

模糊粗糙集在混凝土结构 耐久性环境区划中的应用

罗大明, 牛荻涛

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:将模糊集与粗糙集理论引入混凝土结构耐久性环境区划中,在实测数据离散化的基础上对原始数据进行挖掘,将各种耐久性影响因素的权重分配问题转化为粗糙集的属性重要性评价问题,得出混凝土结构耐久性影响因素的关系数据模型,经过属性值特征化建立了知识系统,通过分析各影响因素对混凝土结构耐久性的影响程度,提出了混凝土结构耐久性环境区划方法.对深圳地区混凝土结构耐久性环境区划结果表明,该方法有效地克服了传统定权方法的缺点,使评价结果更具客观性,提高了综合评判的准确性和有效性.

关键词:混凝土结构;耐久性;环境分析;模糊集;粗糙集

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)04-0540-08

混凝土结构所处的工作环境变化多样,不同地区的建筑环境条件差异很大,使得各地区的混凝土结构耐久性损伤机理与程度不同,结构耐久性劣化形式亦有其地域性特点.若能根据各地区特有的环境条件,寻求合理的耐久性设计方法,对于确保混凝土结构耐久性、延长其使用寿命具有重要的意义.目前国内多名学者对混凝土结构耐久性环境区划进行了研究,并取得了一定的成果^[1-2].但是,这些研究仅仅对部分省份或者全国范围进行研究,没有将区划指标定量化,且仅根据环境对混凝土结构耐久性的影响进行了定性的区划,存在较强的主观性,不能准确反映实际情况.

混凝土结构耐久性环境区划是一个复杂的多参数、多指标评价问题,评价指标的选取及其权重的确定直接关系到区划的合理性以及分区精度的高低.近年来,随着智能信息技术的飞速发展,各种信息处理方法如神经网络理论^[3-5]、模糊理论^[6-7]及粗糙集理论^[8-9]等已大量应用于土木工程各个领域.为了定量地进行混凝土结构耐久性环境区划,本文依据模糊聚类与粗糙集这两者的互补性^[10-11],提出一种基于模糊集与粗糙集的客观权重分配方法,将权重确定问题转化为粗糙集的属性重要性评价问题,可以较好地避免主观评价因素的选取和主观权值的评估,最后以深圳市混凝土结构耐久性环境区划为例验证了该方法的合理性.

1 模糊聚类分析与粗糙集相关理论

1.1 模糊聚类分析

传统聚类分析方法是每个待处理的对象严格划分到某个类别中,是一种硬划分,具有“非此即彼”的性质,而客观事物的类别并不是十分明确,它们在性态和类属方面存在着中介性,具有“亦此亦彼”的性质,因此用模糊聚类分析的方法来处理不分明的对象是行之有效的^[12].模糊聚类可得到样本属于各个类别的不确定性程度,表达了样本类属的中介性,即建立起样本对于类别的不确定性描述,更能客观地反映现实世界,使分类效果更符合实际.

对于混凝土结构耐久性环境区划,令 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为被检测建筑物的全体,这些建筑物将根据其耐久性劣化原因被分成不同的类别,每个检测样本 x_i 由一组数据 $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 共 m 个耐久

收稿日期:2012-07-06 修改稿日期:2013-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278403);陕西省“13115”科技创新工程项目(2010ZDKG-55)

作者简介:罗大明(1986-),男,江西吉安人,博士生,主要从事混凝土结构耐久性方面的研究.

性影响因素检测值来表征,从而得到原始数据矩阵.

模糊聚类分析的步骤如下^[13]:

第1步数据标准化.不同影响因素检测值一般会有不同的量纲,为了使不同量纲的量也能进行比较,可采用平移·标准差变换或平移·极差变换的方法对数据作适当的处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{s_j} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

式中: μ_j 和 s_j 分别为 x_{ij} 的均值和标准差, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$.

第2步建立模糊相似矩阵 \mathbf{R} . 用标准化的数据标定计算各个检测样本间的相似系数 $r_{ij} = \mathbf{R}(x_i, x_j)$, 建立模糊相似矩阵.

