

大连湾海底隧道钻爆法施工风险评估研究

闫玉茹¹, 黄宏伟¹, 胡群芳², 程 勇³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海防灾救灾研究所, 上海 200092;
3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 海底隧道具有复杂难以确定的地质条件和周围环境, 因此施工和运营过程中影响工程进度、成本、城市环境和安全的因素众多, 使得海底隧道的投资风险较大, 目前风险管理理论在钻爆法海底隧道施工方面的应用还较为少见。以拟采用钻爆法施工的大连湾海底隧道为背景, 在预工可阶段, 针对推荐轴线的 2 种方案的施工风险进行了辨识、分析, 并采用基于信心指数的专家调查法对风险进行评价, 风险评估主要从南岸陆域段隧道施工、海域段隧道施工、北岸隧道施工及施工对周围环境的影响四个方面展开。根据风险评估的结果, 对推荐轴线的 2 种方案进行了对比分析, 得出预工可阶段推荐方案的风险较大。最后结合大连湾海底隧道施工风险的特点, 提出风险控制措施以及相应的结论和建议, 为工程决策中选线方案的确定和工程建设管理提供可靠的参考依据。同时, 把风险管理理念应用到海底隧道建设中, 为同类工程的风险评估提供参考。

关键词: 海底隧道; 钻爆法; 风险评估

中图分类号: U 459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3616 - 09

RISK ASSESSMENT ON DRILL AND BLASTING METHOD OF DALIAN BAY SUBSEA TUNNEL

YAN Yuru¹, HUANG Hongwei¹, HU Qunfang², CHENG Yong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Shanghai 200092, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: The subsea tunnel has complex geology conditions and surrounding environments, so there are many factors that affect the advancing rate, cost, city environment and safety during the subsea tunnel construction and operation. However, risk management theory has rarely been reported on the construction of large-scale subsea tunnel excavated by drill and blasting method. With the background of Dalian Bay subsea tunnel excavated by drill and blasting method, it will focus on the two schemes during the stage of the feasibility of the project, identifying and analyzing the construction risks, evaluating the risks by using the survey from specialists method based on confidence index. The risk assessment is mainly carried on by the four aspects, i.e. the south shore land field tunnel construction, the subsea area tunnel construction, the north shore tunnel construction and the influence of the construction upon the surrounding environments. Based on the results of risk assessment, the risk of recommended scheme is large. Finally, according to the characteristics of the risks, some measures to reduce or control the risk loss are taken, and some conclusions and suggestions are also proposed. It gives some references to the selection of scheme line and construction management in the engineering decision. Simultaneity, the risk management theory to the construction of subsea tunnel should be adopted, which can provide references to the

收稿日期: 2007 - 06 - 13; **修回日期:** 2007 - 07 - 12

作者简介: 闫玉茹(1980 -), 女, 2003 年毕业于沈阳工业大学建筑工程系, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下工程风险方面的研究工作。E-mail: yryan@126.com

risk assessment of other similar engineering cases.

Key words: subsea tunnel; drill and blasting method; risk assessment

1 引言

风险管理理论的研究已经历了一段较长的历史,且风险管理咨询已作为一项成熟的技术在美国企业界得到了应用。但目前美国风险理论的研究主要侧重于风险分析方法以及其在企业管理和保险领域的应用方面,而风险分析在工程项目的应用研究相对进展缓慢,尤其在隧道工程领域方面。20 世纪 70 年代以后,隧道工程风险的理论研究才取得了一定的进展。

国内外学者在风险管理理念及其在隧道工程的应用方面,做了一些尝试性的研究。R. Sturk 等^[1]将风险分析技术应用于斯德哥尔摩环形公路隧道。B. Nilsen 等^[2]对复杂底层条件地区的海底隧道的风险进行相对深入地研究。国际隧道协会委员 H. Duddeck^[3]对穿越海峡和穿越阿尔卑斯山的隧道如何进行风险评估进行了探讨。S. D. Eskesen 等^[4]为隧道及地下工程的风险管理提供了一整套参照标准和方法。A. Odgård 等^[5]对丹麦的两个主要岛屿 Zealand 和 Funen 之间建立的海峡隧道进行了详细的风险评估,并提出改善措施。E. Grønv 和 O. T. Blindheim^[6]对隧道工程尤其是海底隧道工程的费用超支问题进行了风险分析。

近年来国内也大力推动和促进工程风险管理的研究。李永盛等^[7]完成的崇明越江通道工程风险分析研究课题,是国内第一个对大型软土盾构隧道工程进行风险评估的项目。黄宏伟等^[8~11]进一步把风险分析理论应用到其他隧道工程的风险评估中。胡群芳和黄宏伟^[12]建立了隧道及地下建筑工程的风险接受准则模型。王梦恕^[13]对厦门海底隧道设计、施工、运营安全风险进行了分析。王学斌^[14]对厦门翔安隧道五通端陆域全强风化层施工的风险进行了分析。

