

深基坑工程施工过程风险综合评价

程鸿群¹, 余佳雪¹, 袁 宁¹, 彭朝晖²

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉市城乡建设委员会, 湖北 武汉 430000)

摘要: 针对当前对深基坑工程施工风险进行评价需要解决风险指标体系构建、指标权重分配和评价方法实现的问题, 建立了证据理论结合区间数赋值的深基坑工程施工过程风险评价模型. 依据深基坑工程的施工原理和管理过程, 应用“工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS)”和“0-1”方法识别风险因素, 建立深基坑工程施工过程风险评价指标体系. 结合区间数理论和证据理论的优势, 降低深基坑工程施工过程风险量化值的主观性, 详述构建识别框架、确定可信度函数以及信息合成的方法与步骤. 最后通过实例分析说明了该方法的合理性与可行性.

关键词: 深基坑工程; 施工过程风险; 工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS); 区间数; 证据理论

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Synthetic Evaluation on Risk of Deep Excavation Engineering Construction Process

CHENG Hongqun¹, SHE Jiaxue¹, YUAN Ning¹, PENG Zhao-hui²

(1. Economics and Management of School Wuhan University, Wuhan 430000, China; 2. Wuhan City Urban and Rural Construction Committee, Wuhan 430000, China)

Abstract: For the three main problems remaining to be solved in the construction process of deep excavation engineering: building a risk index system, distributing the weight of evaluation indexes and evaluating the risk, this article builds a risk evaluation system based on the D-S (Dempster-Shafer) evidence theory combined with interval number theory. Firstly we identify the risk factors by “WBS-RBS” and “0-1” methods to build the risk index system based on the construction principle and management process of deep excavation. In order to decrease the subjectivity of the process of deep excavation risk quantification, then we combine the advantages of interval number theory and D-S

evidence theory to specify the methods and procedures about how to build identifying framework, choose the reliability function and synthesize information. At last, the rationality and feasibility of the risk evaluation system are manifested by analyzing the example.

Key words: deep excavation engineering; construction process risk; work breakdown structure-risk breakdown structure (WBS-RBS); interval number; D-S (Dempster-Shafer) evidence theory

深基坑工程是一个复杂的系统工程, 素有“高危分部工程”之称. 随着科学技术不断发展和生产逐步提高, 深基坑工程正逐步向开挖深度大、面积广、技术含量高的趋势发展, 尤其在施工阶段, 项目投入资源多、施工难度大、周边环境复杂, 不确定因素大量存在, 并不断变化. 当危险系数增加、发生事故时往往带来难以估量的生命财产损失, 由此产生的风险常常影响工程项目的顺利实施, 并带来不良的社会影响. 因此, 深基坑工程施工阶段是项目风险管理重点, 只有科学地评价可能遇到的风险, 才能进行有效的风险分析与控制.

科学地评价深基坑工程施工风险需要解决两个关键问题. 首先是要科学地预测深基坑工程施工过程中的风险因素. 从风险的来源分析, 兰守奇认为深基坑施工期风险因素有自然、事故、环境及施工本身4类^[1]; 黄宏伟等将施工过程中的风险因素分为施工风险、监理风险、监测风险、环境影响风险和人员安全风险^[2]. 从深基坑工程的施工风险形成机理分析, Matsuo等在基坑支护结构方面进行了系统的可靠性研究, 深入研究了影响基坑支护结构安全的各种不确定性因素, 分析了基坑支护结构体系各种失效模式机理^[3]; Chen等深入研究了岩土工程中各种风

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 武汉市城乡建设委员会科技计划项目(201417)

第一作者: 程鸿群(1967—), 女, 管理学博士, 副教授, 主要研究方向为项目管理、房地产与物业管理等方面的教学与科研.

E-mail: chp0901@163.com

通讯作者: 余佳雪(1992—), 女, 硕士生, 主要研究方向为项目管理. E-mail: 413105441@qq.com

险问题,提出岩土工程主要风险包括设计模型与参数风险、技术风险和管理风险^[4].从项目施工工序分析,李朝阳等将基坑的施工风险分为地下连续墙、土方开挖、支撑及立柱、降排水、地基加固和主体结构施工风险六大部分^[5];辛欣等建立了土岩组合地质条件下地铁车站基坑工程风险三级指标,将车站施工风险分为基坑施工、结构施工、附属施工、不良地质施工和自然灾害风险^[6].这些学者从风险来源及形成机理和施工工序流程确定风险因素,可行性强,但风险来源及形成机理和深基坑施工工序复杂,影响因素多,深基坑工程施工过程中的风险指标体系还需更进一步完善.

第二是选取科学有效的风险评价方法.风险的量化具有很强主观性,与人的评价标准以及对于风险事件发生的预测能力和对其后果的控制能力有关^[7].由于深基坑工程施工过程周期长、施工技术复杂,受地质、水文、周边环境的影响,其风险量的确定则具有更大的不可知性.目前在项目风险的评价中运用比较广泛的方法有层次分析法、模糊综合评价法、灰色综合评价法、证据理论等^[8-12],这些方法各自的特性决定了其只能顾及风险量化的一个方面或两个方面的含义,而无法同时处理三个方面的问题,降低了评价结果的客观性.因此需要探寻一种更适合处理深基坑工程施工风险的评价方法.

