

渤海海峡跨海隧道方案研究

谭忠盛,王梦恕

(北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044)

[摘要] 渤海海峡固定式跨海工程是国家铁路网和高速公路的重要组成部分,跨海通道建成后将取代现有的轮渡运输方式,满足不断增长的交通运输的需求,并会进一步加快环渤海经济圈的发展以及东北老工业基地的振兴。在研究渤海海峡的气象、水文、地质等建设条件的基础上,对桥隧工程方案及隧道线位方案进行了初步比选分析,认为渤海海峡跨海工程宜采用全隧道方案,并且旅顺-蓬莱的隧道连岛线位方案较优,在对该线位浅埋隧道和深埋隧道比较后认为采用深埋方案较优。由于公路隧道存在诸多技术难题,以及工程造价和运营成本都很高,因此,把铁路隧道方案作为首选方案,汽车可通过穿梭列车背负式通过隧道。

[关键词] 渤海海峡;跨海工程;铁路隧道;初步方案

[中图分类号] U459.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742-(2013)12-0045-07

1 前言

渤海海峡是辽东半岛与胶东半岛之间的峡湾海域,是渤海与黄海的天然分界线。海峡西面与渤海相连,东面与黄海毗邻。庙岛群岛呈一字形分布在渤海海峡的中部和南部,形成船舶可航行的水道以及和外海域相连的通航航门;渤海海峡两端最短距离约 106 km,位于旅顺与蓬莱之间。海峡地层岩性主要为浅变质岩系,新生代地层为第三系和第四系,工程地质条件较好;主要断裂带有北北东向、北西向和东西向,庙岛群岛距主要发震的糜庐断裂带约 40 km。渤海海峡气温变化有明显的“大陆性”,海峡历年平均气温为 11.9℃,最高年为 12.8℃,最低年为 10.7℃,极端最高气温 36.5℃,极端最低气温 -13.3℃;海峡地处风道,属台风影响区,平均大风日 67.8 d,全年大风日冬季最多,平均 23.4 d,春秋两季平均 19 d,夏季最少,平均 6.6 d;最大风速出现在 1985 年 8 月 19 日的 9 号台风中,为 40 m/s;海峡还时常出现持续时间较长的连续大风,最长可出现持续 18 d 的连续大风过程^[1]。

渤海海峡跨海通道的前期方案分析研究工作十分重要,方案的制定除必须考虑技术及经济条件外,更重要的是密切结合海峡自然条件及地质条件,并考虑国防军事等因素,以保证其长久发挥交通咽喉的重要作用。

2 跨海通道形式初步比选

渤海海峡跨海通道形式可选择:全桥梁方案、全隧道方案、南桥北隧方案 3 种。

2.1 全桥梁方案

目前世界上所采用的大跨度桥梁主要为斜拉桥和悬索桥两种形式。斜拉桥的跨径集中在 200~1 000 m,以 200~600 m 最多。在现代铁路斜拉桥中,绝大多数是公铁两用斜拉桥,如郑州黄河公路铁路两用大桥、芜湖长江大桥和武汉天兴洲公铁两用长江大桥等,最大跨度 1 008 m。悬索桥跨度较大,目前世界上跨度超过 1 000 m 的桥梁有 20 余座,在建的意大利墨西拿海峡桥跨度为 960 m+3 300 m+810 m^[2]。

渤海海峡跨海通道的全桥梁方案如图 1 所示。

[收稿日期] 2013-11-04

[作者简介] 谭忠盛(1963—),男,广西蒙山县人,教授,博士生导师,研究方向为隧道及地下工程设计、施工新技术;

E-mail: zstan@vip.sina.com

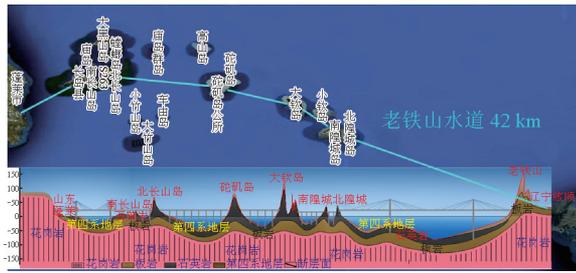


图1 渤海海峡通道的全桥梁方案(单位:m)
Fig.1 Cross Bohai Strait by bridge (unit:m)