隧道工程与其他工程项目相比,具有隐蔽性、复杂性和不确定性等突出的特点,而跨海隧道显得更为突出。海底隧道具有复杂的难以确定的地质条件和周围环境以及施工和运营过程中影响工程进度、成本、城市环境和安全的因素众多,使得海底隧道的投资风险较大,若决策时考虑不周,可能造成重大的经济损失和不良社会影响。然而,目前风

险管理理论在特大钻爆法海底隧道施工方面的应用还极其少见。结合大连湾海底隧道工程,本文将重点对预工可阶段所推荐轴线的 2 种建设方案采用钻爆法施工存在的风险进行分析,因而为工程决策中选线方案的确定和工程建设管理提供可靠的参考依据。

2 工程概况

大连湾海底隧道跨越海域部分总长为 3 000~3 500 m,设双向六车道。预工可阶段选择了 A, B, C 三个不同的轴线位(见图 1),并在同一轴线位上对不同的建设方案进行了综合比较。其中 A 轴线有 2 个重点考虑的方案:(1)方案一,北岸钻爆围堰填海高架跨越甘井子城区;(2)方案二,北岸钻爆直穿甘井子城区。预工可阶段将 A 轴线的方案一作为推荐方案。

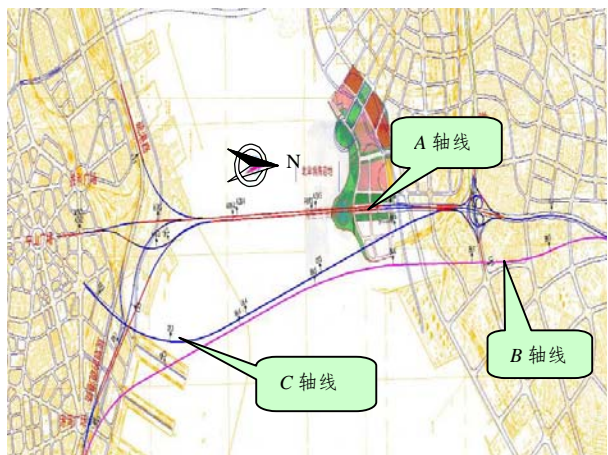


图 1 大连湾海底隧道轴线方案平面布置图

Fig.1 Plane layout of axial scheme of Dalian Bay subsea tunnel

在拟建隧道陆地区域,浅部岩石风化裂隙较发育,岩体完整性差,岩体破碎,深部节理裂隙较发育~很发育,只有局部岩体较完整,大部分岩体较破碎。在中山区临海一带隧道起始端,有辉绿岩脉侵入,形成辉绿岩带。在海湾中间偏南,因是地层交界处,从目前的物探情况推断,可能存在一条软弱破碎带。海湾段隧道穿越地层为灰岩,其为灰褐色~灰黑色,中厚层状构造,隐晶质结构,节理发育,岩体破碎,岩质坚硬,但此区域的灰岩区为岩

溶发育区。过了海湾，北岸陆域有几条明显的断层和褶皱存在。

3 风险辨识和分析

根据大连湾海底隧道工程预可行性研究报告和工程地质勘察报告，对在此海底隧道采用钻爆法施工的风险进行辨识和分析。

3.1 风险辨识

风险辨识，即找工程施工期所有的潜在风险因素，并进行归类整理、筛选，找出风险点。针对大连湾海底隧道推荐轴线的2种采用钻爆法施工的方案进行风险分析，主要从以下四方面展开：南岸陆域段隧道施工、海域段隧道施工、北岸隧道施工及施工对周围环境的影响。针对具体工程，运用专家调查法、故障树法并结合以往工程资料，整理出每个方面的风险事故(如表1所示)，并生成调研表(如表2所示)。

表1 大连湾海底隧道钻爆法施工风险辨识

Table 1 Risk identification on drill and blasting method of Dalian Bay subsea tunnel

风险区域	风险分析
南岸陆域段隧道施工	道路下方施工事故、高架桥桩基损坏、船厂地面沉降大或破坏、火车东站段不均匀沉降、匝道隧道交叉穿越、互通分叉段施工事故
海域段隧道施工	不良地质段施工风险、隧道覆盖层厚度选择不当、钻爆施工超欠挖、超前地质预报有误、施工工序及支护结构选择不当
北岸段隧道施工	填海围堰高架跨越甘井子城区，围堰施工事故、围堰内基坑施工事故、围堰内回填料长期沉降的影响、高架穿越对环境的影响
施工对周围环境的影响	钻爆直穿甘井子城区，北岸不良地质段施工风险、隧道埋置深的风险、中石油某油库附近施工的风险 陆域段施工对周围环境影响、北岸填海对海域环境及规划航道的影响、废渣(废水)的处置不当的影响

