

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202005008



RAP 掺量对半柔性路面 路用性能的影响

包惠明, 叶腾飞, 迟恩涛, 汤铭锋, 卢孙泉

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了探究再生沥青混合料(RAP)掺量对再生半柔性路面路用性能的影响,以体积法设计基体沥青混合料级配.通过浸水马歇尔试验、冻融劈裂实验、低温劈裂实验及车辙实验,分析评价不同 RAP 掺量再生半柔性路面路用性能.结果表明:RAP 材料的变异特性、RAP 掺量变化等因素使不同路用性能呈现不同变化趋势;当 RAP 掺量较低时,相关路用性能指标表现良好,当 RAP 掺量过高时,路用性能明显下降,且劈裂抗拉强度比不满足规范要求;RAP 掺量对车辙深度、劈裂抗拉强度和残留稳定度影响较大.

关键词: RAP 掺量;再生半柔性路面;路用性能;灰色关联分析

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)01-0056-06

Influence of RAP Addition on Road Performance of Semi-Flexible Pavement

BAO Huiming, YE Tengfei, CHI Entao,
TANG Mingfeng, LU Sunquan

(College of Civil and Construction Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the dosage of recycled asphalt mixture (RAP) on the road performance of recycled semi-flexible pavement, the matrix asphalt mixture gradation was designed by volume method. Through submerged Marshall test, freeze thaw split crack test, the low temperature split test, and temperature rut test, the road performance of different semi-flexible pavements with different RAP dosage were analyzed. The results show that the variation characteristics of RAP materials and the variation of rap content make different trends on road performance. When the RAP content is low, the relevant road performance indicators perform well. When the RAP content is too high, the road performance is significantly reduced, and the tensile strength ratio does not meet the requirements of the specification. The RAP content influences obviously the rutting depth, splitting tensile strength and residual stability have close.

Keywords: RAP dosage; recycled semi-flexible pavement; road performance; grey correlation analysis

截止 2018 年末,我国公路总里程已达到 484.65 万 km,公路养护总里程占公路总里程 98.2%^[1],在环境因素和交通荷载的综合作用下,沥青路面在使用一定年限后,容易出现车辙、坑洞、松散等病害.在维修、加固、改、扩建道路过程中,路面的铣刨料每年的产出量已经达到 1.6 亿 t^[2].充分利用这些再生资源既能避免再生沥青混合料(RAP)堆放对环境的破坏,也能降低工程的造价.为充分利用 RAP,我国开展了再生料再利用研究工作,现行规范中推荐掺配比例一般为 15%~30%,而实际工程应用中仅为

收稿日期: 2020-05-03

通信作者: 包惠明(1963-),男,教授,博士,主要从事边坡工程、道路工程的研究. E-mail: bhming@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768016);广西高校中青年教师科研提升项目(2020KY34020)

20%左右^[3]. 过高的掺量使路面在使用初期就产生了较多的病害,使得“变废为宝”适得其反. 厂拌热再生沥青路面实验研究表明^[4-5],RAP 掺量与再生沥青路面高温稳定性成正相关,与低温抗裂性成负相关,且掺加 RAP 使得再生沥青路面长期抗水毁能力下降,当 RAP 掺量达到 30%时,相关性能要求仍符合规范要求.

半柔性路面是一种双骨架结构(开级配沥青骨架和水泥骨架),在大空隙母体沥青混合料中灌注水泥砂浆,最终硬化形成的高性能路面^[6-7]. 半柔性路面兼具混凝土路面和沥青路面的双重优势,混凝土路面的高温性能和水稳性能优于沥青路面,当在沥青路面中灌注水泥砂浆制备半柔性路面,砂浆的掺入可以提高半柔性路面路面的抗渗性、高温性. 本文以体积法设计基体沥青混合料级配,灌注砂浆后养护 7 d,进行不同 RAP 掺量的路用性能试验,确定不同 RAP 掺量对路用性能的影响.

