

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-244-05

填充性岩溶软基加固方案的 模糊综合评价与工程应用

吕建兵¹, 傅鹤林²

(1.广东交通集团检测中心, 广州 510800; 2.中南大学土木建筑学院, 长沙 410075)

摘要: 运用模糊综合评判法与离散抽样模型, 对渝-怀铁路干溪沟隧道 Dk278+628 至+678 段隧底填充性岩溶软基处理方案进行了评价和选择, 从而使所选择的处理方案达到整体最优, 该评价方法可为今后类似的工程处理提供借鉴。

关键词: 填充性岩溶; 旋喷桩; 模糊优化; 隶属度; 软土地基

中图分类号: O 159

文献标识码: A

Fuzzy comprehensive evaluation of reinforcement plan for filling karst soft soil foundation and engineering application

LU Jian-bing¹, FU He-lin²

(1.Guangdong Transportation and Communication Testing Center, Guangzhou 510800, China;

2.School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The fuzzy comprehensive judgment method and the discrete sample model are applied to judge and select the methods settling the filling karst soft roadbed at the tunnel bottom in Dk278+628—+678 section of Ganxigou tunnel, Yu-Huai Railway. In this way, the settling methods are optimized on the whole; and this judging method can serve as reference for future work in this field.

Key words: filling karst; whirly sprayed cement pile; fuzzy optimization; membership degree; soft soil foundation

1 概 况

渝-怀铁路干溪沟隧道位于重庆市黔江地区郁山镇境内, 隧道全长3 878 m, 隧道进口开挖揭示 Dk278+628~+698段发育一大型全充填溶洞, 溶洞加固之前主要充填有黄褐色软塑~硬塑粘土夹碎石、松散~中密块石土, 隧道洞身均位于充填物中。隧道施工过程中, 多次发生临时支护拱部开裂及大面积坍塌, 为有效加固该段软基, 保证隧道施工的安全可靠及正常运行, 有必要对该段软基处理方案进行正确的评价和选择。

笔者^[1]已根据地质超前预报的探测结果, 确定了溶洞为填充性岩溶, 初步拟定了3种适合于隧道填充性岩溶软基加固的可行性方案: (1) 粉喷桩; (2) 旋喷桩; (3) 碎石桩。在此基础上, 笔者运用了填充性岩溶软基加固结构选型的模糊数学评价模型对选定的3种方案进行比选。首先从技术、施工、环境

及经济等方面进行一级综合评判; 然后再综合一级评判结果, 进行二级综合评判, 并运用二级模糊综合评判法的原理, 在专家系统的帮助下, 十分方便地进行了填充性岩溶软基加固方案的选择^[2]; 并将各方案的评价指标分为可定性分析指标和可定量分析指标进行分析。对于可定量分析指标, 借助了离散抽样方法, 运用了离散抽样模型, 得到了可定量分析指标与隶属度之间的关系, 确定了可定量分析指标单因素评价向量, 使该段填充性岩溶软基加固方案的评价和选择更加科学、合理、直观与可靠^[1-4]。

2 填充性岩溶软基加固选型的模糊综合评价模型

2.1 评价指标体系的确定

对于该段填充性岩溶软基加固而言, 最优的软基处理方案应该满足处理技术可行性和经济合理性的要求, 同时还应满足对施工条件和环境影响的要

收稿日期: 2005-04-29

作者简介: 吕建兵, 男, 1977年生, 硕士, 主要从事岩土工程数值分析及公路工程的检测工作。

求, 这是评价方案是否可行与优劣的基本内容, 据此, 建造了如图 1 所示的填充性岩溶软基加固选型综合评价体系, 其中指标 $I_{1,1} \sim I_{1,2}$ 为可定量分析指标, 其余为可定性分析指标。

