

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.211

不同成型方式乳化沥青冷再生混合料力学特性研究

易勇¹, 蒋应军¹, 谭云鹏¹, 胡永林², 陈浙江³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 金华市金东区公路
管理段, 浙江 金华 321000; 3. 金华市公路管理局, 浙江 金华 321000)

摘要:为深入探讨不同成型方式对乳化沥青冷再生混合料力学特性的影响,通过制备马歇尔试件、圆柱体试件,研究了垂直振动法和传统方法对冷再生混合料力学特性的影响,并应用 Weibull 分布建立疲劳方程。结果表明:与传统方法设计的冷再生混合料相比,垂直振动法最佳含水率降低 10%,乳化沥青最佳用量降低 10%,最大干密度提高 1.021 倍;与马歇尔试件相比,垂直振动圆柱体试件马歇尔稳定度 M_S 、25 °C 劈裂强度、冻融劈裂强度分别提高 40%、32% 及 57%;通过疲劳方程的截距 a 和斜率 b 可看出,垂直振动法试件在高应力下抗疲劳性能和对应力变化的敏感性优于马歇尔法试件,即垂直振动法 a 值大于马歇尔法, b 值小于马歇尔法。

关键词:冷再生混合料;力学强度;马歇尔法;垂直振动法

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)05-050-09

Mechanical properties of emulsified asphalt cold recycling mixture with different forming methods

Yi Yong¹, JIANG Yingjun¹, TAN Yunpeng¹, HU Yonglin², CHEN Zhejiang³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. Jindong Highway Management Section, Jinhua 321000, Zhejiang, P. R. China; 3. Jinhua Highway Administration Bureau, Jinhua 321000, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the influence of different moulding methods on the mechanical properties of cold recycled emulsified asphalt mixture, the effects of vertical vibration method and traditional method on the mechanical properties of cold recycled asphalt mixture were studied by preparing Marshall specimens and cylinder specimens, and the fatigue equation was established by Weibull distribution. The results show that by the vertical vibration method, the optimal moisture content and optimal emulsified asphalt content of the mixture are reduced by 10% respectively, and the maximum dry density of the mixture are increased 1.021 times, compared with the mixture by the traditional method. Compared with Marshall Specimens, the Marshall stability M_S , 25 °C splitting strength and freeze-thaw splitting strength of vertical vibration cylinder specimens increase by 40%, 32% and 57% respectively. Through the intercept a and slope b of fatigue equation, it can be seen that the fatigue resistance and sensitivity of vertical vibration specimens to stress change under high stress are better than those of Marshall method specimens, that is,

收稿日期:2019-05-24 网络出版日期:2019-09-27

基金项目:浙江交通科技资助项目(2016-2-17)。

Supported by Zhejiang Transportation Science and Technology Project (2016-2-17).

作者简介:易勇(1995—),男,硕士研究生,主要从事道路工程研究,(E-mail) wsyysnb@163.com。

通讯作者:蒋应军,男,教授,博士生导师,主要从事道路工程研究,(E-mail) 2691287801@qq.com。

the value of a in the vertical vibration method is greater than that of Marshall method, and the value of b in the vertical vibration method is less than that of Marshall method.

Keywords: cold recycled mixture; mechanical strength; Marshall method; vertical vibration method

