

基于映射关系与影响中心度的地铁深基坑施工风险识别

赵长伟

(中铁十八局集团第四工程有限公司, 天津 300000)

摘要: 针对地铁深基坑施工风险节点之间的具体关系不明确、难以精准量化分析风险因素的问题, 提出基于映射关系与影响中心度的地铁深基坑施工风险识别方法。对深基坑施工机理进行分析, 结合施工传感信息的融合结果, 对风险因素进行时空耦合分解处理; 将耦合分解结果作为风险节点, 构建出安全风险网络结构图, 在安全风险网络结构图中表征不同风险节点的重要程度; 结合风险节点的影响中心度, 获得风险等级映射关系, 识别关键地铁深基坑施工风险。测试结果表明: 该方法应用后, 项目风险网络密度逐渐降低, 从而降低安全事故发生的概率, 可以精准识别关键地铁深基坑施工风险。

关键词: 传感信息融合; 时空耦合; 深基坑; 施工安全; 风险识别

中图分类号: TU753; U231

文献标识码: A

Risk Identification of Subway Deep Excavation Construction Based on Mapping Relationship and Influence Centrality

ZHAO Changwei

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The specific relationship between risk nodes in subway deep excavation construction is not clear, making it difficult to accurately quantify and analyze risk factors. Therefore, a risk identification method for subway deep excavation construction based on mapping relationship and influence centrality is proposed. Firstly, analyze the construction mechanism of deep foundation pits, combine the fusion results of construction sensing information, and decompose the risk factors through spatiotemporal coupling; secondly, using the coupling decomposition results as risk nodes, a security risk network structure diagram is constructed to represent the importance of different risk nodes in the security risk network structure diagram; thirdly, by combining the impact centrality of risk nodes, the risk level mapping relationship is obtained to identify key subway deep foundation pit construction risks. The test results indicate that after the application of this method, the density of the project risk network gradually decreases, thereby reducing the probability of safety accidents, so it can accurately identify key subway deep foundation pit construction risks.

Key words: sensor information fusion; spatio-temporal coupling; deep foundation pits; construction safety; risk identification

受到施工工艺以及施工临时性等多方面因素的影响, 地铁深基坑施工工程通常存在较多安全隐患。同时, 由于地铁深基坑所在位置通常为城市中心地带, 地下管线排列方式较为复杂, 如果深基坑内部发生坍塌将会严重影响地下管线的有效运行, 带来较大的经济损失。因此有必要针对

地铁深基坑施工工程中的安全风险进行有效识别, 提升工程安全风险管理质量。

对此, 黄华^[1]采用模糊综合评价法, 通过构建风险评价模型, 对深基坑工程的安全施工风险因素进行了量化分析, 构建安全风险评估体系。哈吉章等^[2]通过计算深基坑施工工程中风险因素

收稿日期: 2024-01-12

作者简介: 赵长伟, 助理工程师, 本科, 研究方向为地铁项目施工

之间的信息熵,对基坑开挖的潜在安全风险进行多维动态评估与分析。何柘沐等^[3]以MES风险评价法作为研究对象,探究该方法在深基坑施工安全管理工作中的实际应用场景。何燕等^[4]通过挖掘影响深基坑施工安全的潜在风险因素,构建动态故障树模型,对地面沉降所产生的安全风险进行精准预测与分析。上述方法均可以在一定程度上实现对深基坑施工安全风险的分析,但是无法精准识别施工工程项目的关键安全风险,风险识别效果还有待优化。

针对上述问题,本文利用风险耦合分解,基于地铁站深基坑施工项目,提出了一种新型的安全风险识别方法。通过耦合分解深基坑施工安全风险,明确施工工程项目中的安全风险节点,构建出安全风险网络结构图。对网络风险节点之间的具体关系进行量化分析,结合风险等级映射关系,精准识别出关键风险,优化风险识别流程,提高识别精度^[5]。

