

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.04.008

预防性养护用薄层罩面疲劳破坏细观特性分析

田 隽¹, 郭桂宏², 梁美君¹, 刘宪明², 卢晓锦³, 赵全满³

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002; 3. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为分析预养护后薄层罩面的疲劳破坏机理,文章通过室内试验与数值模拟相结合的方式,对含层间的沥青混合料试件进行三点弯曲破坏、三点弯曲疲劳试验。结果表明:宏、细观疲劳试验结果之间的差值在3%~5%,满足试验对误差的要求;薄层罩面的弯曲疲劳寿命与加载频率呈正相关,与荷载应力呈负相关;疲劳过程中裂缝分为萌芽、发展、扩展3个阶段,0.2N_f~0.8N_f为裂缝发展阶段,这一阶段剪切型裂缝迅速发展;颗粒间的接触力链随着加载的进行逐渐断裂,且应力主要分布在裂缝顶端处;应力比越大、加载频率越低,加载初期因接触力链断裂而产生的滑移能增速越快。在薄层罩面的使用过程中,应注意避免前期性能损伤,以防止裂缝的快速扩展和耐久性的降低。

关键词:道路工程;沥青混合料;三点弯曲疲劳试验;薄层罩面;PFC数值模拟方法;疲劳性能

中图分类号:U414;U418.65 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)04-0490-08

Analysis of microscopic characteristics of fatigue failure of thin overlay for preventive maintenance

TIAN Jun¹, GUO Guihong², LIANG Meijun¹, LIU Xianming², LU Xiaojin³, ZHAO Quanman³

(1. Shandong Hi-speed Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. Shandong Hi-speed Engineering Test Co., Ltd., Jinan 250002, China; 3. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: To analyze the fatigue failure mechanism of thin overlay after pre-curing, this paper combines indoor test and numerical simulation to carry out three-point bending failure and three-point bending fatigue tests on asphalt mixture specimens with interlayer. The results show that the difference between macro and micro fatigue test results is between 3% and 5%, which meets the requirements of the test for error. The bending fatigue life of the thin overlay is positively correlated with the loading frequency and negatively correlated with the load stress. The cracks in the fatigue process are divided into three stages: germination, development and expansion. The interval from 0.2N_f to 0.8N_f is identified as the stage of crack development, and the shear cracks develop rapidly in this stage. The contact force chain between the particles gradually breaks with the loading, and the stress is mainly distributed at the top of the crack. The larger the stress ratio and the lower the loading frequency, the faster the growth rate of slip energy caused by the fracture of the contact force chain at the initial stage of loading. Therefore, in the process of using the thin overlay, attention should be paid to avoid the early performance damage, so as to prevent the rapid expansion of cracks and the decrease of durability.

Key words: road engineering; asphalt mixture; three-point bending fatigue test; thin overlay; particle flow code(PFC) numerical simulation; fatigue performance

收稿日期:2023-11-20;修回日期:2024-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808322);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018BEE039)和2020年山东高速路面养护科学决策体系与大数据可视化智能管理平台研发资助项目(HSB2020201)

作者简介:田隽(1977—),女,山东德州人,山东高速股份有限公司高级工程师;

赵全满(1987—),男,山东济宁人,博士,山东建筑大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zhaquanman@sdjzu.edu.cn.

随着我国经济的迅速发展,交通量、轴载快速增加,导致道路在设计使用年限内就出现了不同程度的破坏,自我国交通部提出建养并重的指示以来,道路工作的重心开始由新建道路转向路面养护^[1],截止到2022年末,我国养护公路里程已达到 535.03×10^4 km,占公路总里程的99.9%,随着我国养护公路里程逐年攀升,道路养护费用不断增加,道路养护管理部门成本压力巨大。

为提高养护效率,降低年平均养护费用,预防性养护技术逐渐被广泛应用于道路养护工程中,而薄层罩面是较为常见的一种预防性养护技术^[2],能够有效改善路面轻微裂缝、车辙、坑槽等病害,提高道路的抗滑、抗疲劳性能^[3]。但由于沥青路面在使用过程中并不完全符合弹性层状体系理论,路面疲劳寿命受路面层间黏结状态影响较大,研究发现虽然在薄层罩面与旧沥青路面之间喷洒性能优异的黏层材料可有效改善路面的力学响应^[4]、延长路面的使用寿命^[5],但路面的性能受黏层油种类、用量、涂抹方式等因素的影响较大^[6],SBS(styrene-butadiene-styrene)改性沥青在改性过程中胶体结构发生改变,使得沥青分子间的相互作用增强,内聚力提高,因此相较于其他改性乳化沥青来说,SBS改性乳化沥青作为黏层油能提供更好的黏结强度^[7]。