本文从深基坑工程的施工出发,建立深基坑工程的工作分解结构(WBS),结合深基坑工程的施工原理分析其存在的风险因素(风险分解结构,RBS),应用“0-1”法判断“WBS-RBS”组合矩阵进行深基坑

工程的施工风险识别.并将区间数与证据理论相结合,改进证据理论方法中权重确定的主观性,探讨其进行深基坑工程施工风险评价的方法与步骤,以期作为深基坑工程的施工风险评价提供可借鉴的体系与方法.

1 基于 WBS-RBS 的风险识别

本文采用 WBS-RBS (work breakdown structure-risk breakdown structure)组合矩阵进行风险识别.WBS-RBS 是将工作分解结构与风险分解结构构成风险判断组合矩阵进行风险识别的方法,WBS-RBS 矩阵的行向量是工作分解的工作包,矩阵的列向量是风险分解结构的风险指标.

1.1 深基坑工程施工过程的 WBS

深基坑工程是指开挖深度超过 5 m(含 5 m)或开挖深度未超过 5 m,但地质条件、周围环境和地下管线复杂的基坑,包括基坑支护、基底加固、降水、土方开挖等内容.支护工程是深基坑工程施工过程的难点,其设计和施工方案的合理性、可行性、可靠性是影响工程成本、进度、安全的重要因素.支护结构一般分为桩墙体系、撑锚体系和喷锚体系.桩墙体系包括钢板桩支护、地下连续墙支护、排桩支护和深层搅拌桩支护,撑锚体系包括内支撑结构、锚杆(拉锚结构,支撑结构),喷锚系统包括土钉墙支护和挂网喷射混凝土.

根据工作分解结构(WBS)原理,分解深基坑工程见图 1.

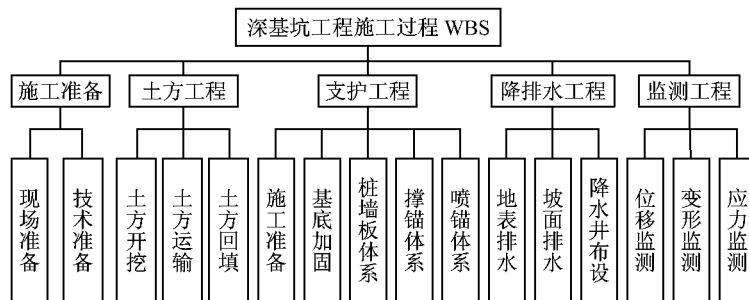


图 1 深基坑工程施工过程工作分解结构(WBS)

Fig.1 Work breakdown structure of deep excavation engineering construction process

1.2 深基坑工程施工过程的 RBS

深基坑是一项涉及面广且复杂多变的工程,既涉及土力学中强度、变形和稳定三大典型问题,同时还与结构工程、环境工程及项目管理相互影响而形成复杂的系统工程.本文依据深基坑工程的施工原理和管理过程,结合深基坑工程特点及对现有文献的归纳分析,在现有自然环境和经济水平下,将施工

过程风险分为技术风险、管理风险及其他风险三大类.技术风险主要分析勘察设计偏差和深基坑支护方案选择的合理性带来的风险;管理风险分为现场管理和控制风险,现场完善的人员、机械、材料的管理和信息的有效沟通可以促进深基坑工程的顺利进行,而成本、质量、进度、范围的风险需结合土力学、结构工程及环境工程确定的基准计划或标准进行有效

控制;其他风险分为基坑保护、施工安全和应急处理。建立如表 1 所示深基坑工程施工过程风险分解表。

表 1 深基坑工程施工过程风险分解(RBS)

Tab. 1 Risk breakdown structure of deep excavation engineering construction process

判据层 A_i	子判据层 A_{ij}	指标层 A_{ijk}	
深 基 坑 工 程 施 工 过 程 风 险 A	技术风险	勘察设计风险	勘察偏差、设计偏差
		工艺风险	施工工艺的合理性、施工设备的选择
		现场管理	人员管理、机械管理、材料管理、信息管理
	管理风险	控制风险	成本控制、进度控制、质量控制、范围控制
		其他风险	基坑保护
	其他风险	安全风险	安全施工计划、安全监控
		应急风险	应急方案、应急处理

1.3 深基坑工程施工过程风险识别

以 WBS 的工作包作为行向量,以 RBS 的指标层作为列向量,建立 WBS-RBS 风险判断组合矩阵,如表 2 所示,表中 Y_g 表示 WBS 的第 g 个工作包, Z_h 表示 RBS 的第 h 个风险指标。结合具体深基坑施工项目以“0-1 法”判断各种风险的存在性,即“0”代表对应风险因素不存在,“1”代表对应风险因素存在,由此识别深基坑工程施工过程中可能存在的风险因素,确定其风险指标体系。

表 2 WBS-RBS 风险判断组合矩阵

Tab. 2 WBS-RBS risk judgment composite matrix

	Y_1	Y_2	Y_3	...	Y_g
Z_1					
Z_2					
\vdots					
Z_h					

2 基于证据理论的深基坑工程施工过程风险评价

针对深基坑工程施工过程中风险量化的特点,本文结合区间数采用证据理论进行深基坑工程施工项目的风险评价。在运用证据理论进行风险评价时,应用区间数理论及概率论知识确定指标体系中各评判指标的权重和基本可信度分配函数,然后利用 D-S(Dempster-Shafer)组合规则进行证据信息融合,消除评价过程中的信息不一致性,得到深基坑工程施工风险信度集函数,再利用区间数可能度矩阵对各风险信度区间值进行排序。

