

# 渤海湾海底隧道运营风险评估分析

王永红, 刘 兵, 张永刚

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**[摘要]** 特长海底隧道运营是一个极其复杂的系统工程, 存在较大的不确定性和安全风险。根据隧道工程运营期风险评估的一般流程, 对渤海湾海底隧道工程在其运营期的风险进行了评估。评估中考虑的主要风险因素有水害、衬砌裂损、冻害、衬砌腐蚀、震害、洞内空气污染、火灾和列车脱轨事故 8 种类型。综合运用信心指数法和层次分析法, 参照隧道与地下工程风险接受准则和风险等级标准, 对渤海湾海底隧道运营期间的风险进行估计与评价。给出了该海底隧道运营期的风险等级, 并讨论了本评估工作中尚存在的一些问题和今后有待深入的工作。

**[关键词]** 海底隧道; 运营期; 风险分析; 风险评估

**[中图分类号]** U459.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0107-06

## 1 前言

渤海湾海底隧道工程运营期的安全性控制是我国和国际特长海底隧道工程所面临的核心技术难题, 不仅要解决运营风险评估的理论问题和关键技术, 而且形成系统控制体系也非常重要。例如, 2000 年 9 月兴交岭隧道出现的衬砌掉块和 2001 年 10 月达成铁路出现的大范围掉块, 以及 2001 年 12 月宝中线清凉山隧道衬砌掉块, 都险些造成严重的行车事故<sup>[1]</sup>。风险研究可以对这些不确定性因素进行分析, 将不可预见的风险因素转化为定量的指标, 帮助有关部门完成最后的决策, 并通过计算风险效益来选择风险控制措施降低各种风险, 以达到安全、经济、高效的管理目标。研究的目的在于通过对隧道工程运营过程存在的各种风险进行分析和评估, 在此基础上对风险实施有效的控制。提前做好风险防范预案, 期望降低风险带来的损失程度, 并为渤海湾海底隧道运营风险评估体系设计提供必要的依据<sup>[2]</sup>。

## 2 工程概况

渤海湾海底隧道全长约 125 km, 其地层纵剖面图及方案总体布置如图 1、图 2 所示。

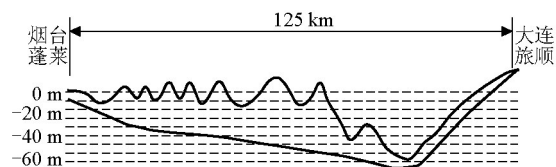


图 1 渤海湾海底隧道地层纵剖面图

Fig.1 The formation longitudinal section of the Bohai Bay subsea tunnel

渤海海峡北起旅顺, 南至蓬莱, 是渤海与黄海的天然分界线, 如图 2 所示。两端最短距离约 106 km, 平均水深 25 m。海峡北部的老铁山水道是黄海海水进入渤海的最主要水道, 宽约 42 km, 平均水深 40 m 以上, 最深处约 85 m。渤海海峡出露的地层分为两类: 一类下部为夹石英岩的千枚岩,

**[收稿日期]** 2013-10-08

**[基金项目]** 国家自然科学基金面上项目(C11A300120)

**[作者简介]** 王永红(1958—), 男, 山东青岛市人, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的研究与教学工作; E-mail: yonghongw@163.com



图2 渤海湾隧道方案总体布置平面图

Fig.2 The general layout plan of the Bohai Bay tunnel

上部为夹石英岩的板岩;另一类下部为板岩和石英岩互层,上部则为石英岩和板岩互层,岩质坚硬<sup>[3]</sup>。

渤海湾隧道采用单洞单线隧道+服务隧道+单洞单线隧道的模式,采用隧道掘进机(TBM)的掘进模式,照渤海湾海底隧道线路的规划结果,将隧道分为三个段进行施工:蓬莱—北长山岛段、北长山岛—北城隍岛段、北城隍岛—旅顺段。隧道最小埋深在80 m左右,长约125 km。行车设计时速为250 km/h,隧道内运行客车、货车和背负式列车。