表2 海底隧道钻爆法施工风险调研表(局部)

Table 2 Investigation table on drill and blasting method of subsea tunnel(part)

钻爆施工风险	事故概率	经济损失	人员伤亡	工期损失	环境损失
分部工程	风险等级	概率指数	信心损失等级	信心损失等级	信心损失等级
工程	事故等级	指数	指数	指数	指数

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。根据风险辨识的成果，结合此海

底隧道具体工程特点，按风险产生原因，可能发生途径以及一旦发生后可能导致的后果进行系统阐述。

3.2.1 南岸陆域段隧道施工风险分析

该工程段地质主要为板岩，其中板岩为板状构造，变余结构，裂隙发育，强风化层厚度约12m，岩体破碎，岩体成碎石状，弱风化层岩体较完整，岩石成碎块状，围岩级别较低。

(1) 道路下方施工的风险

如果施工中爆破对围岩的扰动较大，将对周边建构物产生非常不利的影晌，如路面塌陷，建筑物产生倾斜、裂缝，地下管线损坏等。本工程中，在船厂和火车东站附近的地下管线要进行适当的改移；推荐的南岸交通疏解方案需穿越一条较大的地下排水管。

(2) 高架桥段施工的风险

如果工程地质及桥梁下部结构勘测不清，就会影响到钻爆施工的控制。主线隧道下穿高架桥时顶部覆土厚度约16m，由于该段高架桥跨径较小，一般为13~16m，桥墩基础均为桩基础，隧道施工时对高架桥基础有一定影响。

(3) 船厂段施工风险

本轴线方案有815m左右在大连船舶重工集团下面穿行，隧道顶部距离地面覆土深度为-13.5~29.0m，有一定的安全储备，对船厂的影响不会很大。但是，因其靠近海湾，如果爆破控制不利，或后期围护工作跟做不及时，极易造成隧道渗水、坍塌，造成船厂地面塌陷、机器损坏，影响其正常的运营。

(4) 火车东站段施工风险

根据隧道纵断面设置情况，在穿越大连火车站区时，隧道顶部均有一定的安全覆土厚度，其中覆土厚度约12~16m；该段隧道结构采用单车道分离式隧道形式，单洞开挖跨度大约10m。由于其铁路标高较低，如果爆破控制不利，将对铁轨产生很大的影响。列车运行对沉降、隆起和铁轨间的差异沉降有着特殊的严格要求，较小的变化都可能引起铁路停车甚至颠覆等重大事故，从而影响到火车东站的正常运营。

(5) 匝道隧道施工风险

西侧匝道隧道采用与南岸主线隧道相同的断面形式，埋深与之也基本相当。东侧匝道隧道采用四

车道双洞分离隧道形式, 左线匝道隧道从主线右线下部穿过、埋深较主线深约 15 m, 右线匝道隧道与主线埋深基本相当。左线下穿主线右线时有一定的安全覆盖层厚度, 但是由于其南岸附近地质条件较差, 后施工隧道会对建成隧道有很大影响, 使既有隧道产生不均匀沉降、裂缝等。

(6) 互通分叉段施工风险

由于南岸采用了地下互通形式, 导致不得不采用多处分岔结构, 分岔段结构一般集合了连拱隧道、小间距隧道及分离式隧道等多种隧道形式, 由于其空间受力复杂、线形布设困难、断面变化频繁, 同时分岔段多位于地下水丰富地段, 这对其设计与施工均构成较大的挑战。

3.2.2 海域段隧道施工风险分析

该工程段隧道穿越地质层为灰岩, 其为灰褐色~灰黑色, 中厚层状构造, 隐晶质结构, 节理发育, 岩体破碎, 岩质坚硬, III 类围岩。

(1) 不良地质段施工风险

隧道穿越软弱破碎带不良地质: 地质报告中提到, 在海湾中间偏南, 可能存在一条软弱破碎带。此处地下水具有一定的承压性, 开挖扰动后, 极易发生涌水、突水的现象, 威胁施工的安全。因此, 能否安全穿越软弱不良地质段, 是海底隧道工程施工成败的关键。

隧道穿越断层/断裂带不良地质: 施工风险主要取决于断层的性质、断层破碎带的宽度、填充物、含水性和断层活动性以及断层构造线方向的组合关系(正交、斜交或平行)。此外, 施工过程中对围岩的破坏程度、工序衔接的快慢、施工技术措施是否得当等, 均有很大关系。

