

模糊正交设计方法在沥青混合料试验中的应用

徐栋良,樊统江,陈富强,贾敬鹏

(重庆交通大学 土木建筑学院,重庆 400074)

摘要:使用花岗岩、玄武岩和石灰岩3种不同种类的集料和石灰石粉、重质碳酸钙和滑石粉3种不同种类的填料的沥青混合料,利用马歇尔试验方法进行多指标正交试验的结果,运用模糊数学方法分析了不同种类的集料和不同种类的填料对其试验结果的影响,同时利用模糊物元分析方法和层次分析法对沥青砼的马歇尔多个指标进行模糊综合评判,从而最终确定填料与集料种类的最佳组合及其最佳油石比。

关键词:多指标正交试验;模糊物元分析;模糊综合评判;层次分析法;最佳油石比;最佳组合

中图分类号:O159,U414.2

文献标识码:A

文章编号:1001-716X(2007)04-0060-05

Application of Fuzzy Orthogonal Method to Asphalt Mixture Experiment

XU Dong-liang, FAN Tong-jiang, CHEN Fu-qiang, JIA Jing-peng

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Through the Marshall test method, the multi-target orthogonal experiment was made through the asphalt mixtures of three types of aggregates mixed of granite, basalt and limestone and three types of fillers mixed of limestone powder, heavy calcium carbonate powder and talcum powder. Based on the experiment results, by using the fuzzy mathematics method, the influences of the combination of different aggregates and fillers on asphalt mixtures are analyzed in detail. On the bases of fuzzy element analysis and analytic hierarchy process, the fuzzy synthesis judgment on asphalt concrete guidelines is made to determine the best combination of the types of the fillers and aggregates and the best asphalt content of the mixture.

Key words: multi-targets orthogonal experiment; fuzzy element analysis; fuzzy synthesis judgment; analytic hierarchy process; best asphalt content of mixture; best combination

随着改革开放的不断深入,及国民经济的持续快速增长,作为高等级公路建设核心技术之一的沥青路面修建技术,得到了长足的进步和发展。同时高等级公路在促进社会经济持续快速发展中也发挥着越来越重要的作用。我国的沥青路面技术,以工程建设实践为依托,在路面结构设计、材料组成设计、施工机械及工艺、建设管理模式等方面,依靠科研攻关,不断技术创新,沥青路面修筑质量得到了稳步的提高。然而,我国沥青路面还存在诸多技术问题,如:随着交通量迅速增长,尤其是车辆大型化和严重的超载现象加剧以及交通渠化,使沥青砼路面的使用质量面临着严峻的考验,严重影响沥青路面的使用寿命。因此,科研人员试图通过各种途径来改善沥青路面的使用状况,以延长路面的使用寿命,提高路面

的使用性能(如通过严格控制超载,以减轻沥青路面结构的承受荷载;通过使用聚合物改性沥青或者用聚合物纤维改性沥青来改善沥青路面高温稳定性和承载能力;通过利用新型或功能性材料来改善沥青砼的性能等)。其中,研究不同集料,不同填料,不同级配对沥青砼性能的影响,从中找到最佳组合也是一种有效的技术途径。

以高等级公路沥青路面预防性养护关键技术研究项目为依托,对花岗岩、玄武岩和石灰岩3种不同种类的集料和石灰石粉、重质碳酸钙和滑石粉3种不同种类的填料对沥青混合料性能的影响进行研究,试图找到一种性能良好,经济合理的修补用的沥青混合料。研究利用马歇尔试验方法进行多指标正交试验,运用模糊数学方法分析了不同种类的集料

收稿日期:2006-05-15;修订日期:2006-07-03

作者简介:徐栋良(1982-),男,重庆江津人,硕士研究生,主要从事道路与铁道工程研究工作。e-mail: xudongliang 2000@163.com.

