

悬臂支护基坑失稳风险的改进风险矩阵分析方法

曹文贵¹, 翟友成¹, 张永杰²

(1. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076)

摘要: 基坑失稳风险评价是基坑设计和安全施工的重要环节。首先在深入研究悬臂支护基坑失稳风险事件及其风险因素基础上, 建立出综合考虑风险概率和风险后果影响的基坑失稳风险综合分析模型; 然后, 考虑基坑失稳力学机理及基坑土体物理力学参数的不确定性的区间性特征, 引入非概率可靠性分析方法, 建立出基坑风险概率的确定方法; 同时, 引入信息熵理论, 建立出可反映专家评价水平的风险后果评价方法, 进而建立出悬臂支护结构基坑失稳风险的改进风险矩阵分析方法; 最后, 通过工程实例分析表明了方法的合理性与可行性。

关键词: 基坑工程; 风险概率; 风险后果; 风险矩阵; 信息熵; 非概率可靠性分析

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)02-0210-07

作者简介: 曹文贵(1963-), 男, 湖南南县人, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与研究工作。
E-mail: cwglp@21cn.com。

Improved risk matrix method of instability risk for excavations with cantilever retaining

CAO Wen-gui¹, ZHAI You-cheng¹, ZHANG Yong-jie²

(1. Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Instability risk assessment is an important link of design and safe construction of excavations. Firstly, based on a comprehensive analysis of risk events and their risk factors for excavations with cantilever retaining, a comprehensive analysis model of instability risk for excavation engineering is formulated considering the risk probability and risk consequence. Secondly, considering the mechanical mechanism of instability of excavations and the interval uncertainty feature of physical and mechanical parameters of soil, a method to determine the risk probability of foundation instability is presented by introducing the non-probabilistic reliability analysis. Thirdly, based on the information entropy theory, the evaluation method for the risk consequence is formulated, which can reflect the experts' evaluation level. And the improved risk matrix method of instability risk for excavations with cantilever retaining is developed. Finally, the method is used to analyze the practical engineering, and it is shown that the proposed method is feasible and reasonable.

Key words: excavation engineering; risk probability; risk consequence; risk matrix; information entropy; non-probabilistic reliability analysis

0 引言

由于基坑往往在建筑物密集的场地施工, 施工场地小, 施工条件差, 而且, 基坑多为临时性支护结构, 安全储备相对较小, 导致基坑工程设计和施工存在较大风险, 基坑工程设计和施工的风险评价成为确保基坑安全建设的重要环节, 开展基坑工程风险评价方法研究具有重要的理论与工程实际意义, 这正是本文研究的出发点。

基坑工程风险评价的目的在于确定风险的大小即风险水平, 目前确定基坑工程风险水平主要存在两种基本途径: ①考虑风险事件发生的潜在可能性, 利用

风险事件发生概率确定风险水平。如仲景冰等^[1]建立了工程失败路径及风险源因素的故障树分析方法; 边亦海等^[2]则结合模糊理论和故障树分析方法建立了SMW工法支护结构的失效概率分析方法。显然, 由此类基坑工程风险评价方法确定出的风险发生概率虽然在一定程度上可反映工程风险水平的高低, 但是存在明显的缺陷, 因为基坑风险水平不仅要反映风险事

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078137); 高等学校博士学科点专项科研基金(20090161110005); 湖南省自然科学基金项目(08JJ3115)

收稿日期: 2011-01-11

件发生可能性, 还要反映风险事件发生后可能造成不利后果的影响, 风险事件发生后引起的不利后果对确定基坑工程风险水平的影响是不可忽略的。②基于上述风险评价的局限性, 综合考虑风险概率和风险后果的基坑风险水平评价方法。如何锡兴等^[3]采用模糊综合评判法, 黄宏伟等^[4]、边亦海等^[5]利用风险概率与风险后果的组合标准分别建立出了基于风险概率与风险后果的综合风险水平的确定方法, 该方法较全面地反映了基坑工程的风险大小和水平, 是具有发展前景的基坑工程风险水平评价方法, 这也正是本文采用的基本研究思路。

虽然上述第二类风险分析方法综合考虑了风险概率和风险后果对基坑风险水平的影响, 但其仍存在如下不足与局限性: ①现有研究主要采用专家打分方法计算风险事件发生概率, 这在风险因素影响路径模糊、设计施工依赖工程经验时是行之有效的, 但该方法缺少客观的力学分析, 无法体现各风险因素综合作用和相互影响的特点, 因此, 当风险因素作用机理明确, 具有合理的力学计算模型时, 基于力学分析来确定风险概率将更具客观性和可操作性。②由于风险后果种类繁多, 严重性也有很大差异, 且具有很大的不确定性, 虽然采用专家打分法描述风险后果对风险水平的影响是现阶段最常用的方法, 然而, 不同专家的工程经验、熟悉的领域以及掌握的工程信息不同, 使得专家们的决策水平即不同专家给出的评价结果的可信度并不相同, 现有研究尚未能较好的反映这一问题, 因此, 有必要对风险概率和风险后果提出新的计算方法, 并将其应用于悬臂支护结构下基坑失稳风险分析, 这正是本文研究的核心内容。