隧道穿越岩溶段不良地质: 隧道区域的灰岩区为岩溶发育区。海底隧道在岩溶段施工时, 遇到的风险为: 当隧道穿越可溶性岩层时, 有的溶洞位于隧道底部, 其填充物松软, 隧道基底难于处理; 有的溶洞岩质破碎, 容易发生坍塌; 有时遇到较大的水囊或暗河, 岩溶水或泥砂夹水大量涌入隧道; 有时遇到填满水的填充物溶槽, 当坑道掘进至其边缘时, 含水填充物不断涌入坑道, 此时将难以遏止, 甚至覆盖层开裂下沉, 海水倒灌; 有的溶洞、暗河迂回交错、分支错综复杂、范围宽广, 处理十分困难。

(2) 隧道覆盖层厚度选择的风险分析

方案一, 海域段最小顶板覆盖层厚度为 20 m、最大为 25 m, 有一定的安全储备; 但是该段围岩节理发育, 容易产生渗水、涌水。岩性差的区域, 震动速度衰减较快, 围岩吸收的能量越多, 对围岩稳定影响越不利。

方案二, 海域段隧道的顶板覆盖层厚度为 40 m 左右, 埋置较深。厚度过大会使作用于衬砌结构上的水压力增大; 使海底隧道的长度增加, 继而延长了建设工期、增加了建设费用风险; 使隧道的坡降增大, 影响运营阶段车辆的通行, 并加剧车辆尾气的排放。

(3) 隧道钻爆施工超欠挖风险

导致隧道超欠挖的影响因素有钻孔精度、爆破技术、施工组织管理、地质条件变化、测量放线等。其引起的风险主要为: 超挖引起多装、多运渣, 超挖空间还要用混凝土回填; 欠挖则要清除, 从而造成人工、工期和材料的超额消耗, 致使工程成本增加; 超挖也给后续作业, 如喷射混凝土、张挂防水板等作业造成一定困难。

(4) 超前地质预报应用的风险

导致超前地质预报应用的风险因素为数据收集不充分、数据失真、数据处理失误、地质解释错误、地质解释错误、预报准确率差、地质人员技术水平问题, 且每种预报方法都有其适应性和局限性, 如地质雷达可以探测 5~30 m 范围内的地下地层或地质异常体(如溶洞、土洞、断裂及空隙等), 此海底隧道灰岩区为岩溶发育区, 可以用地质雷达对掌子面前方和边墙外侧岩溶洞穴进行探测; 但目前国内还没有为隧道超前地质预报专门设计制作的地质雷达, 且仪器密封性差, 洞内不易防水、防潮和防尘, 易造成仪器损坏, 特别是没有专门的天线, 操作起来费时费力, 效果不好。对于此海底隧道, 其地下水丰富, 对仪器的密封性要求更高, 使用前要对其适应性进行论证。

(5) 施工工序及支护结构选择风险

此海底隧道的围岩级别为 III~VI 级不等, 如果在钻爆的开挖施工过程中, 如果没有按照围岩级别选择合适工序及支护结构, 可能引起隧道塌方, 甚至海水倒灌。如台阶法适用于 III~V 类围岩, 本隧道工程地质中, SN 两岸地质大多为 IV, V 类围岩, 海域大多为 III 类围岩, 故该方法在本工程中有很强的适用性, 但此方法在施工中也存在风险,

如台阶数过多、台阶长度不适当、台阶开挖增加了对围岩的扰动次数等；但对于不良地质段，如断层、软弱破碎带等，上下导坑先拱后墙法将更加适用。

3.2.3 北岸段隧道施工风险分析

(1) 方案一：钻爆法填海围堰高架跨越甘井子城区

① 围堰施工风险

施工准备期可能存在砂袋质量不合格，导致砂袋漏砂，影响后续工程质量。堰体主体施工中可能存在堰体渗漏水、防渗墙效果差、堰体滑坡破坏等问题；止水帷幕施工中可能有孔斜、卡钻、掉钻、漏浆及塌孔等风险事故的发生；抽水施工中可能由于排水引起围堰倾斜、位移过大、围堰失稳破坏风险事故的发生；同时在填海围堰的施工中，可能由于海水对堰基的冲刷引起堰底抛石不足的风险事故发生。

② 围堰内基坑施工风险

根据预工可报告，围堰内基坑围护结构可以采用钻孔咬合桩，因此在围堰内基坑施工可能存在的问题：开挖时有可能出现涌水、涌砂及基坑塌方等事故；基坑围护结构的稳定是基坑开挖的前提，也是围堰坝体稳定的重要影响因素，在钻孔咬合桩施工过程中，可能会遇到桩孔偏斜、管涌、钢筋笼上浮或者下沉、形成事故桩等事故；基坑开挖、降水的施工不当，有可能会引起围堰坝体的不均匀沉降、倾斜、位移过大，甚至出现坝体开裂、渗漏、失稳等事故；围堰内基坑若在冬季施工中容易出现一些冬季施工质量问题，如供水管道和井点管冻结、钢筋混凝土施工质量问题等。

