

在役乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能

孙立军, 程怀磊, 刘黎萍, 曹巍

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过应力控制下的劈裂疲劳试验, 分析了现场服役多年的乳化沥青冷再生混合料及室内新成型的乳化沥青冷再生混合料劲度模量衰减特征以及 2 类混合料疲劳破坏阶段的黏弹性特征; 结合损伤分析, 提出了在役冷再生沥青混合料和新成型冷再生混合料疲劳破坏准则; 对比了不同车道的在役冷再生混合料和新成型冷再生混合料的疲劳寿命, 结果表明, 现场实际轴载作用次数的增加会导致冷再生混合料剩余疲劳寿命的降低, 冷再生混合料在使用中存在疲劳性能增长过程。

关键词: 乳化沥青; 冷再生混合料; 劲度模量; 疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Fatigue Characteristics of In-situ Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixtures

SUN Lijun, CHENG Hualei, LIU Liping, CAO Wei

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The splitting fatigue test was conducted on in-situ emulsified asphalt cold recycled (EACR) mixture to inspect its attenuation characteristics of stiffness modulus as well as viscoelastic properties. The laboratory new-processing EACR mixture was also tested for comparison. The failure criterions of two kinds of EACR mixtures were established based on fatigue testing results using damage mechanics theory. Moreover, Fatigue testing results indicate that more traffic loads will lead to more reduction in fatigue life of in-situ EACR mixture and the fatigue life EACR mixture improves after being placed in service.

Key words: emulsified asphalt; cold recycled mixtures; stiffness modulus; fatigue characteristics

和乳化沥青, 重新拌和, 形成的符合路用性能要求的一种沥青混合料^[1]. 乳化沥青冷再生混合料越来越频繁应用于旧路大修中, 形成了一种新型的路面结构组合形式。

在这种路面结构中, 沥青路面的疲劳破坏同样是一种重要的破坏方式, 而乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能对结构的疲劳具有重要影响, 研究乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能对于分析这种影响具有重要的意义. 许多学者^[2-4]对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能进行了研究, 但主要针对室内新成型的冷再生混合料, 对现场服役多年的冷再生混合料的疲劳性能没有进行专门研究。

冷再生混合料在服役多年后, 在行车荷载和环境的作用下, 材料性能发生变化, 与新成型的混合料相比, 其疲劳性能可能会发生较大的变化. 本文对从现场取回的在役乳化沥青冷再生混合料进行劈裂疲劳试验, 分析其疲劳破坏特点, 并与室内新成型的冷再生混合料进行对比, 以更好地了解冷再生混合料承受实际轴载作用后的疲劳性能, 为冷再生混合料的研究和应用提供参考。

1 试验材料与试验方法

1.1 试件准备

用于试验研究的试件分为两部分, 一部分为取自昌九高速公路冷再生层的在役乳化沥青冷再生混合料试件, 另一部分是按照昌九高速冷再生层的用料和级配在室内新成型的试件。

昌九高速公路双向四车道, 连接南昌和九江两市. 在 2006 年, 昌九高速大修, 接近 100 km 路段使用了厂拌冷再生技术, 这是在国内第一次将乳化沥青冷再生混合料大范围铺筑在高速公路沥青路面结构的高层位, 现场路面结构及取芯位置如图 1 所示。

乳化沥青冷再生混合料是指将需要维修的沥青路面, 经过铣刨、回收、破碎、筛分, 适当添加新集料

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51678443); 江西省交通厅项目(2014C00015)

第一作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面工程、道路与机场设施管理。

E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

所研究的在役乳化沥青混合料试件钻取自自行车道和超车道,取芯位置为轮迹带正下方。



图 1 昌九高速公路路面结构及取芯位置

Fig. 1 Pavement structure and core positions of Changjiu highway

现场钻取芯样直径为 $100\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$, 将取回的芯样切割成高度为 4 cm 的试件, 进行劈裂疲劳试验。

为了与现场在役冷再生混合料形成对比, 本文在室内新成型了乳化沥青冷再生混合料, 新成型冷再生混合料室内成型试件采用与昌九高速公路冷再生层相同的材料, 包括相同的废旧沥青混合料 (RAP), 相同的乳化沥青、水泥和矿粉, 所使用的乳化沥青检测性能如表 1 所示。