2.1 确定风险识别框架

本文采用文献[13]构建的风险等级划分,定义

风险识别框架 $\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\} = \text{一级, 二级, 三级, 四级, 五级}$, 识别框架中元素用 $H_b (b=1 \sim 5)$ 表示。其中一级表示风险可忽略,需日常管理和检查;二级表示风险可容许,需加强日常管理检查;三级表示风险可接受,需引起重视;四级表示风险不可接受,需制定控制预警措施;五级表示拒绝接受并立即停止,整改、规避或启动应急预案。

2.2 风险评价的信度函数

深基坑工程施工过程风险评价指标体系中指标层各指标被判为识别框架中各等级的信度即为指标的可信度函数。对深基坑工程施工过程风险评价指标信度函数的确定可按如下步骤进行。

2.2.1 基于区间数理论确定指标权重

由于客观事物的复杂性、不确定性以及人类思维本身的模糊性和局限性,评价者往往难以用一个确定的数来表达自己的对事物的认知,本文采用区间数结合九级标度法对指标进行赋值,再利用区间数特征根法[14]计算指标权重,九标度区间赋值见表 3。

(1) 根据进行风险识别后得到的深基坑工程施工过程风险评价指标体系,逐一对判据层、子判据层以及指标层的风险指标构造区间数互反判断矩阵,根据各风险指标的相对重要程度进行两两比较打分。

(2) 对构建的区间数互反判断矩阵进行一致性检验。记区间数互反判断矩阵 $D = ([d_{qr}^-, d_{qr}^+])_{n \times n}$, 其中 q, r 分别表示矩阵元素所处行数与列数, n 为指标个数。将矩阵 $D = ([d_{qr}^-, d_{qr}^+])_{n \times n}$ 划分为矩阵 $D(0)$ 和 $D(1)$, 其中:

$$D(0) = \begin{pmatrix} 1 & d_{12}^- & \cdots & d_{1n}^- \\ d_{21}^+ & 1 & \cdots & d_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^+ & d_{n2}^+ & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \quad (1a)$$

$$D(1) = \begin{pmatrix} 1 & d_{12}^+ & \cdots & d_{1n}^+ \\ d_{21}^- & 1 & \cdots & d_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^- & d_{n2}^- & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1b)$$

根据层次分析法分别检验矩阵 $D(0)$ 和 $D(1)$ 的一致性。若矩阵 $D(0)$ 及 $D(1)$ 均通过一致性检验,则矩阵 D 通过一致性检验[15]。

(3) 利用区间数特征根法确定指标权重:

① 将区间数互反判断矩阵 $D = ([d_{qr}^-, d_{qr}^+])_{n \times n}$ 分解为矩阵 D^- 和 D^+ , $D^- = (d_{qr}^-)_{n \times n}$, $D^+ = (d_{qr}^+)_{n \times n}$, 则 D^- 和 D^+ 的最大特征根所对应的归一化特征向量分别为

$$W^- = (w_i^-), W^+ = (w_i^+), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

②设 $X=[\alpha w_i^-, \beta w_i^+]$ 为 D 对应于最大特征根的全部特征向量, 其中

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\sum_{q=1}^n d_{qr}^+}}{\sum_{q=1}^n d_{qr}^+}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\sum_{q=1}^n d_{qr}^-}}{\sum_{q=1}^n d_{qr}^-}} \quad (3)$$

则该层的指标权重向量为对应于最大特征根的全部特征向量即: $W_i=[\alpha w_i^-, \beta w_i^+]$.

表 3 指标重要性比较区间赋值

Tab.3 Interval assignment of index importance comparison

序号	指标 E 与 F 相比重要性比较结果说明与区间标度赋值
1	E 与 F 同等重要 [1,1]
2	E 比 F 稍微重要 [2,3]
3	E 比 F 重要 [4,6]
4	E 比 F 明显重要 [7,8]
5	E 比 F 极为重要 [9,9]

2.2.2 获取专家对风险指标的主观评价概率值

评价组专家根据参照识别框架各等级描述, 给出指标层中指标 A_{ijk} 评判为识别框架元素 $H_b (b=1 \sim 5)$ 的评价概率值 $P_{ijk,b}$, 该值是将多位专家的评判结果按一定规则的概率运算综合确定的^[16], 满足:

$$\sum_{b=1}^5 P_{ijk,b} \leq 1, P_{ijk,b} \geq 0, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots$$

式(4)一方面表示允许风险评价指标 A_{ijk} 以不同的置信度评判为识别框架中不同的等级元素; 另一方面, 对于置信度少于 1 的部分表示评判专家对相关信息的“不知道”或“不确定”, 即允许将置信度赋予空集, 这种评判规则更符合深基坑工程施工过程风险量化的“未知性”。

2.2.3 确定各风险指标对所属子判据的支持度

证据理论认为, 若认为“指标 A_{ijk} 风险等级为 H_b ”, 则在一定程度上认为“子判据 A_{ij} 风险等级为 H_b ”, 记这个程度为指标 A_{ijk} 对子判据 A_{ij} 的支持度 μ_{ijk} . 定义各子判据下指标中权重最大的为关键指标, 记为 $A_{ij,K}$, 且其权重为 $w_{ij,K}$, 给出关键指标对所属子判据的支持度 $a_{ij,K}$, 称其为关键指标偏好系数 (一般取 $a_{ij,K} \in (0.8, 1.0)$), 有

$$\begin{cases} \mu_{ijk} = a_{ij,K}, & k = K \\ \mu_{ijk} = a_{ij,K} w_{ijk} / w_{ij,K}, & k \neq K \end{cases} \quad (5)$$

