

渤海海峡跨海工程自然条件分析

谭忠盛, 吴永胜, 万 飞

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 在收集渤海海峡的气象水文、地形地貌、地层岩性、地质构造及地震活动等资料,以及现场调研的基础上,分析了渤海海峡跨海工程的建设条件。由于海峡雾大、风大,年平均大风日达67.8 d,故采用桥梁方案不利于全天候通行。由于海峡岛屿众多,且南北向成一字形分布,跨海工程线位可选择连岛方案以减小建设难度和成本。海峡第四系地层稳定性差,且第三系地层主要为玄武岩,大孔隙结构,分布极不均匀,最厚达70 m,这两套地层对隧道埋深的选择有较大影响。对于蓬莱—旅顺线位,场址附近没有活动断层,地层相对稳定。这些资料可为渤海海峡跨海通道方案的初步研究提供参考。

[关键词] 渤海海峡;跨海工程;气象条件;地质条件

[中图分类号] U45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0032-07

1 前言

渤海是中国最大的内海,从辽东半岛沿海到胶东半岛,三面大陆环绕状如英文字母C,如图1所示。渤海海峡是指旅顺到蓬莱之间的峡湾海域,成为山东乃至华东到东北地区的海上天堑。渤海海峡是渤海与黄海的天然分界线,它西面与渤海相连,东面与黄海毗邻。庙岛群岛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,是外海水道进入渤海的主要通道。

环渤海地区公路、铁路交通网较发达,但有缺口的C形交通,从东北大连到烟台、青岛铁路要多绕行1 500 km,高速公路要多绕行1 600 km。因此,渤海海峡跨海通道的研究,就是自20世纪70年代初至今,一直是中国经济和社会发展所面临的一项重大研究课题。设想利用渤海海峡的有利地理条件,从山东蓬莱经长岛至辽宁旅顺,建设铁路和公路相结合的跨越渤海的直达快捷通道,将有缺口的C形交通变成四通八达的D形交通,化天堑为通途。



图1 渤海海峡地图

Fig.1 Bohai Strait map

渤海海峡跨海工程的建设条件对桥隧比选、线位比选及纵横断面比选方案的确定十分重要,但目前该项目还处于初步研究阶段,还缺乏有关渤海海峡自然条件的具体数据,特别是地质条件,也没有物探及钻探资料。本文只是将能收集到的部分资料加以整理分析,为现阶段方案研究提供依据。

[收稿日期] 2013-10-22

[作者简介] 谭忠盛(1963—),男,广西梧州市人,博士,教授,博士生导师,主要从事隧道及地下工程方面的研究工作;

E-mail: zstan@vip.sina.com

2 渤海海峡气象及水文

1) 气温^[1,2]。渤海海峡气温变化有明显的“大陆性”,受陆地、水文和气候的影响十分显著,显示出秋温高于春温,春寒夏暖的特点。渤海海峡历年平均气温为11.9℃。最高年平均气温为12.8℃,最低年平均气温为10.7℃。极端最高气温为36.5℃,极端最低气温为-13.3℃。一年中1月份平均气温最低,为-1.6℃;8月份平均气温最高,为24.5℃。

2) 降水量^[2]。渤海海峡平均年降水量为560~916 mm,丰枯年降水量相差3~5倍,降水量年内分配也不均。年平均降水量为541.3 mm,平均降水天数为63 d,多集中在6—9月,这4个月的降水量之和占年降水量的70.8%,其中7月、8月降水量最大,12月至翌年3月降水量最少,这4个月降水量之和仅占年降水量的6.7%。其次,降水量的年变化也较为显著,有记录的年最大降雨量达881.4 mm(1973年),较年平均值高出323.6 mm;年最小降水量为282.3 mm(1965年),较年平均值低275.5 mm。

月最大降水量为328.3 mm(1963年7月),月最小降水量为0(1963年2月);日最大降水量为197.4 mm(1973年7月24日)。

3) 相对湿度^[2]。渤海海峡相对湿度的年变化振幅在60%~85%。其中7—8月最大,为85%;12月最小,为60%。年平均相对湿度为67%。年平均绝对湿度为11.6 mbar(1 mbar=100 Pa),其中8月最高,为25.6 mbar;1月份最低,为3.4 mbar。相对湿度≤20%的日数平均为2.9 d;相对湿度≥80%的日数平均为67.9 d。

