

文章编号:1671-1637(2016)03-0017-11

施工关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响

薛永超, 钱振东

(东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要:为了研究施工关键因素与环氧沥青混凝土路用性能的综合关系,通过模拟施工关键因素的变化,在室内进行多指标正交试验,关键因素主要包括环氧沥青中A、B组分质量比(A组分为环氧树脂,B组分为石油沥青与固化剂组成的匀质合成物)、油石比、集料级配、混凝土成型时间、混凝土成型温度与压实功,多指标主要包括高温稳定性、低温抗裂性、抗疲劳性、渗水性、抗滑性与水稳定性,利用改进灰色局势决策计算正交试验中每种局势的路用性能与最优局势的灰色综合关联度,并通过SPSS软件进行极差与方差分析。分析结果表明:局势4的灰色综合关联度为0.943 7,与局势3的灰色综合关联度相差0.081 1,较大的差值说明不同的局势与最优局势的联系紧密程度相差较大,根据各局势的灰色综合关联度得出18种制作试件方案的优劣排序;成型时间的极差为2.857,集料级配的极差为1.555,两者相差1.302,说明不同的关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度不同,根据各关键因素的极差得出6个关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度由大到小依次为成型时间、油石比、A、B组分质量比、压实功、成型温度与集料级配;比较每个关键因素的各水平的灰色综合关联度均值,可以得出最佳的施工方案为A、B组分质量比取1:2.9,油石比取6.5%,集料级配取2.36 mm筛孔通过率设计中值,成型时间取55 min,成型温度取120℃,压实功取轮碾24次;方差分析中各关键因素的F检验值均大于临界值19,具有良好的显著性。可见,采用改进灰色局势决策可以有效评估不同施工方案下环氧沥青混凝土路用性能,并可以结合极差分析确定施工过程中各关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度与最佳的施工方案。

关键词:路面材料;环氧沥青混凝土;正交试验;改进灰色局势决策;路用性能

中图分类号:U414.18

文献标志码:A

Influence of key factors in construction on pavement performances of epoxy asphalt concrete

XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong

(Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the comprehensive relationship between the key factors in construction and the pavement performances of epoxy asphalt concrete, the variation of key factors in construction was simulated, and the multi-index orthogonal experiment was carried out in the laboratory. The key factors included mass ratio of component A (the epoxy resin) to component B (the mixture of petroleum asphalt and curing agent) in epoxy asphalt, asphalt-aggregate ratio, aggregate gradation, molding time of concrete, molding temperature of concrete, and compaction work. The multiple indexes included high-temperature stability, low-temperature anti-cracking performance, fatigue resistance performance, water permeability, skid resistance, and moisture

收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51178114, 51378122)

作者简介:薛永超(1990-),男,江苏扬州人,东南大学工学博士研究生,从事路面材料研究。

导师简介:钱振东(1969-),女,江苏南通人,东南大学教授,工学博士。

susceptibility. The improved grey situation decision was used to calculate the grey comprehensive relevancy between the pavement performances of every situation in orthogonal experiment and the optimal situation, and the range and the variance were analyzed by using the statistical product and service solutions (SPSS) software. Analysis result shows that the grey comprehensive relevancy of situation 4 is 0.943 7 and 0.081 1 larger than the value of situation 3, which indicates that the relational closeness between each situation and optimal situation changes significant. Based on the grey comprehensive relevancy of every situation, 18 kinds of schemes making specimens are ranked from good to bad. The range of molding time is 2.857, while the range of aggregate gradation is 1.555, and the larger difference of 1.302 between the two key factors shows that the influences of different key factors in construction on the pavement performances are different. Based on the ranges, key ranked factors are molding time of concrete, asphalt-aggregate ratio, mass ratio of component A to component B, compaction work, molding temperature of concrete, and aggregate gradation according to the influences from big to small. By comparing the average values of grey comprehensive relevancies of each level of all key factors, the determined best construction scheme is that the mass ratio of component A to component B is 1 : 2.9, asphalt-aggregate ratio is 6.5%, the passing rate of 2.36 mm of aggregate gradation is the median of design value, molding time is 55 min, molding temperature is 120 °C, and compaction work is 24 times. The *F* test value of every key factor in variance analysis is bigger than 19, so key factors and their levels have good conspicuousness. Obviously, the improved grey situation decision can be used to effectively evaluate the pavement performances of epoxy asphalt concrete under different construction schemes, and to determine the influence degrees of key factors in construction on the pavement performances of epoxy asphalt concrete and the best construction scheme combined with the range analysis. 5 tabs, 16 figs, 26 refs.

Key words: pavement material; epoxy asphalt concrete; orthogonal experiment; improved grey situation decision; pavement performance

Author resumes: XUE Yong-chao(1990-), male, doctoral student, +86-25-83792868, xueyc@seu.edu.cn; QIAN Zhen-dong(1969-), female, professor, PhD, +86-25-83792868, qianzd@seu.edu.cn.

0 引 言

环氧沥青混凝土是通过在沥青中添加热固性环氧树脂和固化剂,经固化反应而形成的一种强度高、韧性好的沥青混凝土,成功应用于桥面与路面铺装材料,具有优异的高温稳定性、低温抗裂性与抗疲劳性等路用性能^[1-4]。但是,作为一种施工敏感性高的热固性材料,环氧沥青中各组分的质量比、油石比、集料级配、混凝土成型时间、混凝土成型温度与压实功等施工中容易出现偏差的关键因素,对环氧沥青混凝土的路用性能影响较大,相对于普通沥青混凝土,环氧沥青混凝土对施工控制体系的要求更高^[5-7]。