由于沥青路面在服务寿命期间直接经受环境、荷载因素的作用,经年累月,沥青路面的耐久性会大大降低,影响沥青路面的疲劳性能^[8-10]。虽然沥青路面的疲劳寿命为道路设计的指标,但研究发现,疲劳损伤是沥青路面的主要破坏方式^[11]。由于预防性薄层罩面养护方式铺筑的沥青层厚度较薄,在外部因素的综合作用下,相比普通沥青路面其性能损伤速度更快,损伤程度更

大^[12-14],实际疲劳寿命远小于设计使用寿命,限制了薄层罩面技术的推广和应用^[15]。

在从细观角度研究薄层罩面疲劳破坏机理方面,PFC(particle flow code)数值模拟方法被广泛应用。该软件能够通过模拟沥青混合料的细观结构特征,分析骨料尺寸对混合料性能的作用机理^[16],优选出抗裂性能最佳时粗集料与比表面积之间的关系^[17],为沥青混合料的设计提供理论依据^[18]。可以通过观测沥青混合料数字模型内部裂缝的发展情况^[19]、外掺剂与沥青胶浆材料之间的作用机理^[20],量化分析沥青混合料性能指标与模型参数之间的关系^[21-22]。文献^[23]将PFC数值模拟方法应用在沥青混合料的疲劳试验中,验证了该方法探究沥青混合料疲劳性能的可行性,对于薄层罩面的合理使用具有重要的指导意义。

鉴于此,本文基于三点弯曲破坏、疲劳试验,从宏观角度分析含层间沥青混合料的疲劳寿命与荷载、加载频率之间的关系;并以单轴压缩蠕变试验结果为指标,计算沥青砂浆材料的细观结构本构模型,建立沥青混合料数字模型;通过获取疲劳试验过程中裂缝、接触力链的变化情况,从细观角度分析沥青混合料在服务寿命期间的力学响应,揭示薄层罩面破坏机理,为薄层罩面设计与施工提供理论基础。

1 室内试验

1.1 三点弯曲试验

选用的沥青材料为SBS改性沥青,选用的集料为玄武岩碎石和机制砂,主要分为0~3 mm、5~10 mm和矿粉三档矿料。沥青混合料级配类型为SMA-10^[13],试验制备的沥青混合料性能参数见表1所列。

表1 SMA-10马歇尔试验结果

油石比/%	毛体积密度/ (g/cm ³)	最大理论密度/ (g/cm ³)	孔隙率/%	矿料间歇率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
7.0	2.414	2.500	3.8	20.3	81.2	15.2	3.0

首先根据设计级配及最佳油石比按照规范^[24]要求制作300 mm×300 mm×50 mm的车辙板,静置24 h脱模后置于300 mm×300 mm×100 mm的双层车辙板模具中,并在其表面涂抹SBS改性乳化沥青,待乳化沥青完全破乳后,成型上层车辙板。

由于车辆在行车过程中会在道路层间位置产生一定的剪应力,这与三点弯曲疲劳试验中试件

的受力模式较为相似,并且三点弯曲疲劳试验的加载模具制作相对简单。由于应变控制下的疲劳试验结束时试验现象不明显,且加铺沥青层后的路面更接近厚沥青层,采用应力控制模式进行疲劳试验与实际情况更为接近^[25],本文选择应力控制模式下的三点弯曲疲劳试验,由双层车辙板切割成型的试件尺寸为250 mm×40 mm×40 mm,如图1所示。



图 1 三点弯曲疲劳试验成型试件图

1.2 单轴压缩蠕变试验

为了模拟沥青的黏弹性力学行为,将通过单轴

压缩蠕变试验计算沥青材料 Burger's 模型中各元件的数值大小。试验选用粒径小于 2.36 mm 的细集料与沥青、矿粉拌成型沥青砂浆试件,按照所选的级配类型,采用比表面积法确定沥青砂浆试件的配合比^[26],计算过程见表 2 所列,沥青砂浆试件油石比为细料裹附沥青量与细料用量的比值。

根据表 2 中沥青砂浆试件的配比成型 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件。试验设定的应变速率为 0.1 mm/min,恒定荷载为 0.2P,在试验开始前,先以 0.02 MPa 的荷载对试件进行预加载 60 s,预加载结束后继续加载 300 s。

