

文章编号 1006-544X(2000)02-0155-04

# 托换结构可靠性模糊综合评判的探索

邓友生 周国恩

(广西工学院土建系, 广西柳州 545005)

**摘要** 应用模糊数学方法对广州地铁一号线某地段的楼房桩基托换结构工程通过建立两种模型进行可靠性分析。首先建立二级模糊综合评判模型框架, 然后构造隶属函数和根据各因素的重要性利用层次分析法确定权重, 最后得出结论。

**关键词** 地基基础; 托换; 可靠性; 模糊评判; 层次分析法

中图分类号 TU470.2; TB11

文献标识码 A<sup>①</sup>

地基基础属于地下隐蔽工程。由于构成地基岩土的多变性、变异性和复杂性, 基础材料的不完全均匀性, 施工与设计的差异性, 特别是桩基础深入岩层, 由于勘察不可能反映全部地下真实情况, 因而存在大量的不确定性、不精确性。这种不确定性、不精确性既具有随机性, 更具有模糊性, 很难用传统数学中的精确性、确定性的概念来描述。因此, 应用模糊数学来处理和研究这些模糊现象更具有理论与实际意义。

## 1 建立模糊综合评判的模型框架

综合评判就是对多因素影响的事件作出总的评论。由于影响托换结构的因素很多(如地基、桩基、预应力主梁、托换次梁等等)如果按一级评判模型来评价, 那么每个因素的权重分配很小, 所以在合成运算中取小时, 评判矩阵的元素被筛选过多而致使评判失效; 另一方面, 影响因素数不宜过多, 过多则权重分配难以合理, 即难以反映各因素在整体中的地位<sup>[1]</sup>。故本文采用二级综合评判模型。

根据托换结构的组成及其影响质量的因素分成两个层次(二级)逐级评判。首先按影响托换结构基本单元(如地基、桩基、托换次梁、预应

力主梁等)功能可靠性因素(如沉降、承载力、变形等)建立因素集及其隶属函数; 随后用层次分析法建立各因素权重集, 由上一级评判结论, 构造下一级评判矩阵, 最后用加权平均数学模型给出评判结论。图1为二级模糊综合评判模型框架, 图中 $A_1, A_2, A_3$ 和 $A_4$ 分别代表托换结构中地基、桩基、托换次梁和主梁的权重;  $R_i (i=1, \dots, 4)$ 代表一级因素评判矩阵;  $B_i (i=1, \dots, 4)$ 代表一级评判结论;  $A$ 代表二级因素权重集,  $R$ 代表二级因素评判矩阵,  $B$ 代表二级评判结论, 箭头代表评判行进方向。

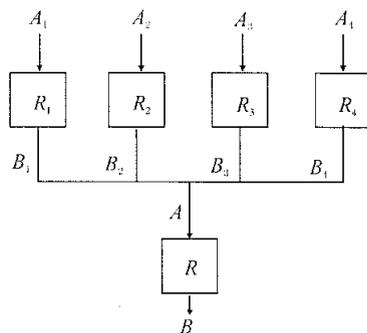


图1 二级模糊综合评判模型框架  
Fig.1 Frame of 2-grade fuzzy comprehensive evaluation models

① 1999-09-30 收稿, 2000-01-26 改回。

第一作者简介: 邓友生(1971-), 男, 硕士, 讲师, 岩土工程专业。

## 2 单因素的隶属函数及其评判

参照现行《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ 144-90)<sup>[2]</sup>将因素评价域分4个等级,即评价集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{a, b, c, d\}$ 。其中: $a$ 级满足规范要求,如构件承载力,取  $R/(r_0S) \geq 1.0$  ( $R$ 为构件抗力, $S$ 为荷载效应, $r_0$ 为构件重要度); $b$ 级略低于规范要求,以不必采取补救措施为准,按可靠指标  $\beta$  调整0.25,相对  $R/(r_0S)$  调低0.1,即  $R/(r_0S) = 0.90$ ;  $c$ 级为不满足规范要求; $d$ 级为严重不满足规范要求,其分界线也是区分危险构件的标准,取  $R/(r_0S) = 0.85$  为分界线。该评价标准并非完全合理<sup>[3]</sup>,如  $R/(r_0S) = 0.899$ ,似应评为  $c$ 级,  $R/(r_0S) = 0.901$  似应评  $b$ 级;但  $R/(r_0S)$