和不同种类的填料对沥青砼的马歇尔试验结果的影响,同时利用模糊物元分析方法和层次分析法对沥青砼的马歇尔多个指标进行模糊综合评判,从而最终确定填料与集料的最佳组合及其最佳油石比。

考虑到滑石粉、重质碳酸钙和石灰石粉相比有以下优势:①颗粒尺寸较小,化学活性高,表面性能高,在催化、吸附等方面具有优越性;②由于小尺寸效应,可提高沥青胶浆内聚粘接强度,改善沥青砼中各集料间的界面结构,提高沥青砼强度、抗渗性、抗水性能与耐久性。因此,具有较好的工程应用前景。

1 原材料和实验方法

1.1 原材料

本研究所用的集料均来自工程原产地,沥青采用镇江 70#,粗集料采用花岗岩、石灰岩、玄武岩,细

集料 2.36 mm 以下部分全采用石灰岩代替,矿粉采用普通石灰石粉、重质碳酸钙、滑石粉,其中普通石灰石粉过 0.075 mm 的方孔筛后使用,沥青、粗集料、重质碳酸钙、滑石粉的基本指标分别详见表 1~表 3。

1.2 矿料级配

试验用矿料级配见表 4。

表 1 镇江沥青 AH-70#主要技术指标

实验项目	实验结果	技术指标	实验方法
针入度/0.1 mm	67	60~80	T0604
针入度指数 PI	—	-1.5~1.0	T0604
软化点/℃	50	44~54	T0606
10℃ 延度/cm	49	>20	T0605
闪点/℃	314	>260	T0611
溶解度/%	99.8	>99.5	T0607
25℃密度/(g·cm ⁻³)	1.037	实测	T0603

表 2 粗集料质量技术指标

指标 类型	压碎值/ %	针片状 含量/%	吸水率/ %	洛杉矶 磨耗值/%	软弱颗粒/ %	磨光值/ BPN	冲击值/ %
石灰岩	18.4	11.6	0.36	16	—	—	14.2
玄武岩	13.2	9.7	1.45	13.89	1.6	49	—
花岗岩	16.6	7.5	0.3	12.34	1.4	61	—

表 3 重质碳酸钙、滑石粉基本指标

指标 种类	细度/ 目	粒径/ μm	白度/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	SiO ₂ 含量/ %	CaO 含量/ %	烧失量/ %
重质碳酸钙	>=500	<=25	>=95	2.686	—	>98.5	<0.5
滑石粉	>=400	<=38	>=95	2.524	>=49	>45	<3.0

表 4 AC-16I 沥青混合料矿料级配

筛孔尺寸/mm	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
质量通过百分率/%	3.4	5.2	8.2	12.7	19.6	30.6	47.8	74.5	92.0	100

1.3 试验方案

沥青混合料设计基于马歇尔试验方法的多指标试验,以油石比、矿粉种类、集料种类为控制因素,以空隙率、稳定度、流值为控制指标。油石比范围3.5%~5.5%,间隔油石比为 0.5%,进行 Marshall 试件的物理指标的测定,再进行沥青混合料的力学试验,通过试件的稳定度、流值、密度、饱和度、矿料间隙率等指标与油石比的关系图,确定最佳油石比的范围。最佳油石比的确定是在以上级配中选用花岗岩的基础上参加不同矿粉,进行试做,按照规范方法确定其最佳油石比大致为 4.9%。

2 基于模糊运算法则的正交试验设计

2.1 试验的因素与水平

影响沥青混合料性能的因素中,油石比、矿粉种类、集料种类这三个因素对沥青砼指标影响最大,因

此选用表 5 的水平取值。其中油石比的确定是在上面已做出的最佳油石比 4.9% 的基础上,以沥青用量 4.9% 为中线,两边各取步长 0.3%,作对比性试验。从沥青混合料的性能得知,综合性能的好坏只是一个总体的效果体现,各个指标水平的不同组合所体现的综合性能可能会是一样的。因此,可以认为各个指标的取值是一个模糊的概念,并运用模糊数学的分析方法来处理试验结果,找出各指标的最佳组合。

表 5 试验因素水平

因素	1	2	3
水平			
A(油石比)	4.60%	4.90%	5.20%
B(矿粉种类)	滑石粉	石灰石粉	重质碳酸钙
C(集料种类)	石灰岩	花岗岩	玄武岩

2.2 $L_9(3^4)$ 的正交试验及模糊统计表

本试验指标是沥青混合料的稳定度、流值、空隙率,通过确定合适的指标值,使它们所体现的综合性能达到最佳,以此时所对应试验条件作为本次试验的最终目标.试验考察指标及试验结果基本统计表如表6和表7.在表7中沥青混合料的各个指标的取值均在区间 $[0,1]$ 范围内,它是试验中的实测数据通过模糊物元分析方法转换而来的相应指标的隶属度.在变换的过程中引入了从优原则,其中稳定度越大越优,其变换公式为 $u_{ji} = X_{ji}/\max X_{ji}$;流值越小越优,其变换公式为 $u_{ji} = \min X_{ji}/X_{ji}$;空隙率越接近某个常数($u_0 = 3.8\%$)越优,其变换公式为 $u_{ji} = \min(X_{ji}, u_0)/\max(X_{ji}, u_0)$. 其中, $j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$.