表 2 沥青砂浆试件的配合比

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	(0,0.075)
通过率/%	100.00	98.40	34.95	23.81	21.02	17.85	15.21	12.64	10.24	
分计筛余	0	1.597	63.455	11.141	2.784	3.171	2.643	2.566	2.400	10.242
比表面积系数	0.41	0.41	0.41	0.82	1.64	2.87	6.14	12.29	32.77	32.77
表面积	0	0.655	26.017	9.136	4.566	9.101	16.229	31.533	78.655	335.631
集料用量	76.194	76.194	76.194	76.194	23.806	23.806	23.806	23.806	23.806	23.806
表面积	35.807	35.807	35.807	35.807	475.715	475.715	475.715	475.715	475.715	475.715
表面积比例	0.070	0.070	0.070	0.070	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930
裹附沥青用量	0.476	0.476	0.476	0.476	6.324	6.324	6.324	6.324	6.324	6.324
油砂比/%	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38
沥青用量/%	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50

2 微观模型建立

2.1 宏、微观参数换算

沥青砂浆的本构模型选用 Burger's 模型,该模型由 Maxwell 和 Kelvin 元件串联而成,根据弹簧与黏壶的力学响应可知,当荷载作用在沥青混合料上时,Maxwell 元件中的弹簧会立即产生瞬时应变;而因为 Kelvin 元件中的弹簧与黏壶并联存在,所以该弹簧元件并不会产生瞬时应变。

当 t 趋于 0 时,仅有 Maxwell 元件的弹簧元件会立即输出应变响应,弹簧 k_1 的弹性模量计算公式为:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

其中: σ_0 为施加在沥青混合料上的应力; ε_0 为模型结构产生的瞬时弹性应变。

除去模型中的瞬时变形后,Burger's 模型中的剩余应变计算式为:

$$\delta(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_0 = \sigma_0 \left[\frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-t/\tau_r}) \right] \quad (2)$$

$$\tau_r = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (3)$$

随着时间的无限长,黏壶元件的延迟弹性变

形接近于定值,当时间 t 趋于 ∞ 时,模型中的应变与加载时间应呈线性增长的关系,即:

$$\delta(t)_{t \rightarrow \infty} = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_2} + \frac{t}{\eta_1} \right) \quad (4)$$

当时间无限大时,以加载时间 t 作为变量,对式(1)~(3)进行求导得到函数的斜率 $\tan \theta$,串联黏壶的黏度 η_1 表达式为:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_0}{\tan \theta} \quad (5)$$

在剩余应变中,令 $t=0$,由此得到 $\delta(t)_{t \rightarrow \infty} = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_2} + \frac{t}{\eta_1} \right)$,由此可得到 Kelvin 元件中弹簧 k_2 的弹性模量为:

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\delta(0)_{t \rightarrow \infty}} \quad (6)$$

为得到延迟元件中黏壶的黏度,对式(4)进行对数换算:

$$-\delta(t) + \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0 t}{\eta_1} = \frac{e^{-t/\tau_r} \sigma_0}{E_2} \quad (7)$$

可以发现,时间与蠕变柔量之间呈线性变化,拟合后得到:

$$\tau_r = \frac{\eta_2}{E_2} = -\frac{\lg e}{\tan \gamma}, \quad \eta_2 = -\frac{0.434}{\tan \gamma} E_2 \quad (8)$$

最终拟合得到的时间与蠕变柔量之间的关系如图2所示。

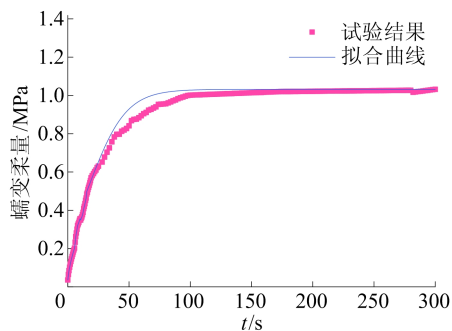


图2 时间-蠕变柔量曲线

2.2 模型建立

由于模型中沥青混合料粒径大于 2.36 mm 的集料为承担荷载应力的受力骨架，粒径小于 2.36 mm 的集料以及填充在骨架孔隙的沥青构成沥青砂浆，结合计算机的计算能力，将 2.36 mm 以下的集料全部归属于沥青砂浆，并按照 2.1 节计算得到的模型参数进行赋值。由于试验中所采用的集料形状并不是表面光滑的球形颗粒，而是带有一定棱角的不规则形状，为了更加真实地表征沥青混合料骨架的嵌挤结构，本文将按照粒径大小，随机生成不规则几何形状以表征粗集料，构建得到的试件如图3所示。