第3步建立模糊等价矩阵 \mathbf{R}^* . 模糊相似矩阵一般不具有传递性,只具有自反性和对称性,可采用传递闭包法求出等价矩阵 \mathbf{R}^* ; 逐步计算 $\mathbf{R}^2, \mathbf{R}^4, \dots$, 直至 $\mathbf{R}^k = \mathbf{R}^{2k} = \mathbf{R}^2$.

第4步聚类. 选取不同的置信水平值 λ , 将第3步得到的模糊等价矩阵 \mathbf{R}^* 的行列逐渐归并得到不同的聚类结果. 当 $r_{ij} \geq \lambda$ 时, 认为相似程度接近并归为一类, 对于混凝土结构耐久性环境区划而言, 可认为混凝土结构耐久性影响因素相似; 当 $r_{ij} \leq \lambda$ 时, 各归为一类. λ 值越大, 样本元素稳定性越高, 细节区分越多; λ 值越小, 分类结果越粗糙. 因此, 置信水平 λ 不同, 所得到的分类结果也不同, 为确定符合混凝土耐久性环境区划的最佳阈值 λ , 本文采用 \mathbf{F} -统计量^[13] 的方法.

在聚类分析过程中, 通过原始数据矩阵求出:

$$\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \dots, \bar{x}_m) \quad (3)$$

其中

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}, k = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

式中: \bar{x} 称为总体样本的中心向量.

设对应于 λ 值的分类数为 r , 第 j 类的聚类样本数为 n_j , 第 j 类的样本记为 $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_{n_j}^{(j)}$, 第 j 类的聚类中心为 $\bar{x}^{(j)} = (\bar{x}_1^{(j)}, \bar{x}_2^{(j)}, \dots, \bar{x}_k^{(j)}, \dots, \bar{x}_m^{(j)})$, 其中 $\bar{x}_k^{(j)}$ 为第 k 个特征的平均值:

$$\bar{x}_k^{(j)} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ik}^{(j)}, k = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

作 \mathbf{F} -统计量, 即:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^r n_j \|\bar{x}^{(j)} - \bar{x}\|^2 / (r-1)}{\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - \bar{x}^{(j)}\|^2 / (n-r)} \quad (6)$$

式中: $\|\bar{x}^{(j)} - \bar{x}\| = \sum_{k=1}^m (\bar{x}_k^{(j)} - \bar{x}_k)^2$ 为 $\bar{x}^{(j)}$ 与 \bar{x} 的距离, 为第 j 类中样本 $x_i^{(j)}$ 与 $\bar{x}^{(j)}$ 的距离. \mathbf{F} -统计量的分子表征类与类之间的距离, 分母表征类内样本间的距离. 因此, \mathbf{F} 值越大, 说明类与类之间的距离越大, 即类与类之间的差异越大, 分类效果越好.

1.2 粗糙集相关理论

粗糙集理论是波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的一种研究不完整、不确定知识和数据的表达、学习、归纳的理论方法, 其主要思想就是在保持分辨能力不变的前提下, 通过知识约简, 导出问题的决策或分类规则. 由于具有不需要提供求解问题时所需处理的数据集合之外的先验知识的特点, 粗糙集已成功地在数据挖掘、模式识别、机器学习与智能控制等领域得到广泛应用^[14-16].

混凝土结构耐久性环境通常无详细的描述数据, 无法对影响结构耐久性的各因素进行详细统计分析获得指标权重. 为了解决该问题, 将粗糙集理论引入, 从粗糙描述数据中确定影响混凝土结构耐久性各环境因素的重要性.

定义 1: 知识表达系统

$$S = (U, A, V, f) \quad (7)$$

式中: U 为样本的集合; $A = C \cup D$ 为属性集合, 其中 C 和 D 分别为对象的条件属性和决策属性; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ 为属性值的集合; $f: U \times (C \cup D) \rightarrow V$ 为一个信息函数, 它指定了 U 中每个样本的属性值. 每一个属性子集 $R \subseteq A$ 决定了一个二元不可区分关系 $IND(R)$:

$$IND(R) = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in R, f(x, a) = f(y, a)\} \quad (8)$$

定义2: 给定知识表达系统 $S = (U, A, V, f)$, 对于每个子集 $X \subset U$ 和不可区分关系 $R \subset A$, X 的上近似集和下近似集定义如下:

$$R_+(X) = \bigcup \{Y \subset U/IND(R) \mid Y \cap X \neq \emptyset\} \quad (9)$$

$$R_-(X) = \bigcup \{Y \subset U/IND(R) \mid Y \subset X\} \quad (10)$$

定义3: 两个属性集 C 与 D 之间的依赖程度 $\gamma(C, D)$ 定义为

$$\gamma(C, D) = |POS_C(D)| / |U| \quad (11)$$

式中: $POS_C(D) = C_-(D)$, $|U|$ 表示整个集合对象的个数.