表 1 乳化沥青性能检测结果

Tab. 1 Emulsified asphalt performance indicators

性能指标	单位	技术要求	试验结果
破乳速度		慢裂或中裂	慢裂
离子电荷		阳离子(+)	阳离子
筛上残留物质量分数 (1.18 mm)	%	≤ 0.1	接近零
残留分质量 分数	%	≥ 50	62.0
蒸发 残留物			
溶解度	%	≥ 97.5	98.4
针入度 (25 °C)	0.1 mm	50~300	64.3
延度(15 °C)	cm	≥ 40	78
与粗集料黏附性、 裹覆面积		$\geq 2/3$	满足
与粗、细集料拌合试验		均匀	均匀
常温储存 稳定性	1 d 5 d	≤ 1 ≤ 5	0.41 2.65

级配设计上不断调整筛分好的粗、中、细 3 档 RAP 掺配比例, 使室内新成型冷再生混合料级配与现场冷再生料一致, 两者级对比如图 2 所示。

在新成型冷再生混合料中, 水泥质量分数取 2%, 不计入级配; 最佳含水率 (OWC) 按照规范推荐的击实试验确定为 3.8%; 乳化沥青用量 (OEC) 与现场冷再生料相同, 为 3%; 成型方法上考虑了现场冷

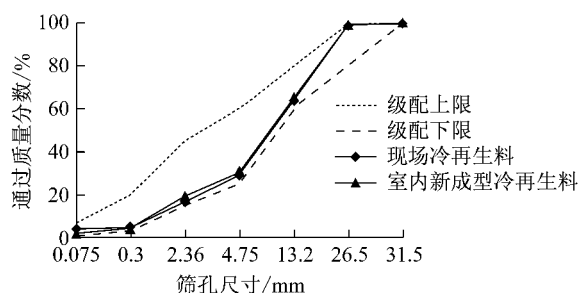


图 2 室内新成型冷再生料与现场冷再生料级对比

Fig. 2 Gradation comparison of in-situ and new-processing EACR mixture

再生料铺筑过程中的“二次压实”原理^[5], 成型过程按照许严^[6]提出的制作乳化沥青冷再生混合料马歇尔试件的拌和、养生和成型方法, 成型出直径为 $(101.6 \pm 0.25)\text{ mm}$ 、高为 $(63.5 \pm 1.3)\text{ mm}$ 的标准马歇尔试件, 并切割成高度为 4 cm 的试件用于劈裂强度试验和疲劳试验。

1.2 试验方法与试验指标

1.2.1 劈裂强度试验

劈裂强度试验按照规范^[7]进行, 试验温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 试验仪器为 Material Test System (MTS-810) 材料试验机。每种类型冷再生混合料进行 4 次平行试验, 取 4 次平行试验结果均值作为该种类型冷再生混合料劈裂强度值。

1.2.2 疲劳试验

疲劳试验采用劈裂疲劳试验方法, 试验仪器为 MTS 材料试验机。试验温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加载频率为 10 Hz ^[8], 采用半正弦波连续加载和应力控制模式。在役冷再生混合料试件采用 0.50、0.40、0.30、0.25 共 4 个应力比, 室内新成型混合料采用 0.40、0.30、0.25 共 3 个应力比。每个应力比下进行 3 次平行试验。试验过程中通过位移传感器测定试件水平径向变形。

1.2.3 劲度模量

劲度是反映沥青混合料在给定温度和加载条件下的应力-应变关系的参数。各种因素实质上通过影响沥青混合料的劲度来影响其疲劳性能, 研究沥青混合料劲度的变化规律对认识其疲劳性能具有关键作用。根据规范^[7], 劲度模量计算采用下式:

$$E_s = \frac{P(0.27 + \mu)}{X_T h} \quad (1)$$

式中: E_s 为劲度模量, MPa; P 为竖向荷载峰值, N; μ 为泊松比; X_T 为水平径向变形幅值, mm; h 为试件高度, mm。

2 行车道与超车道标准轴载作用次数差异

为了量化对昌九高速公路行车道和超车道冷再生混合料实际承受轴载作用次数差异,对昌九高速公路进行现场交通量调查.调查过程中将车辆类型分为三类客车(20 至 39 座)、四类客车(≥ 40 座)、一类货车(≤ 2 t)、二类货车(2.1 t 至 5 t)、三类货车(5.1 t 至 10 t)、四类货车(10.1 t 至 15 t)、五类货车(≥ 15.1 t)、一类集装箱(20 尺货柜)、二类集装箱(40 尺货柜)9 种,每种车型对应不同的平均轴载换算系数.调查方式为室外拍摄,分别选取工作日和周末进行.后期对拍摄视频分车型进行统计,换算成相应的等效轴载作用次数,计算得到行车道的车道系数为 0.864,超车道的车道系数为 0.136.由统计结果可知,行车道冷再生混合料承受的累计交通轴载作用次数为超车道的 6 倍左右,两车道所承受的累计轴载作用次数差异明显.

