

高 RAP 掺量沥青混合料疲劳预估模型研究

孙良钰¹, 王盟¹, 张喜伦¹, 田朋涛¹, 马庆伟^{2*}, 郭平², 杨法勇²

(1. 中交二公局东盟工程有限公司, 陕西 西安 710005; 2. 西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:利用路面热再生技术能够降低能源的消耗,从而达到提高资源利用效率的目的,能够给社会和经济带来积极的影响。该文为了研究再生沥青混合料疲劳寿命的影响因素及其规律,分别在不同应力比、RAP 掺量、温度、加载频率下,拟合高 RAP 掺量沥青混合料疲劳的破坏寿命特征以及疲劳寿命与应力比的关系。结果表明:当 RAP 掺量、应力比和试验温度增加时,再生沥青混合料的疲劳寿命降低;疲劳寿命与应力比近似成对数关系,并以 RAP 掺量、应力比、加载频率和试验温度为疲劳参数,建立混合料疲劳预估模型。

关键词:沥青混合料; RAP; 道路工程; 疲劳性能; 预估模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

近年来,随着交通运输行业的高速发展,道路建设与养护得到了更多的关注,公路养护行业规模也随之扩大^[1]。现存道路在重载交通反复作用下出现各种各样的病害,中国老旧沥青路面在维修、重建过程中产生了大量废旧集料,若未经处理随意丢弃会造成严重污染,因此废旧集料回收再生利用技术应运而生^[2-4]。再生沥青混合料(RAP)的利用指从老旧路面回收的废旧集料,通过一系列处理后,与再生剂、新沥青和新集料按照一定的配比混合、拌和形成的混合料^[5-7]。目前,在 RAP 回收利用中,由于其疲劳性能受限,RAP 掺量主要控制在 15%~25%,从而限制了高掺量 RAP 沥青路面热再生技术在中国的应用以及推广^[8-9]。在提高 RAP 掺量的同时,保证回收旧料再生沥青路面的疲劳性能显得尤为重要^[10]。

YAN Jinhai^[11]等通过对热拌再生沥青混合料的研究发现,当 RAP 掺量更高时,沥青混合料的水稳定性和抗疲劳性能提升较大;林翔^[12]等通过一系列试验发现,影响再生沥青混合料耐久性的众多因素中,RAP 中沥青的老化程度对其影响最大,其次是 RAP 中的沥青含量,再者是 RAP 的分级;姜严旭^[13]发现,再生沥青混合料通过多次冻融循环的作用后,其高温性能和疲劳性能都有所下降。再生沥青混合料的耐久性在长期水、温循环的作用下变差;贾立术^[14]等研

究发现,热再生混合料的低温抗裂性和抗疲劳开裂性随着 RAP 掺量的增加而降低;秦卓文^[15]等提出再生沥青混合料的疲劳性能会随着 RAP 掺量的提高而出现一定程度的降低;Norouzi A^[16]研究发现,路面的抗疲劳性随着 RAP 掺量的提高而降低,这可能是由于添加了使沥青混合料变硬的老化黏结剂所致;Tomlinson C^[17]表明,在一定范围内随着沥青混凝土中 RAP 含量的增加,动态模量和疲劳寿命都会增加。疲劳寿命与 RAP 百分比、黏合剂类型、频率和温度有很大关系;Arsenie I M^[18]使用四点弯曲试验结果和有限元建模来描述疲劳行为;Hou T^[19]研究发现,简化的黏弹性连续损伤(VECD)模型可以很好地预测沥青混合料疲劳寿命,可以在各种温度条件和各种应变水平下相当准确地预测疲劳测试结果;Mannan U A^[20]对传统的疲劳寿命预测模型进行了修改,以便将 RAP 的影响纳入疲劳方程。

为全面描述在较高 RAP 掺量水平下再生沥青混合料疲劳性能的变化规律,预估再生沥青混合料的疲劳寿命,为再生沥青混合料的实际应用提供参考,该文采用间接拉伸试验,将包括 RAP 掺量和应力比在内的内在因素以及温度和频率等外部控制因素作为变量,研究再生沥青混合料的疲劳性能,通过数据分析,建立适合于再生沥青混合料的疲劳预估模型。

