

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.09.060

不同压实方法对乳化沥青冷再生混合料 疲劳性能的影响研究

袁杰豪

(珠海香海大桥有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 不同压实成型方法制备的乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能存在较大差异,通过采用改进的马歇尔击实法和垂直振动压实法制备两种乳化沥青冷再生混合料,进一步对乳化沥青冷再生混合料进行间接拉伸疲劳试验,在试验结果基础上建立基于 Weibull 分布的间接拉伸疲劳方程,对不同压实成型方法的疲劳方程参数进行分析研究,探索不同压实成型方法对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响。试验结果表明,垂直振动压实法制备乳化沥青冷再生混合料的平均力学强度可达到现场取芯试件的 92%,而改进的马歇尔击实成型试件的平均力学强度仅为现场取芯的 65%;与改进的马歇尔击实法相比,垂直振动压实法的最佳乳化沥青掺量和外掺水量分别降低了 9%和 11%,同时抗水损害性能、低温抗裂性能和高温抗车辙性能可分别提高 4%、12%和 35%;基于 Weibull 分布建立的疲劳方程可有效评价乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命,垂直振动压实法制备的乳化沥青冷再生混合料表现出良好的应力变化敏感性和疲劳耐久性,其在应力比为 0.5 时的疲劳寿命是改进马歇尔击实法的 1.36 倍。

关键词: 改进马歇尔击实法;垂直振动压实法;乳化沥青;冷再生混合料;疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)09-0256-05

0 引言

近年来,沥青路面再生因显著的社会效益、经济效益和环保效益而在世界范围内得到快速发展^[1],同时也成为国内外学者重点研究的方向^[2]。乳化沥青冷再生混合料的应用是铣刨料(RAP)回收利用的重要途径之一,在节能环保和施工方便等方面表现突出,所以在公路养护工程中具有很好的技术和市场前景^[3]。

随着经济社会的快速发展,沥青路面面临的交通量和轴载也不断增加。在荷载不断累积的情况下,疲劳开裂是沥青路面病害的主要表现形式。而沥青混合料疲劳性能的优劣是影响疲劳开裂的关键因素,因此对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的研究是一项非常重要的工作^[3]。2012年,Ameri等^[4]在评价高RAP掺量再生沥青混合料疲劳性能时发现,RAP从0%增加到40%时,其疲劳寿命不断增加。2013年,华南理工大学的周源^[5]在研究报告中指出,添加水泥可提高乳化沥青冷再生混合料的强度,但疲劳性能会有一定程度减弱,2%水泥掺量时可兼顾

强度和疲劳性能。这时水泥引发的冷再生混合料的脆性性质未表现出来。2015年,王之怡等^[6]采用应变控制模式进行乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的研究。他采用击实试验和劈裂试验分别确定最佳外掺水量和乳化沥青用量,在合理应变水平下拟合劲度模量-荷载作用次数关系曲线,预估得出RAP掺量为100%时的疲劳寿命大于掺量为80%时的疲劳寿命,进一步提出不同等级交通下的应变控制指标。2016年,长安大学的汪德才等^[7]采用应力控制模式下的间接拉伸疲劳试验分析不同因素对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响规律,基于灰关联熵分析方法对各因素的不同影响结果进行量化比较。试验结果显示,乳化沥青蒸发残留物针入度和RAP掺量为疲劳性能最关键影响因素,乳化沥青掺量及蒸发残留物延度影响次之,试验时应力水平和水泥用量影响最小。同年,Gao等^[8]利用数字图像相关技术研究了冷再生混合物的疲劳行为,与热拌沥青混合料相比,冷再生沥青混合料在较低应力水平下具有更长的疲劳寿命和更大的破坏拉伸应变。2017年,同济大学的孙立军等^[9]针对服役多年和室内新成型的乳化沥青冷再生混合料进行应力控制下的劈裂疲劳试验,分析其劲度模量衰变特征和疲劳破坏阶段的黏弹性特征,进一步提出了两种

收稿日期: 2022-11-26

作者简介: 袁杰豪(1989—),男,硕士,工程师,从事公路与桥梁技术管理工作。

混合料的疲劳破坏准则。试验数据表明,轴载次数增加可降低剩余疲劳寿命,乳化沥青冷再生混合料在服役初始存在一个疲劳性能增长的过程。2019年,王清等^[10]采用添加改性剂、布敦岩沥青、SBR胶乳3种方式欲提高乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能,得到5种不同失效概率下的疲劳方程,对比发现添加再生剂和SBR胶乳后,疲劳耐久性均显著提高,且再生剂提升效果略胜一筹。基于上述材料改性的思路,孙建秀等^[11]在冷再生混合料中加入不同种类纤维,研究结论显示不同种类纤维对疲劳性能的贡献程度差异较大,聚酯纤维>聚丙烯纤维>聚丙烯腈纤维>无纤维>玄武岩纤维>木质素纤维。长安大学的吕政桦等^[12]基于BP神经网络模型结合遗传算法计算出乳化沥青冷再生混合料中各组成材料的最佳配比,建立的材料掺量-应力水平模型显示高应力比下疲劳性能随各材料掺量呈正相关,最后通过微观形貌测试及元素分析得出抗疲劳开裂的机理。