为此, 本文在深入研究悬臂支护结构下的基坑失稳风险综合分析模型基础上, 针对基坑稳定性分析, 基于基坑土体工程地质参数的区间不确定性, 引入非概率可靠性分析方法, 对基坑失稳风险概率计算方法进行探讨, 并采用信息熵理论对现有基坑风险后果的专家调查法进行改进, 使风险后果分析体现专家们的决策水平, 从而建立出综合考虑风险概率和风险后果的基坑风险的改进风险矩阵分析方法, 以期使基坑失稳风险分析更具合理性和可操作性。

1 改进风险矩阵法

本文拟将建立的基坑失稳风险的改进风险矩阵分析方法主要包括3个方面的内容, 即基坑失稳风险综合分析模型、基于区间数学理论与非概率可靠性分析的风险概率分析方法以及基于信息熵理论的风险后果专家调查分析方法, 下面将作详细介绍。

1.1 基坑失稳风险综合分析模型

对悬臂支护结构下基坑失稳风险进行分析, 首先必须进行风险识别, 即对基坑失稳可能出现的风险事件及其风险因素、风险事件发生后可能造成的风险后果加以识别。风险产生的根源就在于风险因素的不确定性, 而那些确定或可忽略其不确定性的基坑稳定性影响因素, 并不属于风险因素, 另外, 由于业主、监理单位和施工单位管理不善、施工失误造成的风险难以客观把握, 其评价结果也往往因人而异, 故本文不予考虑, 而主要考虑岩土体物理力学参数的不确定性造成的基坑失稳风险, 为此, 本文在分析并总结现有研究成果^[1,2,6]基础上, 把基坑失稳风险分解成如图1所示的5个风险事件及其主要风险因素。

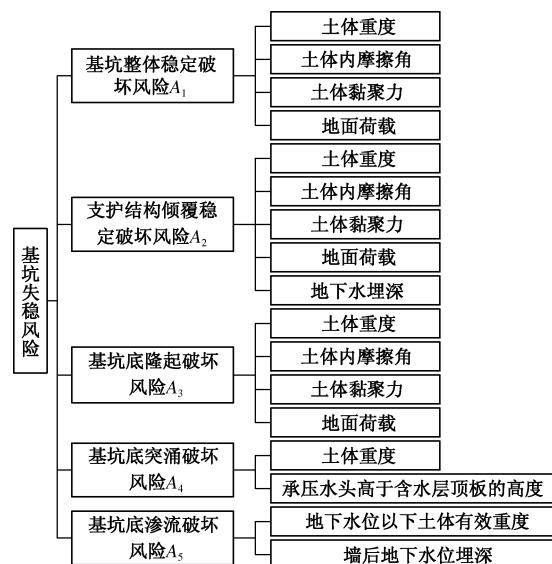


图1 基坑失稳风险事件及风险因素

Fig. 1 Risk events and risk factors for instability of excavations

基坑失稳风险评价的关键之一是基坑失稳风险综合分析模型的建立, 该模型应能综合考虑风险概率和风险后果的影响。考虑到目前风险矩阵法已建立了基于风险概率和风险后果的风险水平评价标准, 也是国际隧协^[7]推荐的方法, 为此, 综合考虑各风险事件对悬臂支护结构基坑失稳总体风险水平的影响, 建立出基坑失稳风险综合分析模型为

$$R = \sum_{i=1}^5 w_i R_i = \sum_{i=1}^5 w_i (p_i \cdot C_i) \quad , \quad (1)$$

式中, R 为基坑失稳总体风险水平, $w_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 分别为5个风险事件 (A_1, A_2, \dots, A_5) 的权重, p_i 为第 i 个风险事件的风险概率, C_i 为第 i 个风险事件发生后产生的风险后果, $R_i = p_i \cdot C_i$ 为风险事件 A_i 综合考虑风险概率和风险后果时的风险水平。

5个风险事件的权重 w_i 采用应用广泛的层次分析法^[8]确定, 即首先基于1~9比例标度将各风险事件两两比较构造判断矩阵 \tilde{A} 如表1所示, 然后由和法计算

公式^[8]得各风险事件的权重 w_i ，风险事件为 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 ，权重值 w_i 为 0.26, 0.41, 0.10, 0.07, 0.16。

