

上海市漕宝路快速路盾构隧道工程风险管理分析及控制

顾 瑾

(上海市交通建设工程管理中心, 上海市 200065)

摘 要: 上海市漕宝路快速路项目工程规模宏大、建设条件异常复杂。为降低漕宝路15 m超大直径长距离盾构隧道工程的施工风险,从定性及定量角度分别对工程水文地质风险、盾构隧道本体风险及环境风险三类风险源进行辨识、分析及计算评估,制定一套有效评估盾构隧道工程整体风险的表格及风险等级划分标准,以评估其安全风险等级。根据盾构隧道工程安全风险等级评定结果,结合工程特点提出针对性风险管理控制措施,保障盾构隧道顺利掘进,可为今后类似大型复杂盾构隧道工程项目风险管理及控制提供借鉴。

关键词: 盾构隧道;风险管理;风险识别;风险评估;控制措施

中图分类号: U458.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0240-05

Risk Management Analysis and Control of Caobao Road Expressway Shield Tunnel Project in Shanghai

GU Jin

(Shanghai Communication Construction Engineering Management Center, Shanghai 200065, China)

Abstract: The Shanghai Caobao Road Expressway Project is of grand scale and has extremely complex construction conditions. In order to reduce the construction risk of the 15-m ultra-large diameter long-distance shield tunnel project of Caobao Road, three types of risk sources including hydrogeological risk, shield tunnel origin risk, and environmental risk are identified, analyzed, calculated and evaluated from both qualitative and quantitative perspectives. A set of forms and risk level classification standards for effectively assessing the overall risk of shield tunnel projects is formulated to evaluate the safety risk levels. Based on the safety risk level assessment results of shield tunnel project and combined with the characteristics of the project, the targeted risk management and control measures are proposed to ensure the successful shield tunneling, which can provide reference for risk management and control of similar large-sized complex shield tunnel engineering projects in the future.

Keywords: shield tunnel; risk management; risk identification; risk assessment; control measures

0 引 言

盾构法因其机械化程度高,安全性高,地层适应性强及环境影响小等优点,在复杂环境隧道工程建设中广泛应用。盾构隧道工程作为大型土木工程项目,建设成本高,建造周期长,工艺复杂程度高,并且涉及不同参与者,且受到社会和自然环境的影响,工程全生命周期存在众多风险,影响项目建设,甚至关系项目成败^[1]。盾构隧道直径越来越大,超大直径盾构施工不可避免地要面临直径更大,埋深更大,距离更长以及地质条件更复杂等问题^[2]。因此,盾构隧

道工程风险管理分析及控制的重要性和必要性不言而喻。

陈龙、黄宏伟等^[3-5]是国内较早研究盾构隧道工程风险管理应用的学者,在上中路隧道、上海市长江隧道等工程管理中实践及应用,初步构建了风险评估相关操作流程。刘艳滨^[6]结合外滩隧道工程,构建了由业主统一协调指挥的风险管理网络、管理流程和标准等管理体系。宋丽妹^[7]结合上海市虹梅南路隧道工程,引入了信息化管控理念以同步掌控隧道工程风险。刘正光^[2]比较了内地与香港大型隧道工程风险管理的工程实践,论述了健全的法律制度是建立完善隧道工程风险管理机制的关键。杨文武^[8]提出了从项目组织架构、项目承包模式和项目运营模式等各方面构建全方位的管理工程风险的模

收稿日期: 2025-03-27

作者简介: 顾瑾(1969—),女,本科,高级工程师,从事交通建设管理工作。

式。黄宏伟^[4]、吴全立^[9]等进行了风险管理可视化的软件研究与开发,便于风险管理操控。

1 工程概况

漕宝路快速路新建工程是一项以超大断面盾构隧道为主体的大型综合市政工程项目,盾构隧道总长约 4.2 km,管片外径 15 m,采用 15.56 m 泥水平衡盾构掘进,平面最小曲率半径 500 m,最大纵坡 5.0%。

盾构主线位于现状漕宝路、富强路及蒲汇塘下方掘进,管线错综复杂,河道密布,并多次穿越河道驳岸,平面布置如图 1 所示。盾构穿越地层为上海市典型软土地层,且隧道埋深较大,浅部穿越③层淤泥质粉质黏土—④层淤泥质黏土,中部穿越⑤₁层粉质黏土—⑦₁层砂质粉土,深部穿越⑦₂层粉细砂层(承压含水层),盾构穿越地层情况如图 2 所示。因此该工程实施条件复杂,致险因子众多,风险控制要求高。