定义4: 属性 $a \in C$, 属性 a 关于 D 的重要程度定义为

$$SGF(a, C, D) = \gamma(C, D) - \gamma(C - \{a\}, D) \quad (12)$$

式中: $\gamma(C - \{a\}, D)$ 表示在 C 中删除属性 a 后, 条件属性对决策属性的依赖程度.

2 混凝土结构耐久性环境区划指标权重分配方法

对混凝土结构耐久性环境进行区划时, 必须考虑各种指标的权重分配. 利用粗糙集理论确定各个区划指标的权重, 其实质是在保持分类能力不变的前提下, 利用粗糙集中属性约简的思想来确定各指标的重要程度, 从而解决权重分配问题. 首先根据结构耐久性区划指标进行模糊聚类, 找到最佳分类, 用同样的方法, 依次删除单个指标 C_i 再进行模糊聚类, 通过判断删除某个指标后整个系统结构变化程度的大小, 定义该指标的贡献度. 贡献度越大, 表明该指标对维持整个系统稳定性的重要程度越大, 其赋权也应越大. 具体步骤如下:

第1步以所有检测样本作为论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 耐久性区划指标作为条件属性, 其值为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 结构或构件耐久性损伤等级作为决策属性, 其值为 $D = \{d\}$, 得到原始数据矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} & d_1 \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} & d_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} & d_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

按传统模糊聚类分析的步骤进行分类.

第2步由 F -统计量方法确定最佳置信水平阈值 λ , 分别按区划指标和耐久性损伤等级对被检测建筑进行等价类划分, 找出最佳分类:

$$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_s\} \quad (14)$$

式中: Y_i 表示一个等价集, 将该分类当作对应于某个耐久性损伤等级的等价关系的集合.

第3步为了找出某区划指标 $c_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的重要性, 删除该指标后, 得到删除后的数据矩阵. 用第二步的方法对该矩阵进行模糊聚类分析, 得到依次删除指标 c_i 后的分类集:

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\} \quad (15)$$

式中: $E_i = \{Y_1^{(i)}, Y_2^{(i)}, \dots, Y_k^{(i)}\}$ 表示删除第 i 个区划指标后得到的分类等价集, 对于不同的 i 值, k 也可能不同; $Y_l^{(i)} (1 \leq l \leq k)$ 表示删除第 i 个区划指标后得到分类的第 l 个等价集.

第4步利用粗糙集相关理论, 求解每个指标的重要程度. 由粗糙集理论定义2分别求解各耐久性损伤等级的各等价集下近似集的并集:

$$POS_{C-\{c_i\}}(D) = \{C - \{c_i\}\}_-(D) = \bigcup \{\{C - \{c_i\}\}_-Y_l\} \quad (16)$$

对每个区划指标 c_i , 由粗糙集理论定义3分别计算耐久性损伤等级 D 对区划指标集 C 和区划指标

集 $C - \{c_i\}$ 的依赖程度:

$$\gamma(C,D) = | POS_C(D) | / | U | \tag{17}$$

$$\gamma(C - \{c_i\}D) = | POS_{C - \{c_i\}}(D) | / | U | \tag{18}$$

再由粗糙集理论定义 4 求解区划指标 c_i 的重要程度 $SGF(c_i, C, D)$.

第 5 步根据每个区划指标的重要程度,用归一化处理方法分配权重,得到更直观的比较结果.

$$W_i = SGF(c_i,C,D) / \sum_{k=1}^m SGF(c_k,C,D) \tag{19}$$

通过关系数据模型的建立与属性值特征化建立知识系统,在数据驱动下通过对被评价对象的支持度和重要性分析,计算出权重.这是本文提出的一种客观分配耐久性区划指标权重的方法.