表 1 判断矩阵 \tilde{A} Table 1 Comparison matrix \tilde{A}

风险事件	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_1	1	1/2	3	4	2
A_2	2	1	4	5	3
A_3	1/3	1/4	1	2	1/2
A_4	1/4	1/5	1/2	1	1/3
A_5	1/2	1/3	2	3	1

显然，采用式(1)对基坑失稳风险进行评价，尚需建立合理的风险水平分级标准及其相应的接受准则，为此，本文根据现有研究成果^[5, 9]首先建立风险概率一级，事故描述为不可能，评分中值为 1；二级，事故描述为很少发生，评分中值为 2；三级，事故描述为偶尔发生，评分中值为 3，四级，事故描述为可能发生，评分中值为 4，五级，事故描述为频繁发生，评分中值为 5。风险后果分级标准：一级，事故描述为可忽略的，评分中值为 1，二级，事故描述为需考虑的，评分中值为 2，三级，事故描述为严重的，评分中值为 3，四级，事故描述为很严重的，评分中值为 4，五级，事故描述为灾难性的，评分中值为 5。然后根据风险概率和风险后果建立风险事件的风险水平组合标准，具体按表 2^[4]所示的风险矩阵进行操作，表 2 第 i 行第 j 列处的元素 b_{ij} 表示当某风险事件的风险概率评分值为 a 、风险后果评分值为 b 时该风险事件的风险水平，且 $b_{ij} = a \times b$ 。在得到风险事件的风险水平之后，为更好的进行风险决策和风险管理，建立风险水平的分级标准以及相应的接受准则如表 3^[10]所示。

表 2 风险矩阵

Table 2 Risk matrix

风险概率 p	可忽略的	需考虑的	严重的	很严重的	灾难性的
不可能	1	2	3	4	5
很少发生	2	4	6	8	10
偶尔发生	3	6	9	12	15
可能发生	4	8	12	16	20
频繁	5	10	15	20	25

需要注意的是式(1)中的风险概率 p_i 并非概率形式表示的值，而与 C_i 一样，是与等级相对应的评分值，其取值区间为 [1, 5]。

由上述分析模型的建立过程可知，风险矩阵法的主要特点就是建立了如式(1)和表 2 所示的风险水平确定方法，其操作简单明确，然而采用风险矩阵法进行基坑失稳风险评价，尚需建立风险概率 p_i 和风险后

果 C_i 的计算方法，将在下面进行介绍。

表 3 风险级别及决策

Table 3 Risk classifications and decisions

风险级别	风险水平 R	风险决策准则
一级（低度）	1~4	风险可忽略，不需采取风险处理措施和监测
二级（中度）	5~9	风险可接受，需予以监测，可能要采取预防措施
三级（高度）	10~15	风险处于不期望状态，必须采取风险处理措施降低风险并加强监测
四级（极高）	16~25	风险不可接受，需高度重视并规避，否则要不惜代价将风险至少降低至不期望的程度

1.2 基坑失稳风险概率计算方法

目前可靠性分析方法主要有两种^[11]：①考虑参数变异性的纯概率统计方法；②考虑参数界限模糊性的模糊统计方法。这两种方法在构建参数概率密度函数或隶属函数时需要大量的样本数据，但是，由于工程地质环境、试验条件以及勘探成本等诸多因素的制约，往往不能获得大量相关数据，因此，当数据缺乏时只得主观假设其分布形态，然而基于概率的可靠性分析方法对参数很敏感，概率数据的小误差可导致可靠性计算结果出现较大的误差^[12]，因此，本文采用非概率可靠性分析方法^[13-14]确定风险概率 p_i ，它只需知道不确定参量变化区间，而不要求其具体分布形式，因而降低了数据信息量的要求。

本文将在建立各风险事件极限状态方程的基础上，引入非概率可靠性分析方法计算出非概率可靠性指标，进而通过建立非概率可靠性指标与风险概率之间的转化关系来确定风险概率 p_i ，其具体步骤如下：

(1) 建立各风险事件的极限状态方程。根据文献[11]的分析，本文取其一般表达式为

$$M = g(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m) = \tilde{R} - \tilde{S} \quad , \quad (2)$$

式中， $g(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)$ 为风险因素 \tilde{x}_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的连续函数， \tilde{R} 为基坑支护结构的抗力， \tilde{S} 为作用在支护结构上的荷载效应。需要注意的是， \tilde{x}_i 是在区间 $[x_i^l, x_i^u]$ 内变化的区间变量， \tilde{R} 和 \tilde{S} 亦为区间变量。