1 地铁深基坑施工安全风险识别方法设计

1.1 安全风险耦合分解

引发地铁车站深基坑施工安全事故的因素主要包括主观人为和客观施工环境因素。为了有效识别地铁车站深基坑施工安全风险,本文深入分析深基坑施工机理,将分析结果与施工传感信息进行融合,实现对施工安全风险的耦合分解处理^[6]。为了缩短施工周期或当施工区域地形不适合开展地上施工时,需要暗挖隧道,进行深基坑施工。地铁车站深基坑施工主要包括支护结构搭建施工、土方开挖施工以及降水施工三个步骤。

(1) 在进行支护结构搭建时,施工人员首先会对结构控制点和标高控制点进行测量放样处理,然后对侧壁进行修正,采用点焊固定的方式将钢筋网挂到侧壁上,进行格栅加工安装作业。

(2) 土方开挖作业中,主要利用微型挖掘机,通过由上至下的竖向分层开挖方式,对深基坑进行开挖处理。

(3) 降水施工指的是通过探孔、钻井等操作,将圆砾石料填入井中,最后安装水泵,进行抽降处理^[7]。

基于上述深基坑施工机理分析结果,假设施工过程中不同传感设备所采集到的信息数据为 a_m ,由此构建出的传感信息集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 。其中, m 代表传感数据总个数^[8]。假设深基坑施工安全风险状态为 S ,影响施工安全

风险的因素为 x_n ,则安全风险状态表达式如下所示。

$$S = a_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

由公式(1)可知,深基坑施工安全风险与风险因素以及传感信息关联性较强,因此本文结合上述的施工机理,将施工风险分解为三类,分别为人员风险 R_1 、现场风险 R_2 以及材料风险 R_3 ^[9]。不同类目下的具体分解耦合结果如表1~3所示。

表1 人员风险耦合分解

一级风险	二级风险	三级风险
人员风险	施工工序不当	管线未做处理
		未分区分层开挖
		钢筋配置不足
		接头连接问题
	施工质量不足	土体加固质量不足
		支护位置偏移较大
		支护构建强度不够
		职业道德缺失
	施工人员认知	职业技能不足
		经验及知识储备不足

表2 现场风险耦合分解

一级风险	二级风险	三级风险
现场风险	基坑开挖深度	土体压力增大
		水体压力增大
		浮力增大
		未做排水措施
	水位过高	未做封底灌浆
		静水压力较大
		被动土压力偏差
		存在砂土层
	土层结构复杂	存在湿陷层
		荷载作用
	周边环境复杂	地下水管渗漏
		地表径流量过大

表3 材料风险耦合分解

一级风险	二级风险	三级风险
材料风险	支护材料偏差	支护结构刚度不足
		支护结构强度不足
	支撑材料偏差	支撑强度刚度不足
		连接强度不足
		间距过大

1.2 风险节点的影响中心度求解

在完成深基坑施工安全风险耦合分解后,将耦合分解结果作为风险节点^[10],构建安全风险网

络图，通过映射关系分析出单个风险节点在整体风险网络结构中的重要程度^[11]。为实现网络风险节点影响作用的量化分析，本文引入触发度和被触发度，作为两个衡量指标。触发度越高，代表该方向节点与相邻节点的映射关系越强，越容易引发相邻节点安全风险^[12]。被触发度越高，代表该节点越容易被其他节点通过映射关系触发安全风险。具体计算公式如下。

$$ID_i = \sum_{j=1}^p \eta_{ji}, i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$OD_i = \sum_{j=1}^q \eta_{ij}, i = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

其中， ID_i 和 OD_i 分别代表映射关系触发度以及被触发度； η_{ji} 代表风险节点 i 对风险节点 j 的影响因子； η_{ij} 代表风险节点 j 对风险节点 i 的影响因子； p 代表风险节点 i 影响其他风险节点的数量； q 代表风险节点 i 被其他风险节点影响的数量。

对上述两种指标进行融合处理，计算风险节点的影响中心度，在风险网络结构中表征不同风险节点的重要程度^[13]。风险节点的影响中心度数值越高，代表该风险节点所映射的风险因素越容易引发施工安全事故。假设风险节点的影响中心度为 f_i ，则具体计算公式如下。

$$f_i = \sum_{i=1}^n \frac{\|ID_i - OD_i\|^2}{n_i} \quad (4)$$

其中， n_i 代表风险节点的原因度，代表风险节点之间映射关系的非线性变化。

1.3 关键风险识别

结合作用力施加对象与被影响对象之间的映射关系的非线性变化，以及对应的影响中心度，计算不同安全风险因素的综合得分，对风险因素进行分级处理，从而识别出关键风险。对此，使用相关分析方法对采集到的数据进行处理和分析，以识别潜在的映射关联关系，对风险节点进行权重分配，具体分配公式如下。