③ 围堰内回填物长期沉降的风险

隧道底部回填物的长期沉降对隧道结构的影响主要表现在两方面：沿隧道纵向长度方向上的不均匀沉降以及施工先后顺序不同的不均匀沉降。不均匀沉降造成的附加应力使隧道产生纵向弯矩和纵向的相对弯曲，进而引起隧道结构开裂、渗漏，严重的可能发生局部区域破坏等。围堰内的隧道有些部分需要在顶部及两侧进行回填，而在这些区段，如果隧道两侧的回填物不作处理或者处理不当，而顶部回填物在回填初期无法形成拱形，荷载呈倒拱型，使得隧道两侧的一部分荷载转移到隧道顶部，加上回填物的不均匀性，很容易使得隧道(尤其是顶部)产生裂缝，进而引起渗漏等问题。

冻融不均匀沉降对隧道结构的影响风险比较大，冻融作用的普遍后果是隧道出现裂缝，产生渗漏，其次是局部破损，严重时将会影响隧道的正常使用。

④ 高架穿越的风险

北岸城区为了与规划的路网相协调，隧道洞口位于北岸填海区内，对海域环境的影响较大。同时北岸高架穿越对道路两边的商业发展割裂较为严重，拆迁量较大。

(2) 方案二：钻爆直穿甘井子城区

该工程段地质以灰岩、白云质灰岩为主，其为灰黑色~灰白色，薄层~中厚层状构造，隐晶质结构，节理较发育，岩体较破碎，岩质坚硬。

① 北岸不良地质段施工风险

北岸隧道沿线存在两条破碎带，一条主要为淤泥质亚黏土；另一条破碎带主要是灰岩、白云质灰岩，局部有黏土填充，岩体很破碎。隧道在开挖过程中遇到破碎带，容易引起隧道塌方，增加了钻爆施工的风险。

② 隧道埋置深的风险

北岸段隧道的顶板覆盖层厚度多在 40 m 以上，埋置深，也将带来一系列的风险。

③ 中石油某油库附近施工的风险

本项目拟定路线方案时充分考虑到中石油某油库与城市快速路的安全距离(平面按不小于 25 m 控制)，对油库的干扰较小。但是，由于油库本身就是很大的危险源，钻爆施工可能引起油库爆炸等风险事故发生，进而引起隧道的坍塌、人员的伤亡等重大事故发生。

3.2.4 施工对周围环境的影响

(1) 陆域段施工对周围环境影响的风险

由于施工不当导致相邻建(构)筑物产生过大沉降和水平位移，影响其正常使用；导致地下管线、路面的破坏，对居民的正常生活造成影响。

(2) 北岸填海对海域环境及规划航道的影 响风险

北岸隧道洞口在规划商业区内接上地面道路，需填海 1 000 m 左右，在海中围海造地，对海域环境及规划航道的影 响较大。主要表现在对海洋的物种多样性的削弱、对水质的破坏等方面；海域航道缩窄，通航受到一定的影 响，且围堰建设难度较大，工程造价较高。

(3) 废渣(废水)的处置不当的风险

推荐方案隧道长 4.150 km, 其主隧道单洞净空断面尺寸为 13.5 m×5.0 m, 开挖量大, 明挖段、匝道等土石方量开挖也较大, 如何处置废渣是一个关键问题。废渣(废水)的处置方式会产生一系列生态环境问题: 建筑渣土从工地运往处置地的过程中, 能造成城市路面、空气污染, 同时汽车尾气排放也增加了城市大气的污染物; 渣土弃置场在使用过程中常常尘土飞扬, 对周围的大气环境造成很大的影响; 同时弃置场地侵占大量的土地。

4 风险评价

4.1 风险评价标准

此海底隧道风险评估与管理研究所采用的风险评估方法和评价准则均依据有关研究^[4, 15]。本文给出风险发生概率、后果损失、风险评估矩阵以及风险接受准则标准, 如表 3~6 所示。

表 3 风险发生概率等级
Table 3 Ranks of risk probability

概率等级	区间概率/%	事故描述
一级	<0.01	不可能
二级	0.01~0.1	很少发生
三级	0.1~1	偶尔发生
四级	1~10	可能发生
五级	>10	频繁

表 4 风险后果损失等级
Table 4 Ranks of risk loss

一级	二级	三级	四级	五级
可忽略	需考虑	严重	非常严重	灾难性

表 5 风险评估表
Table 5 Matrix of risk assessment

事故描述	A 级($P < 0.01\%$)	B 级($0.01\% \leq P < 0.1\%$)	C 级($0.1\% \leq P < 1\%$)	D 级($1\% \leq P < 10\%$)	E 级($P \geq 10\%$)
	可忽略	1A	1B	1C	1D
需考虑	2A	2B	2C	2D	2E
严重	3A	3B	3C	3D	3E
非常严重	4A	4B	4C	4D	4E
灾难性	5A	5B	5C	5D	5E