3 混凝土结构耐久性环境区划实例分析

深圳市自 20 世纪 80 年代以来兴建了大量建筑物,由于建设初期对混凝土结构耐久性问题认识不足,许多混凝土结构存在严重的耐久性安全隐患.本次调查兼顾不同的建成年份、结构型式和地理位置,对深圳市 515 栋在役混凝土结构进行了耐久性影响因素检测及耐久性损伤等级评估,结果表明:多数被调查的建筑物存在耐久性问题,并表现出鲜明的区域性特征.在对深圳市进行耐久性环境区划的过程中,考虑现场检测可操作性,确定耐久性环境区划指标为混凝土碳化深度、混凝土表面氯离子含量、环境温度、环境相对湿度.以深圳市盐田区盐田渔港码头露天栈桥、深圳东和小学教学楼、海洋世界生物娱乐中心等结构的检测结果为例进行分析.选取 20 个检测样本作为论域 $U = \{1, 2, \dots, 20\}$;条件属性集 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ 分别为混凝土碳化深度、混凝土表面氯离子含量、环境温度、环境相对湿度 4 个耐久性区域划分指标;决策属性集 $D = \{d\}$ 为样本构件耐久性损伤等级,可依据《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007)^[17] 计算得到,其中,1 表示构件基本无耐久性损伤,2 表示构件有机械损伤或轻微耐久性损伤,3 表示构件有较严重耐久性损伤,4 表示构件有严重耐久性损伤.检测数据如表 1 所示.

表 1 混凝土结构检测数据(摘录)

Tab. 1 Detecting data of concrete structures(Extract)

Durabilityenvironmental division index					
Sample number	Concrete carbonation depth/mm	Surface chloride concentration of concrete (weight ratio, %)	Ambient temperature /℃	Ambient relative humidity /%	Durability damage level
1	17	1.39	23.91	80	3
2	27	0.80	23.25	72	1
3	18	2.18	23.5	79	3
4	16	1.59	23.94	83	4
5	9	1.98	23.31	85	4
6	22	0.80	23.25	75	2
7	20	2.18	23.67	80	3
8	28	0.01	22.46	74	2
9	26	0.20	22.59	72	1
10	17	2.78	23.28	79	3
11	25	0.39	22.32	74	2
12	7	2.18	23.17	86	4
13	12	2.97	23.88	84	4
14	16	1.19	22.66	84	4
15	21	0.60	23.12	78	3
16	26	0.99	22.47	73	2
17	21	2.58	22.9	80	3
18	10	2.18	23.55	85	4
19	22	0.99	22.41	80	3
20	10	2.38	22.74	86	4
\bar{x}_k	18.50	1.52	23.12	79.45	2.95
\bar{s}_k	6.26	0.88	0.51	4.76	0.97

采用标准差标准化的方法对上述检测值进行处理,以消除量纲的影响,并采用欧式距离法建立模糊相似矩阵 R ;然后用平方法求传递闭包,得模糊等价矩阵 R^* :

