

文章编号:1671-8879(2017)03-0009-07

新加沥青标号对高掺量 RAP 再生混合料 强度及疲劳性能的影响

李明欣,王选仓

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究新加沥青标号的性能差异对高掺量回收沥青路面材料(RAP)再生沥青混合料强度和疲劳性能的影响,制备了 3 种不同类型的再生沥青混合料:新集料和 70[#] 沥青制备的 AC-20 沥青混合料;RAP 掺量为 50%并添加 70[#] 沥青的 AC-20 再生沥青混合料;RAP 掺量为 50%并添加 90[#] 沥青的 AC-20 再生沥青混合料(简称 AC-20 参照组、AC-20-50%RAP-70[#] 和 AC-20-50%RAP-90[#],下同),3 组沥青混合料采用相同的目标级配设计和沥青含量。通过强度试验和疲劳试验分析沥青混合料的性能;采用不同温度下单轴压缩试验和劈裂试验评价沥青混合料的强度;采用控制应变的 UTM 四点弯曲疲劳试验研究沥青混合料的疲劳性能;同时,根据再生沥青实测针入度和软化点的变化规律,探索利用公式预测再生沥青疲劳性能的可行性。研究结果表明:掺入 50% RAP 能使再生沥青混合料的强度提高,沥青混合料强度随试验温度升高而降低,在试验温度范围内,3 组试件强度的高低排序不随试验温度变化而改变,AC-20-50%RAP-70[#] 再生沥青混合料强度最高;再生混合料的疲劳性能与添加新沥青的标号有关,AC-20-50%RAP-90[#] 再生沥青混合料疲劳性能最好,而 AC-20-50%RAP-70[#] 再生沥青混合料的疲劳寿命低于新制备沥青混合料,选用合适标号的新加沥青可有效改善再生沥青混合料的疲劳性能。

关键词:道路工程;沥青标号;RAP;强度;疲劳性能

中图分类号:U414.75 **文献标志码:**A

Influence of new added asphalt grade on strength and fatigue performance of high percentage of RAP mixtures

LI Ming-xin, WANG Xuan-cang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the influence of new added asphalt types' performance difference on strength and fatigue performance of high percentage of RAP (reclaimed asphalt pavement) content recycled asphalt mixture, three different types of recycled asphalt mixtures were prepared in this study. The first mixture was AC-20 asphalt mixture made from new aggregates and 70[#] asphalt. The other two mixtures were AC-20 recycled asphalt mixtures with RAP content of 50%

收稿日期:2016-12-27

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013 318 J08 220);河北省交通运输厅科技计划项目(Y-201302007)

作者简介:李明欣(1988-),男,河南三门峡人,工学博士研究生,E-mail:mingxinli88@yeah.net。

通讯作者:王选仓(1956-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,E-mail:wxc2005@163.com。

and addition of 70[#] and 90[#] asphalt, respectively (abbr. AC-20 reference group, AC-20-50% RAP-70[#], AC-20-50% RAP-90[#]). Three mixture sets used the same target grading design and asphalt content. Performance of asphalt mixture was analyzed by strength and fatigue test. Strength of asphalt mixture was evaluated by uniaxial compression test and splitting test at different temperatures. Fatigue performance was evaluated by the UTM four-point bending fatigue test with controlled strain. Feasibility of using formula method to predict fatigue performance of recycled asphalt was also investigated based on the change of penetration and softening point of recycled asphalt. The results show that strength of recycled asphalt mixture can be improved by adding 50% RAP, and strength of asphalt mixture decreases with the increase of test temperature. Within the test temperature range, strength order of the three groups does not change with the increase of test temperature. AC-20 recycled asphalt mixture by adding 70[#] asphalt ranks the highest in strength. Fatigue performance of the regenerated mixture is related to the addition of the new asphalt type. AC-20 recycled mixture by adding 90[#] asphalt has the best fatigue performance, while fatigue life of the recycled mixture with 70[#] asphalt is lower than that of the reference asphalt mixture set. New asphalt with an appropriate asphalt grade can improve the fatigue performance of recycled asphalt mixture effectively. 13 tabs, 2 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; asphalt grade; RAP; strength; fatigue performance