Qian 等利用有限元方法研究了温度与环氧沥青混凝土的裂纹扩展形态、扩展速率与应力状态的

关系^[8];Dang 等通过室内试验研究了纤维类型与 SMA 混凝土的马歇尔稳定度与动稳定度的关系^[9];秦旻等通过冻融循环试验研究了水作用、温度与沥青混合料的疲劳性能的关系^[10];张顺先等基于断裂力学与能量法研究了油石比、温度与环氧沥青混凝土的抗疲劳性能的关系^[11];Vardanega 等基于孔隙大小研究了沥青黏结料比例、压实功和集料级配等因素与沥青混凝土的渗水性能的关系^[12]。可以看出,目前对单一因素与沥青混凝土路用性能多指标的关系以及多因素与沥青混凝土路用性能单一指标的关系研究较多,而多因素与沥青混凝土路用性能多指标的系统、综合的关系研究相对较少。此外,针对环氧沥青混凝土较高的施工敏感性,根据某一指标的优劣而评价其路用性能的设计与验证方法具有较大的主观性和不合理性,难以满足现阶段对于环氧沥青混

凝土较高的性能要求。灰色局势决策方法具有传统统计理论无法比拟的优点,能够针对多指标精确地计算出多因素与路用性能的综合关系^[13-15]。

本文通过模拟环氧沥青混凝土施工过程中关键因素的变化,在室内进行多指标正交试验,关键因素主要包括环氧沥青中各组分的质量比、油石比、集料级配、混凝土成型时间、混凝土成型温度与压实功,多指标主要包括高温稳定性、低温抗裂性、抗疲劳性、渗水性、抗滑性与水稳定性,并使用改进灰色局势决策、极差与方差分形方法对试验结果进行分析,研究了施工过程中各关键因素的变化对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度,以期确定环氧沥青混凝土施工中各环节的控制方法,从而对施工工艺提出改进措施。

1 正交试验

本文通过正交试验设计原则^[16],根据不同因素的不同水平,确定 18 种试件制作方案,进而通过 6 种室内试验测试不同试件制作方案下的环氧沥青混凝土的 6 个路用性能指标。

1.1 试验材料

试验采用的环氧沥青混凝土由钢桥面用环氧沥青与密级配玄武岩集料以一定的油石比拌和而成,其中,环氧沥青采用钢桥面用 2910 型国产环氧沥青,包含 A、B 两个组分,A 组分为环氧树脂,B 组分为石油沥青与固化剂组成的匀质合成物,密级配玄武岩集料公称最大粒径为 9.5 mm。A 组分与 B 组分以质量比 1 : 2.9 混合而成的环氧沥青主要参数见表 1。

表 1 环氧沥青主要参数

Tab. 1 Main parameters of epoxy asphalt

性能指标	试验结果	技术要求	试验方法
拉伸强度(23℃)/MPa	2.21	≥1.50	ASTM D638
断裂延伸率(23℃)	3.63	≥2.00	ASTM D638
黏度增加至 1 Pa·s 的时间/min	59	≥50	ASTM D4402

1.2 试件制作

首先,设计影响因素水平表,包括环氧沥青 A、B 组分质量比、油石比、集料级配、混凝土成型时间(从混凝土拌和好到碾压成型的时间)、混凝土成型温度(混凝土碾压成型时的温度)与压实功(碾压次数)6 个因素,每个因素分 3 个水平,分别依据施工经验模拟施工过程中各关键因素可能出现的变化;然后,根据影响因素水平表与多指标正交试验设计原则进行正交表 $L_{18}(3^7)$ 的制作;最后,按照正交表

$L_{18}(3^7)$ 中 18 种方案进行环氧沥青混凝土的拌和与试件的制作,每种方案制作 5 个车辙试件和 10 个马歇尔试件,见图 1,车辙试件采用轮碾法制作,尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中沥青混合料试件制作方法(轮碾法)进行试验,马歇尔试件采用标准击实法制作,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中沥青混合料试件制作方法(击实法)进行试验。影响因素水平与试验方案分别见表 2、3。

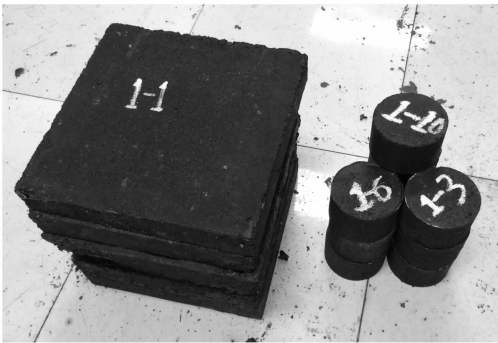


图 1 车辙试件与马歇尔试件

Fig. 1 Rut specimens and Marshall specimens

表 2 影响因素水平

Tab. 2 Levels of influence factors

水平	1	2	3
A、B 组分质量比	1 : 2.7	1 : 2.9	1 : 3.1
油石比/%	6.3	6.5	6.7
集料级配	I	II	III
成型时间/min	45	55	65
成型温度/℃	115	120	125
压实功/次	18	24	30

集料级配水平确定过程为:首先,根据贝雷法公称最大粒径的 0.22 倍确定环氧沥青混凝土集料级配的第 1 控制筛孔粒径为 2.36 mm^[17-19];然后,依据目前现场施工控制的要求,分别取 2.36 mm 筛孔通过率的设计中值与设计值的中值的±3%作为 3 个水平的 2.36 mm 筛孔通过率;最后,根据 2.36 mm 筛孔通过率与 0.075、4.75 mm 两个关键筛孔通过率的设计中值,在环氧沥青混凝土的设计级配范围里调出 3 种集料级配,级配 I 的 2.36 mm 筛孔通过率为设计中值,级配 II 的 2.36 mm 筛孔通过率为设计中值的+3%,级配 III 的 2.36 mm 筛孔通过率为设计中值的-3%,集料级配见表 4。

