

沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性多尺度研究

李友云¹, 陈佳¹, 王硕², 黄淼³, 黄开⁴

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省交通建设质量监督检测有限公司, 湖南 长沙 410014;
3. 湖南省官新高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410000; 4. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052)

摘要:【目的】探讨多尺度算法在研究沥青混合料劈裂疲劳损伤力学性能方面的有效性。【方法】通过划分 5 个尺度区域, 对 5 种不同级配的沥青混合料进行多尺度分析, 计算不同劈裂疲劳损伤程度下的劈裂强度, 并对比分析室内试验与多尺度算法得到的劈裂强度, 验证多尺度算法研究沥青混合料劈裂疲劳损伤力学性能的合理性。【结果】集料粒径为 1.18~2.36 mm 的沥青混合料的劈裂强度有较大幅度的提升; 多尺度算法与室内试验得到的劈裂强度相对误差的绝对值均在 10% 以内, 满足工程精度要求。【结论】用多尺度算法研究沥青混合料劈裂疲劳损伤力学性能具有可行性, 该算法在实际工程中具有一定的应用价值。

关键词: 沥青混合料; 多尺度算法; 劈裂疲劳损伤; 剩余劈裂强度

中图分类号: U 416.217

文献标志码: A

Multi-scale research on mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture

LI You-yun¹, CHEN Jia¹, WANG Shuo², HUANG Miao³, HUANG Kai⁴

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Traffic Construction Quality Supervision and Inspection Co., Ltd., Changsha 410114, China;
3. Hunan Guanxin Expressway Construction and Development Co., Ltd., Changsha 410000 China;
4. Communications Design & Research Institute Co., Ltd. of Jiangxi Prov., Nanchang 330052, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to explore the effectiveness of the multi-scale algorithm in studying the mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture. [Methods] By dividing five scale areas, the multi-scale analysis of five different gradations of asphalt mixtures was conducted, the splitting strengths were calculated under different fatigue damage degrees, the splitting strengths obtained by the indoor test and the multi-scale algorithm were compared and analyzed to verify the rationality of the multi-scale algorithm in studying the mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture. [Findings] The splitting strength of asphalt mixture with aggregate particle size of 1.18—2.36 mm has been greatly improved, the absolute values of relative errors between the splitting strengths obtained by the multi-scale algorithm and that obtained by the indoor test are all within 10%, which meets the engineering accuracy requirements. [Conclusions] The multi-scale algorithm is feasible to study the mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture, and has certain application value in practical engineering.

收稿日期: 2021-06-21

基金项目: 湖南省交通厅科技计划项目(201707)

通信作者: 李友云(1973—), 男, 教授, 主要从事道路结构与材料方面的研究。E-mail: liyouyun8@hotmail.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

Key words: asphalt mixture; multi-scale algorithm; split fatigue damage; residual splitting strength

沥青混合料由非弹性胶浆和任意分布的集料颗粒组成,其性能受沥青、集料和空隙等因素的空间分布的影响^[1-3]。关于沥青混合料力学性能的研究更多的是从宏观角度进行探究分析的。吕松涛等^[4]对沥青混合料进行了加速加载试验,并在不同加载次数下测定回弹模量,进而探究了刚度衰减与非线性疲劳损伤的演化规律。欧阳心和等^[5]通过对不同配合比的马歇尔试件进行劈裂试验,获取不同粒径集料的沥青混合料的劈裂抗拉强度,分析各档粒径集料对沥青混合料劈裂强度的影响以及劈裂强度的变化规律。

随着计算机性能与数字图像技术的不断发展和完善,学者们在沥青混合料细观结构的研究方面取得了丰硕的成果^[6-8]。蒋玮等^[9]基于图像处理及室内试验研究了多孔沥青混合料的细观空隙特征,得到了空隙率、粗细级配和公称最大粒径对多孔沥青混合料细观特征的影响规律,认为细观空隙特征与沥青混合料的性能密切相关。付军等^[10]采用数字图像处理技术建立二维细观有限元模型,对比分析有限元模拟结果与室内试验结果,得到细观尺度下沥青混合料内部力学响应规律。

多尺度计算方法被广泛应用于材料、岩土、航空和计算数学等多个学科领域,在基于非均质材料内部各组分的分布特征对非均质材料宏观性能力学参数进行预测,以及采用逐步均匀化的思想对随机非均匀复合材料疲劳损伤性能进行预测等方面均具有重要的研究意义^[11-12]。刘福明等^[13]利

