

黏性土冻胀风险可拓评价方法研究

王伟^{1†}, 刘丹娜², 王兴¹, 高成梁³, 夏炜燕³

(1. 长春工程学院 土木工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 中交路桥北方工程有限公司, 北京 100024;

3. 长春工程学院 勘查与测绘工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对黏性土冻胀性分级指标单一、界限值大, 无法反映冻胀影响因素间不确定性的方法, 本文在基于可拓云模型在不确定性方面的优点, 结合熵值客观赋权方法提出了以取样深度、含水率、干密度、孔隙比和超塑含水率为评价指标的可拓云综合评价模型。该模型可根据实测数据与冻胀风险等级的随机性处理离散化问题, 真实反映指标间的模糊性、随机性以及不确定性关系, 准确评价黏性土冻胀等级, 通过工程案例对该模型的有效性进行了验证。研究结果表明, 基于熵值法的可拓云综合评价模型在黏性土冻胀风险评价中的应用是有效的、可行的。

关键词: 熵值法; 可拓云模型; 黏性土; 冻胀; 风险评价

引用格式: 王伟, 刘丹娜, 王兴, 等. 黏性土冻胀风险可拓评价方法研究. 控制理论与应用, 2022, 39(5): 897–905

DOI: 10.7641/CTA.2021.10428

Study on extension evaluation method of frost heave risk of cohesive soil

WANG Wei^{1†}, LIU Dan-na², WANG Xing¹, GAO Cheng-liang³, XIA Wei-yan³

(1. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012;

2. China Communication North Road and Bridge Co., Ltd., Beijing 100024, China;

3. School of Prospecting and Surveying, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012)

Abstract: There is a problem that the classification index of frost heave of cohesive soil is single and the limit is large, which cannot reflect the uncertainty among frost heave influencing factors. Based on the advantages of extension cloud model in uncertainty, an extension cloud comprehensive evaluation model which uses sampling depth, water content, dry density, void ratio and super plastic water content as evaluation indexes is proposed through combining the entropy weighting and extension cloud model. The model can deal with the discretization problem according to the randomness of the measured data and the frost heave risk level, truly reflect the fuzziness, randomness and uncertainty relationship between the indexes, and accurately evaluate the frost heave level of cohesive soil. The effectiveness of the model is verified by an engineering case. The results show that the application of extension cloud comprehensive evaluation model based on entropy method in evaluation on frost heave risk of cohesive soil is effective and feasible.

Key words: entropy method; extension cloud theory; cohesive soil; frost heave; risk assessment

Citation: WANG Wei, LIU Danna, WANG Xing, et al. Study on extension evaluation method of frost heave risk of cohesive soil. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(5): 897–905

1 引言

在冻土区进行地铁工程施工时, 基坑越冬现象十分普遍。在低温环境下, 一方面土体内部双向散热, 另一方面土体中的自由水冰冻固结, 使基坑顶面与侧壁出现不同程度的冻胀, 其冻胀力比计算值大很多。为了确保冻土区基坑工程的安全, 提前判断场地地基土的冻胀风险, 并对基坑开挖深度范围内的高风险区采取相应措施, 以便控制其冻胀显得尤为重要。进行场

地冻胀风险评价, 首先需要确定冻胀风险评价体系, 这与土的冻胀性密切相关。国内外对土的冻胀性及其分类进行了大量研究, 并通过建立各种冻胀数学模型来预测土体冻胀变形量。耿琳^[1]采用增量非线弹性理论建立了饱和黏土冻胀变形预估模型; 周家作等^[2]通过饱和粉土冻胀试验推导了基于水分迁移原理的冻土热扩散方程, 并提出了预测冻胀量变化的数值模拟方法; 吴紫汪^[3–4]提出了冻土工程分类与冻胀等级划

收稿日期: 2021–05–20; 录用日期: 2021–10–22。

[†]通信作者。E-mail: 16695496@qq.com; Tel.: +86 431-80578537。

本文责任编辑: 李少远。

吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220637KJ), 长春工程学院主题基金项目(320200054)资助。

Supported by the Scientific Research Project of the Education Department of Jilin Province (JJKH20220637KJ) and the Fund Project of Changchun Institute of Technology (320200054).

分的界限值; 程爱君^[5]提出了以冻高为标准的铁路路基填料冻胀分级方法; 李雨浓等^[6]提出了黏性土、粉土及细粒土的超塑含水率冻胀性等级界限值; 张以晨等^[7]提出了粗粒土相应于不同冻胀等级和类别的界限含水率; 程培峰等^[8]提出了冻胀率小于6%时黏土的冻胀等级界限含水率。上述研究主要以含水率、塑限含水率和冻胀率等单一指标为界限值进行冻胀等级划分, 并未考虑其他冻胀影响因素。此外, 规范^[9-10]采用的冻胀性分级是针对未开挖土体的, 在考虑了冻深条件的同时, 其界限值往往偏大, 得出的土体冻胀性评价结果偏于不安全, 且不适用于季节性冻土区基坑工程中土体对支护结构的冻胀性评价。目前的风险评价方法多以模糊层次分析法^[11]、故障树分析法^[12]、灰色模糊理论^[13]等为主, 这些方法虽然能够通过实测数据进行预测与评价, 但都无法准确有效地反映实际工程中评价指标的特征, 更不能定量描述指标间的转换态势, 所得的判别结果无法评价与划分场地风险等级。近些年, 可拓理论在岩土工程稳定性评价中的应用越来越广。但是, 由于影响冻胀性的指标因素很多, 这些指标之间又存在着一定程度的模糊性、随机性和离散性, 仅用可拓理论通过关联函数进行定量计算并不能解决离散化问题^[14]。云模型恰好可以根据实测数据与评价等级的随机性关系解决此类问题, 一些学者开展了基于云模型的可拓学评价研究, 并在隧道围岩稳定性^[15-16]、施工安全评价^[17]、场地沉降风险^[18]以及公路路用性能^[19]等方面进行了应用。目前, 对于场地冻胀风险评价的研究相对较少, 现行的冻胀性等级分类标准与评价方法, 评价指标过于单一、界限值设定偏大, 评价结果无法反映各冻胀影响因素之间的不确定性关系, 影响了场地冻胀风险等级评价结果的准确性。鉴于此, 笔者以长春市某地铁车站在建深基坑工程为依托, 基于熵值理论、可拓云理论以及云模型在不确定性方面的优点, 以含水率、干密度、开挖深度(取样深度)、孔隙比和超塑含水率为评价指标, 提出了一种适用于黏性土的场地冻胀风险等级分类标准和综合评价方法, 有效解决了黏性土冻胀影响因素之间的模糊性和随机性关系, 提高了评价结果的准确性。