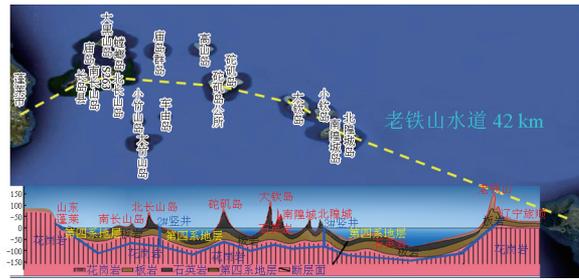


图2 渤海海峡通道的全隧道方案(单位:m)
Fig.2 Cross Bohai Strait by tunnel (unit:m)

跨海桥梁的主要优点:a. 除在水深大、桩基深的情况,其他情况的施工技术较为成熟,可以多点施工,建设周期较短;b. 避免长隧道方案的通风、防渗和防灾等难题;c. 跨海大桥与跨海隧道相比,地质条件对其控制影响相对较小,可跨越不良地质地段;d. 便于庙岛群岛的居民出行。

跨海桥梁的主要缺点:a. 由于渤海海峡经常会遇到台风、暴雨及大雾等天气,跨海大桥需关闭或限速,其功能将受到较大影响;b. 由于海峡水深大,并受通航的影响,桥梁需要解决大跨度、高桥墩等技术难题;c. 渤海海峡属地震多发区,对大桥的结构抗震要求高;d. 桥梁抵抗战争和自然灾害的能力相对弱,且恢复困难;e. 由于桥梁要穿越老铁山水道,对通航影响大,并且对海洋及岛屿环境、蓬莱阁及海市蜃楼奇观影响较大,当地居民也不同意修建桥梁。

2.2 全隧道方案

世界上已修建了许多海峡隧道^[3-9],如日本20世纪40年代在关门海峡修建的关门隧道,是世界上最早的海峡隧道;1974年日本又建成了新关门铁路隧道;1988年日本在津轻海峡建成了迄今世界上最长(53.9 km)的海峡隧道——青函隧道;英法海底隧道于1993年全部贯通;挪威先后建成了十几座海底隧道。我国至今也修建了十几座水下隧道,如宁波、广州、上海、南京等,以及厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道、狮子洋隧道等。正在规划设计的海底隧道、海峡隧道也非常多,这些都为渤海海峡隧道的研究提供了经验。

渤海海峡跨海通道的全隧道方案如图2所示。

相比桥梁方案而言,海底隧道的优点在于:a. 可以全天候运营,不受恶劣气候影响,如台风、暴雨、大雾等天气的影响;b. 各海峡地区的航运一般为自由航行,航道较宽,而隧道深埋于地下,运营期间对水上的航运无影响;c. 隧道深埋于地下,海上洋流、

黑潮等对隧道运营不造成影响;d. 隧道抗震性能好,抵抗战争破坏能力强;e. 隧道附近可新建其他通道,不影响通道资源的利用;f. 隧道结构耐久性好,且结构维护保养费用一般比桥梁低;g. 隧道引线比桥梁短,易于和两端交通接线,形成路网,且占地少;h. 对海洋环境及岛屿环境影响小。

但是隧道方案也存在以下缺点:a. 运营风险较大,主要表现在运营通风困难和灾害条件下的逃生疏散救援困难;b. 虽主体结构采用钢筋混凝土结构,土建工程养护、维修量小,但机电设备系统(通风、照明、排水、消防等)的维护与使用成本较高,特别是电费较高;c. 隧道内空间狭小,灾害处理相对困难;d. 海峡隧道地质勘察难度大,施工中不确定性因素相对较多;e. 不方便庙岛群岛居民的出行。