4) 海雾^[2]。渤海海峡能见度普遍良好,但海峡全年都有雾出现,4—7月是雾季,其中7月雾日最多,月均雾日为4.4 d;9月至翌年1月雾日最少,10月没有出现雾日。雾的日变化比较显著,夜间至早晨雾易生成或发展,且雾最浓。一般情况下,雾有60%~80%只持续1~4 h,绝大多数在上午9时前后趋于消散。渤海海峡逐月能见度频率见表1。

表1 渤海海峡逐月能见度频率表

Table 1 The monthly visibility frequency table in Bohai Strait

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	%
< 0.5 n mile	0.76	1.10	1.89	2.25	1.01	0.63	0.77	0.45	0.34	0.20	0.27	0.47	
< 2 n mile	1.79	1.96	3.42	3.92	2.01	1.73	1.03	1.63	1.01	0.52	1.10	1.02	
> 5 n mile	93.6	93.0	91.0	90.8	93.8	96.1	97.4	96.2	96.7	97.4	96.4	96.8	

5) 海风^[2]。渤海海峡具有典型的季风性气候特征,海峡地处风道,属台风影响区,平均大风日67.8 d;全年大风日数冬季最多,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。渤海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,有时一个月能出现28 d大风。1975—2005年渤海海峡各月大风平均最长持续日数见图2,1995—2005年渤海海峡日最大、极大风力概率分布见图3。

6) 海水温度和盐度^[2-4]。年平均水温为11.5℃。2月平均水温最低,为2.5℃;8月最高,为22.1℃。3月上旬至8月下旬为升温期,9月上旬至翌年2月下旬为降温期。累年平均盐度为31.33。一年中,2—3月为高盐期,2月最高,达31.82;7—9月为低盐期,8月最低,为30.49。

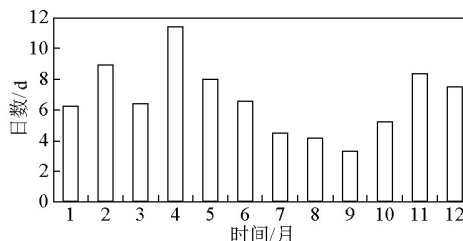


图2 1975—2005年渤海海峡各月平均大风最长持续日数
Fig.2 Average of longest wind days of each month in Bohai Strait during 1975—2005

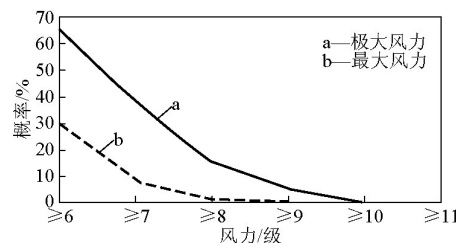


图3 1995—2005年渤海海峡日最大、极大风力概率分布
Fig.3 Probability distribution of daily maximum and great wind in Bohai Strait during 1995—2005

7)海流及波浪^[3-6]。全年多风浪,累年频率为99%;涌浪较少,累年频率为63%。风浪频率的逐月分布无明显变化,而涌浪频率差异较大。春季涌浪最少,其中4月频率为50%,系全年最低;秋季最多,其中11月频率达78%,系全年最高。

8)对工程的影响分析。根据渤海海峡的气象

及水文条件,大风、大雾及暴雨等恶劣天气的时间较多,不利于海上通行,若采用桥梁方式通过渤海海峡将受到很大影响,不能确保全天候运营。日本的经验证明,当风速达到33 m/s(风力11级)时,可导致列车颠覆,无法保证铁路运输畅通无阻,因此制定了海上桥梁交通限制标准如表2所示。

表2 日本海上桥梁交通限制标准

Table 2 The maritime bridge traffic restrictions in Japan

天气	限速40 km·h ⁻¹	禁止通行
风	平均风速:15 m·s ⁻¹ 以上	平均风速:25 m·s ⁻¹ 以上
雨	连续雨量:200 mm以上 阵雨量:20 mm以上	连续雨量:250 mm以上 阵雨量:40 mm以上
雾	视程:100 m以上	视程:50 m以上
雪	初始积雪状态	严重积雪,并有飘雪妨碍视线
冻结	部分区间发生结冰	可看出结冰具有一定强度