表 6 风险接受准则

Table 6 Standards of risk acceptance

风险等级	风险	接受准则	控制对策	建议应对部门
一级	1A, 2A, 1B, 1C	可忽略	不必进行管理、审视	设计、施工、监理单位
二级	3A, 2B, 3B, 2C, 1D, 1E	可容许	引起重视, 需规范管理审视	总承包商
三级	4A, 5A, 4B, 3C, 2D, 2E	可接受	引起重视, 需防范、监控措施	建设公司; 指挥部
四级	5B, 4C, 5C, 3D, 4D, 3E	不可接受	需重要决策, 需控制、预警措施	或政府部门
五级	5D, 4E, 5E	拒绝接受	立即停止, 需整改、规避或预案措施	

4.2 风险评价

根据以上对大连湾海底隧道钻爆法施工可能存在的各种风险事故进行综合汇总分析, 采用基于信心指数的专家调查法, 并依据风险评估矩阵对其风险等级进行评定, 其风险评价列于表 7。

5 2 种方案的比较

针对 A 轴线填海围堰高架跨越甘井子城区和钻爆直穿甘井子城区的 2 种方案, 结合上述风险评价结果, 应用同济大学自行研制开发的隧道及地下工程风险评估与管理软件(TRM1.0), 并参考结合计算机数值模拟分析方法, 得到 A 轴线围堰方案总体风险指标为 0.46, 风险等级为三级; 而隧道穿越甘井子城区方案总体风险指标为 0.39, 风险等级为三级。由计算结果可知:

(1) 施工准备期方面, 由于围堰方案钻爆法隧道长度明显减小, 对于地质勘察失效和不良地质的存在较小风险, 其中不良地质误判、地层界限误判两个风险有着等级大小的性质差别, 其他都有风险等级相同之下的风险指标的细微差别。在冰冻风险方面, 由于围堰方案涉及到填海抽水和地下降水等施工, 风险等级明显大于穿越甘井子方案。

(2) 而在投资风险方面, 由于围堰方案增加了围堰填海工程, 并且由于围堰填海本身具有较大的施工风险, 从而风险等级高于穿越甘井子方案。同样正因为围堰施工的不确定性, 导致围堰方案工期影响风险亦较大。但在与城市规划配套风险方面, 由于围堰方案照顾到甘井子地区的交通疏导, 因此风险相对较小。

(3) 在钻爆法施工风险方面, 主要的差别来源

表7 大连湾海底隧道钻爆法施工风险评价结果表

Table 7 Result of risk assessment on drill and blasting method of Dalian Bay subsea tunnel

风险区域	主要风险	风险等级	后果损失	风险等级
南岸陆域段隧道施工	道路下方施工事故	C级	2	二级
	高架桥桩基损坏	B级	3	二级
	船厂段地面沉降大或破坏	B级	4	三级
	火车站段不均匀沉降	C级	3	三级
	匝道隧道交叉穿越	C级	2	二级
	互通分叉段施工事故	D级	2	三级
	不良地质段施工风险	B级	4	三级
海域段隧道施工	覆盖层厚度选择不当	C级	5	四级
	钻爆施工超欠挖	D级	2	三级
	超前地质预报有误	B级	3	二级
	施工工序及支护结构选择不当	B级	4	三级
	围堰施工事故	D级	3	四级
	围堰内基坑施工事故	C级	2	二级
	围堰内回填物长期沉降的影响	C级	4	四级
北岸段隧道施工	高架穿越对环境影响	D级	2	三级
	北岸不良地质段施工风险	C级	3	三级
	钻爆直穿甘井子城区	D级	2	三级
施工对周围环境的影响	隧道埋置深的风险	D级	2	三级
	中石油某油库附近施工的风险	B级	4	三级
	陆域段施工对周围环境的影响	C级	2	二级
	北岸填海对海域环境及规划航道的影响	D级	3	四级
	废渣(废水)的处置不当	B级	3	二级

于海底隧道长度的不同,和总体隧道的长度不一样。其中穿越甘井子方案在海域中隧道长于围堰方案,因此风险的发生概率较大,从而导致风险较大。据地质勘察分析,在穿越甘井子区段,存在破碎地带,从而增加了钻爆法施工过程中的渗水和塌方风险。主要为超前地质预报风险,该施工技术有一定的不确定性因素,而穿越甘井子方案比围堰方案长近3 km,增加了发生风险的概率。

(4) 两方案的本质区别在于围堰方案增加了围堰施工和围堰内基坑施工风险,而穿越甘井子方案增加地下隧道近3 km。其中围堰工程施工在技术方面有众多不确定因素,且事故的发生后果不容忽视;