2.3 南桥北隧方案

从渤海海峡的地形特征来看,庙岛群岛一字形呈南北方向分布于海峡中、南部,由南至北有南长山岛、北长山岛、高山岛、砣矶岛、大钦岛、小钦岛、南隍城岛、北隍城岛等,再往北就是老铁山水道,是渤海海峡的主要航道。因此,可利用这些岛屿缩短桥梁的长度。在庙岛海峡、长山水道、石侯矶水道、高山水道、南砣矶水道、北砣矶水道、大钦水道、小钦水道上架起一座座桥梁,把南部各岛屿连在一起,既经济又方便,这就是南桥段。庙岛群岛最北部的北隍城岛再向北就没有岛屿了,中间隔着老铁山水道与旅顺相望。这里的水道太宽,长达42 km,如果用桥梁跨越这段距离,需要建造许多人工岛及深水桥墩。更重要的是,渤海海峡是环渤海各大港口的出海口,需要充分考虑将来大型船只的通过,桥身太低了不行,桥身过高又使工程难度加大。因此,要想架设桥梁,在目前的技术条件下还很困难,建设海底隧道是较理想的方案,故称北隧。

海峡跨海通道的南桥北隧方案如图3所示。

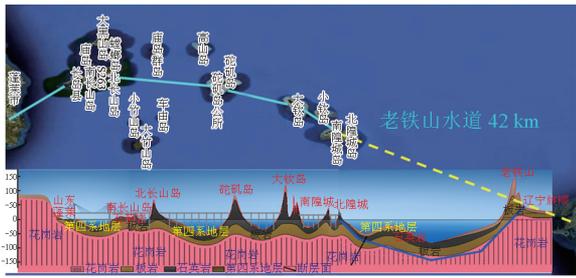


图3 渤海海峡通道的南桥北隧方案(单位:m)
Fig.3 Cross Bohai Strait by "south bridge and north tunnel" (unit:m)

相比较全桥梁和全隧道方案,南桥北隧方案的主要优点在于:a. 利用隧道穿越老铁山水道,不影响航道通航;b. 穿越老铁山水道的隧道长度不到50 km,大大减小了建设、运营通风及防灾的难度;c. 利用岛屿条件,缩短了桥梁长度,大大减小了建设难度;d. 施工技术成熟,建设周期较短;e. 便于庙岛群岛的居民出行。

虽然南桥北隧方案综合了全桥梁和全隧道方案的某些优点,但也存在全桥梁和全隧道的所有缺点:a. 台风、暴雨、大雾等恶劣气候,对桥梁使用影响较大,不能全天候运营;b. 结构和强度要求较高,对抗风和抗震要求较高;c. 对海洋及岛屿环境、蓬莱阁及海市蜃楼奇观影响大;d. 老铁山水道水深大,地质勘察难度大,施工不确定性因素较多;e. 庙岛群岛居民同样不支持此方案。

经过初步分析,建议采用全隧道方案作为跨越渤海海峡的较优方案。

3 公路隧道与铁路隧道方案比选

渤海海峡跨海通道方案必须能同时满足铁路运输和公路运输的要求。汽车过海的隧道方式主要有公路隧道、汽车背负式运输铁路隧道、公铁合建隧道(隧道内设置双层通道,分别布置铁路及公路)三种。

如果采用公铁合建隧道,则隧道直径将达到19 m(双车道公路+单线铁路),而目前世界上最大直径的盾构机仅为15.43 m,盾构机或tunnel boring machine(TBM)掘进机的设备制造难度极大,施工风险巨大,并且公路与铁路对最大纵坡、最大纵向通风的距离也不一样,因此不推荐此方案。

因为通风的问题,水下公路隧道在长度规模上远不及水下铁路隧道,如果让汽车直接行驶通过隧道,必须扩大隧道断面,增加通风设备,并在海峡中

间修建多个人工岛用作通风竖井,如日本的东京湾海底公路隧道(长9.5 km),这样势必使施工难度更大,并大量增加工程造价和运营时的通风费用。此外,还要增加照明、监控、防灾等一系列运营费用。而且汽车在超长公路隧道内连续行驶,驾驶员容易产生紧张感和疲劳感,事故率远远高于铁路隧道,超长公路隧道的安全性差。