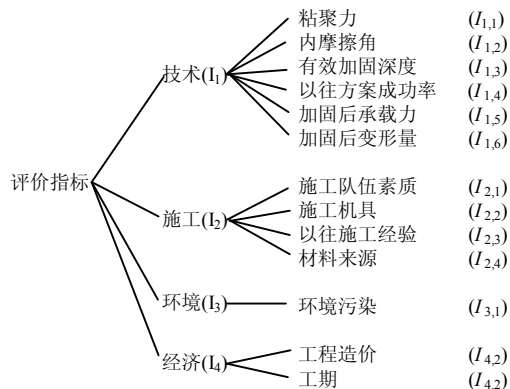


图 1 填充性岩溶软基加固结构选型指标体系

Fig.1 Index system for selection of reinforcing structural types for filling karst soft foundations

2.2 评价指标权重的确定方法

(1) 向量统计法

若有 n 位专家进行评分, 则得到 n 个评分行向量

$$P_{ij} = (p_{ij}), \quad (i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n)$$

$$\text{令 } P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij}$$

$$\text{则有 } P = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m)$$

$$\text{若取 } W_i = P_i / n, \quad i=1,2,\dots,m$$

则权重向量为:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_m) \quad (1)$$

(2) 比较矩阵法

设指标 u_i 某一级包含下一级的 m 个子指标, 每位专家根据各指标的相互重要程度给出一个如表 1 的比较矩阵。

对应指标 u_i 和专家 j , 有矩阵

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mk} \end{bmatrix}$$

表 1 评价指标相对重要程度比较表

Table 1 Comparison of relative importance of evaluating indexes

指标重要性比较	论域的相			
	P_1	P_2	$\cdots$	P_k
u_i 比较 u_1	a_{11}	a_{12}	$\cdots$	a_{1k}
u_i 比较 u_2	a_{21}	a_{22}	$\cdots$	a_{2k}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
u_i 比较 u_m	a_{m1}	a_{m2}	$\cdots$	a_{mk}

$$\text{其中元素满足 } a_{ij} = \begin{cases} 0, & j \neq P \\ 1, & j = P \end{cases}$$

$$\text{对于所有的专家, 令 } A_i = \sum_{j=1}^n A_{ij}$$

由于论域的 K 评判值依次等量替减, 则构造如下向量:

$$Y = (k/(m.n.k), (k-1)/(m.n.k), \dots, 1/(m.n.k))^T$$

$$I = (1, 1, \dots, 1)$$

$$\text{令 } B_i = I A_i Y, \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\text{则有 } B = (B_1, B_2, \dots, B_m), \text{ 取 } X = \sum_{i=1}^m B_i$$

则可归一化得权重向量为:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_m) = (B_1/x, B_2/x, \dots, B_m/x) \quad (2)$$

2.3 可定性分析指标的单因素评价向量确定

对于可定性分析指标, 应用模糊数学理论, 用语言评价方法计算单因素评价向量:

(1) 评价专家的选择

参与选型的专家视具体情况而定, 本文拟定为 5 人。为了反映每位专家评价意见对最终评价结果作用的不同, 赋予每位专家一个相应的权重系数 AEXP。

$$AEXP = (a \exp_1, a \exp_2, \dots, a \exp_m) \quad (3)$$

$$\text{显然有 } \sum_{j=1}^m a \exp_j = 1$$

(2) 评语集的确定

本文采用 7 个评语组成的评语集, 即

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_7) \\ = (\text{非常差, 很差, 差, 一般, 好, 很好, 非常好})$$

(3) 评分标尺

对于可定性分析指标, 评分标尺为 $V_2 = (\text{非常差, 很差, 差, 一般, 好, 很好, 非常好})$, 在论域 $[0, 1]$ 上, 评分标尺赋值为 $V_2 = (0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70, 0.85, 0.95)$ 。

(4) 单因素评价向量的确定

语言评价模型确定后, 就可以进行单因素模糊评价。以一级评价模型为例, 对评语集 V , 每位专家 $\exp_j$ 对某一指标 u_i 隶属于各个方案 D_k 的评分为:

$$r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ijk}, \dots, r_{ijm}) \\ j=1,2,\dots,5, \quad k=1,2,\dots,m$$