收稿日期:2021-02-26

基金项目:陕西省交通科技项目(编号:19-10K,19-28k);陕西省青年科技新星项目(编号:2019KJXX-035)

作者简介:孙良钰,男,大学本科,政工师。E-mail:1766377208@qq.com

* **通信作者:**马庆伟,男,博士研究生,高级工程师。E-mail:287314139@qq.com

1 材料及方法

1.1 材料

(1) 沥青

所用 RAP 材料来源于道路上面层经铣刨而得的旧料,对 RAP 中经过加热蒸馏回收得到的旧沥青进行检测,结果见表 1。新添加的 70[#] 基质沥青试验指标见表 2。

表 1 回收沥青和 70[#] 沥青性能指标

项目	25 ℃ 针入度/ (0.1 mm)	15 ℃ 延度/ cm	软化点/ ℃
回收沥青	31.8	63	55
70 [#] 沥青	67.5	>100	47
规范要求	60~80	>100	42~52

表 2 新沥青技术指标

检测指标	单位	检测结果	规范要求
25 ℃ 针入度	0.1 mm	67.5	60~80
针入度指数(PI)		-1.43	-1.5~+1.0
15 ℃ 延度	cm	>100	≥20
软化点	℃	47	≥46
闪点	℃	273	≥260
15 ℃ 密度	g/cm ³	1.034	实测
溶解度	%	99.72	≥99.5
薄膜烘箱试 针入度比	%	63.1	≥61
验(163 ℃, 质量损失	%	0.061	≤+0.8
5 h) 10 ℃ 延度	cm	22.6	≥8

(2) 集料

RAP 经抽提筛分后得到所用集料,表 3、4 为集料的性能测试结果。表 5~7 为新集料和矿粉的性质试验结果。

表 3 旧粗集料基本性能

性能指标	单位	检测结果
压碎值	%	16.4
洛杉矶磨耗值	%	8.36
针片状颗粒含量	%	8.2
有效密度	g/cm ³	2.714
有效相对密度		2.718
表观相对密度		2.685
吸水率	%	0.7

表 4 旧细集料基本性能

性能指标	单位	检测结果
有效密度	g/cm ³	2.695
有效相对密度		2.691
砂当量	%	97

表 5 新集料与新沥青密度指标

集料与沥青	表观相对 密度	毛体积相 对密度	吸水率/ %
0~4.75 mm	2.707	2.652	0.78
矿料 4.75~9.5 mm	2.729	2.702	0.35
9.5~19 mm	2.730	2.702	0.36
沥青		1.035	

表 6 粗集料性质指标试验结果

粗集料/ mm	压碎值/ %	磨光值/ BPN	针片状含 量/%	<0.075 mm 颗粒含量/%
4.75~9.5	19.2	46	9.7	0.6
9.5~19	19.3	47	7.7	0.5
规范要求	≤26	≥42	≤12	≤1

表 7 细集料性质指标

项目	砂当量不小于	棱角性/%	含水率/%
细集料(0~ 4.75 mm)	66	48	3.4
规范要求	60	>45	≥2

1.2 方法

(1) 新旧集料比例及配合比

采用 AC-20 级配类型进行再生沥青混合料试验研究。表 8 为不同掺量 RAP 的再生沥青混合料各档集料配比。

(2) 间接拉伸疲劳试验

使用 UTM-30 试验机进行间接拉伸疲劳试验,研究沥青混合料的疲劳寿命。在加载频率为 2、5、10 Hz、应力比为 0.3~0.6 以及试验温度设置为 5、15、25 ℃的条件下进行试验操作,试验仪器如图 1 所示。

(3) 疲劳预估模型

研究发现,应力比 C 与对数疲劳寿命 $\ln N_f$ 之间存在较强的线性关联性,将 RAP 掺量 R 设定为不同的掺量时,加载频率 H 也相应变化,试验温度 T 控制不同,发现三者对再生混合料疲劳寿命 N_f 以及应力比 C 存在一定的影响,这种影响可以对数形式呈现,