2 可拓评价方法

2.1 基本理论

可拓学是以物元理论与可拓集合为基础研究物元及其变换的理论, 用于评价研究对象的优劣与可行性, 通过引入物元 R 对其进行定性定量的分析。可拓评价方法是可拓学理论的主要应用之一, 其理论框架由物元理论与可拓数学构建而成, 其中, 物元是可拓学理论的逻辑细胞和基本单位^[20], 以 $R = (N, c, x)$ 的有序

三元组形式来表示。其中: N 表示事物, 即评价对象, c 表示事物的特征, 即评价对象的评价指标, x 表示事物 N 关于 c 的量值。基本物元的表达式如式(1)所示:

$$R_i = \begin{pmatrix} N_i & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

可拓云理论是将物元模型与云模型相耦合, 利用物元理论分析云模型的一种方法。云模型^[21], 是由李德毅院士提出的一种对客观事物进行定性定量转换的不确定性数学模型, 通常用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ^[22], 等云数字特征值表示。其中, 期望 E_x 是论域空间内最具代表性的点, 即最佳样本。熵 E_n 是衡量定性概念的不确定程度, 由定性概念的模糊性与随机性决定, 既反映了云滴的离散性, 又反映了被定性概念认可的云滴的取值区间。超熵 H_e 是衡量熵的不确定性, 反映了云滴的厚度。期望 E_x 和熵 E_n 按式(2)–(3)所示计算。

$$E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2, \quad (2)$$

$$E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6, \quad (3)$$

$$H_e = s, \quad (4)$$

式中: C_{\max} , C_{\min} 为某等级标准的最大和最小边界值, s 为常数, 可通过逆向云发生器计算获得, 并根据指标的模糊阈度进行调整。

2.2 评价模型

本文提出的冻胀风险等级评价模型以可拓云理论为基础, 根据式(1)所示的基本物元, 根据每个评价指标所对应的冻胀等级建立相应的物元, 最后将所有物元组成矩阵。可拓云模型的表达式如式(5)所示:

$$R_j = (N_j, c_j, x_j) = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & c_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: R_j 为第 j 个冻胀等级对应的单位物元, N_j 为第 j 个冻胀等级, c_j 为第 j 个冻胀等级下各评价指标的特征指标, $x_j = (E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})$ 为 N_j 关于 c_j 的特征值, 即根据不同冻胀等级条件下每个评价指标的边界值所确定的期望、熵和超熵的量值。假设有 m 个冻胀等级, n 个评价指标, 通过实测数据并以物元形式可得到由 n 个评价指标组成的 m 维复合云模型 U , 如式(6)所示:

$$U = (N, c_i, x_i) = \begin{pmatrix} N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ c_1 & \mu_1(x_{11}) & \mu_2(x_{12}) & \cdots & \mu_m(x_{1m}) \\ c_2 & \mu_1(x_{21}) & \mu_2(x_{22}) & \cdots & \mu_m(x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & \mu_1(x_{n1}) & \mu_2(x_{n2}) & \cdots & \mu_m(x_{nm}) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: $N_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为第 j 个冻胀等级; c_i 为评价指标, 对于黏性土来说, 冻胀等级的评价指标通常为含水率、干密度、孔隙比和超塑含水率, 本文在此基础上引入了取样深度作为另一个评价指标, 实际工程中还可根据实际情况增加评价指标; $\mu_{ij}(x_{ij})$ 为相应的量值 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 的关联度; j 和 i 分别为评价指标及其对应的特征值的序号及物元维数。

基于复合云模型计算待评价样本与冻胀等级各指标的关联度, 即运用 MATLAB 生成一个以 E_n 为均值, H_e 为标准差计算的正态随机数 E'_n , 令待评价样本中的确定性数值为 x_{ij} , 其云熵为 (x_{ij}, μ_{ij}) , 关联度计算如式(7)所示:

$$\mu_{ij} = \exp\left[-\frac{(x_{ij} - Ex)^2}{2(E'n')^2}\right], \quad (7)$$

根据关联度构建可拓云矩阵 Q , 如式(8)所示:

$$Q = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

进行风险等级确定时, 需通过指标权重向量 W 与可拓云矩阵 Q 相乘计算综合确定度矩阵 B 。每个样本对于每个等级都有其相应的确定度, 将同一等级的确定度累加, 并根据最大确定度原则确定样本的评价等级。综合确定度矩阵 B 如式(9)所示:

$$B = W \cdot Q = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

确定各评价指标的权重是可拓评价的核心问题, 是评价准确与否的关键。赋权方法不同, 权重的计算结果不同, 导致评价结果不同。本文采用熵值法根据各指标的实测数据对评价指标进行赋权, 避免了其他赋权方法中存在的主观性, 使计算结果更为客观、准确, 且符合实际规律。