1.3 试验方法

(1)车辙试验:参照《公路工程沥青及沥青混合

表 3 试验方案
Tab. 3 Test schemes

试验 方案	影响因素水平					
	A、B组分 质量比	油石比	集料 级配	成型 时间	成型 温度	压实功
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2	3
5	2	2	2	3	3	1
6	2	3	3	1	1	2
7	3	1	2	1	3	2
8	3	2	3	2	1	3
9	3	3	1	3	2	1
10	1	1	3	3	2	2
11	1	2	1	1	3	3
12	1	3	2	2	1	1
13	2	1	2	3	1	3
14	2	2	3	1	2	1
15	2	3	1	2	3	2
16	3	1	3	2	3	1
17	3	2	1	3	1	2
18	3	3	2	1	2	3

表 4 集料设计级配

Tab. 4 Design gradations of aggregates

筛孔尺寸/mm		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	下限	100.0	95.0	65.0	50.0	39.0	28.0	21.0	14.0	7.0
	上限	100.0	100.0	85.0	70.0	55.0	40.0	32.0	23.0	14.0
	I	100.0	97.1	75.0	60.0	48.0	35.0	25.0	17.4	10.5
	II	100.0	97.5	76.0	63.0	50.0	35.9	25.5	17.7	10.8
	III	100.0	96.7	74.9	57.0	46.0	34.0	24.2	16.9	10.0

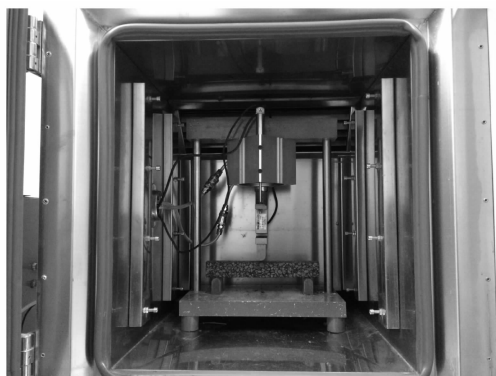


图 2 弯曲试验
Fig. 2 Bending test



图 3 疲劳试验
Fig. 3 Fatigue test

性能的渗水系数。

(5)摆式摩擦因数试验:采用英式摆式摩擦仪,

料试验规程》(JTG E20—2011)中的沥青混合料车辙试验,试验温度为 60 ℃,轮压为 0.7 MPa,得到用以表征高温稳定性的动稳定度。

(2)弯曲试验:从车辙板上切割尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm 的小梁试件,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的沥青混合料弯曲试验,见图 2,试验温度为-15 ℃,加载速率为 50 mm·min⁻¹,得到用以表征低温变形能力的最大弯拉应变。

(3)疲劳试验:从车辙板上切割尺寸为 300 mm×40 mm×50 mm 的小梁试件,采用 LDMT-25 微机控制沥青混合料动态疲劳试验机进行疲劳试验,见图 3,有效跨径(试件下方两支点之间的距离)为 250 mm,试验加载模式为控制应力模式,应力比为 0.3,根据弯曲试验得到的弯曲极限荷载与应力比确定荷载水平,加载波形为半正弦波,加载频率为 10 Hz,试验温度为 15 ℃,得到用以表征抗疲劳性能的疲劳作用次数。

(4)渗水试验:参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的沥青混合料渗水试验,由于环氧沥青混凝土的空隙率很小,渗水较慢,所以根据 3 min 通过的水量得到用以表征渗水

参照 ASTM E303 规程进行试验,得到用以表征抗滑性能的摩擦因数。

(6)冻融劈裂试验:参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的沥青混合料冻融劈裂试验,在每种方案下,经受冻融循环的试件与未进行冻融循环的试件各 5 个,以前者与后者有效试件劈裂抗拉强度平均值的比值作为表征水稳

定性的冻融劈裂抗拉强度比。

1.4 试验结果分析

根据正交试验中各方案制作的试件的动稳定度、最大弯拉应变、疲劳作用次数、渗水系数、摩擦因数与冻融劈裂抗拉强度比见表 5。

表 5 试验结果
Tab. 5 Test results

试验方案	性能指标					
	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/ 10 ⁻⁶	疲劳作用次数/ 10 ⁴ 次	渗水系数/ (mL·min ⁻¹)	摩擦因数	冻融劈裂抗拉 强度比/%
1	16 349	2 444.2	16.5	2.39	82	90.1
2	18 360	2 899.0	18.5	2.13	78	99.3
3	17 636	2 623.5	17.4	2.48	70	93.4
4	18 913	2 880.4	18.8	2.23	81	99.3
5	17 988	2 727.1	17.6	2.42	76	95.6
6	17 400	2 736.6	17.5	2.29	80	92.9
7	16 552	2 567.0	17.0	2.28	76	90.3
8	18 696	2 874.2	18.5	2.28	77	99.2
9	17 055	2 775.3	17.6	2.33	76	91.6
10	17 700	2 636.1	16.9	2.52	80	90.2
11	18 504	2 774.9	17.9	2.13	73	93.9
12	17 721	2 583.7	17.0	2.43	77	90.9
13	16 344	2 613.3	16.5	2.33	73	90.0
14	18 234	2 841.8	18.2	2.47	78	96.9
15	18 727	2 897.0	18.7	2.22	76	99.2
16	16 654	2 489.5	17.0	2.38	82	90.1
17	17 578	2 741.6	18.1	2.33	82	91.7
18	18 838	2 828.1	18.4	2.13	71	95.6

由表 5 可知,通过不同方案制作的试件的性能有很大差异,如方案 4 的动稳定度、疲劳作用次数与冻融劈裂抗拉强度比均高于其他所有方案,即高温稳定性、抗疲劳性能与水稳定性优于其他所有方案,但渗水性能相对较差;方案 2 的最大弯拉应变大于其他所有方案,即低温抗裂性优于其他所有方案,而其摩擦因数却也小于其他部分方案,即抗滑性能相对较差。可见,采用单一性能指标并不能全面反映不同方案的优劣,更不能确定方案中每个关键因素对路用性能的影响程度,因此,需要借助改进灰色局势决策方法,进行多指标的对比和分析,计算出每种方案的综合优劣程度。

