

北京站至北京西站地下直径线 工程重大风险源分析与控制

赵 勇^{1,2}, 韩福忠³, 李建华⁴

(1. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心,北京 100044; 2. 铁道部工程设计鉴定中心,北京 100844; 3. 铁道部安全质量监督总站,北京 100045; 4. 中铁隧道集团技术中心,河南洛阳 471009)

[摘要] 北京站至北京西站地下直径线工程地处北京市中心城区,沿线建/构筑物众多。沿线穿越立交桥、护城河、地铁2号线等重大风险源。通过对地下直径线全线进行详细的风险评估,充分分析沿线各风险源的状况,并根据评估结果提出防止和降低风险的有效控制措施,施工完成后地铁2号线测点沉降值均小于2 mm,天宁寺桥因隧道开挖引起的沉降值低于3 mm,施工对周围建/构筑物影响非常小。

[关键词] 隧道;风险分析;风险控制

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0023-06

1 前言

隧道施工由于所处地层介质的复杂性和不确定性,在建设过程中存在很大的风险。2004年广州地铁塌方事故、2009年杭州地铁塌方事故,引发人们对地铁施工安全性的关注^[1]。

风险评估在隧道工程中已经有了一定应用。国际隧道协会颁布的 Guidelines for tunneling risk management 为隧道工程风险管理提供了参照标准。李永盛等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进行风险评估的项目^[2];杨更社等完成了地铁1号线半坡到纺织城区间风险评估,使地铁施工顺利完成^[3]。

通过风险评估可以充分认识存在的风险,对施工风险可能造成的损失程度有一个全面的了解,提前发现险情并及时采取有效措施防止和减低风险,确保工程建设顺利完成^[4]。

2 工程概况

北京站至北京西站地下直径线工程是中国第

一条在城市采用大直径泥水盾构施工的地下电气化铁路隧道。隧道从崇文门路口东侧起,经前门、宣武门,往西至长椿街后拐至西便门桥、天宁寺桥、白云路桥北侧,斜穿白云路桥至小马场附近出地面。线路全长9 151 m,其中盾构隧道长5 175 m,采用一台全新的 $\phi 12.04$ m泥水盾构施工。隧道主要沿城市主干路布置,周边环境极其复杂,涉及既有地铁、房屋、桥梁和地下管线等特、重大风险源23处,其他风险源105处,被北京市列为“最难的,风险最大的在建地下工程”,被铁道部列为“极高风险工程”。主要施工难点有:

1)地质条件复杂。隧道主要穿越粉细砂层、粉质粘土层、中粗砂层、卵石、圆砾层相互变化夹杂,地下水位高,层间水、承压水存在于不同地段。

2)周边环境复杂,风险点多,环境安全控制要求高。隧道两侧建筑物密集,包括国有资产监督管理委员会、共青团中央等国家部委机关,临近明城墙、箭楼、正阳门火车站等重要文物;上穿地铁5号线、下穿地铁4号线、平行地铁2号线段长3.8 km;穿越西便门桥、天宁寺桥、护城河且沿线范围内地下

[收稿日期] 2010-08-11

[作者简介] 赵 勇(1969—),男,河南夏邑县人,教授级高级工程师,主要从事隧道与地下工程的理论研究、铁路隧道设计审查等工作;
E-mail: jdxzhaoyong@sina.com

管线繁多,包括煤气、热力、污水等大型管线。沉降控制要求高。

3)盾构直径大、独头掘进距离长。对刀盘刀具等部件的耐磨性、泥水系统的适应性、掘进控制、其他配套的相关系统和管理要求较高。

3 重要建筑物风险评估

3.1 风险等级划分

风险等级结合以下因素划分:建/构筑物现状、与隧道的位置关系及建筑物特殊保护措施等。因此,首先根据风险点的重要性、可能造成的人员财产损失及社会影响来确定风险点的关注程度(见表1),然后分析在采取不同保护措施后,风险依旧存在的概率及造成后果的严重程度来评定风险等级(见表2)。