综合分析建议采用铁路隧道为较优方案,铁路隧道可以运行穿梭列车,汽车可通过穿梭列车背负式通过隧道,如图4所示,这与世界各大海峡隧道的方案是一致的。



图4 英法海底隧道背负式列车
Fig.4 Train of Eurotunnel

4 铁路隧道线位方案比选

根据渤海海峡的宽度、水深、地形、地质、地震、交通运输等条件,进行线位方案设计和比选。初步选择4条线位方案,如图5所示。

线位1:最短距离方案,老铁山—蓬莱东港,海域宽102 km,可利用大竹山岛设置竖井,还需设置一座人工竖井。

线位2:连岛方案,老铁山—北隍城岛—大钦岛—砣矶岛—北长山岛—南长山岛—蓬莱东港,长114 km,在北隍城岛、北长山岛设置竖井。

线位3:部分连岛方案,老铁山—大钦岛—北长山岛—南长山岛—蓬莱东港,海域宽111 km,在大钦岛、北长山岛设置竖井。

线位4:部分连岛方案,老铁山—大钦岛—南长山岛—蓬莱东港,海域宽114 km,在大钦岛、南长山岛设置竖井。

这4条线位的最大水深、地层结构及地质构造基本相同。最大水深约85 m;第四系地层30 m左

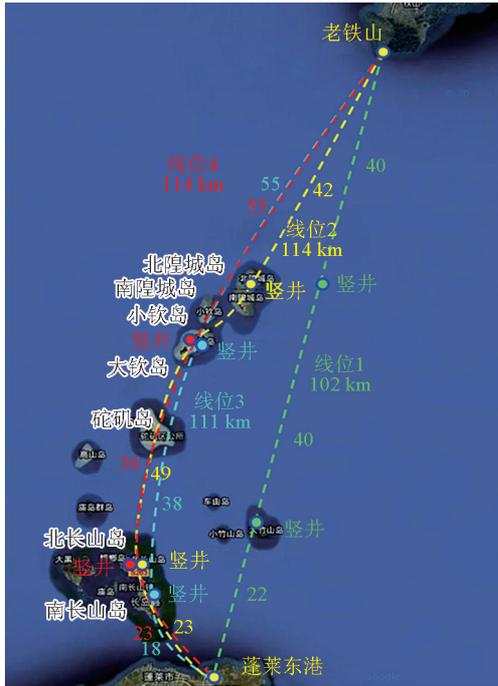


图5 几种对比的隧道线位(单位:km)

Fig.5 Several contrast tunnel line position(unit: km)

右,其下为板岩与石英岩互层、花岗岩地层;4条线位均位于两组北北东向断裂带中间,主要穿越两条北西向断裂带,距主要发震断裂的郟庐断裂带约40 km,如图6所示;线位1距历史上发生过的7级以上地震较近,如图7所示。