0 引言

沥青路面再生技术是指利用部分回收沥青路面材料(RAP)与新沥青和集料共同生产再生沥青混合料。沥青混合料应在保证具有相同或更优路用性能的前提下,尽可能在生产实践中增加其掺加比例,以提高经济效益^[1-4]。目前,国内外厂拌热再生沥青实践中,RAP 掺量(质量分数,下同)通常在 10%~30%,在此掺量范围内,厂拌热再生沥青混合料具有和新拌沥青混合料相近的路用性能^[5-8]。目前,很多国家和地区已经开展了采用更高掺量 RAP 再生沥青混合料的实践。美国已有超过 40 个州使用了 30%以上 RAP 掺量的再生沥青混合料^[9-10]。对于高掺量 RAP 再生沥青混合料而言,除了实际生产拌和过程中出现的一些工艺问题外,其强度和疲劳性能仍被认为无法与传统沥青混合料相比拟。

高掺量 RAP 再生沥青混合料的疲劳性能一直备受关注,RAP 中的老化沥青会增加再生混合料的硬度,更易产生疲劳破坏,低温条件下脆性增加^[11-14]。间接拉伸试验结果和小梁疲劳试验结果均表明,在不对再生混合料级配设计调整的情况下,材料硬度随 RAP 掺量的提高而增加,会引起早期开裂破坏^[15-17]。这些强度增加和发生开裂的现象,很大程度上是由于新沥青和回收料中旧沥青结合程度不足引起的^[18-19]。此外,以往针对再生沥青混合料的力学及疲劳性能研究,对象大多是再生沥青混

合料,而材料级别的分析对象多是回收沥青和再生沥青^[19-22],缺乏对新加沥青标号影响作用的分析。

综上所述,本文通过一系列室内试验研究 AC-20 再生沥青混合料强度和疲劳性能。为研究高 RAP 掺量对再生沥青混合料疲劳性能的影响,混合料中 RAP 掺量选择 50%。制备再生混合料过程中,添加 2 种标号(70[#] 和 90[#])的新沥青,以考察不同沥青标号对再生混合料性能的影响。

1 试验准备

试验准备工作包括 3 种混合料试件的制备:新集料和 70[#] 沥青制备的 AC-20 沥青混合料;RAP 掺量为 50%并添加 70[#] 沥青的 AC-20 再生沥青混合料;RAP 掺量为 50%并添加 90[#] 沥青的 AC-20 再生沥青混合料(简称 AC-20 参照组、AC-20-50% RAP-70[#] 和 AC-20-50% RAP-90[#],下同)。3 种混合料在设计上具有相同的级配组成和沥青含量,分别测试 3 种混合料试件的硬度和疲劳性能。

AC-20 参照组根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)中相关设计要求制备,集料采用武安石场花岗岩,沥青采用 70[#] 沥青。2 组再生混合料由 RAP 回收料、集料和新沥青组成,新集料来源与参照组相同,RAP 回收料取自原石安(石家庄—安阳)高速公路旧沥青路面,2 种新沥青分别为 70[#] 和 90[#] 沥青,其中 70[#] 沥青与参照组中所采用的相同。表 1 为 3 种混合料材料组成情况。

表 1 沥青混合料材料组成情况

Tab. 1 Material compositions of asphalt mixtures

沥青混合料类型	沥青类型	集料类型
AC-20 参照组	70 [#] 沥青	花岗岩
AC-20-50%RAP-70 [#]	70 [#] 沥青, 50% RAP 再生沥青混合料	花岗岩、回收集料
AC-20-50%RAP-90 [#]	90 [#] 沥青, 50% RAP 再生沥青混合料	

2 试验材料

2.1 RAP 回收料

本研究所用 RAP 回收料均来自原石安高速公路旧沥青路面,其含量由《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)(简称规程,下同)中

表 2 RAP 集料各筛孔通过率

Tab. 2 Sieve passing ratios of RAP aggregate

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	99.6	94.8	86.1	65.1	39.6	28.5	22.1	19.0	13.7	9.4	6.1