2 基于改进灰色局势决策的路用性能分析

灰色局势决策就是针对被处置的事件,从不同

的对策中挑选出效果最好的对策来处理该事件,一般由局势效果的确定、最优局势效果的确定与灰色绝对关联度的计算 3 个主要步骤组成^[20-21]。本文针对灰色绝对关联度在体现两序列相对于始点变化速率的接近程度上的不足,用综合关联度代替灰色局势决策中的绝对关联度,改进后的灰色局势决策既能体现两序列的相似程度,又能反映出两序列相对于始点变化速率的接近程度,是较为全面地计算序列之间联系紧密程度的决策方法,能够很好地运用到多指标的对比和分析结果,计算出每种方案的综合优劣程度^[22]。

2.1 局势效果的确定

首先,定义 $U(k)$ 为 18 个局势里的环氧沥青混凝土第 k 个决策目标的效果样本序列,定义 $u_i(k)$ 为第 i 个局势里的环氧沥青混凝土第 k 个决策目标的效果样本,即 18 个试件制作方案。本文选择的 6 个

决策目标对应 6 个路用性能指标:动稳定度(DS)、最大弯拉应变(FS)、疲劳作用次数(RT)、渗水系数(WPC)、摩擦因数(FC)、冻融劈裂抗拉强度比(TSR)。效果样本序列 $U(k)$ 为

$$U(k) = \{u_1(k), \dots, u_i(k), \dots, u_{18}(k)\} \quad (1)$$

将以决策目标划分的 6 组试验数据作为效果样本分别代入式(1),得到

$$U(1) = \{16\ 349, 18\ 360, 17\ 636, 18\ 913, \\ 17\ 988, \dots, 18\ 838\}$$

$$U(2) = \{2\ 444.2, 2\ 899.0, 2\ 623.5, 2\ 880.4, \\ 2\ 727.1, \dots, 2\ 828.1\}$$

$$U(3) = \{16.5, 18.5, 17.4, 18.8, 17.6, \dots, 18.4\}$$

$$U(4) = \{2.39, 2.13, 2.48, 2.23, 2.42, \dots, 2.13\}$$

$$U(5) = \{82, 78, 70, 81, 76, \dots, 71\}$$

$$U(6) = \{90.1, 99.3, 93.4, 99.3, 95.6, \dots, 95.6\}$$

定义 $R(k)$ 为效果样本序列 $U(k)$ 的一致效果测度序列, $r_i(k)$ 为效果样本 $u_i(k)$ 的一致效果测度, 一致效果测度序列 $R(k)$ 为

$$R(k) = \{r_1(k), \dots, r_i(k), \dots, r_{18}(k)\} \quad (2)$$

动稳定度、最大弯拉应变、疲劳作用次数、摩擦因数与冻融劈裂抗拉强度比越大,路用性能越好,渗水系数越小,性能越好,因此,动稳定度、最大弯拉应变、疲劳作用次数、摩擦因数与冻融劈裂抗拉强度比采用上限效果测度,而渗水系数采用下限效果测度。上限效果测度 $r_{si}(k)$ 与下限效果测度 $r_{xi}(k)$ 分别为

$$r_{si}(k) = \frac{u_i(k)}{\max[u_i(k)]} \quad (3)$$

$$r_{xi}(k) = \frac{\min[u_i(k)]}{u_i(k)} \quad (4)$$

将 $U(1) \sim U(6)$ 代入式(3)、(4)后得到的一致效果测度序列 $R(k)$ 为

$$R(1) = \{0.864\ 4, 0.970\ 8, 0.932\ 5, 1.000\ 0, \\ 0.951\ 1, \dots, 0.996\ 0\}$$

$$R(2) = \{0.843\ 1, 1.000\ 0, 0.905\ 0, 0.993\ 6, \\ 0.940\ 7, \dots, 0.975\ 5\}$$

$$R(3) = \{0.877\ 7, 0.984\ 0, 0.925\ 5, 1.000\ 0, \\ 0.936\ 2, \dots, 0.978\ 7\}$$

$$R(4) = \{0.891\ 2, 1.000\ 0, 0.858\ 9, 0.955\ 2, \\ 0.880\ 2, \dots, 1.000\ 0\}$$

$$R(5) = \{1.000\ 0, 0.951\ 2, 0.853\ 7, 0.987\ 8, \\ 0.926\ 8, \dots, 0.865\ 9\}$$

$$R(6) = \{0.907\ 4, 1.000\ 0, 0.940\ 6, 1.000\ 0, \\ 0.962\ 7, \dots, 0.962\ 7\}$$

最后,定义 V_i 为第 i 个局势的环氧沥青混凝土 6 个决策目标的一致效果测度序列, $v_i(k)$ 为第 i 个局势的环氧沥青混凝土第 k 个决策目标的一致效果测度