2.2.4 计算风险评价指标可信度函数

在得到指标 A_{ijk} 被评判为风险等级 H_b 的评价概率值 $P_{ijk,b}$, 以及指标 A_{ijk} 对所属子判据 A_{ij} 的支持度 μ_{ijk} 后, 可以得到指标 A_{ijk} 评定为风险等级 H_b 的可信度函数 $m_{ijk,b}$ 如下:

$$m_{ijk,b} = \mu_{ijk} P_{ijk,b} \quad (6)$$

剩下不能进一步分配的信度 $m_{ijk,\varphi}$ 为

$$m_{ijk,\varphi} = 1 - \sum_{b=1}^5 m_{ijk,b} \quad (7)$$

2.3 风险评价证据信息的合成

深基坑工程施工过程风险综合评价的最终结果是通过一层一层信息的合成得到的. 在得到指标层各指标的置信函数后, 根据 D-S 组合规则合成各层指标所属子判据的置信函数, 同理合成各子判据所属判据的置信函数. 记 M_{ij,H_b} 为子判据 A_{ij} 被评判为 H_b 的置信度, $M_{ij,\varphi}$ 表示剩下未能进一步分配的信度. 当子判据 A_{ij} 所含指标为 $A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijs}, A_{ij(s+1)}, \dots (s \geq 1)$ 时, 令 $m_{ijs,b}$ 为前 s 个指标对 H_b 的综合置信度, 则证据合成的递推公式为

$$\begin{cases} M_{ij,H_b} = (1 - Q_{s+1})^{-1} (m_{ijs,b} m_{ij(s+1),b} + m_{ijs,b} m_{ij(s+1),\varphi} + m_{ij(s+1),\varphi} m_{ij(s+1),b}) \\ M_{ij,\varphi} = (1 - Q_{s+1})^{-1} m_{ijs,\varphi} m_{ij(s+1),\varphi} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $Q_{s+1} = \sum_{x=1}^n \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^n m_{ijs,x} m_{ij(s+1),y}$ 表示指标层证据 $m_{ijs,b}$ 与 $m_{ij(s+1),b}$ 的冲突程度, x, y 分别是识别框架 Θ 中的不同评价等级. Q_{s+1} 越大表明证据冲突越大.

运用以上合成方法可以得到判据层指标的置信度集函数为

$$M_i = \{M_{i,\varphi,H_b}, M_{i,H_b} \mid i = 1, 2, 3; b = 1, \dots, 5\} \quad (9)$$

2.4 基于合成结果决策

式(9)所示置信度集函数 M_i 即为指标体系中判据层三个指标的区间置信函数的集合. 对这三个指标的区间置信函数进行合成, 可以得到深基坑工程施工过程风险评价的风险等级量化区间值 R_b :

$$R_b = [I_b^-, I_b^+], b = 1, 2, \dots, 5 \quad (10)$$

根据区间数可能度概念, 对上述风险等级量化值进行排序. 具体步骤如下^[17]:

(1) 确定深基坑工程施工过程风险评价的风险等级量化值 R_b 的可能度:

令 $R_b = [I_b^-, I_b^+], R_{b'} = [I_{b'}^-, I_{b'}^+], b = 1, 2, \dots, 5; b' = 1, 2, \dots, 5$, 则称

$$p[R_b > R_{b'}] = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(I_b^+ - I_{b'}^+) + (I_b^- - I_{b'}^-)}{|I_b^- - I_{b'}^-| + |I_b^+ - I_{b'}^+| + |I_b^- - I_{b'}^+| + |I_b^+ - I_{b'}^-|} \right) \quad (11)$$

为 $R_b > R_{b'}$ 的可能度, 其中 $l_{b'} = [I_b^-, I_b^+] \cap [I_{b'}^-, I_{b'}^+]$ 的长度.

(2) 根据式(11)对风险等级区间数 R_b 进行两两比较, 求得相应的可能度 $p_{bb'} = p[R_b > R_{b'}]$, 并建立可能度矩阵 $U = (p_{bb'})_{5 \times 5}$.

$$(3) \text{ 令 } \lambda_b = \sum_{b'=1}^5 p_{bb'}, \text{ 得到排序向量}$$

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) \quad (12)$$

根据 λ_b 的大小对 R_b 进行排序,最大值所对应的风险等级即为深基坑工程施工过程风险评价等级。

3 案例分析

武汉市某深基坑工程位于商务区东西发展主轴西南侧的 A01 块地。勘察场地内的地下水有上层滞水,孔隙承压水和基岩裂隙水三种类型。基地西侧约 250 m 即为长江,因此本工程场地内地下深厚的承压水含水层与长江水力联系非常紧密。

3.1 风险识别确定综合评价指标体系

聘请 5 位参与此工程的专家组成评价小组,根据第一部分建立的方法,将深基坑施工过程 WBS-RBS 组合矩阵交由专家组评判,识别此深基坑工程施工过程中存在的风险因素,结果见表 4。

表 4 武汉市某深基坑工程施工过程风险综合评价指标体系
Tab. 4 Risk synthetic evaluation index system of construction process of one deep excavation engineering in Wuhan