图3 PFC 虚拟试件结构模型

2.3 结果验证

为验证建立模型的准确性，故在疲劳试验开始前首先进行三点弯曲破坏试验的模拟，在模拟过程中设定加载压头的速度为 50 mm/min，设定试验停止条件为试件完全断裂。数值模拟与室内试验得到的最大破坏载荷分别为 0.65、0.67 kN，两者相差 2.99%。因为宏、细观的误差在 5% 以内，所以认为选择的参数可用于试验的模拟。

3 结果分析

3.1 室内试验结果分析

为分析加铺薄层罩面后沥青路面在服务寿命期间所经受的荷载环境影响，选择在加载频率为 2、10、15 Hz，应力比为 0.2、0.3、0.4 下进行三点弯曲疲劳试验，以测试含层间薄层罩面的疲劳性

能，验证结果如图4所示。

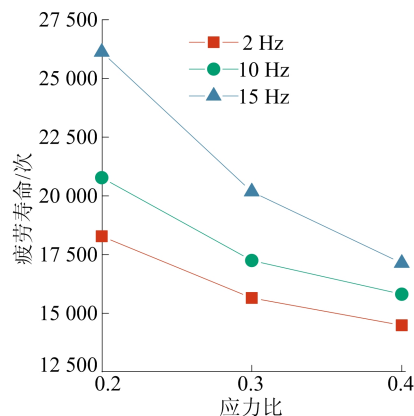


图4 应力比、加载频率与疲劳寿命的关系

由图4可知：在应力比为 0.2 时，试件的疲劳寿命随着应力的增加分别提高 13.7%、42.9%；在应力比为 0.3 时，试件的疲劳寿命分别提高 10.2%、28.9%；在应力比为 0.4 时，试件的疲劳寿命分别提高 9.1%、18.2%。以加载频率为控制变量分析应力比与疲劳寿命之间的关系，当加载频率为 2 Hz 时，随着应力比的提高，试件的疲劳寿命分别降低 14.4%、20.7%；在加载频率为 10 Hz 时，试件的疲劳寿命分别下降 17.0%、23.9%；在加载频率为 15 Hz 时，试件的疲劳寿命分别下降 22.8%、34.4%。

通过上述分析得到，含层间沥青混合料的疲劳性能随加载频率的提高而逐渐增大，随着应力比的增大而逐渐降低。在相同加载频率下，随着应力比的增大，疲劳寿命显著降低但降低速率逐渐减缓；随着应力比的增大，不同加载频率下的疲劳寿命差异变小，因此在行车速度较大时疲劳寿命更易受到应力比的影响，下降速率较快。在同一应力比下，随着加载速率的提高，含层间沥青混合料的疲劳寿命逐渐增大且增速变快；随着加载频率的提高，疲劳寿命对应力比的影响愈加敏感，在不同应力比下试件的疲劳寿命差异逐渐增大。

3.2 三点弯曲疲劳寿命

在模拟过程中，同样将试件断裂列为试验停止的条件，利用 PFC 软件获得的疲劳寿命对比情况如图5所示。

由图5可知，数值模拟获得的结果与室内试验结果的误差在 5% 以内，满足工程误差的要求。数值模拟计算得到的疲劳寿命小于室内试验结果，在同一应力比下，二者之间的误差相差不大；

随着应力比的增加,数值模拟结果与室内试验之间的误差逐渐减小。因数值模拟计算速度由时间步所控制,为模拟疲劳试验的加载过程、实现施加正弦函数应力,本文在模拟过程中调用伺服机制,即当实际加载应力小于目标应力时,加载压头的速度会逐渐增大,但实际加载应力相比于目标应力而言会存在一定的滞后性,加载压头作用在试件上的时间会增长,致使数值模拟结果略小于室内试验结果。