表1 关注程度划分表

Table 1 Division of concern degree

关注程度	可能出现概率或增加困难程度	人员财产损失或社会影响	延误工期
五级	高	大	长
四级	较高	较大	较长
三级	中	中	一般
二级	低	小	较短
一级	较低	较小	不延误

表2 风险点风险等级划分表

Table 2 Division of risk grade

风险点分级	可能出现概率或增加的困难程度	人员财产损失或社会影响	延误工期
特级	高	大	长
一级	较高	较大	较长
二级	中	中	一般
三级	低	小	较短
四级	较低	较小	不延误

3.2 评估程序

评估程序如图1所示。

4 工程沿线重大风险源分析与对策

4.1 地面建筑物的风险分析及对策

4.1.1 风险分析

西便门西里10#楼位于北京地下直径线隧道里程DK6+410~+460段的北侧。该区段从地面到隧道底部的土层分布主要为杂填土、粉土、细砂、圆砾。隧道边缘距建筑物基础最小距离为4.56 m。该建筑物总宽度14 m,总长度42 m,总建筑面积2 940 m²,为办公用房,建于20世纪70年代,为5层砖混结构。后期进行了抗震加固,增加了混凝土构

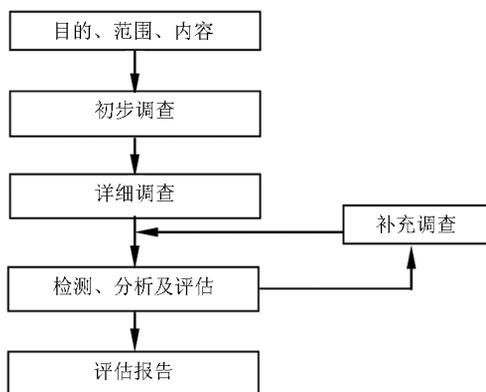


图1 评估程序示意图

Fig. 1 Diagram of evaluation procedure

造柱,顶层及一层各增设了一道混凝土圈梁。

10#楼的损伤主要为:部分窗户口左下角区域有竖向裂缝;挑檐区域普遍存在通长裂缝;建筑物一层顶圈梁普遍存在竖向裂缝。

上述损伤属非结构性损伤,现场检查鉴定结果为:西便门西里10#楼存在较多的非结构性损伤,但未发现对建筑物整体安全及承载力产生严重影响,10#楼完损等级介于基本完好房与一般损坏房之间。该建筑物关注等级划分为三级,风险等级三级。其他沿线建筑物风险评估如表3所示。

表3 盾构法地面主要建筑物风险评估汇总表

Table 3 Risk assessment summary table of the ground buildings

名称	与隧道关系	关注级别	风险等级
建筑材料供应公司(6层)	距结构边缘4.7 m	三级	二级
西区物流中心(5层)	距结构边缘5.6 m	三级	二级
房产基金会	距结构边缘5.2 m	三级	二级
星海大厦(7层)	距结构边缘5.2 m	三级	二级
西便门候车室(6层)	距结构边缘5.4 m	三级	二级
宣武门西大街2#	距结构边缘16 m	三级	二级

4.1.2 风险控制

1)对耐久性损伤较为严重的建筑物及距隧道水平距离明显偏小的建筑物的地基基础采取支护或加固措施进行处理。

2)采用超前注浆对地面建/构筑物进行预加固,盾构推进时对地面进行跟踪补浆。

3)采用高效率制浆剂制备高性能泥浆,使其在短时间内较好的形成泥膜,保持掌子面稳定。

4)严格控制同步注浆。选择胶凝时间较短的浆液进行同步注浆,使管片尽早稳定,同步注浆浆液采用特种灌浆料以及加入微膨胀剂,保证填充密实。

5) 优化掘进施工参数。合理选择泥水压力, 加强出渣量控制, 盾构推进时地层损失率控制在 0.5% ~ 0.75% 之间, 防止出现较大的隆起或沉降。

6) 加强监测。在距隧道水平距离较小的地面建筑物的关键部位设置监测点。

4.2 地下管线的风险分析及对策

4.2.1 风险分析

煤气管: 钢质, 规格为 $\phi 500$ mm, 距隧道上方 19 m, 管线埋深 2.7 m, 垂直于隧道走向。位于线路里程 DK5 + 764 ~ + 870, 经分析风险等级列为二级。管线的风险评估汇总结果如表 4 所示。

