

基于二维云模型的地铁深基坑施工风险评价

刘维庆¹, 姚克迁², 张 浩¹

(1. 石家庄铁道大学 经济管理学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043)

摘要:城市地铁车站深基坑工程受工程地质与水文复杂、周边建筑物与地下管线多、施工作业面狭窄等条件影响,施工过程不确定因素多,面临的风险不可低估。因此,建立基于 C-OWA 算子-二维云模型的地铁深基坑施工风险评价模型。通过文献研究以及实际调研,从基坑主体和周围环境两方面进行风险分析,建立地铁深基坑施工风险指标体系,采用 C-OWA 模型进行赋权,结合云模型加权集成的方法,构建综合评价云数字特征以及二维云图。实例分析显示,地铁深基坑施工风险评价结果属于临界风险,与实际情况相符,可为项目管理者提供理论参考。

关键词:地铁深基坑;施工风险;二维云模型

中图分类号:X947 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)05-0164-06

地铁车站深基坑施工作业中,周边建筑物密集,人员、车辆活动频繁。同时地下商业街、地下综合管廊的建设给地铁车站深基坑施工带来了严峻的挑战。如何有效地评价地铁深基坑施工风险,并实施相应措施是需要深入研究的问题^[1]。

国内外学者对地铁深基坑风险评估进行了大量的研究,采用了许多评价方法。最常用的评价方法有层次分析法^[2],但传统层次分析法对风险因素的权重确定具有较强的主观性。自 1965 年 Zadeh^[3]针对信息的模糊性、不确定性问题提出模糊理论后,刘波等^[4]将模糊层次分析法运用到实际工程中,建立基坑工程风险模糊层次评价模型;张胜昔等^[5]结合使用模糊层次分析法及灰色系统理论,用以评价青岛胶南市某基坑工程;唐建新等^[6]基于模糊数学理论并结合实测数据,建立了深基坑稳定性评价模型。WBS-RBS 和故障树方法也被广泛应用于深基坑风险分析^[7]。贝叶斯网络具有表达和分析不确定性的能力,适用于复杂环境下深基坑风险评估^[8]。另外经典物元可拓模型以其独特的优势在深基坑风险评价领域得到广泛应用^[9]。

云模型在不确定性转换上具有独特优势,可以度量指标的模糊性与随机性。经过几十年的发展,该方法被尝试应用于控制系统^[10]、预测^[11]、围岩稳定性^[12]等,但在深基坑施工风险评估范畴应用较少。

基于以上分析,本文将地铁深基坑施工风险划分为基坑主体风险和周围环境风险两个方面,基坑

主体风险及周围环境风险分别作为二维云模型的基础数字特征,相互耦合得出深基坑施工风险,建立基于二维云模型的风险评价方法,对影响因素进行定性和定量的评价,找出安全隐患^[13],以某市 S 站基坑工程项目为依托,加以应用分析,为类似工程提供可借鉴之处。

1 地铁深基坑施工风险分析

地铁深基坑施工工艺繁多,周围地理及人文环境复杂,应考虑的风险因素很多,支护体系的合理性安全性、基坑开挖对地层的扰动破坏、复杂的地质工况、环境条件都有可能造成基坑事故。故将地铁深基坑施工风险分析,从基坑主体和周围环境两方面入手。

1.1 基坑主体

1.1.1 围护结构

在钻孔灌注桩或地下连续墙施工过程中,墙背主动土压力不断施压,若桩底为可压缩的黏性土层,极易出现钻孔桩抗滑力严重不足,超过钻孔桩、冠梁等极限承受状态,最终折断、破裂。另外墙体插入不足、土压力计算负偏差、钢筋笼未吊放至设计标高或入孔时与孔壁摩擦过大、灌注混凝土质量过差和地下水位较高等原因,也会引起围护桩体坍塌或墙槽壁坍塌。