3 在役乳化沥青冷再生混合料劈裂强度

现场两车道的在役乳化沥青冷再生混合料试件和新成型冷再生混合料试件劈裂强度试验结果汇总如表 2 所示.

表 2 劈裂强度试验结果

Tab. 2 Splitting strength of different kinds of EACR mixtures

冷再生混合料	试验结果/MPa	均值/MPa
超车道	1.74, 1.40, 1.65, 1.53	1.58
行车道	1.64, 1.41, 1.74, 1.44	1.56
室内新成型	1.05, 1.10, 1.00, 0.90	1.01

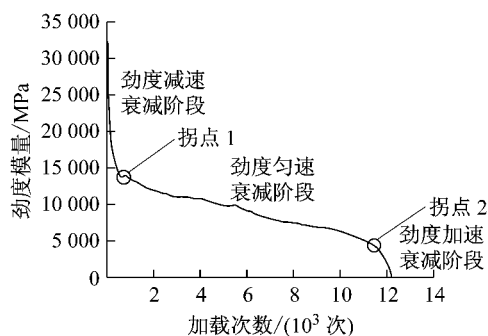
由表 2 可得,取自行车道和超车道的 2 类在役冷再生混合料劈裂强度值接近,差异并不明显,但这 2 类在役冷再生混合料劈裂强度值却明显大于室内新成型的冷再生混合料.新成型冷再生混合料并未承受行车荷载作用,这说明冷再生混合料在铺设后性能有所提升,针对这一规律接下来结合疲劳试验分析结果进行进一步说明.

4 在役乳化沥青冷再生混合料疲劳性能

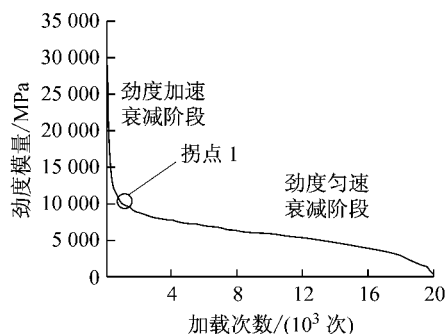
4.1 在役乳化沥青混合料疲劳破坏特点

对在役乳化沥青冷再生混合料进行了 0.50、0.40、0.30、0.25 共 4 个应力比下的劈裂疲劳试验,

并绘制了不同应力比下的劲度衰减曲线,结果表明,在役冷再生混合料在不同应力比(S)下劲度模量有相同的衰减规律.现以 $S=0.4$ 时的劲度模量衰减曲线为例分析在役冷再生混合料的劲度衰减规律. $S=0.4$ 时的劲度模量衰减曲线如图 3a 所示.



a 超车道冷再生混合料 $S=0.4$ 时劲度衰减曲线



b 新成型冷再生混合料 $S=0.3$ 时劲度衰减曲线

图 3 2 种冷再生混合料劲度衰减曲线

Fig. 3 Attenuation curves of stiffness modulus for two kinds of EACR mixtures

由图 3a 可以看出在役冷再生混合料劲度衰减分为 3 个阶段:①疲劳加载次数在 700 次以内的减速衰减阶段.在役冷再生混合料在铺设和服役过程中,所承受的荷载为垂直方向荷载,而室内劈裂疲劳试验加载模式相对于混合料来说是水平方向荷载,在水平方向上,在役冷再生混合料的非均匀性及微观缺陷仍然存在,在疲劳试验过程中,疲劳荷载对试件的压密及局部缺陷部位的应力集中使混合料产生了微细裂纹并逐渐扩展,形成小范围的局部疲劳损伤,导致已服役冷再生混合料劲度模量迅速衰减,但衰减速度随加载次数的增加而逐渐减小.②加载次数在 700~11 500 次之间的劲度匀速衰减阶段.此时微裂纹逐渐积累,在役冷再生混合料内部局部缺陷区域内的高密度能量得到释放转移,混合料内部能量积累-扩散重新达到相对稳定的状态,劲度模量下降,速度与疲劳加载次数近似呈线性关系.③加载次数大于 11 500 次的劲度加速衰减阶段.细微裂纹逐渐扩展直至相互贯通,混合料性能由于内部损伤的

加剧而迅速劣化,试件劲度模量加速衰减直至试件完全开裂并失稳破坏.将在役冷再生混合料上述 3 个阶段分界点定义为拐点 1 和拐点 2.