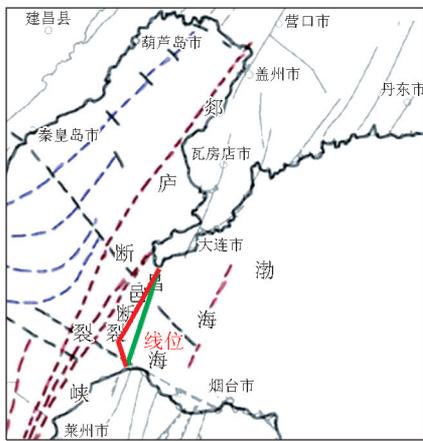


图6 断裂带与隧道线位的关系

Fig.6 The relation of fracture distribution and tunnel line position

综合分析比较后,推荐线位2(连岛方案)为最优方案。海面宽度114 km,最大水深85 m,穿越两条主要断层。该线位是海峡最窄的部位,同时可不

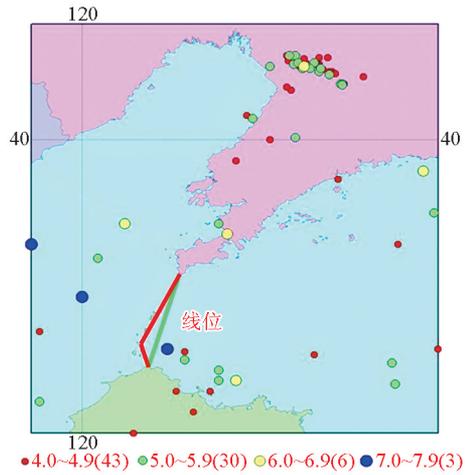


图7 地震震中与隧道线位的关系

Fig.7 The relation of earthquake centre and tunnel line position

修建人工岛而利用已有岛屿修建竖井来解决施工及通风问题。

5 隧道纵断面方案比选

1)坡度选择。渤海海峡隧道的坡度设定问题不仅要考虑工程建设的可行性和风险,而且要考虑隧道运营及防灾救援的要求,结合海峡两岸及海底地形地质条件及海水深度,初步研究0.9%、1.2%、1.8%、2.5%四个坡度方案。

如按0.9%的坡度方案则隧道较长,从工程投资方面初步分析该方案不是较优方案;如按2.5%的坡度方案,隧道长度较1.2%和1.8%方案分别短3.5 km和2 km,其减小隧道长度的效果并不明显,但恶化了运营条件和防灾救援条件,并且运营成本大幅上升,因此2.5%方案也不可行;如按1.2%、1.8%的坡度方案,隧道长度相差2 km,因此暂推荐采用1.8%的最大坡度方案。

2)隧道最小埋深。对于海底隧道其最小覆盖层厚度由隧道长度、最大水压力、施工安全、海床的稳定性等因素决定。如果岩石覆盖层太薄,隧道承受的水压会较大,围岩条件较差,施工安全性也就相对较差。如果岩石覆盖层太厚,施工相对安全,但隧道太长,成本太大,隧道坡度设计条件也变差。

根据初步了解的地质资料,渤海海峡海底上部为第四系深水沉积(30 m左右),下部为上玄武岩、板岩与石英岩互层、花岗岩。但是海峡水文条件恶劣,海床演变情况不详,因此考虑到隧道的安全,以将隧道深埋于岩石中为原则确定隧道埋深,另外隧

道深埋于隔水性较好的岩层中,有利于充分发挥敞开式TBM的掘进效率。经综合考虑,建议渤海海峡隧道最小埋深80 m左右。

3)竖井的设置。根据特长隧道施工及运营通风要求,TBM最大掘进长度,以及TBM施工场地条件等因素分析,初步确定在北隍城岛、北长山岛及两端岸边各设置一座竖井,其中北隍城岛和北长山岛同时作为施工竖井。如果功能需要,可在北长山岛通风竖井设计时考虑设置提供旅客出入的电梯通道;另外也可分别在大钦岛和砣矶岛各增设一座竖井,用于增加施工工作面,减小北隍城岛施工竖井压力,

同时也可作为旅客出入通道或者隧道排水通道。

4)纵断面选择。为了减小海底隧道运营期间衬砌的水压力以及病害问题,隧道防排水系统采用限量排放方式,因此,为了更有利于运营期间的排水、减小排水费用,隧道纵断面采用W形,并主要设置于花岗岩地层,部分地段设置于板岩与花岗岩互层中,隧道纵断面如图8所示,该地层具有很好的自稳能力,并具有很好的隔水作用,有利于减小衬砌背后水压力。海平面到隧道最低处的拱顶距离约为160 m,隧道总长约为125 km。

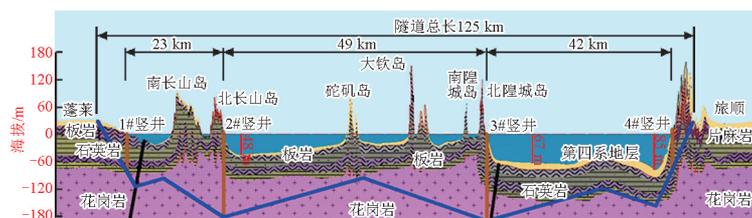


图8 渤海海峡隧道纵断面图

Fig.8 Longitudinal profile of Bohai Strait tunnel

6 隧道横断面方案比选

目前修建双线铁路隧道的形式有双洞单线、单洞双线、单洞双线+隔墙、双洞单线+服务隧道4种主要横断面布置形式。

对于双洞单线隧道方案,由于每孔隧道单向运行,列车行驶安全性高,一旦发生事故,旅客可通过横通道进入另外一条隧道,其防灾疏散能力较强,该方案的缺点是施工和运营期间没有服务隧道可利用。

