

基于AHP-模糊数学的水泥路面压浆材料 设计及性能研究

唐斌璨

(湖南省交通规划设计院有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为了改善水泥混凝土路面板底脱空处治效果,采用层次分析法(AHP)和模糊数学理论,建立水泥路面压浆材料优选方案的多级模糊综合评价模型;选取粉煤灰及脱硫石膏以适当比例复合等量取代水泥,制得了水泥路面压浆材料,并利用建立的综合评价模型对水泥路面压浆材料的选择方案进行综合评价,得到了10种比较方案的优越度,最大优越度为71.61%,最小优越度为21.75%。为了验证模型的合理性,选取优越度为71.16%、70.92%、70.83%、21.75%所对应的方案进行了试验复演,结果表明该模型复演性好,可以较准确地反应压浆材料在处治板底脱空的成效,具有较好的工程实用价值。

关键词: 水泥混凝土路面;板底脱空;压浆材料;模糊数学;层次分析法

中图分类号: U416.03

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)09-0168-03

0 引言

通过对水泥路面养护进行广泛调研发现,路面板底脱空处治常用的压浆材料存在干缩率大、刚性过强、易形成不均匀支撑等问题,且难以综合分析压浆材料在多个因素共同作用下对板底脱空处治成效的影响。同时,这些因素之间各自的属性、重要程度和可比性存在差异,对各因素指标进行压浆材料优选时,存在很大的模糊性。

鉴于此,现以适当比例复合后的脱硫石膏及粉煤灰等量取代水泥,并将其掺入到水泥砂浆中,制成水泥路面压浆材料。同时引入模糊数学原理和层次分析确定权重的方法建立了压浆材料优选方案的模糊综合评价模型,确定了压浆材料的最优方案,并通过试验复演说明模型的合理性。

1 基于压浆材料优选方案的模糊综合评价模型

模糊综合评价是按某些模糊限制条件从论域 U (方案集)中挑选出最优对象。其模型建立的主要路线:(1)构建论域 U 及因素集 X ;(2)确定因素的权重 W ;(3)构造模糊判断矩阵 R ;(4)模糊综合评价^[1-2]。

1.1 构建论域及因素集

假设有 n 种压浆材料方案可供选择,则论域为

$U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,因素集为 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$,于是对于给定的方案 $U_i(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 存在一个 U 到 X 的关系集合 $u_i=\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\}$,其中 $x_{ij}(j=1, 2, 3, \dots, m)$ 是论域 U 中的一个固定元素 u_i 在因素 x_j 作用下变换的结果^[3]。

1.2 层次分析法确定权重

1.2.1 层次结构模型指标体系的构建

结合《公路水泥混凝土路面养护技术规范》和层次分析法建立压浆材料优选方案 O (目标层)的准则层为:力学性能 P_1 、体积变形 P_2 、流动性 P_3 ;准则子层(指标层)为:抗折强度 X_1 、抗压强度 X_2 、干缩率 X_3 、流动度 X_4 ,具体层次结构模型如图1所示。

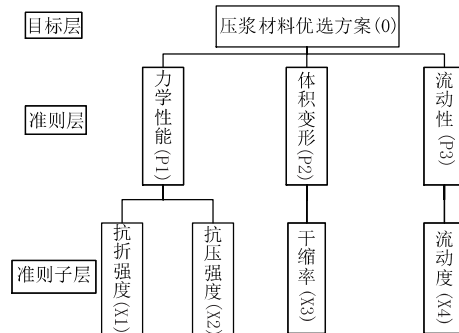


图1 压浆材料优选方案层次结构模型示意图

1.2.2 构建比较矩阵及权重计算

在层次结构模型中,最主要的是确定目标层 O 所支配的因素 P_1, P_2, P_3 和准则层所支配的因素 X_1, X_2, X_3, X_4 的权重^[4]。设受上层元素支配的 l 个因素为: $y_1, y_1, \dots, y_l$,权重向量 $W=[W_1, W_2, W_3, \dots, W_l]^T$;采用

收稿日期: 2020-01-05

作者简介: 唐斌璨(1992—),男,学士,工程师,从事公路工程设计工作。

由 Saaty 提出的 9 标度法则(如表 1 所列),对于 $k, t=1, 2, 3, \dots, l$, 以 a_{kt} 表示 y_k 与 y_t 关于 Z 的重要性比值(即 $a_{kt} = \frac{w_k}{w_t}$, 其中 w_k 表示 y_k 关于 Z 的重要性^[5-6], w_t 表示 y_t 关于 Z 的重要性, 且 $0 < w_k < 1$)构造判断矩阵 A :

$$A = (a_{kt})_{l \times l} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1l} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{l1} & \cdots & a_{ll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_l} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_l}{w_1} & \frac{w_l}{w_2} & \cdots & \frac{w_l}{w_l} \end{bmatrix} \quad (\text{令: } w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_l \end{bmatrix}) \quad (1)$$