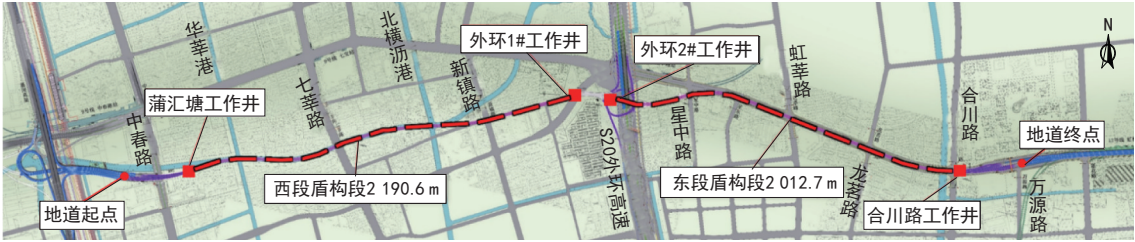


图 1 漕宝路快速路盾构隧道平面布置图

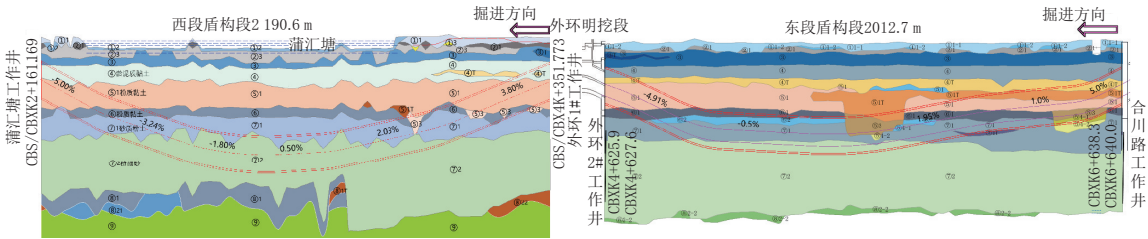


图 2 漕宝路快速路盾构隧道地质纵断面图

漕宝路快速路盾构隧道工程具有项目工程规模宏大,建设条件复杂,需统筹兼顾,协调难度大的特点,因穿越地层差异、穿越环境不同,给工程风险管理带来不同的挑战。目前国内外学者关于盾构隧道工程风险主要集中于理论框架及软件开发研究,对具体风险的管控措施缺乏系统性研究与梳理。

本文结合漕宝路快速路超大直径盾构隧道工程,分别从定性及定量角度对盾构隧道建设过程中的风险源进行辨识、分析及计算评估,并结合工程特点提出针对性风险管理控制措施,降低盾构隧道工程风险,确保盾构隧道工程安全建设。

2 盾构隧道工程风险辨识与分析

风险辨识与分析是风险管理过程中的第一步,其目的是梳理出可能造成风险产生的矛盾体,做到有的放矢。通过系统性风险源辨识,该工程重大风险源可分为工程水文地质风险、盾构隧道本体风险及环境风险三大类。

2.1 工程水文地质风险辨识与分析

在工程水文土质条件上上海地区属典型软土地区,盾构隧道推进过程中存在如下不良地质风险。

2.1.1 穿越高压缩性、高灵敏度地层风险

盾构浅部穿越③~④层淤泥质土,压缩性高,强度低;灵敏度高,具有触变和流变特性。因此,对盾构施工控制要求极高,否则容易引起地层扰动,加剧周边环境变形。

2.1.2 承压水或涌水风险

盾构深部穿越⑦层承压含水层,渗透系数大,当参数设置不合理时,易造成盾尾漏水、漏浆或超挖,甚至发生盾构掌子面坍塌事故。

2.1.3 地质钻孔回填不密实风险

漕宝路部分地质钻孔位于盾构断面附近或断面内,地质钻孔相对周边原状土而言较差,盾构推进到此薄弱点时,可能影响开挖面稳定。

2.1.4 不明地下障碍物风险

盾构沿线下穿现状漕宝路、河道、桥梁及七宝古镇等,前期虽已对盾构投影范围进行地下障碍物资料调查,但仍无法排除遇到不明地下障碍物的风险,当侵入盾构断面时将加速盾构设备磨损,甚至造成盾构无法推进。

