

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 03. 001

渤海海峡跨海桥隧建设的海洋地质环境 分析及修建方案思考

尹延鸿¹, 叶思源¹, 赵铁虎¹, 尹聪²

(1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2. 国家海洋局北海海洋技术保障中心, 青岛 266033)

摘要:通过对渤海海峡跨海通道的地壳稳定性、海洋地质环境及海岛调查研究,证明渤海海峡适合修建跨海通道,且南桥北隧是最佳修建方案。修建跨海通道非常必要且具有非常高的经济效益。以公路通道计算,若能达到日均 40 000 辆的车流量,建成后每年将节减大约 170 亿元的燃油费及相应的燃油污染排放,7 年即可收回投资成本,并可部分降低京津冀地区的雾霾水平和缓解交通压力。最佳修建线路是沿庙岛群岛轴部,这里地壳比周边更稳定、沉积物更薄,且实际跨海距离最短。蓬莱角至砣矶岛水深较浅,平均水深约 20 m,修桥是可行的;砣矶岛至大钦岛,平均水深 35~40 m;大钦岛至老铁山角,平均水深约 50~55 m。我们建议的南桥北隧方案,不同于前人提议的以北隍城岛作为桥隧连接地点的南桥北隧方案。砣矶岛面积 7.05 km²,是首选的桥隧连接地点,大钦岛也可作为桥隧连接地点,可作为次选方案考虑。若砣矶岛作为桥隧连接地点,桥长约 43 km,隧道长约 70 km;若选大钦岛作为桥隧连接地点,则桥长约 58 km,隧道长约 55 km;桥隧总长约 113 km。南桥北隧方案,估计修建用时约为 8~12 年,总投资约为 1 000~1 200 亿元,工程使用年限以 100 年计。渤海是中国的内海,其风浪规模比东海、南海小。渤海海峡的南桥,受风浪的影响程度,虽比青岛胶州湾大桥大一些,但与杭州湾跨海大桥相仿,仅海水深度稍大一些。渤海海峡区估计每年约有 60 余天的风雾影响通行,这正好与两端邻近陆地上的风雾影响在时段和时间上相符合,可一起进行封闭或开通过路操作,实属正常,不应作为否定南桥北隧方案的理由。在海水较浅区域,修桥成本低,场地宽阔,容易施工且施工周期短。挖海底隧道成本较昂贵,施工难度大且周期长。基本上是隧道的长度决定了施工周期。全隧方案虽有“全天候”之美称,但由于全隧方案隧道长 125 km,投资 2 500 亿元,比我们提出的南桥北隧方案多花一倍以上的投资,修建用时也是多 1 倍以上,且必须在全部建完后才产生经济效益,故费时、效率较低,是不适宜的。时代发展的趋势是,高速公路迅速崛起,铁路货运急剧下滑,公路通道比铁路通道更急需优先考虑。南桥北隧方案,南桥是修建公路的南桥,北隧,有两种选择:如果通风等技术问题能够解决,应首先考虑修建公路通道的北隧;如果不能实现的话,那么,退而求其次修建铁路通道的北隧,用火车背负汽车过北隧,其效率低于公路通道汽车直接过北隧,运力不足也只能用滚装船轮渡汽车来补充。总之,不管是修公路通道还是铁路通道,甚至还是二者都要修,最佳方案都应该是南桥北隧,这样较省钱省时效率高,并在修建期间就可阶段性地产生经济效益。此外,南桥以地震基本烈度Ⅷ度设防,并能抗 12 级以上台风及相应浪流,桥墩修建应尽量避免避开断裂带。北隧以地震基本烈度Ⅷ度设防。这正是:南部水浅利修桥,南桥北隧奇通道;阶段施工见效益,省钱省时效率高!

关键词:跨海通道;南桥北隧;海洋地质环境;修建方案;渤海海峡

中图分类号:P75

文献标识码:A

文章编号:0256-1490(2017)03-0001-16

中国地质调查局青岛海洋地质研究所对我国海

域尤其是渤海海峡及周边海域做过多年详细调查研究。尹延鸿等在 2005 年曾主持了山东长岛海岛国家地质公园的调查与申报工作^[1],当时调查了横跨渤海海峡的庙岛群岛的 32 个岛屿,尤其是重点详细调查了有人口居住的 10 个大的岛屿:南长山岛、北长山岛、大黑山岛、庙岛、小黑山岛、砣矶岛、小钦岛、大钦岛、南隍城岛、北隍城岛,其中的多个大岛已成了当今修建渤海海峡跨海通道的必经之路。2012 年至今,国土资源部中国地质调查局连续部署了“渤海海峡跨海通道地壳稳定性调查评价”和“渤海湾西

基金项目:中国地质大调查项目(DD20160144,GZH201200504,GZH201200503);国家重点研发计划(2016YFE0109600);国家自然科学基金(40876033,40872167,41240022,41406082)

作者简介:尹延鸿(1954—),男,研究员,主要从事海洋地质、环境地质、工程地质、构造地质和陨击事件研究,E-mail: yyanhong180@126.com

通讯作者:尹聪(1981—),女,博士,主要从事海洋地质研究,E-mail: yincong@bhj.gov.cn

收稿日期:2017-03-21;改回日期:2017-04-14. 蔡秋蓉编辑

部等重点海岸带综合地质调查”等项目,对渤海海峡跨海通道建设的海洋地质环境适宜性进行了深入研究。在此过程中,我们对如下问题进行了思考:海峡跨海通道是否有修建的必要?海洋地质环境是否适宜?最佳线路选在哪里?采取何种建设方案?全桥?全隧?还是南桥北隧?南桥北隧的话,桥隧连接点选在哪里?公路通道还是铁路通道?各有什么优缺点?需要投资大约多少亿元?哪种方案是最佳选择?多少年能收回成本及经济效益如何?这些都是应用性地质调查非常关心的关键问题。在本文中,试图用我们的研究成果、计算的数据和国内外著名桥隧的对比分析,尽量对上述问题做出有理有据的回答,以供国家进行决策时参考。

海洋经济的快速发展引发了海洋工程的建设热潮。海洋工程建设应讲究实用、高效、节约、环保和安全,不可贪大求洋求形象,花钱费力不讨好。在这方面,成功和失败的典型案例不少。值得一提的是,第一作者尹延鸿曾多年被聘为国家级海域使用论证评审专家,并对一些大的海洋建设工程提出了关键性建议。例如,作者在2007年通过发表“对河北唐山曹妃甸浅滩大面积填海的思考”一文^[2],指出了原曹妃甸填海工程规划的缺陷,提出了“缩小填海面积、保留浅滩潮道”等关键性建议,被河北省内参全文转载,原河北省委书记白克明、省长郭庚茂高度重视该文提出的问题及修改建议,并分别对该文作了批示,从而在2007年修改了曹妃甸填海规划,虽然曹妃甸填海面积仍然偏大,但比原填海规划已改进和优化了不少,并且浅滩潮道(现在叫纳潮河)也重新开通,此事受到了国家海洋局和河北省的赞誉^[3-7]。再如,2010—2015年,规划在山东省龙口湾投资100~150亿元,填海造地54 km²,最深将填至11 m水深处,拟建立世界一流的产业基地。作者极力反对该项目,指出该海域水深较大,填海面积太大,对海洋环境影响大,经济效益差(三大一差)。在该项目被批准后,作者考虑到项目已经被批准改变是极其困难的,又在2010年通过发表文章“山东省海岸带不同岸段的填海造地适宜性分析及需要注意的问题”^[8],建议该项目分两期进行。建议投资五分之一的经费,先填沿岸水深约0~6 m、较容易填的一半面积作为第一期,待第一期完成并产生经济效益后,再考虑是否需要进行第二期较深海域(6~11 m水深)的填海。并指出:“如果不分期把工程一下子全面铺开,5年过去了(一般的规划实施周期是5年),海还没有填完,更谈不上产生经济效益了,更糟糕的是万一赶上社会形势的发展变化,发现大面

积填海并不是那么急需、花巨额投资在海中造出来的土地没有多少优质项目可以落实、难以产生相抵的经济效益甚至产生负的经济效益,那后悔可就晚了,造成经济损失可就大了,因此,一定要分期进行为好”^[8]。此后,作者又指出,该项目的填海面积已超出了“上升效益极限填海面积”,可能会产生负的经济效益^[9,10]。但项目最终还是没有分期进行。每天近百辆次的绿色大卡车轰轰隆隆、轰轰烈烈地向海运石,直接向前推进填海。作者的预言不幸言中,结果该项目在填海造地约4年后,半途而止。投资了多少亿元辛辛苦苦填出来的约30 km²的砂石滩,至今仍然荒凉在那里,再不断接受海洋的侵蚀与削减,大概成了“烂尾填海工程”。这样的教训值得汲取。

渤海海峡跨海通道,是超级大型的海洋工程,关系国计民生,非同一般。一定要尽量全面考虑,详细比较各种方案的优劣,做到规划合理,节约、高效、实用才好。铁路全隧方案,隧道太长(125 km),投资太大(2 500 亿元),修建用时太多,是不适宜的。跨海通道南部水深较浅处,修桥成本低而挖海底隧道成本高,故应尽量修桥,以缩短隧道的长度。南桥北隧方案,投资相对较少,修建用时相对较短,海洋地质环境基本适宜,并可在修建期间阶段性地见经济效益。我们建议的南桥北隧方案,不同于前人提议的以北隍城岛作为桥隧连接地点的南桥北隧方案。我们建议,桥隧连接地点可首选砣矶岛(图1);大钦岛也可作为桥隧连接地点,可作为次选和比选方案。基于以上考虑,特撰此文,辩明利弊,建议我们的南桥北隧方案。

1 渤海海峡跨海桥隧建设的必要性分析

渤海海峡北起辽东半岛老铁山西南角(或称老铁山角),南至胶东半岛蓬莱市登州角(或称蓬莱角)。海峡南部发育庙岛群岛。海峡两端最短直线距离约106 km,沿庙岛群岛轴线距离为110 km。庙岛群岛呈近南北向排列,最北部的北隍城岛距离蓬莱角直线距离64 km(沿岛群轴线距离是68 km)。蓬莱角至砣矶岛水深较浅,平均水深约20 m;砣矶岛至大钦岛,平均水深35~40 m;大钦岛至北隍城岛,平均水深约45~50 m;北隍城岛距离老铁山角是42 km,该段又称老铁山水道,平均水深约50~55 m,最深处达86 m(图2),水深较深。