2.3 熵值赋权方法

熵是热力学中表征热能有效利用程度的物理量,

统计物理学中度量分子运动无序度的物理量, 在信息论中是系统无序程度的度量。当某一测定指标的值变异程度越大, 其熵值越小, 则该指标所提供的信息量越大, 权重越大。熵值法就是根据各项观测指标熵值来确定权重的一种方法^[23], 通过信息熵来计算各指标权重, 并为综合评价提供依据。

假设有 m 个待测样本组成评价对象集 $A_i, i = 1, 2, \dots, m$, 有 n 个指标数据组成指标集 $X_j, j = 1, 2, \dots, n$, 其中 x_{ij} 表示第 i 个待测样本的第 j 项指标的原始数值。通过标准化处理后得到由不同指标中不同量值所占的比重 y_{ij} 组成的标准矩阵 Y , 如式(10)所示, 指标 i 中量值 j 所占比重 y_{ij} 的计算如式(11)所示, 任一指标的熵值 e 按式(12)所示计算:

$$Y = (y_{ij})_{m \times n}, \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}}, \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, \\ j = 1, 2, \dots, n, k \geq 0, e_j \geq 0. \quad (12)$$

式(12)中的 k 与系统的样本数 m 有关, 取常数。当有序度为 0 时, 其熵值最大, 即 $e = 1$ 。当 m 个样本处于完全无序分布状态时, $y_{ij} = 1/m$, 此时的熵值对综合评价的效用价值为零, 因此, 第 j 个指标的差异系数 g_j 由该项指标的熵值与 1 之间的差值确定, 如式(13)所示:

$$g_j = 1 - e_j, j = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

熵值法估算指标权重的本质是利用该指标信息的价值系数来计算, 价值系数越高, 其重要性越大。第 j 项指标的权重 w_j 如式(14)所示:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^n g_j}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

熵值法是一种能够反映指标变动程度的客观赋权法, 通过利用评价指标的固有信息判别指标的效用价值, 一定程度上避免了主观因素对评价结果的影响。

2.4 评价流程

为了更好地理解本文所提出的基于熵值法与可拓云理论的黏性土冻胀等级评价方法, 冻胀等级评价流程如下:

步骤 1 根据黏性土冻胀特点及其影响因素, 确定评价指标 c_i ;

步骤 2 根据各评价指标的实际数据, 采用熵值赋权法计算评价指标 c_i 的客观权重 w_j ;

步骤3 根据冻胀等级 N_j 以及各评价指标 c_i 所对应的各冻胀等级区间界限值计算相应于不同冻胀等级 N_j 的期望 E_x 和熵 E_n 和超熵 H_e ;

步骤4 采用逆向云发生器计算各评价指标云滴的数字特征, 即超熵 H_e , 并根据每个指标的模糊阈对 H_e 进行调整, 并绘制云滴图;

步骤5 计算关联度 μ_{ij} , 并构建可拓云矩阵 Q , 将客观权重向量 W 与可拓云矩阵 Q 相乘, 得到综合确定度矩阵 B ;

步骤6 按照最大确定度原则对每个待评价土样进行冻胀等级的判别.

3 案例分析

3.1 评价指标的选取

以长春某地铁车站基坑工程为例, 对施工场地进行钻孔勘查取样. 对原状土样进行冻胀试验, 测试土样的冻胀率及其各项基本物理性质指标, 试验结果如表1所示. 根据试验土样的取样深度及其对应的冻胀率绘制地基土的冻胀性随深度的变化曲线, 如图1所示. 根据规范^[9-10], 所列季节冻土的冻胀性分类标准和一次冻胀试验结果可知, 1#和7#, 样为不冻胀土,

8#和12#为弱冻胀土, 其余土样均为冻胀土. 而经过二次冻胀后, 所有试样的冻胀率都有不同程度的增大. 其中, 2#和4#土样的冻胀等级都提高了一个级别. 地铁车站基坑工程的周期通常在3年左右, 如果按照一次冻胀结果对土的冻胀性进行分级, 在经历了一个或两个冻融循环周期后, 其冻胀性很有可能会有较大变化, 对工程安全来说是极为不利的.