表 3 新集料粒径组成

Tab. 3 Virgin aggregate gradations

粒径/mm	通过率/%			
	A 档	B 档	C 档	D 档
26.5	100	100	100	100
19	74.9	100	100	100
16	50.5	100	100	100
13.2	25.0	99.7	100	100
9.5	4.5	97.4	100	100
4.75	0.3	12.7	95.4	100
2.36	0.1	0.5	11.5	83.1
1.18		0.3	1.9	44.9
0.6		0.1	0.8	23.5
0.3			0.6	14.0
0.15			0.5	10.6
0.075			0.4	7.5

表 4 新集料性能参数

Tab. 4 Virgin aggregate performance parameters

集料	密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/%	洛杉矶磨耗率/%	扁平指数/%
A 档	2 701	0.32	22.6	9.6
B 档	2 716	1.12		16.2
C 档	2 694	0.50		
D 档	2 563			

2.3 沥青

本研究中所采用新沥青为 70[#] 和 90[#] 2 种,其针入度、软化点、延度和 135 ℃ 旋转黏度如表 5 所示。

T 0735—2011 沥青含量试验(燃烧炉法)获得,RAP 回收料中沥青含量(质量分数,下同)为 3.6%。对燃烧后的集料进行筛分,分析 RAP 回收料集料粒径。采用规程中 T 0726—2011 阿布森法萃取回收沥青,再根据 T 0604—2011、T 0606—2011 和 T 0625—2011 检测回收沥青针入度、软化点和 135 ℃ 旋转黏度。测得回收沥青的针入度为 40 (0.01 mm),软化点为 66.8 ℃,135 ℃ 旋转黏度为 1.3 Pa·s。表 2 为回收料集料粒径组成。

2.2 集料

本研究所用新集料为武安石场生产的花岗岩。表 3 和表 4 为所用 4 档集料(A~D 档)的粒径和性能参数。

表 5 70[#] 和 90[#] 新加沥青性能指标

Tab. 5 Virgin asphalts of 70[#] and 90[#] performance indexes

性能参数	70 [#] 沥青	90 [#] 沥青
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.01 mm	68	85
软化点/℃	48.5	45.8
延度(10 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	57	65
135 ℃ 旋转黏度(Pa·s)	0.58	0.48

3 混合料配合比设计和性能检验

3.1 配合比设计

AC-20 参照组试件的设计方法按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)进行。下页表 6 为参照组试件的各筛孔通过率,根据室内试验结果,参照组混合料最佳油石比(质量分数)为 4.3%。采用最佳油石比的参照组混合料主要性能参数见下页表 7。再生混合料采用与参照组相同的合成级配曲线。

3.2 沥青混合料性能检验

本文对 3 种类型沥青混合料进行了强度和疲劳性能试验。其中,利用旋转压实成型试件,通过钻芯并切割两端,得到 φ100 mm×100 mm 圆柱体沥青混合料试件,用于抗压强度试验;成型沥青混合料马歇尔试件用于劈裂强度试验;成型沥青混合料车辙板,通过切割得到 380 mm×50 mm×63.5 mm 长方体小梁疲劳试件。在进行强度和疲劳试验之前,先对 3 种混合料的体积参数、级配组成和沥青性能进行检验,验证试验所用混合料与设计参数的吻合程度。

表 6 AC-20 参照组矿料级配各筛孔通过率

Tab. 6 Sieve passing ratios of AC-20 reference mixture

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	92.9	85.4	75.8	61.7	42.8	26.7	15.9	11.6	8.5	6.9	5.7	100

表 7 采用最佳油石比的 AC-20 参照组混合料性能参数

Tab. 7 Performance parameters of AC-20 reference mixture with OBC

性能参数	油石比/%	毛体积密度	理论最大相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
数值	4.3	2.438	2.542	4.07	13.15	69.09	15.38	3.48
规范中要求				4~6	≥13	65~75	≥8	1.5~4.0

3.2.1 体积参数

3 种沥青混合料试件的体积参数试验结果见表 8。

表 8 三种类型混合料体积参数试验结果

Tab. 8 Test results of volumetric parameters of 3 types of mixtures

检测项目	AC-20 参照组	AC-20- 50%RAP-70 [#]	AC-20- 50%RAP-90 [#]
油石比/%	4.3	4.3	4.3
理论最大相对密度	2.54	2.55	2.54
试件毛体积相对密度	2.43	2.43	2.44
空隙率/%	4.39	4.44	4.43
矿料间隙率/%	13.9	13.5	13.6
饱和度/%	68.6	68.3	69.0

