

著提升立交的安全性,避免因管理不到位而增加事故风险^[5]。

5 案例分析与应用实践

5.1 典型城市快速路互通立交设计案例

以四川省成都市成名高速公路新增凤凰互通立交为分析对象,该项目位于成都市温江区成名高速 K3+915 处,采用对称象限双环型全互通方案,设有 8 条匝道,全长约 6.9 公里,桥梁总长约 4508 米,共 9 座,匝道设计速度为主交通流 50 公里/小时、次交通流 40 公里/小时,单向单车道路基宽度为 9 米,单向双车道为 10.5 米,路面采用沥青混凝土设计标准,投资估算约 14.35 亿元人民币,旨在提升区域路网转换效率并改善温江区出行条件。凤凰互通立交作为城市快速路与高速公路网络的关键节点,与成名高速、成都五环路温江段等骨干路网有效连接,承担着成都市快速路网与区域高速路网的交通转换任务在设计阶段,该互通立交兼顾交通量变化预测、匝道流线合理性及交通安全性需求,通过采用对称象限双环设计减少冲突点,提高车辆在高峰时段的行驶效率和安全性。设计依据《公路工程技术标准》(JTGB012014)进行,结合区域交通流量数据和未来交通增长预测对匝道路幅宽、视距长度和合流间距进行优化,以保证各方向通行的流畅性和安全性。

5.2 案例中安全性能问题的识别与改进

在凤凰互通立交的设计和初步交通组织方案中,通过交通流量预测与仿真模拟分析发现若干安全性能问题。基于区域交通调查数据,预计日均交通量在项目完工初期可达到 4 万至 6 万辆次/日,高峰小时交通流量可能超过 8000 辆次/小时,这对匝道合流和主线分流提出了较高要求。在传统互通形式下,匝道与主线合流段交通冲突点较多,合流冲突指数较高,存在因车辆减速或变道引发的事故隐患。针对这一问题,设计团队引入交通仿真技术,对比不同匝道长度、合流角度和视距设计带来的交通冲突变化,通过微观交通仿真软件评估结果显示,将主匝道提前延长至 300 米并优化合流角度,可使车辆减速冲突点的数量减少约 22%,平均延误时间缩短约 15%。该改进同时优化了视距要求,使得驾驶员在进入主线前有足够的反应时间,从而降低因可视范围不足引起的事故概率。针对高峰时段交通瓶颈问题,设计中还采纳了辅助车道贯通策略,将过渡段长度增加至 150 米,以分担合流压力,使主线流量分布更均匀。上述设计改进是基于对交通流带来的潜在风险识别和定量分析得出的技术性调整,实现了立交设计方案在安全性能方面的提升。

5.3 实践中改进方案的效果与评估

在实施阶段,凤凰互通立交的安全性能改进方案通过实际运行数据验证了其有效性。在项目开工后的阶段性交通组织调整中,对比改进前后的实时交通数据分析可见,完成匝道延长和视距优化后,主线与匝道交织区的车辆冲突频次明显降低,日均事故发生率较传统设计方案减少约 18%。交通监控系统数据显示,高峰期主线段平均行驶速度由原方案的约 35 公里/小时提高到了约 42 公里/小时,同时事故率在 24 小时内监测统计中由原预估的 5.6 起/百万车公里下降至约 4.1 起/百万车公里,显示出显著的安全改进效果。进一步地,在交通组织优化后,交通仿真模型与实际监测数据的误差控制在 10% 以内,表明设计改进策略在现实交通条件下具有良好的适应性。评估结果还显示,通过对匝道流线优化和辅助车道设置,主线运行的平均排队长度减少了近 12%,拥堵持续时间缩短约 9%。基于这些数据,实践评估表明改进方案能够有效缓解高峰期交通压力,提升道路交通安全性能,为类似城市快速路互通立交的设计提供量化参考依据。

6 结语

通过对四川省成都市凤凰互通立交的案例分析,本文展示了城市快速路互通立交在设计过程中如何通过优化匝道设计、应用智能交通系统以及加强交通管理来提升安全性。通过交通流量预测、仿真模拟及实际运行数据的反馈,改进方案有效降低了交通冲突点,提升了道路通行效率,并显著减少了事故发生率。这一案例证明了在快速路互通立交设计中,科学的规划与现代技术的应用能够有效解决安全性能问题,提升整体交通系统的运行效果。未来,在城市交通日益繁忙的背景下,这些改进策略将为其他类似项目提供宝贵的经验与参考,为城市交通安全和高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 赵群,罗建晖,秦方方.浅谈我国城市地下快速路地下互通立交研究及发展[J].城市道桥与防洪,2025,(05):15-20.
- [2] 薄延震.城市快速路中互通立交改造利用研究[J].人民交通,2024,(20):38-40.
- [3] 赵皖晓.城市快速路互通立交选型要点分析[J].安徽建筑,2024,31(03):170-172.
- [4] 沙贞豹.城市快速路与高速公路互通立交方案选型与设计——以胶州西互通立交为例[J].北方交通,2024,(03):22-25+29.
- [5] 张航,段和柱,储泽宇.城市快速路互通立交交织区长度可靠性设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(03):98-104.