1 原材料

1.1 沥青

实验沥青为中国石化茂名分公司生产的 70 号道路石油沥青,沥青主要检测指标,如表 1 所示. 表 1 中: P 为针入度($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 100 g , 5 s); θ_1 为环球法软化点; l 为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的延度; w 为蒸馏法的质量分数; θ_2 为开口闪点; S 为溶解度; ρ 为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的密度.

表 1 沥青主要检测指标
Tab. 1 Main detection indexes of asphalt

测试项目	质量指标	检测结果	实验方法	测试项目	质量指标	检测结果	实验方法
$P/0.1\text{ mm}$	60~80	79	T 0604—2011	$w(\text{蜡})/\%$	≤ 2.2	1.9	T 0615—2011
$\theta_1/^\circ\text{C}$	≥ 46	48	T 0606—2011	$\theta_2/^\circ\text{C}$	≥ 260	> 300	T 0611—2011
$60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 动力黏度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	≥ 180	208	T 0620—2011	$S(\text{三氯乙烯})/\%$	≥ 99.5	99.7	T 0607—2011
l/cm	≥ 100	> 100	T 0605—2011	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	实测	1.033	T 0603—2011

1.2 RAP

参加的再生沥青混合料来源于安徽省高速改造工程路面铣刨料,选用 10~17 mm 单一大粒径 RAP,经离心抽提:RAP 油石比为 2.74%; $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的针入度为 3.26 mm;环球法软化点为 $65.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.3 砂浆

砂浆的性能较大程度决定了路面的性能^[8-9],国外的工程实践经验表明:半柔性路面灌浆料有足够的流动度,从而保证基体沥青混合料有较高的灌注率;灌浆材料有较高的强度,从而提高半柔性路面的承载能力^[10]. 我国的交通运输部发布 JT/T 1238—2019《半柔性混合料用水泥基灌浆材料》^[11],对水泥基灌浆料的技术要求如下:初始流动度为 10~14 s;抗折强度 $\geq 2.0\text{ MPa}$,7 d 养生;抗压强度为 15.0~30.0 MPa,7 d 养生;凝结时间 $\geq 120\text{ min}$.

灌浆料实验参照 T/CECS G: D51-01—2019《道路灌注式半柔性路面技术规程》,材料简单环保:水泥为 PC 42.5 型复合硅酸盐水泥(广西桂林海螺水泥有限公司);标准砂为中国 ISO 标准砂(福建省厦门市艾斯欧公司),粒径范围为 0.08~2.00 mm;粉煤灰、矿粉(河南省巩义市某净水材料公司). 具体配合比如下:水胶比为 0.5;矿粉掺量为 10%;粉煤灰掺量为 25%;砂掺量为 26.7%. 该配合比测试结果如下:流动度为 11.5 s;抗压强度为 18.6 MPa;抗折强度为 3.7 MPa;凝结时间为 176 min. 半柔性灌浆料配合比参数设计测定结果符合 JT/T 1238—2019《半柔性混合料用水泥基灌浆材料》的技术要求,且抗折强度远远超过技术的要求(2.0 MPa),表明此配合比砂浆性能优良.

2 再生半柔性路面级配设计及路用性能

2.1 基体沥青混合料级配设计

灌注式半柔性路面基体沥青混合料为大空隙结构沥青混合料,设计空隙率为 20%~30%,运用体积法对半柔性路面基体沥青混合料进行级配设计^[12-13]. 在进行再生半柔性路面级配设计时,为形成大空隙骨架-密实结构,贴近工程实际应用,并减小细集料中大量老化沥青对基体沥青混合料的影响,仅掺加 9.5~13.2 mm 的单一粒径粗集料,空隙率设计为 21%. 半柔性路面基体沥青混合料级配,如表 2 所示.

表 2 中: d 为筛孔的边长.