渤海海峡既是众多船舶进入渤海的必然海上通

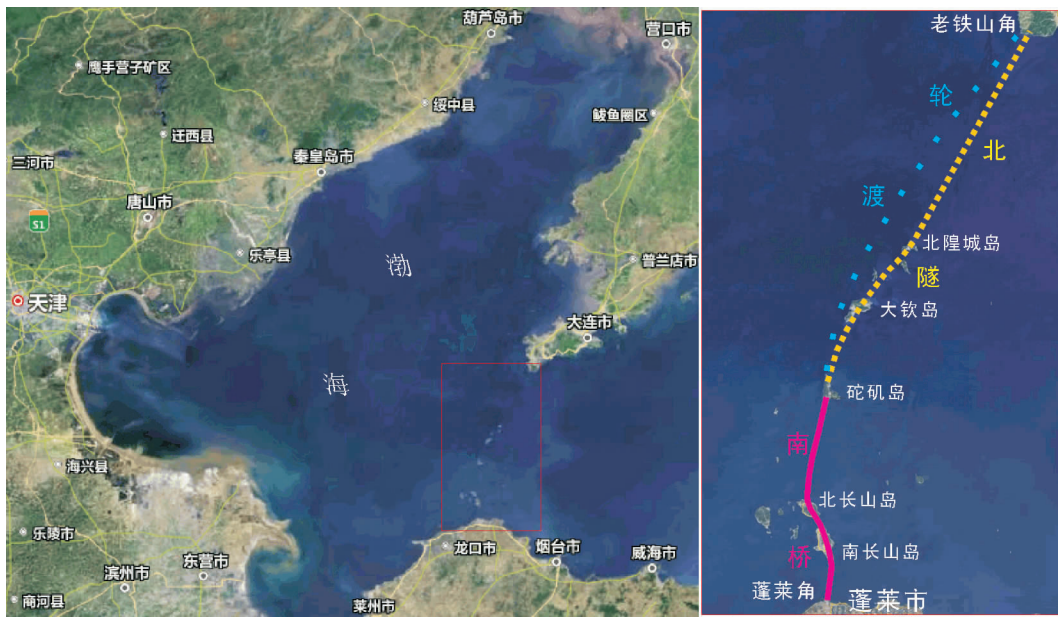


图 1 渤海海峡位置和海峡通道南桥北隧及轮渡修建方案建议图

Fig. 1 Location of Bohai Strait and the proposed sketch of construction scheme on the bridge-in-south and the tunnel-in-north and the ferry route

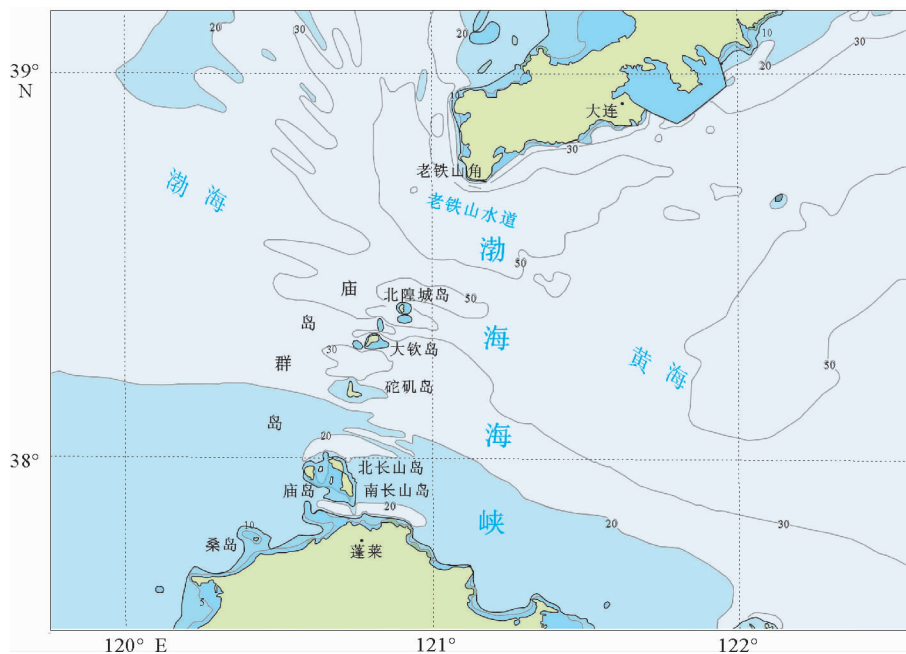


图 2 渤海海峡水深地形图

Fig. 2 Map of the water depth and topography of Bohai Strait

道,又是我国南北陆路交通的天堑,长期以来,由于渤海相隔,使环渤海南北两岸成为交通死角,极大地限制了客货交流和经济来往。修建这一交通运输干线是非常必要的,这些都是老生常谈就不再重复了。我们这里想用数据来说话,从经济效益分析和减少京津冀雾霾这两个方面来说明修建跨海通道的必要

性。

1.1 经济效益分析

从辽东半岛老铁山角至胶东半岛蓬莱角,海峡两端最短距离 106 km。若从陆地沿高速公路绕行,则需约 1 700 km。跨海通道修成后,车辆不用长距

离绕行,而是跨海直行,最大的节约距离是1 600 km。考虑到发车地并不一定都是在大连,而有可能是在渤海的北部(例如沈阳、营口、锦州等地),目的地也并不都是蓬莱及蓬莱以东城市(例如烟台、威海等地),而是有可能去蓬莱以西的城市(例如潍坊、淄博、济南等地)或者由这些城市再进一步南下。那么公路通道修成后每辆车的节约距离大致按1 200 km计算还是较合理的。还有一种观点是用滚装船把汽车轮渡通过渤海海峡(例如从烟台到大连的轮渡)会不会更划算。从烟台到大连,每辆小汽车轮渡费用现在价格是600元,还要买人员轮渡费(3等仓每人260元),按4人计,总费用则达1 640元,与沿渤海长距离绕行费用相仿。

一般来说,每辆小汽车耗油量为8~18升/百公里,大汽车或重型汽车的耗油量为30~80升/百公里。如每辆车耗油量平均按15升/百千米、燃油价格以近5年来的大致平均价格6.5元/升计,计算出缩短交通距离1 200 km,每辆通过海峡的汽车就节省燃油价值1 170元。假如建成公路通道后,以大致日均车流量40 000辆计(我国多条重要高速公路,日均车流量可达40 000辆或以上),一年按365天,计算得知每年省油价值约170亿元。按我们估算的桥隧通道方案投资以1 200亿元(见后文)计,仅从省油这一项计算,7年即可收回投资成本。与国内另两个有名的跨海大桥比较,可见渤海海峡跨海通道的效益是最高的(表1)。

表1 渤海海峡跨海桥隧与国内两个著名跨海大桥的投资效益比较

Table 1 The comparison of investment benefits between the bridge-tunnel across the Bohai Strait and two other famous cross-sea bridges in China

大桥名称	总长度/km	实际跨海长度/km	投资/亿元	缩短交通距离/km	日均车流量	每年节约燃油费/亿元	回收成本年限 (仅从节约燃油费计算)
渤海海峡跨海桥隧	预计 113	106(沿岛群轴 110)	预计 1 200	1 600(按 1 200 计)	预计 40 000	170.82	7.02
杭州湾跨海大桥	36	32	118	100	45 000	16.01	7.37
青岛胶州湾跨海大桥	35.4	26.75	99	30	30 000	3.20	30.94

杭州湾跨海大桥次之,缩短交通距离约100 km,按我们的经济效益算法,7年多也可收回成本。至2016年10月27日,杭州湾跨海大桥已通过一亿辆汽车。建成8年来的总日均车流量为3.5万辆,而现今的日均车流量约为4.5万辆,而且以后会更高。可见经济效益非常好。

青岛胶州湾跨海大桥效益差些,比走环胶州湾高速公路仅缩短距离约30 km,按我们的经济效益算法,31年也能收回成本。其实,青岛胶州湾跨海大桥建设时有2个方案:在胶州湾口修桥虽然距离最短,但由于考虑到大桥会影响大船进出青岛港,所以没有考虑。第一方案是建在现今的跨海大桥之南更靠近胶州湾口的区域,大桥不影响大船进出青岛港,桥长比现今的大桥还短8 km,并且还少投资20亿元。在2006年召开的海域使用论证评审会上,作者尹延鸿强烈呼吁支持第一方案,但最终没有被采纳。如果建议被采纳的话,仅从桥缩短了8 km考虑,每年又可比现今至少多节约0.85亿元的燃油费,还多节约建设投资费用20亿元。结果最终是采取了第二方案,在胶州湾的最宽处修建了现今长35.4 km的跨海大桥。工程是更加“形象”了,但经济效益就远不如第一方案了。

仅用省油计算投资回收年限,是我们独特的经济效益算法。而且还没有计算省了多少开车的时间,省了多少汽车磨损,分流了多少经过京津冀的车流量,提高了多少京津冀地区的交通效率,减少了多少燃油的污染排放,减轻了多少雾霾的浓度水平等等。更没有计算过桥隧还要收过路费的问题。当今流行的经济效益计算,都是从收多少过路费来计算多少年能收回投资成本,这是不科学的,因为收过路费多少是人为规定的。当然,对修路没有缩短距离的工程,也许只能通过收过路费计算多少年收回投资成本了。

1.2 减轻京津冀地区雾霾

我们可以看到,中国的版图像一只大公鸡,京津冀地区正好位于鸡脖子处的食道。京津冀地区西北部的内蒙古高原、太行山构成了鸡脖子处的颈椎(图3)。鸡头吞咽的大量食物将通过食道进入中腹。这正像东北的货物、人员通过京津冀地区输入(或输出)内地。我们知道,现在从东北入京津冀地区主要有3条高速公路,经常是车流滚滚,特别是大卡车、载重汽车相当多,由于车流量大,路上堵车是经常的事。汽车尾气对雾霾的贡献相当大。由于京津冀地