当隔水帷幕嵌入深度不够或旋喷桩尺寸过小或地连墙存在接缝、夹泥、离析、孔洞、开叉等缺陷时,将引起承压水压力超过隔水帷幕的抗渗能力,

收稿日期:2022-01-15

基金项目:河北省社科基金(HB19GL018)。

作者简介:刘维庆(1963—),男,山西平遥人,石家庄铁道大学经济管理学院,教授,博士,研究方向为风险管理。

导致承压水突破围护结构,带着砂土涌入基坑,基坑侧壁出现漏水、涌水、流土、流沙等,大量水土流入开挖面,引起基坑失稳风险。

钢支撑应进行场外预拼,减少安装节点,不得出现扭曲变形,保证钢结构强度和加工质量,避免受力过大而折断、脱落;混凝土梁配筋率不足致使构件抗剪力严重下滑,易出现破坏形态;支撑受到腐蚀或外力撞击,局部出现不对称变形,整体受力不均,支撑破坏,易酿成基坑崩塌;角撑平衡角部土压力,受力以轴向受压为主,应增强角撑材料属性,从而增强其固有强度;拆除支撑需缓慢有序,严禁碰撞格构柱,若混凝土强度未达到要求时拆除,将导致应力释放过大甚至梁体塌落;施工全生命周期内合理进行轴力值监测、变形监测,一旦监测值达到预警值,及时补救,避免支撑失稳。

1.1.2 基坑开挖

基坑土体开挖,内外高差增加,坑外土体对坑内挤压,引起土体回弹。起初为弹性隆起,随着开挖深度逐渐增加或基坑超挖,内外土体压差逐渐增大,出现塑性隆起。若加固不到位或没有及时浇筑底板,会导致地基中塑性开展区扩大,连通成片,直至基坑失稳。

放坡过陡、开挖顺序有误、未按照规定设置土工构筑物或由于场地狭小错误摆放施工器械、材料等顶部荷载,将造成边坡的大量土沿着软弱结构面整体滑动,如果地下水位较高,或出现暴雨等极端天气,大量水土涌入开挖面,若监测方案有误,未能及时预警,风险事件持续发酵,甚至导致基坑滑移坍塌,出现突发性基坑大规模坍塌现象。

深基坑土方开挖随着深度的增加,含水层上覆相对隔水层被层层削薄,水土压力平衡被打破,承压水顶穿开挖面土体,坑底会出现冒水涌水现象,若未设置降压井、降水井数量不够或失效、底板未及时浇筑或存在地下遗留物,另外季节性承压水位变化等因素,将造成坑底突涌、流沙或流土。

1.2 周围环境

1.2.1 地质水文

在工程前期,大量的地质风险来自原状地层的不良发育。勘察深度范围内的地层岩性各不相同,软弱地层力学强度低,遇水易软化、崩解;若遇断裂、岩溶等不良地质,施工中易产生卡钻、围岩失稳等现象;节理、裂隙的发育存在软弱结构面,会产生危岩体,降低了岩石坚硬程度、完整性和边坡稳定性;风化层岩土结构疏松、富水性强;当地下分布着

无规律性易燃、易爆、有毒等气体时,施工扰动会促使其向周围环境释放,造成爆炸、中毒、人员伤亡。

若遇到基坑底部进入承压含水层的工况,此时基坑渗流类型大多为承压-无压的模式,帷幕只有下部起效,阻水效果下降;地表水资源丰富的地区,基坑内会存在大量积水,另外华北地区属温带季风性气候,夏季高温多雨,加剧了降水难度,而大量的抽、降水,可能出现流贯通,极易引发基坑突水事故。

1.2.2 管线及建筑物

由于地铁车站设计在城市内部,深基坑周围存在居民区、商业楼,地下有天然气、给排水管道、光纤等。基坑开挖时需要考虑管线、建筑物桩基、土体以及基坑之间的相互作用^[14]。开挖时坑壁向内侧倾斜,引起周围地层损失,产生地表沉降,建筑物会出现沉降、倾斜、开裂等现象,地下管线也会受到相应的影响。

