

再生沥青混合料变异性影响因素正交试验

张金喜, 林 翔, 苗英豪, 王淑颖

(北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 运用正交试验设计方法, 对 RAP 中沥青针入度, 沥青含量, 矿料级配等因素, 分别拟定 3 个不同水平, 进行三因素三水平正交试验. 通过直观分析、方差分析等手段分析其再生沥青混合料路用性能的差异, 找出通过控制 RAP 的性能控制再生沥青混合料路用性能的科学方法.

关键词: RAP; 变异性; 路用性能; 正交试验设计

中图分类号: U 41

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)06-0771-08

我国路面结构和材料种类较多, 且路面修补频繁, 导致城市道路维修产生的旧沥青混合料复杂, 性质差异大. 对这些旧沥青混合料进行综合回收利用, 需要对其变异性进行控制. 国外在这方面的研究起步较早, 其中日本《厂拌再生铺装技术指针》对适合进行再生的旧沥青混合料的技术指标进行了规定^[1-2]. 我国于 2008 年颁布的《公路沥青路面再生技术规范》^[3]在一定程度上规范了沥青路面再生应用技术, 保证了沥青路面再生工程质量, 但其中规定不同来源的回收沥青路面材料 (RAP) 应分开堆放以保证材料均匀一致. 这就要求废旧沥青混合料再生工厂提供大量土地用于堆放材料, 对于大规模生产不利.

根据我国沥青路面的特点, 旧沥青混合料变异因素主要包括集料级配、沥青种类、使用年限和破碎工艺等. 若对不同的 RAP 统一进行再生, 再生沥青混合料的沥青含量、沥青性质、骨料级配将会发生变化. 作者运用正交试验设计方法, 对旧沥青混合料的沥青老化程度、沥青含量、矿料级配等 3 方面进行控制, 分析其对再生沥青混凝土路用性能的影响.

1 RAP 性质检验

为了分析不同来源旧沥青混合料产生的变异性, 选取不同使用年限 (路龄分别为 3、7、10 a) 的路面回收沥青混合料, 利用 Intuatest 自动沥青抽提仪对沥青和矿料进行分离. 对分离出的沥青直接进行针入度、延度、软化点试验, 评价其老化程度. 同时, 对分离出的骨料进行级配检验, 试验结果如表 1、2 所示.

表 1 RAP 筛分试验各筛孔通过百分率

Table 1 The percentage of the stone left in each sieve on the RAP screening test

种类	筛孔直径 /mm											%
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	
级配范围	100	100	90~100	76~92	60~80	34~62	20~48	13~36	9~26	7~18	5~14	4~8
I 料	100	98.7	96.3	89.5	74.3	49.2	32.2	23.9	19.2	14.2	10.3	8
II 料	100	100	100	100	99	72.8	45.3	34.3	28.1	17.6	11.1	9
III 料	100	100	99.1	94.9	82.9	60.6	36.1	26.2	21.7	16.1	11	8.8

从级配数据结果可以看出, I 料、III 料的级配接近于 AC-16 I 型沥青混合料级配类型, 由于路面经过长期车辆荷载作用, 骨料有细化的趋势; II 料的细骨料较多, 粗集料很少, 由于路面铣刨过程中材料被严重

收稿日期: 2008-10-06

作者简介: 张金喜 (1965-), 男, 河北保定人, 教授, 博士生导师.

细化,对其再生只能增加较大比例粗集料. 据此,对 RAP进行再生的目标级配统一为 AC-16 I.

表 2 回收沥青技术性能

Table 2 Technical performance of recycled asphalt

种类	使用年限 /a	检测指标			沥青质量分数 /%
		25℃针入度 /0.1mm	软化点 /℃	15℃延度 /cm	
I 料	10	19	59.2	8.33	4.7
II 料	7	26	57.9	13.8	4.4
III 料	3	43	50.3	10.17	5.1

从老化沥青的性能变化趋势可以看出,随着使用年限的增长,沥青的针入度和延度降低,沥青变硬变脆,使用性能明显下降. 而软化点变化不明显,基本上还能满足规范要求.

2 正交试验设计

为了分析 RAP变异引起再生沥青混凝土性能变化的程度,作者选用可以反映不同来源 RAP性能差异的 3个因素(沥青老化程度,沥青含量,矿料级配)进行研究,以求找到通过控制 RAP的性能达到控制再生沥青混凝土路用性能的途径. 由于该研究涉及多因素多水平试验,为了减少试验量同时能获得较全面的数据分析效果,采用正交试验设计方法对该试验进行设计.