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{U}{w_i f_i} \quad (5)$$

其中， λ 代表风险节点对应的权重分配结果； N 代表风险类型总数； U 代表风险节点之间的关联系数； w_i 代表风险节点的模糊评价矢量^[14]。由此计算出不同安全风险因素的综合得分，具体计算公式如下。

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{B_i \oplus K}{\lambda R_i} \quad (6)$$

其中， S 代表风险因素的综合得分； K 代表安全风险因素的评价矩阵； B_i 代表风险耦合

向量。

综合上述风险因素得分，对风险类型进行分级处理，具体风险等级以及综合得分的对应关系如表4所示。

表4 风险等级对应关系

风险因素综合得分	风险等级	风险类型
≥ 0.8	I	关键风险因素
$0.8 \sim 0.6$	II	关键风险因素
$0.6 \sim 0.4$	III	次关键风险因素
$0.4 \sim 0.2$	IV	次关键风险因素
≤ 0.2	V	非关键风险因素

结合上述提出的风险等级对应关系，本文构建出的关键风险识别流程如图1所示。图1中，通过计算风险因素得分，对风险进行分级，识别关键风险^[15]，依据映射关系求解风险节点的影响中心度，映射成功则判定其为关键地铁深基坑施工风险。

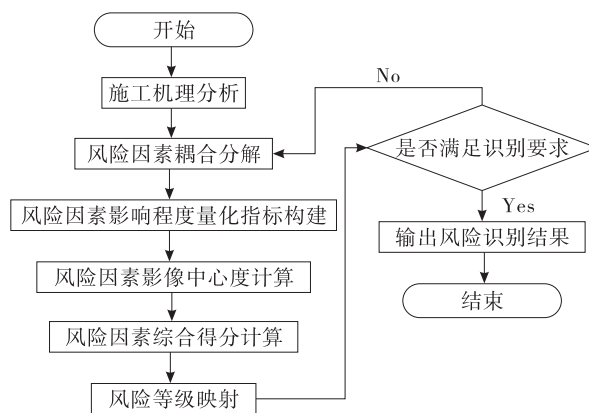


图1 关键风险识别流程图

2 实验论证

2.1 实验说明

为验证本文提出基于映射关系与影响中心度的地铁深基坑施工风险识别的实际应用效果，选取了两种常规的深基坑施工安全风险识别方法作为对比对象，分别为黄华^[1]和哈吉章等^[2]提出的深基坑施工安全风险识别方法。通过构建实验平台，采用三种风险识别方法对同一深基坑工程对象进行风险识别，对比不同识别方法的实际识别效果。

2.2 实验准备

实验对象为某市地铁五号线路中的部分深基坑施工工程，整体隧道长度为1345.62 m，其施工区域途经山区，在开挖深度达到10 m时，土

体沉降量达到了 20 mm，通过安装竖井深基坑支护临时结构，为地铁隧道施工提供安全保障。竖井深基坑现场施工图如图 2 所示。



图 2 竖井深基坑施工现场

图 2 中，地下管线的排列情况以及结构位置统计结果如表 5 所示。

表 5 地下管线相关参数

名称	编号	管径	材质	结构位置关系
污水管道	01	DN300	混凝土	距深基坑东侧 3 m
	02	DN250	混凝土	距深基坑南侧 4 m
	03	DN250	铸铁	距深基坑东侧 2 m
给水管	01	DN400	铸铁	距深基坑东侧 10 m
	02	DN450	混凝土	距深基坑南侧 2 m
	03	DN400	混凝土	距深基坑南侧 8 m
天然气支管	01	DN110	PE 管	距深基坑东侧 13 m
	02	DN120	PE 管	距深基坑南侧 12 m
	03	DN110	铸铁	距深基坑东侧 13 m

