

模糊聚类分析在构件耐久性评估中的应用初探

夏 宁¹,任青文¹,宋 力²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.江苏省水利科学研究院,江苏 扬州 225002)

摘要 基于模糊等价关系的动态聚类分析,提出了一种构件耐久性评估方法.该方法先利用相似系数在各构件的耐久性指标序列之间进行相似性度量,得到具有分类功能的模糊等价矩阵,然后按照不同的置信度水平,对构件耐久性进行动态聚类.算例分析比较结果表明,该方法不仅可避免按传统方法进行评估的不合理性,而且易于编程实现.

关键词 模糊聚类分析;构件;耐久性;评估

中图分类号 :TU375 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)04-0437-05

统计资料表明,我国现有的民用与工业建筑约有 50%亟待维修加固^[1].为了给老化结构制订一个安全、经济的维修加固方案,应对结构的整体性能进行综合评估.结构耐久性问题有两个特点:一是影响因素众多,且各因素之间关系错综复杂,其中一些因素可通过检测和试验等方法来获取信息,另外一些因素却因检测手段的局限而无法测度.因此,结构耐久性问题具有模糊性.二是模糊性的累积使结构耐久性评估结果的精度降低.在评估过程中,精确性与模糊性形成一对十分突出的矛盾,而模糊数学是解决这一矛盾的有效方法之一.

结构耐久性评估是以结构体系中各构件的耐久性评估为前提的.本文采用基于模糊等价关系的动态聚类方法对单元的耐久性进行分类.在制订维修加固方案时,可根据评估结果对耐久性等级不同的单元采用不同的维修加固措施,寻求安全、经济的最佳平衡点.

1 模糊聚类方法的原理^[2]

聚类分析是按照一定的标准对事物进行分类的数学方法.设有 n 个事物的总体 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,每一个事物用 s 个特征值来描述,即 $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{js})$ ($j = 1, 2, \dots, n$).这里 x_{jk} 表示第 j 个事物第 k 个特征的观测值.聚类分析,就是根据实际情况,按某一个标准来鉴别事物之间的接近程度,并把彼此接近的事物归为一类.模糊聚类方法有多种,本文采用基于模糊等价关系的动态聚类法.

2 构件耐久性模糊聚类分析步骤

2.1 确定耐久性评定指标体系

结构耐久性评定指标分为定性指标和定量指标两大类.其中定性指标包括在役结构所处的环境条件和结构构件的外观状况.对于上部结构来说,环境条件主要指气候条件(如温度、湿度、大气中侵蚀性介质的类型、含量和作用范围);结构构件的外观状况是指构件的完好情况,如混凝土保护层是否完好,构件表面有无锈斑,构件表面裂缝的位置、数量等.定量指标包括材料的劣化速度和残余强度、构件的变形、表面裂缝长度、宽度以及深度等.本文采用文献[3]所用的耐久性指标(见表1).

对于定性指标,将其进行量化处理,按优劣等级将其划分为 a, b, c, d, e 5 个等级,各等级的相应取值区间为 $5 \sim 4, 4 \sim 3, 3 \sim 2, 2 \sim 1, 1 \sim 0$;对于定量指标,采用实测值或试验值.

2.2 求构件的耐久性指标矩阵

2.2.1 耐久性指标数据列的规范化处理

由于评定指标通常具有不同的量纲和数量级,不能直接对比,所以首先需要对指标数据列进行生成处

收稿日期:2003-12-18
作者简介:夏宁(1977—),女,江苏南通人,博士研究生,主要从事钢筋混凝土结构耐久性研究.

理^[4]. 本文采用指标区间值化的方法对数据列进行无量纲化和归一化处理.

表 1 耐久性指标及其变化区间和最优值

Table 1 Durability indexes and their variation intervals and optimum values

指标 上、下限	定性指标		定量指标				
	总体外观 情况	环境条件	裂缝宽度 /mm	钢筋截面 损失率/%	混凝土强度 衰减率/%	钢筋锈蚀速度 (%·a ⁻¹)	混凝土强度衰减 速度(%·a ⁻¹)
上限	5*	5*	0.6	5	10	0.5	1
下限	0	0	0*	0*	0*	0*	0*

注:带*者为耐久性指标的最优值.