根据以上分析的 3方面因素,分别选取适合的指标进行试验设计.

对于沥青老化程度,选用沥青的 25℃针入度值作为评价指标;对于沥青含量,以自动沥青抽提仪抽提试验结果为依据;对于矿料级配,采用美国 ASTM C136方法规定的细度模数表征^[4]. 具体计算方法为:

$$M = (A_{0.15} + A_{0.3} + A_{0.6} + A_{1.18} + A_{2.36} + A_{4.75} + A_{9.5} + A_{13.2} + A_{16} + A_{19} + A_{37.5}) / 100$$

式中, M_x 表示细度模数; A_x 表示各筛累计筛余百分率, %.

根据上述 3个指标,为每个因素分别确定了 3个水平,组成水平因素表,见表 3 表中用 A代表针入度水平,用 B代表沥青含量, C代表细度模数.

按表 3设计的正交试验方案见表 4

受 RAP料源的限制,不能直接得到表 4中的 9种组合,考虑到骨料的性质随着路面使用年限增加变化不大,在 RAP中适当添加新骨料对沥青的化学性质和 RAP的力学性质影响并不大. 通过这种方法配置了 9种符合预期要求的混合料,用作正交试验研究的基础材料. 另有一些 RAP中沥青含量和细度模数的水平存在一定的偏差,但均在可以接受的波动范围内.

由于 4#旧料中各项指标与常见旧沥青混合料性能相似,作者拟定 4#旧料作为标准 RAP,对其进行再生配合比设计. 采用旧料掺配比率为 30%,本试验没有采用沥青再生剂,新沥青采用 AH-70#重交通道路石油沥青,所以再生沥青的目标标号要降低 1个等级,为 AH-50#石油沥青^[5]. 新集料采用北京路新大成公司的石灰岩集料. 新集料级配及物理指标见表 5、6. 对 4#旧料进行再生配合比设计^[6],合成级配曲线见图 1,根据马歇尔试验确定最佳沥青含量,配合比方案见表 7、8

表 3 水平因素表

Table 3 Level factors table

水平	A /0.1 mm	B /%	C
1	20	3.5	4.8
2	25	4	4.4
3	40	4.4	4.2

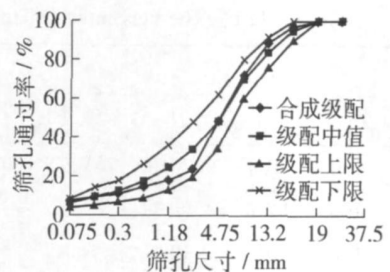


图 1 合成级配曲线图

Fig 1 Synthesis of gradation curve

表 4 正交试验设计方案

Table 4 Orthogonal design method

试验号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
A/0.1 mm	20	20	20	25	25	25	40	40	40
B/%	3.5	4	4.4	3.5	4	4.3	3.5	4	4.4
C	4.8	4.4	4.2	4.4	4.2	4.8	4.2	4.8	4.4

表 5 新集料筛分试验各筛孔通过百分率

Table 5 The percentage of the stone left in each sieve on the new aggregate screening test %

种类	筛孔直径 /mm												
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
10~20			91.5	68.6	24.8	1.4							
5~10					99.6	28.6	4.6						
3~5						97.4	8.7	5.4					
机制砂						99.8	73.6	51.5	38.2	25.3	19.3	13.5	
天然砂						96.7	94.7	93.3	91.4	72.6	31.2	6.2	
矿粉										99.6	97.0	84.0	

表 6 新集料技术性能

Table 6 Technical performance of the new aggregate

指标	矿料类型						规范规定
	10~20	5~10	3~5	机制砂	天然砂	矿粉	
石料压碎值 %	15.6	15.6					≤ 28%
洛杉矶磨耗损失 %	18.2	18.2					≤ 30%
表观相对密度	2.862	2.827	2.836	2.875	2.652	2.765	≥ 2.50
吸水率 %	0.34	0.41	0.45				≤ 3.0%
坚固性 %	7.5	7.5	7.5	7.7	10.1		≤ 12%
针片状质量分数 %	7.2						≤ 18%
砂当量 %				81.5			≥ 60%