对于单洞双线隧道方案,由于隧道内同时运行双向列车,运营风险大。当列车出现事故时,有可能引发另一线列车的次生灾害,其防灾疏散能力较差。而且双线隧道断面大,又无服务隧道可利用,因此隧道施工难度与风险很大。

对于单洞双线+隔墙隧道方案,其防灾能力与双洞单线隧道相当,但隧道断面大小与单洞双线隧道相同,其施工难度与风险也很大。

对于双洞单线+服务隧道方案,该方案有利于施工安全和施工中采用巷道式射流通风,且运营风险小、防灾救援能力强。施工期间,服务隧道可先行施工,探明线位地层情况,并可作为随后主隧道施工的避难救援场所。因此,本文推荐该方案为较

优方案。

隧道横断面如图9所示,隧道由两个主隧道和一个服务隧道组成,主隧道与服务隧道中线之间的距离为30 m,沿隧道纵向每隔700 m左右设置一条横通道连接主隧道和服务隧道。根据我国高速铁路隧道断面大小,内净空面积66 m²可以满足客车200~250 km/h的行车速度要求,并在参考英法海底隧道的断面大小基础上,初步设计主隧道外径为11.3 m,服务隧道外径为7.5 m,横通道外径为4.5 m,采用复合式衬砌,主隧道初期支护为30 cm,二次衬砌为40 cm;服务隧道初期支护为30 cm,二次衬砌为40 cm。

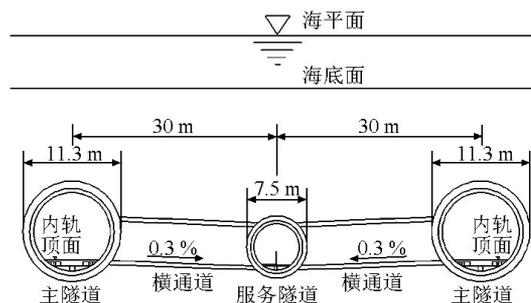


图9 渤海海峡隧道横断面图

Fig.9 Cross section of Bohai Strait tunnel

7 隧道施工方法比选

针对本工程的具体地质条件和建设规模,确定主隧道与服务隧道均采用敞开式TBM+钻爆法施工。施工筹划:隧道共分为5个施工段,即第1段从蓬莱端隧道口到北长山岛竖井,第2段从北长山岛竖井到砣矶岛,第3段从砣矶岛到北隍城岛竖井,第4段从北隍城岛竖井到老铁山水道中部,第5段从老铁山水道中部到旅顺端隧道口。采用15台TBM施工,其中,每段隧道用3台,2台掘进主隧道,1台掘进服务隧道。其中,服务隧道先行施工,两条主隧道随后。横通道采用钻爆法施工。

服务隧道可作为超前导洞先施工,用以查明线路详细的地质情况,补充施工前地质勘探资料的不足。在服务隧道掌子面前方进行超前钻探,如果掌子面前方遇到不良地质情况,可进行超前注浆。并在不良地质地段处,通过服务隧道对主隧道进行各种超前预处理。海底隧道施工部署如图10所示。

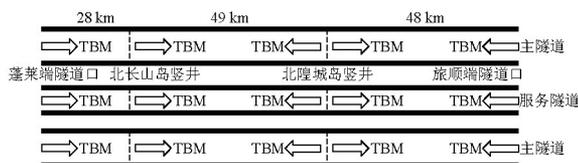


图10 渤海海峡隧道施工部署

Fig.10 The constrain deployment of Bohai Strait tunnel

8 渤海海峡隧道可行性分析

渤海海峡隧道推荐线位穿越的主要大断裂有两条,总体来说,相对于日本青函隧道穿越9条断层,其施工难度要小。该线位距主要发震构造的郯庐断裂带约40 km。通过设置隧道抗震措施,可以满足安全要求。