根据表 5 中的 9 个风险节点，构建安全风险网络图，如图 3 所示。

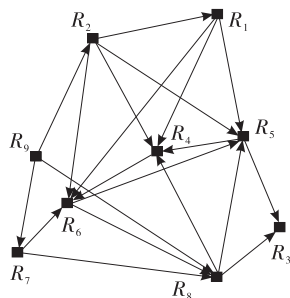


图 3 安全风险节点映射网络结构图

在图 3 中， R_i 代表风险节点，箭头展示了作用力施加对象与被影响对象之间的映射关系。利用触发度和被触发度两个指标衡量图 3 中 9 个风险节点的关联映射结构，利用公式（4）对表 5 中的 9 个风险节点的影响中心度进行计算，获得 9 个风险节点的影响中心度，如表 6 所示。

表 6 风险节点影响中心度

名称	编号	风险节点	影响中心度
污水管道	01	01	0.4
	02	02	0.4
	03	03	0.3
给水管	01	04	0.5
	02	05	0.7
	03	06	0.7
天然气支管	01	07	0.2
	02	08	0.5
	03	09	0.3

使用相关分析方法对采集到的数据进行处理和分析，以识别潜在的映射关联关系，将表 6 的节点影响中心度代入公式（5）中，基于表 1 和表 3 中的安全风险因素，共归纳出 15 个安全风险因素，对风险节点的进行风险权重分配，通过模糊评价确定施工风险权重，如表 7 所示。

表 7 风险权重分配结果

序号	安全风险因素	具体数值参数	风险权重
1	地面沉降	$>9.3\text{ cm}$	0.7
2	地下水面下降	$>4.3\text{ cm}$	0.3
3	土体泡水渗透系数	$>1.78 \times 10^{-6}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.6
4	水压过大	$>45.88\text{ kPa}$	0.4
5	坑壁内倾角度	$>23.3^\circ$	0.3
6	锚管注浆质量较差（强度）	$<520\text{ MPa}$	0.3
7	网片抗剪能力差	$<8.9\text{ kN}$	0.3
8	注浆压力不足	$<0.2\text{ MPa}$	0.7
9	土体加固强度较低	$<0.8\text{ MPa}$	0.8
10	井底加固不足	$<1.4\text{ MPa}$	0.9
11	格栅钢筋量不足	$\leq 56\text{ 个}$	0.3
12	主动土压力系数较大	>0.51	0.2
13	锚杆数量不足	$\leq 50\text{ 个}$	0.5
14	锚杆间距不足	$\leq 1.5\text{ m}$	0.8
15	混凝土厚度不足	$\leq 15\text{ cm}$	0.3

将表 6 的权重分配结果代入公式（6），由此计算出不同安全风险因素的综合得分，根据表 4 中具体风险等级以及综合得分的对应关系，对风险类型进行分级评价处理，具体风险因素分级识别结果如表 8 所示。

将三种风险识别结果用于风险管控中，并对风险管控效果进行检验。为了保障实验结果的可靠性，本次实验共设置了两不同的实验环境，即从实验项目中分别选取了两种基坑复杂程度不同的子施工项目，工况 1 为土壤承载力较低，导致基坑变形和失稳；工况 2 为渗漏水 and 浮力等影

表 8 风险因素识别结果

序号	安全风险因素	评价等级	识别结果
1	地面沉降	Ⅱ级	关键风险因素
2	地下水面下降	Ⅳ级	次关键风险因素
3	土体泡水软化	Ⅱ	关键风险因素
4	水压过大	Ⅲ	非关键风险因素
5	坑壁内倾	Ⅳ	次关键风险因素
6	锚管注浆质量较差	Ⅳ	次关键风险因素
7	网片抗剪能力差	Ⅳ	次关键风险因素
8	注浆压力不足	Ⅱ	关键风险因素
9	土体加固强度较低	Ⅰ	关键风险因素
10	井底加固不足	Ⅰ	关键风险因素
11	格栅钢筋量不足	Ⅳ	次关键风险因素
12	主动土压力较大	Ⅴ	非关键风险因素
13	锚杆数量、间距不当	Ⅲ	关键风险因素
14	土体发生液化	Ⅰ	关键风险因素
15	混凝土厚度不足	Ⅳ	次关键风险因素