$$v_i(k) = r_i(k) \quad (5)$$

一致效果测度序列 V_i 为

$$V_i = \{v_i(1), \dots, v_i(k), \dots, v_i(6)\} \quad (6)$$

将 $R(1) \sim R(6)$ 中的一致效果测度代入式(5)、(6),得到

$$V_1 = \{0.864\ 4, 0.843\ 1, 0.877\ 7, 0.891\ 2, \\ 1.000\ 0, 0.907\ 4\}$$

$$V_2 = \{0.970\ 8, 1.000\ 0, 0.984\ 0, 1.000\ 0, \\ 0.951\ 2, 1.000\ 0\}$$

⋮

$$V_{18} = \{0.996\ 0, 0.975\ 5, 0.978\ 7, 1.000\ 0, \\ 0.865\ 9, 0.962\ 7\}$$

2.2 最优局势效果的确定

根据上限与下限效果测度,可得最优局势的环氧沥青混凝土 6 个决策目标的一致效果测度序列 V_{os} 为

$$V_{os} = \{1.000\ 0, 1.000\ 0, 1.000\ 0, \\ 1.000\ 0, 1.000\ 0, 1.000\ 0\}$$

V_i 与 V_{os} 的相似程度与接近程度见图 4~7,可以看出,在 6 个不同的决策目标下,各个局势与最优局势的相似程度与接近程度都不相同,而且无法进行简

单量化,因此,需要进行灰色综合关联度的计算,根据计算结果对它们的联系紧密程度进行对比和分析。

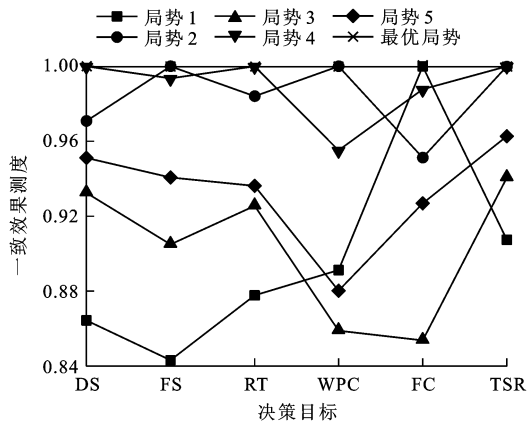


图4 局势1~5与最优局势测度的比较

Fig. 4 Comparison of measure degrees between situations 1-5 and optimal situation

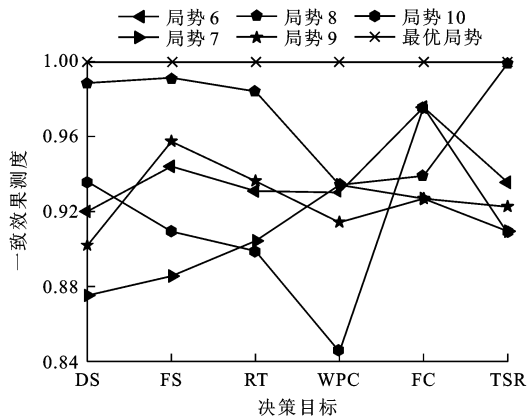


图5 局势6~10与最优局势测度的比较

Fig. 5 Comparison of measure degrees between situations 6-10 and optimal situation

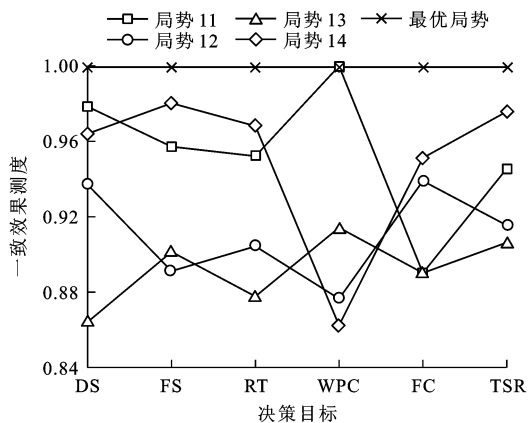


图6 局势11~14与最优局势测度的比较

Fig. 6 Comparison of measure degrees between situations 11-14 and optimal situation

2.3 灰色综合关联度的计算

通过 MATLAB 软件简单编程,进行 V_i 与 V_{os}

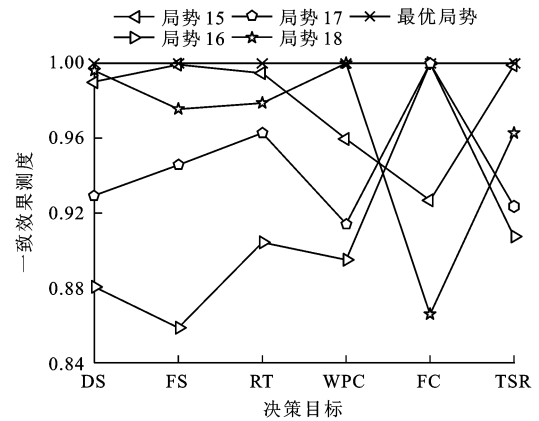


图7 局势15~18与最优局势测度的比较

Fig. 7 Comparison of measure degrees between situations 15-18 and optimal situation

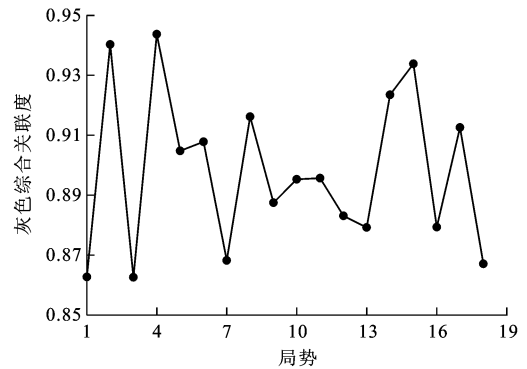


图8 灰色综合关联度计算结果

Fig. 8 Computed result of grey comprehensive relevancy

之间灰色综合关联度的计算^[22],计算结果见图8。局势4的灰色综合关联度为0.9437,局势3的灰色综合关联度为0.8626,局势4与局势3的灰色综合关联度分别是18个局势中的最大值与最小值,两者相差0.0811,说明不同的局势与最优局势的联系紧密程度相差较大,对灰色综合关联度进行排序,可以看出各局势与最优局势的紧密联系程度由大到小排序为:4、2、15、14、8、17、6、5、11、10、9、12、16、13、7、18、1、3。

综上可得,不同试件制作方案下的环氧沥青混凝土的路用性能差异较大,同时,基于环氧沥青混凝土路用性能的6个指标,可以得到18种试件制作方案的优劣排序,即相应的18种施工方案下的路用性能优劣排序为4、2、15、14、8、17、6、5、11、10、9、12、16、13、7、18、1、3,可知方案4的路用性能相对于其他方案最好。