对新成型冷再生混合料进行了 0.40、0.30、0.25 共 3 个应力比下的劈裂疲劳试验,新成型冷再生混合料不同应力比下劲度模量衰减规律也相同.现以 $S=0.3$ 时的劲度模量衰减曲线为例进行分析,其衰减曲线如图 3b 所示.由图可得,新成型冷再生混合料劲度衰减曲线前 2 个阶段衰减规律与在役冷再生混合料相同:①加载次数在 900 次以内的劲度减速衰减阶段.该阶段新成型冷再生混合料劲度模量迅速衰减.②劲度匀速衰减阶段.该阶段新成型冷再生混合料劲度模量基本呈线性递减.需要注意的是,虽然新成型冷再生混合料劲度衰减曲线最后阶段也呈现出小范围的加速衰减特征,但由于该阶段加载次数过少,所以这个阶段不作为特征阶段进行分析,可以认为新成型冷再生混合料劲度衰减分为减速衰减和匀速衰减 2 个阶段,而后试件出现贯通裂缝、失稳破坏.将新成型冷再生混合料 2 个阶段分界点定义

为拐点 1.

在疲劳过程中沥青混凝土的损伤导致其劲度模量衰减,可用损伤量来度量其劣化程度^[9].

累计损伤量 D 定义为第 n 次加载时沥青混凝土劲度模量损失量与初始劲度模量之比.

$$D = 1 - \frac{E_{sn}}{E_{s0}} \quad (2)$$

式中: E_{sn} 为第 n 次加载时劲度模量, MPa; E_{s0} 为初始劲度模量, MPa. 对于在役冷再生混合料, E_{s0} 指试件从现场取回进行室内加载时的初始劲度模量.

根据 Lemaitre 损伤理论, 单次荷载对沥青混凝土造成的损伤量为^[10]

$$\Delta D = 1 - \frac{E_{s(n+1)}}{E_{sn}} \quad (3)$$

按照式(3), 将图 3 中超车道冷再生料和室内新成型冷再生混合料试件在疲劳加载过程中的劲度模量分别转换为累积损伤量 D 和单次荷载损伤量 ΔD , 得到 D 和 ΔD 与疲劳加载次数的关系, 整理如图 4 所示.