随着中国经济水平提高,不可再生能源的消耗越来越快,国家及地方越来越重视环境资源保护问题。近几年乳化沥青冷再生施工技术在节能、环保、便捷等方面的优势得到道路工作者的广泛关注^[1]。乳化沥青冷再生混合料是一种应用于面层、基层施工的道路材料^[2],在沥青路面结构中,冷再生混合料优良的力学性能是路面结构具有良好耐久性的保障^[3]。冷再生混合料力学性能的提升对路面使用性能和使用年限的改善具有正向作用。国内外道路工作者研究了冷再生混合料作为路面材料的可行性,并研究了其力学性能。国外, Babagoli 等^[4]研究了煤渣和灰渣粉等添加剂对冷再生混合料力学性能的影响,结果表明煤渣、灰渣粉作为添加剂掺入冷再生混合料中可提高其力学性能; Godenzoni 等^[5]就冷再生混合料级配与沥青含量两方面研究冷再生混合料疲劳性能,结果表明在一定范围内冷再生混合料的疲劳特性随旧集料掺量增加而增大、冷再生沥青含量增加而减小; Leandri 等^[6]通过室内试验分析了冷再生混合料粘弹特性和抗疲劳特性,并与传统热拌沥青混合料进行了比较,结果表明冷再生混合料疲劳特性有所降低,但其热敏性及对施工时间的依赖性得到显著降低。Li 等^[7]研究了水泥用量对冷再生混合料疲劳性能的影响,表明初始假定应变水平与冷再生混合料疲劳性能息息相关。国内,蒋应军等^[8]采用几种不同级配的冷再生混合料,并研究其力学性能和路用性能的变化规律,表明级配的改变对冷再生混合料的力学性能和路用性能都有显著影响,优化级配是提升其力学性能和路用性能的有效途径。李明欣等^[9]研究了新加沥青类型对高 RAP(reclaimed asphalt pavement)掺量冷再生混合料强度及疲劳特性的影响,结果表明选用合适标号沥青可有效改善冷再生混合料强度及疲劳特性。郝培文等^[10]研究了水泥对冷再生混合料强度影响机理,结果表明水泥产物与沥青胶浆混合可形成的立体网状结构,进而促使混合料力学性能显著提高。上述冷再生混合料的研究中,主要针对级配、外加剂和沥青标号与用量等方面研究力学性能的变化规律,鲜有报道成型方法的影响。文章基于垂直振动成型方法,对比垂直振动成型试件与马歇尔法成型试件的疲劳性能,研究成果可作为后续研究的理论基础,具有参考价值。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料及矿料级配

1.1.1 原材料

路面 RAP 铣刨料采用金华曹岭线 X115 县道路沥青路面回收集料, RAP 铣刨料筛分结果见表 1。乳化沥青采用 SBR 改性乳化沥青;新集料采用山西柳林石灰岩;水泥采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥。原材料各项技术性质均满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)的技术要求。

表 1 路面铣刨料 RAP 级配筛分结果

Table 1 Grading results of pavement milling material RAP

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.500	100.0	2.360	18.7
19.000	96.1	0.300	4.2
9.500	75.7	0.075	2.4
4.750	36.5		

1.1.2 矿料级配

乳化沥青冷再生混合料由新集料、RAP 集料组成,新集料掺量为 33%,由表 1 可知,铣刨料中粒径

2.36~9.5 mm 含量较高,达 57%。粗集料含量较少。这是由于沥青路面在铣刨过程中,部分粗集料被破碎,使得铣刨料与原路面相比粒径偏细^[11]。根据本课题组研究,优化出乳化沥青冷再生混合料级配。新集料掺量为 33%(9.5~19 mm 粗集料 20%,机制砂 10%,矿粉 3%);筛孔孔径为 26.50,19.00,16.00,9.50,4.75,2.36,0.30,0.075 mm 下,RAP 矿料的通过百分率分别为 100%,97.5%,91.7%,65.9%,47.4%,32.9%,10.5%,5%。

1.2 设计方法

1.2.1 传统试验方法

乳化沥青冷再生混合料传统方法是采用重型击实法确定最佳含水率,采用马歇尔法确定密度与乳化沥青最佳用量。重型击实法确定最佳含水率分 3 层击实,每层击实 98 次,落高 45 cm;马歇尔法试件成型,击实 50 次后,连同试模置于 60 °C 鼓风烘箱中养生至恒重(一般不少于 40 h),然后击实 25 次。

1.2.2 垂直振动法(VVTM, vertical vibration test method)

所采用的振动压实仪基本参数:工作频率 35 Hz、名义振幅 1.2 mm、上车系统质量 108 kg、下车系统质量 167 kg;采用垂直振动击实确定最大干密度和最佳含水率,振动成型时间 60 s;采用垂直振动成型直径 100 mm×高 63.5 mm 圆柱体试件,即 VVTM 试件,振动成型时间 60 s。