3 渤海海峡水深及地形地貌

1)渤海海峡水深分布^[2,7,8]。渤海海峡平均水

深为25 m。南部各岛近岸的等深线为5 m,北部各岛近岸的等深线为10 m。冲蚀洼地深50 m,最深处老铁山水道85 m,见图4。

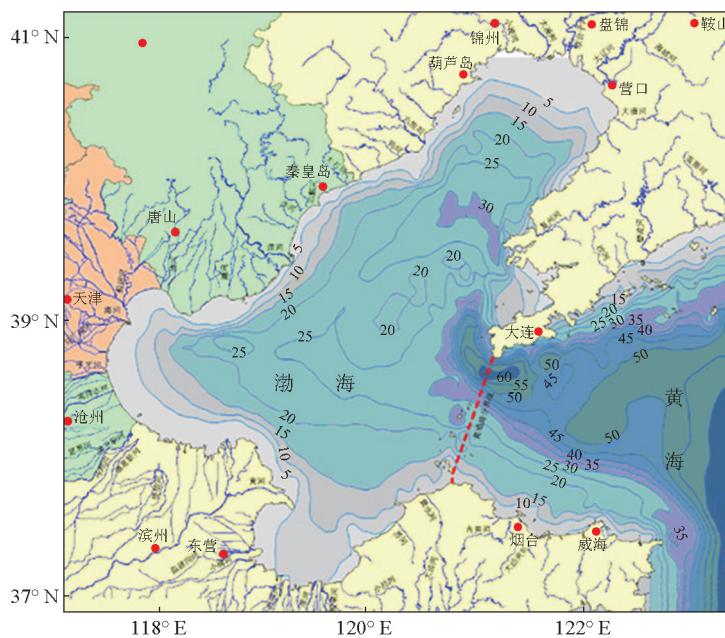


图4 渤海海峡水深分布(单位:m)

Fig.4 Depth of the water distribution in Bohai Strait (unit:m)

2)渤海海峡岛屿及水道^[2,9]。渤海海峡宽约106 km,分布着众多岛屿,其中庙岛群岛位于渤海海峡最狭处,基本呈一直线南北摆开,占据海峡3/5的海面,南距蓬莱角7 km,北距旅顺老铁山42 km。

庙岛群岛共有32个岛屿、66个明礁、16个暗礁、2处长滩。南北岛距56.4 km,东西宽30.8 km。庙岛群岛中较大的有北隍城岛、南隍城岛、大钦岛、砣矶岛、高山岛、大黑山岛、北长山岛和南长山岛等,分

布如图5所示,南长山岛面积最大为13.88 km²。



图5 主要岛屿及水道分布

Fig.5 Main island and channel distribution

渤海海峡共有14条水道,总的来说北部水道宽而深,南部水道窄而浅。主要的水道有:老铁山水道,位于北隍城岛和老铁山角之间,走向为东西,宽42 km,主航道水深42~78 m,最深处达85 m;隍城水道,位于南、北隍城岛之间,走向为东西,长5.6 km,宽1.5 km,主航道水深19~40 m;小钦水道,位于小钦岛与南隍城岛之间,走向为北西,长45 km,宽4 km,主航道水深40~50 m;北砣矶水道,位于砣矶岛与大钦岛之间,走向为东西,长115 km,宽10 km,主航道水深31~50 m,航道中部有一暗礁群;长山水道,位于北长山岛与砣矶岛之间,走向为东西,长17 km,宽7.5 km,主航道水深20~30 m;登州水道,位于南长山岛与蓬莱角之间,走向为东西,长31.5 km,宽6 km,主航道水深12~37 m。

3)海底地形地貌^[8-10]。渤海海峡的海底,由于受老铁山角和蓬莱角的扼制及岛屿的分割,构成水下沟脊横穿的崎岖地貌。海底地势自西向东,自南向北倾斜。老铁山水遭底部成V形沟谷,形成洼槽与垄脊并列相间延伸的地形。北隍城岛北侧的断裂下陷部位与V形沟谷的南坡相连。形成渤海海峡最深陡的洼槽,底部堆积着直径2~7 cm的砾石。庙岛海峡底部冲刷槽起伏大,有两个深凹,各岛之间水道的掘蚀洼地,平面轮廓多为规模较小的椭圆