区属于低洼地区,西北部的内蒙古高原、太行山脉阻挡了空气的流通,使产生的雾霾不易扩散,这是京津冀地区雾霾严重的另一个重要原因。

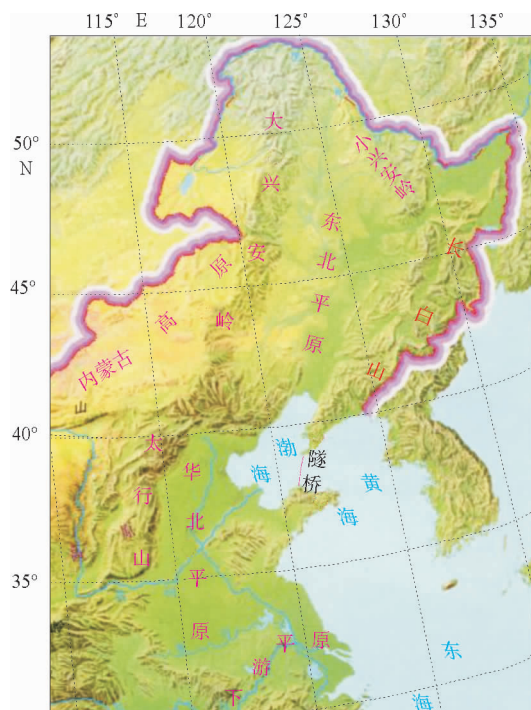


图 3 渤海海峡跨海通道周边地势图

Fig. 3 The terrain around the cross-sea path of the Bohai Strait

渤海海峡跨海桥隧修建后(以公路通道为例),从而使东北出入内地的高速公路由 3 条变成了 4 条。若按车流量的均量分配,原来东北出入内地的 3 条高速的总车流量将降低 25%,渤海海峡跨海通道将占总车流量的 25%。考虑到更多车可能愿意走近道,将来渤海海峡通道有可能占总车流量的 35%,那么,另 3 条高速的总车流量可能占 65%,这样总车流量就降低了 35%。那么,京津冀地区的雾霾水平会不会降低 35%呢?不可能,因为雾霾不全是由于东北进出京津冀的汽车产生的,甚至也不全是由于汽车尾气造成的。所以,渤海海峡跨海桥隧的开通,京津冀地区的雾霾水平肯定会降低,即使能够降低 10%,也是一个显著贡献。

那么,京津冀地区减少的雾霾会不会跑到海峡通道上?不会的,正如上文所述,京津冀地区的雾霾不易扩散是其重要原因。跨海通道建成后,每年节省 170 亿元的燃油及减少 170 亿元燃油污染排放总量是主要的。渤海海峡通道距离短,产生的雾霾本来就少,以及海上空气流通好,其影响甚小,而经济效益则是非常好的。

2 海洋地质环境适宜性分析

通过采用高分辨率侧扫声纳、浅地层剖面测量、高分辨率 24 道地震测量、钻孔分析、资料收集分析等研究手段,对跨海通道及邻域的地形地貌、海洋动力、地层沉积物、断裂构造、历史地震分布及地壳稳定性等作了详细研究。

2.1 地形地貌及海洋动力分析

南部庙岛群岛海域,平均水深较浅,特别是蓬莱角至砣矶岛海域,平均水深约为 20 m。各岛周围,水深约 5~10 m。水道内,水较深。区内有多个水道发育。登州水道,在蓬莱角与南长山岛之间,水深约为 20~28 m,沟底起伏较大。长山水道,在砣矶岛以南,北长山岛以北,水深约为 20~30 m。北砣矶水道,在砣矶岛之北,水深约 30~40 m(图 2)。北部老铁山水道海域,宽 42 km,平均水深约 50~55 m。

海峡风场特征具有明显的季风气候特征,风向季节变化明显,冬季盛行偏北风,夏季盛行东南风,月平均风速在 5.7~8.5 m/s 之间,冬季大、夏季小、春秋季次之^[11]。年平均大风日约 60 天。

渤海海峡区的海浪以风浪为主。冬季盛行偏北向风浪,通常达到 3~4 级浪。夏季及其他季节风浪较小,一般为 2~3 级。各月涌浪波高主要集中在 0.3~2.2 m 之间。遇到寒潮、台风时,最大可达 6 级浪。渤海海峡潮汐以半日潮为主,潮差较小,平均潮差约为 1 m。但潮流流速相对较大,一般为 1.5~2 节,在老铁山水道北端,最大流速有时可达 5 节^[11]。

总之,渤海属于我国内海,渤海海峡的风浪、波高由于受到朝鲜半岛的阻挡作用,比我国东海、南海要小。而且在海峡南部的庙岛群岛一带,水深较浅,尤其是砣矶岛以南,水深平均 20 m,是可以建桥的。当然,必须做好相应的工程设防。杭州湾跨海大桥设计可抵抗 12 级台风及相应浪流,海峡通道的南桥设计也应抗 12 级或以上台风及相应浪流。

2.2 地层及沉积物分析

渤海海峡通道海底及庙岛群岛出露的基岩地层主要为新元古代变质岩蓬莱群(年代距今约 8 亿年),可与大连旅顺地区的元古代变质岩青白口系对比(图 4、图 5)。在南长山岛、北长山岛,大钦岛、小钦岛,南隍城岛、北隍城岛等处及周围海域,发育石英岩、板岩和千枚状板岩互层。在砣矶岛等处及周

围海域,上部地层以板岩、千枚状板岩为主,下部地层以石英岩为主^[1]。

在海峡北部老铁山水道海域,第四系沉积层(图4中T0向下至T4之间的地层)大部分缺失,局部残留沉积层覆盖在基岩之上。残留沉积层主要为晚更新世细砂、硬黏土以及被侵蚀后残留的砾石、粗砂^[12]。

渤海海峡南部庙岛群岛海域,第四系沉积层(图5中T0向下至T4之间的地层)广泛发育,主要以砾石层和粗砂为主,且较密实。

沿群岛轴部一带,沉积层最薄是其主要特征。第四系厚度一般少于100 m,大部分区域数十米。从岛群轴部向东西两边则逐渐加厚^[12-15]。从岛群轴部向东,第四系厚度逐渐加深至200~250 m左右;从岛群轴部向西,其厚度增大更快,这可能是受郯庐断裂的影响所致,至渤海中部地区,第四系厚度已超过700 m。

第四系的最上部地层为全新统(T0与T1之间的地层),主要为粗粒的潮流沙席和潮流沙脊,底界面清晰、平直,可连续追踪。该层全区分布广泛。南部岛群轴线一带厚度最薄,约5~10 m。岛群轴以

西,逐渐加厚为10~15 m。岛群轴以东,逐渐加厚为15~25 m^[12]。

从地层和沉积物发育情况来看,沿庙岛群岛的岛群轴,岩石坚硬,第四系沉积物仅厚几十米,且较密实;全新世的沉积物仅厚5 m左右。可见,沿岛群轴部是修建跨海通道的最佳线路。

2.3 地壳稳定性分析

地壳稳定性分析,主要从地震方面、断裂构造分布和活动性等方面进行分析。

我们对该区的断裂做了进一步研究。总体来说,该区最发育的是NNE向断裂,通过渤海中部的郯城-庐江断裂带是NNE向的最大断裂,该断裂有多次活动^[16-19]。次发育的是NW向断裂(图6)。该区的现代构造应力场的最大主压应力方向是介于东西向与NEE向之间^[18-24]。张家口-蓬莱断裂带是本区最大的NW向断裂。它西起张家口,向东南延伸穿越渤海海峡南部,直到胶东半岛以北海域,全长约700多千米,由许多分支断裂组成^[25]。图6中的大竹山岛-威海北断裂和长岛-芝罘岛断裂应属于它的分支。沿张家口-蓬莱断裂带曾发生过一系列强震

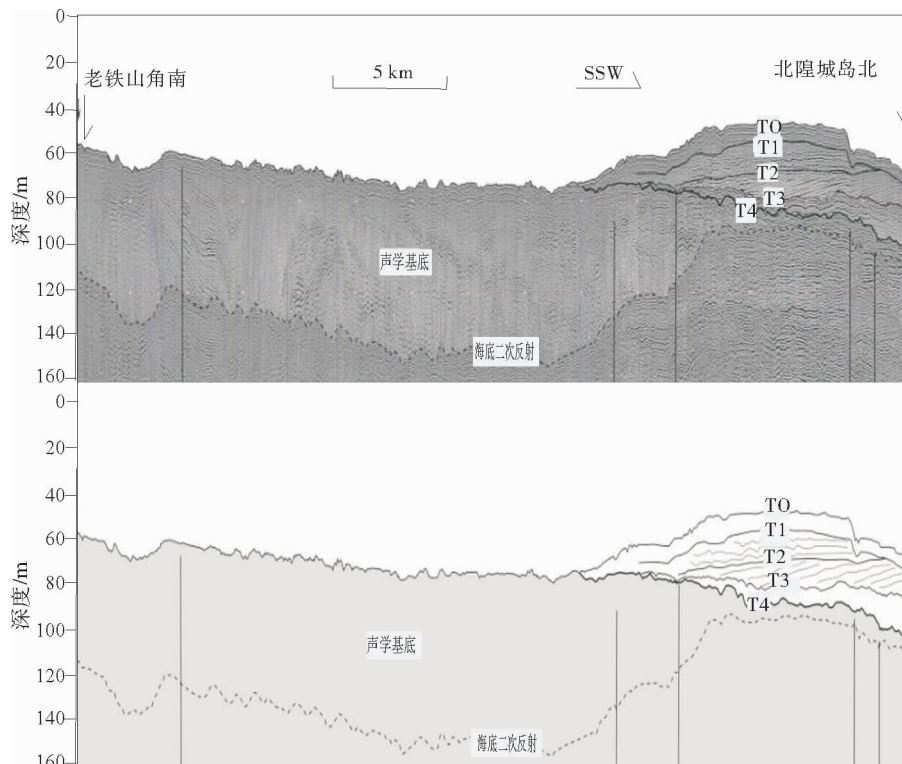


图4 老铁山角南至北隍城岛北浅地层剖面及解释图

(起点 38°43'06.082"N, 121°07'43.799"E; 终点 38°24'00.457"N, 120°55'10.697"E)