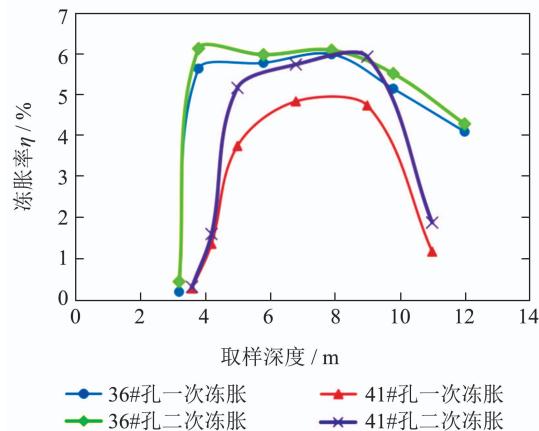


图1 地基土冻胀性随深度变化曲线

Fig. 1 Change curve of frost heave of foundation soil with depth

表1 试验土样冻胀率及其基本物理指标

Table 1 Frost-heave rate of test soil samples and its basic physical indexes

试样 编号	取样深度 H/m	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	超塑含水率 $w - w_p/\%$	塑性 指数 I_p	一次冻胀 率 $\eta/\%$	冻胀 等级	二次冻胀 率 $\eta/\%$	冻胀 等级
1	3.2	28.2	1.554	0.738	1.4	21.2	0.18	I	0.43	I
2	3.8	34.2	1.48	0.831	11.4	17	5.63	III	6.12	IV
3	5.8	37.4	1.401	0.927	15.5	16	5.77	III	5.97	III
4	7.9	52.4	1.108	1.438	27.5	19.3	5.98	III	6.08	IV
5	9.8	31.1	1.567	0.73	12.4	11.4	5.14	III	5.51	III
6	12	33.9	1.547	0.746	14.6	12.1	4.09	III	4.28	III
7	3.6	23.2	1.593	0.707	0.5	19	0.26	I	0.3	I
8	4.2	24.5	1.688	0.599	1.5	17.3	1.35	II	1.59	II
9	5	27.7	1.59	0.704	6.1	15.4	3.74	III	5.16	III
10	6.8	34	1.533	0.761	14.4	12.6	4.83	III	5.73	III
11	9	31	1.536	0.757	11.2	12.9	4.73	III	5.92	III
12	11	26.2	1.624	0.663	8.2	10.2	1.16	II	1.87	II

如图1所示, 冻深以外的地基土在地表以下4~8 m之间时冻胀性最强. 这与长春地区粉质黏土层分布和地下水位普遍埋深有直接关系. 在季节性冻土区进行基坑施工时, 当冬季气温降低, 负温将从地表和支护墙侧面呈双向冻结趋势不断侵入土体, 导致在冻结深度以下土体由于开挖的原因依然会产生一定程度的冻胀. 可见, 开挖深度(以取样深度来代替)对场地冻胀风险等级评价具有重要影响. 采用现行规范进行评价时, 并未考虑该因素.

水是影响黏性土冻胀性的重要因素之一, 现行规范中就采用含水率 w 作为冻胀性分级的一个判别标准. 实际工程中, 地下水位及其补给方式直接影响地基土的含水率, 进而影响土的冻胀性, 因此, 在进行场地冻胀风险评价时, 含水率是一个不可忽视的重要评价指标.

土的干密度 ρ_d 反映了土的密实程度, 黏性土的冻胀率通常随干密度的增大而变小^[24]. 现行规范中并未采用干密度作为土的冻胀性分级标准, 而在实际工程

中, 随着冻融循环次数的增加, 势必会影响土的密实性, 进而影响其冻胀性。如图2所示, 在经过一次冻融循环周期后, 地基土的第2次冻胀率明显大于第1次冻胀率。因此, 将干密度作为场地冻胀性风险评价指标, 能够在一定程度上反映土的密实性对冻胀性的影响。

孔隙比 e 是反映土体密实程度的物理量之一, 由于黏性土通常密实性相对较高, 具有一定的持水能力, 对冻胀性影响极大。而土的孔隙性在一定程度上也会影晌二次冻胀作用, 因此, 将孔隙比与干密度、含水率联合使用进行评价, 不仅在一定程度上能够反映土的饱和程度, 同时还能够反映冻融循环作用对土的二次冻胀的影响。

采用超塑含水率 $w - w_p$ 进行冻胀性评价, 在一定程度上反映了土的塑性状态和含水率对冻胀性的综合影响, 尤其是黏性土。此外, 现行规范所采用的超塑含水率界限值通常都偏大, 对工程来说偏于不安全^[10]。因此, 需要对冻胀性分级中的超塑含水率界限值进行重新定义。

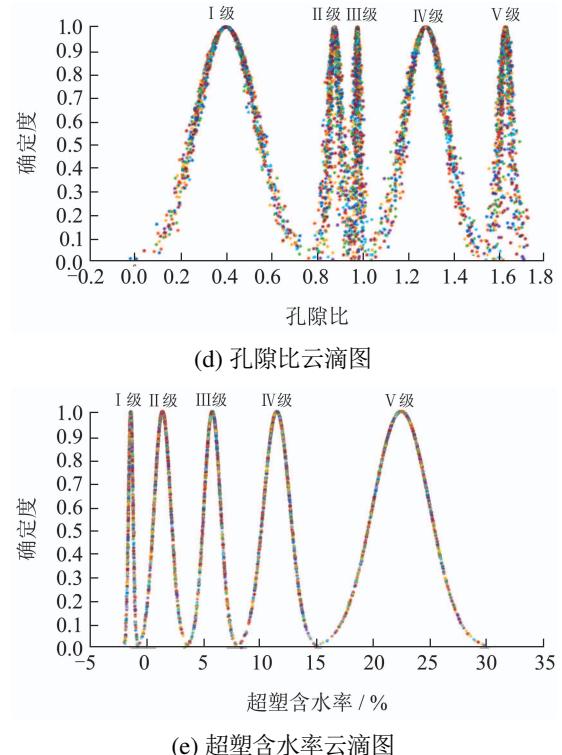
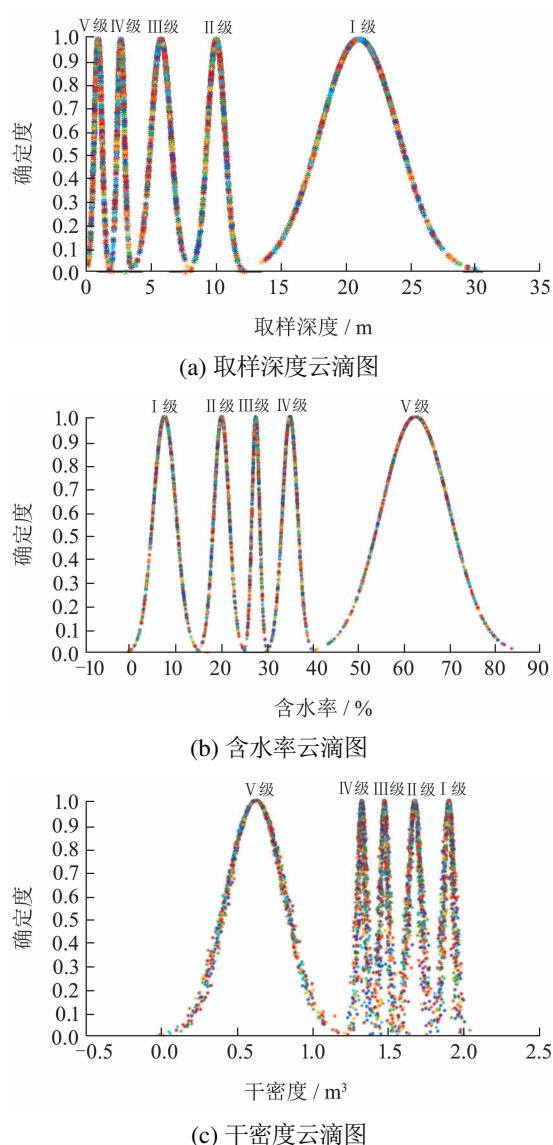