3 极差分析与方差分析

3.1 极差分析

本文采用 SPSS(Statistical Product and Service

Solutions)软件计算 6 个关键因素的极差及其每个水平的灰色综合关联度均值,计算结果见图 9~15。关键因素的极差越大,表示该关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度越大;关键因素的某个水平的灰色综合关联度均值越大,表示该水平相对于此关键因素的其他水平,更有利于提高环氧沥青混凝土的路用性能。

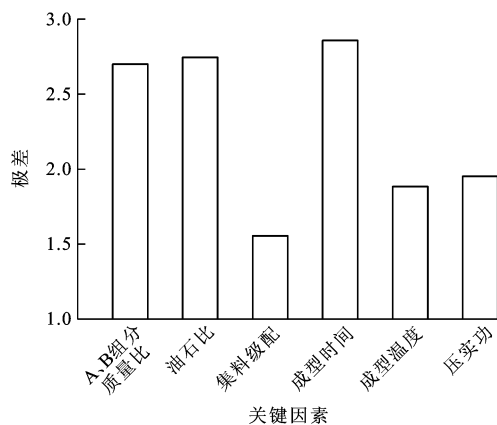


图 9 关键因素的极差

Fig. 9 Ranges of key factors

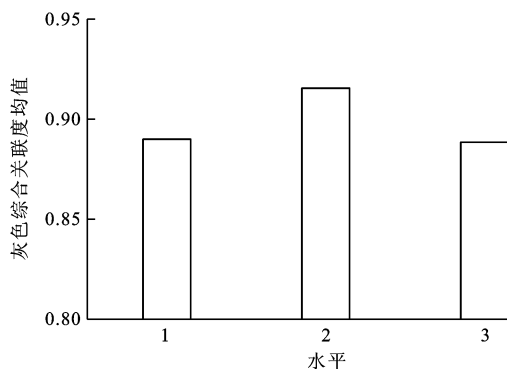


图 10 A、B 组分质量比的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 10 Average values of grey comprehensive relevancies for all mass ratio levels of component A to component B

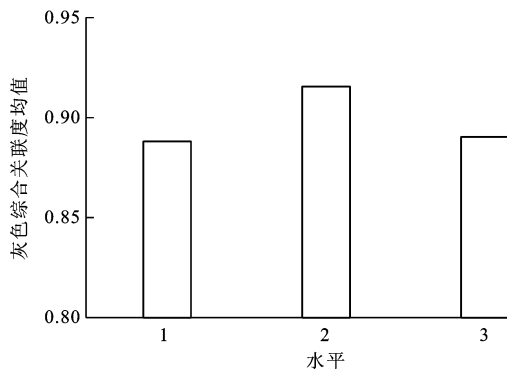


图 11 油石比的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 11 Average values of grey comprehensive relevancies for all levels of asphalt-aggregate ratio

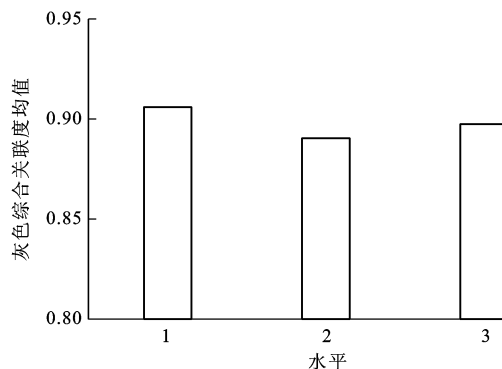


图 12 集料级配的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 12 Average values of grey comprehensive relevancies for all levels of aggregate gradation

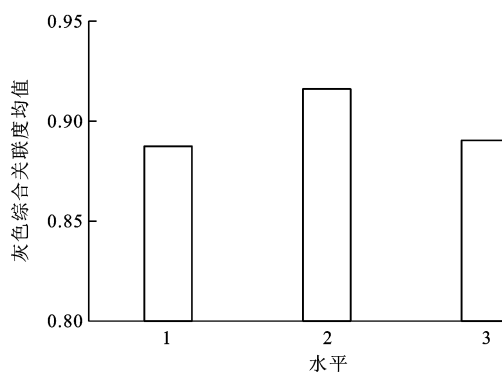


图 13 成型时间的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 13 Average values of grey comprehensive relevancies for all levels of molding time

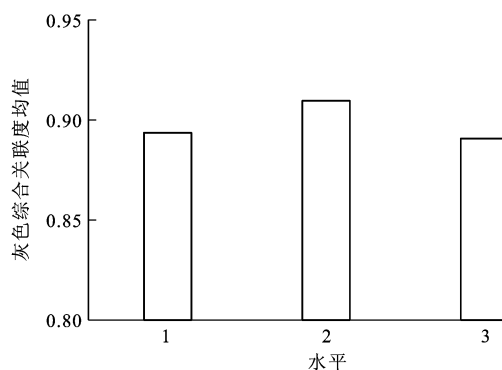


图 14 成型温度的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 14 Average values of grey comprehensive relevancies for all levels of molding temperature

由计算结果可得:成型时间的极差为 2.857,集料级配的极差为 1.555,两者相差 1.302,说明不同的关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度不同,且相差较大。由图 9 可得,基于环氧沥青混凝土路用性能的 6 个指标,6 个关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度由大到小依次为:成型时间、油石比、A、B 组分质量比、压实功、成型温度与集料级配。

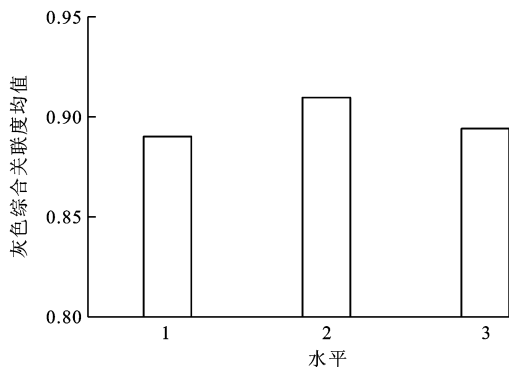


图 15 压实功的各水平的灰色综合关联度均值

Fig. 15 Average values of grey comprehensive relevancies for all levels of compaction work

