为我所用,结合地质资料,综合比较,得出最优方案。

9) 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,不宜采用双护盾掘进机和单护盾掘进机^[1]。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,已在辽宁大伙房供水工地 87 km 长的隧道中推广应用。但在软弱不稳定地层中,围岩无法提供撑靴的摩擦力,以采用泥水加压式盾构机或复合式盾构机施工为宜。

10) 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^[12]:(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、漏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(>12m)盾构机造价很贵,要慎用、少用。

11) 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应注意^[12]:(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。

3 对渤海海峡跨海通道建设的借鉴

3.1 坚持的科学理念

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,然而修建像渤海海峡隧道这样一个大型水下工程,需要坚持科学的理念^[1,15]:

1) 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) 跨海隧道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。可靠的成熟技术可以大大减少工程建设风险,而未经大量实践检验的新技术会增加工程建设的风险和投资风险。在我国当前对高、新技术的呼声十分高涨和普遍的情况下,应对可靠技术与先进(或创新)技术进行理性的分析和评判,不应脱离国情实际,片面追求“世界上最先进的设备和技术”。这是大型海底隧道决策和建设需要面对的重大问题!

4) 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。

3.2 渤海海峡隧道项目应及早打算、周密安排

人类用水下隧道穿越海域的思想始于 19 世纪的欧洲拿破仑时代,英吉利海峡隧道自 1800 年曾两次动工开挖后又停了下来,酝酿了近两个世纪,准备和施工历时 7a 之多。日本从二战前就开始了青函海底隧道的准备工作,从开工到完成,历时 24a。琼州海峡跨海通道经过多年酝酿,在广东省交通厅和湖南省交通厅的联合主持下,于 1996 年完成了预可行性研究。渤海海峡跨海通道是一项投资规模巨大、风险程度高、技术难度大、建设周期长的工程,必须及早打算,未雨绸缪。

1) 应及早进行地质勘探,应充分、详细,特别是断层和软弱带的确定。地质勘探工作对海底隧道建设尤为重要,地质工作做得充分,才能找到较优的线型方案、施工方案,并降低后期施工和运营风险。英吉利海峡隧道的地质勘探工作长达 29a 之久,日本青函海底隧道的地质调查不够充分、详细,施工中为此付出了惨重的代价。

2) 应从线位和线形、线数和断面、附属及运营设施、两端接线方案、建造方式等方面对海底隧道工程方案进行比选,提出建议。隧道选线主要指的是垂直线路,垂直线路的主要问题是岩石覆盖厚度,这是海底隧道最重要的参数之一。

3) 应从断面设计、施工方法、经济性、交通路网规划、运输方式、隧道内外环境、通风、救援及逃生等方面进行综合、充分、合理地论证,确定是

采用铁路隧道还是公路隧道。世界著名的长、大海底隧道工程实例和经验^[1]证明:隧道长度大于 20 km 的应采用铁路隧道方案,电力牵引,这样可长距离不设通风竖井、环境污染小、运营安全、风险小、运营费低,汽车可以坐火车跨越海峡。且渤海海峡跨海通道采用铁路隧道方案符合我国铁路“十五”规划“八纵八横”的要求。

而公路隧道所需的运营通风、照明及监控设施等都高于铁路隧道,海中建造竖井的难度大,费用昂贵,后期运营费用高。不可忽视的是,驾驶员驾车在长距离公路隧道中行驶,有可能产生严重的心理问题。

3.3 渤海海峡隧道修建的重点和难点

1) 工程项目融资、管理及运营。渤海海峡跨海通道的投资是惊人的,融资方式、投资核算、效益分析(包括经济效益和社会效益)是有相当难度的,而且往往是不准确的,必须高度重视。