图2 指标冻胀风险等级评价云滴图

Fig. 2 Cloud drop diagram of index frost heave risk evaluation

综上所述, 本文选取取样深度 H 、含水率 w 、干密度 ρ_d 、孔隙比 e 和超塑含水率 $w - w_p$ 5个指标作为黏性土场地冻胀等级的评价指标。

3.2 评价标准的确定

根据长春地区的工程经验、相关文献[4-8]、规范^[9-10]与设计要求将场地冻胀风险划分为5个等级, 分别为I级(不冻胀)、II级(弱冻胀)、III级(冻胀)、IV级(强冻胀)和V级(特强冻胀)。各评价指标的分级标准依据如下: 1) 取样深度: 根据冻胀率随深度变化曲线和长春地区标准冻深, 确定1.8 m, 3.5 m, 8 m, 12 m为界限值。其中, 冻深1.8 m以内的黏性土受温度影响最显著。由于本案例中基坑开挖深度为30 m, 因此, 将取样深度上限设置为30 m; 2) 含水率: 根据文献[4]对冻土工程分类中亚黏土(粉质黏土)和黏土各级含水率的界限值, 结合规范^[13-14]对土的冻胀性分类, 确定15%, 25%, 30%, 40%为冻胀性分级界限含水率; 3) 干密度: 根据文献[24]中冻胀率与干密度的回归关系以及规范^[9-10]中的冻胀率界限值, 确定1.25 g/cm³, 1.40 g/cm³, 1.55 g/cm³和1.80 g/cm³为冻胀性分级干密度界限值; 4) 孔隙比: 根据文献[4]对冻土工程分类中亚黏土(粉质黏土)和黏土各级孔隙比界限值, 确定0.80, 0.95, 1.00, 1.55为冻胀性分级界限孔隙比; 5) 超塑含水率: 根据规范^[9-10]和文献[6]的试验结果, 将黏性土冻胀等级超塑含水率界限值定为-0.8%, 3.6%, 8%和15%。各评价指标分类标准如表2所示。

表2 黏性土冻胀等级评价指标分类标准

Table 2 Classification standard of evaluation index for frost heave grade of cohesive soil

风险等级	取样深度 <i>H/m</i>	含水率 <i>w/%</i>	干密度 <i>ρ_d/g·cm⁻³</i>	孔隙比 <i>e</i>	超塑含水率
					<i>w - w_p/%</i>
I(不冻胀)	(12, 30)	(0, 15)	(1.80, 2.00)	(0, 0.80]	(-2, -0.8)
II(弱冻胀)	(8, 12]	[15, 25)	(1.55, 1.80]	(0.80, 0.95]	[-0.8, 3.6)
III(冻胀)	(3.5, 8]	[25, 30)	(1.40, 1.55]	(0.95, 1.00]	[3.6, 8)
IV(强冻胀)	(1.8, 3.5]	[30, 40)	(1.25, 1.40]	(1.00, 1.55]	[8, 15)
V(特强冻胀)	(0, 1.8]	[40, 85)	(0, 1.25]	(1.55, 1.70)	[15, 30)

3.3 冻胀风险等级评价

由式(10)–(14)对样本参数进行计算, 确定各项评价指标的熵值*e_j*、差异系数*g_j*和熵权*w_j*, 计算结果如表3所示。根据表2所示黏性土冻胀评价指标等级分类

标准以及式(2)–(4)计算黏性土场地冻胀界限的期望*E_x*和熵*E_n*和超熵*H_e*。结合本案例评价指标参数的特点, 超熵*H_e*取0.01, 并根据冻胀分类标准和物元理论, 构建可拓评价云模型*U₀*, 如式(15)所示:

$$U_0 =$$

$$\left(\begin{array}{ccccc} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ c_1 & (21, 3, 0.01) & (10, 0.667, 0.01) & (5.75, 0.75, 0.01) & (2.65, 0.283, 0.01) & (0.9, 0.3, 0.01) \\ c_2 & (7.5, 2.5, 0.01) & (20, 1.667, 0.01) & (27.5, 0.833, 0.01) & (35, 1.667, 0.01) & (62.5, 7.5, 0.01) \\ c_3 & (1.9, 0.033, 0.01) & (1.675, 0.042, 0.01) & (1.475, 0.025, 0.01) & (1.325, 0.025, 0.01) & (0.625, 0.192, 0.01) \\ c_4 & (0.4, 0.133, 0.01) & (0.875, 0.025, 0.01) & (0.975, 0.008, 0.01) & (1.275, 0.092, 0.01) & (1.625, 0.025, 0.01) \\ c_5 & (-1.4, 0.2, 0.01) & (1.4, 0.733, 0.01) & (5.8, 0.733, 0.01) & (11.5, 1.167, 0.01) & (22.5, 2.5, 0.01) \end{array} \right). \quad (15)$$