表 4 管线风险评估汇总表

Table 4 Risk assessment summary table of pipe lines

管线名称	管线材质	管线尺寸 /mm	管线距隧道顶距离/m	管线埋深/m	管线位置	管线顶标高/m	关注等级	风险等级
雨水	混凝土管	$\phi 1500$	9.22	6.6	DK6 + 769.8	41.32	三级	三级
污水	混凝土管	$\phi 1050$	7.6	9	DK6 + 651.8	39.19	三级	三级
煤气	钢管	$\phi 500$	14.1	2.7	DK6 + 627.8	47.18	二级	二级
电力	砼或钢管	2000 × 2000	13.6	4.73	DK6 + 231	44.37	三级	三级
热力	—	2600 × 1800	17.14	4.72	DK5 + 895.4	42.84	三级	三级
上水	铸铁	$\phi 1000$	22.52	1.88	DK5 + 807.1	45.26	三级	三级

4.2.2 风险控制

对沿线的重要管线沿线地表进行不间断监测, 对监测结果进行及时反馈, 及时采取措施:

1) 泥水比重控制在 $1.05 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$, 泥水粘度在 25 ~ 28 s。形成高质量泥膜, 防止掌子面坍塌。

2) 优化掘进参数。泥水压力介于理论值上下限之间, 穿越管线时, 掘进速度控制在 5 ~ 8 mm/min, 并根据周边环境、地层、监测信息调整。

3) 盾构推进时同步注浆, 管片出盾尾后采用超细水泥材料进行二次注浆及二次加强注浆。

4.3 隧道沿线桥梁的风险分析及对策

4.3.1 风险分析

地下直径线工程穿越天宁寺立交桥区段, 隧道从东向西在二环主路北桥部分和 2#匝道桥桩基的北侧通过, 并垂直穿越 1#匝道桥第 2 跨。隧道与桥梁的平面位置关系见图 2。

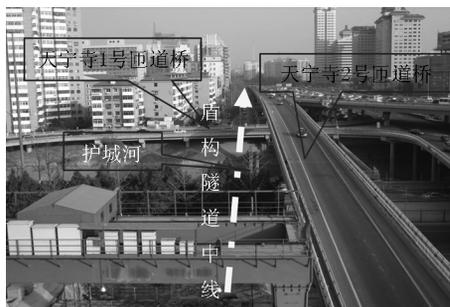


图 2 天宁寺桥与隧道走向关系图

Fig. 2 Layout of Tianningsi Bridge and tunnel

1) 外观检查。1#匝道桥和二环主路北桥桥面铺装、伸缩缝、栏杆及防撞墩等基本完好; 2#匝道桥桥面普遍存在网裂现象(约占 30%), 两桥跨接头存在贯通横缝, 距桥梁左侧防撞墩 2.7 m 处, 存在贯通纵缝。0#台后有一条较宽贯通横缝。

1#匝道桥 T 梁基本完好, 未发现裂缝、锈蚀、破损等病害, 横隔板完好, 未见破损和开裂; 2#匝道桥横隔板与主梁接头处有开裂; 二环主路北桥第 1 跨箱梁北侧翼板底面和梁腋角隅处有纵向开裂, 第 5 跨与第 6 跨接头渗漏水, 翼板砼破损、钢筋锈蚀, 其他地方未发现此类病害。