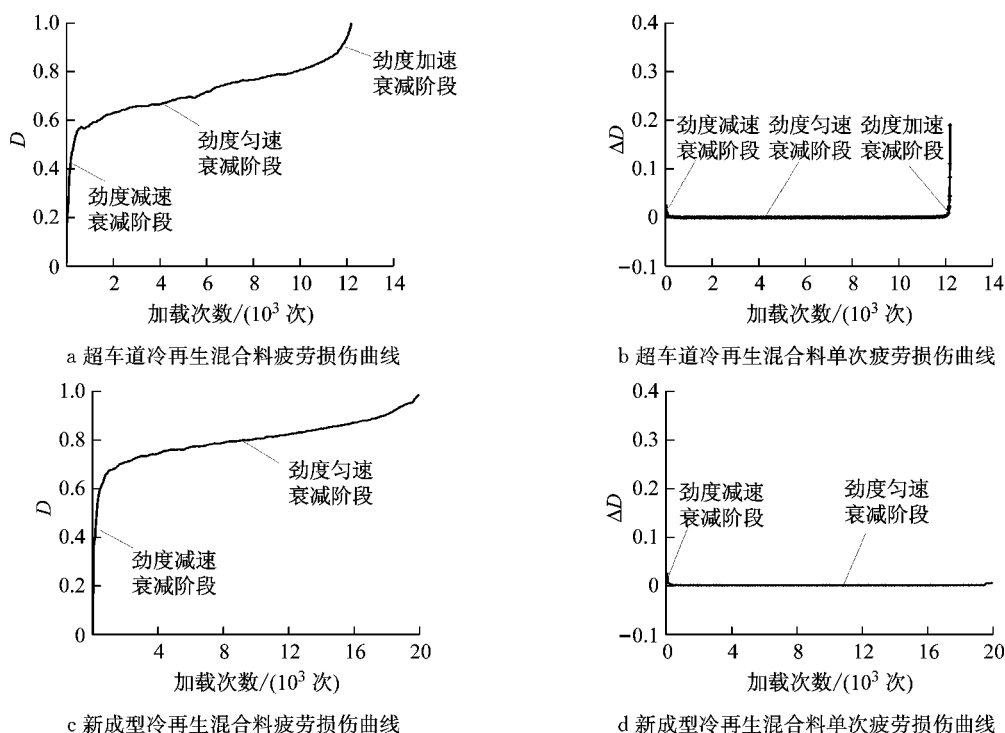


图 4 2 种冷再生混合料疲劳损伤及单次疲劳损伤曲线

Fig. 4 Accumulated fatigue damage and single fatigue damage curves for two kinds of EACR mixtures

由图 4 可得, 对于在役冷再生混合料和室内新成型冷再生混合料, 其实验室加载疲劳损伤曲线均表现出和劲度衰减曲线相同的规律. 在役冷再生混合料疲劳损伤分为 3 个阶段: ①减速损伤阶段, 该阶段损伤值 D 逐渐增大, 但单次损伤值 ΔD 逐渐减小.

②匀速损伤阶段, 该阶段 D 线性增长, ΔD 基本保持不变. ③加速损伤阶段, 该阶段 ΔD 迅速增大, D 随着加载次数迅速增大. 则在疲劳试验过程中, 在役冷再生混合料疲劳损伤的变化规律可用劲度模量的变化规律来表示.

劲度模量减速衰减阶段是由于混合料压实过程及内部局部缺陷引起的,此时混合料还未进入稳定损伤阶段,因此将在役冷再生混合料疲劳破坏的起点定义为减速损伤阶段和匀速损伤阶段的转折点,在劲度衰减曲线上对应拐点 1,该点后在役混合料进入稳定损伤状态;而疲劳破坏终点定义为匀速损伤阶段和加速损伤阶段转折点,在劲度衰减曲线上对应拐点 2,在该点后,在役冷再生混合料劲度加速衰减,混合料已出现宏观裂缝,并加速破坏。

室内新成型冷再生混合料疲劳损伤表现为减速损伤阶段和匀速损伤阶段,其疲劳损伤的变化规律同样可用劲度模量的变化规律来表示。相应的,疲劳破坏的起点定义为减速损伤阶段和匀速损伤阶段的转折点,在劲度衰减曲线上对应拐点 1;由于新成型冷再生料加速损伤阶段可以忽略,所以衰减曲线上不存在拐点 2,其疲劳破坏终点定义为试件完全破坏(劲度变为零)。为直观比较,将在役及新成型冷再生料不同应力比下一次平行试验中得到的劲度衰减曲线汇总到图 5。

由图可看出,超车道和行车道的冷再生混合料在不同应力比下均表现为三阶段衰减模式,室内新成型冷再生料在不同应力比下均表现为两阶段衰减模式。拐点 1 和拐点 2 分别对应冷再生混合料疲劳损伤起点和终点的位置,对劲度衰减曲线 3 个阶段进行线性拟合,通过 3 个阶段最佳线性拟合直线的交点来确定 2 个拐点的位置,具体方法如下:

(1) 首先根据衰减曲线定出 3 个阶段分别对应的横坐标大致范围 $[K_1, K_2]$ 。

(2) 对 3 个阶段对应的 $[K_1, K_2]$ 范围内数据点进行线性拟合,得到拟合函数相关系数 R^2 。

(3) 不断调整 $[K_1, K_2]$ 的范围,重复步骤(2),找到拟合函数相关系数 R^2 最大值,此时 $[K_1, K_2]$ 范围内数据点线性拟合直线即为对应的衰减阶段最佳线性拟合直线。

(4) 3 个阶段最佳线性拟合直线的交点对应的横坐标即为拐点 1 和拐点 2 对应的横坐标。

利用上述方法确定所有类型冷再生混合料不同应力比下 3 次平行疲劳试验得到的劲度衰减曲线的拐点位置,其中新成型冷再生混合料仅考虑拐点 1。将劲度衰减曲线中拐点 1 所对应的劲度模量定义为 E_{sp1} ,拐点 2 所对应的劲度模量定义为 E_{sp2} 。拐点 1 对应的劲度模量与初始劲度模量的比值定义为 $\frac{E_{sp1}}{E_{s0}}$,拐点 2 对应的劲度模量与拐点 1 的相应比值定义为 $\frac{E_{sp2}}{E_{sp1}}$ 。所有拐点对应的劲度模量及拐点间劲度模量比