$= 0.900 \sim 0.999$  也应评为  $b$ 级,前两个级差仅差0.002,后者却相关0.099而评在一个级别内,显得不太合理。为克服这一不足,建立以模糊数学中的隶属函数来处理的评级标准。

对于地基、基础和梁的承载力、位移、变形、沉降等定量因素可用隶属函数建立评判标准,设  $u$  为某一因素(如承载力)的物理量  $R/(r_0S)$ ,按现行标准取  $u \geq u_1$  为  $a$ 级,  $u_1 > u \geq u_2$  为  $b$ 级,  $u_2 > u \geq u_3$  为  $c$ 级,  $u_3 > u > 0$  为  $d$ 级。为了连续化,规定  $u_1$  为  $a$ 级标准值,  $(u_1 + u_2)/2$  为  $b$ 级标准值,  $(u_2 + u_3)/2$  为  $c$ 级标准值,  $u_3$  为  $d$ 级标准值。对应  $a, b, c, d$  各级的隶属函数符合岭形分布,其表达式如下(图2)。 $a$ 级隶属函数

$$\mu_a(u) = \begin{cases} 1 & u > u_1 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_1 - u_2} \left( u - \frac{3u_1 + u_2}{4} \right) & u_1 \geq u > \frac{u_1 + u_2}{2} \\ 0 & u \leq (u_1 + u_2)/2 \end{cases}$$

### $b$ 级隶属函数

$$\mu_b(u) = \begin{cases} 0 & u > u_1 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_1 - u_2} \left( u - \frac{3u_1 + u_2}{4} \right) & \frac{u_1 + u_2}{2} < u \leq u_1 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_1 - u_3} \left( u - \frac{u_1 + 2u_2 + u_3}{4} \right) & \frac{u_2 + u_3}{2} < u \leq \frac{u_1 + u_2}{2} \\ 0 & u \leq (u_2 + u_3)/2 \end{cases}$$

### $c$ 级隶属函数

$$\mu_c(u) = \begin{cases} 0 & u > (u_1 + u_2)/2 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_1 - u_2} \left( u - \frac{u_1 + 2u_2 + u_3}{4} \right) & \frac{u_1 + u_2}{2} \geq u > \frac{u_2 + u_3}{2} \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_2 - u_3} \left( u - \frac{u_2 + 3u_3}{4} \right) & \frac{u_2 + u_3}{2} \geq u > u_3 \\ 0 & u \leq u_3 \end{cases}$$

### $d$ 级隶属函数

$$\mu_d(u) = \begin{cases} 1 & 0 < u \leq u_3 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{2\pi}{u_2 - u_3} \left( u - \frac{3u_3 + u_2}{4} \right) & u_3 < u \leq \frac{u_2 + u_3}{2} \\ 0 & u \geq (u_2 + u_3)/2 \end{cases}$$

按上述隶属函数处理评级标准时,当  $R/(R_0S) = 0.898$  时,评价集  $\mu = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c, \mu_d\} = \{0, 0.229, 0.771, 0\}$ ;当  $R/(R_0S) = 0.901$  时,评价集  $\mu = \{0, 0.271, 0.729, 0\}$ ;当  $R/(R_0S) =$

$0.998$  时,评价集  $\mu = \{0.998, 0.002, 0, 0\}$ 。这样0.898与0.901相差很小,得出的评价集也相关很小;0.898与0.998相关较大,得出的评价集也相关较大。由此可见,这样处理能较好地反映