对于不同风险事件，功能函数的具体形式是不同的，下面分别就本文前述悬臂支护结构基坑的 5 个风险事件建立相应的功能函数。

a) 整体稳定破坏风险 A_1

采用瑞典条分法^[15]得其功能函数为

$$M_1 = \sum_{i=1}^n \tilde{c}_i L_i + \sum_{i=1}^n (\tilde{q} b_i + \tilde{W}_i) \cos \theta_i \tan \tilde{\varphi}_i - \sum_{i=1}^n (\tilde{q} b_i + \tilde{W}_i) \sin \theta_i \quad , \quad (3)$$

式中， \tilde{c}_i 为第 i 个土条底面上的黏聚力， L_i 为第 i 个土条底面面积， \tilde{q} 为地面均布荷载， b_i 为处于地面荷载范围内第 i 个土条顶面面积， \tilde{W}_i 为第 i 个土条重力，其区间变化由土体重度 $\tilde{\gamma}$ 决定， θ_i 为第 i 个土条底面倾角， $\tilde{\varphi}_i$ 为第 i 个土条底面上的内摩擦角。

b) 支护结构踢脚稳定破坏风险 A_2

$$M_2 = \sum_{i=1}^n \tilde{E}_{pi} h_i - \sum_{j=1}^n \tilde{E}_{aj} h_j \quad . \quad (4)$$

式中 \tilde{E}_{pi} 为基坑内侧第 i 层土的被动土压力; h_i 为第 i 层土的被动土压力作用点距转点的垂直距离, 对于无内支撑或锚杆的悬臂支护结构, 转点取在支护桩桩底处; \tilde{E}_{aj} 为基坑外侧第 j 层土的主动土压力; h_j 为第 j 层土的主动土压力作用点距转点的垂直距离, 转点的取法同 h_i 。显然, 被动土压力 \tilde{E}_{pi} 和主动土压力 \tilde{E}_{aj} 都为各层土体的重度 $\tilde{\gamma}$ 、内摩擦角 $\tilde{\phi}_i$ 、黏聚力 \tilde{c}_i 以及地面均布荷载 \tilde{q} 的函数, 其计算方法见文献[6]。

c) 基坑底隆起破坏风险 A_3

本文采用太沙基法^[6, 15]得其功能函数为

$$M_3 = \tilde{N}_q \sum_{i=1}^m \tilde{\gamma}_{li} h_{li} + \tilde{c} \tilde{N}_c - \sum_{i=1}^n \tilde{\gamma}_{2i} h_{2i} - \tilde{q} \quad , \quad (5)$$

$$\tilde{N}_q = \tan^2(45^\circ + \tilde{\phi}/2) e^{\pi \tan \tilde{\phi}} \quad , \quad (6)$$

$$\tilde{N}_c = (\tilde{N}_q - 1) / \tan \tilde{\phi} \quad , \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m h_{li} = D \quad , \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n h_{2i} = D + H \quad , \quad (9)$$

式中, $\tilde{\gamma}_{li}$ 为基坑内侧第 i 层土体 (厚 h_{li}) 的重度, $\tilde{\gamma}_{2i}$ 为基坑外侧第 i 层土体 (厚 h_{2i}) 的重度, D 为支护桩的嵌固深度, H 为基坑开挖深度, \tilde{c} 为支护桩底处土体的黏聚力, $\tilde{\phi}$ 为支护桩底处土体的内摩擦角。

d) 基坑底土突涌破坏风险 A_4

由压力平衡^[6]得

$$M_4 = \sum_{i=1}^k \tilde{\gamma}_i t_i - \gamma_w \tilde{H}_w \quad , \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^k t_i = t \quad , \quad (11)$$

式中, $\tilde{\gamma}_i$ 为不透水层第 i 层土体 (厚 t_i) 的重度, t 为基坑开挖后不透水层总厚度, γ_w 为水的重度, \tilde{H}_w 为承压水头高于含水层顶板的高度。

e) 基坑底渗流破坏风险 A_5

由渗流力特点^[15]得

$$M_5 = \sum_{i=1}^m \tilde{\gamma}'_{3i} h_{3i} + 2 \sum_{i=1}^n \tilde{\gamma}'_{4i} h_{4i} - (H - \tilde{h}_w) \gamma_w \quad , \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n h_{3i} = H - \tilde{h}_w \quad , \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n h_{4i} = D \quad , \quad (14)$$

式中, $\tilde{\gamma}'_{3i}$ 为基坑外侧开挖深度范围内 (离地表 \tilde{h}_w 范围内土体除外) 第 i 层土体 (厚 h_{3i}) 有效重度, $\tilde{\gamma}'_{4i}$ 为支护结构嵌固深度范围内第 i 层土体 (厚 h_{4i}) 有效重度, \tilde{h}_w 为支护结构外侧地下水位埋深, 其它符号同前。

