

基于物元可拓模型的沉井下沉风险评价

刘 坤¹, 查晓庭², 刘钦波²

(1. 江苏中源工程管理股份有限公司, 江苏 南京 211500; 2. 江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要: 水利综合枢纽的建设过程中, 为了穿越河流、确保河道通畅, 采常用地下沉井施工, 然而开挖沉井施工复杂, 技术含量高, 危险性大, 对周边环境扰动大, 因而存在很大风险, 因此, 有必要对影响沉井的风险因素进行识别、评价。先构建沉井风险指标, 利用层次分析方法, 对影响沉井下陷风险因素赋予权重, 再运用物元可拓法定出该施工风险总体等级。结果表明, 该法对沉井下陷施工顺利进行能提供良好的技术指导。

关键词: 层次分析法; 物元可拓; 沉井风险评价

中图分类号: TV861 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2024)11-0012-0004

Risk assessment of caisson sinking based on matter element extension model

LIU Kun¹, CHA Xiaoting², LIU Qinbo²

(1. Jiangsu Zhongyuan Engineering Management Co., Ltd., Nanjing 211500, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: During the construction of comprehensive water conservancy hubs, underground caisson construction is often used to cross rivers and ensure smooth river channels. However, the excavation of caissons is complex, highly technical, dangerous, and highly disruptive to the surrounding environment, there are great risks. Therefore, it is necessary to identify and evaluate the risk factors that affect caissons. Firstly, establish a risk index for caissons, use the analytic hierarchy process to assign weights to factors that affect the risk of caissons, and then use the matter element extension method to determine the overall level of construction risk. The results indicate that this method can provide good technical guidance for the smooth progress of caisson construction.

Key words: analytic hierarchy process; matter element extension; risk assessment of caisson

水利枢纽承载着水流量调节、防洪、灌溉等重要任务, 是十四五规划中的关键建设内容。在水利综合枢纽的建设过程中, 为了穿越河流、确保通行顺畅并减少对周边建筑的影响, 沉井技术常被采用。武南河立交枢纽工程选址位于太湖之滨, 土壤偏软土地基, 气象多雨, 雨期偏长, 沉井基坑容易积水, 且临近桥梁、学校, 易对周边扰动, 环境复杂, 在挖土下沉过程中, 如果风险得不到控制, 将会对周

边重要设施产生严重影响。为了使得沉井施工风险得到有效的预估、评价、控制。多维度层次分析作为一种重要的风险评估和管理方法, 在风险评估领域得到了广泛的应用和认可。为此, 有诸多学者利用综合评价来评价地下建筑风险, 如 Guo 等^[1]提出了一种融合建筑信息模型(BIM)和 Dempster(D-S)证据理论的混合方法, 以支持地下建筑系统风险评估和可视化。Potapova 等^[2]提出了一种基于专家统

收稿日期: 2024-07-04

作者简介: 刘坤(1993—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程施工监理工作。E-mail: 757698107@qq.com

计方法的土质风险评估方法,并对该方法的各个组成部分进行了理论概括。李立云等^[3]采用改进层次分析结合灰色关联分析方法对地下建筑进行了风险评价。本文以武南河立交枢纽沉井为例,将影响沉井的风险因素构建评价指标体系,采用层次分析法(AHP)^[4]对沉井坑风险各个指标赋权。运用物元可拓法,对该沉井做出风险评价,为后续的施工提供一些参考。

1 指标建立

指标体系建立应秉承既要逻辑、客观性又要具有指导、整体性。本文采取咨询相关专家及查阅文献确定将沉井监测数据作为风险判别指标,将风险等级划为低风险、中风险、高风险3个类别。从沉井位移、围封桩沉降(下称周边沉降)、地下水位3个大方面,建立了指标体系。根据因素之间的隶属关系,运用层次分析法将沉井风险评价结构划分为A类、B类、C类^[5]。风险指标层次由内到外如图1所示。