2) 桥梁混凝土强度检测。采用回弹法对天宁寺桥各典型构件进行强度测试。所测试构件混凝土强度均满足设计要求。

3) 碳化深度检测。测得碳化深度在 2.0 ~ 3.8 mm 之间, 碳化系数在 0.5 ~ 1.0 之间, 估算 100 年后碳化深度为 5.0 ~ 10.0 mm, 碳化速度正常。

4) 钢筋保护层厚度检测。除二环主路北桥第 2 跨箱梁钢筋保护层厚度偏小外, 其他均可满足设计规范, 结合估算 100 年后的碳化深度可知, 天宁寺立交桥钢筋保护层厚度基本满足结构耐久性要求。

天宁寺桥关注等级划分为三级, 风险等级二级。沿线桥梁风险评估汇总如表 5 所示。

表5 沿线桥梁风险评估汇总表
Table 5 Risk assessment summary
table of bridges

名称/里程	与隧道关系	关注级别	风险等级
天宁寺 2#匝道桥墩 (DK6 + 630 ~ + 804)	最近距离 8.2 m	三级	二级
天宁寺 1#匝道桥墩 (DK6 + 662 ~ + 674)	与桩基净距 3.14 m	三级	二级
西便门 7#桥 (DK5 + 958 ~ DK6 + 83)	与桩基净距 4.7 m	三级	二级

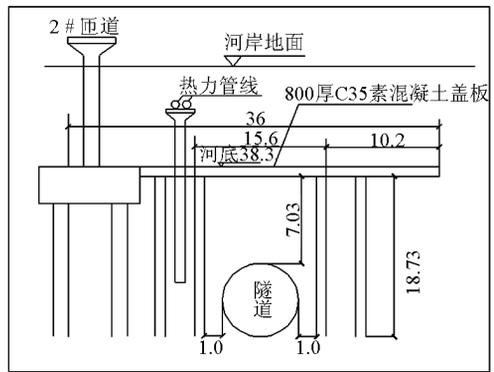


图3 隧道与护城河的位置横断面图(单位:m)

Fig. 3 Cross section of tunnel and moat(unit:m)

4.3.2 风险对策

1) 天宁寺 2#匝道桥风险控制措施。盾构推进时同步注浆,管片出盾尾进行二次注浆,并在 DK6 + 620 ~ + 688、DK6 + 711 ~ + 772、DK6 + 352 ~ + 630段采用超细水泥二次加强注浆,保证二次加强注浆效果。

在 DK6 + 630 ~ + 688(天宁寺 7#、8#、9#桥墩)、DK6 + 715 ~ + 760(天宁寺 4#、5#桥墩)采取洞内半断面超前预注浆加固地层,在 DK6 + 046.5 ~ + 083段隧道南侧采取洞内半断面超前预注浆加固地层。盾构施工中严格控制盾构推进参数,控制泥水压力(包括泥浆粘度、比重)、盾构姿态。

加强施工过程控制、构筑物和环境监控观察。在天宁寺桥墩布设沉降、倾斜监测点,对其实施监测,及时反馈信息。

2) 西便门 6#、7#立交桥加固方案。采取同步注浆,二次注浆,二次加强注浆并增加二次加强注浆范围及注浆量。

在 DK6 + 040 ~ + 046 西便门桥段,采取施做直径 $\phi 800$ mm,间距 1 200 mm 的钻孔桩作为地面隔离保护措施。灌注桩采用等级为 C30 混凝土。桩长为 38.5 m(盾构隧道底板下 5 m),桩间距为 1.2 m,单排布置 7 根。

在 DK6 + 046.5 ~ + 083 段隧道南侧采取洞内半断面超前预注超细水泥浆加固地层。

4.4 隧道穿越护城河的风险分析及对策

4.4.1 风险分析

1) 在里程 DK6 + 688 ~ + 711 段下穿护城河,隧道顶最小覆土 7.86 m。由于覆土不足,在盾构推进过程中,可能发生因为泥水压力或同步注浆压力控制不当,造成河底冒浆影响掌子面的稳定,横断面图见图 3。