响下，不能有效控制地下水位，导致基坑稳定性较差。对比不同风险识别方法的实际管控效果。

2.3 风险识别效果对比结果

对比不同方法的实际识别效果，具体衡量指标为不同方法下的风险网络结构密度。该值越高，代表风险之间的关联程度越高，证明风险识别方法未对施工项目起到更好的风险管控作用。风险网络密度计算公式如下。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i n_i}{n(n-1)}$$

(7)

其中， n 代表风险网络节点数量； d_i 代表风险传递演化速度； i 代表风险因素； D 代表风险网络密度。具体实验结果如图 4、图 5 所示。

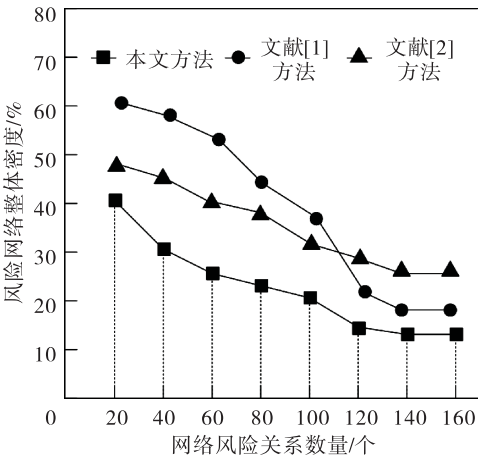


图 4 工况 1 的风险网络密度对比结果

由图 4 和图 5 可知，在对复杂程度不同的深

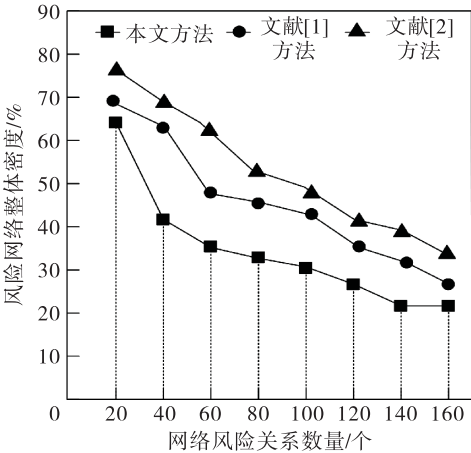


图 5 工况 2 的风险网络密度对比结果

基坑施工项目进行风险识别时，随着网络关系数量的不断增加，施工项目的风险网络结构密度不断降低，但利用本文方法所得到的风险网格密度均低于其他两种方法，说明本文方法的优势在于风险之间的关联程度更低，风险识别方法可以对施工项目起到更好的风险管控作用。

3 结束语

本文针对常规深基坑施工安全风险识别方法无法精准识别关键安全风险，导致风险识别效果较差的问题，提出了一种基于映射关系与影响中心度的地铁深基坑施工风险识别方法。该方法能够有效降低项目风险网络密度，从而降低安全事故发生的概率。在未来研究工作中，还需结合实际施工情况，对施工安全风险进行动态分析，为安全风险影响因素识别工作提供理论支持。

参考文献：

[1] 黄华. 基于 AHP-模糊综合评价法的深基坑施工安全风险识别研究[J]. 江西建材, 2023(1): 373-375, 378.

[2] 哈吉章, 杨良义, 肖旺槟, 等. 基于信息熵的地铁车站深基坑开挖安全风险多维度动态评价[J]. 工程管理学报, 2022, 36(5): 79-84.

[3] 何柘沐, 李延罡. MES 法风险评价应用于深基坑施工安全管理[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(10): 118-122.

[4] 何燕, 李晓阁, 杨莉琼, 等. 基于动态故障树的深基坑施工安全风险识别[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 323-327.

[5] 杨刚. 风险管理在地铁深基坑施工安全管理中的应用研究[J]. 价值工程, 2022, 41(34): 7-9.

[6] 张宁. 建筑深基坑工程施工技术及安全风险控制分析[J]. 安装, 2022(11): 86-88.