表 8 不同掺量 RAP 下各档集料配比

集料规格/ mm	不同 RAP 掺量(%)集料所占比率/%				
	0	30	40	50	60
19~16	11.88	11.73	12.11	12.67	13.98
16~13.2	14.76	15.74	14.25	11.95	6.78
13.2~9.5	22.70	1.06	0.02	0.02	0.02
9.5~4.75	0.37	10.01	5.36	0.25	0.00
4.75~2.36	21.42	6.04	4.55	3.01	0.00
2.36~1.18	4.12	4.78	4.13	3.59	1.52
1.18~0.6	9.08	6.37	6.06	5.73	5.67
0.6~0.3	5.32	4.53	4.14	3.78	3.33
0.3~0.15	0.87	1.02	1.04	1.03	0.95
0.15~0.075	2.86	4.38	4.03	3.74	3.47
矿粉	6.83	4.28	4.28	4.30	4.31



图 1 UTM-30 仪器

同时,通过对 N_f 和应力比 C 的这种关系的系数修正可建立以下形式的疲劳预估模型:

$$\ln N_f = a + b \ln C \tag{1}$$

$$a = f_1(R, H, T) \tag{2}$$

$$b = f_2(R, H, T) \tag{3}$$

式中: N_f 为试件破坏时的疲劳寿命(次); C 为施加的应力比; R 为 RAP 掺量(%); T 为试验温度($^{\circ}\text{C}$); H 为加载频率(Hz); a 和 b 分别为三参数 R 、 T 和 H 的函数。

2 疲劳性能影响因素分析

2.1 RAP 掺量对疲劳性能的影响

在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 10 Hz 条件下,进行间接拉伸疲劳试验,不同 RAP 掺量的再生沥青混合料试验结果如表 9 所示,图 2 为对数疲劳寿命随 RAP 掺量的变化曲线。

从图 2 中可以看出:RAP 掺量在 $0\sim 30\%$ 之间的再生沥青混合料的对数疲劳寿命变化很小。研究表明:低掺量的 RAP 对疲劳性能影响很小,RAP 掺量增加,影响相关性变大,图形的趋势逐渐下降,尤其当掺量大于 30% 后,对数疲劳寿命下降幅度较大,且随着

表 9 混合料在不同 RAP 掺量下的疲劳寿命($15\text{ }^{\circ}\text{C}$)

RAP 掺量/%	应力比	疲劳寿命/次	对数疲劳寿命
0		68 060	4.835
30		60 190	4.781
40	0.3	54 860	4.741
50		35 850	4.556
60		11 050	4.045

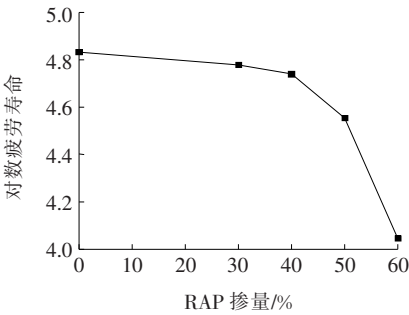


图 2 不同 RAP 掺量下的疲劳寿命

越来越多 RAP 的掺入,对数疲劳寿命的下降趋势也随之越来越大,这说明 30% 的掺量是影响 RAP 的一个临界掺量。造成这种现象的原因主要是,随着旧沥青在再生沥青混合料中比重的增加,新沥青含量相对降低,但新旧沥青无法全部相融,因此再生沥青混合料的疲劳性能显著下降。

2.2 应力水平对疲劳性能的影响

图 3 为不同应力比时 AC-20 混合料疲劳试验结果。

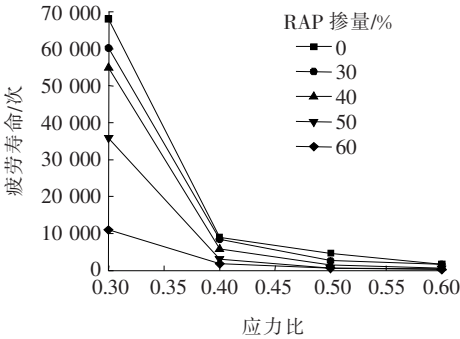


图 3 不同应力比下疲劳寿命曲线

从图 3 可以看出:当应力比为不同值时, 0% 掺量和 30% 掺量 RAP 的混合物有着几乎相同的疲劳寿命曲线,说明低掺量 RAP 对混合料疲劳寿命影响较小。当应力水平从 0.3 增加到 0.4 且 RAP 掺量不同时,各个水平的混合料疲劳寿命都出现较大的降低,这说明当应力水平较低时,应力比对再生沥青混合料的疲劳寿命影响较大,对比 0% 和 60% 掺量 RAP 时的疲劳寿