表 2 半柔性路面基体沥青混合料级配
Tab. 2 Gradation of semi-flexible pavement matrix asphalt mixture

d/mm	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
通过率/%	100.0	12.3	12.3	8.7	6.7	5.7	4.7	3.5	2.5

半柔性路面基体沥青混合料属于骨架-密实结构,与普通沥青混合料的级配有较大的差异,若仍然采用传统的马歇尔试验法,所确定的最佳沥青质量分数(沥青用量)将超过裹附集料所需的沥青用量^[14].因此,采用谢伦堡沥青析漏试验及肯塔堡飞散试验进行初步确定,最后,通过马歇尔试验进行验证及调整.以 RAP 掺量为 30% 时为例,设置 5 个梯度沥青用量,测定的肯塔堡飞散损失及谢伦堡析漏损失,如图 1 所示.图 1 中: η_1 为飞散损失; η_2 为析漏损失; $w(\text{沥青})$ 为沥青用量.

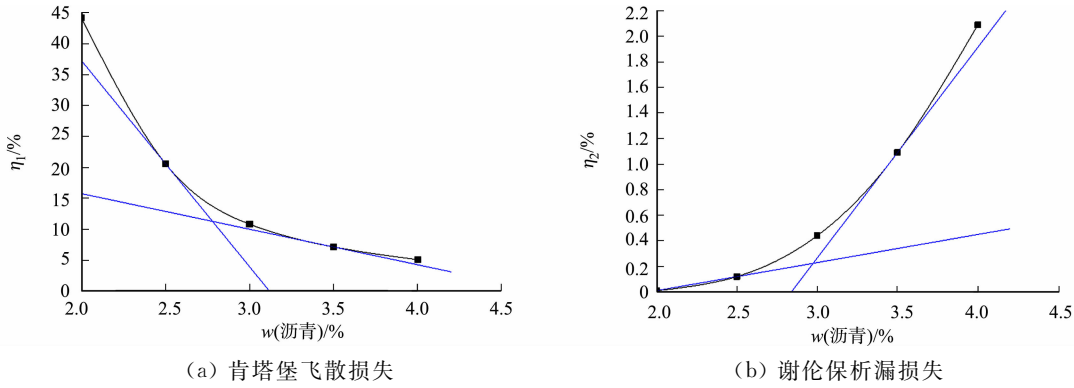


图 1 最佳沥青用量实验
Fig. 1 Experiment on optimum amount of asphalt

从图 1 可知:曲线拐点处横坐标即为最大沥青用量或最小沥青用量,取其平均值,测定马歇尔稳定度,并验证稳定度指标是否符合要求.不同 RAP 掺量的最佳沥青用量,如表 3 所示.表 3 中: $w(\text{RAP})$ 为 RAP 掺量; MS 为稳定度; $w_b(\text{沥青})$ 为沥青的最佳用量.

由表 3 可知:再生料掺入能够降低基体沥青混合料的沥青用量,每掺加 15% 再生料约可减少基体沥青混合料 0.9% 沥青用量;再生料的掺入能够增大基体马歇尔稳定度,每掺加 15% 再生料可增大约 13% 的基体马歇尔稳定度.

2.2 再生半柔性路面路用性能

半柔性路面以基体沥青混合料为主体,灌浆养护后路面刚度稍大于普通沥青路面,远小于混凝土路面,偏柔性^[15],因此,采用沥青路面试验评价半柔性路面的相关路用性能.砂浆在常规条件下养护 7 d,强度可达 28 d 的 80% 左右.