2) 过小的覆土可能造成土层与盾构周边的握裹力减弱,盾构正面泥水沿盾壳流向已建成隧道,同时部分泥水还带有一定压力,导致管片上浮。

3) 由于覆土过薄对于扰动的灵敏性,可能造成护城河段热力管线、天宁寺 2#匝道桥等周边构筑物产生过大沉降,影响环境安全。

4) 盾构本身的意外停机,导致盾构不能连续施工通过护城河。

按照风险等级划分,穿越护城河隧道施工关注等级属于三级,风险等级二级。

4.4.2 风险控制

1) 以护城河河底混凝土盖板 + 两侧 $\phi 800 @ 1\ 000$ mm 的 C30 钻孔灌注桩作为地面隔离保护措施,既保证盾构掌子面浆液不冒顶,又保护了周边桥墩及热力管线支撑稳定。

2) 优化掘进参数并针对性地对硬质地层刀盘及盾构机系统进行改造,加强了盾构刀盘的耐磨性以及盾构开挖能力,能够较好地适应剩余掘进段地层,掘进之前对盾构机易出现故障的部件进行检修,保证盾构能够一次性成功的下穿护城河。

3) 严格控制泥浆质量,使较短时间内形成高质量泥膜,保证掌子面稳定,严格控制同步注浆。选择胶凝时间短的浆液,在浆液中加入灌浆料及膨胀剂进行同步注浆,保证管片尽早稳定。优化注浆压力与注浆量控制,避免回填不足和冒浆等。

4) 加强施工监控量测和环境监控观察,并根据监测结果,通过二次注浆控制地层损失。

4.5 隧道沿线地铁的风险分析及对策

4.5.1 风险分析确认及分析

北京地下直径线工程的邻近施工必将引起既有地铁 2 号线、4 号线地铁结构及轨道的沉降、侧移、倾斜等变形,从而对地铁的安全性产生影响。

1)垂直穿越关系:国内地铁结构设计均按结构横向受力考虑,一旦既有结构受到新建工程的穿越,受力状态由原先横向承载变为横、纵向均承载。使原结构产生纵向不均匀变形(沉降或上浮)。

2)邻近并行关系:当新建线与既有线临近并行,主要会使既有线发生横向的倾斜,其倾斜程度随新建线及既有线邻近距离的变化而变化。

长椿街站西南出入口垂直于隧道线路方向,距隧道顶 14.5 m(见图 4 和图 5)。盾构隧道断面是卵石土,在出入口和隧道之间是砂层和圆砾土层。

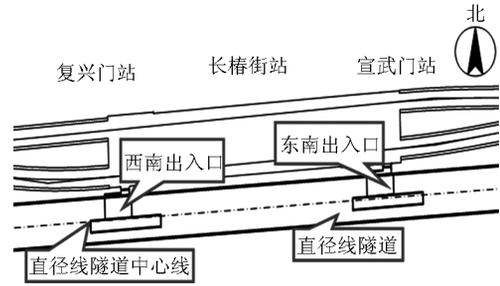


图 5 盾构隧道与长椿街站平面位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tunnel and station of Changchun street

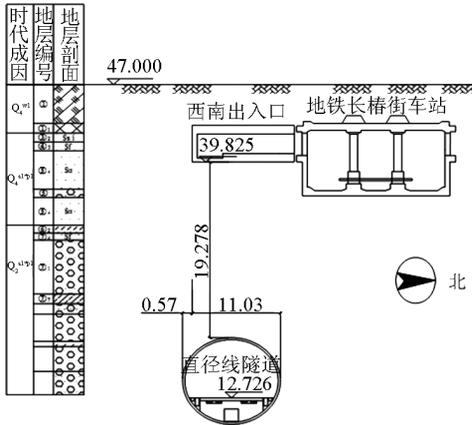


图 4 隧道与长椿街站西南出入口剖面图(单位:m)

Fig. 4 Profile of tunnel and southwest passageway of Changchun street(unit:m)