目标层	判据层 A_i ; 子判据层 A_{ij}	指标层 A_{ijk}
技术风险 A_1	设计风险 A_{11}	地连墙的勘察偏差 A_{111} 、地连墙的设计偏差 A_{112}
	工艺风险 A_{12}	地连墙施工工艺的合理性 A_{121} 、降水井布设合理性 A_{122} 、制作吊放钢筋笼设备的选择 A_{123}
管理风险 A_2	现场管理 A_{21}	现场准备中的人员管理 A_{211} 、技术准备中的机械管理 A_{212} 、现场准备中的信息管理 A_{213}
	控制风险 A_{22}	制作吊放钢筋笼进度控制 A_{221} 、地连墙进度控制 A_{222} 、内支撑进度控制 A_{223} 、土方开挖质量控制 A_{224} 、地连墙质量控制 A_{225} 、内支撑质量控制 A_{226} 、基底加固质量 A_{227} 、降排水质量控制 A_{228} 、土方开挖范围控制 A_{229} 、基底加固范围控制 A_{220}
深基坑工程施工过程风险 A	基坑保护 A_{31}	内支撑支护保护 A_{311} 、基底加固支护保护 A_{312} 、基底加固坑底保护 A_{313}
	安全风险 A_{32}	内支撑安全施工计划 A_{321} 、土方开挖安全监控 A_{322} 、基坑监测安全监控 A_{323} 、地连墙安全监控 A_{324} 、内支撑安全监控 A_{325} 、基底加固安全监控 A_{326} 、工程测量安全监控 A_{327} 、降排水安全监控 A_{328}
	其他风险 A_3	土方开挖应急方案 A_{331} 、降排水应急方案 A_{332} 、土方开挖应急处理 A_{333} 、基坑监测应急处理 A_{334} 、地连墙应急处理 A_{335} 、内支撑应急处理 A_{336} 、基底加固应急处理 A_{337} 、降排水应急处理 A_{338}

3.2 确定指标权重

请专家小组根据表 4 对各判据、子判据及指标进行重要性程度打分,利用第 1.2 节建立的方法进行权重计算,结果与表 4 指标对应。指标权重分配见表 5。

表 5 指标权重分配

Tab.5 Index weight distribution

判据层 A_i	子判据层 A_{ij}	指标层 A_{ijk}
[0.581, 0.647]	[0.806, 0.854]	([0.680, 0.739], [0.278, 0.302])
	[0.165, 0.174]	([0.328, 0.369], [0.114, 0.128], [0.473, 0.532])
[0.254, 0.283]	[0.165, 0.174]	([0.581, 0.647], [0.111, 0.123], [0.254, 0.283])
	[0.806, 0.854]	([0.023, 0.023], [0.054, 0.060], [0.054, 0.060], [0.065, 0.073], [0.260, 0.283], [0.265, 0.285], [0.120, 0.146], [0.057, 0.061], [0.024, 0.026], [0.024, 0.025])
[0.111, 0.123]	[0.408, 0.422]	([0.718, 0.758], [0.165, 0.187], [0.083, 0.085])
	[0.155, 0.183]	([0.028, 0.030], [0.186, 0.208], [0.096, 0.118], [0.312, 0.361], [0.162, 0.175], [0.063, 0.078], [0.022, 0.024], [0.035, 0.041])
		([0.033, 0.038], [0.018, 0.018], [0.118, 0.124], [0.158, 0.168], [0.258, 0.292], [0.197, 0.209], [0.088, 0.095], [0.040, 0.050])

3.3 确定支持度

经专家小组商议,关键指标的偏好系数统一确定为 0.9,由式(5)可得到如表 6 所示结果。

表 6 指标支持度

Tab.6 Support degree of index

支持度 μ_i	支持度 μ_{ij}	支持度 μ_{ijk}
[0.900, 0.900]	[0.900, 0.900]	([0.900, 0.900], [0.338, 0.399])
	[0.173, 0.195]	([0.554, 0.703], [0.192, 0.244], [0.900, 0.900])
[0.353, 0.438]	[0.173, 0.195]	([0.900, 0.900], [0.154, 0.191], [0.353, 0.438])
	[0.900, 0.900]	([0.072, 0.079], [0.171, 0.204], [0.171, 0.204], [0.204, 0.249], [0.820, 0.900], [0.900, 0.900], [0.379, 0.496], [0.179, 0.206], [0.076, 0.088], [0.075, 0.086])
[0.154, 0.191]	[0.900, 0.900]	([0.900, 0.900], [0.196, 0.235], [0.099, 0.106])
	[0.330, 0.404]	([0.074, 0.082], [0.464, 0.602], [0.239, 0.341], [0.900, 0.900], [0.405, 0.506], [0.158, 0.226], [0.054, 0.068], [0.087, 0.119])
		([0.100, 0.133], [0.055, 0.064], [0.362, 0.431], [0.487, 0.588], [0.900, 0.900], [0.607, 0.732], [0.272, 0.331], [0.123, 0.175])

3.4 可信度函数计算

各专家根据已掌握的经验知识,参照第 2.1 节对识别框架中各元素的等级描述,给出每个指标评

判为识别框架中 $H_b (b = 1 \sim 5)$ 的概率,运用文献 [16] 中的专家意见合成方法将 5 位专家的评价概率

进行合成,得到如表 7 所示结果. 进一步按照式(6)和式(7)确定指标层的可信度区间如表 8 所示.