穿越甘井子隧道长度增加不少,包括几百米海域隧道,且存在破碎带地层,从而使钻爆法施工发生渗水、塌方事故风险增加。

(5) 在隧道运营期的风险评估方面,由于穿越甘井子隧道长度增加,导致在通风、防火、交通事故和耐久性等相关长度有关的风险上,其风险等级普遍较大。但是,围堰方案在隧道坡度增加,围堰施工影响海域环境,而且存在围堰内回填物长期沉降对隧道结构的影响等风险上,等级较穿越甘井子方案大。

(6) 从工程建设规模角度,围堰方案需临时围堰1 000 m和永久填海大于500 m,相比延长隧道来说,工程规模略大,造价略高。从城市交通规划角度,围堰方案隧道长度较短,整个路线方案与城市总体规划一致,穿越甘井子城区方案快速畅通、对甘井子城区干扰小,但对城市未来改造和发展配合较差。

6 风险控制措施

风险的存在是不可避免,但可以通过一些工程技术措施降低风险。目前,风险控制主要有两条思路:一是减小风险发生的概率,二是减小风险可能发生后的损失大小。在通常情况下,降低风险也就意味着增加投资,投入额外的人力物力对风险进行技术控制,而且达到一定程度后,增加大量投资仅能将风险程度作细微减小;但是对风险置之不理亦不可取,以往大量工程的事故案例一次又一次地向人们敲响警钟。所以,应该先对风险按大小、性质进行区分,在针对不同风险采取可靠的风险控制措施。

根据以往大量工程实践经验,结合许多工程事故教训,并查阅大量文献资料,同时,考虑到大连湾海底隧道特定的工程特点,整理出对应风险控制措施:

(1) 南岸陆域段隧道施工风险控制措施

① 在市区段,应严格按爆破设计进行施工,爆破所引起的地表震速应控制在周围建筑物结构响应所允许范围内,同时应严格控制开挖引起的地表沉降;

② 为有效控制和规避管线综合风险,首先必须对线路区域内的管线情况进行详细的了解和把握,

且应文明施工;

③ 对于在建构筑物下方附近的隧道钻爆施工,要详细了解该处地质和结构情况;

④ 制定紧急预案,出现危险情况及时进行处理。

(2) 海域段隧道施工风险控制措施

① 在不良地质段施工前,切实掌握所遇不良地质的所有情况,制定全面而可靠的施工安全措施、防淹对策、消防措施以及在施工过程中做好紧急情况下的撤离训练等;

② 根据工程场地的实际水文地质情况,并结合国内外海底隧道覆盖层厚度设计施工的经验,确定合理的覆盖层厚度;

③ 控制超欠挖重点是要控制钻孔精度、爆破技术参数的合理配置,对作业全过程及相关因素实行严格科学的管理;

④ 超前地质预报中,要以地质分析方法作为基础,长、短期地质超前预报共同作用,组成完整的地质超前预报技术体系;

⑤ 隧道开挖时,应进行爆破震动监测及时反馈信息,调整爆破参数,减轻爆破震动效应,从而确保隧道施工安全。

(3) 北岸段隧道施工风险控制措施

方案一:钻爆填海围堰高架穿越甘井子城区:

① 北岸围堰段施工长度比较长,采用分仓围堰,在关键节点施工时需要加强施工管理,察看水情状态,发现紧急情况,要及时修补加固;

② 对围堰内基坑施工的各个施工工序需要严格把关,控制施工质量;同时还要采取冬季施工的预防措施;

③ 对隧道底部、顶部及两侧的回填土根据其厚度、所处位置采取合理措施,并预防冻融引起的不均匀沉降。

方案二:钻爆直穿北岸城区:

① 在不良地质段施工前,切实掌握不良地质的情况,采取合理的施工方法;

② 在中石油某油库附近施工时,采用减震爆破技术,减少对围岩的扰动。

(4) 施工对周围环境的影响的风险控制措施

① 采取合理的爆破技术,使施工对周围环境的影响降低到最小;

② 下一阶段结合相关专题并充分评估建设方案对海域环境及规划航道影响;

③ 施工前与沿线单位、企业协商,制定合理的下穿方案,减小对其影响;

④ 实现城市渣土减量化和资源化,按照循环经济的原则指导建筑渣土的处置和管理。

7 结 论

通过对大连湾海底隧道钻爆法施工风险辨识、分析、评价及控制措施研究,可得到如下结论:

(1) 由于不良地质的存在,将导致钻爆法施工无法正常进行,甚至造成灾难性的后果,强烈建议有关单位重视地质勘察和超前地质预报,制定施工安全措施和应急预案,将风险损失降低到最小。建议采用光面爆破技术或预裂爆破技术,以保持隧道成型良好,减少超欠挖,减少对围岩的扰动;隧道开挖时,应进行爆破震动监测,及时反馈信息,调整爆破参数,减轻爆破震动效应,从而确保隧道施工安全。