对于沉井位移的水平、垂直累积值及周边沉降



图1 沉井风险指标层次

累积值以(实测值/开挖深度)作为指标,地下水位、沉降的水平变化率、沉降变化率以(实测值/警戒值)作为指标。并查阅相关文献^[6]及专家意见得出相关指标数据标准见表1。

表1 沉井风险各级指标判别值

B指标	C指标	内容	低风险/mm	中风险/mm	高风险/mm
沉井位移 B1	位移水平累积值 C1	实测值/开挖深度	0~0.2	0.2~0.7	0.7~2.0
	位移水平变化率 C2	实测值/警戒值(3 mm)	0~0.3	0.3~0.9	0.9~1.0
	位移垂直累积值 C3	实测值/开挖深度	0~0.2	0.2~0.7	0.7~2.0
周边沉降 B2	周边沉降累积值 C4	实测值/开挖深度	0~0.2	0.2~0.7	0.7~2.0
	周边沉降变化率 C5	实测值/警戒值(3 mm)	0~0.3	0.3~0.9	0.9~1.0
地下水位 B3	地下水位累积值 C6	实测值/警戒值(1 m)	0~0.3	0.3~0.9	0.9~1.0
	地下水位变化率 C7	实测值/警戒值(0.5 m)	0~0.3	0.3~0.9	0.9~1.0

2 权重确定

在利用层次分析法确定沉井指标权重时,主要采用专家打分法,根据各位专家对各指标在评价沉井风险中重要程度的认知,对每个指标因素进行打分。打分根据相互的对比重要程度,采取1~9度打分确定评价系数。先对沉井位移、周边沉降、地下水位,三类B级指标两两比较,再对B类下的C类指标两两比较,最后归一。需要注意的是,互为相反的重要关系用倒数关系处之,2、4、6、8则表明处于其中间值,由此可得判断矩阵。对于判断矩阵为了保证其不矛盾,引入了一致性检验来保证这种情况不会发生。通过查阅工具书,得出一致性检验公式为

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵最大特征根; n 为矩阵的阶数; C_1 为一致度值。

当矩阵具有完全一致性,即完全不矛盾时, $C_1=0$ 。 C_1 越大,矩阵可能出现矛盾了,需要重新打分。 C_1 越小即越接近于0时,一致性好。为了实际需要,通常引入满意一致度或者叫一致度比例 C_R :

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (2)$$

式中, R_1 为平均随机一致性,当 $C_R < 0.1$ 时,一致检验通过,此判断矩阵合理。

沉井风险判断矩阵、沉井风险判断矩阵、周边沉降判断矩阵、地下水位判断矩阵见表2~5。

对判断矩阵计算的权重结合层次图进行集体综合,最终综合计算结果如图2所示。

3 沉井风险的物元可拓评价

3.1 构建模型

先构建经典域,即已经确定风险评价范围的

表2 沉井风险判断矩阵

沉井风险评价A	沉井位移B1	周边沉降B2	地下水位B3	W_i
沉井位移B1	1	2	3	0.5396
周边沉降B2	1/2	1	2	0.2970
地下水位B3	1/3	1/2	1	0.1634

注:一致性比例:0.0088<0.1,一致性检验通过, λ_{\max} :3.0092。

表3 沉井风险判断矩阵

沉井位移B1	水平累计值C1	水平变化率C2	垂直累计值C3	W_i
水平累计值C1	1	1/2	3	0.3196
水平变化率C2	2	1	4	0.5584
垂直累计值C3	1/3	1/4	1	0.1220