上述研究中对于乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的研究均是从材料组成比例、改性剂种类、室内试验方法等方面展开,但是成型方式对疲劳性能的影响研究探索较少。根据已有研究成果可知,目前主流的压实成型方式包括改进的马歇尔击实法、旋转压实法、垂直振动压实法。改进的马歇尔击实法明显落后于交通发展,且与现场实际压实相关性较差。旋转压实法制备的试件虽与现场芯样较一致,但试验成本高且装置难推广^[13]。垂直振动压实法是对振动压路机的良好模拟,且设备制造和使用较为经济。本研究旨在通过改进的马歇尔击实法和垂直振动压实法制备乳化沥青冷再生混合料试件,并与现场芯样的力学特性和疲劳性能进行对比分析,建立了间接拉伸疲劳方程,探索压实方式对疲劳性能的影响。

1 原材料与试件制备

1.1 原材料

本研究中乳化沥青冷再生混合料使用的黏结材料为SBR胶乳改性的乳化沥青,其技术指标见表1,符合《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)的要求。RAP取自当地某干线公路下面层,对其进行抽提试验,测得RAP中纯沥青含量为3.6%,对剩余集料进行筛分,集料级配见表2。新添加的粗细集料和矿粉由当地石灰岩矿料生产。经检验,其物理和力学性能指标合格,洁净程度满足要求。

表1 SBR改性乳化沥青技术指标

性能指标	测试结果	技术标准	
破乳速度	慢裂	—	
恩格拉黏度 E25	10.2	2~30	
蒸发残留物含量	62	≥60	
蒸发残留物	针入度(25℃)/0.1 mm	61	50~300
	延度(15℃)/cm	—	≥40
	溶解度 /%	98.3	≥97.5
储存稳定性	1 d /%	3.7	≤1
	5 d /%	0.5	≤5

表2 抽提后 RAP 集料级配

筛孔尺寸 /mm	通过率 /%	筛孔尺寸 /mm	通过率 /%
26.5	100	2.36	44.2
19	98.4	1.18	31.9
16	95.5	0.6	20.6
13.2	86.9	0.3	15.4
9.5	76.2	0.15	10.4
4.75	59.7	0.075	6.8

1.2 目标级配

乳化沥青冷再生混合料的目标级配见表3。根据目标级配进行配合比设计,混合料中各组成材料的比例分别为:RAP80%、19-26.5新集料14%、机制砂3%、矿粉3%。

表3 目标级配

筛孔尺寸 /mm	通过率 /%	筛孔尺寸 /mm	通过率 /%
31.5	100	4.75	76.2
26.5	98.4	2.36	59.7
19	95.5	0.3	9.1
9.5	86.9	0.075	3.9

1.3 试件制备

对于乳化沥青冷再生混合料的室内试验,其试件制备并没有标准规范的方法。目前国内常用的是重锤击实法和改进的马歇尔击实法。通常由重锤击实法的最大干密度确定最佳含水率,由改进的马歇尔击实法的浸水前后间接拉伸强度确定最佳乳化沥青用量。垂直振动压实法的最佳含水量由其最大干密度确定,最佳乳化沥青用量由其浸水前后间接拉伸强度确定,与国内常用方法相比,操作简单,试验误差较小。

本研究采用改进的马歇尔击实法和垂直振动压实法。这两种试件制备方法流程如图1所示。对于改进的马歇尔击实法,首先双面击实50次,然后不脱模的情况下置于60℃环境箱中直至恒重。接着再次双面击实25次,最后将试件冷却12h后脱模。对于

垂直振动压实法,首先在垂直振动状态下对混合料进行压实,然后在60℃环境箱中放置48h,最后同样冷却12h后脱模。垂直振动压实法的振动频率为35 Hz,振幅为1.2 mm。