表 7 矿料配合比设计方案

Table 7 Mix design method

矿料类型	4 [#] 旧料	10~20	5~10	3~5	机制砂	矿粉
掺配比率 %	30	32	15	9	10	4

表 8 混合料体积参数

Table 8 The Volume parameters of the mixture

指标类型	最佳沥青质量分数 %	毛体积相对密度	理论最大相对密度	空隙率 %	沥青体积分数 %	矿料间隙率 %	沥青饱和度 %	稳定度 /kN	流值 /mm
试验值	4.7	2.457	2.554	4.07	10.47	14.54	71.99	10.96	2.32
规范要求				3~6		≥ 14	65~75	≥ 8	2~4

根据上述配合比设计方案,使新集料、新沥青、及 RAP 使用量完全相同,改变 RAP 的种类,配置上述设计好的 9 种再生沥青混合料,通过车辙试验、马歇尔残留稳定度试验、冻融劈裂试验^[7],分析其路用性能的差异,找出控制变异性的方法.

3 试验结果及数据分析

3.1 再生沥青混合料路用性能试验结果汇总

9 种试验的动稳定度、残留稳定度和冻融劈裂强度比列于表 9.

表 9 正交设计试验结果

Table 9 The results of orthogonal design experiment

试验号	RAP 性能差异			动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	残留稳定 度 /%	冻融劈裂抗拉 强度比 TSR /%
	A / 0.1 mm	B /%	C			
1 [#]	20	3.50	4.8	2 002	83.78	79.19
2 [#]	20	4.00	4.4	2 184	85.62	82.86
3 [#]	20	4.40	4.2	2 347	90.08	87.16
4 [#]	25	3.50	4.4	1 870	88.23	86.00
5 [#]	25	4.00	4.2	1 919	90.24	92.50
6 [#]	25	4.30	4.8	1 797	93.04	88.64
7 [#]	40	3.50	4.2	1 883	92.66	91.28
8 [#]	40	4.00	4.8	1 388	91.90	89.78
9 [#]	40	4.40	4.4	1 682	94.11	94.61

3.2 试验结果分析

3.2.1 直观分析

采用直观分析方法计算每个因子的各水平均值,保证计算公式中所用的实验结果对应因子的各水平出现的频数相等.通过比较因子的每个水平均值的大小来评论此因子的水平好坏,还可以通过极差来判断因子对指标的影响程度^[8].根据以上数据,进行直观分析的结果见表 10.

从直观分析的结果可以看出,3 个试验因素的极差值都大于误差列的极差值,说明试验效果是显著的.达到了使 RAP 的沥青针入度、沥青含量和矿料细度模数这 3 个因素成为影响再生混合料路用性能的主要因素的目的.从中可以看出:

1) 对于高温稳定性方面,RAP 中沥青老化程度对动稳定度影响最显著,其次为矿料级配,影响最小的因素为沥青含量;

2) 对于水稳定性方面,无论是马歇尔残留稳定度,还是冻融劈裂强度比,对其影响最大的因素都是沥青老化程度,其次是沥青含量,再次为矿料细度模数;

3) 通过直观分析的综合比较,作者认为 RAP 中沥青老化程度对再生沥青混合料路用性能影响最显著,其次为沥青含量,再次为矿料级配.

为了便于综合分析,将各指标随因素的水平变化的情况用图表表示出来,如图 2 所示.

由图 2 可以发现,随着 RAP 中沥青针入度的提高,再生沥青混合料动稳定度有所降低,但远远大于规范规定动稳定度不小于 800 次/mm 的规定,所以添加 RAP 对提高沥青混合料高温稳定性有好处.沥青老化越严重再生沥青混合料动稳定度越高,这是因为老化沥青的化学性质发生了变化,沥青变硬变脆,并且其再度老化的趋势也在减弱,所以高温时混合料更硬,抗轮碾能力增强.另外,随着老化沥青针入度升高,其马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比都得到了提升,说明其抗水损坏能力得到了提高.这说明老化程