表 7 专家评价概率值

Tab.7 The possibility given by experts

子判据层	指标层	P_{ijk}					子判据层	指标层	P_{ijk}				
		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5			H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
A ₁₁	A ₁₁₁		0.1	0.6	0.3		A ₃₁	A ₃₁₁		0.7	0.1	0.1	
	A ₁₁₂		0.1	0.6	0.3			A ₃₁₂		0.1	0.6	0.2	
A ₁₂	A ₁₂₁		0.2	0.5	0.3		A ₃₁₃		0.2	0.6	0.2		
	A ₁₂₂	0.1	0.5	0.3			A ₃₂₁	0.1	0.4	0.4			
	A ₁₂₃	0.1	0.7	0.2			A ₃₂₂		0.4	0.3	0.1		
							A ₃₂₃		0.3	0.4	0.2		
A ₂₁	A ₂₁₁		0.4	0.5	0.1		A ₃₂₄		0.2	0.5	0.3		
	A ₂₁₂	0.2	0.6	0.1			A ₃₂₅			0.4	0.4	0.1	
	A ₂₁₃	0.1	0.6	0.2			A ₃₂₆		0.2	0.6	0.2		
A ₂₂	A ₂₂₁	0.1	0.4	0.4			A ₃₂₇	0.3	0.3	0.4			
	A ₂₂₂	0.2	0.6	0.2			A ₃₂₈	0.1	0.5	0.3			
	A ₂₂₃		0.2	0.7	0.1		A ₃₃₁		0.2	0.5	0.3		
	A ₂₂₄		0.1	0.7	0.1		A ₃₃₂		0.4	0.5	0.1		
	A ₂₂₅			0.6	0.2	0.1	A ₃₃₃	0.1	0.3	0.6			
	A ₂₂₆		0.2	0.6	0.2		A ₃₃₄		0.3	0.6	0.2		
	A ₂₂₇		0.2	0.6	0.2		A ₃₃₅			0.7	0.2	0.1	
	A ₂₂₈		0.3	0.6	0.1		A ₃₃₆			0.7	0.2	0.1	
	A ₂₂₉	0.2	0.3	0.5			A ₃₃₇		0.2	0.6	0.1		
	A ₂₂₀	0.2	0.4	0.5			A ₃₃₈		0.3	0.4	0.2		

将表 8 的可信度按式(8)进行递归合成,分别得到子判据层和判据层的可信度分配,如表 9—10 所示.

3.5 基于合成结果决策

对表 10 中三个指标的可信度进行合成,得到深基坑工程施工过程风险评价的风险等级量化值为: $R_b = \{[0.009, 0.018], [0.176, 0.182], [0.284, 0.309], [0.050, 0.054], [0.009, 0.014]\}$, 即该深基坑工程施工过程风险等级为“ H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 ”的可信度区间分别为 $[0.009, 0.018], [0.176, 0.182], [0.284, 0.309], [0.050, 0.054], [0.009, 0.014]$, 根据式(11)—(12)得到这 5 个区间数的排序向量 $\lambda = (1.000, 3.000, 4.000, 2.000, 0.250)$, 则该组区间数基于可能度的排序为 $R_3 > R_2 > R_4 > R_1 > R_5$, 该深基坑工程施工过程综合风险等级为三级.

3.6 综合评价分析

从合成结果来看,该深基坑工程施工过程综合风险水平为三级,说明整体风险可接受,应做好防范、监控措施. 分析表 8—10, 各层风险指标的风险水平主要处于二级或三级, 同时也有较多指标存在一定的四级或五级风险信度区间, 说明虽整体风险水平可接受, 但依然有潜在的较高风险性, 对于这些风险因素需提高警戒、加大防范力度. 此外, 该工程的技术风险控制水平较好, 管理风险则应该加强, 尤其

应注意安全风险和应急风险.

对结果进行具体分析可知, 技术风险的四级风险是由设计风险和地连墙施工工艺的合理性引起的; 管理风险的四级风险是由现场准备中的人员管理、内支撑进度控制、土方开挖质量控制、地连墙质量控制、内支撑质量控制、基底加固质量、降排水质量控制引起的, 而五级风险是由地连墙质量控制引起的; 其他风险的四级风险是由内支撑保护、基坑监测安全监控、地连墙安全监控、内支撑安全监控及应急风险引起的, 而五级风险是由内支撑保护、地连墙应急处理、内支撑应急处理带来的. 因此, 要加强对可能引起四级、五级这些高风险等级因素的具体分析和控制, 采取切实可行的有效措施.

4 结语

正确地识别和评估深基坑工程施工过程的风险将有助于整个工程计划和风险管理, 降低或消除深基坑工程施工环节风险事件发生的概率和损失, 保障工程的顺利进行. 本文在相关研究的基础上, 利用 WBS-RBS 组合矩阵, 初步建立了深基坑工程施工过程风险指标体系. 针对风险评价过程中的模糊性和不确定性, 采用区间数理论确定评价体系各指标的权重值, 利用证据理论方法构建识别框架、确定可信