2.2.1 水稳定性能评价 由于半柔性路面中存在砂浆,使得其与普通沥青水稳定性能有较大的差异,当半柔性路面砂浆灌注率达到 85% 以上时,路面的渗水系数几乎为 0.因此,半柔性路面的水稳定性能优于普通沥青路面.由于再生半柔性路面材料为三相非均质材料,通过对比浸水马歇尔试验、冻融劈裂实验评价方法确定最优评价方法.不同 RAP 掺量的再生半柔性路面水稳性能指标的影响,如图 2 所示.图 2 中: δ 为冻融劈裂实验强度比; MS_0 为砂浆残留稳定度

由图 2 可知:浸水马歇尔试验及冻融劈裂实验的水稳性能有较大的差异,从统计学规律看,砂浆残留稳定度随着 RAP 掺量增大而增大,这是由于砂浆在 60 ℃ 恒温水浴箱中养护的强度增长大于砂浆在标准条件下养护;低 RAP 掺量中半柔性路面冻融劈裂强度比随着 RAP 掺量增大而提高,当 RAP 掺量超过 15% 时,冻融劈裂强度比逐渐下降,当掺量较高(超过 30%)时,其冻融劈裂实验强度比不满足现行规范中指标规定(不低于 80%).较低 RAP 掺量下,老旧沥青与集料结合得更紧密,增强了水稳定性能,随着 RAP 掺量的增加,RAP 的材料变异特性使得再生半柔性路面中新老沥青融合程度下降,水稳性能

表 3 不同 RAP 掺量的最佳沥青用量

Tab. 3 Optimal amount of asphalt
for different RAP dosage

参数	$w(\text{RAP})/\%$			
	0	15	30	45
$\eta_1/\%$	2.92	2.78	2.68	2.51
$\eta_2/\%$	3.04	3.02	2.96	2.89
MS/kN	4.26	4.87	5.34	6.38
$w_b(\text{沥青})/\%$	2.98	2.90	2.82	2.70

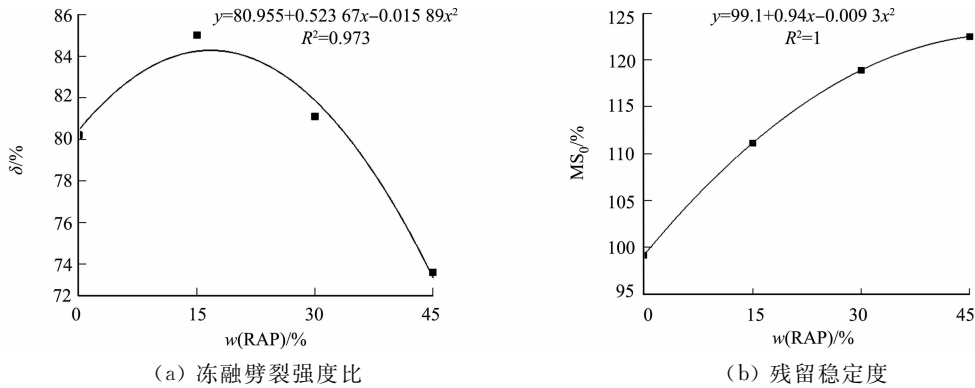


图 2 不同 RAP 掺量对再生半柔性路面水稳性能指标的影响
Fig. 2 Influence of different RAP dosages on water stability performance index of recycled semi-flexible pavement

也随之下降, 综上, 建议选用冻融劈裂实验测定半柔性材料的水稳定性能.

2.2.2 低温抗裂性能评价 我国大部分地区冬季漫长, 平均温度较低, 低温开裂是沥青路面主要病害之一, 在半柔性路面中, 集料、沥青及砂浆温缩系数不同. 沥青和砂浆温缩系数对整体低温性能影响程度较大, 未有统一的评价方法. 低温弯曲实验、低温蠕变实验需切割车辙试件, 由于灌浆及材料分布差异, 半柔性路面小梁试件个体差异化较大, 因此, 对测试结果有较大的影响. 采用易于控制灌浆量和均匀性的低温劈裂实验测定低温性能. 按规范成型的马歇尔试件灌浆养生 7 d, 实验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加载速率为 $50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. 不同 RAP 掺量低温劈裂实验结果, 如表 4 所示. 表 4 中: F 为劈裂值; ϵ_T 为破坏拉伸应变; p_1 为劈裂抗拉强度; p_2 为弯曲劲度模量.