2.3 模糊评判矩阵的建立

首先计算每个因素在各个水平上所对应的各个指标均值,即某一个因素的第 k 个水平在所对应指标上的均值为 $e_{ij} = \sum_k y_{ij}(k)/3$ ($i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, \dots, 9$; $k = 1, 2, 3$)

式中, $y_{ij}(k)$ 是观测值 y_{ij} 中与不同因素的第 k 个水平所对应的数据的转换值.由正交试验设计可知,同一个 y_{ij} 可以是不同因素不同水平作用的结果,例如3个因素对于第一个指标(稳定度)的第一个水平均值分别用 u_{11}, v_{11}, w_{11} 表示,有

$$u_{11} = (y_{11} + y_{12} + y_{13})/3 = (0.871 + 0.966 + 0.883)/3 = 0.907$$

$$v_{11} = (y_{11} + y_{14} + y_{17})/3 = (0.871 + 0.941 + 1.000)/3 = 0.937$$

$$w_{11} = (y_{11} + y_{16} + y_{18})/3 = (0.871 + 0.972 + 0.874)/3 = 0.906$$

同理,可算出其他各因素的水平均值,详见表8、表9.

表6 指标与测试方法

考察指标	观测数据转换指标	测试方法
稳定度 m_1/kN	u_{ij}	马歇尔试验
空隙率 $m_2/\%$	u''_{ij}	网篮法
流值 m_3/mm	u'_{ij}	马歇尔试验

表7 正交试验模糊统计

试验条件	因素及其水平				观测数据转换指标		
	A	B	C	4	u_{ij}	u''_{ij}	u'_{ij}
1	1	1	1	1	0.871	0.780	0.969
2	1	2	2	2	0.966	0.800	0.886
3	1	3	3	3	0.883	0.891	1.000
4	2	1	2	3	0.941	0.940	0.981
5	2	2	3	1	0.963	0.954	0.950
6	2	3	1	2	0.972	0.962	0.911
7	3	1	3	2	1.000	0.698	0.895
8	3	2	1	3	0.874	0.829	0.895
9	3	3	2	1	0.941	0.826	0.894

表8 因素水平均值

因素 水平	A			B			C		
	u_1	u_2	u_3	v_1	v_2	v_3	w_1	w_2	w_3
观测指标转换值									
u_{ij}	0.907	0.959	0.938	0.937	0.934	0.932	0.906	0.857	0.925
u''_{ij}	0.824	0.952	0.784	0.806	0.861	0.893	0.949	0.856	0.948
u'_{ij}	0.952	0.947	0.895	0.949	0.91	0.935	0.949	0.847	0.948

表9 因素与对应指标的评语集合

因素 水平	A			B			C		
	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3
观测指标归一化值									
m_1	0.316	0.346	0.338	0.334	0.333	0.332	0.337	0.319	0.344
m_2	0.322	0.372	0.306	0.315	0.336	0.349	0.345	0.311	0.345
m_3	0.341	0.339	0.320	0.340	0.326	0.335	0.346	0.309	0.346

注:表9中每一个因素下面的数字方阵就是该因素所对应的评判矩阵.

3 模糊综合评判

3.1 权重向量的确定

在模糊综合评判过程中,权重向量的确定是优化设计的关键,它既可以由专家评定来决定相应的

权重分配,也可以通过计算得出.考虑到专家评定主观因素及经验因素较大,为了使确定出来的权向量更具有合理性,采用 T. L. Saaty 提出的层次分析法计算,即在主观评定的同时采用数学方法客观的确

定权重分配向量,使其各个指标值得到最优的权重分配.具体的计算方法见文献[3].通过计算得出评判指标 m_1, m_2, m_3 的权重系数分别为 0.332、0.547、0.121,由此构成的权重向量为 $W = (0.332, 0.547, 0.121)$.

