

渤海海峡隧道竖井钻爆法施工风险分析 及对策研究

张文新, 邹 翀

(中国中铁隧道集团有限公司技术中心, 河南洛阳 471009)

[摘要] 针对拟建的渤海海峡隧道竖井施工进行风险分析, 确定了施工期间的风险并结合风险权重分析排序, 依次为支护结构失效风险最小、自然灾害风险较大、竖井开挖风险最大, 并通过风险评估确定了突水、突泥风险为关键风险。综合考虑关键风险与其他风险对竖井施工的影响, 从地质预报、竖井吊装设备的选择与吊装过程控制、竖井开挖风险控制、自然灾害风险的预防、竖井支护结构的质量控制以及建立竖井施工作业安全制度等方面提出了对渤海海峡隧道竖井施工风险的应对措施, 为后续施工提供参考。

[关键词] 海峡隧道; 竖井施工; 钻爆法; 风险分析; 应对措施

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0101-06

1 前言

近年来我国经济迅速崛起, 交通、运输等基础设施的发展极大地促进了水底隧道修建技术的进步。已经建成的厦门翔安海底隧道(厦门东通道工程)是我国第一条海底隧道, 隧道长 6.05 km, 海底最大埋深约 70 m, 隧道采用三孔建设形式, 中间一孔为服务隧道^[1]。建成的第二条海底隧道是青岛胶州湾海底隧道, 在海底花岗岩地层中穿越, 采用钻爆法施工, 下穿胶州湾湾口海域, 隧道最大埋深为 70.5 m, 最小埋深为 25 m, 隧道长 7.8 km^[2]。在海南, 专家已对琼州海峡跨海通道进行了可行性研究, 论证表明, 修建海底隧道是跨越琼州海峡的最佳方案^[3-5]。在山东, 专家从自然与地质条件、设想、技术条件、经济条件等对修建渤海海峡隧道的可行性进行了分析^[6]。目前, 中国已在江底、海底成功修建隧道, 具备了修建海底隧道的技术实力和成功经验。本文主要对拟建的渤海海峡隧道设置的竖井存在的风险和应对措施进行了探讨。

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, 隧道初步线路方案为: 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。综合考虑岛屿面积及场地条件、竖井间距、技术及经济等因素, 线路上设置老铁山竖井、北隍城岛竖井、北长山岛竖井、蓬莱竖井, 竖井分布见图 1。

3 竖井钻爆法施工风险分析

3.1 风险识别

通常在岛屿上建造的竖井与陆地上存在明显的不同: a. 海岛靠近海边, 降水和季风时间较长, 地表降水量大; b. 海岛上的竖井全部位于海平面以下, 竖井施工过程的水压大、水量丰富, 一旦突水, 由于海水的无限补给, 会产生灭顶之灾。因此, 需要对海岛上竖井施工进行风险识别, 即找出工程施工期所有的潜在风险因素, 并进行归类整理、筛选,

[收稿日期] 2013-10-08

[作者简介] 张文新(1981—), 男, 山西洪洞县人, 工程师, 主要从事地下工程技术与科研工作; E-mail: zwx1981112@163.com



图1 渤海海峡隧道竖井布置

Fig.1 Layout of the Bohai Strait tunnel shaft

找出风险点。

针对渤海海峡隧道初步设计的4座竖井进行风险分析,老铁山竖井、蓬莱竖井深约60 m,北隍城岛竖井、北长山岛竖井深约100 m,均采用钻爆法施工。竖井主要作为工作井和通风井。竖井施工工序通常为:测量放线、确定井口位置→锁口圈施工→安装龙门井架→井筒开挖→井筒初期支护→井筒二次衬砌施工→竖井施工至井底标高。

从竖井的施工工序上看,竖井施工自身存在竖井开挖风险和支护结构失效风险。另外,竖井位于海边或海岛上,不可避免的要受到台风等气象灾害的影响,需要考虑自然灾害风险。因此,渤海海峡隧道竖井施工存在三大风险,如图2所示。