### 3 运营风险分析

#### 3.1 风险辨识

风险辨识,即分析阶段所有的潜在风险因素,并进行归类、筛选和整理,重点考虑那些对目标参数影响较大的风险因素<sup>[4]</sup>。从用户、运营管理、隧道基础设施、车辆等几方面综合考虑,目前隧道运营中常见的病害主要有隧道水害、衬砌裂损、冻害、衬砌腐蚀、震害、洞内空气污染、火灾和列车脱轨事故8种类型。

#### 3.2 风险因素分析

##### 3.2.1 隧道水害

隧道水害的成因是修建隧道破坏了山体原始的水系统平衡,隧道成为穿过山体附近地下水集聚的通道。当隧道围岩和含水地层连通,而衬砌的防水及排水措施、方法不完善时,就必然要发生隧道水害。造成水害的原因可以分为两种:隧道穿过含水的地层和隧道衬砌防水以及排水设施不完善。

##### 3.2.2 隧道衬砌裂损

衬砌裂损变形的主要危害有降低衬砌结构对围岩的承载能力;使隧道净空变小,侵入建筑限界,影响车辆安全通过;拱部衬砌掉块,影响行车和人身安全;裂缝漏水,造成洞内设施锈蚀,道床翻浆,严寒和寒冷地区产生冻害;铺底和仰拱破损、基床翻浆、线路变形、危及行车安全,被迫降低车辆运行速度,大量增加养护维修工程量;在运营条件下对裂损衬砌进行大修整治,施工与运输互相干扰,费用增大<sup>[5]</sup>。

##### 3.2.3 隧道冻害

隧道冻害是寒冷地区和严寒地区的隧道内水流和围岩积水冻结,引起隧道拱部挂冰、边墙结冰、洞内网线设备挂冰、围岩冻胀、衬砌胀裂、隧底冰锥、水沟冰塞、线路冻起等,影响安全运营和建筑物的正常使用的各种病害。冻害的成因主要有寒冷气温的作用、季节冻结圈的形成、围岩的岩性对冻胀的影响、隧道设计和施工的影响。

##### 3.2.4 隧道衬砌腐蚀

渤海湾隧道所接触的地质条件千差万别。其中有些地区富含腐蚀性介质。衬砌背后的腐蚀性环境水容易沿衬砌的毛细孔、工作缝、变形缝及其他孔洞渗流到衬砌内侧,成为隧道渗漏水,对衬砌混凝土和砌石、灰缝产生物理性或化学性的侵蚀作用,造成衬砌腐蚀。衬砌腐蚀可分为物理性侵蚀和化学性侵蚀两类。隧道衬砌腐蚀的主要影响因素有衬砌施工的质量和水泥的品种,渗流到衬砌内部的环境水含侵蚀性介质的种类和浓度,环境的温度和湿度等自然条件。

##### 3.2.5 隧道震害

地震中隧道遭受破坏的例子很多,因震害停运及由此造成的经济损失超过隧道本身的修复费用。造成隧道地震破坏的原因有工程地质条件、抗震设计质量以及施工水平等。

##### 3.2.6 隧道洞内空气污染

隧道在运营过程中铁路车辆、电气设备、抛弃的废弃物等释放出多种有害气体,而隧道是一个封闭空间,一般只有进出口与大气相通,有害气体不能很快消散,当积累的浓度超过一定值时,会引起严重影响。国内外研究表明,运营隧道空气中的主要有害物质一般应包括NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、总烃和粉尘这6种。

### 3.2.7 隧道火灾

隧道是铁路的咽喉要道,无论是铁路隧道火灾,还是地铁隧道火灾都是极其危险的,其危险性在于危及人身安全。造成隧道中产生火灾事故的原因多种多样,甚至是多种因素造成的,包括人的不安全行为和物的不安全状态。

### 3.2.8 列车脱轨事故

渤海湾隧道拟采用单洞单线隧道+服务隧道+单洞单线隧道的模式,通过隧道的汽车及货物由火车托运(见图3),设计时速为250 km/h,高速和重载加剧了轮轨的动态作用,对运行安全性提出了更为严峻的考验。



图3 列车托运方式示意图

Fig.3 The schematic diagram of the train shipping method

机车运行事故主要是由于运行过程中人、列车、环境等因素的影响而导致的列车出现不能正常运行甚至造成重大事故的现象。机车运行事故将对人身安全和国家财产造成严重损失,近些年来列车事故频发,这就给正在运营的以及即将建设的铁路隧道工程敲响了警钟<sup>[6,7]</sup>。导致机车运行事故的主要原因有驾驶员、车辆及轨道、环境因素三方面。