1.3 测试方法

1.3.1 劈裂试验方法

成型好的冷再生混合料试件放入恒温水浴箱中 15 °C 水浴 1 h,取出试件进行劈裂试验,试验过程按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中(T0716—2011)进行。

1.3.2 疲劳试验

研究^[12]表明,间接拉伸疲劳试验能较好地模拟实际路面荷载下路面内部应力状态,与路面钻芯取样试件对比更直观,且具有操作方便、结果稳定等特点,相比其他疲劳试验方法具有优越性,故本文采用圆柱体试件间接拉伸疲劳试验方法。动态伺服液压试验系统(UTM, university testing machine)与夹具及试件安装如图 1 和图 2 所示。

为使疲劳试验中试件应力变化与波形变化与行车荷载下路面接近,文中采用半正负正弦波荷载以应力控制模式加载。疲劳试验参数如下:加载频率为 10 Hz,加载时间间隔为 0,循环特征值(高低应力比) R 为 0.1,应力水平 S 分别为 0.3,0.4,0.5,0.6,0.7 等 5 种。

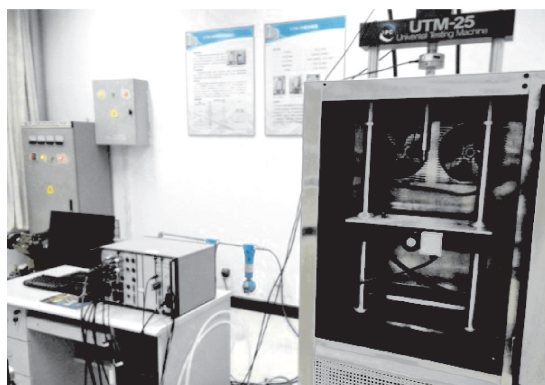
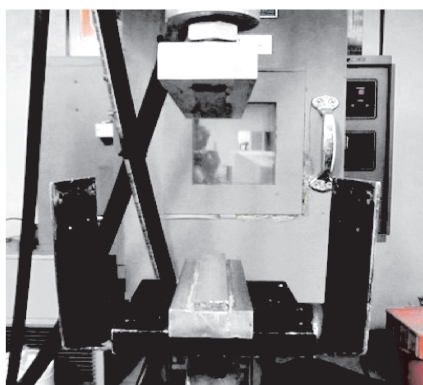


图 1 UTM 动态伺服液压试验系统

Fig. 1 UTM dynamic servo hydraulic test system



(a) 劈裂夹具图



(b) 试件安装图

图 2 疲劳试验夹具图

Fig. 2 Fatigue test fixture diagram

2 设计结果与对比

2.1 物理-力学指标设计结果

2种设计方法下,乳化沥青冷再生混合料物理-力学指标如表2所示。表中 θ_{OWC} 表示最佳含水率, ρ_{max} 表示最大干密度, C_{OEC} 表示最佳乳化沥青用量, M_{S} 表示未浸水马歇尔稳定度, M_{Sw} 表示浸水马歇尔稳定度, R_{Tw} 、 R_{T} 、 R_{T1} 、 R_{T2} 分别指湿劈裂强度、干劈裂强度、冻融劈裂强度和未冻融劈裂强度, $P_{\text{V}}/P_{\text{M}}$ 指VVTM试件与Marshall试件物理-力学性能比值。

表2 不同设计方法下试件物理-力学指标

Table 2 Physical-mechanical indices of specimens under different design methods

设计方法	$\theta_{\text{OWC}}/\%$	$\rho_{\text{max}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_{\text{OEC}}/\%$	M_{S}/kN	M_{Sw}/kN	R_{T}/MPa	R_{Tw}/MPa	R_{T1}/MPa	R_{T2}/MPa
传统方法	4.8	2.170	4.6	12.3	11.2	0.73	0.68	0.29	0.41
VVTM	4.3	2.220	4.2	17.2	15.9	0.96	0.92	0.45	0.61
$P_{\text{V}}/P_{\text{M}}$	0.90	1.02	0.91	1.40	1.42	1.32	1.35	1.55	1.49