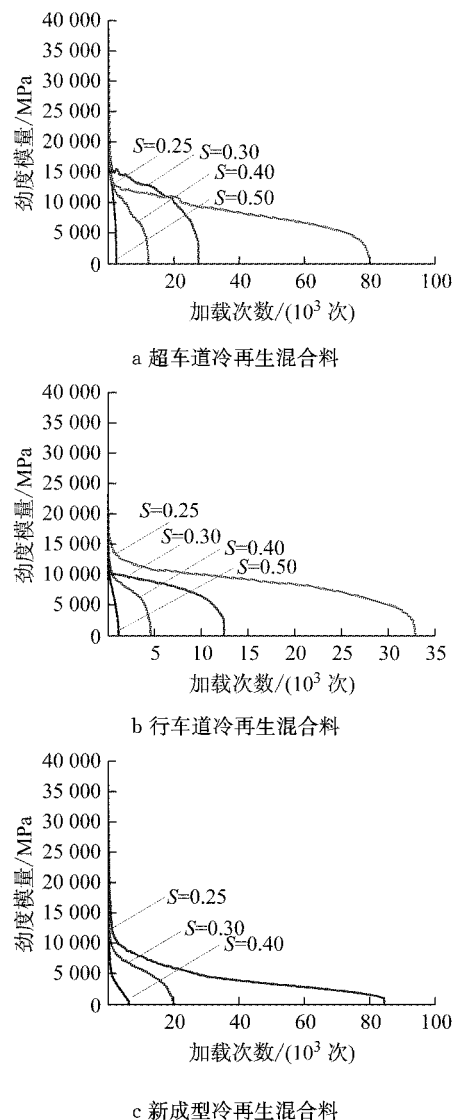


图 5 不同类型冷再生混合料不同应力比下劲度模量衰减曲线

Fig. 5 Attenuation curves of stiffness modulus for different kinds of EACR mixtures at different tensile stress levels

值汇总到表 3。

为了便于比较分析,计算表 3 中 $\frac{E_{sp1}}{E_{s0}}$ 与 $\frac{E_{sp2}}{E_{sp1}}$ 的均值并将均值数据汇总到表 4。

由表 4 及图 5 可得,取自超车道的在役冷再生混合料在不同应力比时初始劲度大小基本不变,拐点 1 和拐点 2 对应的劲度大小在不同应力比时也基本不变。行车道冷再生混合料初始劲度值、拐点 1 对应的劲度值、拐点 2 对应的劲度值随应力比变化也不明显。而新成型冷再生料初始劲度值、拐点 2 对应的劲度值随应力比变化明显:应力比变大,初始劲度值和拐点 1 对应的劲度明显降低。由此可得,在役冷再生混合料在承受行车荷载、充分老化后,在疲劳破

表 3 不同冷再生混合料劲度衰减曲线拐点对应的劲度模量
Tab. 3 Stiffness moduli of characteristic points of attenuation curves for different EACR mixtures

冷再生混合料类型	应力比	E_{s0}/MPa	E_{sp1}/MPa	$E_{sp1}/E_{s0}/\%$	E_{sp2}/MPa	$E_{sp2}/E_{sp1}/\%$
超车道	0.25	36 066	14 640	40.6	5 948	40.6
		33 099	13 544	40.9	6 231	46.0
		34 515	10 735	31.1	5 323	49.6
	0.30	36 441	15 117	41.5	7 436	49.2
		29 912	14 229	47.6	6 587	46.3
		37 518	15 542	41.4	6 902	44.4
	0.40	33 012	13 980	42.3	5 506	39.4
		39 504	12 259	31.0	5 928	48.4
		31 262	11 519	36.8	6 296	54.7
	0.50	36 455	15 078	41.4	5 497	36.5
		28 597	11 479	40.1	5 603	48.8
		36 903	11 554	31.3	5 352	46.3
行车道	0.25	22 350	12 154	54.4	6 031	49.6
		22 439	12 724	56.7	5 942	46.7
		23 160	11 110	48.0	4 545	40.9
	0.30	19 258	9 604	49.9	4 938	51.4
		20 988	9 654	46.0	5 499	57.0
		24 347	12 483	51.3	4 749	38.0
	0.40	21 489	12 034	56.0	4 760	39.6
		21 421	9 649	45.0	5 176	53.6
		20 243	12 109	59.8	5 280	43.6
	0.50	21 661	12 034	55.6	5 211	43.3
		17 497	9 649	55.1	5 358	55.5
		22 331	10 889	48.8	5 076	46.6
室内新成型	0.25	36 590	12 593	34.4		
		38 214	15 382	40.3		
		33 390	11 598	34.7		
	0.30	22 276	9 245	41.5		
		29 899	9 031	30.2		
		34 597	11 041	31.9		
	0.40	20 536	6 872	33.5		
		21 696	6 420	29.6		
		18 818	6 181	32.8		