Fig. 4 The sub-bottom profile from the south of Laotieshanjiao to north of Beihuangcheng Island and its interpretation (start point: 38°43'06.082"N, 121°07'43.799"E; end point: 38°24'00.457"N, 120°55'10.697"E)

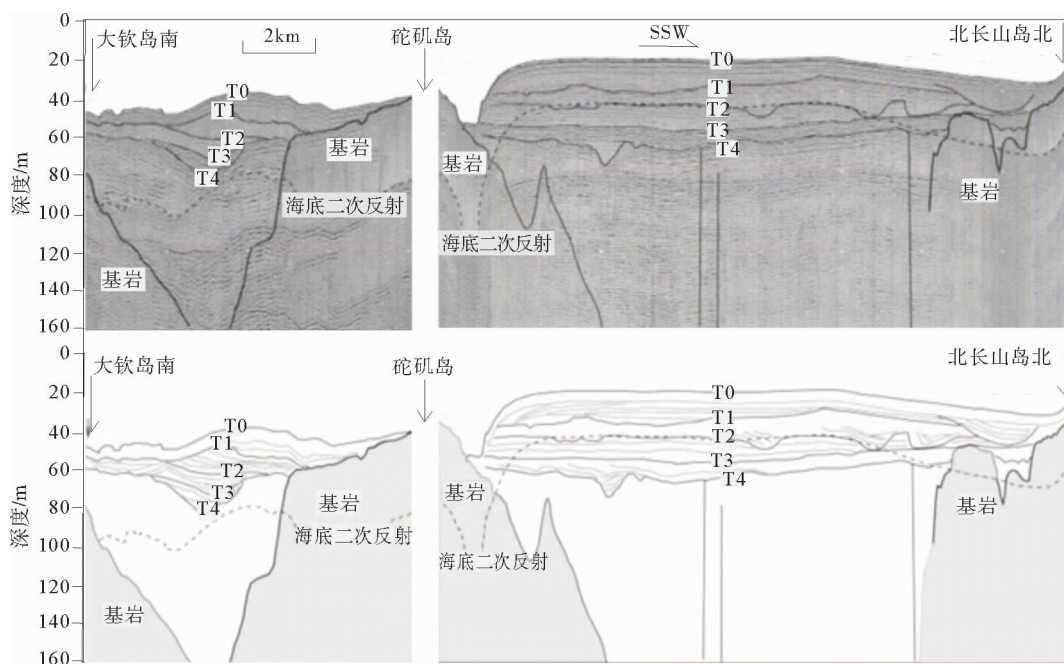


图 5 大钦岛南至砣矶岛、砣矶岛至北长山岛北浅地层剖面及解释图

(大钦岛南至砣矶岛,起点:38°16′38.726″N,120°47′40.560″E;终点:38°12′05.036″N,120°44′50.852″E。

砣矶岛至北长山岛北,起点:38°08′44.902″N,120°44′46.918″E,终点:37°59′50.471″N,120°41′55.867″E)

Fig. 5 The sub-bottom profiles from the south of Daqin Island to the Tuoji Island, and that from the Tuoji Island to the north of Beichangshan Island, and the interpretation (profile from the south of Daqin Island to Tuoji Island, start point:38°16′38.726″N, 120°47′40.560″E;end point:38°12′05.036″N, 120°44′50.852″E. profile from the Tuoji Island to the north of Beichangshan Island, start point:38°08′44.902″N,120°44′46.918″E, end point:37°59′50.471″N,120°41′55.867″E)

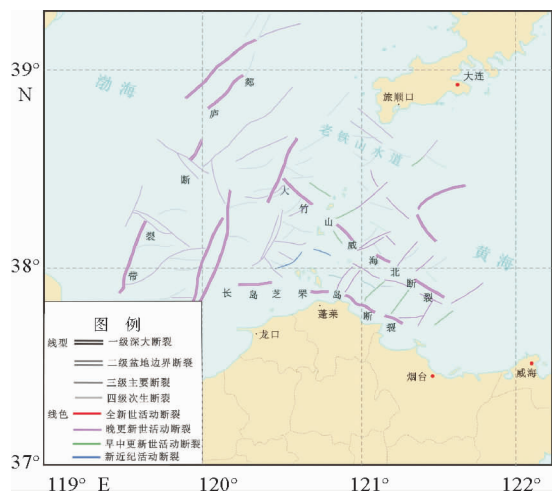


图 6 渤海海峡及邻域断裂构造图(据文献[25]修改)

Fig. 6 Fault structures in Bohai Strait and the adjacent area (revised according to reference [25])

和大量的中小地震,是华北及渤海地区一条活动构造带,在修建跨海通道时应引起高度重视。

总之,这两组断裂,从地震剖面上分析,断点多表现为晚第四系沉积地层的活动断裂和褶皱等构造变形,断点的最新活动时代绝大多数为晚更新世中

晚期,断层大多数断至基底,几乎全为正断层。因此,桥墩的建设应尽量避开断裂带,尤其是规模较大的活动断裂。

通过该区的历史地震研究,可知 6.0 级以上强震主要发生在穿过渤海中部的郟城-庐江断裂地震带^[26-31]。该带若有强震,渤海海峡区域能受到一定影响。但在渤海海峡区域,很少发生强震,近 1 000 年以来,发生 6.0 级以上强震只有一次,即 1548 年 9 月 13 日长岛东侧大竹山岛附近海区 7.0 级地震。

渤海海峡区域地壳属于基本稳定区(或过渡区),修建桥隧是可行的。但也要做好相应地震烈度的设防。考虑到渤海海峡或邻近区域有发生 6 级以上地震的可能,桥隧工程设计应考虑能抗 6 级或 7 级地震。在渤海海峡南部(指北隍城岛以南庙岛群岛区域),工程应按地震基本烈度Ⅷ度设防;在渤海海峡北部老铁山水道一带,工程应按地震基本烈度Ⅶ度设防。

3 渤海海峡跨海通道修建方案建议

关于渤海海峡跨海通道建设的讨论已持续多

年,到底如何修建,有各种不同的建议^[32-46],修建的线路最好选在哪里?如何修建?是本文进一步讨论的重点。

3.1 沿岛群轴线是跨海通道的最佳路线

修跨海通道线路的选择,除沿岛群轴修建外,还有多个建议。例如,建议以烟台为起点修全隧直至大连,跨海距离 126 km;建议从蓬莱角至老铁山角直线修筑,线路最短是 106 km 等。作者认为,沿庙岛群岛的岛群轴修建,线路是 110 km(再加约 3 km 的在陆地上的延伸,实际桥隧的修建总长度可按 113 km 考虑),比最短距离长 4 km,但它是最佳的线路选择。理由如下:(1)沿岛群轴,地壳较稳定且岩石最坚硬。如果不是岩石最坚硬,为何经过了千万年的海浪侵蚀,岛群依然矗立,而两边早已沦为大海。(2)沿岛群轴,第四系沉积物仅厚几十米,且较密实;全新世的沉积物仅厚 5 m 左右。而在岛群轴的东西两侧,沉积物就逐渐加厚了。(3)虽然沿岛群轴线路比最短距离长了 4 km,但它的实际跨海距离最短,仅 88 km,因为通过的岛屿占了 22 km。(4)线路通过岛群,给修桥隧工程带来方便,给车辆的停靠和休息服务带来方便。(5)沿岛群轴,特别是修桥,给陆地居民旅游群岛带来方便,也给 5 万庙岛群岛居民带来交通方便,土地会升值,有明显经济效益。

3.2 全桥方案不可行

老铁山水道宽 42 km,平均水深约 50~55 m,最大水深 86 m,修桥难度大,费用高,并且老铁山水道,是环渤海各港口进出渤海的咽喉要道,船舶进出繁忙,修桥不利于通航特别是大船、超大船的通航。横跨老铁山水道应修隧道。因此,全桥方案不可行。

3.3 全隧方案不适宜

全隧道方案不适宜,费钱费时效率低。

在海水较浅的海域,修桥比修隧道更便宜,修隧道则较为昂贵。为计算工程的投资,需要计算建筑材料费用、人员工资、施工费用等,这种计算方法我们不擅长。但通过近年来类似的跨海隧道工程的投资来估算和比较是可行的。

现在世界上最长的海底隧道是日本青函隧道:横穿日本轻津海峡,全长 54 km,海底部分 23 km,该工程 1964 年动工,1 800 名工程技术人员和

工人从隧道两端南北对挖,于 1988 年竣工,历时 24 年完成,耗资 7 000 亿日元,约合当时人民币 400 亿元。

世界上第二长的海底隧道是英吉利海峡隧道,横贯多佛尔海峡,从英国的福克斯通到法国的桑加特。全长 53 km,海底部分 37 km,从 1986 年法、英两国签订关于隧道连接的坎特布利条约后开始动工,到 1994 年 5 月正式通车,11 000 名工程技术人员和工人从隧道两端东西对挖,历时 8 年完成,耗资约 100 亿英镑,约合 150 亿美元,约合当时人民币 1 000 亿元。

世界第三长的海底隧道,也是中国最长的海底隧道,青岛胶州湾海底隧道,全长 7.8 km,其中陆域段 3.85 km,海底段 3.95 km。主隧道均为单向三车道(双向 6 车道),净宽 13.5 m,工程于 2006 年 12 月开工,估计是几百名工程技术人员和工人施工,因此挖的速度较慢,2011 年 6 月 30 日实现通车。历时 4.5 年完成,项目总投资人民币 33 亿元。

现在较流行的一种建议是,蓬莱到旅顺宜采用铁路全隧道方案^[32-34],隧道长 125 km,投资 2 500 亿。长 125 km 的跨海隧道,世界还没有先例。世界最长跨海隧道才 54 km。海底隧道越长,出渣距离越长、人员交班距离越大,隧道换气难度越大,因此隧道长度成倍增加时,投资和修建用时若仅仅按倍数相应地增加就显然太低了。根据世界多个隧道工程案例,本文总结出:工程投资、修建用时与海底隧道长度成倍增加的关系并非简单的倍数关系,而是呈几何级数(等比数列)的方式增加才更符合实际。