根据表2可以得出,与传统方法相比,VVTM确定的乳化沥青再生混合料最佳含水率降低了10%,最佳乳化沥青用量降低约9%,最大干密度显著提高,为现行方法的1.02倍,即振动压实标准比重型压实标准提高1.02倍;直振动圆柱体试件马歇尔稳定度 M_{S} 、15℃劈裂强度、冻融劈裂强度较马歇尔法分别提高了40%、32%及57%。VVTM设计方法乳化沥青冷再生混合料的各项物理-力学指标均优于传统设计方法,因为采用VVTM进行试验时,会在试件内部生成振动压力波,导致试件从静止状态进入运动状态,集料颗粒间也变成动摩擦,从而减小集料颗粒间的摩擦系数,减小内摩擦阻力,降低剪切强度和抗压阻力,且运动状态的集料颗粒更容易达到充分密实状态,从而表现出物理-力学性能优于传统成型方法。

2.2 路用性能对比

2种设计方法下,乳化沥青冷再生混合料路用性能如表3所示。其中 D_{S} 表示动稳定度, τ_{d} 表示抗剪强度, R_{B} 表示弯拉强度, M_{S0} 表示残留马歇尔稳定度, $P_{\text{V}}/P_{\text{M}}$ 指VVTM试件与Marshall试件路用性能比值。

表3 不同设计方法下冷再生混合料路用性能

Table 3 Road performance of cold recycled mixtures under different design methods

设计方法	$D_{\text{S}}/(\text{次}\cdot\text{mm}^{-1})$	$\tau_{\text{d}}/\text{MPa}$	R_{B}/MPa	$M_{\text{S0}}/\%$
传统方法	1810	0.290	3.21	0.91
VVTM法	2670	0.335	3.89	0.92
$P_{\text{V}}/P_{\text{M}}$	1.48	1.16	1.21	1.01

根据表3可以得出,与马歇尔法设计结果相比,VVTM设计的乳化沥青冷再生混合料动稳定度可提高48%,抗剪强度提高16%,弯拉强度提高21%,残留马歇尔稳定度影响不大。这是由于VVTM设计的乳化沥青混合料在振动压力波的作用下,粗、细骨料得到充分的移动和排列,进而获得更为稳定的强骨架密实结构,混合料具有较高粘结力和内摩阻力。因此,VVTM设计的乳化沥青冷再生混合料路用性能优于马歇尔试验方法。

3 疲劳试验结果及分析

3.1 劈裂强度

劈裂强度试验结果见表4,其中 $P_{\text{V}}/P_{\text{M}}$ 表示VVTM试件与Marshall试件劈裂强度比值。

表 4 不同成型方式劈裂强度试验结果

Table 4 Test results of splitting strength of different moulding methods

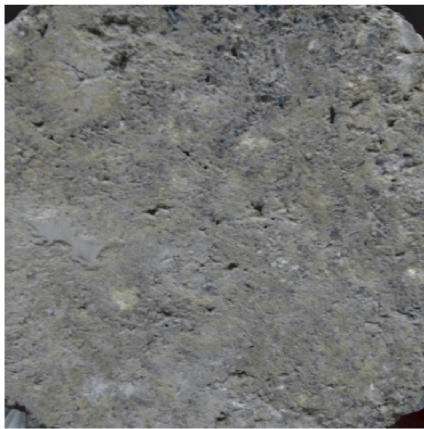
试验项目	不同方式成型试件		P_V / P_M
	马歇尔	VVTM	
劈裂强度/MPa	0.99	1.13	1.2

由表 4 可知, VVTM 试件的劈裂强度大于马歇尔试件, 是马歇尔试件劈裂强度的 1.20 倍。这主要是由于 VVTM 试件骨架结构更加密实, 混合料具有较高粘结力和内摩阻力, 使冷再生混合料的力学强度得到极大的提高^[13]。