对比表 7 和表 8 的结果,可以发现试件实测体积参数与最佳油石比下的设计参数非常接近。

3.2.2 级配组成验证

利用燃烧筛分法对 3 种沥青混合料的级配组成进行验证,试验结果见表 9。

表 9 三种沥青混合料级配检验结果

Tab. 9 Aggregate gradation inspection results of 3 types of mixtures

筛孔尺寸/mm	混合料通过率/%		
	AC-20 参照组	AC-20- 50%RAP-70 [#]	AC-20- 50%RAP-90 [#]
26.5	100	100	100
19	95.6	93.3	92.8
16	86.8	85.1	83.1
13.2	76.4	75.9	77.3
9.5	63.2	61.1	62.7
4.75	40.5	42.8	41.8
2.36	24.9	23.6	24.6
1.18	14.1	13.5	14.5
0.6	10.4	11.6	10.6
0.3	7.2	8.7	8.5
0.15	6.2	7.2	7.3
0.075	5.1	5.3	5.6

由表 9 可以看出,3 组沥青混合料的实际级配差异很小,可视为采用相同的级配设计。对于 2 组采用 50% RAP 再生沥青混合料而言,其油石比

(4.24 和 4.28)与参照组油石比(4.30)也几乎相同,符合设计要求。

3.2.3 再生沥青性能分析

3 组沥青混合料中的沥青性能分析结果见表 10。结果显示,在 RAP 掺量为 50%时,加入不同标号沥青的 2 组沥青混合料所抽提出的再生沥青均比参照组的沥青更硬,即其具有较低的针入度和较高的软化点及旋转黏度。根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)(简称规范,下同)中关于沥青标号的性能指标,2 组再生沥青均比新加沥青下降 1 个标号,即分别达到 50[#] 和 70[#] 沥青的标准。

表 10 回收沥青性能实测结果

Tab. 10 Measured properties of recycled asphalts

混合料类型	沥青性能		规范中 沥青标号
	针入度(25℃,100 g, 5 s)/0.01 mm	软化点/℃	
AC-20 参照组	68	48.9	70 [#]
AC-20- 50%RAP-70 [#]	53	57.1	50 [#]
AC-20- 50%RAP-90 [#]	63	54.6	70 [#]

参考欧洲规范^[23],可根据新加沥青和回收沥青的针入度及软化点,预测对应的再生沥青针入度和软化点,其计算公式为

$$a\lg(P_1)+b\lg(P_2)=(a+b)\lg(P_{\text{mix}}) \tag{1}$$

$$T_{\text{mix}}=aT_1+bT_2 \tag{2}$$

式中: P_1 为 RAP 中回收沥青针入度; P_2 为新加沥青针入度; a 、 b 分别为回收沥青和新加沥青占再生混合料沥青总质量的比例; P_{mix} 为再生沥青的针入度计算值; T_1 为 RAP 中回收沥青的软化点; T_2 为新加沥青的软化点; T_{mix} 为再生沥青的软化点计算值。

采用式(1)、式(2)计算得到的再生沥青针入度和软化点见下页表 11,并与表 10 中实测值进行对比后发现,2 种方法的结果十分接近,即再生混合料回收沥青的标号分别达到 50[#] 和 70[#] 沥青的标准。

表 11 回收沥青针入度与软化点预测值
Tab. 11 Predicted values of penetration and softening point of recycled asphalts

混合料类型	沥青性能		规范中 沥青标号
	针入度(25℃,100 g, 5 s)/0.01 mm	软化点/℃	
AC-20- 50%RAP-70 [#]	54	56.6	50 [#]
AC-20- 50%RAP-90 [#]	61	55.0	70 [#]

4 强度试验结果分析

4.1 抗压强度及抗压回弹模量

抗压强度及抗压回弹模量试验参考规程中 T 0713—2000 方法,分别测试 3 种混合料在 15℃ 和 20℃ 下的抗压强度和回弹模量,试验结果见表 12。

表 12 沥青混合料抗压强度及抗压回弹模量试验结果
Tab. 12 Test results of compressive strength and compression rebound modulus of asphalt mixtures MPa