其等比数列为:

$$a, \quad aq, \quad aq^2, \quad aq^3, \dots$$

$$\text{前 } n \text{ 项和为: } a(q^n - 1)/(q - 1)$$

式中: a 代表所选隧道的修建用时或投资额度; q 代表公比,前 n 项和 $a(q^n - 1)/(q - 1)$ 为 n 倍长度的隧道修建用时或投资额度。

根据世界上多个不同长度的海底隧道工程案例研究,本文认为选用公比 q 为 1.2 来考虑较为合理。即每增加 1 倍距离的隧道长度时,用公比 q 为 1.2 倍来考虑修建用时及投资额度的增加。以青岛胶州湾跨海隧道(长 7.8 km)的修建速度(4.5 年)和投资额度(33 亿元)为例,分别按倍数计算(显然太低)和用公比 1.2 来计算不同距离的海底隧道修建用时及投资额度(表 2)。经计算,北隧(大钦岛方案)隧

道长 55 km,需投资 429 亿元;北隧(砣矶岛方案)隧道长 70 km,需投资 684 亿元;全隧方案长 125 km,需要投资 2 890 亿元。这与上文所述的流行建议全隧 2 500 亿元投资相近,从这里也可以看出,选择 q 为 1.2 还是较为合理的。

表 2 不同距离的海底隧道修建用时及投资额度
(以青岛胶州湾跨海隧道为例进行计算)

Table 2 The construction time and investment of undersea tunnels of different lengths

(take the Jiaozhou Bay cross-sea tunnel as an example)

隧道距离/km 及倍数	修建用时/年		投资额度/(亿元)	
	按倍数计	按 q 为 1.2 计	按倍数计	按 q 为 1.2 计
7.8 (1 倍)	4.5	4.5	33	33
15.6(2 倍)	9	9.9	66	72.6
23.4(3 倍)	13.5	16.38	99	120.12
31.2(4 倍)	18	24.16	132	177.14
39.0(5 倍)	22.5	33.49	165	245.56
46.8(6 倍)	27	44.69	198	327.67
54.6(7 倍)	31.5	58.12	231	426.22
62.4(8 倍)	36	74.25	264	544.47
70.2(9 倍)	40.5	93.60	297	686.36
.....
124.8(16 倍)	72	393.48	528	2 885.59
北隧(大钦岛方案)55	32	59	233	429
北隧(砣矶岛方案)70	40	93	296	684
全隧 125	72	396	528	2 890

这里,利用几个世界著名跨海隧道的修建用时及投资额度,来估算渤海海峡跨海隧道的修建用时及投资额度(表 3)。

从表 2、表 3 可以看出。渤海海峡全隧方案,隧道长 125 km,按世界最快速度英法修建速度需 22 年,按日本修建速度需 64 年,按青岛修建速度则需

396 年。可见,若没有愚公移山的精神,花 22 年或以上的时,修建全隧还真有点困难。因此海底隧道要尽量越短越好。

海水较浅时修大桥比修隧道便宜得多,且用时也短得多。修桥的距离增加一倍,若其他条件相同,投资可以以倍数计算;施工时间甚至不用增加一倍,因为建桥场地开阔,可以多点同时进行施工。而修海底隧道受到的限制可就多了。一般来说修海底隧道比修桥慢得多且投资高得多,特别是海底隧道距离越长越是如此。

若以海峡通道南桥北隧(砣矶岛方案)的隧道长 70 km 来考虑,按世界最快速度英法修建速度需 11 年,按日本修建速度需 33 年,按青岛修建速度则需 93 年。若以海峡通道南桥北隧(大钦岛方案)的隧道长 55 km 来考虑,按世界最快速度英法修建速度需 8 年,按日本修建速度需 24 年,按青岛修建速度则需 59 年。

可见,修建隧道用时较长。如果能够达到英法修建速度,北隧用 8~12 年是能够完成的。

考虑到隧道挖掘技术的不断提高,用时可能会缩短一些。但海底隧道仍不同于城市地铁。城市地铁在陆地上施工,出站口多,可有多个出渣口、多个人员进出通道和通风口,使施工相对容易一些。而海底隧道,一般来说都是从海底两端挖,隧道越长,用时及投资额度都以等比数列规律增加(若能用上几个岛做通道或通风口可能会好些)。所以全隧方案,隧道长 125 km,用时太长,多用 1 倍以上的修建时间;投资巨大(2 500 亿元),多用 1 倍以上的投资费用,并且如此长的海底隧道世界无先例,技术上难度大,遇到事故疏散及救援更困难,是不适宜的。

3.4 最佳方案是南桥北隧

最佳的建设方案是南桥北隧。桥隧总长约 113 km。本文建议的南桥北隧方案,不同于前人提议的

表 3 世界著名跨海隧道的修建用时及投资额度

Table 3 The tunneling time and investment of the famous sea-cross tunnels in the world

隧道名及长度/km	以日本修建 速度计/年	以英法修建 速度计/年	以青岛修建 速度计/年	投资额度	备注
日本青函隧道 54	24			7 000 亿日元 (约合当时人民币 400 亿元)	1988 完成
英吉利海峡隧道 53		8		150 亿美元 (约合当时人民币 1 000 亿元)	1994 完成
青岛胶州湾隧道 7.8			4.5	33 亿元	2011 完成
海峡通道北隧(大钦岛方案) 55	24	8	59	429 亿元(以青岛隧道计)	根据世界 3 个隧道估算
海峡通道北隧(砣矶岛方案) 70	33	11	93	684 亿元(以青岛隧道计)	根据世界 3 个隧道估算
海峡通道全隧方案 125	64	22	396	2 890 亿元(以青岛隧道计)	根据世界 3 个隧道估算

以北隍城岛作为桥隧连接地点的南桥北隧方案。关于南桥,最长的建桥线路是从蓬莱角沿庙岛群岛轴线至北隍城岛,桥长 68 km。但考虑到北隍城岛的岛体太小,仅 2.62 km²,并且岛的长轴是近东西向而不是近南北向。并且从该岛修建隧道可能下潜过陡,以及大钦岛与北隍城岛之间,水深较大,约 40~50 m。因此,可考虑从砣矶岛或大钦岛下挖隧道较有利。挖北隧,利于海上大船的通航,同时在砣矶岛(或大钦岛)和大连之间开通滚装船轮渡。南桥北隧方案,估计修建用时约为 8~12 年,总投资费用约为 1 000~1 200 亿元(其计算依据见表 4、表 5)。工程使用年限以 100 年计。

砣矶岛是庙岛群岛的第四大岛,面积 7.05 km²,可作为首选的桥隧连接地点,蓬莱角至砣矶岛平均水深仅 20 m,较利于修桥。桥长约 43 km,隧道长约 70 km,桥隧和轮渡布局见图 1。但缺点是桥短隧长,投资及挖掘用时比大钦岛方案略大。

大钦岛是庙岛群岛的第五大岛,面积 6.44 km²,岛的长轴 4.9 km 并且与修建线路一致,可做次选的桥隧连接地点,桥长约 58 km,隧道长约 55 km,桥隧和轮渡布局见图 7。缺点是在砣矶岛和大钦岛之间水深加大,水深约 35~40 m,修桥难度增加。

南桥北隧方案,优点如下:

(1) 投资少,效益高

渤海海峡南桥北隧修南桥的费用见表 4,以修

建青岛胶州湾跨海大桥和杭州湾跨海大桥的平均单价计算,砣矶岛方案为 131 亿元,若考虑当今的建桥投资,需要考虑进一步提高桥的坚固性及涨价因素(其实,近 10 年来,建筑材料水泥、钢铁几乎没有涨价,而只是人工费涨价较明显),按 1.5 倍计算投资额度为 196 亿元。大钦岛方案为 176 亿元,若考虑当今的建桥投资,需要考虑进一步提高桥的坚固性及涨价因素,以及砣矶岛至大钦岛段水深加大的因素,按 2 倍计算投资额度为 352 亿元。

修北隧的费用及南桥北隧的总费用见表 5。如前文所述,以青岛胶州湾跨海隧道价格计,并以等比级数考虑了隧道加长的费用。大钦岛方案修建 55 km 北隧需 429 亿元(见表 2)。若考虑当今的建隧投资,需考虑进一步加固及涨价因素,按 1.5 倍计作为实际投资额度是 644 亿元,再加上修 58 km 南桥的费用 352 亿元(表 4),这样大钦岛方案南桥北隧合计总投资额度为 996 亿元。

砣矶岛方案修建 70 km 的北隧需 684 亿元(见表 2),若考虑当今的建隧投资,需考虑进一步加固及涨价因素,按 1.5 倍计算是 1 026 亿元,再加上修 43 km 南桥的费用 196 亿元(表 4),这样砣矶岛方案南桥北隧合计总投资额度为 1 222 亿元。可见,修建南桥北隧,当今的投资额度为 1 000~1 200 亿元是基本合理的。这比全隧方案节约了大约 1 300~1 500 亿元。