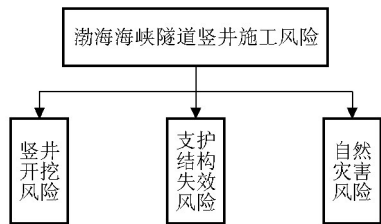


图2 渤海海峡隧道竖井施工风险组成图

Fig.2 Composition diagram of the Bohai Strait tunnel construction risk

3.2 风险分析

风险分析的目的是分析风险辨识得到的风险

事故及其发生因素。运用专家调查法、故障树法并结合以往工程资料,分析出竖井施工中各风险的权重,并就每个风险中引起因素的权重进行细化,使得在后续竖井应对措施中重点突出,全面管理,保证施工的顺利进行。竖井施工中各风险因素的权重如表1所示。

表1 竖井施工风险权重

Table 1 Weights of shaft construction risk

风险	权重
竖井开挖风险	0.629 4
自然灾害风险	0.278 1
支护结构失效风险	0.092 5

通过竖井风险因素权重分析,竖井开挖风险是主要风险阶段,其次是自然灾害风险,支护结构失效风险最小。无论风险大小,如果发生都会对施工造成严重影响,因此,对各风险进一步进行说明,使后续采取的应对措施更加全面。

1)竖井开挖风险。竖井的位置位于海边或海岛之上,地层受地质构造作用与海水渗透、侵蚀作用,使得竖井地层岩石破碎,存在软弱构造面,造成地下水的富集或海水充填,造成竖井施工中的突水、突泥风险。另外,地层破碎,必将导致围岩结构力学性能降低,竖井开挖后,围岩不能自稳导致坍塌风险。竖井开挖风险各风险指标权重如表2所示。

表2 竖井开挖风险各风险指标权重

Table 2 Risk index weights of shaft excavation risk

指标	权重
突水、突泥风险	0.750 0
坍塌风险	0.250 0

2)支护结构失效风险。竖井支护结构可以分为竖井井口、竖井井身以及竖井与横通道交接处结构三部分。竖井井口结构受地面机械设备和吊装设备的垂直荷载作用,使竖井井口结构受到较大的压力而存在失效风险;竖井井身结构受地层挤压变形和地下水渗透侵蚀存在失效风险;竖井与横通道交接处结构受围岩应力释放调整,以及结构的不规则存在失效风险。支护结构失效风险各风险指标权重如表3所示。

表3 支护结构失效风险各风险指标权重
Table 3 Risk index weights of supporting structure failure risk

指标	权重
竖井井口结构失效风险	0.100 0
竖井井身结构失效风险	0.100 0
竖井与横通道交接处结构失效风险	0.800 0

3) 自然灾害风险。渤海海峡属暖温带季风气候,全年平均大风日70 d以上,冬季多西北风和北风,夏季多南风 and 东南风。竖井位于海边或海岛上,施工中必然遇到台风的危害,强台风所到之处建筑工地塔机在强台风侵袭后易造成塔机倾斜、弯折、倒塔现象。大量降水通常伴随台风发生,因此竖井井口存在雨水倒灌的风险。另外,竖井井口架设高大井架,在打雷时会遭到雷击,极易损坏设备和危及人员安全。自然灾害风险各风险指标权重如表4所示。

表4 自然灾害风险各风险指标权重
Table 4 Risk index weights of natural disaster risk

指标	权重
台风风险	0.428 6
雨水灌入风险	0.428 6
雷击风险	0.142 9

3.3 风险评价

根据《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》和国际通用的风险等级划分标准,采用模糊数学处理制定渤海海峡隧道竖井施工风险等级划分标准(见表5),结合竖井各风险因素权重计算出渤海海峡隧道竖井施工风险等级,计算结果如表6所示。

表5 风险等级划分标准^[7]
Table 5 Classification criteria of risk level^[7]