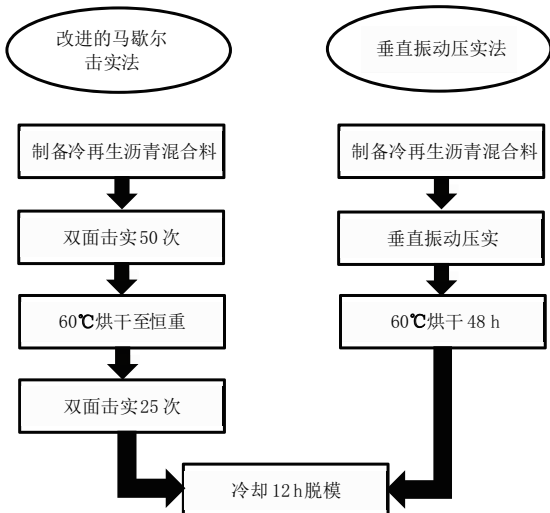


图1 试件制备方法流程

2 试验方法

2.1 间接拉伸强度试验

间接拉伸强度能表征乳化沥青冷再生混合料的抗疲劳开裂能力。其可通过万能试验机 UTM 测定。将成型好的试件在15℃水浴中浸泡1.5h后测定间接拉伸强度。浸水间接拉伸强度指标是将试件在25℃水浴中浸泡23h,再调至15℃浸泡1h后测定。间接拉伸强度试验装置如图2所示。



图2 间接拉伸强度试验装置

2.2 间接拉伸疲劳试验

成型圆柱形试件时的受力状态与路面实际施工时的应力状况相似,且圆柱形试件成型方便,所以本研究基于圆柱形试件进行间接拉伸疲劳试验。为保证试验较强的再现性、可靠的精准度和清晰的疲劳

失效准则,疲劳试验采用应力控制模式,测定不同应力比条件下的疲劳寿命。间接拉伸疲劳试验参数设定见表4。

表4 间接拉伸疲劳试验参数

参数类型	具体参数
控制模式	应力控制
应力比	0.3、0.4、0.5、0.6、0.7
加载频率 / Hz	10
试验温度 / °C	15
加载波形	半矢量正弦波

除上述间接拉伸强度试验和疲劳试验外,本研究还涉及沥青混合料弯曲试验、车辙试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验等。抗弯拉强度(R_B)和最大弯拉应变(ϵ_B)反映了混合料低温抗裂性能,动稳定度(DS)可表征高温抗车辙能力,冻融劈裂强度比(TSR)和浸水残留稳定度(MS_0)用于评价水稳定性。各指标严格按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行测定。

3 试验结果分析

3.1 成型方法可靠性评价

评价试件成型方法可靠性的关键在于,分析其能否充分模拟实际压实成型条件和效果。物理和力学性能是乳化沥青冷再生混合料的基本性能,是材料组合设计和施工质量控制的基本指标。所以,对改进的马歇尔击实法、垂直振动压实法、施工现场取芯等得到的试件进行物理和力学性能对比,以评价上述成型方法的可靠性。乳化沥青冷再生混合料的物理和力学性能指标见表5。其中, VV 为空隙体积, MS 为马歇尔稳定度, MS_1 为浸水马歇尔稳定度, R 为劈裂强度, R_1 为冻融劈裂强度, R_c 为抗压强度, K_1 为改进马歇尔击实成型试件性能指标与现场取芯试件性能指标的比值, K_2 为垂直振动压实成型试件性能指标与现场取芯试件性能指标的比值。

表5 不同成型方法试件的物理和力学性能指标

性能指标	改进马歇尔击实成型试件	垂直振动压实成型试件	现场取芯试件	K_1	K_2
$VV/\%$	11.2	10.6	10.2	—	—
MS/kN	9.6	13.8	14.7	0.65	0.94
MS_1/kN	8.3	12.4	13.4	0.62	0.93
R/MPa	0.67	0.89	0.97	0.69	0.92
R_1/MPa	0.53	0.76	0.85	0.62	0.89
R_c/MPa	0.98	1.36	1.47	0.66	0.93

由表 5 中的试验数据可知,垂直振动压实成型试件的物理和力学性能指标与现场取芯的比值最小为 0.89,而改进马歇尔击实成型试件的物理和力学性能指标与现场取芯的比值最大为 0.69,明显得出垂直振动压实成型试件更接近现场取芯试件,能很好地模拟实际现场施工情况,即采用垂直振动压实法成型乳化沥青冷再生混合料可靠性较高。

然后固定乳化沥青的掺量为 4%,分别添加 3.5%、4%、4.5%、5%、5.5%的水制备混合料,采用改性马歇尔击实和垂直振动压实成型试件,以最大干密度对应的含水量为最佳掺水量。接着固定最佳外掺水量,分别添加 3%、3.5%、4%、4.5%、5%的乳化沥青成型试件,以劈裂强度和冻融劈裂强度确定最佳乳化沥青用量。不同成型方法最大干密度、最佳外掺水量、最佳乳化沥青用量等见表 6。在此基础上进行低温抗裂、高温抗车辙、水稳定性等路用性能对比分析,试验结果见表 7。