2 深基坑施工风险评价模型

地铁深基坑施工过程中,存在的各种风险因素具有模糊性、耦合性和随机性等特点。为了提高施工风险评价水平,采用 C-OWA 算子-二维云模型的地铁深基坑施工风险评价模型。利用 C-OWA 模型减少极值对指标的赋权的影响。云模型钟型隶属度函数较为柔和,结合云模型加权集成的方法对各个指标进行量化分析,将各级指标相互耦合,构造评价云数字特征以及二维云图,从而实现对地铁深基坑施工风险综合评价。

2.1 确立风险指标

通过地铁深基坑施工风险分析,结合相关规范、现场情况以及专家意见,建立深基坑施工风险评价指标体系,如图 1 所示。

该体系包含 2 个一级指标:基坑主体风险、周围环境风险,其中基坑主体风险下包含 2 个二级指标:围护结构、基坑开挖;周围环境风险下包含 2 个二级指标:地质水文、管线及建筑物。

围护结构下包含 13 个三级指标,基坑开挖包含 10 个三级指标;地质水文包含 10 个三级指标,管线及建筑物包含 6 个三级指标。

2.2 基于 C-OWA 算子的指标赋权

C-OWA 算子即组合数有序加权平均算子,可以降低极值对赋权结果的影响,其步骤如下:

1) 将风险评价指标 D_i 在数据集中 $(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 从大到小排列,得到新的集结数据 $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。

2) 利用组合数 C_{n-1}^j 对数据 b_j 进行赋权,得到加权向量 W :