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

在渤海海峡隧道竖井施工风险的评价中,主要是施工技术和自然灾害两方面的风险因素,施工主要从降低风险发生的概率和降低损失来达到降低

表6 风险等级
Table 6 Risk level

风险	风险因素
竖井开挖风险 $V=50.6$	突水、突泥风险 $V=50.9$ 坍塌风险 $V=49.6$
自然灾害风险 $V=48.5$	台风风险 $V=48.7$ 雨水灌入风险 $V=48.4$ 雷击风险 $V=47.8$
支护结构失效风险 $V=45.0$	竖井井口结构失效风险 $V=42.1$ 竖井井身结构失效风险 $V=42.4$ 竖井与横通道交接处结构失效风险 $V=45.7$

风险等级的目的。结合风险接受准则(见表7)可知,竖井开挖中的突水、突泥风险为不期望风险,需要采取风险处理措施。

表7 风险接受准则^[7]
Table 7 Risk acceptance criteria^[7]

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

另外,其他风险虽都为可接受风险,但坍塌风险、台风风险、雨水灌入风险、雷击风险等风险指数接近三级风险等级,结合以往施工实际情况,需要采取一定的措施进行风险防御,防止风险因素的可能增大性。

4 渤海海峡隧道竖井施工风险应对措施

根据竖井施工风险因素权重和风险评估,关键风险为突水、突泥风险;同时,竖井在不同地层结合处,围岩的破碎程度和地下水的聚集、施工工序衔接的快慢、施工技术措施是否得当也是制约竖井施工的关键难题。另外,自然灾害和支护结构稳定性也是影响竖井正常施工的重要因素,因此,对渤海海峡隧道竖井施工风险控制措施包括以下几个方面。

4.1 加强施工地质工作

竖井施工中采用垂直钻探进行地质预报,不需

要进行精确度差的物探,多孔一次钻探到位准确掌握地质条件。

4.2 竖井开挖风险控制

竖井位于海边或海岛上,受地质构造运动和海水侵蚀作用,围岩整体性不强,为防止灾害的发生,应做到以下几个方面。

1)竖井开挖前准确测出竖井开挖轮廓线,开挖后对开挖轮廓线进行检查,确保竖井开挖净空尺寸符合设计和规范要求。竖井开挖后及时进行初期支护,防止竖井周边围岩应力自身调整不能自稳出现坍塌,确保竖井施工安全。

2)竖井开挖过程把注浆防水和围岩加固作为一个工序纳入施工中,根据围岩开挖情况和地下水富水情况,进行注浆,既达到堵水的效果,也加强了围岩的整体性,防止开挖中突泥、突涌水的发生。同时,井身防排水采用吊泵和深井泵接力排水,并且随时保持一套排水机械作为突涌水时的防备措施,配备备用电源,确保连续抽水,保证竖井施工安全。

3)根据地质条件、所使用的钻眼机具以及所采用的开挖方法,结合围岩的级别设计循环进尺,合理计算炮眼布置、装药量,提高测量放线的精度和作业人员水平,提高钻眼质量和优化爆破设计,严格控制隧道竖井超欠挖,保证开挖成型,减少爆破对围岩的振动和防止围岩应力集中。保护好竖井周边围岩的完整性,也有利于减少围岩坍塌和突泥、突涌水的发生。

4.3 自然灾害风险的预防

渤海海峡地处风道,属台风影响区,全年大风日数冬季最多,春秋两季居中,夏季最少。最大风速出现在1985年8月19日的9号台风中,为40 m/s。海峡历年平均降水日数为63 d,年平均降水量为541.3 mm。其中,春季降水量最多,秋季降水量居中,冬季降水量最少。为了保证施工期间人员、设备的安全,使施工能够顺利进行,应做到以下几点,防止自然灾害的发生。

1)施工期间专人负责天气预报信息的收集,关注台风的发布情况,通过新闻、报纸、互联网等多种渠道收集、了解附近及当地区域的海面活动情况和台风预报信息,根据建设行政主管部门或气象台天气预报给出的信息,应落实责任,加强监督,做到早准备、早防御;施工现场的设备顶部应安装风级风速报警器,并有瞬时风速风级的显示能力;吊装设备安装与施工单位应及时制定塔机抗台风专项预