事物的量变规律。

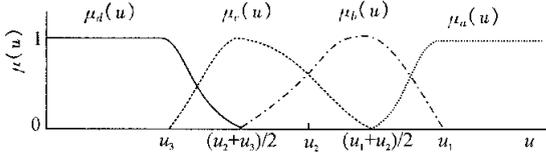


图 2 因素  $u$  的隶属函数图

Fig.2 Membership function figure of factor  $u$

### 3 用层次分析法确定因素权重集

在模糊综合评判中，权重是至关重要的。它反映各因素在综合评判中所占的地位或所起的作用并直接影响评判结果。权重分配，通常凭经验根据因素的重要性直接给出权值，这样很难做到客观准确。层次分析法<sup>[4]</sup>就是系统工程中对非定量事件作定量分析的一种简便方法，也是对人们的主观判断作客观描述的一种有效方法。其主要步骤如下。

(1) 确定目标和评价因素集  $R$ 。

(2) 构造判断矩阵  $A$ 。以  $A$  表示目标， $u_i$  表示评价因素， $a_{ij}$  表示  $u_i$  对  $u_j$  的相对重要性数值，采用 1~9 标度(表 1)根据各因素的重要程度，作因素间的两两对比，构造判断矩阵  $A$ 。

表 1 1~9 标度  
Table 1 Bid 1~9

标度	含 义
1	两元素相比，具有同样的重要性
3	两元素相比，前者比后者稍重要
5	两元素相比，前者比后者明显重要
7	两元素相比，前者比后者强烈重要
9	两元素相比，前者比后者极端重要

以托换桩基的变形、沉降、承载力因素为例，其判断矩阵如表 2 所示。

表 2 托换桩基判断矩阵

Table 2 Decisive matrix of underpinning

A	变形	沉降	承载力
变形	1	2/4	1/6
沉降	4/2	1	3/5
承载力	6	5/3	1

(3) 计算重要性排序。根据  $A-R$  矩阵，求出最大特征根所对应的特征向量。所求的特征向

量即为评价因素重要性排序，也就是权数分配。

以托换桩基为例，采用和积法可求得。求得正规化后的特征向量  $W = \{0.121, 0.293, 0.586\}$ ， $\lambda_{\max} = 3.039$ 。

(4) 检验。目的是检查权数分配是否合理。其检验的步骤如下：

$$CR = CI/RI$$

$CR$ —判断矩阵的随机一致性比率； $CI$ —判断矩阵的一般一致性指标， $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ ， $n$  为  $A$  的行数或列数； $RI$ —平均随机一致性指标。

以托换桩基为例，求得  $CI = 0.0195$ ，查找相应的平均随机一致性指标(表 3)  $RI = 0.58$ 。

表 3 平均随机一致性指标  $RI$

Table 3 Average stochastic consistent index  $RI$

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.34	1.41	1.45

计算一致性比率  $CR = CI/RI = 0.0195/0.58 = 0.034 < 0.1$

当  $CR < 0.1$  时，认为该判断矩阵具有满意的一致性，说明权数分配合理，即  $W = \{0.121, 0.293, 0.586\}$  可作为权数向量；否则需要调整判断矩阵直到取得具有满意的一致性为止。

### 4 构造因素评判矩阵及求解评判结果

#### 4.1 一级综合评判的因素评判矩阵及评判结果

根据托换结构构件的变形、沉降、承载力的计算结果，由建立的单因素隶属函数，求得各因素对  $a, b, c$  和  $d$  各级隶属度  $\mu_{ij}$ ，构造因素判断，如桩基评判矩阵  $R_2$  为

$$R_2 = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{1a} & \mu_{1b} & \mu_{1c} & \mu_{1d} \\ \mu_{2a} & \mu_{2b} & \mu_{2c} & \mu_{2d} \\ \mu_{3a} & \mu_{3b} & \mu_{3c} & \mu_{3d} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{3 \times 4}$$