显然可以得到:

$$a_{kt} > 0, a_{kt} \times a_{tk} = 1, a_{kk} = 1$$

$$A_w = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_l} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_l}{w_1} & \frac{w_l}{w_2} & \cdots & \frac{w_l}{w_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lw_1 \\ lw_2 \\ \vdots \\ lw_l \end{bmatrix} = lw \quad (2)$$

则求 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_l$ 关于 Z 的重要性 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_l$ 可以转化为求解判断矩阵 A 对应于 l 的特征向量。由矩阵理论可知: l 为判断矩阵 A 唯一非零的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量。考虑到 $0 < w_k < 1$ 且 $\sum_{k=1}^l w_k = 1$, 于是对 w 进行归一化处理即:

$$W_k = \frac{w_k}{\sum_{k=1}^l w_k}, W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_l]^T \quad (3)$$

所得到的 $W_1, W_2, W_3, \dots, W_l$ 就是 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_l$ 的权重。

表 1 标度法则表

标度	含义
1	两个因素相比,同等重要
3	两个因素相比,因素 y_k 比因素 y_i 比较重要
5	两个因素相比,因素 y_k 比因素 y_i 重要
7	两个因素相比,因素 y_k 比因素 y_i 很重要
9	两个因素相比,因素 y_k 比因素 y_i 极其重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值

1.2.3 矩阵一致性检验

由于判断矩阵是研究者通过 9 标度法则构造的,为了确定权重向量是否与实际状况相吻合,因此,需进行一致性检验即:

(1)当 $\lambda_{\max} = l$ 时,判断矩阵具有完全一致性。

(2)当 $\lambda_{\max} > l$ 时,必须计算一致性指标 CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - l}{l - 1} < 0.1 \quad (4)$$

CI 越大,一致性越差; CI 越小,一致性越好。

(3)当判断矩阵的阶数大于 2 时,还需计算判断矩阵的一致性指标 CI 与平均一致性指标 RI (RI 值见表 2)的比值,即随机一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (5)$$

表 2 1~9 阶平均随机一致性指标一览表

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

一致性指标 CI 和同阶随机一致性比率 CR 同时满足时,即认为判断矩阵具有一致性,否则就需要对判断矩阵进行调整使其符合一致性检验。

1.3 构造模糊判断矩阵

对于压浆材料方案的优选由图 1 可知,指标层均为定量指标,则因素指标矩阵可以由各压浆材料的指标值构成:

$$u = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后对模糊判断矩阵采取定量指标综合决策法构造模糊评价矩阵即:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0.1 + (u_{i\max} - u_{ij})/d & \text{ui 为负指标,} \\ 0.1 + (u_{ij} - u_{i\min})/d & \text{ui 为正指标.} \end{cases} \quad (7)$$

式中:正指标是该指标值越大对目标越有利,负指标是该指标值越小对目标越有利,指式中 d 表示级差值即:

$$d = \frac{u_{i\max} - u_{i\min}}{1 - 0.1} \quad (8)$$

则: $m \times n$ 指标值作元素构成的模糊综合评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.4 模糊综合评价

利用加权平均模型 $M(g+)$ 对由 m 个因素共同作用的 n 个方案进行综合评价:

$$B = WR = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (10)$$

其中: $b_i = \sum_{j=1}^m W_j r_{ji}, i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m$ 。根据最大隶属度原则,将 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 从大至小进行排序,则各压浆材料方案对水泥路面板底脱

空处治的成效为 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 中排序对应的方案, 且 $b_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 中的最大值对应的压浆材料方案为最优方案。

2 工程实例

2.1 水泥路面压浆材料性能试验

采用以适当比例复合后的脱硫石膏及粉煤灰等量取代水泥制备了脱硫石膏-粉煤灰-水泥压浆材料。通过对掺和量的前期试验, 采用粉煤灰、脱硫石膏相互比例为 1:1、1:2、2:1 等量取代 20%~40% 的水泥配制成水泥路面压浆材料, 胶凝材料用量为 450 g, 标准砂用量为 1 350 g, 水胶比为 0.5, 其具体配合比如表 3 所列。