注:一致性比例:0.0176<0.1,一致性检验通过, λ_{\max} :3.0183。

表4 周边沉降判断矩阵

周边沉降B2	累计值C4	变化率C5	W_i
累计值C4	1	1/2	0.3333
变化率C5	2	1	0.6667

注:一致性比例:0.0000<0.1,一致性检验通过, λ_{\max} :2.0000。

表5 地下水位判断矩阵

地下水位B3	累计值C6	变化率C7	W_i
累计值C6	1	1/2	0.3333
变化率C7	2	1	0.6667

注:一致性比例:0.0000<0.1,一致性检验通过, λ_{\max} :2.0000。

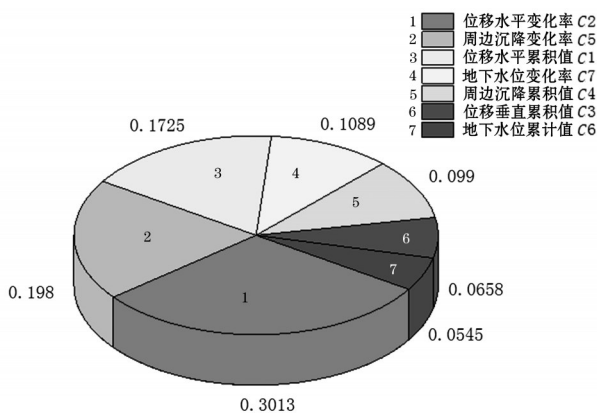


图2 AHP计算的权重结果

域。本文为高风险、中风险、低风险。假定它有 m 个评价指标,分别对应 C_1, C_2, \dots, C_m ,每个指标分为 n 级,即 C_i 对应 $V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}^{[7]}$ 。其经典域物元 $R(N_n, C_m, V_{mn})$ 可以如下式所表示:

$$R = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \cdots & n_n \\ c_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ c_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_m & v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

节域为需评价风险等级区间的指标范围,即标准事物经典域的全体构成节域。根据本项目评价风险对象的特点,理论值可以取0至正无穷,但由于超过一定值,沉井已经破坏。综合考虑取节域范围为(0,2)。

建立待评物元矩阵,待评物元矩阵 RP 是待评价的风险对象 P 的指标 c 及其数据 v 组成,形式如下式所示:

$$RP = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

结合武南河立交枢纽沉井工程实际情况专家给出的表1中评判标准,确定了该立交枢纽沉井风险评价指标经典域。应用物元可拓评价方法对沉井风险进行评价时,先对沉井相关数据进行监测,监测数据值在下式中,以此构成待评价物元模型。待评价模型列如下:

$$RP = \begin{bmatrix} N \\ c_1 & 0.05 \\ c_2 & 0.50 \\ c_3 & 0.40 \\ c_4 & 0.50 \\ c_5 & 0.20 \\ c_6 & 0.30 \\ c_7 & 0.70 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 建立关联度函数

关联函数 k 是一个事物关联或者叫相似另一种事物的程度^[8],在此沉井评价中,即评估风险对象与评估风险等级的贴近程度,用以评价风险的不同等级。关联函数 K 的一般表达式为

$$K = \begin{cases} -p(v_i, v_{ij}) \\ p(v_i, v_{ij}) \\ D(v_i, v_{ij}, v_{pi}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: K 为测量风险指标值 v_i 相对于风险经典域 v_{ij} 的相似程度; $p(v_i, v_{ij})$ 为指标值与在 (a, b) 区间经典域 v_{ji} 的可拓距离,即,

$$p(v_i, v_{ij}) = \begin{cases} a_{ji} - v_i & v_i < a_{ji} \\ v_i - b_{ji} & v_i > a_{ji} \end{cases} \quad (7)$$