表 4 不同 RAP 掺量低温劈裂的实验结果
Tab. 4 Low-temperature splitting experiment results of different RAP dosages

$w(\text{RAP})/\%$	F/kN	p_1/MPa	$\epsilon_T \times 10^{-6}$	p_2/MPa
0	16.22	1.61	3 412	809.9
15	18.55	1.83	4 052	779.8
30	24.56	2.43	4 531	923.4
45	20.73	2.05	3 917	901.5

由表 4 可知: RAP 掺量对抗弯拉强度与破坏拉伸应变影响表现出一致性, 在低掺量时, RAP 能够增强破坏拉伸应变, 从而增强再生半柔性路面材料的低温抗裂性能; 当掺量较高 (超过 30%) 时, 低温抗裂性能呈现下降趋势. RAP 材料能够在低掺量条件下增强混合料的粘结性能, 提高低温抗裂性能, 随着 RAP 掺量的增加, 新旧沥青混合均匀性变差, 融合紧密程度也随之下降, 导致再生半柔性路面的低温抗裂性能随 RAP 掺量的增大而下降.

2.2.3 高温稳定性能评价 普通沥青路面的高温稳定性一般较差, 高温时, 路面经常出现车辙印迹, 而良好的抗车辙性能是半柔性路面主要优点之一. 以动稳定度 (DS) 和车辙位移 (s) 表征高温稳定性性能的优劣, 标准车辙实验的车辙尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 轮压为 0.7 MPa , 进行 3 次平行试验. 不同 RAP 掺量对再生半柔性路面高温稳定性能指标的影响, 如图 3 所示.

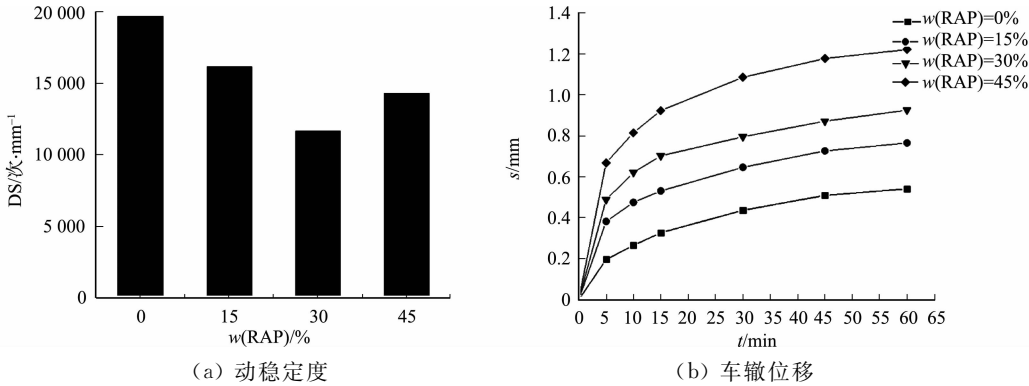


图 3 不同 RAP 掺量对再生半柔性路面高温稳定性能指标的影响
Fig. 3 Influence of different RAP dosages on high-temperature stability performance index of recycled semi-flexible pavement

掺加 RAP 的试件细集料比例增大,细集料堵住了部分母体空隙,造成密闭孔隙的增大.由图 3 可知:车辙位移随掺量增大而增大,但总体位移较小且各 RAP 掺量的动稳定度均大于 $10\,000\text{次}\cdot\text{mm}^{-1}$,显著大于普通沥青路面的动稳定度指标,具有优良的抗车辙性能;动稳定度呈现先减小后增大的趋势,这是由于空隙的减小导致动稳定度的下降,当 RAP 掺量为 30% 时出现拐点,动稳定度出现最小值,后期空隙率降低放缓,动稳定度提升,老化沥青中重质成分的增加提升抗变形能力,导致动稳定度的增大.