2) 渤海海峡跨海通道是一项高风险的水下工程,存在较高的风险源,建设过程中需要对规划、设计、施工、运营 4 个阶段进行安全、风险分析。

3) 海洋地质勘探特别是深槽海洋地质勘探的难度高、投入大,漏勘与情况失真的风险程度大。

4) 饱和岩体强度软化,其有效应力降低,使围岩稳定条件恶化。

5) 高渗透性岩体施工开挖所引发涌水、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。

6) 海上施工竖井布置难度高,致使独头单口掘进的长度加大,施工技术难度增加。

7) 全水压衬砌与限压、限裂衬砌结构的设计要求高。

8) 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。

9) 隧道的运营通风、防灾救援及逃生和交通监控设施,需要有周密设计与技术保障措施,对长、大隧道尤为关键。

4 结语

在对国内外水下隧道充分调查和分析的基础上,讨论了国内外水下隧道特别是大型海底隧道

修建技术的发展现状及关键技术,从地质勘探、设计及施工三个方面分析了水下隧道的优越性、设计和修建的关键技术及应注意的相关问题。从前期准备、工程理念、总体规划、方案及施工等方面考虑,对渤海海峡跨海通道的建设提出了一些值得借鉴的经验和理念。渤海海峡跨海通道建设必须未雨绸缪、及早准备、详细勘探、周密安排。这项巨大工程的前期研究、规划、建设以及关键技术的研究,无疑将大大推动我国隧道工程尤其是水下隧道工程技术的进一步发展,同时,也是对我国隧道工程技术人员的巨大挑战!希望本文的讨论对渤海海峡跨海通道乃至其他大型水下隧道的建设能有所裨益。

参考文献:

- [1] 王梦恕.水下交通隧道发展现状与技术难题[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2161—2172
- [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.
- [3] 王梦恕.台湾海峡海底铁路隧道建设方案[J].隧道建设,2007,27(3):517—526
- [4] 宋克志,王梦恕.烟大渤海海峡隧道的可行性研究探讨[J].现代隧道技术,2006(6):1—8
- [5] 柳新华,刘良忠,侯鲜明.国内外跨海通道发展百年

- 回顾与前瞻[J].科技导报,2006,24(11):78—89
- [6] 谭忠盛,王梦恕,张弥.琼州海峡铁路隧道可行性研究探讨[J].岩土工程学报,2001,23(2):139—143
- [7] 谭忠盛,王梦恕,杨小林.海底隧道施工技术及其琼州海峡隧道方案的可行性[J].焦作工学院学报,2001.
- [8] 崔玖江.隧道与地下工程修建技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [9] 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
- [10] 艾齐.水下公路隧道概述及相关技术问题[J].交通建设与管理,2007(1):46—48
- [11] 董国贤.论水下隧道抗灾的生命力与优越性[J].地下空间,2001,21(2):117—120
- [12] 孙钧.海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1513—1521.20(4):286—291.
- [13] 吕明,Grønv E,Nilsen B,Melby K.挪威海底隧道经验[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4219—4225.
- [14] 李术才,徐帮树,李树忱.海底隧道衬砌结构选型及参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3895—3903.
- [15] 郭陕云.关于我国海底隧道建设若干工程技术问题的思考[J].隧道建设,2007,27(3):1—5.

Current Construction Technologies Developments of Underwater tunnels and Its Experiences for Bohai Strait Tunnel

SONG Ke-zhi^{1,2}, WANG Meng-shu³

(1. College of Civil engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on investigating, searching and comparing for the passages across rivers and straits, some developments of construction technologies for underwater tunnels are discussed. The developments of underwater tunnels such as main achievements, construction methods and cross section types are introduced; characteristics of construction methods and their applications are also compared. Generalizing experiences and lessons of underwater tunnel in the world, the advantages of underwater tunnel are given. The difficulties, key technologies and remarkable issues in geologic survey, design and construction are analyzed in detail. Finally some valuable experiences for Bohai strait channel are summarized including prior preparing, engineering concepts, general planning, and design scheme and construction issues. The giant engineering must be thought ahead, prepared earlier, surveyed detailed and arranged well. The planning and design of the engineering should be carried out according to the sequence of safety, reliability, applicability, economic efficiency and advance.

Key words: underwater tunnel; Bohai Strait channel; construction technologies; developments

(责任编辑 李少兰)