表 6 不同成型方法试件的物理性能指标

成型方法	最大干密度 $\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最佳外 掺水量 /%	最佳乳化 沥青用量 /%	成型后 含水量 /%
改进马歇尔 击实法	2.168	4.6	4.82	4.30
垂直振动压 实法	2.221	4.2	4.31	4.21

表 7 不同成型方法试件的物理和力学性能指标

成型方法	$R_B /$ MPa	$\epsilon_B /$ $(\mu\epsilon \times 10^{-6})$	$DS /$ $(\text{次}\cdot\text{mm}^{-1})$	$MS_0 / \%$	$TSR / \%$
改进马歇尔 击实法	2.4	1284	2426	88.9	72.1
垂直振动 压实法	3.2	1430	3257	93.2	75.2

由表 7 试验数据计算得出垂直振动压实法的 R_B 、 ϵ_B 、 DS 、 MS_0 、 TSR 等各指标相对于改进马歇尔击实法分别提高 33%、11%、34%、5%、4%,即垂直振动压实的乳化沥青冷再生混合料的高温抗车辙性能和低温抗裂性能较改进马歇尔击实法提高 34% 和 11%,同时水稳定性也表现出一定优势。这是由于两种成型方法的原理不同,垂直振动压实法能使混合料形成稳定且致密的骨架结构,各项性能表现优异。

3.2 间接拉伸强度试验结果

对改进马歇尔击实和垂直振动压实两种方法成型的冷再生试件进行间接拉伸强度试验,试验结果如图 3 所示。

通过垂直振动压实法成型的试件,相比于改进的马歇尔击实法成型的试件,间接拉伸强度及变异

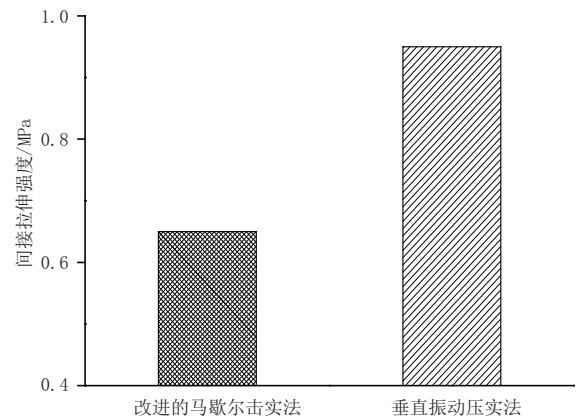


图 3 不同成型方法的间接拉伸强度试验结果

系数可分别提高 46% 和 23%。所以,垂直振动压实法在抗裂方面表现积极,且试验数据的稳定性好。

3.3 疲劳性能试验结果

根据 2.2 节的试验方案进行疲劳试验,但由于在试验方法、环境条件、试件均匀性等方面存在不同程度的离散型,导致疲劳寿命试验数据存在离散型。为避免或尽量消除离散型带来的试验不准确性,本研究采用 Weibull 模型数理统计方法对试验数据进行处理。数据处理步骤如下:

(1) 假设等效疲劳寿命 N 符合 Weibull 分布,则失效概率 P 满足式(1)。

(2) 对式(1)进行对数转换得到式(2)。

(3) 将疲劳寿命试验数据代入式(2),得到形状参数 m_0 、比例参数 ξ ,具体见表 8。将得到的参数反代入到式(2)中,得到不同失效概率下(5%、50%)各应力比的疲劳寿命(见表 9)。

表 8 不同成型方法试件的 Weibull 模型参数

应力比	改进的马歇尔击实法		垂直振动压实法	
	m_0	$\ln \xi$	m_0	$\ln \xi$
0.3	5.336	52.921	8.187	81.179
0.4	5.172	46.787	7.903	72.378
0.5	4.148	34.267	8.391	71.857
0.6	3.566	27.117	7.346	58.859
0.7	4.363	29.580	6.459	47.481

表 9 不同成型方法试件和失效概率的疲劳寿命

成型方法	失效 概率	应力比				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
改进马歇尔 击实法	5%	11 510	4 613	1 795	849	445
	50%	18 832	7 736	3 468	1 693	819
垂直振动 压实法	5%	15 372	6 802	3 567	1 874	996
	50%	21 174	9 504	4 883	2 695	1 488

$$P = F(N_{等}) = 1 - \exp\left(-\frac{N_{等}^m}{\xi}\right) \quad (1)$$

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = m_0 \ln N_{等} \ln \xi \quad (2)$$