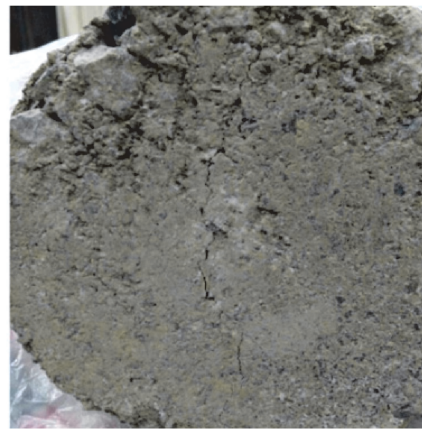
3.2 试件疲劳破坏过程

冷再生混合料疲劳破坏过程分为 6 个阶段:

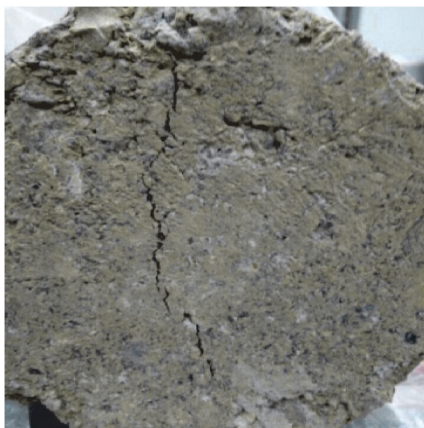
- 1) 完整应力阶段。试验开始时试件加载次数较少, 其表面未发生破坏, 整体结构也未出现裂纹及局部损伤。如图 3(a) 所示。
- 2) 裂纹萌生阶段。随着循环应力加载次数的增加, 试件底面中心位置处开始出现细微疲劳裂纹, 如图 3(b) 所示。
- 3) 裂纹缓慢扩展阶段。此阶段试件的裂纹沿径向、轴线逐渐延伸, 直至试件底部, 如图 3(c) 所示。
- 4) 裂纹迅速扩展阶段。此阶段试件承载力逐渐降低, 当承载力降低到一定程度时, 裂纹迅速扩展, 如图 3(d) 所示。
- 5) 裂纹贯通阶段。裂纹沿径向贯穿整个试件, 然后沿轴线迅速扩展, 如图 3(e) 所示。
- 6) 失稳破坏阶段。裂纹贯穿整个试件, 并完成疲劳试验, 如图 3(f) 所示。