度函数并进行信息合成. 在最后的案例分析中,应用本文建立的指标体系与评价方法,得到了较为清晰客观的风险评价结果. 以区间形式表达指标权重,并

通过证据理论方法进行风险评估,使风险指标的风险置信区间一目了然. 在逐层合成推进的过程中,不仅得到深基坑工程整体的风险等级水平,还使得在

表 8 指标层可信度区间

Tab.8 Interval distribution of credibility for the indication

子判据层	指标层	$m_{ijk,b}$					$m_{ijk,\varphi}$
		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	
A ₁₁	A ₁₁₁	0	[0.090,0.090]	[0.540,0.540]	[0.270,0.270]	0	[0.100,0.100]
	A ₁₁₂	0	[0.034,0.040]	[0.203,0.240]	[0.101,0.120]	0	[0.601,0.662]
A ₁₂	A ₁₂₁	0	[0.111,0.141]	[0.277,0.351]	[0.166,0.211]	0	[0.297,0.446]
	A ₁₂₂	[0.019,0.024]	[0.096,0.122]	[0.058,0.073]	0	0	[0.781,0.827]
	A ₁₂₃	[0.090,0.090]	[0.630,0.630]	[0.180,0.180]	0	0	[0.100,0.100]
A ₂₁	A ₂₁₁	0	[0.360,0.360]	[0.450,0.450]	[0.090,0.090]	0	[0.100,0.101]
	A ₂₁₂	[0.031,0.038]	[0.092,0.115]	[0.015,0.019]	0	0	[0.828,0.861]
	A ₂₁₃	[0.035,0.044]	[0.212,0.263]	[0.071,0.088]	0	0	[0.606,0.682]
A ₂₂	A ₂₂₁	[0.007,0.008]	[0.029,0.032]	[0.029,0.032]	0	0	[0.928,0.935]
	A ₂₂₂	[0.034,0.041]	[0.102,0.122]	[0.034,0.041]	0	0	[0.796,0.829]
	A ₂₂₃	0	[0.034,0.041]	[0.120,0.143]	[0.017,0.020]	0	[0.796,0.830]
	A ₂₂₄	0	[0.020,0.025]	[0.142,0.143]	[0.020,0.025]	0	[0.776,0.817]
	A ₂₂₅	0	0	[0.492,0.540]	[0.164,0.180]	[0.082,0.090]	[0.190,0.262]
	A ₂₂₆	0	[0.180,0.180]	[0.540,0.540]	[0.180,0.180]	0	[0.100,0.100]
	A ₂₂₇	0	[0.076,0.099]	[0.227,0.297]	[0.076,0.099]	0	[0.504,0.621]
	A ₂₂₈	0	[0.054,0.062]	[0.107,0.124]	[0.018,0.021]	0	[0.794,0.821]
	A ₂₂₉	0	[0.023,0.027]	[0.038,0.044]	0	0	[0.912,0.924]
	A ₂₃₀	[0.015,0.017]	[0.030,0.034]	[0.022,0.026]	0	0	[0.923,0.933]
A ₃₁	A ₃₁₁	0	0	[0.630,0.630]	[0.090,0.090]	[0.090,0.090]	[0.190,0.190]
	A ₃₁₂	0	[0.020,0.023]	[0.118,0.141]	[0.039,0.047]	0	[0.789,0.823]
	A ₃₁₃	0	[0.020,0.021]	[0.059,0.064]	[0.020,0.021]	0	[0.894,0.901]
A ₃₂	A ₃₂₁	[0.007,0.008]	[0.030,0.033]	[0.030,0.033]	0	0	[0.926,0.933]
	A ₃₂₂	0	[0.186,0.241]	[0.139,0.181]	[0.046,0.060]	0	[0.519,0.629]
	A ₃₂₃	0	[0.072,0.102]	[0.095,0.136]	[0.048,0.068]	0	[0.693,0.785]
	A ₃₂₄	0	[0.180,0.180]	[0.450,0.450]	[0.270,0.270]	0	[0.100,0.100]
	A ₃₂₅	0	0	[0.162,0.203]	[0.162,0.203]	[0.040,0.051]	[0.544,0.636]
	A ₃₂₆	0	[0.032,0.045]	[0.095,0.136]	[0.032,0.045]	0	[0.774,0.842]
	A ₃₂₇	[0.016,0.021]	[0.016,0.021]	[0.022,0.027]	0	0	[0.932,0.946]
	A ₃₂₈	[0.009,0.012]	[0.043,0.059]	[0.026,0.036]	0	0	[0.893,0.922]
A ₃₃	A ₃₃₁	0	[0.020,0.027]	[0.050,0.067]	[0.030,0.040]	0	[0.867,0.900]
	A ₃₃₂	0	[0.022,0.025]	[0.027,0.032]	[0.005,0.006]	0	[0.936,0.945]
	A ₃₃₃	[0.036,0.043]	[0.109,0.129]	[0.217,0.259]	0	0	[0.569,0.638]
	A ₃₃₄	0	[0.146,0.176]	[0.292,0.353]	[0.097,0.118]	0	[0.354,0.464]
	A ₃₃₅	0	0	[0.630,0.630]	[0.180,0.180]	[0.090,0.090]	[0.100,0.100]
	A ₃₃₆	0	0	[0.425,0.512]	[0.121,0.146]	[0.061,0.073]	[0.268,0.393]
	A ₃₃₇	0	[0.054,0.066]	[0.163,0.198]	[0.027,0.033]	0	[0.702,0.755]
	A ₃₃₈	0	[0.037,0.052]	[0.049,0.070]	[0.025,0.035]	0	[0.843,0.889]