## 4 运营期风险评估与评价

### 4.1 风险评估的程序

风险评估的程序如图4所示。

### 4.2 风险评估方法

风险评估与分析的常用方法主要有基于信心指数的专家调查法、模糊综合评判方法、层次分析法、故障树分析方法、德尔斐法、检查表法、流程图法等<sup>[8]</sup>。

### 4.3 风险接受准则

根据国内隧道及地下工程领域风险管理研究中已提出的定性的风险接受准则,提出定性的海底

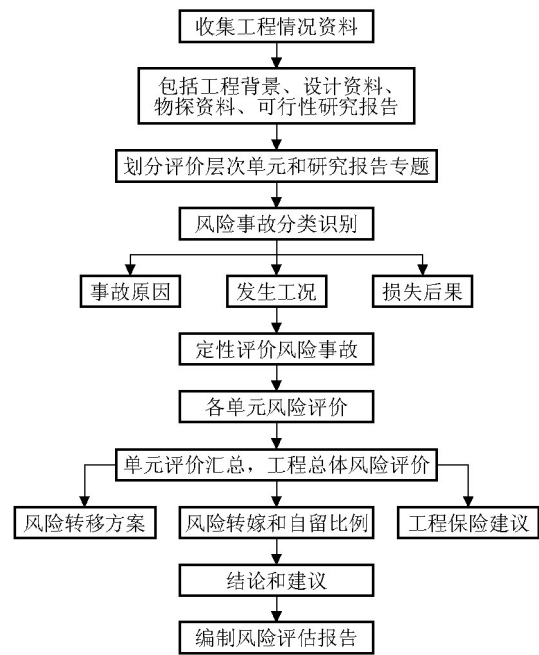


图4 风险评估的程序图

Fig.4 The program graph of the risk assessment

隧道工程施工风险接受准则<sup>[9]</sup>。依据风险事故发生概率的大小,可将其分为5级(见表1)。

表1 风险概率等级标准

Table 1 The criterion of the risk probability

等级	事故描述	区间概率
一级	不可能	$P < 0.01\%$
二级	很少发生	$0.01\% \leq P < 0.1\%$
三级	偶尔发生	$0.1\% \leq P < 1\%$
四级	可能发生	$1\% \leq P < 10\%$
五级	频繁	$P \geq 10\%$

风险矩阵法是最常用且被普遍接受的定性风险分析方法。下面根据不同的风险概率等级和损失后果等级,建立风险等级评价矩阵,如表2所示<sup>[10]</sup>。

风险接受准则作为可接受风险水平的评判标准,其评判对象就是通过风险分析方法得出的风险水平。依据风险矩阵法这一被普遍运用和接受的定性风险分析方法,提出定性的海底隧道工程运营风险接受准则。不同的风险水平需采用不同的风险管理与控制措施,结合风险评估矩阵,不同等级风险的接受准则和相应的控制对策如表3所示。

### 4.4 风险评价

根据海底隧道运营的特点,建立了一个基于多



表2 风险评价矩阵

Table 2 The matrix of the risk assessment

风险		事故损失				
		1.可忽略的	2.需考虑的	3.严重的	4.非常严重	5.灾难性
发生概率	A: $P < 0.01\%$	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A
	B: $0.01\% \leq P < 0.1\%$	1 B	2 B	3 B	4 B	5 B
	C: $0.1\% \leq P < 1\%$	1 C	2 C	3 C	4 C	5 C
	D: $1\% \leq P < 10\%$	1 D	2 D	3 D	4 D	5 D
	E: $P \geq 10\%$	1 E	2 E	3 E	4 E	5 E

表3 风险接受准则

Table 3 The criteria of the risk acceptance

等级	风险	接受准则	控制对策
一级	1A, 2A, 1B, 1C	可忽略	日常管理和审视
二级	3A, 2B, 3B, 2C, 1D, 1E	可容许的	需注意, 加强日常管理审视
三级	4A, 5A, 4B, 3C, 2D, 2E	可接受的	引起重视, 需防范、监控措施
四级	5B, 4C, 3D, 4D, 3E	不可接受	制定控制、预警措施
五级	5C, 5D, 4E, 5E	拒绝接受	立即停止, 整改、规避或启动预案