若指标 k 的变化范围为 $[X_k^L, X_k^U]$, 它的实际取值为 X_k . 对于以最大值为最优的指标, 规范化处理后的

$$x_k = \frac{X_k^U - X_k}{X_k^U - X_k^L}$$

(1)

对于以最小值为最优的指标, 其规范化处理后的

$$x_k = \frac{X_k - X_k^L}{X_k^U - X_k^L}$$

(2)

显然 $x_k \in [0, 1]$ 且无量纲. 由公式 (1) (2) 可知, x_k 表示指标 k 的取值 X_k 接近最优指标的程度, x_k 越小, 表明实际指标值越接近最优指标. 耐久性指标的变化区间及最优值^[3]见表 1.

2.2.2 形成构件耐久性指标矩阵

设有 n 个待评定的构件, 以各构件规范化处理后的耐久性指标序列作为矩阵的行元素, 可得到这 n 个构件的耐久性指标矩阵, 即

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

(3)

式中 x_{ij} 为第 i 个待评定构件的第 j 个指标规范化后的取值.

2.3 求构件的模糊相似矩阵

相似性度量, 即按一定准则和方法, 给 X 中的元素两两之间赋以 $[0, 1]$ 内的一个数. 此数称为相似系数, 其大小表征两个元素彼此接近或相似的程度^[2]. 标定方法有多种, 根据耐久性问题的特点和实际操作的可行性, 本文选用绝对值减数法, 即

$$r_{ij} = 1 - c \sum_{s=1}^k |x_{is} - x_{js}| \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

(4)

式中 r_{ij} 为元素 x_i 与 x_j 的相似系数, 其中 c 应适当选取, 使 $r_{ij} \in [0, 1]$ 且分散开.

为能将构件按照耐久性优劣的标准进行分类, 需在矩阵 A 中加入 1 行参考序列, 并利用相似系数将参考序列与由各构件耐久性规范化指标组成的比较序列进行对比. 设这一参考序列为 $X_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}\}$. 由于矩阵 A 中的元素表明了实际指标值接近最优指标值的程度, 所以当参考序列表征耐久性较好时, 其中的元素可取为 0.20. 由此可得到一个 $(n+1) \times (n+1)$ 维的模糊相似矩阵 R ,

$$R = \begin{bmatrix} r_{00} & \cdots & r_{0n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n0} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

(5)

2.4 形成模糊等价矩阵

矩阵 R 不能直接进行构件耐久性分类, 需将它改造为具有分类功能的模糊等价矩阵. 由模糊数学可知, 用最小幅值提高 R 中的元素, 以达到传递性的传递闭包 $\mathcal{I}(R)$ 是模糊等价矩阵, 可利用它对构件进行耐久性分类. 求矩阵 R 的传递闭包 $\mathcal{I}(R)$ 时, 可采用“逐次平方法”^[2]:

$$R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2^k} \rightarrow \dots$$

直至出现 k_0 , 使 $R = R^{2^{k_0}}$. 对于 n 阶模糊相似矩阵, 至多只需 $\lceil \log_2 n \rceil + 1$ 步即可求得 $\mathcal{I}(R)$.

2.5 构件耐久性评定的动态聚类

设 $0 \leq \lambda \leq 1$,求矩阵 $\mathcal{K}(R)$ 的 λ 截矩阵 $[\mathcal{K}(R)]_{\lambda}$. λ 从 1 降至 0 ,按 $[\mathcal{K}(R)]_{\lambda}$ 所得的分类结果将由细变粗 ,逐步归并 ,形成一个动态聚类图 . 这里的 λ 可理解为置信度 . 显然 ,当 λ 较大时 ,和 R 中的首行归并为一类的行元素所代表的构件的耐久性较好 . 从得到的动态聚类图中 ,可以得出各构件耐久性状况隶属于较好的程度 . 究竟把哪些构件的耐久性归并为较好 ,和 λ 的取值有关 . 在评定时 ,可根据结构重要性等级、下一个目标使用年限和地区经济状况等实际情况来确定 λ 值 . 当结构重要性等级较高、下一个目标使用年限较长、地区经济状况较好时 , λ 取值亦较大 .

3 算例分析

一栋位于干湿交替的北方沿海地区的两层钢筋混凝土框架结构(见图 1),已使用 10 a ,此前结构无维修史 ,通过现场检测所得的各项耐久性指标值列于表 2^[3].