表 10 正交设计直观分析

Table 10 The intuitive analysis on the orthogonal design method

试验指标	计算参数	因素			误差列
		A	B	C	
动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	K ₁	6 533	5 755	5 187	5 603
	K ₂	5 586	5 491	5 736	5 804
	K ₃	4 953	5 826	6 149	5 605
	k ₁	2 178	1 918	1 729	1 868
	k ₂	1 862	1 830	1 912	1 955
	k ₃	1 651	1 942	2 050	1 868
	极差	527	112	321	87
	因素主次 优方案			ACB A ₁ B ₃ C ₃	
残留稳定度 %	K ₁	259.48	264.67	268.72	268.13
	K ₂	271.51	267.76	267.96	271.32
	K ₃	278.67	277.23	272.98	270.21
	k ₁	86.49	88.22	89.57	89.38
	k ₂	90.50	89.25	89.32	90.44
	k ₃	92.89	92.41	90.99	90.07
	极差	6.40	4.19	1.67	1.06
	因素主次 优方案			ABC A ₃ B ₃ C ₃	
冻融劈裂强度比 %	K ₁	249.21	256.47	257.61	266.30
	K ₂	267.14	265.14	263.47	262.78
	K ₃	275.67	270.41	270.94	262.94
	k ₁	83.07	85.49	85.87	88.77
	k ₂	89.05	88.38	87.82	87.59
	k ₃	91.89	90.14	90.31	87.65
	极差	8.82	4.65	4.44	1.17
	因素主次 优方案			ABC A ₃ B ₃ C ₃	

度越轻的沥青,与集料的黏结性能越好,沥青混合料抗水浸入的能力越高. 与规范规定马歇尔残留稳定度不小于 80%和冻融劈裂强度比不小于 75%比较^[9],再生沥青混合料的抗水损坏能力能满足规范要求. 结合国外研究成果及本研究得出的规律,建议 RAP中沥青 25℃针入度值不宜小于 20/0.1 mm.

根据再生沥青混合料路用性能随 RAP沥青含量变化而变化的关系图,可看出 RAP的沥青含量对再生沥青混合料高温性能影响并不显著,相对而言,当沥青含量在 4%时动稳定度值最小,沥青含量在 4.4%时动稳定度比前 2种水平提高许多. 随着沥青含量的增加,残留稳定度与冻融劈裂强度比 2项指标都有提高的趋势,而且随着 RAP沥青含量的增加(3.5%~4.4%),再生沥青混合料的抗水损坏能力也得到提高. 根据图表的趋势,作者建议 RAP中沥青含量不宜低于 3.5%.

对于 RAP中矿料级配对再生沥青混合料路用性能影响的分析可看出,细度模数为 4.2时,3个指标同时达到最大值,说明此时再生沥青混合料的路用性能最佳. 随着细度模数的增大,动稳定度与冻融劈裂强度比都有下降的趋势. 当 RAP的细度模数为 4.4时,马歇尔残留稳定度达到最小值,但此项结果变化并不