命曲线发现,应力水平的变化在 RAP 掺入后对疲劳性能有显著影响,使其比新沥青混合料更敏感。

2.3 加载频率对疲劳性能的影响

图 4 为不同加载频率下的疲劳寿命变化特征。

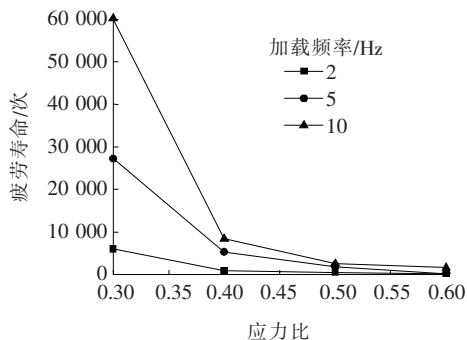


图 4 不同加载频率下的疲劳寿命曲线

由图 4 可以看出:疲劳寿命与加载频率呈现出正相关的趋势,加载频率的降低会导致疲劳寿命的降低,2 Hz 时,疲劳寿命最小。控制加载频率不变,疲劳寿命与应力比呈负相关趋势,随着应力比的增加,疲劳寿命减小。当应力比超过 0.4 时,降幅趋于平稳。此外,当荷载频率增大到一定范围时,其疲劳寿命差值更小。

2.4 试验温度对疲劳性能的影响

图 5 为不同试验温度下疲劳寿命变化规律。

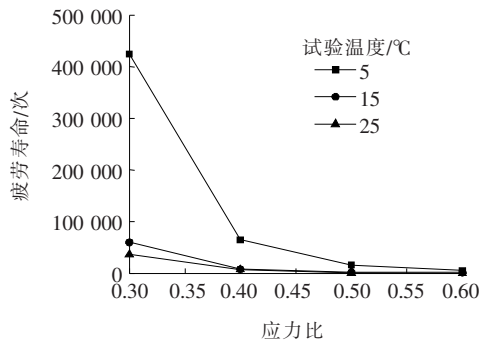


图 5 不同温度下的疲劳寿命曲线

由图 5 可知:在应力比相同的情况下,再生沥青混合料的疲劳寿命受温度变化的影响较大,当应力比较小时,温度的降低导致了疲劳寿命的较大增长。主要原因是再生沥青混合料的劲度会随着试验温度在一定范围内的降低而增大,当应力条件相同时,产生的应变就变得更小,由此导致疲劳寿命增加。

3 再生沥青混合料疲劳预估模型的建立及评估

3.1 RAP 掺量对疲劳预估模型参数影响

在条件为 $H=10\text{ Hz}$ 、 $T=15\text{ °C}$ 的情况下,疲劳预

估模型中的试验结果显示,RAP 掺量的变化可以决定疲劳寿命的变化,并且在这种 RAP 掺量变化下的疲劳寿命,可以用 $N_f=a \cdot C^b$ 来模拟拟合与应力比的关系,如图 6 所示。从图 6 可以看出:不同配比的再生沥青混合料和不同应力水平下的疲劳试验数据可以利用这种模型很好地拟合。图 7 表达了利用该模型得到的疲劳方程拟合参数 a 、 b 与不同 RAP 掺量之间的关系。