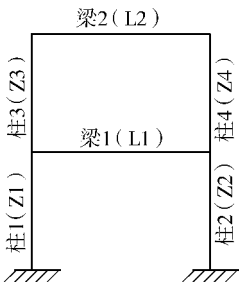


图 1 平面框架结构立面图
Fig.1 Elevational drawing of plan frame structure

表 2 各构件耐久性指标实测值

Table 2 Measured values of durability indexes of components

构件	定性指标		定量指标				
	总体外观情况	环境条件	裂缝宽度/mm	钢筋截面损失率/%	混凝土强度衰减率/%	钢筋锈蚀速度/(%·a ⁻¹)	混凝土强度衰减速度/(%·a ⁻¹)
L ₁	4.4	3.6	0.09	1.1	1.5	0.05	0.30
L ₂	4.1	3.4	0.12	1.2	2.0	0.07	0.40
Z ₁	3.8	3.0	0.21	1.6	2.5	0.12	0.50
Z ₂	3.6	3.0	0.24	1.8	2.5	0.14	0.50
Z ₃	3.9	3.6	0.27	1.2	2.0	0.09	0.40
Z ₄	4.1	3.7	0.21	1.0	2.0	0.06	0.36

3.1 耐久性指标实测值的规范化处理

用式(1)(2)对各构件耐久性指标实测值进行规范化处理的结果如表 3 所示.

表 3 各构件耐久性指标规范化处理后的结果

Table 3 Normalized durability indexes of components

构件	定性指标		定量指标				
	总体外观情况	环境条件	裂缝宽度/mm	钢筋截面损失率/%	混凝土强度衰减率/%	钢筋锈蚀速度/(%·a ⁻¹)	混凝土强度衰减速度/(%·a ⁻¹)
L ₁	0.12	0.28	0.15	0.22	0.15	0.10	0.30
L ₂	0.18	0.32	0.20	0.24	0.20	0.14	0.40
Z ₁	0.24	0.40	0.35	0.32	0.25	0.24	0.50
Z ₂	0.28	0.40	0.40	0.36	0.25	0.28	0.50
Z ₃	0.22	0.28	0.45	0.24	0.20	0.18	0.40
Z ₄	0.18	0.26	0.35	0.20	0.20	0.12	0.36

由表 3 结果可形成构件耐久性指标矩阵 A ,

$$A = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.28 & 0.15 & 0.22 & 0.15 & 0.10 & 0.30 \\ 0.18 & 0.32 & 0.20 & 0.24 & 0.20 & 0.14 & 0.40 \\ 0.24 & 0.40 & 0.35 & 0.32 & 0.25 & 0.24 & 0.50 \\ 0.28 & 0.40 & 0.40 & 0.36 & 0.25 & 0.28 & 0.50 \\ 0.22 & 0.28 & 0.45 & 0.24 & 0.20 & 0.18 & 0.40 \\ 0.18 & 0.26 & 0.35 & 0.20 & 0.20 & 0.12 & 0.36 \end{bmatrix}$$

3.2 形成模糊相似矩阵

在矩阵 A 的首行中加入参考序列 {0.20 0.20 0.20 0.20 0.20 0.20 0.20}.

采用绝对值减数法 ,即用式(4)对待评定的构件进行两两之间的标定(这里 ,式(4)_c 取 0.5) ,形成模糊相

似矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.760 & 0.780 & 0.550 & 0.465 & 0.695 & 0.765 \\ 0.760 & 1.000 & 0.820 & 0.510 & 0.425 & 0.675 & 0.785 \\ 0.780 & 0.820 & 1.000 & 0.690 & 0.605 & 0.815 & 0.845 \\ 0.550 & 0.510 & 0.690 & 1.000 & 0.915 & 0.735 & 0.685 \\ 0.465 & 0.425 & 0.605 & 0.915 & 1.000 & 0.700 & 0.600 \\ 0.695 & 0.675 & 0.815 & 0.735 & 0.700 & 1.000 & 0.850 \\ 0.765 & 0.785 & 0.845 & 0.685 & 0.600 & 0.850 & 1.000 \end{bmatrix}$$

3.3 求模糊等价矩阵

采用“逐次平方法”求模糊相似矩阵 R 的模糊等价矩阵,通过计算可得

$$R^8 = R^4 \circ R^4 = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.780 & 0.780 & 0.735 & 0.735 & 0.780 & 0.780 \\ 0.780 & 1.000 & 0.820 & 0.735 & 0.735 & 0.820 & 0.820 \\ 0.780 & 0.820 & 1.000 & 0.735 & 0.735 & 0.845 & 0.845 \\ 0.735 & 0.735 & 0.735 & 1.000 & 0.915 & 0.735 & 0.735 \\ 0.735 & 0.735 & 0.735 & 0.915 & 1.000 & 0.735 & 0.735 \\ 0.780 & 0.820 & 0.845 & 0.735 & 0.735 & 1.000 & 0.850 \\ 0.780 & 0.820 & 0.845 & 0.735 & 0.735 & 0.850 & 1.000 \end{bmatrix} = R^4 = \kappa(R)$$