式中， $\mu_1 = \{\mu_{1a}, \mu_{1b}, \mu_{1c}, \mu_{1d}\}$  代表变形的评判结果， $\mu_{1a}, \mu_{1b}, \mu_{1c}, \mu_{1d}$  分别表示位移隶属于  $a, b, c, d$  各等级的程度； $\mu_2 = \{\mu_{2a}, \mu_{2b}, \mu_{2c}, \mu_{2d}\}$  代表沉降的评判结果， $\mu_{2a}, \mu_{2b}, \mu_{2c}, \mu_{2d}$  分别表示位移隶属于  $a, b, c, d$  各等级的程度； $\mu_3 = \{\mu_{3a}, \mu_{3b}, \mu_{3c}, \mu_{3d}\}$  代表承载力的评判结果， $\mu_{3a}, \mu_{3b}, \mu_{3c}, \mu_{3d}$  分别表示位移隶属于  $a, b, c, d$  各等级的程度；再利

用桩基的权重集  $A_2$ , 按模糊数学综合评判式  $B_2 = A_2 \cdot R_2$  可以得到桩基的评判结论  $B_2$ 。

#### 4.2 二级综合评判的因素评判矩阵及评判结果

根据地基、桩基、托换次梁和主梁的一级评判结论  $B_1, B_2, B_3$  和  $B_4$  构造二级评判矩阵  $R$ , 即

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ A_3 \cdot R_3 \\ A_4 \cdot R_4 \end{pmatrix} = (r_{ij})_{3 \times 4}$$

利用托换结构的权重集  $A$ , 由  $B = A \cdot R$  可得整个托换结构的评判结论  $B$ 。

### 5 工程结构模型分析及结果

本工程以广州地铁一号线某地段其中一幢楼房桩基托换工程结构为例, 首先建立两种计算分析结构模型, 然后利用上述方法进行评判, 最后得出结论。

模型 1: 以钢筋混凝土均在分段线弹性状态下为正常工作状态, 预应力筋以达到设计拉应力为极限状态, 超过此限为破坏状态;

模型 2: 以钢筋混凝土均在弹塑性状态下为正常工作状态, 预应力钢筋的应力不超过裂缝控制宽度为极限状态, 否则视为不安全状态。

经过计算, 最后得到模型 1 整体托换结构的评价集为  $\mu_1 = \{0.996, 0.004, 0, 0\}$ , 模型 2 整

体托换结构的评价集为  $\mu_2 = \{0.981, 0.019, 0, 0\}$ 。

由此可见, 虽然两种模型都评判为  $a$  级, 但是模型 1 隶属  $a$  级的程度比模型 2 隶属  $a$  级的程度更大, 说明前者比后者更安全、稳定、可靠。

### 6 结语

对工程结构质量可靠性的评判是一种模糊现象。应用模糊数学原理对广州地铁一号线某段的桩基托换结构工程的可靠性进行探索, 得出该工程安全可靠的结论。笔者自从地铁一号线开通后多次到广州调查情况, 未发现托换后的楼房出现异常现象。

研究过程中得到广东工业大学李子生副教授的支持和鼓励, 谨此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 张振良. 应用模糊数学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991. 55~56
- [2] 工业厂房可靠性鉴定标准 (GBJ144-90) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [3] 张 誉. 旧房可靠性的模糊综合评判 [J]. 建筑结构学报, 1997, (5): 14~15
- [4] 扈 垆. 实用模糊数学 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1989. 194~201

## RESEARCH ON FUZZY COMPREHENSIVE EVALUATION OF RELIABILITY OF THE UNDERPINNING STRUCTURE

Deng Yousheng Zhou Guoen

(Department of Civil Architecture, Guangxi Institute of Technology, Liuzhou 545005)

**Abstract** through constructing two structural models, the fuzzy mathematics method is applied to analysing the reliability of an underpinning at the line of No.1 Guangzhou subway. The authors have constructed a frame of the 2-grade fuzzy comprehensive evaluation model, then have established membership functions, and have determinated the weight value of each factor according to its significance by the analytic hierarchy process, at last have drawn conclusions.

**Key words** foundation; underpinning; reliability; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process