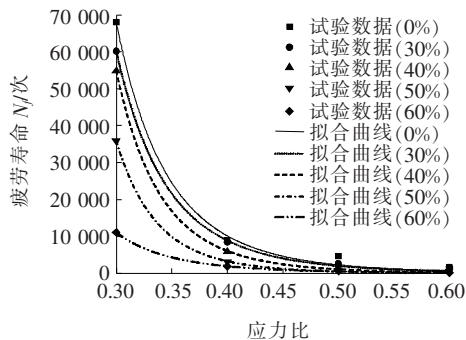


图 6 混合料疲劳寿命与应力比在不同 RAP 掺量下的拟合曲线

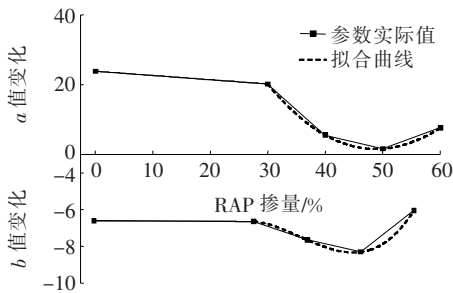


图 7 拟合参数 a 、 b 值与 RAP 掺量的拟合曲线图

从图 7 可以看出:RAP 掺量小于 30% 时,RAP 与 a 、 b 的变化值存在一定的关系,故采用一次函数 $a=A_1+B_1 \cdot x$ 、 $b=A_2+B_2 \cdot x$ 来表达,而 $R \geq 30\%$ 时, a 、 b 不再满足线性关系而满足一种非线性关系,拟采用三次多项式的方式来拟合疲劳方程参数,从而提高参数拟合的准确度,分别为 $a=C_1+D_1 \cdot x+E_1 \cdot x^2+F_1 \cdot x^3$ 、 $b=C_2+D_2 \cdot x+E_2 \cdot x^2+F_2 \cdot x^3$,表 10 为得到的疲劳方程各拟合参数。

由上述分析可知:在 $H=10\text{ Hz}$ 、 $T=15\text{ °C}$ 的情况下,当疲劳预估模型的 RAP 掺量变化时,方程参数 a 、 b 变化特征为:

$$a = \begin{cases} 23.83 - 12.14R & R < 30\% \\ 138.22 - 596.86R + 724.13R^2 - 153.61R^3 & R \geq 30\% \end{cases} \quad (4)$$

表 10 疲劳方程参数 a 、 b 的拟合值

a 取值						b 取值					
A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2	F_2
23.83	-12.14	138.22	-596.86	724.13	-153.61	-6.61	-0.12	-27.37	179.98	-498.55	429.70

$b =$

$$\begin{cases} -6.61-0.12R & R<30\% \\ -27.37+179.98R-498.55R^2+429.70R^3 & R\geq 30\% \end{cases} \quad (5)$$

3.2 加载频率对疲劳预估模型参数影响

在条件为 $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $R=30\%$ 的情况下,从疲劳预估模型试验结果中可以看出:加载频率的变化能够决定疲劳寿命的变化,这种变化关系也可以采用 $N_f=a\cdot C^b$ 来拟合,关系如图 8 所示。图 8 疲劳方程中拟合参数 a 、 b 值在加载频率不同时的变化趋势如图 9 所示。

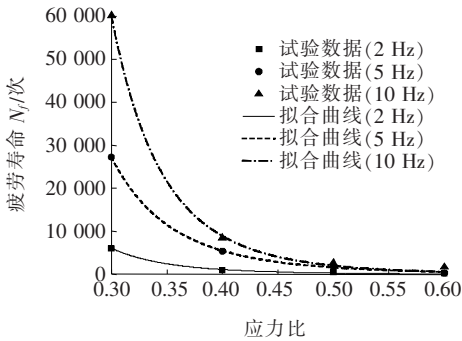


图 8 混合料疲劳寿命与应力比在不同加载频率下的拟合曲线

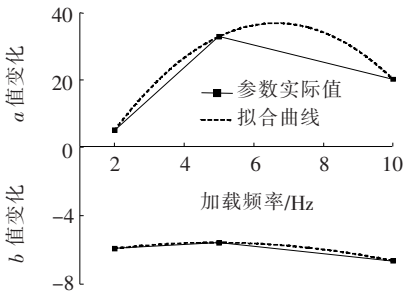


图 9 拟合参数 a 、 b 值与加载频率的拟合曲线

由图 9 中曲线的变化趋势看出,当加载频率不同时,可用近似二次函数来拟合疲劳方程中参数 a 、 b 变化值,分别为 $a=A_3+B_3\cdot H+C_3\cdot H^2$, $b=A_4+B_4\cdot H+C_4\cdot H^2$,表 11 为得到的拟合参数在疲劳方程中的数据。