混合料类型	不同温度(℃)下 抗压强度		不同温度(℃)下 抗压回弹模量	
	15	20	15	20
AC-20 参照组	7.9	5.7	1 855	1 257
AC-20- 50%RAP-70 [#]	10.1	7.2	2 171	1 575
AC-20- 50%RAP-90 [#]	9.3	6.3	2 001	1 385

由表 12 可见:掺加 50%RAP 的再生沥青混合料具有更高的抗压强度和抗压回弹模量。以试验温度为 15℃ 为例,AC-20-50%RAP-70[#] 混合料抗压强度最高达到 10.1 MPa;掺加 90[#] 新沥青的混合料也可达到 9.3 MPa。抗压回弹模量结果同样表明:AC-20-50%RAP-70[#] 混合料抗压回弹模量最高,达到 2 171 MPa;AC-20-50%RAP-90[#] 混合料次之,达到 2 001 MPa。AC-20 参照组沥青混合料的抗压强度和抗压回弹模量均最低,分别是 7.9、1 885 MPa。当试验温度为 20℃ 时,各组混合料试验结果呈现相同的趋势。由此可以得出:对比普通 AC-20 沥青混合料,在 RAP 掺量为 50% 的再生沥青混合料中添加 90[#] 新沥青,其抗压强度提高 15% 左右,抗压回弹模量提高 9%;添加 70[#] 新沥青时,抗压强度和抗压回弹模量增幅分别达到 25% 和 23%。

4.2 劈裂强度

劈裂强度可有效评价再生混合料的强度性能,

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)中同样指出劈裂强度与抗压强度满足一定的换算关系。劈裂强度试验参考规程中 T 0716—2011 方法,在 0℃、15℃、30℃、45℃ 这 4 个温度下分别进行沥青混合料劈裂试验。图 1 为 3 种混合料试件劈裂强度试验结果。

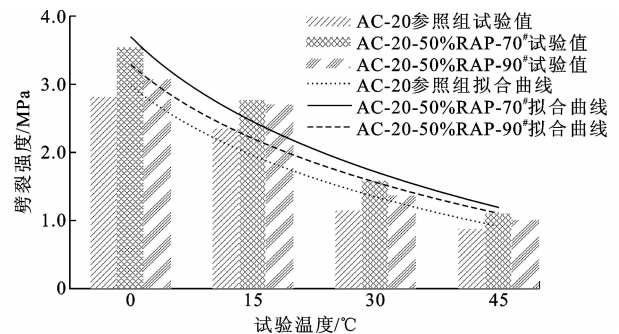


图 1 三种沥青混合料在不同温度下劈裂试验结果
Fig. 1 Splitting test results of 3 types of asphalt mixtures under different temperatures

由图 1 可见,随着试验温度的升高,各组混合料试件的劈裂强度逐渐降低,采用 70[#] 沥青的再生混合料劈裂强度最高,参照组沥青混合料劈裂强度最低,这一结果与混合料抗压强度试验结果相符。在 0℃、15℃、30℃、45℃ 时,相比于 AC-20 参照组混合料,AC-20-50%RAP-70[#] 再生混合料的劈裂强度分别提高了 25.8%、18.3%、39.1% 和 26.1%;AC-20-50%RAP-90[#] 再生混合料的劈裂强度则分别提高了 9.3%、14.9%、19.1% 和 15.4%。可以看出,在高温区段再生混合料劈裂强度增幅更为显著。从 3 组混合料劈裂强度随温度的变化趋势可以看出,AC-20-90[#] 再生混合料劈裂强度在高温段变化相对缓慢,表明采用标号较高沥青时,混合料高温性能较好,对温度变化较不敏感。

5 疲劳试验结果分析

根据规程中 T 0739—2011 推荐,采用 UTM-25 万能试验机对 3 组混合料试件进行四点弯曲疲劳试验。试验采用应变控制模式,分别用 400×10^{-6} 、 600×10^{-6} 、 800×10^{-6} 作为控制应变进行试验,每组试验平行测试 4 个试件。试验机输出偏正弦波,试验温度为 20℃,当试件强度下降至初始强度的 50% 或试件破坏时,试验停止,停止时的作用次数即为试件的疲劳寿命。下页图 2 为 3 组混合料疲劳试验结果,可见:AC-20-50%RAP-90[#] 再生混合料具有最好的疲劳性能,在不同控制应变下均可以承受最多次的反复疲劳荷载作用;AC-20-50%RAP-70[#]