表 3 水泥路面压浆材料配合比一览表

编号	配比	ω_{FA}	ω_{FGD}	ω_C
A_0	纯水泥	0	0	1
A_1	$\omega_{FA} : \omega_{FGD} = 1 : 2$	0.06	0.14	0.8
A_2		0.1	0.2	0.7
A_3		0.13	0.27	0.6
A_4	$\omega_{FA} : \omega_{FGD} = 2 : 1$	0.13	0.07	0.8
A_5		0.2	0.1	0.7
A_6		0.26	0.14	0.6
A_7	$\omega_{FA} : \omega_{FGD} = 1 : 1$	0.1	0.1	0.8
A_8		0.15	0.15	0.7
A_9		0.2	0.2	0.6

2.2 试验结果分析

根据表 3 所列的配比进行试验, 在各试验规定的期限内测得的方案 $A_0 \sim A_9$ 的试验结果如表 4 所列。

表 4 粉煤灰-脱硫石膏-水泥压浆材料各试验结果一览表

编号	抗折强度	抗压强度	干缩率	流动度
A_0	9	47.5	197	19.4
A_1	9.1	44.5	45	19.8
A_2	9.27	45.1	17	21.2
A_3	9.05	43.2	-59	20.7
A_4	9.72	45.9	116	21.0
A_5	9.16	44.0	37	22.6
A_6	9.16	42.5	10	22.4
A_7	9	45.9	101	20.0
A_8	9.1	43.5	34	22.1
A_9	9.15	42.1	-1	22.3

2.3 水泥路面压浆材料模糊综合评价

依据 Saaty 提出的 9 标度法和优先次序, 相对于目标层, 准则层各准则构造判断矩阵。准则层的权重向量为 $W_p=[0.169\ 2, 0.443\ 4, 0.387\ 4]^T$, $CI=0.009\ 1 < 0.1$, $CR=0.0158 < 0.1$, 符合一致性检验。

准则子层同理可得: 权重向量 $W_x=[0.042\ 3, 0.126\ 9, 0.443\ 4, 0.387\ 4]$, 由于准则子层判断矩阵

的阶数最大为 2, 依据矩阵理论显然具有完全一致性。

方案集中不同配比的压浆材料对水泥混凝土路面板底脱空处治的成效来排序 (根据个方案的权重由大到小) 依次是: $A_5, A_9, A_6, A_3, A_8, A_2, A_4, A_1, A_7, A_0$; 由最大隶属度原则可知, A_5 最优。

3 试验复演

该项研究选取由模糊综合评价模型确定的 A_5, A_9, A_6, A_0 进行水泥路面板底脱空压浆成效的复演试验。复演的试验结果见表 5 所列。

表 5 各方案饱和度 (%) 试验结果一览表

测点	A_5	A_9	A_6	A_0
K	88.6	84.5	84.5	80.3
H	91.3	86.6	85.5	83.4

各压浆材料方案饱和度折线如图 2 所示。图 2 的结果显示, 证明压浆材料优选方案的模糊综合评价模型的复演性较好, 能满足水泥混凝土路面板底脱空处治评选压浆材料的要求。

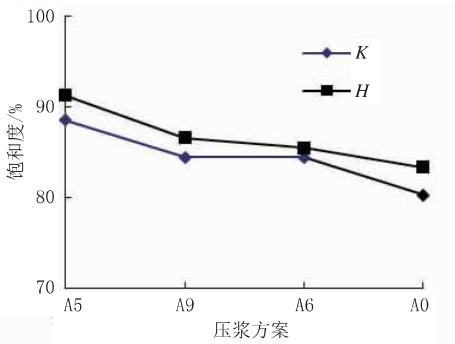


图 2 各压浆材料方案点 K 和点 H 饱和度折线图

4 结 论

(1) 结合模糊数学和层次分析法建立了压浆材料优选方案的模糊综合评价模型, 综合分析了力学性能、流动性和体积变形共同作用下对水泥混凝土路面板底脱空处治成效的影响, 得到压浆材料的方案集的排序, 根据最大隶属度原则, 最优方案为: A_5 。

(2) 相对于传统的压浆材料, 通过模糊综合评价可以得出: 当粉煤灰—脱硫石膏—水泥压浆材料采用脱硫石膏及粉煤灰以 $\omega_{FA} : \omega_{FGD} = 2 : 1$ 的比例复合等量取代水泥 30% 掺入水泥砂浆中, 并掺入 0.01 的减水剂, 有效地改善了面板脱空现象的发生。