综合 5 位专家的意见, 可以得到专家集体对相应评价指标 u_i 隶属于单个方案 D_k 的评分为

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}, \dots, r_{im}) \quad (4)$$

$$\text{式 (4) 中各项 } r_{ik} = \sum_{j=1}^5 a \exp_j r_{ijk}$$

式 (4) 即为对某一评价指标 u_i 而言, 隶属于

各方案 D_k 的隶属度向量,此向量即为该指标 u_i 的单因素评价向量。

2.3 可定量分析指标的单因素评价向量确定

(1) 离散抽样模型的建立

设某项评价指标(如凝聚力 c) u_j ($j=1, 2, 3$) 为某一值时,在被抽查的填充性岩溶软基加固工程对象中,属于某一加固方案的填充性岩溶软基加固数目为 d ,称为检出数,其检出概率为

$$P_{(d,k,u)} = C_{kN}^{d \ n-d} / C_N^n \quad (5)$$

式中 N 为填充性岩溶软基加固工程总数目; k 为 N 中属于某一加固方案的填充性岩溶软基加固数目所占的百分比,称为检出率; n 为抽样分析的填充性岩溶软基加固工程数目。

检出概率 $P_{(d,k,u)}$ 与 N 、 n 有关,其表达式如下:

$$\sum_{k=d/N}^{(N-n+d)/N} P_{(d,k,u)} = \frac{C_{N+1}^{N-n}}{C_N^n} = \frac{N+1}{n+1} \quad (6)$$

在非抽样情况下,评价指标值为某一数值时,其隶属于某一填充性岩溶软基加固结构的隶属度 μ 与检出率 k 之间的关系可用折线表示,若候选的填充性岩溶软基加固方案只有 3 种, μ 与 k 之间关系如图 2 所示。图中, μ_1 , μ_2 与 μ_3 分别代表某一评价指标隶属于填充性岩溶软基加固结构的隶属度, k_a , k_b , k_c , k_d , k_e 为分类参考点。

在抽样情况下,检出率是未知的,能够得到的是样本的检出数 d ,如何由抽样情况下的检出数 d ,推断总体情况下的隶属度 μ 是一个关键问题。实际上,图 2 中,填充性岩溶软基加固结构形式不只 3 种, μ 与 k 的关系可为任意形式。设 $k > k_a$ 时的 $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = \mu_3 = 0$; $k_c < k \leq k_a$ 时, μ_1 曲线用 $\mu_{1a}(k)$ 表示, μ_2 曲线用 $\mu_{2a}(k)$ 表示, $\mu_3 = 0$; $k_e < k \leq k_c$ 时, μ_2 曲线用 $\mu_{2b}(k)$ 表示, μ_3 曲线用 $\mu_{3a}(k)$ 表示, $\mu_1 = 0$; $k \leq k_e$ 时, $\mu_3 = 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 0$ 。在一般情况下,评价指标隶属于填充性岩溶软基加固结构(取 3 种填充性岩溶软基加固结构型式)的隶属度写成如下式(7)~(9)的形式。

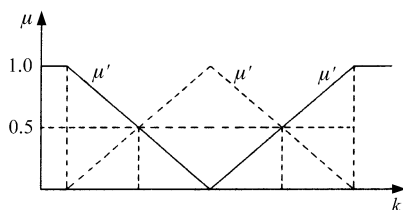


图 2 隶属度(μ)与检出率(k)的关系
Fig.2 Relationship between subordination degree and detection rate