1	0.783	0.859	0.91	0.817	0.783	0.859	0.783	0.783	0.859	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	0.859	0.817	0.783	0.817
0.783	1	0.783	0.783	0.783	0.87	0.783	0.818	0.818	0.783	0.818	0.783	0.783	0.818	0.87	0.818	0.783	0.783	0.818	0.783
0.859	0.783	1	0.859	0.817	0.783	0.937	0.783	0.783	0.898	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	0.874	0.817	0.783	0.817
0.91	0.783	0.859	1	0.817	0.783	0.859	0.783	0.783	0.859	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	0.859	0.817	0.783	0.817
0.817	0.783	0.817	0.817	1	0.783	0.817	0.783	0.783	0.817	0.783	0.936	0.854	0.783	0.783	0.783	0.817	0.931	0.783	0.875
0.783	0.87	0.783	0.783	0.783	1	0.783	0.818	0.818	0.783	0.818	0.783	0.783	0.818	0.896	0.818	0.783	0.783	0.818	0.783
0.859	0.783	0.937	0.859	0.817	0.783	1	0.783	0.783	0.898	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	0.874	0.817	0.783	0.817
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	1	0.921	0.783	0.911	0.783	0.783	0.821	0.818	0.899	0.783	0.783	0.823	0.783
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	0.921	1	0.783	0.911	0.783	0.783	0.821	0.818	0.899	0.783	0.783	0.823	0.783
0.859	0.783	0.898	0.859	0.817	0.783	0.898	0.783	0.783	1	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	0.874	0.817	0.783	0.817
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	0.911	0.911	0.783	1	0.783	0.783	0.821	0.818	0.899	0.783	0.783	0.823	0.783
0.817	0.783	0.817	0.817	0.936	0.783	0.817	0.783	0.783	0.817	0.783	1	0.854	0.783	0.783	0.783	0.817	0.931	0.783	0.875
0.817	0.783	0.817	0.817	0.854	0.783	0.817	0.783	0.783	0.817	0.783	0.854	1	0.783	0.783	0.783	0.817	0.854	0.783	0.854
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	0.821	0.821	0.783	0.821	0.783	0.783	1	0.818	0.821	0.783	0.783	0.821	0.783
0.783	0.87	0.783	0.783	0.783	0.896	0.783	0.818	0.818	0.783	0.818	0.783	0.783	0.818	1	0.818	0.783	0.783	0.818	0.783
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	0.899	0.899	0.783	0.899	0.783	0.783	0.821	0.818	1	0.783	0.783	0.823	0.783
0.859	0.783	0.874	0.859	0.817	0.783	0.874	0.783	0.783	0.874	0.783	0.817	0.817	0.783	0.783	0.783	1	0.817	0.783	0.817
0.817	0.783	0.817	0.817	0.931	0.783	0.817	0.783	0.783	0.817	0.783	0.931	0.854	0.783	0.783	0.783	0.817	1	0.783	0.875
0.783	0.818	0.783	0.783	0.783	0.818	0.783	0.823	0.823	0.783	0.823	0.783	0.783	0.821	0.818	0.823	0.783	0.783	1	0.783
0.817	0.783	0.817	0.817	0.875	0.783	0.817	0.783	0.783	0.817	0.783	0.875	0.854	0.783	0.783	0.783	0.817	0.875	0.783	1

利用 F -统计量方法确定最佳阈值 $\lambda = 0.91$, 故按照区划指标 C 和耐久性损伤等级 D 对 20 个被检测建筑进行等价类划分的结果为:

$$U/IND(C) = \{\{1,4\}, \{2\}, \{3,7\}, \{5,12,18\}, \{6\}, \{8,9,11\}, \{10\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{19\}, \{20\}\};$$

$$U/IND(D) = \{\{2,9\}, \{6,8,11,16\}, \{1,3,7,10,15,17,19\}, \{4,5,12,13,14,18,20\}\};$$

类似地, 分别删除区划指标 c_i 条件属性后, 用模糊聚类的方法进行分类, 各种最佳分类情况如下:

$$U/IND(C - \{c_1\}) = \{\{1,4\}, \{2,6,15\}, \{3,7,10,17\}, \{5,12,18\}, \{8,9,11,16\}, \{13\}, \{14\}, \{19\}, \{20\}\};$$

$$U/IND(C - \{c_2\}) = \{\{1,3,4,7,10,13,15,17\}, \{2\}, \{5,12,18\}, \{6\}, \{8,9,11,16\}, \{14\}, \{19\}, \{20\}\};$$

$$U/IND(C - \{c_3\}) = \{\{1\}, \{2,16\}, \{3,7,17\}, \{4,14\}, \{5,12,18,20\}, \{6,8,9,11\}, \{10\}, \{13\}, \{15,19\}\};$$

$$U/IND(C - \{c_4\}) = \{\{1,4\}, \{2,6,15\}, \{3,7\}, \{5,12,18\}, \{8,9,11,16,19\}, \{10\}, \{13\}, \{14\}, \{17\}, \{20\}\};$$