2.2 盾构隧道本体风险辨识与分析

2.2.1 超大直径盾构始发与接收风险

盾构始发接收施工历来是业界公认风险较大的

施工阶段。漕宝路盾构分西段和东段两区间,如图1至图2所示,根据施工筹划,该工程隧道掘进过程中将存在两次始发和两次接收。

2.2.1.1 盾构机吊装及解体风险

漕宝路采用15.56 m超大直径泥水平衡盾构机,盾构机体量庞大,构造精细,加上工作井空间狭窄,设备吊装及解体风险高。

2.2.1.2 盾构始发与接收风险

盾构始发时,地基加固不合理可能出现洞门渗漏(泥)水,甚至无法形成泥水平衡体系造成掌子面坍塌等事故发生。盾构掘进过程中可能因测量不准或操作不当,造成轴线偏差以及抬头、磕头等事故,浅覆土时可能产生盾构上浮。盾构接收时,除可能面临地基加固措施不当的风险外,存在由于测量失误或操作不当使得盾构姿态偏差,致使盾构无法进洞等事故。

2.2.2 超大直径盾构小半径曲线推进风险

本工程最小曲线半径 $R=500\text{ m}$ (约 $33D$, D 为管片外径,下同),转弯难度大,小半径曲线转弯施工主要存在如下风险。

2.2.2.1 管片破裂、错台及张开风险

小半径曲线推进时盾构千斤顶压力差致使管片承受三向不均匀受力,导致管片破裂、错台等不良后果产生。因作用于管片上的千斤顶作用力外侧大于内侧,可能引起管片环缝张开量不均匀,严重时将导致管片防水失效。

2.2.2.2 地表不均匀沉降风险

小半径曲线推进时盾构需持续调整姿态以防止轴线偏差较大,因此实际出土量超出理论出土量,致使小半径曲线区间地层损失率大于标准区间。此外,盾构姿态纠偏对土体影响大,软土地区将导致后期沉降周期延长。

2.3 环境风险辨识与分析

2.3.1 盾构近穿越建(构)筑物风险

盾构自东向西沿线穿越节点众多,经统计盾构沿线下穿33处、侧穿76处(共计109处)建筑物。此外,盾构穿越9座桥梁(下穿7处),其中蒲汇塘上方7座,桥梁基础除蒲汇塘北大街文保桥采用扩大基础外,其余均采用桩基础。

2.3.2 七宝古镇及区级文保穿越掘进风险

盾构隧道长距离穿越七宝古镇,周边建筑为多层砖混结构,且服役期较久远,抗变形能力较差。盾构穿越可能导致七宝大街路面塌陷,近距离侧穿南

七宝寺及下穿北大街文保桥(两者均为闵行区区级文保单位)时古建筑变形较大。值得注意的是,上述三类风险之间并非相互独立,彼此具有关联性,在风险传递演化过程中存在直接或间接影响。如工程水文地质风险事件产生后,可能诱发或加剧盾构隧道本体风险及环境风险,环环相扣,产生多米诺骨牌效应。因此,盾构隧道风险评估过程中,需要综合全面考虑,点面结合。

3 盾构隧道工程风险评估

根据盾构隧道建设规模、工程水文地质条件、周边环境和施工工艺等,该工程分别邀请建设单位、施工单位、设计单位及高校共计16名专家进行了调查打分,借助专家调查法,制定了一套有效评估盾构隧道工程整体风险的表格,以评估其安全风险等级,具体如表1所列。

盾构隧道区间工程施工安全风险大小计算: $RT=G(A1+A2+A3+A4)$,并根据计算风险值的大小,确定风险分级。借助专家调查法,建议I~IV级,分别对应低度、中度、高度和极高风险,取值分别对于 ≤ 5 、 ≤ 14 、 ≤ 23 及 ≥ 24 。