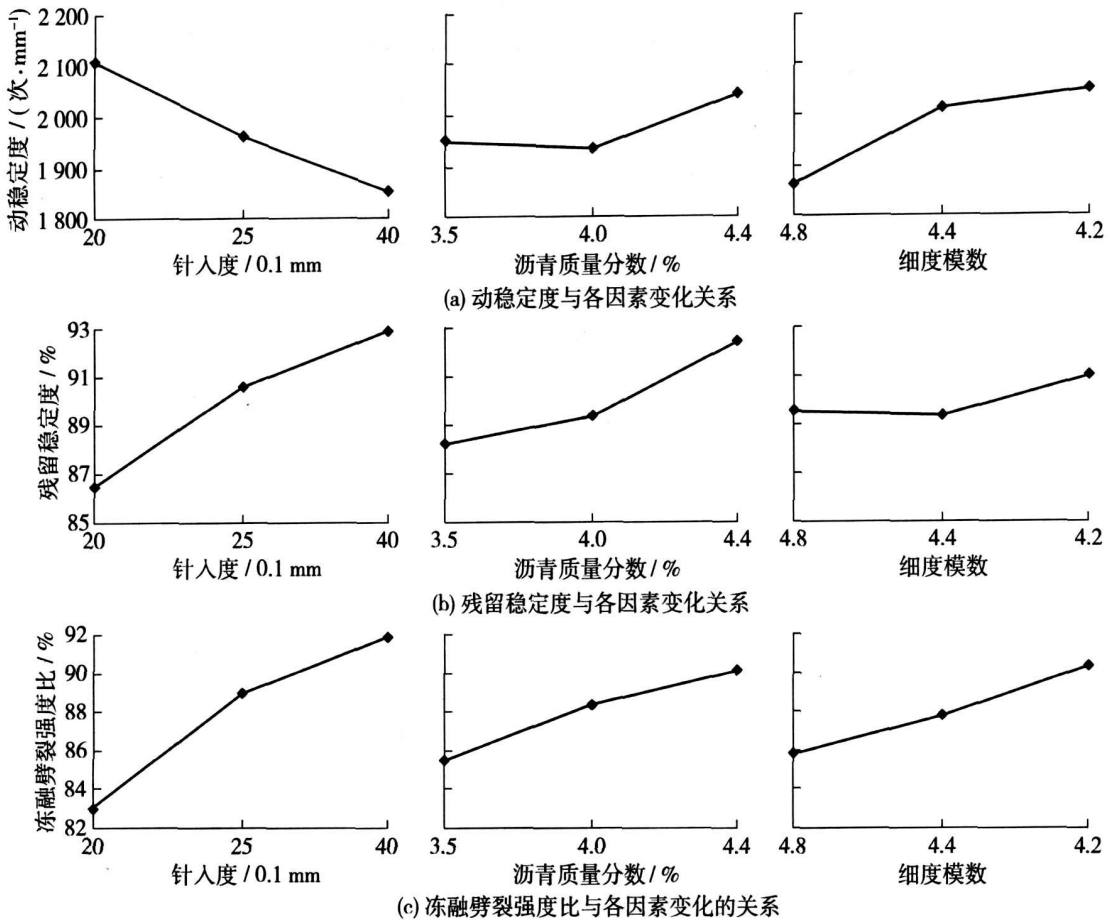


图 2 因素水平变化对指标影响图示

Fig 2 The relationship between the road performance and the various factors

大,说明细度模数对残留稳定度影响较小.因此,建议 RAP中细度模数值不宜大于 4.8

3.2.2 方差分析

上述直观分析只能从宏观上分析各因素对试验结果的影响,不能估算试验中与试验结果测定中必然存在的误差大小.方差分析能把试验条件改变引起的数据波动与试验误差引起的数据波动区分开,分解为反映因素水平变化引起的波动和反映试验误差引起的波动 2 部分,然后将他们的平均波动进行比较,做出因素对指标作用效果是否显著的结论,同时给出各因素对试验结果的影响程度精确的数量估计.作者根据正交试验结果,对试验数据进行方差分析^[9],如表 10 所示.

根据方差分析的结果,可以发现:

1) RAP中沥青 25℃ 针入度对动稳定度影响比较显著,细度模数对其影响一般显著,而沥青含量的影响不显著.所以在研究再生沥青混合料高温稳定性方面,可以主要考虑 RAP中沥青老化程度产生的影响.

2) RAP中沥青 25℃ 针入度对马歇尔残留稳定度影响比较显著,沥青含量对其产生的影响为一般显著,而细度模数对其影响不显著.所以混合料在该方面的性能上,应更关注沥青老化程度和沥青含量的影响.

3) RAP中沥青 25℃ 针入度对冻融劈裂强度比影响比较显著,而沥青含量和矿料细度模数对其的影响均为一般显著.所以,在再生沥青混合料抗冻融耐久性方面,应更多地考虑 RAP中沥青老化程度的影响.

表 10 正交试验结果方差分析表

Table 10 Experimental results of orthogonal analysis

试验项目	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	临界值	影响
动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	因子 A	421 544.22	2	210 772.11	28.06	F _{0.1} (2, 2)=9	**
	因子 B	20 773.56	2	10 386.78	1.38	F _{0.05} (2, 2)=19	
	因子 C	155 268.22	2	77 634.11	10.34	F _{0.01} (2, 2)=99	*
	误差 E	15 022.89	2	7 511.44			
	总和 T	612 608.89	8				
残留稳定度 %	因子 A	62.69	2	31.35	35.86	F _{0.1} (2, 2)=9	**
	因子 B	28.55	2	14.28	16.33	F _{0.05} (2, 2)=19	*
	因子 C	4.88	2	2.44	2.79	F _{0.01} (2, 2)=99	
	误差 E	1.75	2	0.87			
	总和 T	97.88	8				
冻融劈裂强度比 %	因子 A	121.60	2	60.80	46.17	F _{0.1} (2, 2)=9	**
	因子 B	33.03	2	16.51	12.54	F _{0.05} (2, 2)=19	*
	因子 C	29.76	2	14.88	11.30	F _{0.01} (2, 2)=99	*
	误差 E	2.63	2	1.32			
	总和 T	187.02	8				