比较图 10~15 中每个关键因素的各水平的灰色综合关联度均值,可以得出最佳的施工方案为:A、B 组分质量比取 1:2.9,油石比为 6.5%,集料级配为类型 I,成型时间为 55 min,成型温度为 120℃,压实功取轮碾 24 次。

分析关键因素的排序结果与最佳的施工方案,并结合环氧沥青混凝土的施工工艺,可以得到以下环氧沥青混凝土施工中关键环节的控制方法。

(1)成型时间。成型时间排在第 1 位,即成型时间对环氧沥青混凝土的路用性能影响最大,这与环氧沥青混凝土的性能特殊性相吻合。因为环氧沥青混凝土是一种热固性材料,其黏度形成过程与普通沥青混凝土不同,当环氧沥青 2 个组分混合后,化学反应就随之开始,体系黏度随着时间的增长逐步增加,反应达到一定阶段后,其黏度骤增,同时形成了不溶的凝胶体^[23-24],所以在环氧沥青混凝土拌和到碾压过程中,其黏度随着时间不断变化。如果过早进行摊铺和碾压,此时结合料黏度较低,容易导致混凝土出现离析等现象;反之,结合料黏度过大,又会导致摊铺困难和碾压不密实,因此,在施工过程中,需要设计合理的混凝土运输路径与运输方式,以确保在规定的成型时间进行摊铺和碾压。

(2)油石比。从排序上看,油石比是仅次于成型时间的重要因素,这是因为油石比过小时,混凝土黏聚力过小,抗剪强度下降,甚至导致碾压后的混凝土表面出现花白料;反之,则会在颗粒之间形成未与集料相互作用的自由沥青,成为集料发生位移的润滑剂,甚至导致碾压后的混凝土表面出现泛油现象,直接影响路面的抗滑性能^[25],因此,在混凝土的拌和、运输及摊铺过程中,需要控制混凝土的离析,以减少出现局部油石比不均匀的现象,也需控制黏结层的厚度,以防止黏结层中过多

的沥青进入混凝土内部。

(3)A、B 组分质量比。环氧沥青的组分比直接决定了环氧沥青的性能,从而影响混凝土的路用性能,所以对静态混合器的操作尤为重要。

(4)压实功。从最佳施工方案中可以看出,压实次数低于 24 次或者超过 24 次,都会导致路用性能的降低,因此,施工时需要严格控制压实次数。

(5)成型温度。从最佳施工方案中可以看出,成型温度取 120℃时,路用性能最佳,因此,在混凝土的生产之前,需要通过对拌和楼的多次调试,以保证混凝土温度的稳定性;在混凝土的运输中,需要通过覆盖棉被等措施,以防止混凝土温度的变化。

(6)集料级配。从排序上可以看出集料的级配是排最后的,这主要是因为环氧沥青混凝土的集料由 6 档矿料组成,容易调成接近设计中值的较优级配,而且集料选用干净、坚硬、耐磨、表面 100% 为破碎面、形状以立方体为主的玄武岩集料,材料本身性能较好。但从最佳方案中可以看出,以 2.36 mm 筛孔的设计中值作为通过率的级配,其设计出的混凝土的路用性能最佳,因此,施工时应严格控制环氧沥青混凝土关键筛孔的通过率。

3.2 方差分析

为了检验改进灰色局势决策的合理性与关键因素选取的正确性,采用 SPSS 软件继续对单一试验结果进行方差分析,方差分析又称 F 检验,通过比较 F 值进行显著性判断。方差分析结果见图 16。

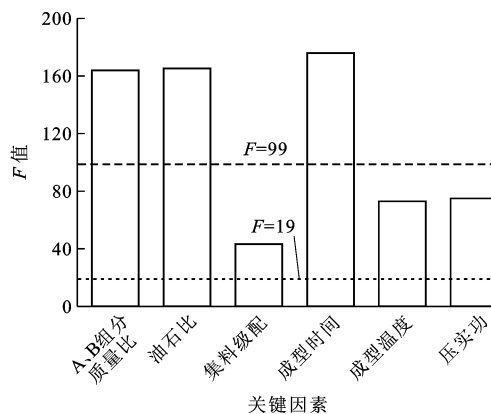


图 16 方差分析结果

Fig. 16 Analysis result of variance

由图 16 可知:显著水平 α 为 0.05 时的方差临界值为 19, α 为 0.01 时的临界值为 99,6 个关键因素的 F 值均大于 19,成型时间、油石比及 A、B 组分质量比的 F 值均大于 99,说明在 α 为 0.05 时 6 个关键因素都是显著的,在 α 为 0.01 时,成型时间、油石比及 A、B 组分质量都是显著的;各关键因素的 F

值由大到小依次为成型时间、油石比、A、B 组分质量比、压实功、成型温度与集料的级配,这与极差分析的排序结果是一致的。较高的显著性与排序结果的一致性证明了改进灰色局势决策在本文运用中的合理性,同时证明了本文在关键因素与关键因素水平的选取上的正确性^[26],可真实地模拟施工过程中可能出现的影响环氧沥青混凝土路用性能的关键因素及其可能出现的变化范围。

4 结 语

(1)灰色综合关联度较大的差值说明不同的局势与最优局势的联系紧密程度相差较大,根据各局势的灰色综合关联度排序得出 18 种试件制作方案的优劣排序,方案 4 的路用性能最好。

(2)不同的关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度不同,且相差较大,根据各关键因素的极差得出 6 个关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度由大到小依次为:成型时间、油石比、A、B 组分质量比、压实功、成型温度与集料级配。

(3)比较每个关键因素的各水平的灰色综合关联度均值,可以得出最佳的施工方案为:A、B 组分质量比取 1:2.9,油石比取 6.5%,集料级配取类型 I,成型时间取 55 min,成型温度取 120 °C,压实功取轮碾 24 次。