综合车辙位移及动稳定度指标,从统计学角度可近似认为高温性能随 RAP 掺量增大呈线性降低.这与普通沥青混合料随着 RAP 掺量增加性能增强的结论相反,这是由于三相非均质性(材料性质在空间上的变化)的材料特性和连锁结构特征导致,在进行再生半柔性路面最佳 RAP 掺量设定时,高温性能可作为次要考虑因素,优良的高温抗车辙性能是半柔性路面最突出的特点.

3 RAP 掺量与路用性能灰色关联分析

3.1 灰色关联分析理论

1982 年,邓聚龙提出描述因素间关系强弱的灰色关联分析法,有如下 4 个求解步骤.

步骤 1 确定参考序列和比较序列.灰色关联分析以 RAP 的掺量为参考序列,以劈裂抗拉强度、动稳定度、车辙深度、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比等路用性能指标为比较序列.

参考序列为 $X_0=\{X_0(1),X_0(2),X_0(3),\cdots,X_0(m)\}$.

比较序列为 $X_1,X_2,X_3,X_4,\cdots,X_i;X_i=\{X_i(1),X_i(2),X_i(3),\cdots,X_i(m)\},i=1,2,3,\cdots,m$.

步骤 2 数据无量纲处理.使用均值法对数据进行无量纲处理,即

$$x_0=\left\{\frac{X_0(1)}{X_0},\frac{X_0(2)}{X_0},\frac{X_0(3)}{X_0},\cdots,\frac{X_0(m)}{X_0}\right\},\tag{1}$$

$$x_i=\left\{\frac{X_i(1)}{X_i},\frac{X_i(2)}{X_i},\frac{X_i(3)}{X_i},\cdots,\frac{X_i(m)}{X_i}\right\},\quad i=1,2,3,\cdots,m.\tag{2}$$

步骤 3 参考数列与比较数列的灰色关联系数为

$$\zeta_i(k)=\frac{\min_k\min_i|x_0(k)-x_i(k)|+\rho_1\cdot\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho_1\cdot\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|}.\tag{3}$$

式(3)中: $k=1,2,3,\cdots,m;\rho_1$ 为分辨系数,取值范围为 $(0,1)$,通常取 0.5.

步骤 4 关联度的求解.关联度 γ_i 为

$$\gamma_i=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^m\zeta_i(k).\tag{4}$$

式(4)中: γ_i 表示 x_i 与 x_0 的关联程度,数值越大,趋势越接近.

3.2 RAP 掺量与路用性能灰色关联度分析

不同 RAP 掺量的半柔性路面路用性能指标灰色关联度,如表 5 所示.表 5 中: h 为车辙深度.

表 5 不同 RAP 掺量的半柔性路面路用性能指标灰色关联度

Tab. 5 Gray correlation degree of semi-flexible pavement performance indicators with different RAP dosages

参数	$w(\text{RAP})/\%$				γ_i
	0	15	30	45	
p_1/MPa	0.512	0.831	1.000	0.464	0.702
$\text{DS}/\text{次}\cdot\text{mm}^{-1}$	0.389	0.732	0.611	0.434	0.542
h/mm	0.588	0.867	0.827	0.608	0.722
$\delta/\%$	0.453	0.710	0.776	0.429	0.592
$\text{MS}_0/\%$	0.491	0.779	0.810	0.479	0.639

由表 5 可知:灰色关联度值越大,RAP 对路用性能影响越大;当 $0.600<\gamma_i\leq 1.000$ 时,关联度为强度关联,当 $0.300<\gamma_i\leq 0.600$ 时,关联度为中度关联.参数关联度由强到弱排序为 $h>p_1>\text{MS}_0>\delta>\text{DS}$,其中, h,p_1,MS_0 为强度关联, δ,DS 为中度关联.沥青路面在不同深度及不同部位回收的 RAP 材料存在较大的性能差异,因此,RAP 材料存在较大的变异系数,使得 RAP 掺量与车辙深度的关联度强.老

化沥青与新沥青的低温抗裂性能有较大差异,RAP 掺量影响新旧沥青及集料的融合程度,进而影响沥青路面水稳性能.综合灰色关联度分析,RAP 掺量对再生半柔性路面的基本路用性能影响较大.