3.2 综合评判和水平优选

3.2.1 对因素 A 的综合评判

由表 9 可知不同油石比对 3 个指标的隶属度,构成的模糊评判关系矩阵为:

$$R1 = \begin{bmatrix} 0.316 & 0.346 & 0.338 \\ 0.322 & 0.372 & 0.306 \\ 0.341 & 0.339 & 0.320 \end{bmatrix}$$

根据权重向量和评判关系矩阵,由模糊综合评判模型 $M = W \circ R$,采用 Zadeh 算子评判 ($m_j = \max \min(w_j, r_{ij} = \bigvee_{i=1}^m (w_j \wedge r_{ij}))$),得出对因素 A 的综合评判结果为:

$$M1 = W \circ R1 = (0.332 \quad 0.547 \quad 0.121) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.316 & 0.346 & 0.338 \\ 0.322 & 0.372 & 0.306 \\ 0.341 & 0.339 & 0.320 \end{bmatrix} = (0.322 \quad 0.372 \quad 0.332)$$

式中, $M1 = (0.332 \wedge 0.316) \vee (0.547 \wedge 0.322) (0.121 \wedge 0.340) = 0.316 \vee 0.322 \vee 0.121 = 0.322$

在此基础上,再对评判结果进行归一化处理,得 $B1 = (0.314 \quad 0.362 \quad 0.324)$,由于 $b2 > b3 > b1$,则 $b2$ 就是优选的隶属度,即认为油石比 4.9% 对路面性能的综合指标为最优水平.

3.2.2 对因素 B 和 C 的综合评判

按照以上方法可求得因素 B 和 C 的综合评判结果分别为

$$M2 = W \circ R2 = (0.332 \quad 0.547 \quad 0.121) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.334 & 0.333 & 0.332 \\ 0.315 & 0.336 & 0.349 \\ 0.34 & 0.326 & 0.335 \end{bmatrix} = (0.332 \quad 0.336 \quad 0.349)$$

$$M3 = W \circ R3 = (0.332 \quad 0.547 \quad 0.121) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.337 & 0.319 & 0.344 \\ 0.345 & 0.311 & 0.345 \\ 0.346 & 0.309 & 0.346 \end{bmatrix} = (0.345 \quad 0.319 \quad 0.345)$$

通过归一化处理后, A, B, C 单因素的综合评价向量为

$$M1 = (0.314 \quad 0.362 \quad 0.324)$$

$$M2 = (0.327 \quad 0.330 \quad 0.343)$$

$$M3 = (0.342 \quad 0.317 \quad 0.341)$$

3.3 直观分析

根据表 8 结果,将各因素水平与观测指标转换值的关系绘制成图,如图 1 ~ 图 3.

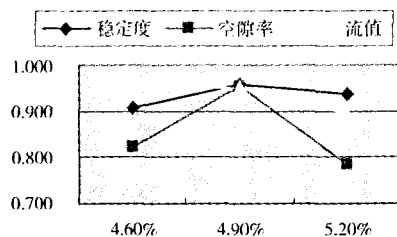


图1 因素 A(油石比)

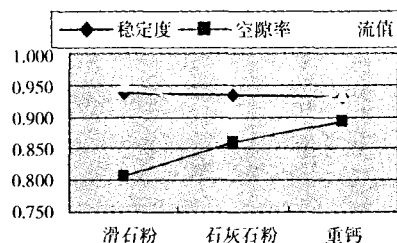


图2 因素 B(矿粉种类)

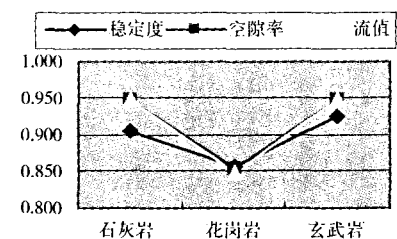


图3 因素 C(集料种类)

由于指标观测值已采用从优原则,并通过模糊物元分析方法转换为相应的隶属度,因此最佳水平的选择应是指标值越大越好,于是由图 1 ~ 图 3 可直观的看出,稳定度较高的最佳水平组合为 $A_2B_1C_3$,空隙率接近常数 (3.8%) 的最佳组合为 $A_2B_3C_1$,流值较小的最佳组合为 $A_1B_1C_1$.