(3) 将电厂两大工业废渣—粉煤灰和脱硫石膏复合, 开发了用于水泥路面板底脱空处治的压浆材料, 通过减少水泥用量达到节约工程造价的目的; 具有

(下转第 178 页)

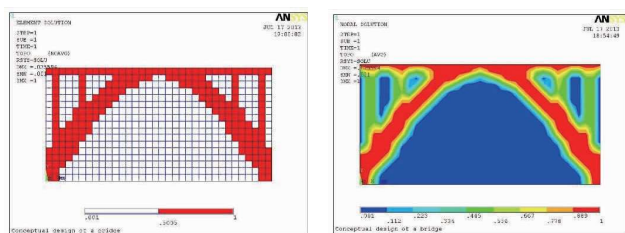
(a) $V_s=70\%$ 有限元离散模型(b) $V_s=70\%$ 时的伪密度云图

图7 迭代第七步优化图示

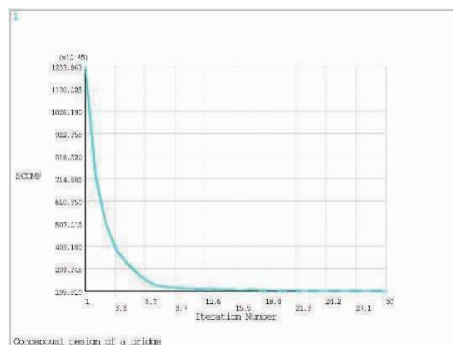
地显示出拱桥的桥型。此时迭代停止。在开始的几次迭代中,目标函数和体积变化比较明显,在经历了第16次迭代后,优化结果趋于稳定,如图8所示。

5 结 语

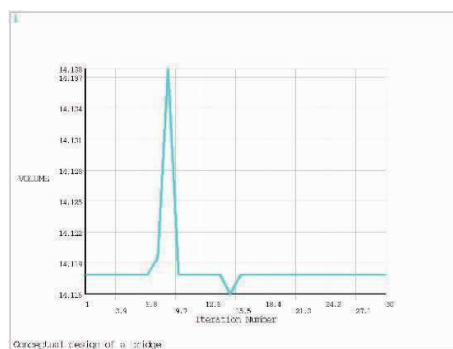
拓扑优化时,由于尚不明确构件尺寸、构件之间的连接方式,所以可以利用拓扑优化工具开展桥梁结构找型的工作。本文算例是以单元刚度最大为优化目标的二维单元拓扑优化。经过数次迭代获得了较成功的拱桥桥型的优化结果,充分证明了采用ESO法可以很好地开展桥梁的找型工作。

参考文献:

- [1] 汪树玉,刘国华,包志仁.结构优化设计的现状与进展[J].基建优化,1999,20(5):3-7.
- [2] 蔡新,郭兴文,张旭明.工程结构优化设计[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [3] 王军.波形钢腹板PC组合箱梁桥截面优化设计和剪力连接件研究[D].西安:长安大学,2013.
- [4] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.



(a) 拓扑目标函数迭代曲线



(b) VOLUME 的迭代曲线

图8 目标函数、约束函数的迭代曲线

- [5] 荣见华,谢忆民,姜节胜,等.渐进结构优化设计的现状与进展[J].长沙交通学院学报,2001,17(3):16-23.
- [6] 谢涛,刘静,刘军考.结构拓扑优化综述[J].机械工程师,2006(8):22-25.
- [7] 周克民,李俊峰.《连续结构拓扑优化:综述》简评[J].力学进展,2005(2):283-284.
- [8] 荣见华,郑健龙,徐飞鸿.结构动力修改及优化设计[M].北京:人民交通出版社,2002.

(上接第170页)

较大的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 万良,刘影.基于模糊数学的绿色建筑方案的优选[J].森林工程,2010,26(3):61-65.
- [2] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中理工大学出版社,2000.
- [3] 高英力.脱硫石膏-粉煤灰复合胶凝材料基胶砂试验研究[J].粉煤

灰综合利用,2009,24-25.

- [4] 陈水利,李敬功,王向公.模糊集理论及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [5] 黄伟.水泥类浆料在水泥混凝土路面脱空处治中的应用[J].中外公路,2011,31(4):284-287.
- [6] 曾胜,许佳,曾小军.基于模糊层次分析法的水泥混凝土路面板底脱空率的估算[J].中外公路,2009,29(4):54-57.