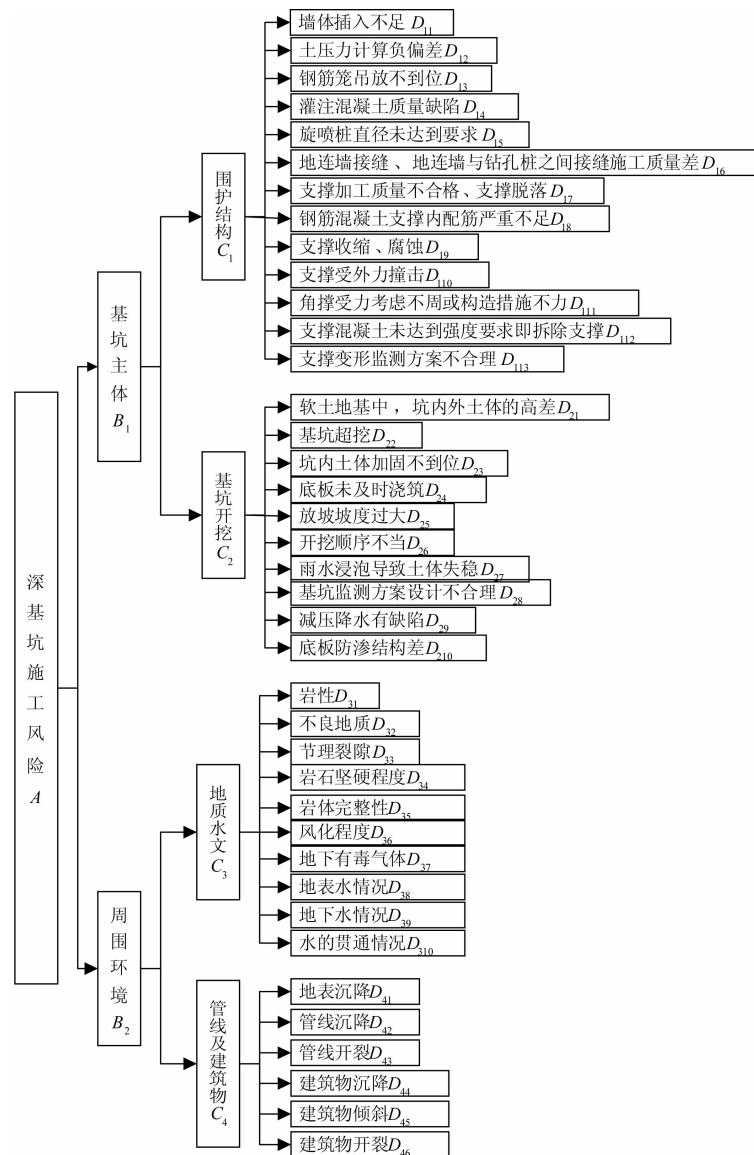


图 1 深基坑施工风险评价指标体系

$$W_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{\sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}, j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中, C_{n-1}^j 为在 $n-1$ 个数据中选取 j 个数据后的组合数。

3)通过加权向量 $\mathbf{W}$ 对决策数据加权,得到指标 D_i 的相对权重:

$$\widetilde{W}_j = \sum_{i=1}^n W_j b_j, W_j \in [0, 1], j \in [1, n] \quad (2)$$

4)计算指标的相对权重 W_i :

$$W_i = \frac{\widetilde{W}_i}{\sum_{i=1}^m \widetilde{W}_i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

2.3 深基坑施工风险评价

2.3.1 标准云

风险事件的严重度和可能性涉及概念的数量

区间划分问题,将各级指标的两个不确定因素划分为 I ~ V 级,将区间[0,10]平均分成 5 个标准评级区间,由式(4)可得每个区间的数字特征,具体的取值范围、等级阈值描述和数字特征见表 1。

$$\begin{cases} \bar{E}_x = \frac{S_j^{\max} + S_j^{\min}}{2} \\ \bar{E}_n = \frac{S_j^{\max} - S_j^{\min}}{6} \\ \bar{H}_e \in \left[\frac{E_x}{100}, \frac{E_n}{10} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{E}_x$ 、 $\bar{E}_n$ 、 $\bar{H}_e$ 分别为标准云的期望、熵和超熵; $S_j^{\max}$ 、 $S_j^{\min}$ 分别为第 j 个评级区间的上、下限;超熵 H_e 由经验得出,可根据实际情况进行调节,本文取 0.05。

2.3.2 综合评价云

专家根据基坑施工的实际情况,结合表 1 中自然语言描述为各底层风险事件进行打分,规定分值

精确到 0.1。

表 1 风险等级划分

风险等级	取值区间	等级描述	风险应对	数字特征
I	0~2	危害低	风险可接受,需进行审视	(1,0.33,0.05)
II	2~4	危害较低	风险可允许,需引起注意,进行常规管理	(3,0.33,0.05)
III	4~6	临界危害	风险部分接受,需采取一定控制措施方可接受	(5,0.33,0.05)
IV	6~8	危害较大	风险不可接受,需高层进行管理和决策	(7,0.33,0.05)
V	8~10	危害大	风险不可接受,需立即停产整顿	(9,0.33,0.05)

专家打出的每个分值形成一个云滴,应用逆向云发生器求得底层风险云数字特征:

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ E_n = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|} \\ H_e = \sqrt{\left| \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - E_n^2 \right|} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_i 为专家打分; n 为专家人数。

二级指标风险云由三级指标风险云和三级指标权重合并计算得出。以此类推,最终得到综合风险云,公式为

$$\begin{cases} E'_x = \sum_{i=1}^n w_i E_{xi} \\ E'_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i E_{ni})^2} \\ H'_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i H_{ei})^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: (E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) 为 n 朵不同的云; $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为每朵云的权重; E'_x, E'_n, H'_e 分别为综合风险云的期望值、熵和超熵。

3 实例分析

3.1 工程概况

某市地铁 2 号线 S 站主体均位于道路正下方,车站形式为地下双岛式车站,车站中心里程为 YK33+650.447,结构总长 270.0 m,车站标准段宽度 22.9 m,顶板覆土约为 3.5 m,底板埋深 17.04 m。盾构井段宽度 26.8 m,顶板覆土约为 3.5 m,底板埋深 18.48 m。车站结构型式为地下双层两柱三跨矩形框架结构。该项目航拍图如图 2 所示。围护结构采用 1200@1500 钻孔灌注桩+3 道