由上述分析可以得到:在 $R=30\%$ 、 $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,可用下列公式表征疲劳预估模型中 a 、 b 在不

表 11 不同加载频率下疲劳方程参数 a 、 b 的拟合值

a 取值			b 取值		
A_3	B_3	C_3	A_4	B_4	C_4
-28.70	19.78	-1.49	-6.55	0.40	-0.04

同加载频率下的变化特征:

$$\begin{cases} a=-28.70+19.78H-1.49H^2 \\ b=-6.55+0.40H-0.04H^2 \end{cases} \quad (6)$$

3.3 试验温度对疲劳预估模型参数影响

在条件为 $R=30\%$ 、 $H=10\text{ Hz}$ 的情况下,疲劳预估模型试验结果显示,试验温度变化影响疲劳寿命变化规律,并且不同试验温度变化的疲劳寿命与加载应力比的关系同样可以用 $N_f=a\cdot C^b$ 来模拟拟合,关系如图 10 所示。

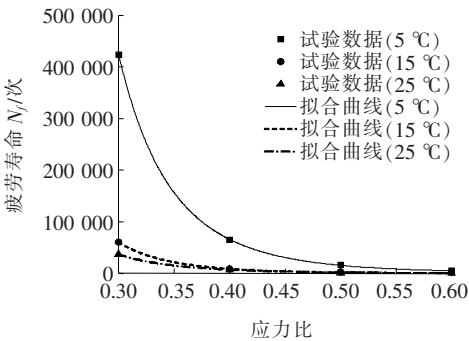


图 10 混合料疲劳寿命与应力比在不同试验温度下的拟合曲线

将图 10 疲劳方程拟合参数 a 、 b 值与不同试验温度之间的关系绘制成图 11。

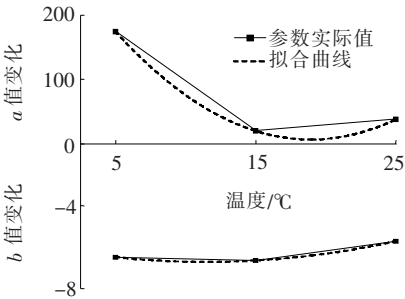


图 11 拟合参数 a 、 b 值与试验温度的拟合曲线

由图 11 中曲线的变化趋势看出:同样可用二次函数来描述不同试验温度对 a 、 b 变化值的影响,分别为

$a=A_5+B_5\cdot T+C_5\cdot T^2$, $b=A_6+B_6\cdot T+C_6\cdot T^2$,表 12 为得到的疲劳方程的拟合参数。

表 12 疲劳参数 a 、 b 在不同试验温度下的拟合值

a 取值			b 取值		
A_5	B_5	C_5	A_6	B_6	C_6
315.81	-32.60	0.86	-4.93	-0.24	0.01

当 $R=30\%$ 、 $H=10\text{ Hz}$ 时,疲劳预估模型的 a 、 b 值在不同试验温度下的特征可用公式表示为:

$$\begin{cases} a=315.81-32.60T+0.86T^2 \\ b=-4.93-0.24T+0.01T^2 \end{cases} \tag{7}$$

3.4 RAP 掺量、加载频率和试验温度对疲劳预估模型参数的综合影响

在高掺量 RAP($R\geq 30\%$)的情况下,加载频率 H 、试验温度 T 以及 RAP 掺量 R 都是影响参数 a 和 b 的主要因素,可通过不同公式的建立来拟合它们的关系。同时研究上述 3 个不同变量对再生沥青混合料的疲劳方程影响规律,建立如下疲劳参数方程:

$$\begin{cases} a=P_1+P_2R+P_3R^2+P_4H+P_5H^2+ \\ \quad P_6T+P_7T^2+P_8R^3 \\ b=P_1+P_2R+P_3R^2+P_4H+P_5H^2+ \\ \quad P_6T+P_7T^2+P_8R^3 \end{cases} \tag{8}$$