表 4 不同冷再生混合料 E_{sp1}/E_{s0} 与 E_{sp2}/E_{sp1} 均值
Tab. 4 Average values of E_{sp1}/E_{s0} and E_{sp2}/E_{sp1} for different EACR mixtures

冷再生混合料类型	应力比	E_{sp1}/E_{s0} 均值/%	E_{sp2}/E_{sp1} 均值/%
超车道	0.25	37.5	45.4
	0.30	43.5	46.6
	0.40	36.7	47.5
	0.50	37.6	43.9
行车道	0.25	53.0	45.7
	0.30	49.0	48.8
	0.40	53.6	45.6
	0.50	53.2	48.5
室内新成型	0.25	36.5	
	0.30	34.5	
	0.40	32.0	

坏阶段更多地表现出弹性特征,劲度模量对应力大

小的敏感性减小;而新成型冷再生混合料破坏阶段劲度模量对应力敏感性高。

在同一应力比下,超车道冷再生料初始劲度值、拐点 1 对应的劲度值、拐点 2 对应的劲度值均大于行车道冷再生混合料。行车道和超车道冷再生混合料差异性更多地体现在实际承受的轴载作用次数上,可得实际轴载作用次数的增加会导致在役冷再生混合料劲度模量降低。由表 1 可得,在役冷再生混合料拐点 1 对应劲度值和初始劲度值的比值集中在 37%~54%之间,均值为 45%;拐点 2 对应劲度值与拐点 1 对应劲度值的比值集中在 43%~49%,均值也在 45%左右。由此可给出在役冷再生混合料疲劳破坏准则:劲度模量下降到初始模量 45%时开始疲劳破坏;劲度模量下降到疲劳破坏起点(拐点 1)劲度值 45%时发生破坏。室内新成型冷再生混合料拐点 1 对应劲度值和初始劲度值的比值集中在 32%~37%,均值在 35%左右,则其疲劳破坏准则定为劲度模量下降到初始劲度 35%时开始疲劳破坏;由于新成型冷再生混合料不存在拐点 2,则试件完全破坏(劲度模量为零)时发生疲劳破坏。

4.2 冷再生混合料室内疲劳寿命及疲劳方程

按照 4.1 节提出的在役及新成型冷再生混合料疲劳破坏准则,确定 2 类冷再生混合料在不同应力比下的疲劳寿命。其中对于在役冷再生混合料而言,得到的疲劳寿命其实是混合料在承受现场实际轴载作用次数后的剩余疲劳寿命。不同混合料的疲劳寿命结果汇总如表 5 所示。

将表 4 中的数据绘制在双对数坐标上,如图 6 所示。

由图可得,2 类冷再生混合料疲劳寿命和试件中心拉应力在双对数坐标上呈现很好的线性关系,则疲劳方程形式选定为

$$N_f = k \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^b \quad (4)$$

式中: N_f 为疲劳寿命,次; σ_t 为试件中心拉应力,MPa; k, b 为与材料有关的参数, k 表征疲劳性能, b 表征混合料疲劳寿命对应力的敏感程度。

由图 6 可拟合得到在役及新成型冷再生混合料相应的疲劳方程。

对于超车道冷再生混合料有

$$N_f = 897.2 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{4.823} (R^2 = 0.96) \quad (5)$$

对于行车道冷再生混合料有

$$N_f = 536.2 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{4.475} (R^2 = 0.96) \quad (6)$$

表 5 不同冷再生混合料疲劳寿命

Tab. 5 Fatigue lifes of different kinds of EACR mixtures

冷再生混合料类型	应力比	试件中心最大拉应力/MPa	疲劳寿命试验值	疲劳寿命均值
超车道	0.25	0.40	79 968,90 262,57 885	76 038
	0.30	0.47	20 900,29 923,32 216	27 680
	0.40	0.64	9 450,13 030,9 962	10 814
	0.50	0.78	2 330,3 390,1 048	2 256
行车道	0.25	0.40	38 300,32 106,34 482	34 963
	0.30	0.47	10 700,14 600,9 441	11 580
	0.40	0.64	4 280,5 587,7 527	5 798
	0.50	0.80	860,1 050,1 792	1 234
室内新成型	0.25	0.25	46 590,49 220,74 690	56 833
	0.30	0.30	16 926,18 733,22 750	19 470
	0.40	0.41	5 612,8 537,5 892	6 680