形,有砂砾覆盖,两壁呈水平层理的河湖相淤泥层,部分也有基岩出露,如图6所示。

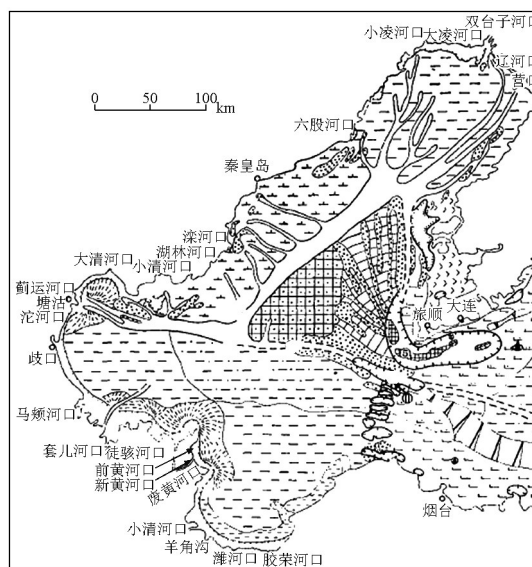


图6 渤海海峡海底地形地貌

Fig.6 Bohai Strait undersea topography

4)对线位选择的影响分析。由于渤海海峡有很多岛屿,且南北方向呈一直线摆开,岛屿周围的水深较浅,因此,无论桥梁方案或隧道方案在线位比选时,优先选择连岛方案都是有利的。对于桥梁方案,可以利用岛屿减少桥梁的长度,并且由于水深较浅可以减小桥墩高度。对于隧道方案,可以利用岛屿设置施工竖井及运营通风竖井,避免在海上设置人工岛而增加成本及建设的难度,同时由于水深较浅可以减小隧道深度。

由于老铁山水道水深最大,最大水深达85 m,为海上运输穿越渤海海峡的主要航道,这是工程方案比选主要考虑的因素之一。如果选择桥梁跨越,则必须考虑桥梁大跨度问题及深水桥墩修建的难度问题;如果选择隧道穿越,则必须考虑隧道的合理埋深问题及高水压隧道施工难题。初步分析,采用隧道方案穿越老铁山水道更优。

4 渤海海峡地层岩性

根据有关部门的研究资料^[10,11],渤海海峡区内出露地层为上元古界的“蓬莱群”,为一套浅变质岩系,上部为新生代的第三系和第四系地层。

1)上元古界蓬莱群。a. 豹山口组,下部以绢云千枚岩为主,夹含砾石英岩和长石石英岩,上部主要为紫色、青灰色板岩夹长石石英岩或石英岩,主

要分布于大竹山岛、小竹山岛、车由岛、砣子岛、高山岛、猴矶岛和砣矶岛等岛屿上。b. 辅子弁组, 下部主要为青灰色、紫色板岩与石英岩互层, 厚度较大。主要分布在大钦岛、小钦岛、南隍城岛、北隍城岛、南长山岛、北长山岛、大黑山岛、小黑山岛等岛屿上。

2) 新生代地层。第三系地层为两期火山喷发的玄武岩, 下部气孔构造发育, 具备有斑晶, 斑晶为伊丁石化橄榄石; 上部为深灰黑色、致密、坚硬的玄武岩, 偶见斑晶, 斑晶为辉石和伊丁石橄榄石。主要分布于大黑山岛, 最大厚度达 70 m。

第四系地层在多数岛屿及海底均有分布, 尤其在大钦岛、砣矶岛、大黑山岛、南长山岛较发育, 由南向北逐渐增厚。在海底的第四系地层最大厚度初步估计达 30 m 左右。第四系地层按其成因分为残积层、坡积-洪积层、海积层。

残积层由砾石和棕红色亚黏土组成, 厚度一般为 1~3 m, 系原岩风化物, 多分布于山丘地区。砾石主要为石英碎块, 磨圆度差, 呈棱角状。亚黏土由砂砾和黏土组成。

坡积-洪积层主要由砾石、含砾亚砂土和亚黏土组成, 分布于沟谷两侧、山坡地带和平缓处, 有的夹有砾石层, 富含钙质, 局部含姜结核。此层厚度变化大, 一般为 20~40 m, 有的厚达 60 多米。