$D(v_i, v_{ij}, v_{pi})$ 表示指标值 v_i 经典域和节域区间套的

位置关系,即,

$$D(v_i, v_{ij}, v_{ip}) = p(v_i, v_{pi}) - p(v_i, v_{ij}) \quad (8)$$

评估对象关于风险等级的关联度表示为 $K_{j\text{总}}$, 计算方法为

$$K_{j\text{总}} = \sum_{i=1}^n w_i \times k_j(v_i) \quad (9)$$

式中, w_i 是指标 C_i 的权重系数, 取 $K_{j\text{总}} = \max(K_{j\text{总}})$, 可以得到评估对象的等级。

3.3 风险等级权重表

计算各指标的关联系数, 并和权重列在一起, 可以得到风险等级权重, 见表6。

3.4 确定风险等级

表6 风险等级权重

指标	低风险	中风险	高风险	权重
C1	0.2500	-0.7500	-0.9286	0.1725
C2	-0.2857	0.3333	-0.4444	0.3013
C3	-0.3333	0.4000	-0.4286	0.0658
C4	-0.3750	0.4000	-0.2857	0.0990
C5	0.3333	-0.3333	-0.7778	0.1980
C6	0.0000	0.0000	-0.6667	0.0545
C7	-0.3636	0.3333	-0.2222	0.1089

利用式(6)计算得到沉井风险指标和各经典域的关联度如表6左边4列所示, 将表6左边4列数据和右边权重代入式(9)得到沉井指标风险同各等级的关联度为:

$$K_{\text{低总}} = \sum_{i=1}^7 w_i \times k_1(v_i) = -0.0756 \quad (10)$$

$$K_{\text{中总}} = \sum_{i=1}^7 w_i \times k_2(v_i) = -0.0073 \quad (11)$$

$$K_{\text{高总}} = \sum_{i=1}^7 w_i \times k_3(v_i) = -0.5651 \quad (12)$$

$$\max(K_{j\text{总}}) = K_{\text{中总}} = 0.0073 \quad (13)$$

因此得到该沉井目前的风险等级为“中风险”, 需要引起注意了。引起风险的主要因素为沉井的水平位移累计值、沉井垂直沉降位移、周边地表沉降过大。其中沉井的水平位移累计值权重占比大, 需要重点处理加固。通过处理这些因素, 可以把沉井风险从中降至低, 进而可以进一步施工。

4 结 语

本文是以物元可拓模型为基础的立交枢纽沉

井风险评估模型, 该模型的特点是组织专家讨论, 构建沉井分级风险评估体系, 采用层次分析法比较设计指标的重要性。查阅文献及专家讨论构建风险等级范围, 通过实地测量相关数据得到待评价模型, 最后用可拓法评价风险等级, 保证了评估结果具有一定的客观性和精确性^[9]。实例表明, 本文建立的评价模型能够有效地度量基底工程风险。用可拓方法分析风险指数与各风险等级区间的关系, 可以看到基底的整体风险状况, 有助于有效把握和加强关键环节, 有效指导后续的风控工作。保证工程目标, 实现了沉井风险管理和科学决策。

参考文献:

- [1] GUO K, ZHANG L M. Multi-source information fusion for safety risk assessment in underground tunnels[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 227: 107210.
- [2] POTAPOVA E V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 962(4): 42-52.
- [3] 李立云, 刘政, 王兆辉. 基于灰色关联模型的改进型层次分析法与基坑风险评价[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(6): 889-896.
- [4] Science and Technology; University of Rio de Janeiro Researchers Describe Recent Advances in Science and Technology. Data and calculation approach of the fuzzy AHP risk assessment of a large hydroelectric project[J]. Science Letter, 2019, 25: 104294.
- [5] LIU Q L, DOU F F, MENG X F. Building risk precontrol management systems for safety in China's underground coal mines[J]. Resources Policy, 2020, 74: 101631.
- [6] 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.
- [7] HUAN J H, MA D H, WANG W, et al. Safetystate evaluation model based on structural entropy weightmatter element extension method for ancient timber architecture[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(6): 1087-1097.
- [8] 柳博洋, 胡明月. 基于物元可拓模型的建筑安全管理评价[J]. 江西建材, 2024(3): 271-273, 276.
- [9] 何玉钧, 刘毅, 周生平. 基于物元可拓模型的电力通信网风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 64-69.