案,并落实好相应的器械、工具和人员;吊装设备生产单位应在产品说明书里增加塔机抗强台风的具体细则,指导和帮助施工单位落实抗台风措施;当风力大于吊装设备承受能力,威胁到施工安全时能发出报警信号,停止一切吊装作业,切断电源,检查连接是否牢固,有问题应及时处理,将吊钩固定;吊装司机须具有预防和处理瞬间突发性强阵风的心理素质和基本知识,面对险情沉着应对,及时卸荷。

2)台风的发生必然伴随着大雨,甚至是暴雨,施工期间防止雨水倒灌,除在竖井上游砌筑截水沟以拦截地下水,井口四周比井沿处略低50 cm左右外,竖井周边也应设置排水口,使短时间内大量积水能够及时排走;竖井配备独立排水系统,在竖井开挖、吊装设备切断电源的情况下能够排水;安排专人负责制度,确保雨水顺利引排。另外,利用井口上提升设备顶部的防雨棚对雨水进行遮挡。

3)在吊装设备顶部或者防雨棚上安装避雷装置,科学引导电流释放,防止雷电产生高强度电流把设备的线路击穿,造成设备线路故障。

4)台风、雨季施工要经常检查排水系统,清理沉淀池,确保其畅通无阻,并对施工造成的可能积水的区域进行处理。同时,竖井施工是复杂工作程序,应预先对工程各分部分项所需的材料、物资、构件作远程规划预算,进行宏观调控,做好工程材料储备,保证台风、暴雨过后能够快速恢复施工。

4.4 竖井支护结构的质量控制

竖井支护结构一般由初期支护和二次衬砌两部分组成,而容易发生破坏的通常为初期支护。因此,竖井支护结构失效风险应对措施主要考虑初期支护。

1)竖井井口锁口段结构质量控制。竖井井口的地质为第四系地层,井口设置高强钢架锁口圈,井身部分往锁口盘底下挖一定深度,回填碴石平整锁口盘底后,绑扎钢筋模混凝土浇筑作业,待混凝土达到强度后将开挖空间进行回填夯实,使锁口圈与混凝土浇筑成整体,使其达到很强受力特征,保证进口结构安全。

2)竖井井身结构质量控制。井身初期支护采用喷-钢架-锚-网-喷联合支护结构,先整平浮碴后,对井壁进行初喷,保护围岩,减少奉化,初喷完成后进行拱架安装,拱架背后安装钢筋网片,再打设锚杆并注浆锚固,最后对井壁复喷至设计厚度。另外,对地层破碎地段和富水地段,还需再采取:

a. 初期支护背后花管注浆与预注浆起到填充与止水的双重作用,当喷射混凝土表面出现水泥浆液外流的时候,加入水玻璃,加快凝结速度,增强注浆效果,改善围岩力学性能,并使初期支护与围岩形成整体;b. 预埋卸水管集中排水,将比较分散的水流通过卸水管集中引出,防止水路对竖井井壁已喷射混凝土的冲刷。竖井井身二次衬砌混凝土采用整体下模板施工,混凝土下放过程中在距模板顶处设一缓冲器,缓冲器上接钢管下连特制橡胶管减小冲击力,防止混凝土离析,混凝土到井底后要以“十”形对称浇筑,防止跑模,采用插入式振捣棒进行振捣,两侧相对高差不超过10 cm,分层厚度,保证振捣质量,不得出现漏振与过振。当浇筑至模板顶部时,还要调整混凝土的粗骨料比例,减少大石子,增加水泥用量,以增加混凝土的流动性,加强振捣,保证混凝土密实,施工时确保与地面联系畅通。