3.4 多指标模糊综合评判

从单因素模糊综合评判向量 $M1, M2, M3$ 中可以看出 $M12, M23, M31$ 是最佳工艺参数组合,即 $A_2B_3C_1$,此时油石比为 4.9%,矿粉为重值碳酸钙,集料种类为石灰岩.

由此可知通过模糊综合评判对影响马歇尔试验结果的各个参数的模糊正交试验,使各个考察指标在不同的权重系数下,获得它们的最佳组合,最佳组合方案的各因素水平都是从最高效应中择优而取的.值得一提的是,此时所确定的最佳组合只是在目标配合比设计阶段得出的,但具体性能的好坏以及其合理性程度,尚需从后续实验中的其他指标(如动稳定度、蠕变劲度模量、弯曲模量、冻融劈裂强度

比等)进一步评判。

4 结 语

由于正交设计通常是通过较少的试验找出其输入量与输出量的对应关系,这就使得试验中往往会漏掉一些搭配,难以进行试验因素的有效组合与安排,而通过模糊综合评判的方法正好弥补了正交设计中传统正交试验数据分析方法的不足,它使试验数量大为减少,并可有效寻找出最佳工艺条件,避免陷入局部最优解,而这也正说明了模糊数学在评价正交设计中明显优于一般统计方法。因此,模糊数学在试验设计与工程应用中具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社,2005.

- [2] 沈邦兴. 试验设计及工程应用[M]. 北京:中国计量出版社,2005.
- [3] [美]萨蒂 T L. 层次分析法[M]. 许树柏译. 北京:煤炭工业出版社,1985.
- [4] 张登良. 沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [5] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 殷岳川. 公路沥青路面施工[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [7] 资雪琴,刘刚. 层次分析法在室内空气品质综合评价中的应用[J]. 山西能源与节能,2005,(1):33-34.
- [8] 邹春伟. 道路工程中的模糊综合评判法[J]. 安徽建筑工业学院学报,2004,12(1):76-77.
- [9] CHEN Shyi-ming. Fuzzy group decision making for evaluating the rate of aggregative risk in software development[J]. Fuzzy Sets and Systems,2001,118(1):75-83.

(上接第56页)

堵为主”的治水原则进行治理。

对于施工缝及裂缝渗漏水,沿施工缝及砼裂缝凿槽后用KT材料对槽底进行封堵后安装PVC管,其上用KP材料封堵,确保管外不渗不漏;砼表面点片状渗漏水处将需处理部位的基面凿除后均匀地涂抹KT1溶液。对于较严重的渗水,可先找出渗水点用KT材料堵漏后再涂刷KT1溶液;拱脚处渗漏水采取“先排后堵”的原则,即凿槽冲洗后安装PVC引水管,再采用凯顿系列堵水材料封堵,使渗漏水直接排入纵向排水沟。

磨沟岭隧道渗漏水仅历时两周,经现场检验及观察,采用凯顿系列防水材料治理渗漏水后,隧道渗漏水得到全面解决,不仅达到了“快速高效”的目的,还确保了隧道处理后“不渗不漏”。

5 结 论

通过对铁路隧道渗漏水的表现形式、主要危害等方面的叙述,从工程上的设计、施工质量及选用材料等方面对渗漏水的形成进行了详细的分析,提出相应的治理措施建议,为隧道渗漏水的防治提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 祝和权,李海燕. 铁路隧道防水技术现状及趋势[J]. 铁道建设,2003,(10):36-38.
- [2] 韩忠存,张文强. 隧道渗漏水病害的预防及治理[J]. 公路学报,2005,(4):87-92.
- [3] 曹玉,彭勇,滕伟福,等. 运营铁路渗漏水与衬砌裂损病害分析及整治[J]. 西部探矿工程,2003,(6):92-95.
- [4] 铁道部第二勘察设计院. 隧道[M]. 中国铁道出版社,1995.
- [5] 袁勇,姜孝漠. 我国隧道放水技术现状[J]. 世界道路,1999,(4):40-44.
- [6] 叶林标. 建筑工程防水施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990:32-33.
- [7] 史常青. 确保铁路隧道不渗不漏的施工技术研究[J]. 隧道标准设计,2005,(2):62-64.
- [8] 赵旭东. 隧道渗漏水的病害整治[J]. 西部探矿工程,2001,(2):69-73.
- [9] 祝和权,李海燕,杜存山. 隧道渗漏水综合治理技术的研究[J]. 中国铁路,2005,(4):42-44.