$$\mu_1(d) = \begin{cases} 1 & (k > k_a) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=d/N}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{1a}(k)) + \sum_{k=k_a+1/N}^{(N-n+d)/N} P_{(d,k,u)} \right] & (k_c < k \leq k_a) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=k_e}^{k_c} (P_{(d,k,u)} \mu_{1b}(k)) + \sum_{k=k_e+1/N}^{(N-n+d)/N} P_{(d,k,u)} \right] & (0 \leq k \leq k_e) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_2(d) = \begin{cases} 0 & (k > k_a) \\ \frac{n+1}{N+1} \sum_{k=d/N}^{k_a} P_{(d,k,u)} \mu_{2a}(k) & (k_c < k \leq k_a) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=d/N}^{k_c} (P_{(d,k,u)} \mu_{2b}(k)) + \sum_{k=k_c+1/N}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{2a}(k)) \right] & (k_e < k \leq k_c) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=k_e}^{k_c} (P_{(d,k,u)} \mu_{2b}(k)) + \sum_{k=k_e+1/N}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{2a}(k)) \right] & (0 \leq k \leq k_e) \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_3(d) = \begin{cases} 0 & (k > k_c) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=d/N}^{k_a} P_{(d,k,u)} \mu_{3a}(k) \right] & (k_e < k \leq k_c) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=d/N}^{k_e} (P_{(d,k,u)} \mu_{3b}(k)) + \sum_{k=k_e+1/N}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{3a}(k)) \right] & (k_g < k \leq k_e) \\ \frac{n+1}{N+1} \left[\sum_{k=k_g}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{3b}(k)) + \sum_{k=k_g+1/N}^{k_a} (P_{(d,k,u)} \mu_{3a}(k)) \right] & (0 \leq k \leq k_g) \end{cases} \quad (9)$$

(2) 单因素评价向量的确定

由式(7)~(9)可以计算评价指标为某一数值时,其隶属于某一填充性岩溶软基加固结构的隶属度为

$$\mu_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}) \quad (10)$$

式(10)是评价指标为某一值时,其隶属于各种填充性岩溶软基加固方案的隶属度向量,它实质上就是评价指标隶属于各种填充性岩溶软基加固方案的单因素评价向量,即

$$R_i = (R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}) \quad (11)$$

2.4 模糊综合评价方法

无论是可定性分析指标还是可定量分析指标， r_i 均为评价指标隶属于各填充性岩溶软基加固方案的单因素评价向量，它只反映了单个因素对评测方案的影响。只有综合所有因素的作用，才能选出合理的填充性岩溶软基加固结构方案。前面已研究了评价指标体系权重的确定方法，根据各评价指标合理的权重 W 、各单因素评价向量 r_i ，则模糊综合评价模型为

$$B = WR = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_m) \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1j} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2j} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i1} & R_{i2} & \dots & R_{ij} & \dots & R_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mj} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix} \\ = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n) \quad (12)$$

式中 i 为级评价指标数， $i=1,2,\dots,m$ ； j 为填充性岩溶软基加固方案候选数； $j=1,2,\dots,n$ ； B 为模糊综合评价集；其中元素 $b = W_1 R_{1i} + W_2 R_{2i} + \dots + W_i R_{ii} + \dots + W_m R_{mi}$ 。

求出模糊综合评价集 B 后，根据最大隶属度原则，取 $bt = V(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n)$ ，则认为 bt 为考虑所有评价指标的最优结果，其对应的填充性岩溶软基加固结构即为最优加固方案。