(2) 确定风险因素 \tilde{x}_i 的区间值 $[x_i^l, x_i^u]$ 。文献[11]提出了一种基于概率统计理论的区间变量取法, 其可靠性较好, 笔者建议试验或勘察数据足够多时可优先采用该方法, 但是, 由于工程地质条件的复杂性和试验成本的制约, 获得的数据往往较少, 此时建议采用文献[16]的区间估计法计算风险因素区间值。

(3) 引入非概率可靠性方法计算非概率可靠性指标。为此首先介绍区间变量的几个相关概念^[13], 若不确定参数 \tilde{p} 在区间 $[P^l, P^u]$ 内变化, 其上、下界分别为 P^u , P^l , 则 $\tilde{p} \in P^l = [P^l, P^u]$ 称为区间变量, 令

$$P^c = (P^u + P^l)/2 \quad , \quad (15)$$

$$P^r = (P^u - P^l)/2 \quad . \quad (16)$$

则 P^c 称为 P^l 或 \tilde{p} 的均值, P^r 称为 P^l 或 \tilde{p} 的离差。由式(2)可知, 当各风险因素 \tilde{x}_i ($i=1, 2, \dots, m$) 采用区间变量输入后, 输出结果 M 也是一个区间变量。设其均值和离差分别为 M^c 和 M^r , 则非概率可靠性指标 η 可定义为^[13]

$$\eta = M^c / M^r \quad , \quad (17)$$

式中, M^c 和 M^r 在不同的情况下可采用不同的求解方法, 这在文献[14]中有详细的介绍。

(4) 根据非概率可靠性指标确定风险概率。由可靠性理论^[13]可知, 超曲面 $M = 0$ 称为失效面。若式(17)中的 $\eta > 1$, 则对 $\forall \tilde{x}_i \in X_i^l$ ($i=1, 2, \dots, m$), 均有 $M > 0$, 此时风险事件必然不会发生; 若 $\eta < -1$, 则对 $\forall \tilde{x}_i \in X_i^l$, 均有 $M < 0$, 风险事件必然发生; 而当 $-1 \leq \eta \leq 1$ 时, 对 $\tilde{x}_i \in X_i^l$, $M < 0$ 和 $M > 0$ 均有可能, 即风险事件可能发生, 也可能不发生, 且当 $\eta \rightarrow -1$ 时风险事件发生的可能性就越大, 反之发生的可能性就越小。因此, η 能够反映风险事件发生可能性的大小, 用 η 来度量风险概率 p 是合理可行的。非概率可靠性指标存在 $\eta = 1$ 和 $\eta = -1$ 两个特殊点, 本文以此为划分依据, 当 $\eta > 1$ 时取风险概率等级为最有利等级, 即为一级, 当 $\eta < -1$ 时将风险概率等级取为最不利等级, 即为五级, 而当 $-1 \leq \eta \leq 1$ 时, 将其区间 $(1, -1)$ 等分为 $(1, 1/3)$, $(1/3, -1/3)$ 和 $(-1/3, -1)$ 3 个小区间, 并分别取其对应的风险概率等级为二级、三级和四级, 为与表 3 中风险概率等级评分值相对应, 取上述 3 个小区间的区间中值为各风险等级的评分中值, 其它值则采用线性插值计算风险概率评分值 p ,

$$p = \begin{cases} 1 & (\eta \geq 1) \\ 4 - 3\eta & (1 > \eta \geq 2/3) \\ 3 - 3\eta/2 & (2/3 > \eta \geq -2/3) \\ 2 - 3\eta & (-2/3 > \eta > -1) \\ 5 & (\eta \leq -1) \end{cases} \quad . \quad (18)$$

1.3 基坑失稳风险后果计算方法

基坑风险后果种类繁多, 包括经济损失、工期损

失、人员伤亡等諸多方面, 对风险后果作统一度量比较困难, 并且, 风险后果具有很强的不确定性, 如风险事件破坏规模、发生时间以及历险人数不确定等, 此外, 在基坑设计与施工过程中, 获得的信息往往也不全面, 这都将使风险后果的精确预估变得非常困难, 因此, 现阶段采用较为粗糙的专家调查法, 利用专家的工程经验来预估风险后果是合理可行的^[4], 但是, 不同专家由于工程经验、熟悉的领域以及掌握的工程信息不尽相同, 其给出的评价结果也往往不同, 甚至可能互相矛盾, 即不同专家的决策水平(评价结果的可信度)并不相同, 因此, 有必要针对现有专家调查法存在的问题展开进一步的研究, 建立一种能够反映专家决策水平的风险后果评价方法。

在决策论和信息论等诸多领域, 熵经常用来度量信息的不确定性^[17], 为此, 本文引入信息熵, 以此来度量专家评价结果的可信度, 以期使风险后果评价结果更加科学合理, 其具体实施过程如下:

(1) 对于各风险事件, 考虑经济损失、工期损失和人员伤亡 3 种风险后果, 建立不同后果种类的风险分级标准如表 4 所示^[5], 风险后果权重: 经济损失 \bar{c}_1 为 0.5, 工期损失 \bar{c}_2 为 0.2, 人员伤亡 \bar{c}_3 为 0.3。

表 4 风险事故后果分级标准

Table 4 Ranking standards of risk consequence

等级	事故 描述	评分 中值	经济损失			工期损失			人员伤亡		
			经济损失	工期损失	人员伤亡	经济损失	工期损失	人员伤亡	经济损失	工期损失	人员伤亡
一级	可忽略	1	10万以下	15 d以下	轻伤3人以下						
二级	需考虑	2	10万~50万	15~45 d	轻伤超过3人或重伤一人						
三级	严重	3	50万~100万	45~90 d	重伤1人以上3人以下						
四级	很严重	4	100万~500万	90~180d	重伤3人以上或死亡1人						
五级	灾难性	5	500万以上	180 d以上	死亡1人以上						

(2) 请 S_1, S_2, \dots, S_m 共 m 位专家对每个风险事件可能出现的经济损失、工期损失和人员伤亡进行评分, 并根据风险后果权重求得第 i 位专家对第 j 个风险事件的风险后果综合评分值 r_{ij} :

$$r_{ij} = 0.5\bar{c}_{1ij} + 0.2\bar{c}_{2ij} + 0.3\bar{c}_{3ij} \quad (19)$$

式中, \bar{c}_{1ij} , \bar{c}_{2ij} 和 \bar{c}_{3ij} 分别为第 i 位专家对第 j 个风险事件的经济损失、工期损失以及人员伤亡给出的评分值。进而确定出风险后果评价矩阵 $A = (r_{ij})_{m \times 5}$ 。

(3) 不同专家对同一风险事件风险后果评分并不相同, 有必要建立一种有效的方法来度量专家所给评分结果的可信度。为此, 首先根据风险后果评价矩阵 $A = (r_{ij})_{m \times 5}$ 计算专家 S_i 的评价水平向量 E_i ^[17]:

$$E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{i5}) \quad (20)$$

$$e_{ij} = 1 - |r_{ij} - \bar{r}_{ij}| / \max r_{ij} \quad (21)$$

$$\bar{r}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (22)$$

e_{ij} 能反映专家 S_i 对风险事件 A_j ($j=1, 2, \dots, 5$) 风险后果评价的可信程度(即评价水平), 于是基于信息熵建立出专家评价水平的评定模型 H_i 为^[17]

$$H_i = \sum_{j=1}^5 h_{ij} \quad (23)$$

$$h_{ij} = \begin{cases} -e_{ij} \ln e_{ij} & (1/e \leq e_{ij} \leq 1) \\ 2/e - e_{ij} |\ln e_{ij}| & (0 < e_{ij} < 1/e) \end{cases} \quad (24)$$

式中, e 为自然常数。此模型能根据专家给出的评分结果的不确定性来度量专家自身的决策水平, 容易看出, 熵值 H_i 越小, 则专家决策水平越高, 所给评分结果越可信, 反之, 熵值 H_i 越大, 则专家决策水平越低, 所给评价结果越不可信。

(4) 显然, 决策水平越高的专家所给的评价结果应赋予越大的权重, 故专家 S_i 的自身权重 w'_i 为^[17]

$$w'_i = \frac{1}{H_i} \left/ \sum_{i=1}^m \frac{1}{H_i} \right. \quad (25)$$

因此, 考虑专家评价水平的风险后果评分向量为

$$C = W'A \quad (26)$$

式中, $C = (C_1, C_2, \dots, C_5)$ 为 5 个风险事件的风险后果评价向量, $W' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_5)$ 为专家自身权重向量, $A = (r_{ij})_{m \times 5}$ 为风险后果评价矩阵。

至此, 已建立悬臂支护结构基坑失稳风险的改进风险矩阵分析方法及其实施过程。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

为验证本文方法的合理性, 将其应用于某大厦基坑^[18]失稳可能引起的风险进行评价。如图 2 所示, 该大厦基坑开挖深度 $H = 8$ m, 地面均布垂直荷载 $q = 60$ kPa, 采用悬臂式支护桩结构, 嵌固深度 $D = 9$ m, 桩长 17 m, 无地下水。基坑各土层分布: 第一层为杂填土, 厚 2.5 m, 重度 $\gamma_1 = 19$ kN/m³, 黏聚力 $c = 12$ kPa, 6 kPa; 内摩擦角 φ 的均值和方差分别为 9°, 2°。第二层土为粉质黏土, 厚 3.5 m, 重度 $\gamma_2 = 20$ kN/m³, 黏聚力 $c = 80$ kPa, 26 kPa; 内摩擦角 φ 的均值和方差分别为 13°, 3.1°。第三层土为粉质黏土, 厚度大于 11.0 m, 重度 $\gamma_3 = 20$ kN/m³, 黏聚力 $c = 30$ kPa, 13.5 kPa; 内摩擦角 φ 的均值和方差分别为 13°, 1.6°。各土层重度的变异性可忽略。