海积层主要由砾石, 亚黏土, 粉砂、海洋生物遗骸和贝壳组成。分布于各大岛海岸线平缓处。砾石为石英岩, 多为球形。

渤海海峡地层剖面如图 7 所示。

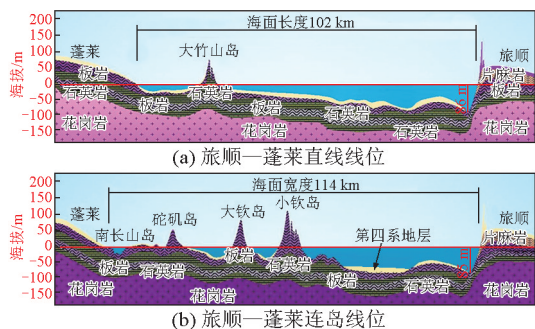


图 7 渤海海峡地层剖面

Fig.7 Geological profile in Bohai Strait

3) 对隧道埋深的影响分析^[11,12]。根据目前已有的渤海海峡地层岩性资料, 其第四系地层厚度较小, 结构松散, 没有隔水层, 稳定性差; 第三系地层

为火山喷发的玄武岩, 大孔隙结构, 透水性较强。因此, 不能采用浅埋隧道方案而把隧道设置在这两个地层中; 应该考虑采用深埋隧道方案, 把隧道设置于花岗岩地层中, 这样水压相对较小、地层相对稳定, 对隧道施工和运营都有利。

5 渤海海峡地质构造

1) 渤海海峡地质构造^[13,14]。渤海海峡及其两岸的断裂较为发育, 渤海海峡主要是 NE、NWW 向断裂^[11,12], 如图 8 所示。主要的断裂有郯庐断裂带, NNE 向, 其渤海段是控制渤海湾盆地东侧边界的断裂, 也称营口—潍坊断裂, 在莱州湾进入渤海后, 在渤海南部海域郯庐断裂主要分为两支: 张家口—蓬莱断裂带, NWW 向, 渤海中部及南部海域内的 NW 向断裂都被认为是张家口—蓬莱断裂带的次级断裂, 它们控制了海域内的次级构造凸起和凹陷, 并在渤海中部切过郯庐断裂带; 还有一组 NEE-EW 向断裂, 主要分布于凹陷或凸起上, 规模较大的如莱北断裂、垦北断裂、黄河口断裂等。

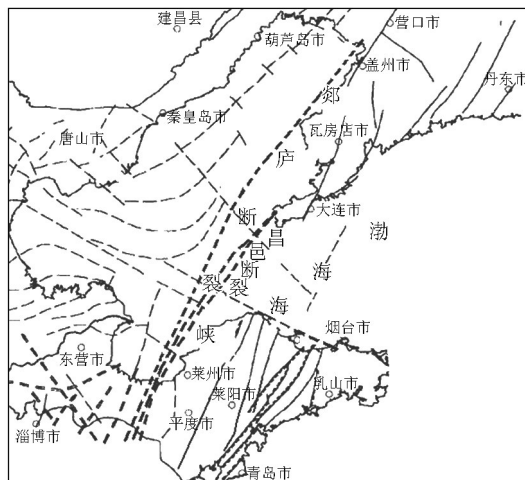


图 8 渤海海峡断裂构造分布

Fig.8 Bohai Strait fracture distribution

渤海海峡不仅前第四纪的断裂活动频繁、强烈, 而且第四纪以来存在一系列的继承性断裂活动, 尤其是晚更新世以来的构造运动比较突出。浅地层剖面反映的部分活动断层位于活动断裂带附近, 深部的错动引起上覆地层发生位移形成继承性的活动断层。渤海海峡北部及庙岛群岛海域分布着大量火成岩侵入体。渤海海峡海域第四纪曾经经历过多次火山活动, 晚更新世火山岩以凝灰岩为主。

2) 对隧道的影响分析^[11,12]。根据已有的渤海海

峡地质构造资料,穿岛方案线位的隧道必须穿越两组主要的NWW向断裂构造带,以及岛上一系列小的断裂构造带,而海峡最大的郟庐断裂带与隧道基本平行,且相距有40多千米,对隧道的影响相对较小。隧道施工穿越构造带的时候,突水突泥的风险较大,施工时必须做好地质预报及超前加固地层、堵水措施。