2.5 最优方案分析

针对填充性岩溶软基加固工程的评价指标分为可定性分析指标和可定量分析指标的特点，考虑到不同评价指标其对应评价矩阵计算的方法不同，其模糊综合评价步骤如图 3 所示。

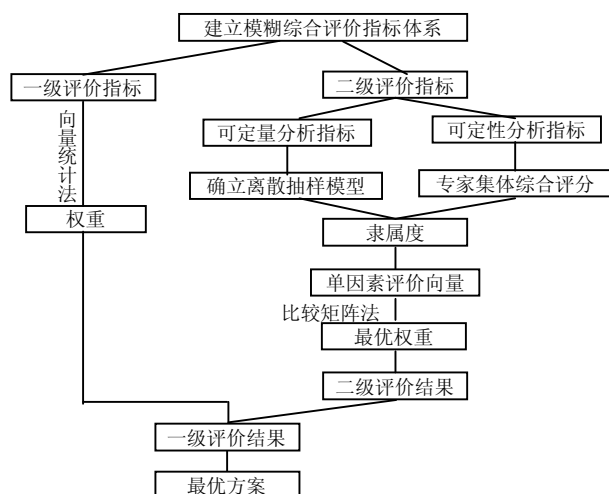


图 3 填充性岩溶软基加固结构选型模糊综合评判分析流程图

Fig.3 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation of reinforcing scheme selection for filling karst soil foundation

(1) 可定性分析指标的单因素评价向量的确定
某一位专家对可定性分析指标隶属于各个方案的评价见表 2。

表 2 加固方案对比
Table 2 Comparison of reinforcing schemes

二级评价指标	加固方案		
	粉喷桩	旋喷桩	碎石桩
$I_{1,3}$	好	很好	好
$I_{1,4}$	好	好	好
$I_{1,5}$	很好	好	一般
$I_{1,6}$	一般	好	一般
$I_{2,1}$	好	好	好
$I_{2,2}$	差	好	一般
$I_{2,3}$	很差	一般	差
$I_{2,4}$	一般	差	好
$I_{3,1}$	很好	一般	一般
$I_{4,1}$	好	好	一般
$I_{4,2}$	差	一般	好

设有 5 位专家进行评分，各位专家的权重系数相等，取 5 位专家评分的平均值，得可定性分析指标单因素评价向量为：

$$R_{(I_{1,3})} = (0.64, 0.69, 0.65), R_{(I_{1,4})} = (0.65, 0.69, 0.54), \\ R_{(I_{1,5})} = (0.69, 0.62, 0.61), R_{(I_{1,6})} = (0.54, 0.58, 0.50), \\ R_{(I_{2,1})} = (0.65, 0.76, 0.62), R_{(I_{2,2})} = (0.40, 0.62, 0.58), \\ R_{(I_{2,3})} = (0.36, 0.50, 0.46), R_{(I_{2,4})} = (0.54, 0.36, 0.58), \\ R_{(I_{3,1})} = (0.65, 0.61, 0.50), R_{(I_{4,1})} = (0.72, 0.73, 0.61), \\ R_{(I_{4,2})} = (0.44, 0.54, 0.65)$$

(2) 可定量分析指标的单因素评价向量的确定
抽样情况下根据离散抽样结果与半正态分析法，取分类参考点为：

$$k_a = 0.25, \quad k_b = 0.20, \quad k_c = 0.15, \quad k_d = 0.10, \\ k_e = 0.05$$

由于 N 较大，取检出概率 P 为正态分布，由式 (7) ~ (9)，当凝聚力 c 为某一值时，可计算其隶属于填充性岩溶软基加固结构的隶属度，从而计算得到凝聚力 c 隶属于填充性岩溶软基加固结构的单因素评价向量为：

$$R_{(I_{1,1})} = (0.32, 0.41, 0.00)$$

同理，可计算出内摩擦角 ϕ 隶属于填充性岩溶软基加固结构的单因素评价向量为：

$$R_{(I_{1,2})} = (0.15, 0.31, 0.03)$$

(3) 模糊综合评价

由模糊综合评价理论，对于二级评价指标有

$$B_{(I_i)} = W_{(I_i)} \times R_{(I_i)} \quad (\text{其中: } i=1, 2, 3) \quad (13)$$

$$R_{(I_1)} = \{R_{(I_{1,1})} \quad R_{(I_{1,2})} \quad R_{(I_{1,3})} \quad R_{(I_{1,4})} \quad R_{(I_{1,5})} \quad R_{(I_{1,6})}\}^T =$$

