

渤海海峡隧道TBM施工风险评估及 关键风险对策探讨

李 达¹,洪开荣²,谭忠盛³

(1. 中国中铁隧道集团有限公司技术中心,河南洛阳 471009; 2. 中国中铁隧道集团有限公司,河南洛阳 471009;

3. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044)

[摘要] 本文以渤海海峡隧道设想方案的施工风险为评估对象,采用层次分析法(AHP)-模糊综合评价法对渤海海峡隧道的施工风险进行了识别和评价,认为渤海海峡隧道施工风险等级为三级,为高风险隧道。分析了影响风险等级的关键风险为隧道掘进机(TBM)主轴承制造风险、突水突泥风险和施工通风风险,并根据这些风险的特征提出了风险对策建议和尚需解决的关键问题,为渤海海峡隧道的决策提供参考,同时也为跨海隧道的规划、设计以及施工方案的制定提供参考。

[关键词] 渤海海峡隧道;层次分析法;模糊评价;风险评估;风险对策

[中图分类号] U455.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0095-06

1 前言

自20世纪70年代以来,Einstein曾撰写多篇有价值的文献,指出隧道工程风险研究的特点和应遵循的理念^[1]。20世纪90年代起,惊人的隧道塌陷事故引起了公众和业主对地下工程施工中潜在风险的特别关注。在水底隧道风险研究方面,Nilsen等对复杂地层条件地区海底隧道的风险进行了相对深入的研究^[2]。国际隧道协会委员Heinz Duddeck则在其论文中对穿越海峡的隧道和穿越阿尔卑斯山的隧道如何进行风险评估进行了探讨^[3]。随着我国近几年水底隧道的修建,水底隧道的风险评估研究及应用逐渐被用于指导工程实践。2000年,以同济大学为主进行的沪崇(上海—崇明岛)通道的风险评估项目为我国在越江跨海隧道的风险研究做出了突破性贡献^[4]。2007—2008年,马小峰和洪选华分别针对浏阳河水下隧道和厦门翔安海底隧道施工进行了风险评估,提出了风险对策^[5,6]。

渤海是我国内海,海峡两端最短距离约为106 km,平均水深为25 m,最大水深老铁山水道为85 m,既是外海进入渤海的必经海上通道,又是我国南北陆路交通的天堑。渤海海峡通道的建设对军事、政治、经济、技术以及开发开拓海洋工程均有积极意义。魏礼群等总结了20世纪90年代以来针对渤海海峡隧道建设相关的区域经济效应、技术经济效果、海洋地质、生态环境等进行了深入探讨^[7]。2006—2007年,王梦恕等论述了修建渤海海峡隧道的必要性,研究了海峡通道“南桥北隧”方案,比较了海底隧道的不同方案及施工方法。以我国目前的隧道技术水平和经济实力为依据,认为在近几十年内修建渤海海峡隧道是可行的^[8,9]。2012年,王梦恕等通过研究提出了该隧道横纵断面,并认为该隧道宜采用以隧道掘进机(TBM)为主、以钻爆法为辅的施工方法^[10]。当前的研究是从经济、技术层面对渤海海峡隧道进行研究的,而从施工角度针对渤海海峡隧道进行风险评估的文献尚未见报道。

[收稿日期] 2013-10-08

[基金项目] 中铁隧道集团有限公司重大课题(隧研合2012-15)

[作者简介] 李 达(1983—),男,河南洛阳市人,博士,工程师,主要从事地下工程研究工作;E-mail:49620364@qq.com

2011年1月4日,国务院批复《山东半岛蓝色经济区发展规划》,并将渤海海峡隧道项目纳入了国家“十二五”发展战略,可见渤海海峡隧道的建设需求是十分迫切的。

2 工程概况

拟修建的渤海海峡隧道位于山东蓬莱市东港至旅顺老铁山之间,全长约125 km(见图1)。隧道拟采用双洞加一辅助洞的三洞方案,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设置一条横通道连接主隧道和服务隧道。隧道按