6 渤海海峡地震

1)渤海地区地震活动特征^[14,15]。已有的资料表明,在我国近海海域中,渤海是我国强震最为活跃的海域之一。本区属华北地震区,根据区域大地构造、新构造、地球物理场和地震活动等特征,可以划分出河北平原地震带、郟庐地震带、北京—渤海强震带、辽东地震带、辽西地震带和石家庄—安丘地震带。东部地区4次强烈地震(河北省邢台1966年7.2级、渤海1969年7.4级、辽宁省海城1975年7.3级、河北省唐山1976年7.8级)均发生在这个地域内。全区90%的6~6.9级强震和全部大于7级的大震都发生在这几条强震带上。自公元1548年以来,本区记录到的5级以上地震13次,其中7级以上的地震4次,平均120年发生一次,1888年7.5级地震为最大;6级以上的地震7次;6级及其以下地震的记载缺失较多。图9为渤海地区发生于公元1548年至2005年5月时期4级及以上的地震分布。

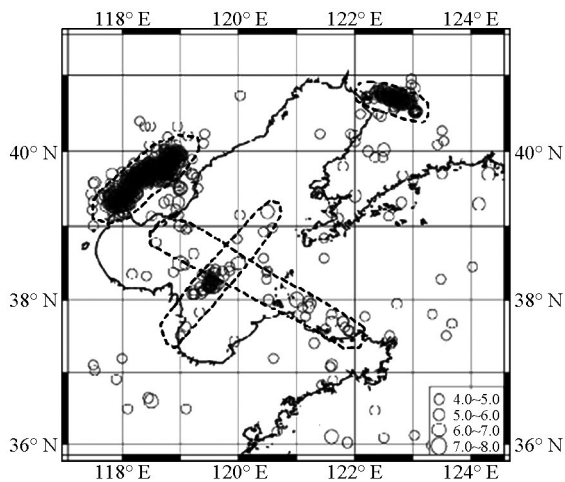


图9 近500年渤海地区中强震($M \geq 4$)分布

Fig.9 Moderate strong earthquake ($M \geq 4$) distribution of Bohai region in nearly 500 years

渤海及周边地区现今小震活动分布如图10所示,从图中可以看出存在4个小震密集区,分别为

1976年唐山、1975年海城、1969年渤海大地震区和山东半岛烟台外侧海域。渤海海域内小震的分布是不均匀的,绝大多数分布在中部和南部,辽东湾是一个相对空白区。小震的分布也呈NNE向和NW向两个趋势,与强震分布趋于一致,也与NNE向郟庐断裂带和NWW向的张家口—蓬莱断裂带的位置基本相同,显示了上述两条断裂对渤海地震活动的控制作用^[14-16]。

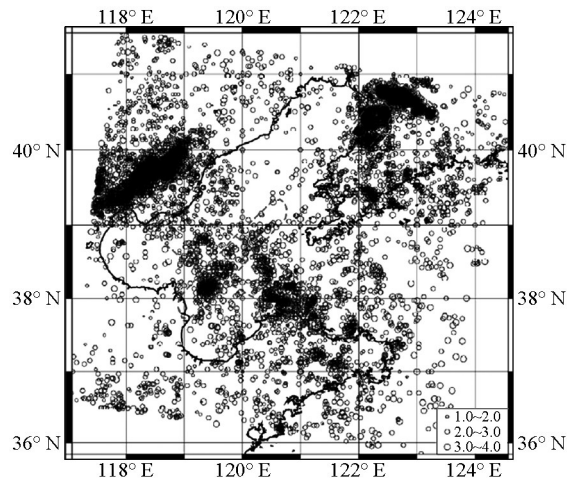


图10 渤海地区小震分布

Fig.10 Distribution of small earthquakes in Bohai region

2)渤海海峡地区稳定性评价。通过对环渤海地区地震学参数等综合分析认为,渤海海峡及邻区有发生5级以上地震的异常背景。预测区域为:胶东北部海域3级地震集中区及边缘有发生4.5级左右地震的可能;唐山老震区仍有发生5级左右地震的可能;海城老震区5.4级地震后地震活动水平呈下降趋势,小震活动频繁,但无明显地震异常。