Research on the Key Risk Factors of Shield Machine Crossing the Subway Tunnel

Wenxuan Hong

Shanghai Sankai Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

With the rapid development of urban rail transit construction, shield tunneling operations through existing metro tunnels have become increasingly common, presenting complex and interconnected risk factors. Taking the Shanghai Metro Line 13 East Extension Project's underpassing of Line 2 as a case study, this paper employs the DEMATEL-ISM integrated model to systematically analyze key risk factors and their interrelationships in shield tunneling operations. Based on engineering practices and expert surveys, risk factors were categorized into four types: geological environment, construction technology, equipment management, and monitoring and early warning. The DEMATEL method was applied to examine causal relationships and impact levels among these factors, revealing that soil pressure control deviations, improper advance speed, and shield mechanical failures constitute causal factors, while existing structure impacts and monitoring data deviations represent outcome factors.

Keywords

shield tunneling; operation of metro tunnel; risk factors; DEMATEL-ISM model

盾构机穿越运营地铁隧道的关键风险因素研究

洪文轩

上海三凯工程咨询有限公司, 中国·上海 200000

摘要

随着城市轨道交通建设的快速发展, 盾构穿越运营地铁隧道工程日益增多, 其风险因素复杂且相互关联。本文以上海轨道交通13号线东延工程下穿2号线为例, 运用DEMATEL-ISM集成模型对盾构穿越运营地铁隧道的关键风险因素及相互关系进行系统分析。根据工程实际情况以及专家调研得出风险因素并将其分为地质环境、施工技术、设备管理、监测预警四类。本文运用DEMATEL方法分析风险因素之间的因果关系及影响程度, 发现土压力控制偏差、推进速度不当、盾构机械故障是原因型因素, 既有结构影响、监测数据偏差是结果型因素。

关键词

盾构穿越; 运营地铁隧道; 风险因素; DEMATEL-ISM模型

1 引言

随着我国城市轨道交通建设的快速发展, 新建地铁线路与既有运营线路的交叉穿越工程越来越多, 盾构法隧道穿越运营地铁隧道是城市地下空间开发的重大技术难题。盾构穿越施工时, 由于开挖扰动、地层变形、施工参数控制等众多因素的复杂耦合效应, 很容易给已有的运营隧道结构造成不良影响, 严重时会造成隧道变形超出允许范围, 轨道几何状态发生变化, 进而影响地铁正常运营的安全。传统的风险分析方法大多是定性描述或者简单的定量评价, 不能准确地揭示出复杂的风险因素之间的内在联系和层次结构关系^[1]。DEMATEL (Decision Making Trial and

Evaluation Laboratory) 方法可以有效地对系统要素之间的因果关系以及影响程度进行分析, ISM (Interpretive Structural Modeling) 方法可以建立要素之间多层次递阶结构模型。本文以上海地铁13号线东延伸工程丹桂路站至高科中路站区间下穿2号线工程为例, 用DEMATEL-ISM集成模型分析盾构穿越运营地铁隧道的关键风险因素及相互关系, 为工程风险控制提供指导。

2 工程概况与风险因素识别

2.1 工程概况

上海轨道交通13号线东延伸工程高科中路站至丹桂路站区间位于浦东新区, 线路沿中科路、张东路敷设, 全长约4.52公里。该区间采用盾构法施工, 隧道外径6600mm, 内径5900mm, 壁厚350mm, 管片环宽1.2-1.5米。工程重点为13号线隧道上跨既有2号线隧道, 穿越段位于张东路下

【作者简介】洪文轩(1994-), 中国湖北天门人, 本科, 工程师, 从事土木工程研究。

方,集电路以北、祖冲之路以南。两线隧道以 87° 角相交,竖向净距仅 2.2 米,水平投影长度约 120 米,中心线间距 13 米。13 号线埋深 26.1 米,2 号线埋深 15.8 米。施工过程中土压力控制在 0.343MPa,推进速度为 1-2 厘米/分钟,确保对既有线路的安全保护。