外运不同阶段的转换条件,可以规范现场管理,提高施工现场安全性;涉及的机械设备均为常规机械设备,便于市场租赁或公司内调配自有机械。然而,在临时便道外运阶段,临时便道的坡度需根据土方外运车辆的性能、深基坑的深度、深基坑的长度等综合确定,确保土方外运车辆在临时便道上安全行驶。在土体台阶倒运阶段,大台阶的尺寸限制需要根据挖掘机的性能和挖掘机司机操作水平确定,必要时需要进行验证操作,确保挖掘机可以向上攀爬出深基坑,因此,大台阶尺寸具体的确定条件需要在未来实践中总结讨论。门式起重机外运阶段土方开挖外运效率过低,经济和时间成本较大,是后期实践中优化调整的重点。

参考文献:

- [1]党涛,雷伟,任利军,等.西咸机场扩建工程深大基坑开挖对邻近地铁车站影响分析[J].市政技术,2023,41(8):235-244,252.
- [2]李娜春.试析建筑深基坑支护及土方开挖施工技术[J].河南建材,2020(3):1-4.
- [3]刘毅,胡建军,潘硕,等.复合内支撑体系下的深基坑土方开挖[J].中国建筑金属结构,2023,22(6):59-61.
- [4]翟相飞,曹艳辉,叶锦华,等.L形短台阶小步距软土基坑施工方法研究与应用[J].市政技术,2022,40(8):142-145,152.
- [5]林佐江,李卓文,张秀川,等.三河交汇处复杂环境超大深基坑支护开挖关键技术分析[J].天津建设科技,2020,30(5):64-67.
- [6]李威.明挖地铁车站土方开挖施工技术[J].交通世界,2023(13):15-17.
- [7]杨国锋.深基坑土方开挖专项施工方案编制存在的问题与解决办法分析[J].建材发展导向,2023,21(11):159-161.
- [8]北京市质量技术监督局.北京市基坑工程内支撑技术规程:DB11/940—2012[S].北京:工程建设标准化,2012.
- [9]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑土石方工程安全技术规范:JGJ 180—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10]彭军.地铁车站深基坑支护及降水施工技术研究[J].河南科技,2023,42(20):67-71.
- [11]林泽耿.广州地区某深基坑工程变形监测分析[J].广州建筑,2020,48(1):32-35.
- [12]蒋宏鸣,许俊青,李骁炜.深圳地区某深基坑支护设计方案优选与变形监测分析[J].广州建筑,2021,49(1):19-23.
- [13]李金阳,刘燕茹,董旭华.重庆轨道交通九号线二期工程深基坑支护和土方开挖施工技术[J].工程设计与设计,2023(22):152-154.
- [14]杜志涛,李少友.紧邻既有桥梁深基坑支护方案研究[J].市政技术,2020,38(4):254-257.
- [7]靳隆.深基坑施工安全监控及风险预警系统探究[J].中国建筑装饰装修,2022(3):181-182.
- [8]潘朝发.一种有效降低加油站深基坑作业安全风险施工方法研究[J].安全、健康和环境,2022,22(1):26-29.
- [9]李曙光,任少强,王洪坤,等.地铁车站深基坑施工变形规律及安全风险评估[J].公路,2022,67(1):355-362.
- [10]高芬芬,耿晔宽.软土地区相邻深基坑同步施工安全风险控制关键技术研究[J].江苏建筑,2021(6):89-91.
- [11]陈孝刚,林叶,张冬辉.深基坑工程风险分析和风险管控措施[J].建筑技术,2021,52(S1):63-67.
- [12]吴波,赵睿,蒙国往,等.基于模糊理论的地铁深基坑非对称施工安全风险评估[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):8-15.
- [13]郭平,邱晨展,孙立英,等.基于WSR和熵权物元可拓理论的深基坑安全风险评价[J].青岛理工大学学报,2021,42(5):12-19.
- [14]赵德凤,洪文霞,鹿乘.基于C-OWA算子的地铁深基坑施工安全可拓评价[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2021,39(5):17-22.
- [15]张阿晋,沈雯,朱建刚.深基坑施工安全监控及风险预警系统研究[J].建筑施工,2021,43(4):570-573.

(上接第35页)