内支撑。本工程勘探范围内的土层划分为人工堆积层(Q^{ml})、第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})、第四系上更新统冲洪积层(Q_3^{al+pl})三大层。本场地赋存一层地下水,地下水类型为潜水(二),埋深大于 45 m。

该项目东北处为两层混凝土结构,东南侧为 1 层砖结构。北侧电力竖井。B 出入口及 1 号风道主要控制管线有:南北向 1 条 DN500 给水管,管道顶埋深约 1.63 m,两条 400×300 光纤管线,管道顶埋深约 0.92 m,C 出入口主要控制性管线有 DN529 中压燃气、DN100 给水管。



图 2 S 站航拍图

3.2 风险评价

邀请 9 位专家对底层指标按照重要度评分,分值为 0~10 分。按照式(1)~式(3)计算各指标权重,同理对围护结构、基坑开挖、地质水文、管线及建筑物按照重要度评分,计算二级指标权重,结果见表 2。

邀请 9 位专家参照表 1 中对各风险等级的自然语言描述,在各等级阈值范围内对底层指标进行打分。

利用式(5)计算各底层事件的风险云数字特征,为深度分析底层因素对施工过程的影响,利用正向云发生器生成底层指标风险云图,因指标数量较多,只选取风险程度较高的几个指标,其中围护结构风险如图 3 所示。

利用式(6)加权集成各底层事件风险云数字特征,得到二级指标风险云数字特征,继续加权集成得到一级指标风险云数字特征,结果见表 3。利用正向云发生器生成 S 站深基坑综合风险云,如图 4 所示。

3.3 结果分析

在图 3 中可以看出:支撑加工质量不合格、支撑脱落风险接近 IV 级;地连墙接缝、地连墙与钻孔桩之间接缝施工质量差风险次之;钢筋混凝土支撑内配筋严重不足风险等级相对较小。钢支撑加工质量和结构强度无法保证,会出现受力过大而折

断、脱落,一旦局部变形或失稳,将改变围护结构整体受力,严重的可能造成基坑崩塌,在施工中应重点

表 2 风险指标权重

一级指标	二级指标	三级指标	权重
基坑主体 B ₁ (0.732)	围护结构 C ₁ (0.587)	D ₁₁	0.077
		D ₁₂	0.085
		D ₁₃	0.080
		D ₁₄	0.081
		D ₁₅	0.081
		D ₁₆	0.074
		D ₁₇	0.098
		D ₁₈	0.080
		D ₁₉	0.069
		D ₁₁₀	0.069
		D ₁₁₁	0.062
		D ₁₁₂	0.069
		D ₁₁₃	0.069
	基坑开挖 C ₂ (0.413)	D ₂₁	0.106
		D ₂₂	0.146
		D ₂₃	0.092
		D ₂₄	0.093
		D ₂₅	0.087
		D ₂₆	0.087
		D ₂₇	0.067
		D ₂₈	0.125
		D ₂₉	0.097
		D ₂₁₀	0.094
周围环境 B ₂ (0.268)	地质水文 C ₃ (0.557)	D ₃₁	0.134
		D ₃₂	0.082
		D ₃₃	0.090
		D ₃₄	0.099
		D ₃₅	0.105
		D ₃₆	0.127
		D ₃₇	0.086
		D ₃₈	0.052
		D ₃₉	0.127
		D ₃₁₀	0.093
	管线及建筑物 C ₄ (0.443)	D ₄₁	0.209
		D ₄₂	0.192
		D ₄₃	0.128
		D ₄₄	0.177
		D ₄₅	0.152
		D ₄₆	0.139