(4)方差分析中各关键因素的 F 值均大于临界值 19,具有良好的显著性,且其大小排序与各关键因素的极差大小排序是一致的,证明了本文在关键因素与关键因素水平的选取上的正确性。

(5)改进灰色局势决策可以作为一种不同施工方案下环氧沥青混凝土路用性能的综合评估方法,并可以结合极差分析确定施工过程中各关键因素的变化对环氧沥青混凝土路用性能的影响程度,同时可以确定最佳施工方案中各关键因素的取值。由于试验条件的限制,本文只基于 6 个指标及 6 个关键因素进行了环氧沥青混凝土的相关研究,而改进灰色局势决策在研究更多指标与更多因素的关系上的普适性还需进一步研究,同时,在施工中,轮碾 24 次需要换算成真实的压路机压实次数。

参 考 文 献 :

References :

[1] HUANG Wei, QIAN Zhen-dong, CHENG Gang, et al. Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridges[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2391-

2394.

- [2] LU Qing, BORS J. Alternate uses of epoxy asphalt on bridge decks and roadways[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 18-25.
- [3] QIAN Zhen-dong, LU Qing. Design and laboratory evaluation of small particle porous epoxy asphalt surface mixture for roadway pavements[J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 110-116.
- [4] XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong, JIA Wen-biao. Design and evaluation of epoxy asphalt geogrid stress-absorbing layer[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2016, 32(1): 93-98.
- [5] BOCCI E, GRAZIANI A, CANESTRARI F. Mechanical 3D characterization of epoxy asphalt concrete for pavement layers of orthotropic steel decks [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 145-152.
- [6] ZHOU Xin-xing, WU Shao-peng, LIU Gang, et al. Molecular simulations and experimental evaluation on the curing of epoxy bitumen[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1): 241-247.
- [7] BAGSHAW A, HERRINGTON P R, WU J P. Preliminary examination of chipseals prepared with epoxy-modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2015, 88: 232-240.
- [8] QIAN Zhen-dong, HU Jing. Fracture properties of epoxy asphalt mixture microstructure based on extended finite element method[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(11): 3335-3341.
- [9] DANG V T, CHENG Pei-feng. Study on marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1337-1341.
- [10] 秦 旻,梁乃兴,陆兆峰.水-温作用下沥青混合料疲劳性能分析[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(4):1126-1132.
- QIN Min, LIANG Nai-xing, LU Zhao-feng. Fatigue property analysis of asphalt mixture in water-temperature action[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(4): 1126-1132. (in Chinese)
- [11] 张顺先,张肖宁,徐 伟,等.基于冲击韧性的钢桥面铺装环氧沥青混凝土疲劳性能设计研究[J].振动与冲击,2013, 32(23):1-5.
- ZHANG Shun-xian, ZHANG Xiao-ning, XU Wei, et al. Epoxy asphalt concrete fatigue performance design for a steel bridge deck pavement based on impact toughness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(23): 1-5. (in Chinese)
- [12] VARDANEGA P J, WATERS T J. Analysis of asphalt concrete permeability data using representative pore size[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(2): 169-176.
- [13] 张素磊,陈 淮,王亚琼.基于灰色突变理论的隧道衬砌裂缝诊断模型[J].交通运输工程学报,2015,15(3):34-40.
- ZHANG Su-lei, CHEN Huai, WANG Ya-qiong. Diagnostic model of crack for tunnel lining based on gray and catastrophe theories[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,

- 2015, 15(3): 34-40. (in Chinese)
- [14] GOLINSKA P, KOSACKA M, MIERZWIAK R, et al. Grey decision making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 105: 28-40.
- [15] CAMELIA D. Grey systems theory in economics—a historical applications review[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2015, 5(2): 263-276.
- [16] CHEN Yong-gui, YE Wei-min, ZHANG Ke-neng. Strength of copolymer grouting material based on orthogonal experiment[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(1): 143-148.
- [17] VAVRIK W, PINE W, CARPENTER S. Aggregate blending for asphalt mix design: Bailey method[J]. Transportation Research Record, 2002(1789): 146-153.
- [18] PASETTO M, BALDO N. Fatigue performance of stone mastic asphalt designed with the Bailey's method[C]//CANESTRARI F, PARTL M N. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Berlin: Springer, 2016: 1005-1016.
- [19] BOTASSO G, GARCIA L, NIETO J P, et al. Bailey method design for a dense asphalt concrete and its influence on permanent plastic deformations resistance[J]. Revista Científica Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles, 2012, 1: 21-29.
- [20] LIU Shi-feng, FORREST J, VALLEE R. Emergence and development of grey systems theory[J]. Kybernetes, 2009, 38(7/8): 1246-1256.
- [21] LIANG Xu, YU Wei. Optimum mixture ratio of cement and red mud stabilized graded crushed stones based on grey situation decision[J]. Advanced Materials Research, 2013, 602-604: 968-971.
- [22] 闫嘉钰,张宏韬,刘国良,等. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点优化新方法及应用[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2008, 40(2): 160-164.
- YAN Jia-yu, ZHANG Hong-tao, LIU Guo-liang, et al. Application of a new optimizing method for the measuring points of CNC machine thermal error based on grey synthetic degree of association [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 160-164. (in Chinese)
- [23] XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong. Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 378-383.
- [24] 闵召辉,黄卫. 环氧沥青的粘度与施工性能研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 5-8.
- MIN Zhao-hui, HUANG Wei. Study on viscosity and construction property of epoxy asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 5-8. (in Chinese)
- [25] 钱振东,陈磊磊,尹祖超,等. 国产环氧沥青混合料抗剪性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 282-286.
- QIAN Zhen-dong, CHEN Lei-lei, YIN Zu-chao, et al. Research on shearing behavior of domestic epoxy asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2): 282-286. (in Chinese)
- [26] LARSON M G. Analysis of variance[J]. Circulation, 2008, 117(1): 115-121.