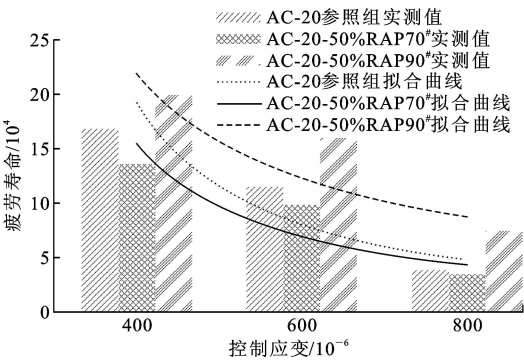


图2 三组沥青混合料疲劳试验结果

Fig.2 Fatigue test results of 3 types of mixtures

再生混合料疲劳性能略逊于 AC-20 参照组,疲劳性能为 3 组中最弱。由此可见,在再生混合料中加入较高标号(较软)的沥青时,可以显著提高再生混合料的疲劳性能。

疲劳寿命 N_f 和控制应变 ϵ 双对数线性回归疲劳方程如表 13 所示。在疲劳回归方程中,斜率 n 越小,疲劳寿命对控制应变的变化敏感度越低;截距 k 越小,在相同控制应变下,疲劳寿命越短。分析其原因为:掺加 50%RAP 后,再生沥青混合料的劲度有所增加,导致疲劳寿命因混合料硬化而有所减弱,因此 AC-20-50%RAP-70# 再生混合料 k 值比 AC-20 参照组低,而 90# 新沥青更软,一定程度上缓解了 RAP 的硬化作用,因此 AC-20-50%RAP-90# 混合料 k 值与 AC-20 参照组相近;旧路回收的 RAP 混合料由于加载历史作用,相比于新拌沥青混合料,其疲劳寿命对于控制应变的变化较不敏感,因此 2 组再生混合料的 n 值都比参照组小。

表 13 三组沥青混合料双对数线性回归疲劳方程

Tab.13 Linear regression fatigue equations of 3 types of asphalt mixtures in log-log scale

混合料类型	疲劳方程	判定系数 R^2
AC-20 参照组	$\lg(N_f) = -1.889\ 78\lg(\epsilon) + 10.308\ 71$	0.910 43
AC-20-50%RAP-70#	$\lg(N_f) = -1.340\ 71\lg(\epsilon) + 8.032\ 38$	0.854 77
AC-20-50%RAP-90#	$\lg(N_f) = -1.488\ 07\lg(\epsilon) + 10.800\ 07$	0.891 50

6 结 语

(1)当采用一定级配和油石比设计时,掺入 50%RAP 的再生沥青混合料中,再生沥青会变硬,硬化程度与回收沥青的性能有关。

(2)所有试件抗压强度和劈裂强度均随试验温度升高而降低,3 组试件强度的高低顺序不会随试验温度变化而改变,再生混合料试件强度总是优于

参照组试件强度,采用 70# 基质沥青的再生混合料强度始终最高。采用标号较高新沥青制备的再生混合料试件具有较好的疲劳性能。采用 90# 基质沥青的再生混合料疲劳性能优于参照组试件,而采用 70# 基质沥青的再生混合料疲劳寿命最低。

(3)根据欧洲规范中提出的再生沥青针入度和软化点计算公式,得到的计算值与实测值非常接近,证明可借鉴该公式来预测再生沥青性能。

(4)通过建立的疲劳方程分析试验结果表明,新沥青标号对再生混合料的软化作用是影响其疲劳性能的关键因素,选用合适的沥青标号可有效提高再生沥青混合料的疲劳寿命。再生沥青混合料具有较好的强度性能,有利于减少路面结构层的厚度,增加设计寿命。但是,在制备再生混合料时,应选取合适的新沥青标号,否则可能导致路面疲劳性能下降,不利于结构的长期使用。

(5)在今后的研究中,除了总结再生沥青混合料材料级别的强度和疲劳性能外,还需进一步对再生沥青进行材料级别的性能分析。此外应对实际路面回收 RAP 混合料作进一步老化分析,并同室内模拟 RAP 老化结果进行对比研究,以求更接近工程实际。

参考文献:

References:

[1] COPELAND A. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of practice[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2011.