表3 评价指标熵值赋权计算结果

Table 3 Calculation results of evaluation index entropy weighting

	取样深度 <i>c₁</i>	含水率 <i>c₂</i>	干密度 <i>c₃</i>	孔隙比 <i>c₄</i>	超塑含水率 <i>c₅</i>
熵值 <i>e_j</i>	0.963252	0.990052	0.99814	0.988397	0.889343
差异系数 <i>g_j</i>	0.036748	0.009948	0.00186	0.011603	0.110657
熵权 <i>w_j</i>	0.215133	0.05824	0.010891	0.067928	0.647808

运用MATLAB对各评价指标进行云滴图的计算, 如图2所示。

如图2所示, 各评价指标的云滴皆呈正态分布, 每个评价指标相邻两个等级所对应的云层均有不同程度的相交。其中, 干密度和孔隙比的相交区域比其他3个指标的相交区域略大。云层的相交区域反映了云模型的模糊性和不确定性。在正态随机数计算结果基础上, 根据式(7)–(8)构建可拓云矩阵。根据熵值法确定的权重, 按式(9)计算综合可拓云评价矩阵。可拓云矩阵如表4所示, 可拓云评价矩阵如表5所示, 将相同等级的确定度累加, 得到样本在各等级下的确定度, 并根据最大确定度原则判定样本的冻胀风险等级, 评价结果如表6所示。

4 评价结果分析

将可拓云综合评价结果与采用规范^[9–10], 得到的一次冻胀与二次冻胀的评价结果进行比较, 如表6所示。3#, 8#, 9#, 10#, 12#土样的评价结果一致。通过基本物理指标可知, 除了8#土样, 其余都属于粉质黏土。而8#土样虽然属于黏土, 但是塑性指数为17.3, 其塑性状态与粉质黏土十分接近。按冻胀率分级可知, 这5个土样属于不冻胀、弱冻胀和冻胀的黏性土。1#, 4#, 5#, 6#, 7#, 11#土样的评价结果比一次冻胀和二次冻胀的评价结果高, 而2#土样的评价结果比一次冻胀评价结果高, 与二次冻胀评价结果相同。按冻胀率分级可知, 除了1#和7#土样为弱冻胀黏性土, 其余都属于强冻胀和特强冻胀黏性土。可见, 对于强冻胀和特强

冻胀黏性土, 评价结果的差异是比较明显的, 对实际工程的影响比较大。对于冻胀、弱冻胀和不冻胀黏性土, 评价结果基本一致, 对实际工程的影响不大。由试验结果与对比分析可知, 黏性土的冻胀性分级不仅仅取决于冻胀率, 同时与含水率、干密度、孔隙比以及超塑含水率密切相关。对于开挖类工程, 土体冻胀性还与开挖深度(取样深度)有关。实际工程中采用规范值来评价土体冻胀性, 因其界限含水率相对较大, 评价结果对工程来说是偏于不安全的^[6]。本次试验结果也说明了这个问题, 即土体经过一个冻融周期后, 二次冻胀量明显大于一次冻胀量, 部分土体的冻胀等级提高。其原因是土体在冻融循环作用下, 含水率、干密度、孔隙比以及超塑含水率均有不同程度的变化。本文构建的可拓云综合评价模型在评价指标的选取上, 充分考虑了黏性土冻胀影响因素的敏感性^[24], 并结合规范^[9-10]以及文献[4, 6]中对现行规范中冻胀性分级的补充, 确定了各指标分级标准的取值范围。从评价结果来看, 采用可拓云模型对土体进行冻胀性评价, 考虑了开挖深度、含水率、干密度、孔隙比以及超塑含水率对冻胀性的影响以及各因素之间的不确定性关系, 同时反映了评价指标之间的模糊性、随机性和规律性。影响因素之间的这种不确定性关系、模糊性和随机性在土体经过冻融循环作用后其冻胀性发生改变的过程中得到了体现, 而现行规范中的判别方法并没有考虑冻融循环作用的影响, 给实际工程带来较大的安全隐患。可见, 根据可拓云模型的冻胀等级评价结果制定相应的预防措施, 可以有效避免多个冻融循环周期后土体冻胀性改变对支护结构带来的风险, 从而保证施工的安全进行。

表4 评价指标可拓云矩阵

Table 4 Extension cloud matrix of evaluation indicators

样本 编号	取样深度 c_1	含水率 c_2	干密度 c_3	孔隙比 c_4	超塑含水率 c_5
1	0.189	0.7022	0.0688	0.0704	1
2	0.0275	0.8921	0.9337	0.3723	0.9963
3	0.9978	0.3539	0	0.3503	0.0192
4	0.017	0.4037	0.0549	0.2866	0.1354
5	0.9543	0.068	0.0908	0.0174	0.7485
6	0.0105	0.8073	0.0001	0.0322	0.028
7	0.017	0.1634	0.1097	0.0631	0.4714
8	0.1429	0.0269	0.959	0.3439	0.9904
9	0.6281	0.9708	0.0447	0.0825	0.9173
10	0.3619	0.8382	0.3384	0.0148	0.0465
11	0.3576	0.0572	0.098	0.0268	0.9674
12	0.333	0.3021	0.6053	0.1349	0.0198