200~250 km/h标准进行设计和建设,采用铁路隧道方案,铁路隧道可以运行穿梭列车,汽车可通过穿梭列车背负式穿过隧道。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,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。渤海海峡隧道最大纵坡为1.8%。为了减小建设风险,采用深埋方案,考虑到第四系沉积有30 m左右,隧道埋深取80 m左右,隧道纵断面图见图2。渤海海峡隧道拟采用TBM为主要施工方法修建,TBM掘进区间划分见图3^[10]。

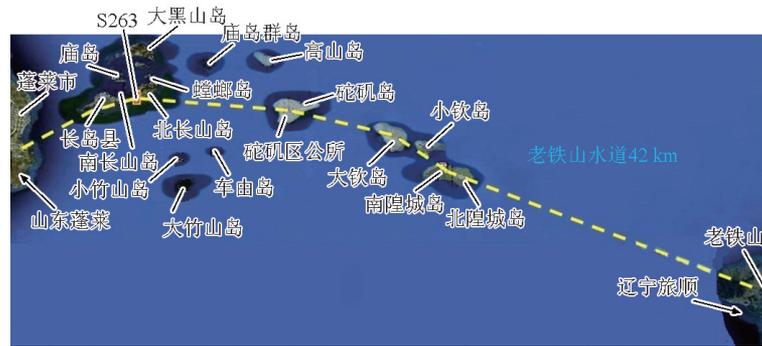


图1 渤海海峡隧道平面示意图
Fig.1 Sketch plane of Bohai Strait tunnel

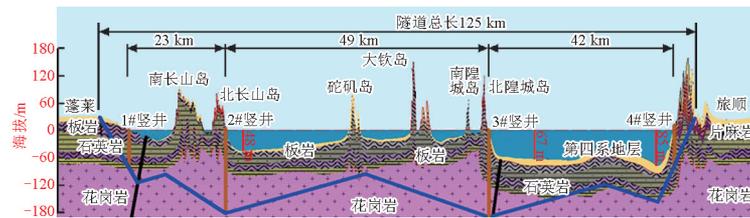


图2 渤海海峡隧道纵断面图
Fig.2 Longitudinal profile of Bohai Strait tunnel

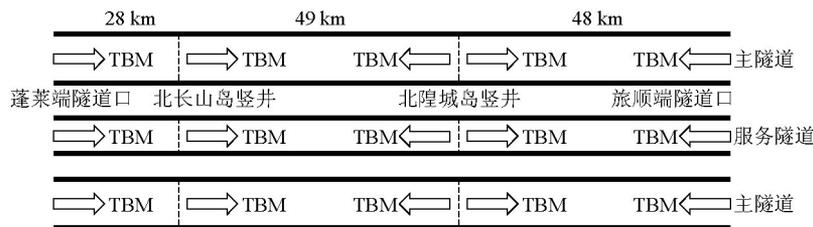


图3 主隧道及服务隧道TBM施工区间安排
Fig.3 TBM construction interval arrangement of Bohai Strait main and service tunnel

3 渤海海峡隧道风险评估

3.1 风险识别与权重分析

掘进机法是利用岩石隧道掘进机在岩石地层中暗挖隧道的一种施工方法,施工时所使用的机械通常为TBM。它是利用回转刀盘并借助推进装置的作用力使得刀盘上的滚刀切割岩面以达到开挖隧道的目的。TBM目前已成为世界上长大隧道施工最有效、最先进的施工方法之一。

3.1.1 风险识别

根据TBM在花岗岩地层施工的特点,渤海海峡隧道具有规模大、技术难度大、不可预见因素多、工期长等特点,组建风险识别小组,运用层次分析法(AHP)对渤海海峡主隧道及服务隧道施工风险进行识别,渤海海峡隧道施工风险包括TBM设备风险、TBM掘进风险和辅助工序风险。其施工风险结构见图4。