3.4 构件耐久性评定的动态聚类

a. $\lambda = 0.91$ 时 ,

$$\kappa(R)_{0.91} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分成 6 类 : $\{M^*\}$, $\{L_1\}$, $\{L_2\}$, $\{Z_1, Z_2\}$, $\{Z_3\}$, $\{Z_4\}$.可见 ,由于 Z_1 和 Z_2 的耐久性状况极为相似 ,因此在置信度水平较高(即 λ 较大)时就聚为一类 ,说明它们属于同一耐久性等级.

b. $\lambda = 0.85$ 时 ,分成 4 类 : $\{M^*\}$, $\{L_1\}$, $\{Z_1, Z_2\}$, $\{L_2, Z_3, Z_4\}$.

c. $\lambda = 0.82$ 时 ,分成 3 类 : $\{M^*\}$, $\{L_1, L_2, Z_3, Z_4\}$, $\{Z_1, Z_2\}$.

d. $\lambda = 0.78$ 时 ,分成 2 类 : $\{M^*, L_1, L_2, Z_3, Z_4\}$, $\{Z_1, Z_2\}$.

e. $\lambda = 0.74$ 时 ,分成 1 类 : $\{M^*, L_1, L_2, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$.

由以上分类结果 ,可以画出构件耐久性评定的动态聚类图 ,见图 2.由此可得出结论 :构件 L_1, L_2, Z_3, Z_4 的耐久性较好 , Z_1, Z_2 的耐久性较差.

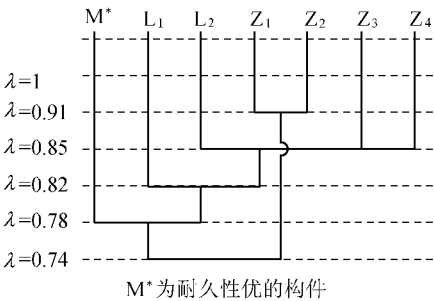


图 2 构件耐久性评定的动态聚类
Fig.2 Dynamic cluster figure of durability evaluation of components

4 结 语

- a. 本文方法计算所得的结果与文献[3]所得结果基本吻合 ,说明本文方法是合理的.
- b. 本文方法充分考虑了“耐久性”概念的模糊性 ,避免了过去传统方法采用耐久性划界指标进行硬性划分的不合理性 ,基于模糊聚类分析法的实施步骤规律性强 ,易于编程实现.
- c. 本文方法的不足之处 (a) $\kappa(R)$ 对 R 会产生传递偏差 ,影响耐久性评估结果的准确性.虽然在多数情况下 ,传递偏差不至于导致分类结果的不合理 ,但还必须引起重视.传递偏差有传递总偏差、传递均偏差、相对传递总偏差和相对传递均偏差^[2]4 个衡量指标 ,它与相似系数 r_{ij} 的算法有关.为了使传递偏差达到最小 ,

可将传递偏差的 4 个衡量指标作为多目标优化问题的 4 个目标函数 ,从中选择一种最优的 r_{ij} 算法.(b)在耐久性评估实际中 , r_{ij} 算法的选择以及模糊相似矩阵中参考序列元素值的确定 ,目前还没有相关理论可以遵循 ,只能根据经验进行.

参考文献 :

[1] 金伟良 ,赵羽习 .混凝土结构耐久性[M].北京 :科学出版社 ,2002.2.
[2] 黄健元 .模糊集及其应用[M].银川 :宁夏人民教育出版社 ,1999.90—125.
[3] 卢木 .基于耐久性评定的钢筋混凝土结构的剩余寿命预测[J].建筑科学 ,1999 ,15(2) 23—28.
[4] 刘思峰 .灰色系统理论及其应用[M].北京 :科学出版社 ,2002.100—110.

Application of fuzzy cluster analysis to evaluation
of durability of components

XIA Ning¹ , REN Qing-wen¹ , SONG Li²

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Jiangsu Research Institute of Hydraulic Science , Yangzhou 225002 , China)

Abstract : Based on the dynamic cluster analysis of fuzzy equivalence relation , a durability evaluation method for components was proposed. In this method , the similarity coefficient was used for similarity measurement in durability index series of different components , and a fuzzy equivalence matrix with sort function was obtained. Then the dynamic cluster of the durability of components was performed according to different degrees of confidence. An example was given to show that the present method could avoid the irrationality of the conventional method and could be easily realized by programming.

Key words : fuzzy cluster analysis ; component ; durability ; evaluation