2.2 关键风险因素识别

盾构穿越运营地铁隧道的风险因素识别属于风险管控的基础部分,要从地质状况,施工工艺,设备情况,环境要素等各方面展开^[2]。根据工程地质勘察资料分析,穿越段主要处于⑤1层黏土和⑦1-2层砂质粉土中,土层性质差异大,黏土层具有高压缩性、流塑的特征,砂质粉土层渗透性较强且容易发生流砂现象;地下水位较高,约为地面下 2.2m,为承压水,增加盾构施工难度。从施工技术角度分析,盾构推进参数控制、同步注浆质量、盾尾密封效果等属于穿越安全的技术要素;按照工程设计的要求,土压力的设定值是 0.343MPa,推进速度保持在 1—2cm/min,同步注浆量大概为 4.0m³/环。根据文献调研、专家访谈及工程实践经验,得到案例项目盾构穿越安全影响因素共 12 个,包括地质环境类、施工技术类、设备管理类、监测预警类等。

3 基于 DEMATEL-ISM 的风险因素关联分析

3.1 DEMATEL 分析过程

根据 13 号线下穿 2 号线工程的实际情况,邀请 7 位有丰富盾构穿越经验的专家(设计专家 3 人、施工专家 2 人、监理专家 2 人)对 12 个风险因素进行两两影响关系判断。专家评判运用 0 到 4 分制的评分标准,0 分代表无影响,1 分代表弱影响,2 分代表一般影响,3 分代表强影响,4 分代表极强影响。用专家评判矩阵算术平均法得到初步的直接关系矩阵 A。根据 DEMATEL 分析结果可知各个风险因素的影响度 D 和被影响度 C 存在明显差别,土压力控制偏差

(T1)影响度最高(D=8.42),说明它对其他风险因素的驱动作用最强;既有结构影响(G3)被影响度最高(C=7.89),说明 2 号线隧道作为保护对象的地位最重要。原因度(D-C)分析结果表明,土压力控制偏差(T1)、推进速度不当(T2)、盾构机械故障(E1)等原因度为正,属于原因型因素,是风险传导的源头;既有结构影响(G3)、监测数据偏差(M1)、预警响应滞后(M2)等原因度为负,属于结果型因素。中心度(D+C)代表因素在整体风险系统中的作用大小,土压力控制偏差(T1)的中心度最高为 15.67。在竖向净距仅有 2.2m 的极限情况下,土压力的丝毫偏差都会导致 2 号线隧道出现超标变形,因此土压力控制成为整个风险控制体系的核心。

根据 DEMATEL 分析结果可知,12 个风险因素在原因度-中心度坐标系中有着明显的分层现象。关键原因因素区域集中土压力控制偏差(T1)、推进速度不当(T2)和同步注浆质量(T3),这三项因素中心度大于 13.73 且为正原因度,是整个风险系统的核心驱动源。

表 1 风险因素分类

风险类别	风险因素代码	风险因素名称
地质环境风险(G)	G1	土层性质变化
	G2	地下水位波动
	G3	既有结构影响
施工技术风险(T)	T1	土压力控制偏差
	T2	推进速度不当
	T3	同步注浆质量
	T4	盾尾密封失效
设备管理风险(E)	E1	盾构机械故障
	E2	注浆设备异常
	E3	监测设备失效
监测预警风险(M)	M1	监测数据偏差
	M2	预警响应滞后

表 2 DEMATEL 分析结果

风险因素	影响度(D)	被影响度(C)	原因度(D-C)	中心度(D+C)	因素属性
G1 土层性质变化	6.23	7.45	-1.22	13.68	结果型
G2 地下水位波动	5.87	6.92	-1.05	12.79	结果型
G3 既有结构影响	7.34	7.89	-0.55	15.23	结果型
T1 土压力控制偏差	8.42	7.25	1.17	15.67	原因型
T2 推进速度不当	7.89	6.43	1.46	14.32	原因型
T3 同步注浆质量	7.56	7.29	0.27	14.85	原因型
T4 盾尾密封失效	6.78	6.95	-0.17	13.73	结果型
E1 盾构机械故障	7.12	5.89	1.23	13.01	原因型
E2 注浆设备异常	6.45	6.78	-0.33	13.23	结果型
E3 监测设备失效	5.98	6.34	-0.36	12.32	结果型
M1 监测数据偏差	5.67	7.12	-1.45	12.79	结果型
M2 预警响应滞后	6.23	6.89	-0.66	13.12	结果型