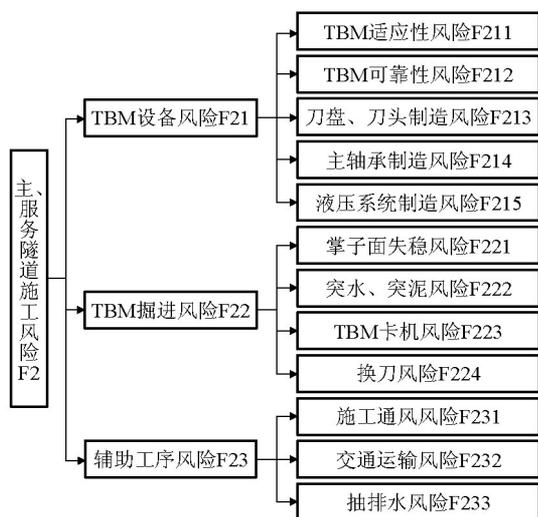


图4 渤海海峡隧道施工风险结构
Fig.4 Construction risk structure of Bohai Strait tunnel

3.1.2 风险权重计算

评估指标权重系数的确定十分重要,它可以直接影响综合评估的结果。具体确定权重的方法很多,如定性经验的德尔菲法,定量数据统计处理的主成分分析法,以及AHP等。渤海海峡隧道采用常用的AHP来确定评价指标的权重。对各风险因素相对重要程度的打分采用1~9的比例标度^[5,6]。权重计算结果见表1。

表1 风险权重

Table 1 Weight coefficient of risk

整体风险	主要风险	基本风险
渤海海峡隧道施工风险 $W=1$	TBM设备风险 $W_1=0.605$	TBM适应性风险 $W_{11}=0.166$ TBM可靠性风险 $W_{12}=0.0626$ 刀盘、刀具制造风险 $W_{13}=0.16$ 主轴制造风险 $W_{14}=0.440$ 液压系统制造风险 $W_{15}=0.166$
	TBM掘进风险 $W_2=0.273$	掌子面失稳风险 $W_{21}=0.103$ 突水、突泥风险 $W_{22}=0.424$ TBM卡机风险 $W_{23}=0.050$ 超高水压换刀风险 $W_{24}=0.424$
	辅助工序风险 $W_3=0.122$	施工通风风险 $W_{31}=0.455$ 交通运输风险 $W_{32}=0.091$ 抽排水风险 $W_{33}=0.455$

3.2 风险估计与评价

利用模糊数学法处理非数字化、模糊难含义的变量有独到之处,该方法能提供合理的数学规则去解决模糊变量问题,相应得出的结果又能通过一定的方法转为语言描述。这一特性适合解决海底施工存在的潜在风险问题。

3.2.1 风险估计与评价计算模型及计算方法

根据渤海海峡隧道施工风险结构模型,首先根据规范^[1]和国际通用的标准^[5,6],并利用专家打分的方式建立各个基本风险集的评价集 R_{ix} (i, x 为大于0的整数),然后根据前述计算的权重系数计算下一层的风险评价集 R ,即

$$R_i = w_{ix} \cdot R_{ix} \quad (1)$$

式(1)中, w_{ix} 为各风险的权重系数组成的 $1 \times x$ 的矩阵。同样的方法可以得出目标评价矩阵 R , 计算模型见图5。

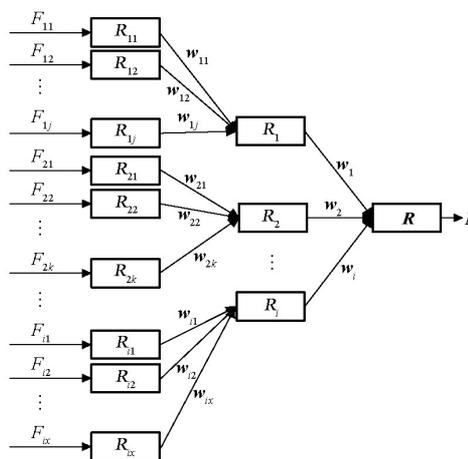


图5 渤海海峡隧道施工风险评估计算模型
Fig.5 Calculation model of risk estimation for Bohai Strait tunnel

任意层级的风险等级指标 v 采用下式计算

$$v = F_R V \quad (2)$$

式(2)中, F_R 为对应各风险的评价矩阵; V 为各级风险指针组成的集, 取值见表2。

表2 风险等级划分标准^[11]