分别求解各耐久性损伤等级的各等价集下近似集的并集:

$$POS_C(D) = \{2,3,5,6,7,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20\}$$

$$POS_{C-\{c_1\}}(D) = \{3,5,7,10,12,13,14,17,18,19,20\}$$

$$POS_{C-\{c_2\}}(D) = \{2,5,6,12,14,18,19,20\}$$

$$POS_{C-\{c_3\}}(D) = \{1,3,4,5,7,10,12,13,14,15,17,18,19,20\}$$

$$POS_{C-\{c_4\}}(D) = \{3,5,7,10,12,13,14,17,18,20\}$$

通过计算耐久性损伤等级 D 对区划指标集 C 和各区划指标集 $C - \{c_i\}$ 的依赖程度, 分别求解各区划指标 c_i 的重要程度:

$$SGF(c_1, C, D) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-\{c_1\}}(D) = \frac{|POS_C(D)|}{|U|} - \frac{|POS_{C-\{c_1\}}(D)|}{|U|} = \frac{15}{20} - \frac{11}{20} = \frac{4}{20}$$

$$SGF(c_2, C, D) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-\{c_2\}}(D) = \frac{|POS_C(D)|}{|U|} - \frac{|POS_{C-\{c_2\}}(D)|}{|U|} = \frac{15}{20} - \frac{8}{20} = \frac{7}{20}$$

$$SGF(c_3,C,D)=\gamma_c(D)-\gamma_{c-(c_3)}(D)=\frac{|POS_c(D)|}{|U|}-\frac{|POS_{c-(c_3)}(D)|}{|U|}=\frac{15}{20}-\frac{14}{20}=\frac{1}{20}$$
$$SGF(c_4,C,D)=\gamma_c(D)-\gamma_{c-(c_4)}(D)=\frac{|POS_c(D)|}{|U|}-\frac{|POS_{c-(c_4)}(D)|}{|U|}=\frac{15}{20}-\frac{10}{20}=\frac{5}{20}$$

最后对上述区划指标的重要程度进行归一化处理,得到各耐久性影响因素的权重:

$$(\omega_{c_1},\omega_{c_2},\omega_{c_3},\omega_{c_4})=(0.235\ 3,0.411\ 8,0.058\ 8,0.294\ 1)$$

(20)

由式(20)可见,在影响深圳市盐田区混凝土结构耐久性的因素中,混凝土表面氯离子含量的影响最大,环境相对湿度和混凝土碳化的影响次之,环境温度的影响相对较小.采用同样的方法,对深圳市 515 栋在役混凝土结构进行耐久性影响因素分析及耐久性损伤等级评估,分析得出各建筑耐久性影响因素的权重.根据被调查建筑物的耐久性劣化形式,综合考虑深圳市行政区划及龙大高速、广深高速、机荷高速、惠深高速、惠盐高速等重要交通道路区划,将深圳市分为氯离子侵蚀区(Ⅰ区)、以氯离子侵蚀为主,碳化作用为辅的近海大气区(Ⅱ区)、以及以碳化作用为主的一般大气区(Ⅲ区),结果见表 2.根据该区划结果,绘制深圳市混凝土结构耐久性环境区划图,如图 1 所示.

表 2 深圳市混凝土结构耐久性环境区划结果

Tab. 2 Result of durability environmental divisions of concrete structures in Shenzhen City

Weight of durabilityenvironmental division indexes					Geographical area
Regions	Surface chloride concentration of concrete	Concrete carbonation depth	Ambient temperature	Ambient relative humidity	
Region I	0.315 4~0.425 0	0.180 3~0.256 0	0.015 4~0.173 7	0.021 3~0.312 5	A narrow distribution along the coastline, Mainly in the south of Guangzhou-Shenzhen Highway
Region II	0.275 8~0.323 9	0.244 5~0.346 0	0.075 8~0.123 9	0.025 0~0.237 5	Central of Bao'an District, Northern of Nanshan and Futian District, most parts of the Luohu and Yantian District, southern of Longgang District
Region III	0.176 2~0.261 8	0.321 9~0.479 5	0.075 8~0.199 8	0.021 9~0.184 3	Mainly in the north of Longda Expressway, Huiyan Highway, and Shenzhen-Shantou Expressway