表4 风险等级表

Table 4 The table of the risk level

风险因素	发生概率	损失等级	风险等级
隧道水害	D	3	四级
隧道衬砌裂损	C	3	三级
隧道冻害	A	3	二级
隧道衬砌腐蚀	D	2	三级
隧道震害	C	3	三级
隧道洞内空气污染	C	2	二级
隧道火灾	C	4	四级
列车脱轨事故	C	4	四级

层次模糊综合评判的施工风险评价模型,通过综合考虑海底隧道工程运营风险因素(水害、衬砌裂损、冻害、衬砌腐蚀、震害、洞内空气污染、火灾、列车脱轨事故)发生的概率和风险因素对运营的影响程度,确定运营风险的大小。首先,利用层次分析法建立海底隧道运营风险评价指标体系,确定各项指标的相对权重;其次,根据海底隧道运营的特点,利用专家经验法的模糊估计方式,对各基本风险因素进行风险估计;再次,在基本风险因素的风险概率模糊集和风险损失模糊集的基础上,基于模型,综合考虑风险发生概率及造成的后果对风险评价的影响,建立风险评估矩阵及风险登记区域,得到基本风险因素的评价指标,采用加权平均的方法对评价指标进行处理,最终确定海底隧道运营的基本风险因素的风险水平等级。通过多级模糊综合评价模型,确定高层次风险因素及运营的风险评价指标,从而确定高层次风险因素及整体风险水平等级<sup>[11]</sup>。其风险等级如表4所示。

海底隧道运营期水害、火灾及列车脱轨事故风险为四级,风险等级较高,属于不可接受范围,需高度重视。建议采用现代化的监控手段和科学的管理方法,制定控制、预警措施,采取有效的风险控制措施。

## 5 运营风险控制及残余风险评估

针对渤海湾隧道工程出现的风险,本文提出了运营风险控制措施。

### 5.1 隧道水害防治

根据隧道的具体情况,因地制宜地贯彻“截、排、堵结合综合防治的原则”,力求达到建立完善的隧道防排水系统、使用的材料安全而耐久、工艺先进、质量可靠、方便维修、经济合理的目的。常用的整治隧道水害的基本方法有适当疏排、注浆堵水、增设内防水层。

### 5.2 隧道衬砌裂损整治

衬砌裂损整治措施,主要分为以下几种情况:a. 裂缝整修;b. 衬砌背后空洞压浆;c. 底板的稳定处理;d. 换拱、换边墙。

### 5.3 隧道冻害整治

严寒及寒冷地区隧道冻害的防治,其基本措施是综合治水、更换土壤、保温防冻、结构加强、防止融坍等,根据实际情况综合运用。

### 5.4 隧道衬砌腐蚀防治

从勘测设计入手,掌握隧道工程地质和水文地质资料,查明环境水含侵蚀性介质的来源和成分,

在正确判定其对衬砌混凝土侵蚀程度的基础上,因地制宜地采取防治措施。

### 5.5 运营隧道震害防治

将海底隧道结构建于均匀、稳定地基中,远离断层,避免过分靠近山坡坡面,避免山坡不稳定地段,尽量避免饱和沙土地基而减少地震液化;在相同条件下,尽量选取埋深较大的线路,远离风化岩层区;区间隧道转角处的交角不宜太小,应加强出入口处的抗震性能。

### 5.6 隧道内空气污染防治

对于隧道空气污染问题,可通过以下措施进行控制:利用自然通风或使用机械通风将有害气体排出洞外;在隧道中配置可以吸收洞内有害气体的设备;彻底消除污染源。

### 5.7 运营隧道火灾整治

设置疏散避难设施,如避难通道、隧道两侧的诱导路、定点急救避难场所等,对于双孔隧道,可把横通道作为避难设施;还应设置其他消防设施,如消防进攻道路的设计、截流沟或可燃液体疏导沟的设置等;加强隧道消防管理和铁路管理,如不得随意超车停车、限制载有易燃易爆物及其他危险品的车辆进入隧道等,以及经常检查隧道的防火安全工作等。