(a) 完整应力阶段



(b) 裂纹萌生阶段



(c) 缓慢扩展



(d) 迅速扩展阶段

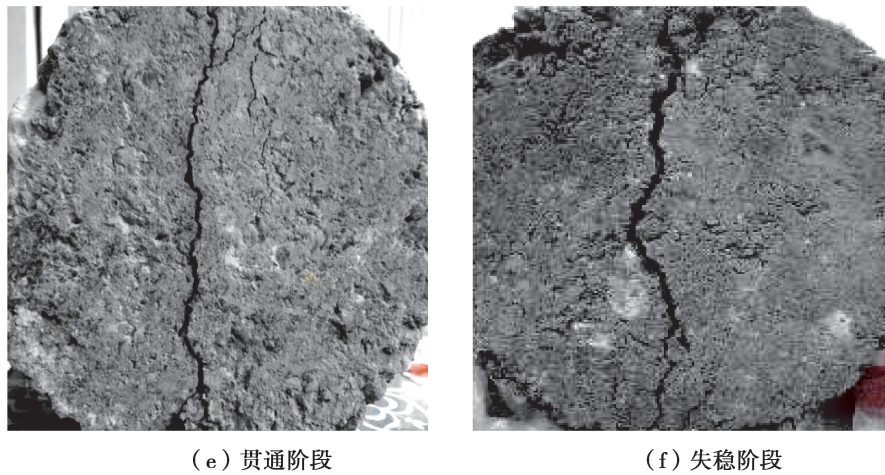


图 3 试件破坏过程

Fig. 3 Failure process of specimens

3.3 疲劳试验结果及分析

3.3.1 疲劳试验结果

疲劳试验结果见表 5 所示。

表 5 疲劳试验结果
Table 5 Fatigue test results

设计方法	下列应力水平 S 对应的疲劳寿命 N(次)				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
马歇尔	5 917	2 004	955	476	286
	6 653	2 506	1 064	558	316
	7 172	2 652	1 184	645	358
	8 025	2 864	1 360	705	389
	8 424	3310	1 455	759	415
VVTM	18 285	8 217	4 302	2 313	1 255
	19 946	8 757	4 567	2 648	1 452
	21 313	9 829	4 990	2 745	1 574
	21 860	10 174	5 307	2 958	1 670
	24 355	10 757	5 546	3 177	1 790

3.3.2 疲劳寿命预估模型

由表 5 可知,室内疲劳试验数据离散性较大,因此,采用数据统计方法进一步分析研究冷再生混合料的疲劳寿命规律。

假定疲劳寿命 N 和等效疲劳寿命 $\bar{N} (\bar{N} = N^{1-R})$ 均服从两参数 Weibull 分布,建立失效概率和疲劳寿命之间的对应关系。则失效概率 P 满足

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right], \tag{1}$$

$$\ln\ln \frac{1}{1-P} = \alpha \ln \bar{N} - \alpha \ln u, \tag{2}$$

式中: α 为形状参数; u 为尺度参数; n 为随机变量 N 的特征值。

根据式(2)和表 5 得到不同应力水平 S 对应的等效疲劳寿命 \bar{N} 的回归系数, 见表 6。

表 6 Weibull 分布检验结果
Table 6 Weibull distribution test results

设计方法	回归系数	下列应力水平 S 对应 N 的 Weibull 分布模型回归系数				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
马歇尔	α	7.330 3	4.741 1	5.088 1	4.722 6	5.396 5
	β	65.757 0	37.797 0	36.737 0	31.277 0	32.440 0
	R_2	0.989 1	0.976 0	0.980 9	0.992 8	0.994 8
VVTM	α	8.182 7	7.902 3	8.390 1	7.340 6	6.453 9
	β	81.917 0	72.837 0	71.785 0	58.598 0	47.814 0
	R_2	0.971 1	0.973 3	0.982 5	0.987 2	0.994 5

由表 6 可知, 在不同应力水平条件下, 不同新集料掺量下的冷再生混合料的线性回归相关性系数 R^2 均大于 0.95, $\ln \ln \frac{1}{1-P} \sim \alpha \ln N$ 呈现出良好的线性关系, 表明可用 Weibull 分布模型预估乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命。

将表 6 的回归系数代入式(2)中, 可得不同应力水平下乳化沥青混合料等效疲劳寿命 \bar{N} , 结果见表 7 所示。

表 7 不同失效概率下的等效疲劳寿命
Table 7 Equivalent fatigue life under different failure probabilities

设计方法	失效概率 $P/\%$	下列应力水平 S 对应的等效疲劳寿命 \bar{N}				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
马歇尔	5	5 247	1 550	762	401	235
	10	5 788	1 804	878	467	269
	20	6 412	2 113	1 018	547	309
	30	6 836	2 333	1 116	605	337
	40	7 179	2 516	1 198	652	360
	50	7 484	2 684	1 272	696	381
VVTM	5	15 491	6 914	3 648	1 955	1 041
	10	16 915	7 574	3 975	2 156	1 164
	20	18 540	8 328	4 347	2 388	1 308
	30	19 634	8 837	4 596	2 546	1 406
	40	20 515	9 248	4 798	2 674	1 487
	50	21 295	9 612	4 975	2 787	1 559