4 结论

以体积法设计再生半柔性路面级配,在此基础上,探究不同 RAP 掺量的再生半柔性路面路用性能,并通过灰色关联分析,得出如下 3 个结论.

1) 掺加 RAP 能降低基体沥青混合料的沥青用量,每掺加 15%再生料,约可减少基体沥青混合料 0.9%的沥青用量;掺加 RAP 能够增大基体马歇尔稳定度,每掺加 15%再生料,约可增大基体马歇尔稳定度约 13%.

2) 低掺量下,随着 RAP 掺量的增加,水稳定性能及低温抗裂性能也得到显著提升;随着掺量的进一步增加,水稳定性能及低温抗裂性能则呈现下降趋势;RAP 通过本身变异特性影响空隙变化及沥青重质变化,使得动稳定度呈现先降低后增加.综合车辙位移及动稳定度指标,从统计学角度,可近似认为高温性能随着 RAP 掺量增大呈线性降低.综合分析不同 RAP 掺量的路用性能,建议最佳 RAP 掺量为 30%.

3) RAP 掺量与路用性能灰色关联分析结果表明:RAP 掺量对车辙深度、劈裂抗拉强度和残留稳定度影响较大.

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2019-04-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html.

[2] 陈雅雯. 厂拌热再生沥青混合料性能及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.

[3] 秦永春,黄颂昌,徐剑,等. 厂拌温再生沥青混合料中新旧沥青的融合性研究[J]. 公路交通科技,2015,32(12):24-28,52. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2015.12.005.

[4] 何兆益,陈龙,陈先勇,等. 厂拌热再生沥青混合料力学性能及应用研究[J]. 建筑材料学报,2016,19(5):871-875,914. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2016.05.015.

[5] 宋小峰,王大明. 厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[J]. 森林工程,2015,31(2):139-144. DOI:10.16270/j.cnki.slgc.2015.02.031.

[6] 凌天清,郑晓卫,凌濛,等. 保水降温半柔性路面材料性能研究[J]. 中国公路学报,2010,23(2):7-11,17. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2010.02.002.

[7] CAI Xing,YANG Jun,CHEN Xianhua,*et al.* Interlocking property evaluation of dual skeleton in semi-flexible pavement material by micromechanical model and X-ray computed tomography[J]. Construction and Building Materials, 2020,254:118934.

[8] 成志强,孔繁盛,贾蓉蓉. 半柔性路面水泥基灌浆材料泌水性能研究[J]. 中外公路,2016,36(4):276-279.

[9] 覃峰. 半柔性路面灌注复合砂浆性能研究[J]. 混凝土,2016(6):97-102. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2016.06.026.

[10] HASSAN K E,SETYAWAN A,ZOOROB S E. Effect of cementitious grouts on the properties of semi-flexible bituminous pavements[C]//Proceedings of 4th European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements. Nottingham:[s. n.],2002:113-120.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 半柔性混合料用水泥基灌浆材料: JT/T 1238—2019[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[12] 程磊,郝培文. 基于体积法的半柔性路面母体沥青混合料设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2002,22(1):1-3. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2002.01.001.

[13] 张肖宁,郭祖辛,吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1995,28(2):28-36.

[14] 程磊. 半柔性路面用混合料性能及其设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2002. DOI:10.7666/d.y558946.

[15] 董营营. 高性能半柔性路面设计参数及施工工艺研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008. DOI:10.7666/d.y1249944.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)