注:若 $F > F_{0.01}(2, 2)$, 称该因素是高度显著的, 用 *** 表示; 若 $F < F_{0.01}(2, 2)$ 、但 $F > F_{0.05}(2, 2)$, 称该因素的影响是比较显著的, 用 ** 表示; 若 $F < F_{0.05}(2, 2)$ 、但 $F > F_{0.1}(2, 2)$, 称该因素的影响是一般显著的, 用 * 表示; 若 $F < F_{0.1}(2, 2)$, 称该因素的影响不显著, 不用 * 表示。

综合分析, RAP 中沥青老化程度 3 项指标影响效果都是比较显著的; 沥青含量有 2 项指标的影响效果是一般显著; 细度模数也有 2 项指标的影响效果为一般显著。由此可得, RAP 中沥青老化程度对再生混合料路用性能的影响效果最显著, 其次为沥青含量, 再次为矿料级配情况。

4 结论

1) RAP 中沥青老化程度对再生沥青混合料路用性能影响最显著, 其次为 RAP 中的沥青含量, 再次为 RAP 的矿料级配。

2) 试验发现, 对 RAP 进行再生过程中, 若 RAP 的 25℃ 针入度在 20/0.1 mm 以下、沥青含量在 3.5% 以下、旧骨料细度模数在 4.8 以上时, 其再生沥青混合料路用性能会发生较大幅度降低。

3) 再生沥青混合料与普通沥青混合料一样, 其路用性能能满足生产规范要求。另外, 在旧料参配比较低 (30% 以下) 的情况下, 只要严格控制 RAP 的性质, 不同来源不同种类的旧沥青混合料可以混合再生利用。

4) 试验结果证明, 原旧沥青混合料性能的差异会引起再生沥青混凝土性能的变异。因此为保持再生沥青混凝土性能的稳定性, 必须对旧沥青混合料的性能变异范围进行控制。

参考文献:

- [1] 日本道路协会, 杉山好信. 厂拌再生铺装技术指针 [S]. 东京: 丸善株式会社出版事业部, 1992: 4-18.
- [2] 日本道路协会, 多田宏行. 路上表层再生工法技术指针 [S]. 东京: 丸善株式会社出版事业部, 1988: 17-33.
- [3] 交通部公路科学研究院. JTG F41—2008. 公路沥青路面再生技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 7-10.

- recycling[S]. Beijing: China Communications Press, 2008, 7-10. (in Chinese)
- [4] 交通部公路科学研究院. JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005, 82-86.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E42—2005, Test methods of aggregate for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2005, 82-86. (in Chinese)
- [5] 张金喜. 再生沥青混合料的设计针入度对其使用性能的影响[C]//中国公路学会 2003年学术年会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2003.
ZHANG Jin-xi. The needle regenerating design an asphalt enters an impact of degree over whose usage function[C]// The Proceedings of 2003 Academic Conference of China Highway and Transportation Society. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 张金喜, 李娟, 朱毅军. 道路废旧沥青混合料再利用实验分析[J]. 北京工业大学学报, 2007(2): 170-173.
ZHANG Jin-xi, LI Juan, ZHU Yi-jun. Investigation of hot recycled asphalt mixture by experiment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007(2): 170-173. (in Chinese)
- [7] 交通部公路科学研究院. JTJ 052—2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000, 290-296, 345-351, 392-397.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTJ 052—2000, Standard test methods of Bitumen and Bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2000, 290-296, 345-351, 392-397. (in Chinese)
- [8] 马成良, 张海军, 李素平. 现代试验设计优化方法及应用[M]. 河南: 郑州大学出版社, 2007.
- [9] 交通部公路科学研究院. JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004, 23-37.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG F40—2004, Technical specifications for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press, 2004, 23-37. (in Chinese)

Study on the Factors and Variability Affecting Recycled Asphalt Mixture by Orthogonal Test

ZHANG Jin-xi LIN Xiang MIAO Ying-hao WANG Shu-ying

(Key laboratory of Traffic Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The performance of the recycled asphalt mixture can be changed because the old asphalt mixture has variability. This paper researched the performance of recycled asphalt mixture such as high-temperature stability, low-temperature crack resistance and water stability and its affection on the variability of the old asphalt mixture by using Marshall orthogonal experimental design and statistics methods. The purpose is to find out a scientific method to control the performance of the recycled asphalt mixture.

Key words: RAP; variability; performance of the recycled asphalt mixture; marshall orthogonal experimental design

(责任编辑 郑筱梅)