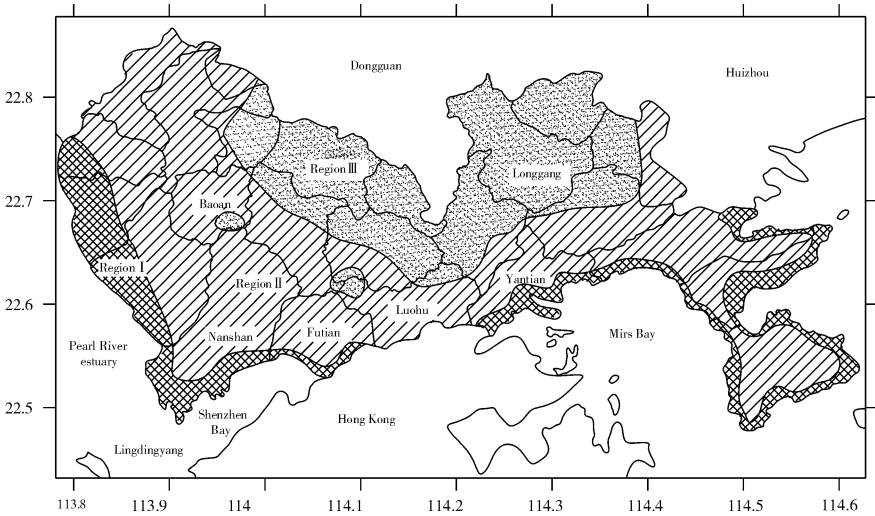


图 1 深圳市混凝土结构耐久性影响因素区划图

Fig. 1 Division map of durability environment for concrete structures in Shenzhen City

由表2和图1可以看出,从氯离子侵蚀区(Ⅰ区)到一般大气区(Ⅲ区),在役混凝土结构耐久性受氯离子侵蚀的影响逐渐减弱,而碳化作用所带来的影响逐渐成为主导。

在氯离子侵蚀区(Ⅰ区),氯离子侵蚀为混凝土结构耐久性破坏的主要因素。同时,由于大气相对湿度较高,混凝土中孔隙水含量的增加有利于氯离子的扩散和渗透,加重了由氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀和混凝土保护层剥落现象。检测结果亦表明,构件表面氯离子浓度达到甚至超过规范规定的限值,结构耐久性劣化严重。混凝土结构耐久性设计时应着重考虑氯离子侵蚀的影响。

近海大气区(Ⅱ区)则涵盖了深圳特区的大部分地区。随着离海距离的增加,空气中盐含量迅速降低。这是由于莲花山系的阻挡,迫使海风气流抬升,海风携带的盐雾大部分被山岩及树木吸附;加之深圳市近年城市化进程加快,深圳市南部高楼密集,地面空气流通受阻,空气中的盐核大量沉降,这与实际环境大气中盐雾浓度及盐雾沉降量随离海距离的增加呈指数递减^[18]相符合。Ⅱ区混凝土结构受氯离子侵蚀与碳化作用的影响均较为显著,构件钢筋锈蚀比较严重,混凝土保护层表现出大量顺筋裂缝,甚至大面积剥落。在混凝土结构耐久性设计时需要同时考虑氯离子侵蚀及碳化作用的影响。

空气中的盐核在Ⅰ、Ⅱ区大量沉降之后,一般大气区(Ⅲ区)空气中含盐量大为减少,碳化作用为该区域混凝土结构耐久性破坏的主要因素,在役混凝土结构中钢筋偶有轻度锈蚀,部分构件的混凝土保护层有少量顺筋裂缝或由于厚度不够而剥落,构件表面氯离子浓度未达到规范规定的限值。该区域的建筑在混凝土结构耐久性设计时可以不考虑氯离子侵蚀作用的影响。

4 结 论

(1)将模糊聚类分析与粗糙集相关理论引入混凝土结构耐久性环境区划中,提出了耐久性区划指标的定量计算方法,提高了耐久性环境区划质量和分区精度。建议方法能够对具体城市或地区进行科学的耐久性环境区划,可较为全面地反映不同地区的耐久性影响因素及影响程度。

(2)以深圳地区为背景,利用本文建立的方法对其耐久性环境进行了区划,最终得到的区划结果与深圳市混凝土结构耐久性劣化情况基本一致,证明了该方法的有效性与实用性。建议方法可为钢筋混凝土结构的耐久性设计、维护等提供科学依据。