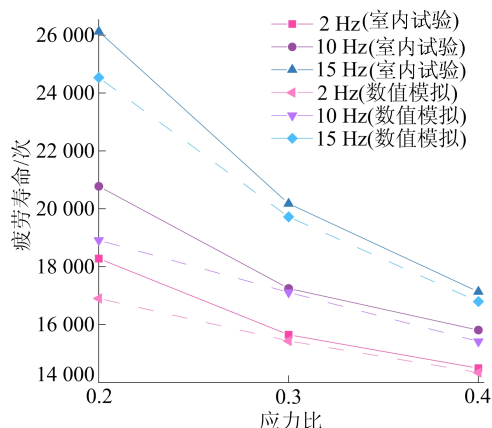


图 5 试验疲劳寿命对比

3.3 裂缝发展规律

在三点弯曲疲劳试验停止时,试件的断裂长度是最直观的试验现象,为从细观角度观察裂缝的发展情况,记录荷载作用下,裂缝数量、长度、类

型及其分布特征。

3.3.1 裂缝数量及长度

以加载频率作为试验变量记录试验过程中裂缝的发展情况,结果如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,无论试件所承受的荷载、加载频率如何变化,试件中裂缝的发展均分为 3 个阶段。第 1 阶段为裂缝萌发阶段,在此阶段中,试件中出现的裂缝均属于微小裂缝;随着加载的进行,试件中的裂缝数量逐渐增多,此阶段为裂缝发展阶段,此时裂缝的数量增速较快;当裂缝的分布高度接近试件高度的 1/2 时,裂缝开始逐步贯通,将此阶段称为裂缝贯通阶段,此时试件中存在一条较为明显的宏观裂缝,而后试件因裂缝贯通而发生疲劳断裂。

在同一加载频率下,随着应力比的增加,试件中裂缝数量、裂缝长度的增加速度逐渐提高。以加载频率 2 Hz 为例,当应力比为 0.2 时,在疲劳寿命小于 $0.3N_f$ (N_f 为总疲劳寿命) 时,裂缝发展处于第 1 阶段的萌发状态;当疲劳寿命处于 $0.3N_f \sim 0.7N_f$ 之间时,裂缝进入扩展阶段;当疲劳寿命大于 $0.7N_f$ 时,裂缝进入贯通阶段,直至试件发生断裂。当应力比为 0.3、0.4 时,第 1 阶段裂缝萌芽的时间缩短,裂缝扩展阶段提前至 $0.1N_f \sim 0.6N_f$ 范围内,当疲劳寿命大于 $0.6N_f$ 时,裂缝就开始逐渐贯通。

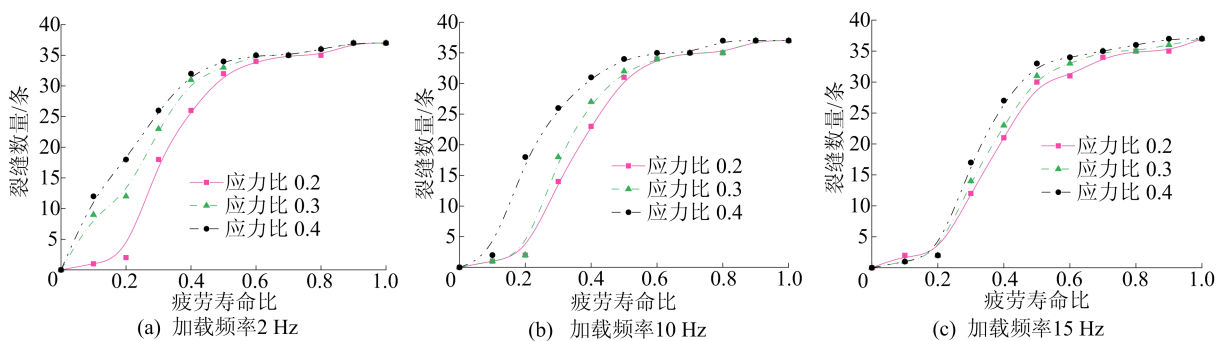


图 6 裂缝数量增长规律

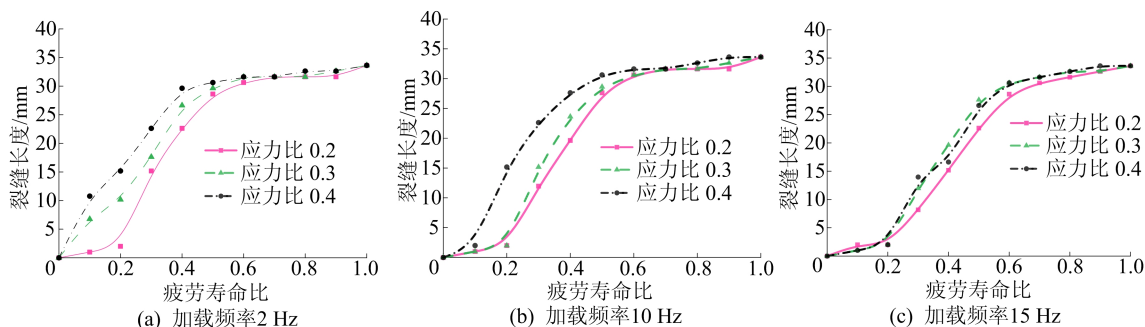


图 7 裂缝长度变化规律

在 0.3、0.4 应力比下,当加载频率由 2 Hz 提高至 10 Hz 时,裂缝萌芽阶段所占据的时间增加 1 倍,当加载频率由 2 Hz 提高至 15 Hz 时,裂缝萌芽阶段所占据的时间增加 2 倍。虽然第 2 阶段的时间占比变化并不明显,但对比第 3 阶段裂缝特征可以发现,加载频率提高后,随着荷载作用次数的增加,裂缝由陡增逐渐变为缓慢增加。