表5 综合可拓云评价矩阵

Table 5 Comprehensive extension cloud evaluation matrix

样本 编号	取样深度 c_1	含水率 c_2	干密度 c_3	孔隙比 c_4	超塑含水率 c_5
1	0.0407	0.0409	0.0007	0.0048	0.6478
2	0.0059	0.052	0.0102	0.0253	0.6454
3	0.2147	0.0206	0	0.0238	0.0124
4	0.0037	0.0235	0.0006	0.0195	0.0877
5	0.2053	0.004	0.001	0.0012	0.4849
6	0.0023	0.047	0	0.0022	0.0181
7	0.0037	0.0095	0.0012	0.0043	0.3053
8	0.0307	0.0016	0.0104	0.0234	0.6416
9	0.1351	0.0565	0.0005	0.0056	0.5942
10	0.0779	0.0488	0.0037	0.001	0.0301
11	0.0769	0.0033	0.0011	0.0018	0.6267
12	0.0716	0.0176	0.0066	0.0092	0.0128

5 结论

1) 针对目前冻胀等级分类中评价指标单一、界限值偏大以及评价结果存在不确定性等问题, 将熵值理论与可拓云模型相结合, 提出基于取样深度、含水率、干密度、孔隙比和超塑含水率等5个评价指标的适用于黏性土的冻胀风险等级分类方法以及评价指标各等级的范围取值, 并在此基础上构建了可拓云冻胀风险综合评价模型。

2) 以长春市地铁深基坑工程为例, 采用可拓云模型对12个黏性土样本进行了冻胀风险等级评价, 并与规范评价结果进行比较。对于不冻胀、弱冻胀和冻胀黏性土的评价结果基本一致。对于强冻胀和特强冻胀黏性土, 可拓云评价结果比规范评价结果高。其中, 部分土样由于二次冻胀量变大而导致冻胀等级提高, 而可拓云评价结果与这类土样的二次冻胀等级评价结果基本相同。可见, 可拓云评价结果更符合实际情况, 有利于实际工程中对二次冻胀的风险预防。

3) 基于熵值理论的可拓云冻胀风险评价模型考虑了开挖深度、含水率、干密度、孔隙比以及超塑含水率对黏性土冻胀性的重要影响, 评价结果反映了各评价指标信息中的模糊性、随机性和实际分布规律以及各因素之间的不确定性关系, 避免了对数据归一化造成的信息缺失。从评价结果来看, 运用熵值法对原始数据进行的赋权使各指标权重更加科学合理, 根据评价结果的预防措施可有效避免冻融循环周期后土体冻胀性增大对支护结构带来的风险。本方法可为冻土区地基土冻胀风险等级评价提供科学有效的参考。

表 6 可拓云评价结果及比较

Table 6 Evaluation results and comparison of extension cloud

样本 编号	I级 (不冻胀)	II级 (弱冻胀)	III级 (冻胀)	IV级 (强冻胀)	V级 (特强冻胀)	可拓云 评价结果	一次冻胀 等级	二次冻胀 等级
1	0.0048	0.6486	0.0409	0.0407	0	II	I	I
2	0	0.0253	0.0161	0.6974	0	IV	III	IV
3	0	0.0238	0.2147	0.0206	0.0124	III	III	III
4	0	0	0.0037	0.0195	0.1118	V	III	IV
5	0.0012	0.2063	0	0.4888	0	IV	III	III
6	0.0022	0.0023	0	0.0652	0	IV	III	III
7	0.0043	0.3161	0.0037	0	0	II	I	I
8	0.0234	0.6536	0.0307	0	0	II	II	II
9	0.0056	0.0005	0.7859	0	0	III	III	III
10	0.001	0	0.0816	0.0789	0	III	III	III
11	0.0018	0.0769	0.0011	0.63	0	IV	III	III
12	0.0092	0.0782	0.0176	0.0128	0	II	II	II

参考文献:

- [1] GENG Lin. *Mechanical Model and Numerical Prediction on Deformation of Soil under the Action of Frost Heave*. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
(耿琳. 土的冻胀力学模型及冻胀变形数值模拟. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.)
- [2] ZHOU Jiazu, WEI Changfu, LI Dongqing, et al. Experimental study and numerical simulation to the process of frost heave in saturated silt. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 485 – 495.
(周家作, 韦昌富, 李东庆, 等. 饱和粉土冻胀过程试验研究及数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 485 – 495.)
- [3] WU Ziwang. Classification of permafrost in engineering construction. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1979, 1(2): 52 – 60.
(吴紫汪. 多年冻土的工程分类. 冰川冻土, 1979, 1(2): 52 – 60.)
- [4] WU Ziwang. Classification of frozen soils in engineering constructions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(4): 43 – 48.
(吴紫汪. 冻土工程分类. 冰川冻土, 1982, 4(4): 43 – 48.)
- [5] CHENG Aijun. *Study on the Filling Heave Classification of the Railway Subgrade*. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2006.
(程爱君. 铁路路基填料的冻胀性分类研究. 北京: 铁道部科学研究院, 2006.)
- [6] LI Yunong, ZHANG Xifa, ZHANG Dongqing, et al. Research on frost heaving classification of fine-grain soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(12): 50 – 53.
(李雨浓, 张喜发, 张冬青. 季冻区公路路基细粒土冻胀性分类研究. 公路交通科技, 2007, 24(12): 50 – 53.)
- [7] ZHANG Yichen, LI Xin, ZHANG Xifa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1522 – 1526.
(张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及分类研究. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522 – 1526.)
- [8] CHENG Peifeng, YIN Chuanjun. Study on classification of frost heave of subgrade clay in seasonally frozen region. *Journal of China & Foreign Highway*, 2014, 34(5): 23 – 28.
(程培峰, 尹传军. 季冻区路基粘土冻胀性分类研究. 中外公路, 2014, 34(5): 23 – 28.)
- [9] *Code for Design of Soil and Foundation of Building in Frozen Soil Region: JGJ118 – 2011*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
(冻土地地区建筑地基基础设计规范: JGJ118-2011. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.)
- [10] *Code for Engineering Geological Investigation of Frozen Ground: GB50324-2014*. Beijing: China Planning Press, 2014.
(冻土工程地质勘察规范: GB50324-2014. 北京: 中国计划出版社, 2014.)
- [11] LI Chaoyang, YE Cong, SHEN Yuanshun. Risk assessment of subway pit construction based on fuzzy comprehensive evaluation. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(1): 220 – 226.
(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. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 220 – 226.)
- [12] ZHOU Hongbo, GAO Wenjie, CAI Laibing, et al. Risk identification and analysis of subway foundation pit by using fault tree analysis method based on WBS-RBS. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2703 – 2707, 2726.
(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. 岩土力学, 2009, 30(9): 2703 – 2707, 2726.)
- [13] WU Bo, WU Yufang, HUANG Wei, et al. Safety risk assessment of metro deep foundation pit construction based on fuzzy comprehensive judgment method. *Mathematics in Practice and Theory*, 2020, 50(2): 179 – 187.
(吴波, 吴昱芳, 黄惟, 等. 基于模糊综合判定法地铁深基坑施工安全风险评估. 数学的实践与认识, 2020, 50(2): 179 – 187.)
- [14] SONG Shengyuan, WANG Qing, SUN Tao, et al. Extenics evaluation of engineering geological zoning of foundation soil in Tianjin Binhai New area. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(10): 1502 – 1506.
(宋盛渊, 王清, 孙涛, 等. 天津滨海新区地基土工程地质分区的可拓学评价. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(10): 1502 – 1506.)
- [15] WANG Jianzong, ZHENG Zhixue, LI Changming, et al. Evaluation of stability of tunnel surrounding rock based on extension cloud theory integrated with game theory. *Railway Standard Design*, 2018, 62(11): 118 – 124.
(王建宗, 郑志学, 李长明, 等. 基于博弈论-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 118 – 124.)
- [16] WANG Mingwu, DONG Jingquan, DONG Hao, et al. Novel extension evaluation model for stability of surrounding rock based on connection clouds. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 2136 – 2142.

- (汪明武, 董景铨, 董昊, 等. 基于联系云的围岩稳定性可拓评价模型. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 2136–2142.)
- [17] CHEN Juanjuan. *Study on construction safety comprehensive assessment and application based on the extension cloud model*. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2017.
(陈娟娟. 基于可拓云理论的施工安全综合评价及应用研究. 武汉: 武汉科技大学, 2017.)
- [18] RUAN Yongfen, CHEN Zhaohui, WU Long, et al. Risk assessment of the settlement of peat soil field based on the extension cloud theory. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(1): 59–67.
(阮永芬, 陈赵慧, 吴龙, 等. 基于可拓云理论的泥炭质土场地沉降风险评价. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 59–67.)
- [19] WANG Hualan, LIANG Yuansheng. Evaluation model of highway pavement performance based on extension cloud theory. *Journal of China & Foreign Highway*, 2015, 35(3): 63–70.
(王兰花, 梁院生. 基于可拓云理论的公路路面性能评价模型. *中外公路*, 2015, 35(3): 63–70.)
- [20] SHEN Shiwei, XU Junchen, DAI Shulin, et al. Extenics evaluation of joint rock tunnel blasting quality based on entropy weighting method. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(12): 118–126.
(沈世伟, 许君臣, 代树林, 等. 基于熵值赋权法的节理岩体隧道爆破质量可拓学评价. *土木工程学报*, 2013, 46(12): 118–126.)
- [21] LI Deyi, DU Yi. *Uncertain Artificial Intelligence*. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
(李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能. 北京: 国防工业出版社, 2005.)
- [22] YANG Wendong, YANG Dong, XIE Quanmin. Study on slope risk assessment method based on cloud model and its application. *Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 30–34.
- (杨文东, 杨栋, 谢全敏. 基于云模型的边坡风险评估方法及其应用. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 30–34.)
- [23] YE Yicheng, KE Lihua, HUANG Deyu. *Technology and Application of System Comprehensive Evaluation*. Beijing: Metallurgical Industry Press Co., Ltd, 2006.
(叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 2006.)
- [24] WANG Wei, DU Wenyuan, TANG Yangang, et al. Sensitivity of freezing and thawing influencing factors of pipeline foundation soils in permafrost region. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(10): 1155–1164.
(王伟, 杜文友, 唐艳刚, 等. 多年冻土区管道地基土冻融影响因素的敏感性. *油气储运*, 2020, 39(10): 1155–1164.)

作者简介:

王伟 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为岩土及地下工程施工风险评价, E-mail: 16695496@qq.com;

刘丹娜 高级工程师, 目前研究方向为地基土风险等级评价, E-mail: 59239881@qq.com;

王兴 硕士研究生, 目前研究方向为地铁盾构及地下施工技术, E-mail: 1661903571@qq.com;

高成梁 讲师, 目前研究方向为岩土工程病害治理, E-mail: 21354341@qq.com;

夏炜燕 硕士研究生, 目前研究方向为地质灾害治理, E-mail: 1587748216@qq.com.