2.2 分析过程及结果

采用本文方法对该基坑失稳风险进行评价, 其具体过程如下:

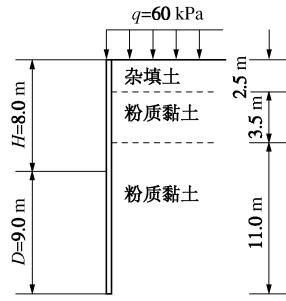


图 2 支护结构与土层分布示意图

Fig. 2 Retaining structure and distribution of soil layers

(1) 计算风险概率 p_i 。限于篇幅, 本文只给出风险概率 p_2 的具体计算过程, 可分如下两步进行。

a) 确定各风险因素的区间值。在本文基坑实例中, 无地下水, 故无需考虑基坑底土突涌破坏风险和基坑底渗流破坏风险; 地面荷载 q 和土体重度的不确定性可忽略, 将其作为确定性参数; 该基坑共有 3 层土, 第 1 层厚 2.5 m, 第 2 层厚 3.5 m, 第 3 层厚 11 m, 取各层土体力学参数的区间变量: $\tilde{c}_1 = [6, 18]$, $\tilde{c}_2 = [54, 106]$, $\tilde{c}_3 = [16.5, 43.5]$, $\tilde{\phi}_1 = [7^\circ, 11^\circ]$, $\tilde{\phi}_2 = [9.9^\circ, 16.1^\circ]$, $\tilde{\phi}_3 = [11.4^\circ, 14.6^\circ]$ 。

b) 将区间变量代入极限状态方程式(4), 可证 M_2 是关于 \tilde{c}_1 , \tilde{c}_2 , \tilde{c}_3 , $\tilde{\phi}_1$, $\tilde{\phi}_2$, $\tilde{\phi}_3$ 的单调增函数, 由转换法^[14]计算得 $M_2^c = -138.7$, $M_2^r = 4164.5$, 由式

(17) 得 $\eta_2 = -0.03$, 进而由式(18)得风险概率 $p_2 = 3$, 同样可得 $p_1 = 1$ 、 $p_3 = 1$ 、 $p_4 = 1$ 、 $p_5 = 1$ 。

(2) 计算风险后果 C_i 。

a) 确定风险后果评价矩阵。有 4 位专家对 5 个风险事件的风险后果给出了评分, 通过式(19)处理后得到风险后果评价矩阵 $A = (r_{ij})_{4 \times 5}$, 如表 5 所示。

表 5 风险损失评分值

Table 5 Values of risk loss

专家	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	1.5	2.0	1.6	2.0	1.5
2	1.8	2.5	1.5	1.5	1.2
3	2.0	2.2	1.9	2.5	2.0
4	1.6	1.8	2.0	1.8	1.2

b) 采用信息熵对专家的决策水平进行评价。根据专家给出的评价矩阵 $A = (r_{ij})_{4 \times 5}$, 由式(20)~(25)计算得各专家的权重如表 6 所示。

c) 根据专家自身权重对风险后果评价矩阵 $A = (r_{ij})_{4 \times 5}$ 进行修正, 由式(26)得风险后果的最终评分值向量为 $C = [1.7 \ 2.1 \ 1.7 \ 1.9 \ 1.5]$ 。

(3) 计算基坑失稳总体风险 R 。将前面得到的风险概率 p_i 和风险后果 C_i 代入式(1)计算得 $R = 3.6$, 由表 3 可知该基坑风险为一级, 风险可忽略, 不需采取风险处理措施。

实际工程表明支护结构是安全的^[18], 这与本文方法分析结果一致, 表明本文方法分析结果可较好的反

映工程实际, 从而验证了本文方法的合理性和可行性。

表 6 专家权重结果

Table 6 Weight values of experts

专家	专家水平向量 $E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{i5})$	熵值 H_i	权重 w'_i
1	(0.888, 0.950, 0.925, 0.980, 0.988)	0.258	0.421
2	(0.963, 0.850, 0.875, 0.820, 0.863)	0.581	0.187
3	(0.863, 0.970, 0.925, 0.780, 0.738)	0.647	0.168
4	(0.938, 0.870, 0.875, 0.940, 0.863)	0.483	0.224

3 结 论

本文在现有风险矩阵法的基础上, 引入非概率可靠性分析方法和信息熵理论, 对悬臂支护基坑失稳风险分析方法进行了深入探讨, 由此可得如下结论:

(1) 考虑基坑失稳力学机理, 建立了可综合考虑风险概率和风险后果的基坑失稳风险改进风险矩阵分析方法。

(2) 采用基于区间数学理论的非概率可靠性分析方法确定风险概率, 可以反映基坑失稳的力学机理与土体物理力学参数的不确定性对风险概率的影响。

(3) 基于信息熵理论的基坑风险后果确定方法可以反映专家评价水平的影响, 较现有专家调查法更能反映工程实际。

参考文献:

- [1] 仲景冰, 李惠强, 吴 静. 工程失败的路径及风险源因素的 FTA 分析方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(1): 14 - 17. (ZHONG Jing-bing, LI Hui-qiang, WU Jing. FTA method for path of engineer failure and risk source factor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2003, 20(1): 14 - 17. (in Chinese))
- [2] 边亦海, 黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 664 - 668. (BIAN Yi-hai, HUANG Hong-wei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 664 - 668. (in Chinese))
- [3] 何锡兴, 周红波, 姚 浩. 上海某深基坑工程风险识别与模糊评估[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1912 - 1915. (HE Xi-xing, ZHOU Hong-bo, YAO Hao. Construction risk identification and assessment of a deep foundation pit in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1912 - 1915. (in Chinese))
- [4] 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 - 614; 645. (HUANG Hong-wei, BIAN Yi-hai. Risk management of deep foundation pit construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 611 - 614; 645. (in Chinese))

- Hong-wei, BIAN Yi-hai. Risk management in the construction of deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 611 - 614; 645. (in Chinese))
- [5] 边亦海, 黄宏伟, 李 剑. 可靠性方法在深基坑施工期风险分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 70 - 73. (BIAN Yi-hai, HUANG Hong-wei, LI Jian. Risk analysis in the construction stage of deep excavation engineering based on dependability method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 70 - 73. (in Chinese))
- [6] 黄 强. 建筑基坑支护技术规程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (HUANG Qiang. Manual of technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [7] ITA. Guidelines for tunneling risk management[S]. 2004.
- [8] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990. (WANG Lian-fen, XU Shu-bai. An introduction to analytical hierarchy process[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990. (in Chinese))
- [9] 黄宏伟, 朱 琳, 谢雄耀. 上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1103 - 1107. (HUANG Hong-wei, ZHU Lin, XIE Xiong-yao. Risk assessment on engineering feasibility of key events in Shanghai metro line No.11[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1103 - 1107. (in Chinese))
- [10] 毛 儒. 隧道工程风险评估[J]. 隧道建设, 2003, 23(2): 1 - 3. (MAO Ru. Risk evaluation on tunneling engineering[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(2): 1 - 3. (in Chinese))
- [11] 苏永华, 何满潮, 曹文贵. 岩体地下结构围岩稳定非概率可靠性的凸集合模型分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 377 - 383. (SU Yong-hua, HE Man-chao, CAO Wen-gui. Non-probabilistic reliability convex model method for stability analysis of surrounding rock mass of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 377 - 383. (in Chinese))
- [12] ELLISHAKOFF I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from A M Freudenthal's criticisms to modeling[J]. Computers & Structures, 1995, 56(6): 871 - 895.
- [13] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56 - 60. (GUO Shu-xiang, LU Zhen-zhou, FENG Yuan-sheng. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [14] 郭书祥, 张 陵, 李 翩. 结构非概率可靠性指标的求解方法[J]. 计算力学学报, 2005, 22(2): 227 - 231. (GUO Shu-xiang, ZHANG Ling, LI Ying. Procedures for computing the non-probabilistic reliability index of uncertain structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(2): 227 - 231. (in Chinese))
- [15] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000. (ZHAO Ming-hua. Soil mechanics and foundation project[M]. Wuhan: Wuhan Industrial University Press, 2000. (in Chinese))
- [16] 刘 义, 王国玉, 柯宏发. 一种基于灰色距离测度的小样本数据区间估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 116 - 119. (LIU Yi, WANG Guo-yu, KE Hong-fa. Approach of parameter estimation for small samples based on grey distance measure[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 116 - 119. (in Chinese))
- [17] 余建星, 蒋旭光, 练继建. 水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 729 - 735. (YU Jian-xing, JIANG Xu-guang, LIAN Ji-jian. Comprehensive evaluation model for optimal deployment of water resources based on fuzzy theory and information entropy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 729 - 735. (in Chinese))
- [18] 廖 瑛. 基坑支护结构的稳定可靠度研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 54 - 56. (LIAO Ying. The reliability study on stability of bracing structure for excavation[J]. Industrial Construction, 2004, 34(1): 54 - 56. (in Chinese))