该线位海水最大深度为85 m,深度比日本津轻海峡最深水位140 m要浅,比较分析,渤海海峡隧道的建设规模大,但海水深度不是太深,修建同等深度的隧道有较多先例,因此,在技术上是可行的。

地下水压与隧道埋深及地下水处置方式有紧密联系,渤海海峡隧道最不利的施工水压为1.8 MPa,比青函隧道的水压要低。隧道采用深埋方式,尽量将隧道设置于隔水能力较强的基岩中,因此,在这样

水压条件下修建海底隧道是可行的。

大直径TBM海中对接的可行性。日本东京湾海底公路隧道的8台盾构采用冻结法进行了四次海中对接,我国的狮子洋隧道也成功地实现了水下对接,为渤海海峡隧道的实施提供了很好的借鉴作用,本工程采用隧道深埋方式后,对接条件更好。

9 结语

综合以上研究,得出以下初步结论。

1)根据渤海海峡的自然及地质条件,通过对桥隧方案的比较分析,认为全隧道方案优于全桥梁方案和南桥北隧方案,而全隧道方案采用铁路隧道形式,汽车可通过穿梭列车背负式穿过隧道。

2)通过对隧道线位方案的比选,认为旅顺到蓬莱的连岛线位方案较优,隧道长约125 km,并在旅顺端岸边、北隍城岛、北长山岛及蓬莱端岸边各设一通风竖井。

3)为了减小海底隧道的施工风险及技术难度,可考虑采用深埋隧道方案,最小埋深80 m左右,并且尽可能地减小隧道断面。隧道纵断面采用W形,最大坡度可用1.8%。隧道横断面采用双洞单线+服务隧道的形式。

4)隧道施工采用TBM法+钻爆法,在我国现有隧道修建的技术水平与经济能力下是可行的。

参考文献

- [1] 魏礼群,柳新华. 渤海海峡跨海通道若干重大问题研究[M]. 2版. 北京:经济科学出版社,2009.
- [2] 魏礼群,柳新华. 世界跨海通道比较研究[M]. 2版. 北京:经济科学出版社,2009.
- [3] 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,2006,43(6):1-8.
- [4] 王梦恕. 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”[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11):2161-2172.
- [5] 谭忠盛,罗时祥. 琼州海峡铁路隧道方案初步比选分析[J]. 中国工程科学,2009,11(7):39-44.
- [6] 谭忠盛,王梦恕. 台湾海峡越海通道前期方案研究报告[R]. 北京:北京交通大学,2012.
- [7] 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.
- [8] Tuneyoshi Hunasaki. Mechanizing and construction result of world largest diameter tunnel for Trans-Tokyo Bay Highway[C]// Proceedings of the word tunnel congress'99 - Challenges for the 21st Century. Norway, 1999: 543-554.
- [9] 严金秀. 欧洲隧道公司提交第二座英吉利海峡隧道可行性研究报告[J]. 世界隧道,2000,7(3):22-26.

Scheme study of Bohai Strait cross-sea tunnel

Tan Zhongsheng, Wang Mengshu

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Bohai Strait settled cross-sea project is an important part of the national railway network and the highway. Settled cross-sea channel will be built to replace the existing ferry transport, to meet the growing transportation needs. Based on the study of meteorology, hydrology, geology of Bohai Strait, the preliminary comparison of bridge or tunnel scheme and tunnel line position are analyzed. According to the analysis, Bohai Strait cross-sea project should adopt the whole scheme, and Lvshun—Penglai tunnel line bit program is excellent, the line position in deep tunnels is optimum. Because there are many technical difficulties of highway tunnel, as well as construction costs and operating costs are high, therefore, the railway tunnel scheme is the preferred one, and cars are carried by trains to cross the Bohai Strait tunnel.

[Key words] Bohai Strait; cross-sea project; railway tunnel; preliminary scheme