风险等级	指针值(V)	等级范围
一级	20	1~25
二级	45	25~50
三级	70	50~75
四级	95	75~100

3.2.2 风险评估

采用上一节的风险等级计算方法对渤海海峡隧道风险等级进行计算, 计算结果见表3。

表3 风险等级

Table 3 Risk level

整体风险	主要风险	基本风险
渤海海峡隧道施工风险 $v=50.7$	TBM 设备风险 $v=55.6$	TBM 适应性风险 $v=45.8$
		TBM 可靠性风险 $v=44.7$
	TBM 掘进风险 $v=49.4$	刀盘、刀具制造风险 $v=45.7$
		主轴制造风险 $v=67.6$
		液压系统制造风险 $v=47.2$
		掌子面失稳风险 $v=49.6$
	辅助工序风险 $v=51.7$	突水、突泥风险 $v=50.1$
		TBM 卡机风险 $v=47.5$
		超高水压换刀风险 $v=48.9$
		施工通风风险 $v=55.2$
		交通运输风险 $v=44.2$
		抽排水风险 $v=49.7$

4 渤海海峡隧道存在的风险及对策

4.1 关键风险分析

渤海海峡隧道施工风险的评价主要是根据施工技术方面的风险因素来进行的。从风险评估过程来看, 更高层次的风险是由基本风险的评价指标与其权重指标通过一层一层传递计算得出的。风险权重反映了相对低一层风险的重要程度, 尽管是通过主观判断确定的, 但也客观反映了该因素的实际重要性, 一般是无法改变的。因此, 为了降低风险等级, 需从基本风险发生的概率和损失两方面着手。

根据表4中的风险接受准则, 基本风险中的主轴制造风险, 突水、突泥风险, 施工通风风险为不期望风险, 需采用风险处理措施。其他基本风险都为可接受风险, 但需加强管理和监测。

表4 风险接受准则^[11]

Table 4 Risk acceptance criteria^[11]

风险等级	接受准则	处理措施
一	可忽略	此类风险较小, 不需采取风险处理措施和监测
二	可接受	此类风险次之, 不需采取风险处理措施, 但需予以监测, 加强管理
三	不期望	此类风险较大, 必须采取风险处理措施降低风险并加强监测, 且满足降低风险的成本不高于风险发生后的损失
四	不可接受	此类风险最大, 必须高度重视并规避, 否则要不惜代价将风险降低到不期望的程度

在不期望风险中, 主轴制造风险, 突水、突泥风险和施工通风风险是影响渤海海峡隧道施工风险等级的关键风险。

4.2 主轴制造风险对策

主轴作为TBM的关键部件尚需从国外引进。当前从国内的TBM使用情况来看, 主轴的平均使用寿命在15 000 h左右, 按照每天工作16 h、维护时间为8 h、掘进速率为1.5 cm/min计算, 每个主轴在使用寿命内能够掘进13.5 km。而渤海海峡隧道设想施工方案的单台掘进机掘进长度均在25 km左右, 因此主轴制造风险较高。为了应对此种风险主要采用以下对策。

1) 根据工程特点定制TBM主轴的性能和功能, 主要部件、原材料性能优良、无损伤, 大轴承在挤压力和扭转力矩作用下不变形。

2) 组织专业小组对TBM进行验收。

3) 在主轴达到寿命需要更换时, 在洞内修建更换操作间。

4) 风险转移或风险规避, 由多方共同承担风险。

5) 除了上述对策, 还需要在施工前针对主轴综合性能进行研发, 使其寿命延长。尤其是主轴应达到在洞内可简便更换或使用寿命达到30 000 h。

通过上述措施, 可以使主轴制造风险降为二级, 即可接受。

4.3 突水、突泥风险对策

根据前述的工程概况, 渤海海峡隧道将在花岗岩中掘进, 而花岗岩地层中可能存在花岗岩风化槽, 此外, 隧道还需穿越断层破碎带, 因此突水、突

泥风险较高。应对渤海海峡隧道可能发生的突水、突泥风险采取以下措施:a. 加强超前地质预报;b. 严格控制掘进参数不冒进;c. 对遇到的风化槽、断层破碎带采用钻爆法迂回到前方处理;d. 制定好注浆堵水和人员救护预案;e. 研制新型速凝、耐久注浆材料和高效的钻机。