将疲劳寿命试验结果代入到 $S-N$ 疲劳方程, 然后对应力比 t 和疲劳寿命 N_f 进行双对数回归, 可得到一条线性的函数关系曲线, 如式(3)所示。疲劳方程中的斜率 n 越大, 疲劳寿命随应力比的变化越敏感; K 值越大, 其所代表的疲劳方程曲线的截距也就越大, 疲劳耐久性更好。

$$\lg N_f = \lg K - n \lg t \quad (3)$$

由表 9 和图 4 可知, 在相同失效概率下, 垂直振动压实法成型试件的疲劳曲线 K 值均大于改进马歇尔击实成型试件, 而斜率 n 值正好相反, 这就充分说明垂直振动压实法成型的试件疲劳性能表现优异。这是由于垂直振动时产生的振动压力使集料从相对静态变成相对动态, 这一过程能克服部分内摩阻力, 使集料互相连接, 形成致密骨架结构, 因此垂直振动压实成型试件表现出较强的路用性能和疲劳性能。垂直振动压实法更适用于乳化沥青冷再生混合料的成型压实。

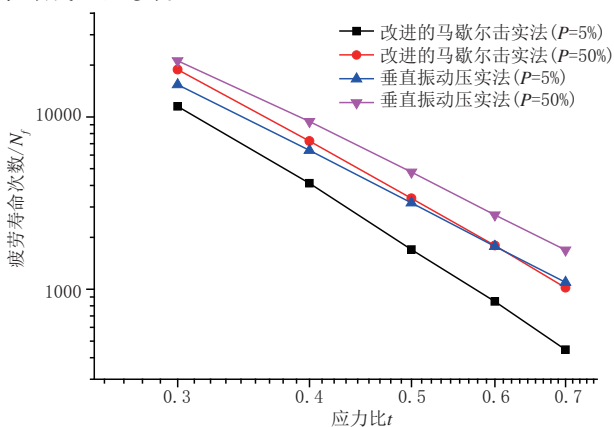


图 4 不同成型方法的间接拉伸疲劳曲线

4 结 语

(1)垂直振动压实成型试件的物理和力学性能指标与现场取芯的比值最小为 0.89, 而改进马歇尔击实成型试件的物理和力学性能指标与现场取芯的比值最大为 0.69, 表明垂直振动压实成型试件更接近现场取芯试件。

(2)垂直振动压实成型试件相比于改进马歇尔击实成型试件, 其最佳外掺水量少 8.7%, 最佳乳化沥青用量少 10.6%, 低温抗裂能力高 11%, 高温抗车辙能力高 34%, 即垂直振动压实成型试件可在较低的沥青用量下达到较好的性能。

(3)乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命服从 Weibull 分布, 垂直振动压实法成型的试件具有更长的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] YANAN LI; YUCHAO LYV; LIANG FAN, et al. Effects of Cement and Emulsified Asphalt on Properties of Mastics and 100% Cold Recycled Asphalt Mixtures[J]. Materials, 2019, 12(5): 754.
- [2] OUYANG J. Effect of cement on the demulsifying behavior of over-stabilized asphalt emulsion during mixing [J]. Constr Build Mater, 2018, 177: 252-260.
- [3] GEORGIU P. Evaluation of the effects of gyratory and field compaction on asphalt mix internal structure [J]. Mater Struct, 2016, 49: 665-676.
- [4] AMERI M. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates [J]. Constr Build Mater, 2012, 26: 475-480.
- [5] 周源. 水泥含量对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 226-229.
- [6] 王之怡, 郝培文, 柳浩, 等. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 28-32.
- [7] 汪德才, 郝培文, 魏新来. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(4): 541-546.
- [8] GAO L. Evaluation of fatigue behavior in cold recycled mixture using digital image correlation method [J]. Constr Build Mater, 2016, 102: 393-402.
- [9] 孙立军, 程怀磊, 刘黎萍, 等. 在役乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 1648-1654.
- [10] 王清, 汪德才, 都敬丽. 不同改性方式对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36: 44-48.
- [11] 孙建秀, 刘黎萍, 孙立军. 纤维对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(1): 97-101.
- [12] 吕政桦, 申爱琴, 李悦, 等. 基于遗传优化的乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能及机理研究[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 2704-2709.
- [13] JIANG Y. An experimental investigation of optimal asphalt - aggregate ratio for different compaction methods [J]. Constr Build Mater, 2015, 91: 111-115.