采用式(3)对表 7 数据进行回归分析, 求得不同失效概率下的疲劳方程回归系数和相关系数, 结果见表 8 所示, 其中 R^2 为相关系数。

$$\lg \bar{N} = a - b \lg \sigma, \quad (3)$$

式中: a 、 b 为方程待定回归系数; σ 为应力水平; N 为荷载作用下的等效疲劳寿命。

表 8 疲劳方程回归系数及相关系数

Table 8 Regression coefficient and correlation coefficient of fatigue equation

设计方法	系数	下列失效概率 p (%) 疲劳方程回归系数和相关系数					
		5	10	20	30	40	50
马歇尔	a	1.796 4	1.867 9	1.942 5	1.989 1	2.024 7	2.055 1
	b	3.618 9	3.579 2	3.537 8	3.512 0	3.492 2	3.475 3
	R^2	0.997 0	0.998 2	0.999 1	0.999 4	0.999 5	0.999 5
垂直振动	a	2.575 2	2.623 9	2.674 7	2.706 5	2.730 8	2.751 5
	b	3.143 3	3.119 7	3.095 1	3.079 7	3.068 0	3.058 0
	R^2	0.994 1	0.994 9	0.995 7	0.996 1	0.996 5	0.996 7

冷再生混合料疲劳方程式(3)中的回归系数 a 越大,表征应力作用下材料抗疲劳性能越好;回归系数 b 越小,表征材料对应力变化越不敏感,材料的抗疲劳性能越好^[14-15]。

根据表 8 绘制不同成型方式,在 5% 和 50% 失效概率下的疲劳特性曲线,如图 4 所示。

结合表 7 及图 4 可知:

1) 不同成型方法及失效概率下, $\lg \sigma$ 随 $\lg N$ 均呈线性变化趋势,相关性系数 R^2 均大于 0.90,且不同成型方法对冷再生混合料的疲劳性能影响显著。

2) 对比分析失效概率为 5% 及 50% 时 VVTM 试件下的疲劳预估寿命曲线可知,在不同失效概率下乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命存在较大差异,当失效概率由 5% 增大为 50% 时,混合料的疲劳寿命显著增大,在进行混合料疲劳寿命分析时,应根据实际情况确定合适的失效概率进行评价。

3) 在不同失效概率下,VVTM 试件疲劳曲线的回归系数 a 取值均最大, b 取值均最小,说明 VVTM 设计冷再生混合料的疲劳特性良好,对应力变化敏感性良好,具有一定的抗疲劳优势。这是由于 VVTM 成型试件时,在振动压力波作用下,不同公称粒径间的集料更容易相互错动滑移,粗、细骨料更容易相互靠拢,以致达到紧密接触状态,形成密实的后期结构,试件疲劳特性与混合料结构密切相关^[7-8,13,16],因此,VVTM 设计冷再生混合料疲劳特性优于马歇尔法。

综上,VVTM 振动压实方式比 Marshall 击实方式更加合理,且有利于提高乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能。

4 结 论

1) 与马歇尔设计的乳化沥青冷再生混合料相比,VVTM 设计的冷最佳含水率降低约 10%,乳化沥青最佳用量降低约 10%,最大干密度提高约 1.021 倍,与马歇尔试件相比,VVTM 试件的马歇尔稳定度、劈裂强度、冻融劈裂强度分别至少提高 40%,32% 和 57%。

2) 乳化沥青冷再生混合料劈裂寿命服从双参数 Weibull 分布,建立的不同成型方式下的乳化沥青冷再生混合料疲劳方程能够较为准确地反映乳化沥青冷再生混合料劈裂寿命。

3) 不同失效概率下,VVTM 乳化沥青冷再生混合料在应力作用下抗疲劳性能及对应力变化敏感性优于马歇尔法,主要体现在 VVTM 成型试件的疲劳方程的截距 a 值均大于马歇尔法,而斜率 b 值正好相反。