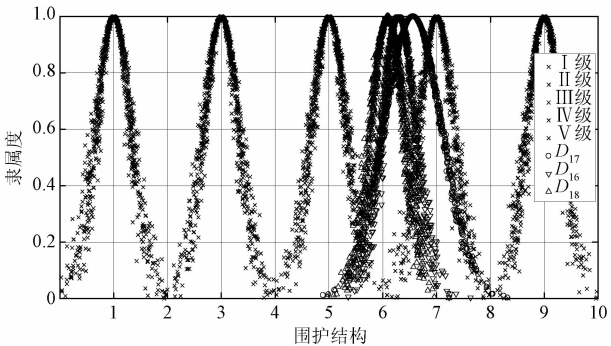


图 3 围护结构风险

表 3 深基坑风险云数字特征

一级指标	风险云数字特征	二级指标	风险云数字特征
基坑主体	(5.232, 0.116,0.03)	围护结构	(5.462,0.125,0.04)
		基坑开挖	(4.905,0.218,0.06)
周围环境	(4.004, 0.111,0.03)	地质水文	(3.716,0.184,0.05)
		管线及建筑物	(4.366,0.095,0.02)

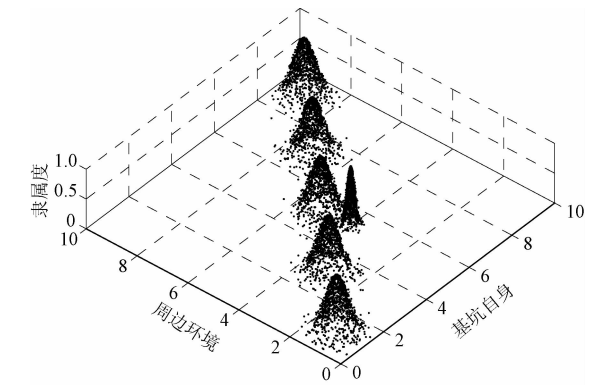


图 4 深基坑施工风险

关注;地连墙接缝、地连墙与钻孔桩之间接缝易冒水涌水,导致围护结构渗漏,在实际施工中应给予一定的控制措施。

结合图 4 得出该项目整体风险偏向Ⅲ级,属临界风险,风险等级较高,需采取一定措施规避风险。

3.4 风险控制措施

3.4.1 基坑主体风险控制措施

1)侧壁渗漏。保证接缝施工质量,按图施工。另外地下水的存在也加大了侧壁渗漏的潜在风险,为了控制侧壁渗漏应严格按照设计要求的降水深度设置降水井点,可根据实际情况加密布置。为防止降水井点破损失效,还应布设一定数量的预备井点,定期检查维修抽水泵,观测井点水位,确保降水井的质量和降水效果。

2)内支撑失稳。应保证支撑加工质量、钢筋混凝土内充分配筋。另外钢管支撑与穿墙 H 型钢在地面焊接时轴线偏差应控制在许可范围内,连接处设置劲肋板,同时考虑衬墙厚度、活络头调节段,长度不宜过长。钢板与地墙表面应紧密贴合,后靠空虚部分应填实,地墙凿毛处应平整。对轴力值加强监测,可采用钢支撑轴力自动补偿技术,不间断对支撑状态进行监控,实时调整轴力值,精准、安全、自动化程度高^[15]。

3)土体滑移坍塌。施工中应严格按照专项方案要求分段、分层、抽槽开挖,严禁超挖,土方开挖到支撑位置时及时架设支撑。

3.4.2 周围环境风险控制措施

1)桩基钻进、管线沟槽开挖前,协同有关部门

调查核实施工区域内管线的位置、走向、修建年份、尺寸、类型、材质接头形式等。实际工程中由于土层位移或其他地下结构施工扰动,管线位置可能与调查资料中有所偏差,故采用探测仪及人工挖槽进一步确定管线具体位置。对场地内需要保护的管线,制定切实可行的方案。