按照风险等级划分标准,长椿街站西南出入口关注等级属于三级,风险等级二级。

4.5.2 风险控制

1)采取同步注浆,二次注浆,二次加强注浆,二次加强注浆时打设注浆花管,保证其注浆效果。

2)优化掘进施工参数。合理选择泥水压力,防止出现较大的隆起或沉降。

3)严格控制同步注浆。选择胶凝时间较短的浆液,同步注浆浆液采用特种灌浆料以及加入微膨胀剂,保证填充密实。同时合理控制注浆压力与注浆量,避免回填不足和冒浆等异常现象。

4)加强施工监控量测和环境监控观察。在既有轨道上安设电子水平尺,对既有轨道实施适时在线监控,掌握既有轨道变化,及时采取应对措施,保证既有轨道安全。风险评估汇总见表 6。

5 结语

1)城市地下工程建设的关键是对相邻建/构筑物等风险源的控制,通过对沿线各重要建/构筑物科学的风险评估,制定针对性的工程措施,能有效保证隧道沿线建/构筑物的安全,合理控制工程投资。

2)通过对各风险源的风险评估,采用合理的方法对风险源进行控制。未因采取保守策略而增加工程成本,取得较好的经济效益。

3)对北京地下直径线工程全线进行了详细的风险评估,充分分析沿线各风险源的状况,并根据评

表 6 地铁各风险点的风险评估汇总

Table 6 Risk assessment summary table of subway

既有地铁风险点	直径线与既有地铁相关关系	既有线运营情况	风险等级
2 宣武门站	斜下方并行,水平距离 10.3 m,竖向距离 17.1 m	列车运营	特级
号 长椿街站	斜下方并行,水平距离 2.6 m,竖向距离 15.6 m	列车运营	特级
线 前门站东喇叭口区间	斜下方并行,水平距离 9.8 m,竖向距离 1 m	列车运营	特级
主 长椿街站东喇叭口区间	斜下方并行,水平距离 3.5 m,竖向距离 15.6 m	列车运营	特级
体 长椿街站西喇叭口区间	斜下方并行,水平距离 2.3 m,竖向距离 16 m	列车运营	特级
结 4 号线宣武门站	上方跨越,竖向距离 4 m	列车运营	特级
构 长椿街站东南出入口	下方穿越,竖向距离 20.1 m	乘客通行	三级
构 长椿街站西南出入口	下方穿越,竖向距离 19.4 m	乘客通行	三级

估结果提出防止和降低风险的有效控制措施,施工完成后,既有地铁2号线隧道及轨道结构沉降均小于2 mm。天宁寺桥因隧道开挖引起的沉降低于3 mm,施工对周围建/构筑物影响非常小。

参考文献

[1] 黄宏伟,朱琳.上海地铁11号线关键节点工可阶段工程风

险评估[J].岩土工程学报,2007,29(7):1103-1104.

[2] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.

[3] 杨更社,吴成发.西安地铁1号线区间特殊地段施工风险评估[J].西安科技大学学报,2010,30(2):159-160.

[4] 毛儒.隧道工程风险评估[J].隧道建设,2003,23(2):1-3.

Analysis and control of significant risk source of underground diameter project from Beijing railway station to Beijing railway west station

Zhao Yong^{1,2}, Han Fuzhong³, Li Jianhua⁴

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Identification of the Ministry of Railways Engineering, Beijing 100844, China; 3. Central Station of Security and Equality Supervision, Ministry of Railways, Beijing 100045, China; 4. Technology Center of China Railway Tunnel Group, Luoyang, Henan 471009, China)

[Abstract] Through the detailed risk evaluation on underground diameter project from Beijing railway station to Beijing railway west station, the conditions of all the risk sources along were analyzed adequately. At last, effective control measures of risk prevention and reduction were proposed based on the evaluations results. The settlement of all the measuring points of metro line 2 was lower than 2 mm. Due to the tunnel excavation the settlement of Tianningsi Bridge was lower than 3 mm. The construction impact on surrounding building was very small.

[Key words] tunnel; risk analysis; risk control