[2] 陈静云. 沥青路面再生方法的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

CHEN Jing-yun. Experimental study on recycling methods of asphalt pavements [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[3] 郭 涛. 高速公路改扩建方案选择及路面再生标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.

GUO Tao. Freeway rebuilding plan selection and pavement recycling standards [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

[4] PETERSON J C. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability[J]. Developments in Petroleum Science, 2000, 40: 363-399.

[5] 陈静云, 王 峻, 刘佳音. 高比例 RAP 热再生沥青混合料低温抗裂性能[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(5): 782-787.

CHEN Jing-yun, WANG Jun, LIU Jia-yin. Study on low temperature anti-cracking performance of hot re-

- cycled asphalt mixture at high proportion of RAP[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2013, 29(5): 782-787.
- [6] 田小草,莫一魁,郑健龙. 抽提回收过程对沥青老化程度评价的影响[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 23-26.
- TIAN Xiao-ge, MO Yi-kui, ZHENG Jian-long. Effect of extracting and reclaiming process on aging degree of asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 23-26.
- [7] 吴传海,袁玉卿,王选仓. 重交通道路沥青老化规律及评价方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(5): 35-39.
- WU Chuan-hai, YUAN Yu-qing, WANG Xuan-cang. Rules and evaluation methods of asphalt aging under heavy traffic[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 35-39.
- [8] KANDHAL P S, RAO S S, WATSON D E, et al. Performance of recycled hot mix asphalt mixtures in state of Georgia[R]. Auburn; Auburn University, 1995.
- [9] MCDANIEL R, SOLEYMANI H, ANDERSON R M, et al. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2000.
- [10] WIDYATMOKO I. Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(2): 77-87.
- [11] 郑南翔,侯月琴,纪小平. 老化沥青再生性能的预估分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(3): 6-10.
- ZHENG Nan-xiang, HOU Yue-qin, JI Xiao-ping. Prediction analysis of recycled performance of aged asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 6-10.
- [12] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
- GENG Jiu-guang. Study on the aging mechanism and recycling technique of asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [13] 朱成. 高比例RAP热再生沥青混合料性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- ZHU Cheng. The experiment performance study of the hot recycled asphalt mixture of the high percentage RAP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] WEST R, WILLIS J R, MARASTEANU M. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2013.
- [15] WEST R, MICHAEL J, TUROCHY R, et al. A comparison of virgin and recycled asphalt pavements using long-term pavement performance SPS-5 data [C]//TRB. Proceedings of the Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2011: 1-22.
- [16] AL-QADI I L, AURANGZEB Q, CARPENTER S H, et al. Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures [R]. Springfield: Illinois Center for Transportation, 2012.
- [17] SHU X, HUANG B S, VUKOSAVLJEVIC D. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1323-1330.
- [18] 陈华鑫,姜艺,李硕,等. 沥青混合料老化后的低温性能[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(1): 1-5.
- CHEN Hua-xin, JIANG Yi, LI Shuo, et al. Low-temperature properties of aged asphalt mixtures [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 1-5.
- [19] 谭忆秋,王佳妮,冯中良,等. 沥青结合料紫外老化机理[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 19-24.
- TAN Yi-qiu, WANG Jia-ni, FENG Zhong-liang, et al. Ultraviolet aging mechanism of asphalt binder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 19-24.
- [20] 张争奇,梁晓莉,李平. 沥青老化性能评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 1-5.
- ZHANG Zheng-qi, LIANG Xiao-li, LI Ping. Evaluation method of asphalt aging properties[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 1-5.
- [21] HUNTER R N, SELF A, READ J. The shell bitumen handbook[M]. 6th ed. London: ICE Publishing, 2015.
- [22] SULLIVAN J. Pavement recycling executive summary and report[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1995.
- [23] EN 13108-1—2006, Bituminous mixtures—Material specifications—Part 1: Asphalt concrete[S].