3.3.2 裂缝类型及分布

在沥青混合料服务寿命期间内,试件内部会因不同应力的共同作用出现不同类型的裂缝,故在加载过程中,按照裂缝处的应力不同,将裂缝分为剪切型裂缝和张拉型裂缝,剪切型裂缝产生的原因是外部传递至颗粒接触间的剪应力超过此处接触力所能承担的最大剪应力,张拉型裂缝产生的原因则是由于传递至颗粒接触间的拉力超过了此处所能承担的最大拉力。以应力比 0.3 为例,裂缝随加载频率的变化形式如图 8 所示。

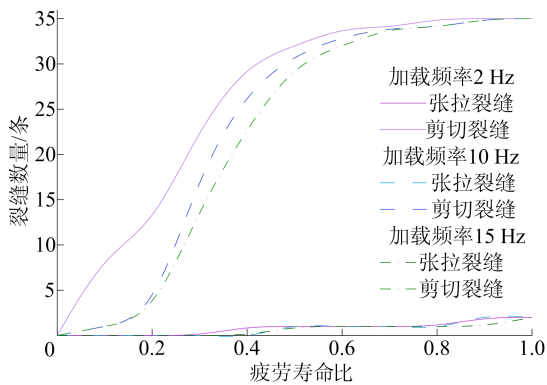


图 8 裂缝类型变化示意图

由图 8 可知,随着加载次数的增多,试件中最先出现的裂缝是在剪应力作用下形成的,随着作用次数的增加,试件中的剪切型裂缝逐渐增多,当沥青砂浆材料的黏结力不足以承担上部荷载的作

用力时,试件中出现张拉型裂缝,因为沥青砂浆材料间存在黏结作用,所以当试件出现宏观裂缝后,沥青砂浆材料成为荷载的主要承担者,试件并不会马上断裂,在后期主要由沥青材料承担作用在此处的荷载应力。通过对比各应力比下,张拉型裂缝发展曲线可以发现,随着加载频率的提高,试件中张拉型裂缝出现的时间更晚,但高频率下试件的服务寿命更长,因此在高频率作用下,会出现更多的张拉型裂缝。

3.4 接触力链

3.4.1 接触力链变化情况

为分析接触力链与应力、加载频率之间的关系,以应力比 0.3 为例,分析随着加载频率的提高,接触力链的变化情况。以加载频率 10 Hz 为例,分析随着应力比的增加,接触力链的变化情况,结果如图 9 所示。

图 9 中:接触力链的粗细表示接触力所承担的应力大小;蓝色力链表示试件内部颗粒之间的压力;红色表示试件中颗粒中拉力,接触力链越粗,颗粒之间的力越大。

为分析加载频率对颗粒接触力链的作用机理,选取图 9b 中的荷载作用次数 9 000 次为例,获取加载频率 2、15 Hz 时,试件中的接触力链分布情况(图 9e、图 9f)。由图 9a~图 9d 可知,加载开始前,颗粒之间的压力主要由粗集料承担,且层间位置处的接触力非常小;随着加载的进行,外部荷载传递的压力开始由上部集料进行传递,且试件中的压力逐渐变竖向传递;当试件中开始出现裂缝时,由于裂隙尖端效应的影响,在裂缝顶端位置处产生了较大的拉应力,并且试件中的应力集中分布在裂缝顶端附近位置处;当试件完全断裂不再承受外部荷载时,裂缝顶端位置处的应力减少。