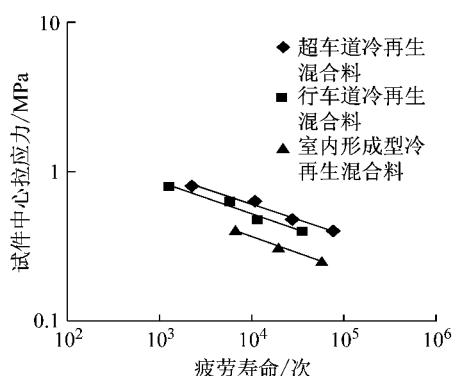


图 6 不同冷再生混合料不同应力下疲劳寿命

Fig. 6 Chart of fatigue lifes of different kinds of EACR mixtures at different tensile stress

对于室内新成型冷再生混合料有

$$N_f = 113.3 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{4.467} (R^2 = 0.98) \quad (7)$$

由式(5)至(7)可以看出 3 类冷再生混合料疲劳方程相关性都很高,超车道冷再生混合料疲劳方程中系数 k 最大,行车道冷再生混合料次之,室内新成型冷再生混合料的系数 k 最小。由于 k 表征疲劳性能, k 越大,表示混合料室内疲劳试验得到的剩余疲劳寿命越大。因此,可得在试件中心最大拉应力相同的情况下,超车道冷再生混合料剩余疲劳寿命大于行车道,这表明更多的轴载作用次数会导致在役冷再生混合料疲劳寿命降低。室内新成型冷再生混合料并未承受行车荷载作用,其疲劳寿命理论上应该高于在役冷再生混合料,但疲劳方程表明,新成型冷再生混合料疲劳寿命低于在役冷再生混合料,这说明乳化沥青冷再生混合料在铺设后服役过程中存在疲劳寿命增长过程。过往研究中^[11-12]对不同泡沫沥青与乳化沥青冷再生混合料在实体工程运营后进行研究,发现冷再生混合料在运营 2~5 年内力学性能逐年增长,2~5 年后达到稳定水平,本文的研究结果也和这一结论相吻合。这种情况可能是由于在役

冷再生混合料中旧料与沥青的结合浸润和压密作用时间长,各界面黏结力较强,疲劳寿命长;而新成型冷再生料中旧料与沥青相互作用时间短,各界面间黏结作用较弱,疲劳寿命较短。

5 结论

(1) 在役乳化沥青冷再生混合料劲度衰减可分为劲度减速衰减、劲度匀速衰减、劲度加速衰减 3 个阶段,3 阶段的分界拐点可分别定义为疲劳破坏的起点和终点。新成型乳化沥青冷再生混合料则只有劲度减速衰减、劲度匀速衰减 2 个阶段。冷再生混合料在不同加载应力比条件下的疲劳损伤曲线与劲度衰减曲线变化规律相同。

(2) 在役乳化沥青冷再生混合料在疲劳破坏阶段更多地表现出弹性特征,劲度模量对应力大小不敏感;而室内新成型冷再生混合料劲度模量对应力敏感性高。在轴载作用次数差异影响下,超车道冷再生混合料疲劳破坏各个阶段劲度值普遍大于行车道冷再生混合料,表明现场更多的轴载作用次数会导致冷再生混合料劲度模量降低。

(3) 在役乳化沥青冷再生混合料疲劳破坏准则可定义为:当劲度模量下降到初始模量 45% 时开始疲劳破坏,劲度模量下降到疲劳破坏起点劲度值 45% 时疲劳破坏结束。室内新成型冷再生混合料疲劳破坏准则定义为:劲度模量下降到初始劲度 35% 时开始疲劳破坏,试件完全破坏时疲劳破坏结束。

(4) 在试件中心最大拉应力相同时,超车道冷再生混合料剩余疲劳寿命大于行车道冷再生料;室内新成型冷再生混合料疲劳寿命低于在役冷再生混合料,说明乳化沥青冷再生混合料在铺设后服役过程中存在疲劳性能增长过程。

(下转第 1687 页)