### 5.8 列车脱轨事故防治

加强驾驶员的技能培训,增强业务的熟练程度,选择一些经验丰富,应变能力强的驾驶员,以便在事故突发的时候能够沉着应变,保证机车的安全行驶;对车辆应该定期检修,遇到问题及时更换零件设施,尤其是刹车器等关键部位,使其在遇到突发事件时能够保证安全制动;提高设备的质量,保持较高的安全技术性能;研制开发列车脱轨报警系统;制定事故的应急方案,以最快速度恢复正常行车,开展事故调查,防止类似事件再发生<sup>[4,12,13]</sup>。

残余风险是指在实现了新的或增强的安全控制后还剩下的风险。对各风险因素经过控制以后的残余风险经营评估结果如表5所示。

由表5可知,对风险因素加以控制以后,大部分处在可允许、可接受的范围内,说明风险因素得到了很好的控制,运营阶段的主要风险因素都在可控的范围之内。

## 6 结论

本文将渤海湾海底隧道运营期可能的的主要危

表5 残余风险等级表

Table 5 The table of the residual risk level

风险因素	发生概率	损失等级	风险等级
隧道水害	D	2	三级
隧道衬砌裂损	B	2	二级
隧道冻害	B	1	一级
隧道衬砌腐蚀	C	2	二级
隧道震害	B	2	二级
隧道洞内空气污染	C	1	一级
隧道火灾	C	2	二级
列车脱轨事故	B	2	二级

险事故进行罗列,对可能出现的隧道水害、衬砌裂损、冻害、衬砌腐蚀、震害、洞内空气污染、火灾和列车脱轨8种事故及其损失进行评估、排序,使实际工程中可以有有的放矢地采取对策。此外,风险评估和风险管理应该是动态的,即在工程进行的过程中,根据工程结构发展情况(如风险的发生还可能带来二次风险)实时更新信息,进而更新评价模型,得到更为准确的评价结果。

### 参考文献

- [1] 柳新华,刘良忠,侯鲜明. 国内外跨海通道发展百年回顾与前睹[J]. 科技导报,2006,24(11):78-89.
- [2] 赵晋友. 海底隧道经济分析与评价的关键问题[J]. 岩土工程界,2006,9(5):21-23.
- [3] 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.
- [4] 刘海京. 公路隧道健康诊断计算模型研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [5] 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.
- [6] Tunnel Study Centre. Guide to road tunnel safety documentation booklet3: Risk analyses relating to dangerous goods transport [M]. France: CETU, 2005.
- [7] 曾庆元,向 俊,娄 平,等. 列车脱轨的力学机理与防止脱轨理论[J]. 铁道科学与工程学报,2004,1(1):19-31.
- [8] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 141-155.
- [9] 王梦恕. 厦门海底隧道设计、施工、运营安全风险分析[J]. 施工技术,2005(S1):1-4.
- [10] 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.
- [11] 刘铁民,张兴凯. 安全评价方法应用指南[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [12] 罗积玉,邢 瑛. 经济统计分析方法及预测[M]. 北京:清华大学出版社,1987:198-201.
- [13] 史定华,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京:北京师范大学出版社,1993.

# Risk assessment on Bohai Bay subsea tunnel in its operational period

Wang Yonghong, Liu Bing, Zhang Yonggang

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

**[Abstract]** The operation of super-long subsea tunnel is a extremely complex system project, has larger uncertainty and safety risk. The procedure of risk assessment was explained in detail, and its application on Bohai Bay subsea tunnel project was proposed as a case study in this paper. Firstly, lots of different risk factors of the subsea tunnel operation were identified systematically, which involved water damage, tunnel lining crack, tunnel freezing, tunnel lining corrosion, tunnel earthquake disaster, the air pollution inside the cave, tunnel fire and the train derailment accident. Then, those operational risks were analyzed and assessed by the confidence index method and analytic hierarchy process, and were classified and discussed gradually according to the risk acceptance criterion. Finally, some topics about risk assessment on the subsea tunnel operational risk needed to the further research were high-lighted here.

**[Key words]** subsea tunnel; operational period; risk analysis; risk assessment