$$\begin{bmatrix} 0.32 & 0.41 & 0.00 \\ 0.15 & 0.31 & 0.03 \\ 0.64 & 0.69 & 0.65 \\ 0.65 & 0.69 & 0.54 \\ 0.69 & 0.62 & 0.61 \\ 0.54 & 0.58 & 0.50 \end{bmatrix},$$

$$R_{(I_2)} = \{R_{(I_{2,1})} \quad R_{(I_{2,2})} \quad R_{(I_{2,3})} \quad R_{(I_{2,4})}\}^T =$$

$$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.76 & 0.62 \\ 0.40 & 0.62 & 0.58 \\ 0.36 & 0.50 & 0.46 \\ 0.54 & 0.36 & 0.58 \end{bmatrix},$$

$$R_{(I_3)} = R_{(I_{3,1})} = (0.65 \quad 0.61 \quad 0.50),$$

$$R_{(I_4)} = \{R_{(I_{4,1})} \quad R_{(I_{4,2})}\}^T = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.73 & 0.61 \\ 0.44 & 0.54 & 0.65 \end{bmatrix}$$

对于二级评价指标的权重的确定,采用比较矩阵法。计算求得二级评价指标归一化权重向量为:

$$W_{(I_1)} = (0.22 \quad 0.22 \quad 0.20 \quad 0.16 \quad 0.10 \quad 0.10)$$

由式(13),求得二级评价结果为:

$$B_{(I_1)} = (0.46 \quad 0.53 \quad 0.33)$$

同理可以求得:

$$B_{(I_2)} = (0.50 \quad 0.59 \quad 0.56), B_{(I_3)} = (0.65 \quad 0.61 \quad 0.50),$$

$$B_{(I_4)} = (0.63 \quad 0.67 \quad 0.62)$$

对于一级评价指标,其模糊关系矩阵为

$$B = WR \quad (14)$$

式中 $R = (B_{(I_1)} \quad B_{(I_2)} \quad B_{(I_3)} \quad B_{(I_4)})^T$; W 由向量统计法求得, W 为:

$$W = (0.34 \quad 0.16 \quad 0.20 \quad 0.30)$$

将 R 与 W 代入式(14),得一级评价指标的评价结果为:

$$B = (0.56 \quad 0.60 \quad 0.49)$$

根据最大隶属度原则,可得3种填充性岩溶软基加固方案的优劣程度顺序为:旋喷桩,粉喷桩,碎石桩。对本工程软基的处理,采用与评价值0.60对应的软基加固方案——旋喷桩为最优的加固方案,其优点可从表2中看到:地基的承载力提高,降低了沉降,经济合理,施工期短,环境污染程度小。

3 结 论

(1)运用了填充性岩溶软基加固结构选型的模糊数学评价模型对选定的3种方案进行比选,首先从技术、施工、环境及经济几个方面进行一级综合评判,然后再综合一级评判结果,进行二级综合评判,并运用二级模糊综合评判法的原理,在专家系统的帮助下,十分方便地进行了填充性岩溶软基加固方案的选择;

(2)模糊综合评价理论将评价和选择填充性岩溶软基加固方案的主观性转化为数学形式,考虑了各评价因素的重要程度,因而具有更高的可靠性;

(3)通过最优方案分析表明,将各方案的评价指标分为可定性分析指标和可定量分析指标进行分析,该分析既考虑了专家及以往工程的实际经验,又运用了离散抽样模型理论,使评价和选择方案更加科学、合理、直观与可靠。

参 考 文 献

- [1] 吕建兵,傅鹤林. HSP 地质超前预报技术及其应用[A]. 第二届全国土木工程研究生学术论坛[C]. 2004.
- [2] 吕建兵. 复杂地质条件下隧道填充性岩溶处治技术研究[硕士学位论文D]. 长沙:中南大学,2004.
- [3] 朱熾,李章华. 模糊综合评价的离散抽样模型[J]. 清华大学学报,2000,40(8): 121—124.
- [4] 段绍伟. 深基坑支护结构选型理论分析及应用研究[博士学位论文D]. 长沙:湖南大学,2003.