漕宝路盾构隧道 $RT=25$,属于IV级风险(极高风险),应纳入专项风险评估,采取针对性风险控制措施。

4 盾构隧道工程风险控制

4.1 工程水文地质风险控制

4.1.1 穿越高压压缩性灵敏地层控制措施

盾构施工过程中严格控制施工参数,保持开挖面泥水平衡,控制超挖或欠挖,防止过大纠偏,以减小对地层扰动影响。

4.1.2 承压水或涌水控制措施

盾构施工前对特殊区域进行补勘以调查并掌握详细的工程水文地质资料。盾构掘进时,合理设定切口压力,同时确保拔桩、钻孔等封孔质量,避免沿薄弱点的险情发生。

4.1.3 地质钻孔回填不密实控制措施

盾构施工前对沿线地质钻孔回填情况进行摸排加固。掘进时准备相应预案,必要时采取无泥浆顶管法顶进冻结管,避免涌砂、冒砂。

4.1.4 地下不明障碍物控制措施

盾构掘进前采取地质雷达等手段,当发现隧道断面存在障碍物时采取清障措施。清障时控制掘进

表 1 盾构隧道区间工程总体风险评估指标

评估指标		分类	分值	得分	说明
工程特征 (A1) (9分)	隧道外径 Φ/m	$\Phi\geq 14$	3	3	盾构隧道外径 15 m
		$11\leq\Phi<14$	2		
		$\Phi<11$	0~1		
	隧道长度 L/m	$L\geq 5\,000$	3	2	盾构隧道西段长度 2 190.6 m, 东段长度 2 012.7 m, 总长约 4.2 km
		$1\,500\leq L<5\,000$	2		
		$L<1500$	0~1		
	隧道平面最小半径 R/m , 最大纵坡 $i\%$	$R\leq 500$ 或 $i\geq 5$	1	1	盾构隧道平面最小半径 500 m, 最大纵坡 5%
		$R>500$ 或 $i<5$	0		
		隧道顶覆土 H/m	$H\leq 0.6D$ 或 $H\geq 35$	2	2
	$0.6D<H\leq 1D$ 或 $25\leq H<35$		1		
$1D<H<25$	0				
地质与水文条件 (A2) (9分)	隧道断面分布有沼气层等不良地质		7~9	7	隧道最低点掘进面位于⑦ ₁ 、⑦ ₂ , 盾构施工过程中可能遭遇淤泥、暗滨、厚填土、软土、流砂等不良地质
	隧道断面分布有粉、砂性、卵石等土层, 承压水压力 $\geq 0.3\text{ MPa}$; 或掘进面处于泥炭土、淤泥土等软弱土层		4~6		
	隧道断面分布有粉、砂性等土层, 承压水压力 $<0.3\text{ MPa}$		2~3		
	地质水文条件较好, 基本不影响施工安全		0~1		
周边环境 (A3) (9分)	铁路、高速公路、机场跑道或隧道结构		7~9	8	盾构沿线下穿 33 处、侧穿 76 处建(构)筑物, 并穿越七宝古镇, 且沿线穿越 9 座桥梁(其中正下穿 7 处)
	燃气、航油管等重要管线, 以及其它有特殊要求的设施				
	历史保护建筑等沉降敏感区域		3~6		
	江河湖海				
	城市主干道、高架桥或下立交				
	勘探孔等与承压水层或河流连通的透水通道		0~2		
无重要保护建筑的一般情况					
施工工艺成熟度 (A4) (3分)	新技术、新工艺、新设备, 国内首次应用		3	2	施工企业经验丰富, 施工工艺较成熟
	施工工艺较成熟, 国内有相关应用		2		
	施工工艺成熟		0~1		
盾构选型 (G)	盾构性能基本满足地质水文条件的要求		1.5	1	上海市同等规模盾构经验成熟, 盾构性能完全满足地质水文条件的要求
	盾构性能完全满足地质水文条件的要求		1		

参数,提高泥水质量,确保开挖面稳定。

4.2 盾构隧道本体风险控制

4.2.1 超大直径盾构始发与接收风险

4.2.1.1 盾构机的吊装及拆除风险控制措施

盾构施工前对盾构机吊装制定专项施工方案,加强施工科学组织与管理,对施工人员进行安全生产专项培训,提高工人的安全生产意识,严格监督,杜绝隐患。

4.2.1.2 盾构始发与接收风险控制措施

盾构始发与接收前对进出洞加固土体强度及质量进行检查与验收,同时于洞口打设管井,降低盾构始发与接收风险。

盾构始发时检查基座强度、稳定性及测量定位,并对负环拼装质量进行控制,保证后靠安全稳定性。为防止盾构出洞轴线偏差,在始发前测量复核洞门,掘进过程中加强测量,确保盾构姿态。可以合理提高出洞姿态避免盾构磕头、合理安排始发导轨以及快速通过的措施。

盾构掘进过程中及时纠偏,不均匀地层掘进时根据需要添加土体改良剂以改善土体使推进更加顺畅。

盾构接收前 100 m 进行轴线复测,避免出现盾构姿态控制失误无法进洞事故。为避免盾构抬头,可以合理压低盾构进洞姿态,确保盾构到达时姿态正确。

4.2.2 超大直径盾构小半径曲线推进风险

4.2.2.1 管片破裂、错台及张开控制措施

提前开启主动铰接装置,避免盾构姿态产生较大偏差,并加密导向系统移站,提高姿态控制精度。同时通过计算分析设定合理的管片拼装点位和管片楔形量,结合盾构实时姿态数据(如铰接角度、千斤顶推力差)动态调整拼装。通过上述措施,提高盾构姿态控制,保障管片拼装精度。