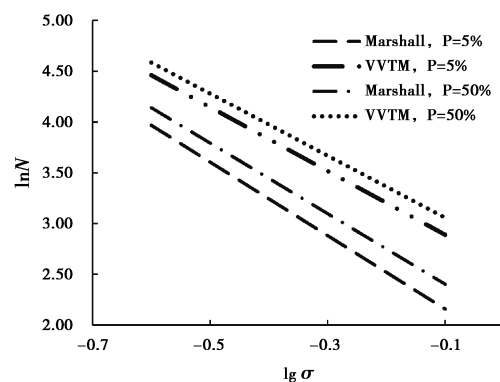


图 4 不同成型方法及失效概率下的疲劳特性曲线
Fig. 4 Fatigue characteristic curves under different forming methods and failure probabilities

参考文献:

- [1] 王宏. 全深式水泥稳定就地冷再生基层应用与耐久性能评价[J]. 公路, 2019, 64(6): 1-8.
Wang H. Application and durability evaluation of full-depth cement stabilized in-situ cold recycling base [J]. Highway, 2019, 64(6): 1-8. (in Chinese)
- [2] Cheng H L, Sun L J, Liu L P, et al. Fatigue characteristics of in-service cold recycling mixture with asphalt emulsion and HMA mixture[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 704-714.
- [3] Lin J T, Hong J X, Xiao Y. Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 337-344.
- [4] Babagoli R, Ameli A, Shahriari H. Laboratory evaluation of rutting performance of cold recycling asphalt mixtures containing SBS modified asphalt emulsion[J]. Petroleum Science and Technology, 2016, 34(4): 309-313.
- [5] Godenzoni C, Graziani A, Perraton D. Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(1): 130-150.
- [6] Leandri P, Losa M, di Natale A. Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 275-282.
- [7] Li Q, Wang Z B, Li Y L, et al. Cold recycling of lime-fly ash stabilized macadam mixtures as pavement bases and subbases[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 306-314.
- [8] 蒋应军, 韩占闯. 级配对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(6): 607-614.
Jiang Y J, Han Z C. Influence of gradation on pavement performance of emulsified asphalt cold regenerated mixture[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(6): 607-614. (in Chinese)
- [9] 李明欣, 王选仓. 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[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 9-15.
Li M X, Wang X C. Influence of new added asphalt grade on strength and fatigue performance of high percentage of RAP mixtures[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2017, 37(3): 9-15. (in Chinese)
- [10] 郝培文, 蒋鹤, 王宏, 等. 水泥对泡沫沥青冷再生混合料强度影响机理[J]. 功能材料, 2016, 47(3): 90-96.
Hao P W, Jiang H, Wang H, et al. Influence mechanism of cement on the strength of foamed asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(3): 90-96. (in Chinese)
- [11] 张明杰, 祁文洋. 铣刨工艺对 RAP 变异性和级配的影响[J]. 石油沥青, 2016, 30(4): 12-17.
Zhang M J, Qi W Y. Milling process effects on the variability and gradation of RAP[J]. Petroleum Asphalt, 2016, 30(4): 12-17. (in Chinese)
- [12] 马泽欣, 刘黎萍, 孙立军. 基于加速加载的在役沥青混合料损伤与疲劳性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 384-391.
Ma Z X, Liu L P, Sun L J. Damage and failure performance of in-service asphalt mixture based on accelerated loading test[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 384-391. (in Chinese)
- [13] 薛金顺, 蒋应军, 陈豫, 等. 垂直振动压实 SRX 稳定碎石力学性能影响因素研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1387-1392, 1429.
Xue J S, Jiang Y J, Chen Y, et al. Influence factors of mechanical property of SRX stabilized crushed stone base on vertical vibration test method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1387-1392, 1429. (in Chinese)
- [14] 蒋应军, 赵占林, 李明杰. 两种方法设计沥青混合料的疲劳特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 473-478.
Jiang Y J, Zhao Z L, Li M J. Fatigue characteristics of asphalt mixture designed by two methods[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 473-478. (in Chinese)
- [15] Jiang Y J, Liu H P, Xue J S. Fatigue performance of vertical vibration compacted cement-stabilized recycled pavement materials[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(5): 2251-2264.
- [16] Jiang Y J, Deng C Q, Xue J S, et al. Investigation of the fatigue properties of asphalt mixture designed using vertical vibration method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018: 1-16.