参考文献 References

- [1] JIN Wei-liang, LÜ Qing-fang. Durability Zonation Standard of Concrete Structure Design [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2007, 23(1): 98-104.
- [2] 王 艳. 混凝土结构耐久性环境区划研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
WANG Yan. Durability Environmental Division for Concrete Structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Arch. & Tech., 2007.
- [3] VENKITEELA G, GREGORI A, SUN Z, et al. Artificial Neural Network Modeling of Early-Age Dynamic Young's Modulus of Normal Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(3): 282-290.
- [4] SHAH A A, ALSAYED S H, ABBAS H, et al. Predicting Residual Strength of Non-Linear Ultrasonically Evaluated Damaged Concrete Using Artificial Neural Network [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(0): 42-50.
- [5] KWON SEUNG-JUN, SONG HA-WON. Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(1): 119-127.
- [6] ANOOP M B, RAGHUPRASAD B K, RAO K B. A Refined Methodology for Durability-Based Service Life Estimation of Reinforced Concrete Structural Elements Considering Fuzzy and Random Uncertainties [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 27(3): 170-186.
- [7] CHOI K, SHERIF A G, MAHMOUD M, et al. Shear Strength of Slender Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement: A Model Using Fuzzy Set Theory [J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 768-777.
- [8] KIM Y M, KIM C K, LEE J C. Rough Set Algorithm for Crack Category Determination of Reinforced Concrete Structures [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3): 202-211.
- [9] HUANG RONG-YAU, MAO I-SHIANG, LEE HAO-KANG. Exploring the Deterioration Factors of RC Bridge

- Decks; A Rough Set Approach [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, 25(7): 517-529.
- [10] HE Qiang, WU Cong-xin, CHEN De-gang, et al. Fuzzy Rough Set Based Attribute Reduction for Information Systems with Fuzzy Decisions [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2011, 24(5): 689-696.
- [11] FENG Feng, LI Chang-xing, DAVVAZ B, et al. Soft Sets Combined with Fuzzy Sets and Rough Sets: A Tentative Approach [J]. *Soft Computing*, 2010, 14(9): 899-911.
- [12] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
GAO Xin-bo. *Fuzzy Cluster Analysis and its Applications* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- [13] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
XIE Ji-jian. *Fuzzy Mathematics Method and Applications* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2000: 81-118.
- [14] PAWLAK Z. *Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [15] PAWLAK Z. RoughSet Theory and its Applications to Data Analysis [J]. *Cybernetics and Systems*, 1998, 29(7): 661-688.
- [16] 张文修, 吴伟志. 粗糙集理论介绍和研究综述[J]. *模糊系统与数学*, 2000, 14(4): 1-12.
ZHANG Wen-xiu, WU Wei-zhi. An Introduction and a Survey for the Studies of Rough Set Theory[J], *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2000, 14(4): 1-12.
- [17] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性评定标准(CECS220:2007)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
China Engineering Construction Standardization Association. *Standard for Durability Assessment of Concrete Structures(CECS220:2007)*[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [18] 徐国葆. 我国沿海大气中盐雾含量与分布[J]. *环境技术*, 1994(3): 1-7.
XU Guo-bao. Content and Distribution of Salt at Offshore Atmosphere in Our Country [J]. *Environmental Technology*, 1994(3): 1-7.

Application of fuzzy and rough set for durability environmental division of concrete structures

LUO Da-ming, NIU Di-tao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ of Arch & Tech, Xi'an 710055, China)

Abstract: In this paper, fuzzy set and rough set theory were used in the research of durability environmental division of concrete structures. Based on discretization of the measured data, the significance of attributes among rough sets was estimated instead of weight determination, and a relational data model about the durability effecting factors of concrete structures was established. A knowledge system was built through making attribute value into eigenvalue. After that, the method of durability environmental division is established by analyzing the degree of influence which various factors have on the durability of concrete structures. The researching on durability environmental divisions of concrete structures in Shenzhen City shows that the proposed approach overcomes the subjectivity of traditional weight determination method. It possesses much more objectivity and has improved the accuracy and efficiency of comprehensive evaluation.

Key words: concrete structures; durability; environmental analysis; fuzzy set theory; rough set theory