通过上述措施,可以使突水、突泥风险降为二级,即可接受。

4.4 施工通风风险对策

由于竖井设置困难,渤海海峡隧道每个区段的通风距离长,就目前的通风技术来说,只能采用巷道式通风。但是由于工作面多,通风风险仍然很高。主要有以下应对措施:a. 风门要密闭严密,防止污风循环;b. 制定常见有害物质的人工及自动监测方案;c. 风机、风管要匹配;d. 配备备用电源,保障需要时的连续通风。

采用措施以后,可以使施工通风风险降为二级,即可接受。

5 结语

本文基于渤海海峡隧道设想方案,对渤海海峡隧道施工风险进行了分析评估,得到如下结论:a. 渤海海峡隧道整体施工风险等级为三级,属高风险隧道;b. 渤海海峡隧道的关键风险为TBM主轴承制造风险,突水、突泥风险和施工通风风险;c. 文中结合渤海海峡隧道的工程特点对关键风险的应对措施进行了初步讨论。

建议在目前研究的基础上进一步开展如下几

个方面的工作:a. 渤海海峡隧道沿线地质情况尚需进一步的收集和调查,以使风险评估边界条件更加明确;b. 继续对国外类似隧道的施工情况进行详细收集,汲取其成功经验并总结教训;c. 在地质资料更加明确的条件下,采用现有或研究新的海底隧道施工工艺、工程材料和工程设备等,以此来丰富渤海海峡隧道施工风险的对策。

参考文献

- [1] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 141-155.
- [2] Nilsen B, Palmstrom A, Stille H. Quality control of a subsea tunnel project in complex ground conditions [J]. Challenges for the 21st Century, 1992: 137-145.
- [3] Heinz Duddeck. Challenges to tunnelling engineers [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 5-10.
- [4] 同济大学. 崇明越江通道工程风险分析研究总报告[R]. 上海: 同济大学, 2002.
- [5] 马小峰. 水底隧道风险评估体系及施工风险评估研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [6] 洪选华. 胶州湾海底隧道典型施工风险评估与研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [7] 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.
- [8] 宋克志, 王梦恕. 修建渤海海峡跨海隧道可行性初探[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2006, 22(3): 253-260.
- [9] 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.
- [10] 王梦恕, 谭忠盛. 渤海海峡跨海通道战略规划研究[R]. 大连: “渤海海峡跨海通道战略规划研究”座谈会, 2012.
- [11] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

Construction risk estimation of TBM and discussion on key risk countermeasures of Bohai Strait tunnel

Li Da¹, Hong Kairong², Tan Zhongsheng³

(1. Technology Center of China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China; 2. China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] The identification and estimation of construction risks of Bohai Strait tunnel are made by means of analytic hierarchy process (AHP) fuzzy comprehensive evaluation method, with the construction risks estimation of existing devised program of Bohai Strait tunnel as an example. The results show that the construction risk grade of Bohai Strait tunnel is grade III. The key construction risks of Bohai Strait tunnel, including manufacturing of main bearing of tunnel boring machine (TBM), mud/water bursting and ventilation, are analyzed, and the countermeasures and problems to be solved are presented. The paper can provide reference for the construction program determination of Bohai Strait tunnel and for the planning, design and construction program of sea-crossing tunnels in the future.

[Key words] Bohai Strait tunnel; analytic hierarchy process; fuzzy evaluation; risk estimation; risk countermeasure

(上接 89 页)

The location choice and construction technology of shafts in Bohai Strait tunnel

Wang Yunlong, Tan Zhongsheng

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

[Abstract] Bohai Strait tunnel is an important part of the national railway network and the highway; the construction of the crossing is significant. Based on the whole tunnel scheme of Bohai Strait, the location choice and construction technology of shafts in Bohai Strait subsea tunnel were researched in this paper. Through the analysis of the tunnel boring machine (TBM) life, Beihuangcheng Island and Beichangshan Island were selected as the locations for two shafts; and through the calculations of construction and operation ventilation and the research of the island sites, the feasibility of the shaft location choice scheme was demonstrated. According to the construction technology analyses of shafts in mine, railway tunnel and road tunnel, a molding method of drilling and blasting was used to construct the Bohai Strait tunnel shaft; the main measure of the construction of shaft top-soil should be plugging; the main technology program of the construction of base rock section should take the reasonable crack grouting technology.

[Key words] subsea tunnel; shaft; ventilation; construction technology