3) 竖井与横通道交接处结构质量控制。竖井与横通道处于垂直交叉,围岩开挖扰动大,结构受力复杂,尤其是在竖井与横通道结构连接处容易产生应力集中,因此为了防止结构出现应力集中,并且减少结构转换出荷载作用,首先对竖井接近横通道位置处的围岩进行注浆加固,改善围岩的性能,提高自稳能力;在竖井内沿横通道开挖位置预埋加强筋,并施作固定锚杆,使竖井靠近横通道位置处钢架连接成整体,并通过锚杆与注浆使竖井支护与围岩共同作用;横通道开挖过程中,在竖井与横通道交界面架设临时支撑,保证竖井支护结构开口后的稳定性;横通道拱架采用抗力大、抗扭性好的高强钢架,提高横通道初期支护的刚度;竖井钢架与横通道钢架采取双层、扩大连接,增强抵抗应力集中的能力,并通过锚杆进行固定;横通道在竖井范围内开挖初期支护完成后,统一浇筑二次衬砌,使二者连接处的二次衬砌为一个整体,利于结构稳定。

4) 做好竖井不同位置的监控量测工作,及时掌握竖井支护结构变形位移情况,建立预警报警机制,制定变形控制等级,制定注浆补强、支撑加固等工程处理措施。另外,还要制定支护结构失效紧急情况下的逃生预案,并定期组织演练。

4.5 竖井施工制定作业安全制度

竖井施工安全危险源多,一定要做到:a. 制度

上,针对各种施工作业、辅助作业等一系列有关施工的所有工序制定具体、详细、可操作性强的规章制度;b. 落实上,坚决予以落实执行,针对各种作业的具体情况实行日、周、旬、月检查,并坚决实行奖罚制度;c. 环境保障上,尽量创造良好的施工环境、作业条件,如井下施工环境,解决好通风排水人员设备防护等;d. 紧急安全预案,对于施工现场所处的特殊条件,做好包括施工机械、人员、围岩、涌水等各种紧急安全预案。

5 结语

通过对拟建的渤海海峡隧道竖井的风险分析,得出了渤海海峡隧道竖井施工的关键风险为突水、突泥风险;综合考虑了渤海海峡隧道竖井开挖风险等级(三级),属于高风险;并结合渤海海峡隧道竖井的工程特点对风险的应对措施进行了初步讨论,进一步说明了风险管理在海底隧道竖井施工中的重要意义和控制措施的重要性。同时,风险评估结果可以为业主决策和风险管理提供一定的依据和指导,从而确保隧道施工安全,也可为以后类似工程参考借鉴。

由于当前针对渤海海峡隧道竖井施工风险分析和应对措施是建立在设想方案的基础上,深度和广度存在一定的不足,在今后的研究中需进一步收集和调查渤海海峡隧道沿线地质情况,以使风险评估边界条件更加明确,对渤海海峡隧道竖井施工的对策更具针对性。

参考文献

- [1] 程正明. 潮间带富水砂层海底隧道及竖井施工技术探讨[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(6): 33-38.
- [2] 周书明. 青岛胶州湾海底隧道总体设计与施工[J]. 隧道建设, 2013, 33(1): 38-44.
- [3] 谭忠盛, 王梦恕, 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.
- [4] 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.
- [5] 谭忠盛, 王梦恕, 杨小林. 海底隧道施工技术及其琼州海峡隧道方案的可行性[J]. 焦作工学院学报, 2001, 20(4): 286-291.
- [6] 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.
- [7] 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, 2007.

Study on shaft drilling and blasting construction risk analysis and countermeasures of Bohai Strait tunnel

Zhang Wenxin, Zou Chong

(Technology Center of China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

[Abstract] In view of the shaft construction risk analysis of Bohai Strait tunnel, this paper determines risks during construction. Combining the risk weight analysis ranking, the sequence in turn from low to high is supporting structure failure risk, natural disaster risk and shaft excavation risk. Through risk assessment, we determine that the risk of water inrush and mud outburst is the key risk. Considering the influences of key risk and other risks on the shaft construction, we put forward response measures about shaft construction risk of Bohai Strait tunnel from the geological forecast, shaft hoisting equipment selection and hoisting process control, shaft excavation risk control, natural disaster risk prevention, shaft supporting structure for quality control and the establishment of the shaft system construction, which provide guidance for the subsequent construction.

[Key words] strait tunnel; shaft construction; drilling and blasting method; risk analysis; response measures