从图9、图10可以看出,初步拟定的蓬莱—旅顺线位穿过NWW向的张家口—蓬莱断裂带,该断裂带在靠近蓬莱地段地震较多,工程场址附近发生过4级以上地震有几次,4级以下的小震十分密集,因此,采用抗震效果较好的隧道方案优于桥梁方案。

7 结语

通过对渤海海峡的气象、水文及地质等自然条件的分析,得出以下初步结论。

1)渤海海峡岛屿众多,且南北向排列,跨海工程线位可选择连岛方案,以减小工程建设的难度和建设成本。

2)由于渤海海峡风大、雾大、持续时间长,而且

老铁山水道又是重要的航道,这些条件不利于选择桥梁作为跨海通道方案。

3)通过对地质构造及地震分布特征分析,拟选的蓬莱—旅顺线位场址附近断裂带较少,地层相对稳定。

4)渤海海峡第四系地层稳定性差,厚度不均,海底一般达30 m左右,第三系地层主要为玄武岩,大孔隙结构,分布极不均匀,最厚的达70 m。这两套地层对隧道埋深的选择有一定影响,建议采用深埋隧道方案,将隧道设置于稳定的基岩中。

参考文献

- [1] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-14.
- [2] 魏礼群, 柳新华. 渤海海峡跨海通道研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2013.
- [3] 丁文兰. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征[J]. 海洋科学集刊, 1985, 25: 27-40.
- [4] 顾玉荷, 修日晨. 渤海海流概况及其输沙作用初析[J]. 黄渤海海洋, 1996, 14(1): 1-6.
- [5] 贺先明, 张元奎. 渤海中南部春、夏、秋季的水温分布特点及年际变化[J]. 海洋预报, 1990(3): 44-49.
- [6] 林霄沛, 吴德星, 鲍献文, 等. 渤海海峡断面温度结构及流量的季节变化[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 355-360.
- [7] 丁东. 渤海海峡跨海通道的地质概况[J]. 海洋地质动态, 1994, 3: 24-26.
- [8] 丁东. 渤海海峡跨海通道的自然条件[J]. 海洋地质动态, 1994, 2: 35-38.
- [9] 魏礼群, 戴桂英, 柳新华, 等. 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, 2013.
- [10] 金翔龙. 庙岛群岛的地质[J]. 海洋与湖沼, 1964, 5: 13-17.
- [11] 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.
- [12] 谭忠盛. 琼州海峡工程地质问题及铁路隧道的可行性研究[R]. 北京: 北京交通大学, 2001.
- [13] 闵伟, 晁洪太, 邓起东, 等. 渤海地区新生代构造与地震活动[J]. 新构造与环境, 2001: 218-233.
- [14] 邓起东, 晁洪太, 闵伟, 等. 海域活动断裂探测和古地震研究[J]. 中国地震, 2002, 18(3): 311-315.
- [15] 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等. 郯庐断裂带中段全新世活断层的特征滑动行为与特征地震[J]. 内陆地震, 1994, 8(4): 297-300.
- [16] 胡政, 丁东. 渤海地震震中附近地区浅层地质构造特征[J]. 地震学刊, 1990, 3: 26-32.

Analysis of natural condition for Bohai Strait cross-sea engineering

Tan Zhongsheng, Wu Yongsheng, Wan Fei

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

[Abstract] Geological conditions of Bohai Strait is complicated. Meteorological conditions, topography, stratum lithology, geological structure, earthquake activity are directly related to the Bohai Strait cross-sea construction successful or not. Adopting the research method, a lot of engineering geological and hydrogeological data of the bohai Strait were collected, and detailed analysis has been carried on, the regional stability evaluated. The bridge is not disadvantage of the all-weather thoroughfare, for thick fog, high wind and the average gale in year days up to 67.8 days in Bohai Strait; because there are some islands and islets what keep a line along the longitude, the joining islands are choosed for the Bohai Strait cross-sea engineering construction to reduce the difficulty and cost of construction. There are the poor stability Quaternary stratigraphic and third strata mainly basalt, large pore structure, very uneven distributed and up to 70 m cover, and these two sets of strata have great influence on the option of buried depth of the tunnel. To line of Penglai—Lvshun, there are not active faults in construction site, and the formation of relatively stable. These work can provide reference for the Bohai Strait cross-sea construction.

[Key words] Bohai Strait; cross-sea engineering; geological condition