现拟采用曲线拟合计算前沿的全局优化算法和麦夸特法获得在再生沥青混合料疲劳方程中得到的参数,且相关系数 R^2 高达 99.99%。所得参数如表 13 所示。

表 13 疲劳寿命预估方程各参数取值

参数	a 取值	b 取值	参数	a 取值	b 取值
P_1	384.95	-25.56	P_5	-1.49	-0.04
P_2	-596.86	179.98	P_6	-32.60	-0.24
P_3	724.13	-498.55	P_7	0.86	0.01
P_4	19.78	0.40	P_8	-153.61	429.70

统计上述数据发现,在高 RAP 掺量($R\geq 30\%$)下,再生沥青混合料的疲劳预估模型可以表示为:

$$\ln N_f=384.95-596.86R+724.13R^2+19.78H-1.49H^2-32.60T+0.86T^2-153.61R^3+(25.56-179.98R+498.55R^2-0.40H+0.04H^2+0.24T-0.01T^2-429.70R^3)\ln\left(\frac{1}{C}\right) \tag{9}$$

3.5 基于再生沥青混合料疲劳试验数据的预估效果评估

可将该文所述的试验条件代入上述公式,以检验

该文提出的疲劳寿命预估模型,以此判断加载应力比 C 在不同 RAP 掺量 R 、试验温度 T 和加载频率 H 下与预估模型的疲劳寿命 N_f 的关系,疲劳寿命预测曲线如图 12~14 所示。

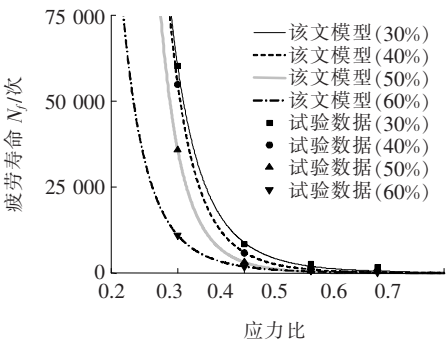


图 12 不同 RAP 掺量下疲劳寿命 N_f 的预测曲线图

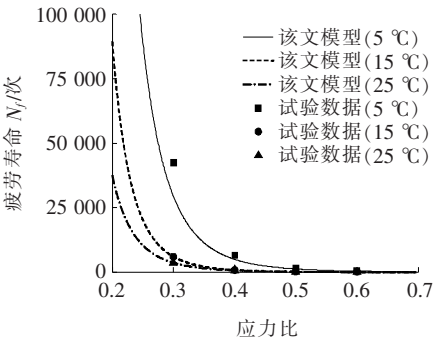


图 13 不同温度下疲劳寿命 N_f 的预测曲线图

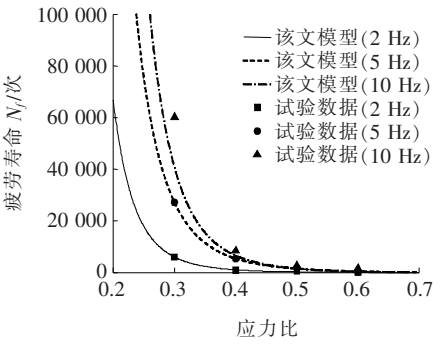


图 14 不同加载频率下疲劳寿命 N_f 的预测曲线图

从图 12~14 可以看出:当影响因素改变时,该文得到的所有试验数据都能对应所建立的预估模型预测出的数据,得到的数据变化趋势差异很小,且能够得到在低应力比下的疲劳寿命,从而为再生沥青混合料在路面设计与验算中提供参考经验。

4 结论

(1) RAP 掺量为 0 和 RAP 掺量为 30% 的沥青混

合料的对数疲劳寿命曲线几乎相同,疲劳性能受RAP掺量影响较小。当掺量大于30%后,对数疲劳寿命降幅较大,且随着RAP掺量的增加而下降,30%为临界掺量。

(2) 当应力水平较低时,疲劳寿命的敏感性较强,疲劳寿命在应力比增大时降低。再生沥青混合料的疲劳寿命在低频时更小,且随着加载频率的增加趋于稳定。疲劳寿命随着温度的降低而急剧增长。