(2) 本海底隧道的围岩节理裂隙发育、存在不良地质,钻爆法的各种辅助施工处治措施的费用会急剧增加,同时施工风险也较大;此海底隧道采用钻爆法施工,国内可供借鉴工程实例很少,设计施工存在经验不足的风险。

(3) 通过对所推荐 A 轴线 2 种方案的综合风险评估和分析,以及应用同济大学自行研制开发的隧道及地下工程风险评估与管理软件(TRM1.0),得出钻爆法直穿甘井子城区的风险较低,与预工可阶段的推荐的北岸钻爆填海围堰高架穿越北岸城区的方案不一致,建议有关部门对方案进行深入分析和考虑。

(4) 基于信心指数的专家调查法被证明在缺乏大量施工数据的情况下可作为一种有效的风险分析方法。通过对大连湾海底隧道预工可阶段所推荐轴线 2 种建设方案的施工风险综合分析,为工程决策中选线方案的确定和工程建设管理提供可靠的参考依据。同时,把风险管理理念应用到海底隧道工程的建设中去,这样可以为同类工程的风险评估提供一定的参考。

参考文献(References):

- for large underground projects as applied to the Stockholm ring road Tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 157 - 164.
- [2] NILSEN B, PALMSTRØM A, STILLE H. Quality control of a subsea tunnel project in complex ground conditions[C]// *Challenges for the 21st Century. Proceedings of World Tunnel Congress '99*. Oslo: A. A. Balkema, 1999: 137 - 145.
- [3] DUDDECK H. Challenges to tunnelling engineers[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 5 - 10.
- [4] ESKESSEN S D, TENGBORG P, KAMPMANN J, et al. Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No.2[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3): 217 - 237.
- [5] ODGÅRD A, BRIDGES D G. Design and risk analyses for the great belt east tunnel[J]. *Structural Engineering International*, 1995, 5(4): 216 - 217.
- [6] GRØV E, BLINDHEIM O T. Risks in adjustable fixed price contracts[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2003, 35(6): 45 - 47.
- [7] 李永盛, 陶履彬, 黄宏伟, 等. 崇明越江通道工程风险分析研究总报告[R]. 上海: 同济大学, 2003.(LI Yongsheng, TAO Lubin, HUANG Hongwei, et al. General report on risk assessment of the Chongming passages crossings Yangtze River[R]. Shanghai: Tongji University, 2003.(in Chinese))
- [8] 黄宏伟. 武汉长江隧道(含地铁)工程灾害与风险分析研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2003.(HUANG Hongwei. Report of engineering disaster and risk assessment research on the Wuhan tunnel crossing Yangtze River[R]. Shanghai: Tongji University, 2003.(in Chinese))
- [9] 陈 龙, 黄宏伟. 岩石隧道工程风险浅析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 110 - 115.(CHEN Long, HUANG Hongwei. Risk analysis of rock tunnel engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 110 - 115.(in Chinese))
- [10] 陈 龙, 黄宏伟. 上中路隧道工程风险管理的实践[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(1): 65 - 69, 73.(CHEN Long, HUANG Hongwei. The practice of risk management in Shangzhong Road tunnel engineering [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 65 - 69, 73.(in Chinese))
- [11] 黄宏伟. 大连湾海底隧道工程风险评估研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2007.(HUANG Hongwei. Report of risk assessment research on the Dalian Bay subsea tunnel[R]. Shanghai: Tongji University, 2007.(in Chinese))
- [12] 胡群芳, 黄宏伟. 隧道及地下工程风险接受准则计算模型研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(1): 60 - 64.(HU Qunfang, HUANG Hongwei. Study on the modeling of risk acceptance criteria for tunnel and underground engineering[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 60 - 64.(in Chinese))
- [13] 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, (增): 1 - 4.(WANG Mengshu. Design, construction and operation safety risk analysis of the Xiamen subsea tunnel[J]. *Construction Technology*, 2005, (Supp.): 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 王学斌. 厦门翔安隧道五通端陆域全强风化层施工风险分析[J]. *公路交通技术*, 2007, (2): 137 - 141.(WANG Xuebin. Analysis of construction risk on fully strong weathered layer on land at Wutong of Xiamen Xiang'an tunnel[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2007, (2): 137 - 141.(in Chinese))
- [15] 同济大学. 地铁及地下工程建设风险管理指南[R]. 上海: 同济大学, 2007.(Tongji University. Guidelines of risk management for metro tunnelling and underground engineering works[R]. Shanghai: Tongji University, 2007.(in Chinese))