2)对既有管线加固可采用 700@500 双轴搅拌桩隔离加固,对煤气管道等危险性爆炸性管道进行加固时,采用砖砌土墩支护并设置防震沟。对管线与施工区之间、建筑物与基坑之间松散土和空隙用纯水泥浆加固。还要加强对该基坑污水管线、雨水管线、电力管线等的监测。

4 结论

1)从基坑主体和周围环境两方面进行风险分析,基坑主体包括围护结构、基坑开挖,周围环境包括地质水文、管线及建筑物。通过风险分析与识别,确定风险因素,为风险评价奠定基础。

2)建立了基于 C-OWA 算子-二维云模型的地铁深基坑施工风险评价模型,该方法可以将施工风险多指标进行耦合,每一层级风险指标的随机性和模糊性进行综合处理,为地铁深基坑风险评价方法体系提供了有效依据。

3)实例研究显示,该项目基坑施工总体风险等级为Ⅲ级,属临界风险;针对影响程度大的风险提出相应的控制措施,从源头上加以防护,具有一定的实际意义。

参考文献

[1] 郭健,钱劲斗,陈健,等. 地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J]. 土木工程与管理学报,2017,34(5):32-38.

[2] 魏丹. 基于故障树和层次分析法的地铁施工风险评价:以隧道竖井基坑围护结构失稳为例[J]. 安全与环境工程,2018,25(1):100-104.

[3] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965,8(3):338-353.

[4] 刘波,王凯强,黄冕,等. 地铁深基坑工程风险模糊层次分析研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):257-264.

[5] 张胜昔,陈为公,王会会,等. 基于 G-FAHP 的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(5):104-109.

[6] 唐建新,李欣怡. 基于模糊数学的地铁深基坑稳定性评价[J]. 安全与环境学报,2018,18(6):2135-2140.

[7] 周红波,高文杰,蔡来炳,等. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析[J]. 岩土力学,2009,30(9):2703-2707,2726.

[8] 王成汤,王浩,覃卫民,等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学,2020,41(5):1670-1679,1689.

[9] 吴贤国,沈梅芳,覃亚伟,等. 基于变权和物元原理的地铁基坑施工安全风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(6):879-885.

[10] 李军. A3000 系统的云模型控制[D]. 镇江:江苏科技大学,2013.

[11] 范谨麒. 多样本多维数据的智能分类预测模型及其应用[D]. 北京:冶金自动化研究设计院,2019.

[12] 薛黎明,李长明,郑志学,等. 基于二维云模型和 Apriori 算法的围岩稳定性分级研究[J]. 铁道学报,2020,42(6):121-128.

[13] 江浩,陶卫中. 基于多层次灰色评价法的钻孔灌注桩施工风险评价[J]. 科技和产业,2014,14(12):142-146.

[14] 徐宏增,石磊,王振平,等. 深基坑开挖对邻近大直径管线影响的优化分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(2):714-719.

[15] 何蓓. 深基坑邻近砌体房屋安全风险评估与管控研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

Risk Evaluation of Metro Deep Foundation Pit Construction
Based on Two-dimensional Cloud Model

LIU Weiqing¹, YAO Keqian², ZHANG Hao¹

(1. School of Economics and Management, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Transportation, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The deep foundation pit project of urban subway station is affected by complex engineering geology and hydrology, many surrounding buildings and underground pipelines, and narrow construction work surface. There are many uncertain factors in the construction process, and the risks should not be underestimated. Therefore, a risk assessment model is established for subway deep foundation pit construction based on the C-OWA operator-two-dimensional cloud model. Through literature research and actual investigation, conduct risk analysis from both the main body of the foundation pit and the surrounding environment is made, and a risk index system is established for subway deep foundation pit construction, using the C-OWA model for weighting, and combine the weighted integration method of the cloud model to construct a comprehensive evaluation Cloud digital features and two-dimensional cloud images. Case analysis shows that the risk evaluation results of subway deep foundation pit construction are critical risks, which are consistent with the actual situation, and provide theoretical references for project managers.

Keywords: deep foundation pit of subway; construction risk; two-dimensional cloud model