(3) 利用对数函数可以描述疲劳寿命 N_f 与应力比 C 的相互关系,利用二次曲线函数描述疲劳方程参数 a 、 b 与 T 、 H 的关系,而利用三次函数描述与 R 的关系,最终以 R 、 H 、 T 、 C 作为自变量建立了疲劳预估方程。当影响因素变化时,该文给出的预估模型的变化趋势与试验数据变化趋势相符,提出的模型能够较好地预测估计再生沥青混合料的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 李鹏,李波,王静,等.基于激光扫描技术的高掺量RAP沥青混合料疲劳性能评价方法[J].中外公路,2018,38(1):230—234.
- [2] LI H, WANG W, LI W, et al. Replacement of Limestone with Volcanic Stone in Asphalt Mastic Used for Road Pavement[J]. Arab. J. Sci. Eng., 2019, 44(10): 8 629—8 644.
- [3] 肖庆一,张靖洁,李宁利,等.100%RAP的温拌再生沥青混合料的路用性能研究[J].中外公路,2017,37(3):216—220.
- [4] YANG F, LI H, ZHAO G, et al. Mechanical Performance and Durability Evaluation of Sandstone Concrete[J]. Adv. Mater. Sci. Eng., 2020, 2 020(1): 1—10.
- [5] 王雪莲,胡林,黄晓明.沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J].中外公路,2019,39(1):210—214.
- [6] LI H, LIU G, DONG B, et al. Research on the Development and Regeneration Performance of Asphalt Rejuvenator Based on the Mixed Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil[J]. Int. J. Pavement Res. Technol., 2019, 12(3): 336—346.
- [7] 李雪莲,叶峻宏,唐成,等.再生剂在回收热拌沥青混合料生产中的应用研究综述[J].中外公路,2020,40(5):240—244.
- [8] 李泉,韩庆奎,张继森,等.高废旧料掺量厂拌热再生技术性能研究[J].中外公路,2018,38(6):301—304.
- [9] 齐小飞,邹晓翎,阮鹿鸣,等.高RAP掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J].中外公路,2018,38(2):248—251.
- [10] LI H B, DONG B, WANG W J, et al. Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1 767.
- [11] YAN J H, ZHANG Z X, ZHU H R. Experimental Study of Hot Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement and Different Recycling Agents[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 42(5): 1 183—1 190.
- [12] 林翔,李海军,林立宽,等.基于正交试验的再生沥青混合料耐久性能研究[J].公路交通科技,2015,11(11):86—89.
- [13] 姜严旭,顾兴宇,周洲. RAP掺量对热再生沥青混合料水温耐久性能的影响[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(3):368—372.
- [14] 贾立术,卢争艳.高RAP掺量热再生混合料抗裂性能研究[J].公路工程,2017,42(2):296—301.
- [15] 秦卓文.厂拌热再生沥青混合料设计及性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [16] NOROUZI A, SABOURI M, KIM Y R. Evaluation of the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures with High RAP Content[J]. Journal of Tylor and Francis Group, 2014: 1 069—1 077.
- [17] TOMLINSON C. The Effect of High RAP and High Asphalt Binder Content on the Dynamic Modulus and Fatigue Resistance of Asphalt Concrete[D]. Virginia Tech, 2013.
- [18] ARSENIE I M, CHAZALLON C, THEMELI A, et al. Measurement and Prediction Model of the Fatigue Behavior of Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixture[C]. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Springer, Dordrecht, 2012.
- [19] HOU T, UNDERWOOD B S, KIM Y R. Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using the Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model[J]. Asphalt Paving Technology, 2010(79).
- [20] MANNAN U A, FAISAL H M, HASAN MM, et al. Evaluating the Effect of High RAP Content on Asphalt Mixtures and Binders Fatigue Behavior[J]. J Test Eval, 2018, 46(5): 1—13.