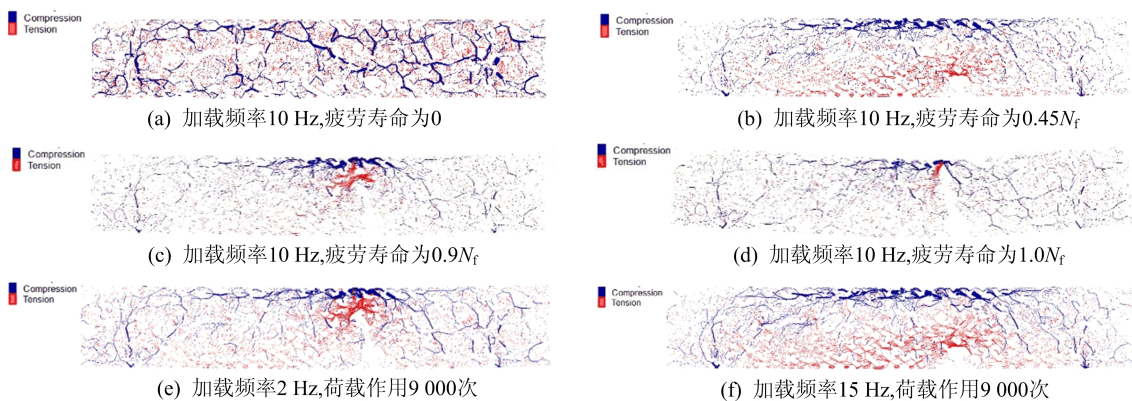


图 9 应力比 0.3 时接触力链变化情况

通过对比图 9b、图 9e 和图 9f 可以发现,在相同应力比、相同荷载作用次数下,颗粒接触力链的衰减速率随着加载频率的提高而减小,按照疲劳试验中加载频率与车辆行驶速度间的关系,因为疲劳试验中加载频率 10、15 Hz 分别代表行车速度为 60、80 km/h,所以同一加载频率下,二者接触力的分布变化并不明显。

3.4.2 能量变化

因颗粒由接触键相连接形成整体,当两颗粒之间的接触不足以承担传递在此的荷载作用时,接触力链会因此发生断裂,在其断裂时,会因摩擦力的作用而产生滑移能,因此记录了试件在发生破坏时内部能量的变化情况,结果如图 10 所示。

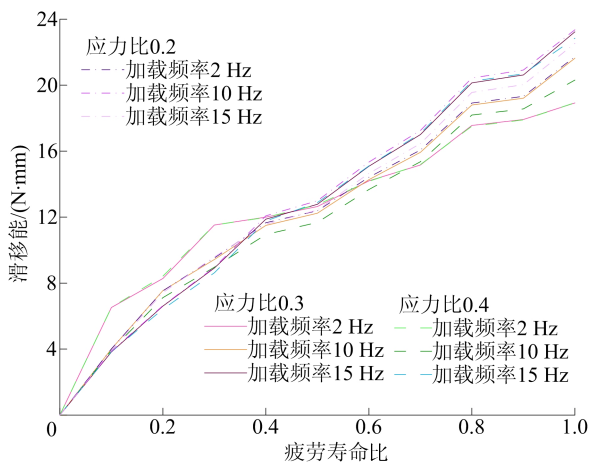


图 10 滑移应变能变化情况

由图 10 可知:各应力比、加载频率下,试件中滑移能的变化趋势基本相同,同一应力比下,随着加载频率的提高,因摩擦引起的滑移能前期增速缓慢,随着荷载作用次数的增多,试件中滑移能的增速逐渐提高;在同一加载频率下,滑移应变能随着荷载应力的提高,在前期阶段增速较快,在后期的增速逐渐趋于平稳阶段。由此可知,在低速、重载作用下,滑移耗散能在疲劳寿命前期显著增多,从而造成试件的损伤。因此在薄层罩面的使用过程中,应尤其注意使用前期,道路交叉口、公交车停靠站处的使用情况,避免因车速低、荷载大而产生的损伤。

4 结 论

本文通过室内试验与数值模拟相结合的方式,对不同应力比、加载频率下的含层间沥青混合料试件整体的弯曲疲劳性能进行分析,得出如下主要结论。

1) 含层间沥青混合料的疲劳寿命与试件所受的应力比呈负相关,与加载频率呈正相关。随着加载频率的提高,疲劳寿命对应力比的变化愈加敏感;随着应力比的增加,疲劳寿命与加载频率间的关系逐渐减弱。

2) 以沥青砂浆单轴压缩蠕变试验得到的参数为基础,建立了沥青混合料虚拟试件结构。经验证发现,宏、细观试验之间的结果差值在 3%~5%之间,满足试验对误差的要求。

3) 通过分析沥青混合料中裂缝发展规律,获得了裂缝与疲劳寿命比的变化曲线。裂缝的变化共分为萌芽、发展、扩展 3 个阶段,其中裂缝发展阶段主要为 $0.2N_f \sim 0.8N_f$ 期间,并且在该阶段试件内部产生的主要是剪切型裂缝。

4) 沥青混合料颗粒之间的黏结作用会随着外部荷载作用时间的增长而逐渐断裂,随着加载的进行,荷载逐渐变成竖向传递;由于裂隙尖端效应的影响,应力集中分布在裂缝顶端附近位置;颗粒接触力链的衰减速率、初期滑移能的增速与加载频率呈负相关。