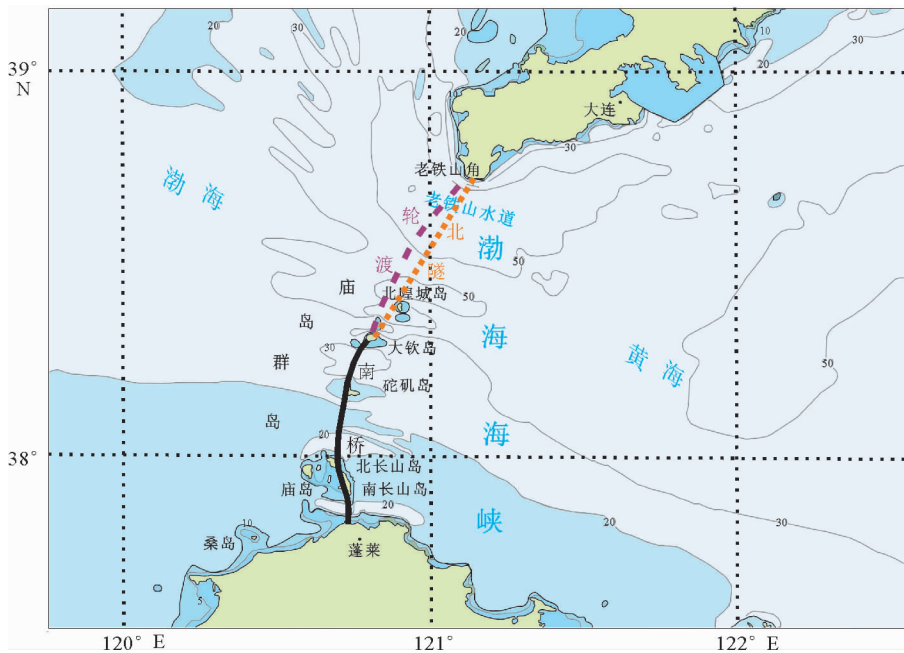


图 7 若选大钦岛作为桥隧连接点的南桥北隧和轮渡方案示意图

Fig. 7 The sketch map of the bridge-in-south and tunnel-in-north and ferry across the Bohai Strait if Daqin Island is taken as the bridge-tunnel connection place

表 4 渤海海峡跨海通道的南桥费用核算

Table 4 The cost for bridge-in-south of the cross-strait path in Bohai Strait

桥隧名称	总长/km	实际跨海长度/km	总投资/ 亿元	平均造价/ (亿元/km)	备注
青岛胶州湾跨海大桥	35.4	26.75	99	2.80	2011年6月30日建成通车
杭州湾跨海大桥	36	32	118	3.28	2008年5月1日建成通车
渤海海峡跨海桥隧的南桥(砣矶岛方案)	预计 43	25.5(沿岛群轴线并加岛 43)	131	3.04	以青岛、杭州湾跨海大桥平均单价计
渤海海峡跨海桥隧的南桥(砣矶岛方案)	预计 43	25.5(沿岛群轴线并加岛 43)	196	4.56	按平均价格的 1.5 倍计
渤海海峡跨海桥隧的南桥(大钦岛方案)	预计 58	36(沿岛群轴线并加岛 58)	176	3.04	以青岛、杭州湾跨海大桥平均单价计
渤海海峡跨海桥隧的南桥(大钦岛方案)	预计 58	36(沿岛群轴线并加岛 58)	352	6.07	按平均价格的 2 倍计 (平均水深更大,故按 2 倍计)

表 5 渤海海峡跨海通道的北隧费用核算及跨海通道总费用

Table 5 The cost for tunnel-in-north of cross-strait path and the total cost of the path in Bohai Strait

桥隧名称	总长/km	实际跨海长度/km	总投资/ 亿元	平均造价/ (亿元/km)	备注
青岛胶州湾跨海隧道	7.8	3.95	33	4.23	2011年6月30日建成通车
渤海海峡跨海桥隧的北隧(砣矶岛)	预计 70	67	684	9.77	以青岛胶州湾跨海隧道价格计, 并以等比级数考虑了隧道加长的费用
渤海海峡跨海桥隧的北隧(砣矶岛)	预计 70	67	1026	14.66	按上述价格的 1.5 倍计
渤海海峡跨海桥隧的北隧(大钦岛)	预计 55	52	429	7.8	以青岛胶州湾跨海隧道价格计, 并以等比级数考虑了隧道加长的费用
渤海海峡跨海桥隧的北隧(大钦岛)	预计 55	52	644	11.7	按上述价格的 1.5 倍计
渤海海峡跨海南桥北隧(砣矶岛)合计	预计 113		1222		桥隧价格各按 1.5 倍计的桥隧投资总合计
渤海海峡跨海南桥北隧(大钦岛)合计	预计 113		996		修桥价格按 2 倍,修隧价格按 1.5 倍计的桥隧投资总合计

(2) 施工时间短

在海水较浅区域,修桥价格便宜,场地宽阔,容易施工且施工周期短。砣矶岛作为首选的桥隧连接地点,南桥的长度,实际跨海距离才 25.5 km,比青岛跨海大桥、杭州湾跨海大桥实际跨海距离还短,若连岛一起考虑,也仅是杭州湾跨海大桥的 1.2 倍。大钦岛作为次选的桥隧连接地点,南桥的长度也仅是杭州湾跨海大桥的 1.5 倍而已。修建南桥不应太难。只要按相应的工程设防进行修建,运行也会像杭州湾跨海大桥、青岛胶州湾跨海大桥一样正常。

挖海底隧道价格较昂贵,施工场地狭小,难度大,周期长。基本上是海底隧道的长度决定了施工周期。挖 70 km(或 55 km)的北隧,北部的几个岛可利用做通风口,如果能够达到英法修建速度,约 8~12 年能够完成,而同时可进行 43 km(或 58 km)的修桥施工,修桥估计 5 年内是可以完成的。故总工期仍约 8~12 年,比全隧的 22 年工期(英法修建速度)节省了约 10 年以上的工期。工程使用年限一般以 100 年考虑。

(3) 阶段性施工就可见经济效益

利用 1~2 年时间,修通蓬莱角至南长山岛的长约 8 km 的大桥,就可解决内地居民去长岛的困难,也可解决南长山岛和北长山岛的 5 万居民的出行困难。利用 5 年建完至砣矶岛(或大钦岛)的南桥,就又方便了砣矶岛、大钦岛等地的居民出行。此时北隧虽然还没有建完,甚至北隧 8~12 年没有完成,还得多挖几年也不要紧。可先在砣矶岛或大钦岛开辟去大连的轮渡(滚装船轮渡汽车),距离 67 km 或 52 km,比现在的烟台至大连的轮渡已短了约一半距离,明显提高了轮渡效益(图 1、图 7)。这就是阶段性施工就可见经济效益。

而全隧方案,必须全建设完才能运行和见效益,这种差别是很大的。搞不好就会成了“烂尾隧道工程”。

(4) 海上的风、雾对南桥的交通影响不大

反对建南桥的理由一个是:海上雾大。我们做过几个月的海岛调查,没遇到特别大的雾,遇到雾时,经常是几千米或十几千米以外的海岛看不见,但近距离的能见度与陆上有雾或雾霾时似乎没有什么太大的差别。

反对建南桥的另一个理由是:海峡年平均大风日达60余天,故采用桥梁方案不利于“全天候”通行。其实,渤海是中国的内海,其风浪规模比东海、南海小。渤海海峡的南桥,受风浪的影响程度,应该比青岛胶州湾大桥大一些,但与杭州湾跨海大桥相差不多,但建桥的水深,比上述两个大桥深一些,这是值得注意的问题。

每年的台风,我国东海和南海沿海地区较多,渤海地区较少。当然,蓬莱、大连等海岸带的大风每年也有十几日至几十日。一般来说,渤海海峡的风也就比沿海陆地的风大1~2级。故海区的大风日数比沿海陆地的大风日数相差并不太大。陆地上没有大风,海上也不会有太大的风。海峡由于大风一年约60余天不能通行也基本属正常。例如,青岛跨海大桥每年禁止通行时间约为20~30天,遇大风、暴雨、浓雾等限制通行时间约在80天。可见海陆没有太大差别。另外如果海上确因风、雾较大不便通行,大桥因为经过了多个海岛,有足够的回旋余地和空间,这是非常有利的。

(5)“全天候”意义不大

支持全隧方案者,常以“全天候”这个美丽字眼来形容之。反对桥隧方案者,也多是以不能“全天候”来否定之。

全隧方案的隧道太长,花费了更多的金钱,多费了10年以上的挖掘时间(以最快的英法修建速度计),就是实现了全天候意义也不大,因为挖掘隧道多用了太多时间。

海上有较大风或较大雾时,两端陆地的高速可能由于陆地上的大风或雾霾原因早已封闭,所以有时海上的“全天候”已无实际意义。

况且,全天候也非常难以实现。火车隧道也经常出事故,也做不到全天候。英吉利海峡隧道1996年的一次大火灾,使隧道停运一个多月。

(6)南桥北隧,修建公路通道优先考虑

现在,世界最长的铁路隧道是穿越瑞士境内阿尔卑斯山的圣哥达隧道,长57.1 km,耗时17年建成。中国最长的铁路隧道是青藏铁路西宁格尔木二线新建关角隧道,位于青海省海西蒙古族藏族自治州天峻县境内,长32.65 km。耗时7年建成。

世界最长的公路隧道是挪威莱尔多隧道,长24.51 km。中国最长的公路隧道是秦岭终南山公路隧道,长18.02 km。

南桥北隧,公路通道比铁路通道更急需,修建公路通道优先。随着时代的发展,铁路客运随着高铁的兴起,近几年发展兴旺。但铁路货运则正好相反,

市场需求占有量在逐年的下降。近年来随着高速公路的迅速发展,零散的货物比较集中于走公路运输,而之前有铁路货运的大宗物资却由水路运输以及公路运输所取代。这是由于铁路运输周期长,得装满一辆火车才开运,卸货也比较麻烦,不如载重汽车方便,装满一汽车就走,方便快捷。现在看来,铁路货车运量不足,载人高铁的主要人流去向是京津。而海峡跨海通道最需要的是汽车通道,从减少京津雾霾考虑也是汽车。修建公路通道更急需。

关于隧道的修建技术,已有多人做过讨论,非常关键的问题是通风技术^[47-51]。南桥,毫无疑问是修建公路通道的南桥。北隧有两种选择,即公路或铁路。如果通风等技术可能的话,应首先考虑建公路通道北隧,效率高。

如果由于通风等技术上的原因,北隧的公路通道不能实现的话,那么,退而求其次,修建铁路通道北隧,用火车背负汽车过北隧。

一般认为,建铁路隧道,汽车可通过穿梭列车背负式通过隧道。但是,汽车开上火车背负得需要排队等待、开上火车并固定等时间。并且,大的载重汽车能否开上火车背负还是个问题。每辆火车运行之间也有一定时间间隔,这样通过火车背负式运汽车过北隧,其效率可能低于直接的公路北隧。铁路北隧的汽车运载能力不足,也只有通过砬砬岛(或大钦岛)至大连的滚装船轮渡汽车来补充。当然,铁路北隧除了主要运载汽车外,还可开通少量客运和货运。