4.2.2.2 地表不均匀沉降控制措施

将小半径施工段作为关键工序卡控点控制。优化盾构掘进参数设置,尽量“勤纠偏、少纠偏”,确保盾构机姿态和成型隧道质量。并根据盾构埋深、所在位置土层状况及监测数据确定和调整掌子面支护压力。

加强同步注浆,采用同步注浆压力和注浆量双重标准控制,并根据地表沉降监测反馈信息、施工参数、出土量来检查结果进行二次注浆。

4.3 环境风险控制

4.3.1 盾构近穿越建(构)筑物风险

(1)施工前加强基础资料搜集,熟悉掌握结构类型、基础形式、服役现状以及盾构穿越地层情况、与结构相对空间关系等,对于重要节点,建议构建BIM模型,实时掌控掘进状态。

(2)施工过程中控制地层扰动,加强同步注浆,保证注浆压力和注浆量充足,使浆液有效填充盾尾间隙,并根据需要采取二次注浆,控制地层损失率。

(3)数值分析预测评估,采用数值软件仿真模拟盾构近接施工,提前预判盾构掘进影响。图3所示为盾构穿越海上新村建筑群三维仿真模型,竖向变形对应3‰地层损失率控制时盾构穿越后的地面沉降及建(构)筑物变形情况。数值分析预测:建筑物最大沉降10.5 mm,整体倾斜0.40‰,可控制在规范允许范围(整体倾斜3‰)以内。

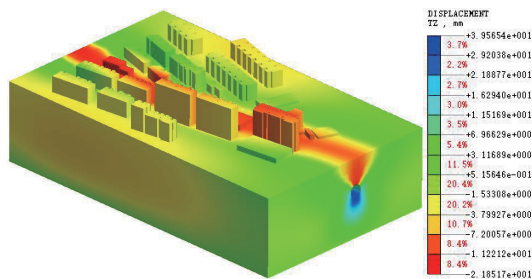


图3 盾构穿越海上新村建筑群变形三维仿真(单位:mm)

(4)设置盾构试验段。对于穿越条件复杂、风险较高区段,提前设置盾构试验段,合理确定盾构掘进参数。

(5)加强变形监测。盾构隧道掘进过程中,通过监测反馈及时优化盾构施工参数的设置,确保变形可控。

4.3.2 七宝古镇及区级文保穿越掘进风险

盾构穿越七宝古镇及区级文保区段,除上述针对近穿越建(构)筑物风险控制措施外,对重要节点提前进行调研及盾构影响评估,根据评估结果可增设如下措施。

(1)加固建筑主体结构,提高结构承载力及抗变形能力。

(2)盾构到达前对地基进行注浆处理,提高土体强度参数。

(3)在盾构周边设置MJS或钻孔桩,降低盾构掘进扰动影响。

(4)合理确定掌子面的泥水压力,根据土压力动态调整,降低对周边土体的扰动影响。

4.4 风险管理实施效果

通过精细化地风险管控,该工程盾构稳步顺利推进,各风险节点均达到了预期的效果。以盾构下穿海上新村建筑群为例,根据现场监测数据反馈,盾构穿越后建筑物最终沉降7.5 mm,整体倾斜0.28‰,小于数值仿真预测结果,风险管理控制效果显著。

截至目前,漕宝路快速路工程已完成东段盾构区间不间断掘进施工,并于2025年4月底顺利完成第一次盾构接收。计划2025年9月底,将于外环1#工作井第二次始发,向西继续西段盾构的掘进,东段盾构有效的风险管理控制措施及经验积累将给东段盾构掘进提供保驾护航。

5 结 语

以漕宝路快速路盾构隧道工程为例,通过系统性风险源辨识,分别从定性及定量角度对盾构隧道建设过程中的工程水文地质风险、盾构隧道本体风险及环境风险三大类风险源进行辨识、分析及计算评估,并结合工程特点提出针对性风险管理控制措施,得出以下结论及建议。

(1)采用专家调查法,制定了一套有效评估盾构隧道工程整体风险的表格及风险等级划分标准。经评测本工程盾构隧道总体风险值 $R=25$,属于IV级风险(极高风险),经综合专项施工风险评价,该工程属三级风险,风险等级为高度。

(2)分别针对工程水文地质风险、盾构隧道本体风险及环境风险,提出了安全有效的风险控制措施,保障盾构隧道工程安全掘进,在东段盾构中实施效果显著。

(3)大数据时代给各个行业的发展带来了有利契机,建议通过搭建大数据平台,构建BIM模型,引入AI技术,实现风险源智能精准识别并及时、有效防控,必将给盾构隧道工程风险管理带来积极显著的影响。

(下转第297页)