表 9 子判据层可信度区间

Tab.9 Interval distribution of credibility for the second criterion

子判据层	$m_{ijk,b}$					$m_{ijk,\varphi}$
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	
A ₁₁	0	[0.057,0.061]	[0.313,0.321]	[0.187,0.190]	0	[0.301,0.314]
A ₁₂	[0.048,0.052]	[0.234,0.240]	[0.374,0.382]	[0.051,0.058]	0	[0.331,0.411]
A ₂₁	[0.031,0.042]	[0.211,0.236]	[0.207,0.245]	[0.023,0.028]	0	[0.452,0.538]
A ₂₂	[0.019,0.024]	[0.096,0.122]	[0.358,0.361]	[0.083,0.091]	[0.065,0.082]	[0.521,0.597]
A ₃₁	0	[0.031,0.046]	[0.362,0.431]	[0.078,0.086]	[0.017,0.022]	[0.431,0.587]
A ₃₂	[0.010,0.021]	[0.089,0.104]	[0.278,0.291]	[0.133,0.139]	[0.004,0.011]	[0.564,0.601]
A ₃₃	[0.005,0.013]	[0.092,0.115]	[0.215,0.229]	[0.089,0.120]	[0.034,0.037]	[0.628,0.761]

表10 判据层可信度区间

Tab.10 Interval distribution of credibility for the criterion

判据层	$m_{ijk,b}$					$m_{kj,\varphi}$
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	
A_1	[0.011,0.013]	[0.215,0.223]	[0.307,0.313]	[0.090,0.113]	0	[0.300,0.303]
A_2	[0.021,0.034]	[0.134,0.140]	[0.263,0.280]	[0.041,0.046]	[0.006,0.011]	[0.468,0.472]
A_3	[0.003,0.014]	[0.079,0.083]	[0.312,0.325]	[0.076,0.082]	[0.021,0.035]	[0.597,0.602]

分析风险指标利害程度时能够追根溯源,对症下药,为深基坑工程施工过程风险管理提供了有力依据和保障,说明了本文方法的可行性与实用性。

参考文献:

- [1] 兰守奇,张庆贺.基于证据理论的深基坑施工期风险评估[J].岩土工程学报,2009,31(4):648.
LAN Shouqi, ZHANG Qinhe. Risk assessment of deep excavation during construction based on fuzzy theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 648.
- [2] 黄宏伟,边亦海.深基坑工程施工中的风险管理[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):611.
HUANG Hongwei, BIAN Yihai. Risk management in the construction of deep excavation engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,1(4): 611.
- [3] Matsuo M, Kawamura K. A design method of deep excavation in cohesive soil base on the reliability theory [J]. Soil and Foundations, 1980,20(1):61.
- [4] Chen Z Y, Shao C M. Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,25(4):735.
- [5] 李朝阳,叶聪,沈圆顺.基于模糊综合评判的地铁基坑施工风险评估[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):220.
LI Chaoyang, YE Chong, SHEN Yuanshun. Risk assessment of subway pit construction based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 220.
- [6] 辛欣,万鹏,沈圆顺.土岩组合地质条件下的基坑工程施工风险评估[J].岩土工程学报,2012,34:342.
XIN Xin, WAN Peng, SHEN Yuanshun. Risk assessment of construction of excavations in areas of rock and soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34:342.
- [7] Al-Bahar J F, Crandall K C. Systematic risk management approach for construction projects [J]. Journal of Construction Engineering & Management, 1990,116(3):533.
- [8] Dey P K. Managing project risk using combined analytic hierarchy process and risk map [J]. Applied Soft Computing, 2010,10(4):990.
- [9] Nieto-Morote A, Ruz-Vila F. A fuzzy approach to construction project risk assessment [J]. International Journal of Project Management, 2011,29(2):220.
- [10] Zeng Jiahao, An Min, Smith N J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment [J]. International Journal of Project Management, 2007,25(6):589.
- [11] 杜修力,张雪峰,张明聚,等.基于证据理论的深基坑工程施工风险综合评价[J].岩土工程学报,2014,36(1):155.
DU Xiuli, ZHANG Xuefeng, ZHANG Mingju, et al. Risk synthetic assessment for deep pit construction based on evidence theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 155.
- [12] 程鸿群,余红伟,叶子苑.项目组合管理能力评价[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(1):148.
CHEN Hongqun, YU Hongwei, YE Ziyuan. Assessment of project portfolio management ability [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(1):148.
- [13] 中华人民共和国建设部.地铁及地下工程建设风险管理指南[M].北京:中国建筑出版社,2007.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. The subway and underground engineering construction risk management guidelines [M]. Beijing: China building Press, 2007.
- [14] 魏毅强,刘进生,王绪柱.不确定型AHP中判断矩阵的一致性概念及权重[J].系统工程理论与实践,1994,4:16.
WEI Yiqiang, LIU Jingsheng, WANG Xuzhu. Concept of consistence and weights of the judgment matrix in the uncertain type of AHP [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1994, 4:16.
- [15] 乐琦,樊治平.区间数互反判断矩阵的一致性分析及排序方法[J].系统工程学报,2010,25(4):459.
YUE Qi, FAN Zhiping. Consistency analysis and ranking method for interval reciprocal judgment matrices [J]. Journal of System Engineering, 2010,25(4):459.
- [16] 杨春,李怀祖.一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J].系统工程理论与实践,2001,4:43.
YANG Chun, LI Huaizu. An evidence reasoning model with its application to experts opinions combination [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2001, 4:43.
- [17] 李德清,谷云东.一种基于可能度的区间数排序方法[J].系统工程学报,2008,23(2):243.
LI Deqing, GU Yundong. Method of ranking interval numbers based on possibility degree [J]. Journal of System Engineering, 2008, 23(2):243.