南桥,应先建公路的南桥。将来根据发展情况如果确实需要,再加建铁路的南桥。北隧,可根据通风等技术,有公路北隧和铁路北隧两种选择,当然应优先考虑公路北隧。

总之,我们认为,不管是修公路通道还是修铁路通道,或者公路通道和铁路通道都要修,都应该是南桥北隧为最佳方案。

4 结论

在渤海海峡修建跨海桥隧非常必要,经济效益高,以公路通道计算,若能达到日均40 000辆的车流量,建成后每年将节减大约170亿元的燃油费及相应的燃油污染排放,约7年即可回收投资成本,并可适度减轻京津冀地区的雾霾水平和交通拥挤状态。渤海海峡的海洋地质环境适合修建南桥北隧跨海通道,南桥以地震基本烈度Ⅷ度设防,并能抗12级或以上台风及相应浪流,修建桥墩尽量避开断裂带;北隧以地震基本烈度Ⅶ度设防。最佳线路是沿

庙岛群岛轴部修建,砣矶岛面积较大,其以南平均水深仅 20 m,是首选的桥隧连接地点,大钦岛可作为次选的桥隧连接地点并作为对比方案考虑。全隧方案由于隧道太长,投资巨大,挖掘用时太多等原因不适宜。南桥北隧方案,估计修建用时约为 8~12 年,总投资约为 1 000~1 200 亿元,工程使用年限以 100 年计。如果技术上可能,可考虑直接修公路隧道。不管是修公路通道还是铁路通道,或者是公路通道和铁路通道都要建,最佳方案都应该是南桥北隧,这样较省钱省时效率高,并可在修建期间阶段性地产生经济效益。

致谢:中国地质大学(北京)万天丰教授、中国地质调查局青岛海洋地质研究所所长吴能友研究员审阅了该文,并提出了宝贵意见,在此致谢。

参考文献(References)

- [1] 尹延鸿. 天然的海上大花园——走进长山列岛国家地质公园[J]. 国土资源科普与文化, 2015(2): 42-53. [YIN Yanhong. The natural park on the sea-coming into the Changshanliedao national geological park[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2015(2): 42-53.]
- [2] 尹延鸿. 对河北唐山曹妃甸浅滩大面积填海的思考[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(3): 1-10. [YIN Yanhong. Some questions about large-area marine reclamation land in Caofeidian bank, Tangshan of Hebei Province[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(3): 1-10.]
- [3] 尹延鸿. 曹妃甸浅滩潮道保护意义及曹妃甸新老填海规划对比分析[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 200-209. [YIN Yanhong. The significance of protection of the Caofeidian shoal tidal channel and comparison of the new Caofeidian plan of sea reclamation land to the old one[J]. Geoscience, 2009, 23(2): 200-209.]
- [4] 尹延鸿, 高茂生, 尹聪. 河北唐山曹妃甸浅滩潮道(纳潮河)开通过程及开通意义[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 40-46. [YIN Yanhong, GAO Maosheng, YIN Cong. Opening up of the tidal inlet (Nachao River) on Caofeidian Shoal in Tangshan, Hebei Province and its significance[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(3): 40-46.]
- [5] 尹延鸿, 褚宏宪, 李绍全, 等. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道初期老龙沟深槽的地形变化[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(5): 1-6. [YIN Yanhong, CHU Hongxian, LI Shaoquan, et al. An analysis of the topographical change of Laolonggou deep trough in the initial stage of Caofeidian reclamation project after blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(5): 1-6.]
- [6] 尹聪, 褚宏宪, 尹延鸿. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道中期老龙沟深槽的地形变化特征[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(5): 15-20. [YIN Cong, CHU Hongxian, YIN Yanhong. Topographic change of Laolonggou deep trough in the middle stage of Caofeidian reclamation project for blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(5): 15-20.]
- [7] 尹延鸿, 白伟明, 褚宏宪, 等. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道后期老龙沟深槽的地形演化趋势[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 1-5. [YIN Yanhong, BAI Weiming, CHU Hongxian, et al. Recent topographic change of Laolonggou deep trough after Caofeidian Reclamation project blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 1-5.]
- [8] 尹延鸿. 山东省海岸带不同岸段的填海造地适宜性分析及需要注意的问题[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(12): 35-39. [YIN Yanhong. A discussion on land reclamation along the coast of Shandong and its problems[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(12): 35-39.]
- [9] 尹延鸿, 尹聪. “上升效益极限填海面积”概念的提出与讨论[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(6): 47-50. [YIN Yanhong, YIN Cong. The new concept of “benefit limited reclamation area” [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(6): 47-51.]
- [10] 尹延鸿, 尹聪. 围海及填海造地的起因、发展及问题[J]. 自然杂志, 2014, 36(6): 437-444. [YIN Yanhong, YIN Cong. The reasons, development and problems of the land reclamation[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(6): 437-444.]
- [11] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Bohai Geology [M]. Beijing: Ocean Press, 1985.]
- [12] 赵铁虎, 高小惠, 齐君. 渤海海峡跨海通道区浅地层结构探测[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 38-42. [ZHAO Tiehu, GAO Xiaohui, QI Jun. Shallow Structure characteristics in trans-sea channel of Bohai Strait[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 38-42.]
- [13] 陈晓辉, 张训华, 李日辉, 等. 渤海海峡海域灾害地质研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 11-19. [CHEN Xiaohui, ZHANG Xunhua, LI Rihui, et al. A preliminary study on hazardous geology in the Bohai Strait[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(1): 11-19.]
- [14] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous Clinof orm off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [15] 蒋东辉, 高抒. 渤海海峡潮流底应力与沉积物分布的关系[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 663-667. [JIANG Donghui, GAO Shu. Relationship between the tidally-induced near-bed shear stress and the distribution of surficial sediments in The Bohai Strait[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 663-667.]
- [16] 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 159-168. [WAN Tianfeng, ZHU Hong, ZHAO Lei, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang Fault Zone: a review[J]. Geoscience, 1996, 10(2): 159-168.]

- [17] Lin A M, Miyata T, Wan T F. Tectonic characteristics of the central segment of the Tancheng-Lujiang fault zone, Shandong Peninsula, Eastern China [J]. *Tectonophysics*, 1998, 293(1-2): 85-104.
- [18] Wan T F. Intraplate Deformation, Tectonic Stress Field and Their Application for Eastern China in Meso-Cenozoic [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994: 1-156.
- [19] 万天丰. 中国大地构造学纲要 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-387. [WAN Tianfeng. *Outlines of China Tectonics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-387.]
- [20] Wan T F. The Tectonics of China; Data, Maps and Evolution [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 1-501.
- [21] Wan T F. Recent tectonic stress field, active faults and geothermal fields (hot-water type) in China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1984, 22(3-4): 287-300.
- [22] Wan T F, Zhu H. Cretaceous-early Eocene tectonic stress field in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1989, 2(3): 227-239.
- [23] Wan T F. Thought on the Research of Plate Tectonic Dynamics [M]. 1994 Annual Report, The Laboratory of Lithosphere Tectonics and Its Dynamics (MGMR). Beijing: Seismological Publishing House, 1995: 52-53.
- [24] 李西双, 刘保华, 赵月霞, 等. 渤海海域晚更新世—全新世的活动构造 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 52-59. [LI Xishuang, LIU Baohua, ZHAO Yuexia, et al. Late Pleistocene-Holocene Submarine active structures in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(5): 52-59.]
- [25] 赵铁虎, 齐君, 梅赛, 等. 渤海海峡跨海通道地质条件调查与分析 [J]. *科技导报*, 2016, 34(21): 39-47. [ZHAO Tiehu, QI Jun, MEI Sai, et al. Survey and analysis of the Geological conditions in trans-sea channel of Bohai strait [J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(21): 39-47.]
- [26] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1: 400 万) [M]. 北京: 地震出版社, 1990. [China Earthquake Administration. *Earthquake Intensity Zoning Map of China (1/4, 000, 000)* [M]. Beijing: Seismological Press, 1990.]
- [27] 胡政, 丁东, 冯志泽. 渤海南部晚第四纪地层和活动构造 [M]. 中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1994. [HU Zheng, DING Dong, FENG Zhize. *The Late Quaternary Strata and Active Tectonics in the South of Bohai Sea* [M]. Seismological Society of China, Seismological Geology, Specialized Committee. *Research on the Active Fault in China*. Beijing: Seismological Press, 1994.]
- [28] 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 郯庐活断层的分段及其大震危险性分析 [J]. *地震地质*, 1994, 16(2): 121-126. [LI Jialing, CHAO Hongtai, CUI Zhaowen, et al. Segmentation of active fault along the Tancheng-Lujiang fault zone and evaluation of strong earthquake risk [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(2): 121-126.]
- [29] 吕悦军, 彭艳菊, 沙海军. 渤海及邻区地震活动环境 [C]//中国地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 2003: 38-44. [LV Yuejun, PENG Yanju, SHA Haijun. *Seismicity environment in Bohai and its adjacent regions* [C]//The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*. Beijing: The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, 2003: 38-44.]
- [30] 强祖基, 叶士忠. 1668年山东莒县-郯城 $8^{1/2}$ 级大震区的活动断裂特征 [J]. *地震地质*, 1985, 7(2): 19-26. [QIANG Zuji, YE Shizhong. The characteristics of the active faults in the 1668 great earthquake ($m = 8^{1/2}$) area, Juxian-Tancheng, Shandong Province [J]. *Seismology and Geology*, 1985, 7(2): 19-26.]
- [31] 赵兴兰, 魏光兴, 郭爱香, 等. 渤海地区近期地震活动特征及其趋势分析 [J]. *地震学刊*, 1990(3): 56-59. [ZHAO Xinglan, WEI Guangxing, GUO Aixiang, et al. The characteristics of the recent seismicity in the Bohai Sea region and the analysis of the prospective seismicity in the region [J]. *Journal of Seismology*, 1990(3): 56-59.]
- [32] 王梦恕, 宋克志. 渤海湾跨海通道建设的紧迫性及现实条件和初步方案 [J]. *北京交通大学学报*, 2013, 37(1): 1-10. [WANG Mengshu, SONG Kezhi. *Urgency and current constructions condition and preliminary scheme of Bohai strait cross-sea channel* [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, 37(1): 1-10.]
- [33] 宋克志, 邓建俊, 王梦恕. 烟大渤海海峡隧道的可行性研究初探 [J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 4(1): 121-129. [SONG Kezhi, DENG Jianjun, WANG Mengshu. *Feasibility study on Bohai Strait tunnel connecting Yantai and Dalian* [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 4(1): 121-129.]
- [34] 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. [SONG Kezhi, WANG Mengshu. *Feasibility study on Bohai channel tunnel connecting Yantai and Dalian* [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2006, 43(6): 1-8.]
- [35] 卢光杰, 田宝红. 渤海海峡跨海通道建设方案研究 [J]. *铁道标准设计*, 2013(8): 37-41. [LU Guangjie, TIAN Baohong. *Research on development scheme of sea-crossing Railway through the Bohai channel* [J]. *Railway Standard Design*, 2013(8): 37-41.]
- [36] 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. [WANG Mengshu. *Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel—discussion on construction scheme of Taiwan Strait undersea railway tunnel* [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2161-2172.]
- [37] 谭忠盛, 王梦恕. 渤海海峡跨海隧道方案研究 [J]. *中国工程科学*, 2013, 15(12): 45-51. [TAN Zhongsheng, WANG Mengshu. *Scheme study of Bohai Strait cross-sea tunnel* [J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(12): 45-51.]