[参 考 文 献]

- [1] 张春喜. 考虑抗滑性能的罩面沥青混合料配合比设计研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报,2020,33(10):1-66.
- [3] CHENG H, LIU J, SUN L, et al. Fatigue behaviours of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121675.
- [4] SHAFABAKHSH G, AHMADI S. Reflective cracking reduction by a comparison between modifying asphalt overlay and sand asphalt interlayer: an experimental evaluation [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(2):192-200.
- [5] WANG X, ZHONG Y. Influence of tack coat on reflective cracking propagation in semi-rigid base asphalt pavement [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 213:172-181.
- [6] 杨玉晶. 基于直剪试验的黏层黏结效果影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2):68-76, 102.
- [7] 孙妮. SBS 与 SBR 改性乳化沥青黏层油性对比分析[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [8] 周丹, 马泽欣, 刘黎萍, 等. 基于足尺加速加载试验的现役沥青路面疲劳特性研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(1):17-24.
- [9] 冯卫东, 营永明, 龚华勇. 沥青混合料弯曲疲劳性能演化规律的宏细观试验表征[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10):2984-2994.

- [10] 梁波,兰芳,郑健龙. 沥青的老化机理与疲劳性能关系的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9083-9096.
- [11] LV S T, TAN L, PENG X H, et al. Fatigue resistance design of rubberized asphalt mixture pavement under three-dimensional stress state[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 125138.
- [12] 杜健欢, 艾长发, 黄超, 等. 界面水对沥青复合小梁疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技, 2019, 36(3): 49-54.
- [13] ZHAO Q, LU X, JING S, et al. The fatigue mechanism of asphalt mixture with an interlayer under the combined effect of multiple factors[J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131428.
- [14] 冯云霞, 罗钰鸿, 牛开民, 等. 盐及环境耦合作用下沥青和混合料性能劣化规律及机理研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 107-116.
- [15] 叶向前. 基于离散元方法的薄层罩面沥青混合料力学特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [16] 易富, 葛丽娜, 赵琪琪. 基于颗粒离散元的沥青混合料尺寸效应及影响因素[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 1-10.
- [17] LIU G, ZHU C, HAN D, et al. Asphalt mixture force chains morphological characteristics and bearing capacities investigation using discrete element method[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(1): 2168660.
- [18] 吴文亮, 斯李, 卢家志. 基于虚拟单轴贯入试验研究集料对沥青混合料抗剪性能的影响[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 1-8.
- [19] 陈戈雨. 基于离散元法的再生沥青混合料疲劳特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [20] DING X, RATH P, OLIVER G, et al. Fracture modeling of rubber-modified binder based on discrete element method[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 135017.
- [21] 郑冬. 基于集料形貌特性的多孔沥青混合料空隙演变机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [22] YUAN G, LI X, HAO P, et al. Application of flat-joint contact model for uniaxial compression simulation of large stone porous asphalt mixes[J]. Construction and Building Materials, 238, 2020, 117695.
- [23] 郭泽宇. 基于三维离散元考虑损伤的沥青混合料剪切疲劳寿命研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [24] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 1-358.
- [25] 崔亚楠, 张强, 张翔. 沥青混合料复合小梁宏观与细观疲劳特性分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1): 85-90.
- [26] 张垚. 基于 PFC3D 的沥青混合料虚拟试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 489 页)

- [11] WANG L, SUN D, YAO Y, et al. Kinematic limit analysis of three-dimensional unsaturated soil slopes reinforced with a row of piles[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 120: 103428.
- [12] 姬建, 王乐沛, 廖文旺, 等. 基于 WUS 概率密度权重法的边坡稳定系统可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1492-1501.
- [13] 孙志豪, 谭晓慧, 孙志彬, 等. 基于上限分析的空间变异土质边坡可靠度[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3397-3406.
- [14] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(12): 1363-1388.
- [15] MICHALOWSKI R L. Limit analysis and stability charts for 3D slope failures[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2010, 136(4): 583-593.
- [16] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Design method for stabilizing piles against landslide: one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 21-37.
- [17] GUO X, DIAS D, PAN Q. Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113: 103093.
- [18] 谭晓慧, 董小乐, 费锁柱, 等. 基于 KL 展开的可靠度分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 808-816.
- [19] AHMED A, SOUBRA A H. Application of the subset simulation approach to spatially varying soils[J]. Risk and reliability in geotechnical engineering, 2018: 591-625.
- [20] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Risk assessment in geotechnical engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008: 461.

(责任编辑 吴亮)