- [38] 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. [WEI Liqun, LIU Xinhua. Research on Several Key Problems for Bohai Trans-strait Passageway[M]. 2nd ed. Beijing: Economic Science Press, 2009.]
- [39] 谭忠盛, 吴永胜, 万飞. 渤海海峡跨海工程自然条件分析[J]. 中国工程科学, 2013, 15(12): 32-38. [TAN Zhongsheng, WU Yongsheng, WAN Fei. Analysis of natural condition for Bohai Strait cross-sea engineering[J]. Engineering Sciences, 2103, 15(12): 32-38.]
- [40] 魏礼群, 柳新华, 刘良忠. 渤海海峡跨海通道若干重大问题研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2007. [WEI Liqun, LIU Xinhua, LIU Liangzhong. Research Several Key Problems for Bohai Trans-strait Passage[M]. Beijing: Economy Science Press, 2007.]
- [41] 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): 78-83. [LIU Xinhua, LIU Liangzhong, HOU Xianming. A century review and prospect of the trans-straits passages at home and abroad[J]. Science and Technology Review, 2006, 24(11): 78-83.]
- [42] 魏礼群, 柳新华. 渤海海峡跨海通道研究[M]. 2 版. 北京: 经济科学出版社, 2009: 85-87. [WEI Liqun, LIU Xinhua. Research on Bohai Trans-strait Passage[M]. 2nd ed. Beijing: Economy Science Press, 2009: 85-87.]
- [43] 宋克志, 张广东, 李传明. 渤海海峡跨海通道可视化仿真建模研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 107-112. [SONG Kezhi, ZHANG Guangdong, LI Chuanming. Visualization simulation modeling for trans-sea channels of Bohai Strait[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 107-112.]
- [44] 王梦恕. 台湾海峡海底铁路隧道建设方案[J]. 隧道建设, 2008, 28(5): 517-526. [WANG Mengshu. Construction scheme of Taiwan strait sub-sea railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(5): 517-526.]
- [45] 洪开荣. 水下盾构隧道硬岩处理与对接技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(3): 361-365. [HONG Kairong. Case study on hard rock treatment technology and shield docking technology in boring of underwater tunnels [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 361-365.]
- [46] 王梦恕. 不同地层条件下的盾构与 TBM 选型[J]. 隧道建设, 2006, 26(2): 1-3, 8. [WANG Mengshu. Type selection of shield TBMs and hard rock TBMs for different geological conditions[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(2): 1-3, 8.]
- [47] Wang X J, Liu G. Research on strait crossing solution of submerged floating tunnel (underwater continuous girder bridge)[J]. Procedia Engineering, 2016, 166: 76-82.
- [48] 王梦恕. 水下交通隧道的设计与施工[J]. 中国工程科学, 2009, 11(7): 4-10. [WANG Mengshu. Design and construction technology of underwater tunnel[J]. China Engineering Sciences, 2009, 11(7): 4-10.]
- [49] 张志刚, 刘洪洲. 公路沉管隧道的发展及其关键技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(5): 343-347. [ZHANG Zhigang, LIU Hongzhou. Development and key technologies of immersed highway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(5): 343-347.]
- [50] 管敏鑫. 沉管隧道在越江工程中的地位以及有关的新认识[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(1): 1-4, 9. [GUAN Minxin. The role of the tunneling by immersed tube method in the river-crossing engineering and some related new cognitions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(1): 1-4, 9.]
- [51] 项贻强, 薛静平. 悬浮隧道在国内外的研究[J]. 中外公路, 2002, 22(6): 49-52. [XIANG Yiqiang, XUE Jingping. The research of floating tunnel in China and foreign countries[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2002, 22(6): 49-52.]

MARINE GEO-ENVIRONMENT ANALYSIS OF THE PROPOSED BRIDGE-TUNNEL PATH SYSTEM ACROSS THE BOHAI STRAIT AND SUGGESTIONS ON CONSTRUCTION SCHEMES

YIN Yanhong¹, YE Siyuan¹, ZHAO Tiehu¹, YIN Cong²

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Geological Survey of China, Qingdao 266071;

2. North China Sea Marine Technical Support Center of SOA, Qingdao 266033)

Abstract: Surveys of earth crust stability, marine geo-environment and island geology along the Bohai Strait suggest that the Bohai Strait is feasible for cross-strait path construction, and the scheme of “bridge-south and tunnel-north” is the best and optimum one for construction among others. Construction of such a path way will certainly bring very high economic benefits to the region as well as to the country. A rough calculation for a highway with possible traffic flow of 40 000 vehicles per day suggests that 17 billion RMB of fuel charge could be saved every year with the facility, and it takes only six years to recover the investment cost in the years to come. It will certainly relieve the traffic pressure around the region and as the result reduce the haze caused by fuel emission. The optimum route for such a path is along the axis of the Miaodao

islands because of more stable earth crust, thinner sediment cover, and shorter actual cross-sea distance there. From the Penglaijiao to the Tuoji Island the water depth is only 20m on average, while the water depth from Tuoji Island to Daqin Island is 35~40 m, and from the Daqin Island to the Laotieshanjiao 50-55m on average. It is absolutely feasible for construction of a bridge system in the south. Our suggested scheme of "bridge-south and tunnel-north" is completely different from the alternative proposal which prefers to take the Beihuangcheng Island as the connection point for the bridge and the tunnel though they also agree to the idea of bridge-south and tunnel-north. We prefer to have the bridge - tunnel connection at the Tuoji Island, which is 7.05 km². The Daqin Island can be the second choice of the connection place for the bridge and the tunnel. If the Tuoji Island is selected as the bridge-tunnel connection, the bridge will be 58km long and the tunnel is 55km, with the total up to 113 km. Upon the above consideration, it is estimated that 8~12 years is needed to complete the construction with a total cost of 100~120 billion RMB if the service life of the system is assumed as 100 years. The Bohai Sea, as a continental sea of China, has weaker stormy waves comparing to the East China Sea and the South China Sea. The impact of stormy wave on the bridge across the Bohai Strait is supposed to be larger than that on the Jiaozhou Bay Bridge, but almost the same as the Hangzhou Bay Bridge, even the water depth of Bohai Strait is deeper. It is estimated that there would be more than 60 windy and foggy days every year when the traffic will be suspended in the Bohai Strait, almost the same as the period and time on the two land ends nearby. Therefore, it will not bring too much traffic problems to the region. Anyway, the weather should not be the reason to deny the scheme of "bridge-south and tunnel-north". The cost for bridge building is lower in the shallower water area, and the engineering will also proceed easily and complete in a shorter time in this broad zone. Moreover, tunneling costs more, needs more complicated engineering operation and of course much longer time. In fact, the length of tunnel is the factor which will decide the time required by the whole project. The scheme of "tunnel only" claims that it has the reputation of "performance under all the weather condition", but the "tunnel", which is 125 km long totally, will cost 250 billion RMB, at least twice over the scheme of "bridge-south and tunnel-north", and need twice or even more time for construction. And the economic benefits can only be generated after the whole project completed. So "tunnel only" scheme is costly, time-consuming and inefficient, and thus unrealistic for the time being. The developing trend of this area shows that the transport by highway rises rapidly, as the transport by railway declines sharply, so highway has the priority over the railway as a more realistic consideration. In the proposed scheme of "bridge-south and tunnel-north", bridge-will be constructed only for highway, but the tunnels in the north, there might be two alternatives. If some of the technical problems, such as ventilation, can be solved, the tunnel in the north should take highway as the priority. If the problems cannot be solved, the option of railway has to be acceptable. The trains may bring vehicles through the tunnel, of course, it is less efficient than the highway tunnel which may bring vehicles running through directly. The reduced transport capacity can be compensated by ferry transportation. In conclusion, no matter which type of path is to be built, highway or railway or both, the optimum scheme is the system with bridge-south and tunnel-north, which will be economic, time-saving and efficient, with economic benefits produced during different construction stages. The south bridge should be designed and constructed according to a basic seismic intensity of VIII and a typhoon attack of 12 degree and the associated stormy waves. The bridge pier should keep a distance as far as possible to faults and fault zones. The north tunnel should be designed according to the basic seismic intensity of VII. To sum up, the shallower water in the south is good for bridge construction, and the "bridge-south and tunnel-north" scheme will make a perfect cross-strait path; which will be really economic, time-saving and efficient, and benefits will be produced during each stages of construction.

Key words: cross-strait path; bridge-south and tunnel-north; marine geo-environment; scheme of construction; Bohai Strait