用多尺度模型阐明了沥青混合料的微观结构,通过建立沥青混合料各组分的本构模型,对沥青混合料损伤的演化规律进行了研究。陈玉丽等^[14]介绍了用多尺度计算方法研究复合材料力学性能的发展进程,通过对常用的多尺度计算模拟方法的分析,解决了如何选取多尺度计算方法对复杂非均匀材料进行分析的问题。裴世源等^[15]用提出的确定性多尺度计算方法(有限元细胞法)进行了降尺度计算,并预测了非均质复合材料的力学性能。

本研究基于多尺度算法建立了沥青混合料不同尺度的模型,计算了沥青混合料不同疲劳损伤程度下的劈裂强度,对比分析了室内劈裂试验与多尺度算法得到的不同疲劳损伤程度下的劈裂强度,并证明了多尺度算法在研究沥青混合料疲劳损伤力学性能方面是有效的。

1 劈裂疲劳损伤试验

1.1 沥青混合料配合比设计

根据试验规范确定 AC-13C 集料筛分通过率的上、下限,合理确定集料的筛分通过率,由马歇尔试验确定最佳油石比。逐级去除上一级粒径的集料后,按照剩余各档集料质量比不变以及集料总比表面积与沥青用量之比不变的原则,确定各级细观组分 AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 等效基体的配合比,最终得到各档粒径集料沥青混合料的配合比设计结果,见表 1。

表 1 各档沥青混合料的级配设计

Table 1 Gradation design of each asphalt mixture %

沥青混合料类型	通过下列筛孔(方孔筛,mm)的质量百分率										油石比
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC-13C	100.0	96.0	73.0	48.0	35.0	30.0	19.0	16.0	9.0	6.0	5.2
AC-9.5	—	100.0	76.0	50.0	36.5	31.3	19.8	16.7	9.4	6.3	5.4
AC-4.75	—	—	100.0	65.8	48.0	41.1	26.0	21.9	12.3	8.2	7.0
AC-2.36	—	—	—	100.0	72.9	62.5	39.6	33.3	18.7	12.5	10.4
AC-1.18	—	—	—	—	100.0	85.7	54.3	45.7	25.7	17.1	14.1

1.2 试验结果

用试验机对直径 101.0 mm、高 63.5 mm 的

AC-13C、AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 圆柱体试件进行劈裂试验,得到各自的劈裂强度,见图 1。

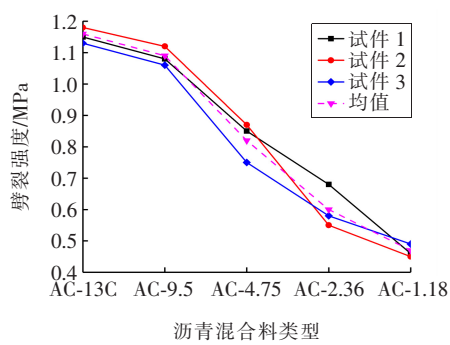


图 1 各档沥青混合料劈裂强度

Fig. 1 Splitting strength of each asphalt mixture

从图 1 可以看出,从 AC-13C 到 AC-1.18 沥青混合料,劈裂强度依次下降,其均值分别为 1.16、1.09、0.82、0.60 和 0.47 MPa。可见,随着沥青混合料上一级粒径集料的逐级去除,沥青混合料的劈裂强度相应降低。这表明在混合料试件中粗集料起着承载外力和抵抗变形的作用,而细集料起着填充间隙的作用,其抵抗外力的能力相对较弱。

在此基础上,在应力比为 0.3 的情况下,在 UTM 试验机上进行各试件 0% N_f 、20% N_f 、50% N_f 、65% N_f 、80% N_f (N_f 为疲劳寿命)损伤程度的劈裂疲劳损伤试验,测定不同损伤程度下 AC-13C 及含不同粒径集料沥青混合料的剩余劈裂强度。各档沥青混合料的劈裂疲劳寿命均值见表 2,沥青混合料剩余劈裂强度见图 2。

表 2 各档沥青混合料的劈裂疲劳寿命均值

Table 2 Average of splitting fatigue life of each asphalt mixture

沥青混合料类型	疲劳荷载/kN	疲劳寿命均值/次
AC-1.18	1.42	5 590
AC-2.36	1.82	6 973
AC-4.75	2.49	7 571
AC-9.5	3.30	7 836
AC-13C	3.50	7 993

从图 2 可以看出,随着疲劳损伤程度的增加,各试件内部集料碎裂、胶结料与骨料脱离开裂等损伤严重,各档沥青混合料的劈裂剩余强度不断减小。在疲劳损伤前期(损伤程度 0%~20%),劈裂强度衰减得比疲劳损伤中期(损伤程度 20%~70%)快;而在疲劳损伤后期(损伤程度 70%以后),劈裂强度衰减得更快。这表明在疲劳损伤前

期,各档沥青混合料的抗破坏能力较好,随着疲劳损伤程度的增大,各档沥青混合料的抗破坏能力迅速下降。

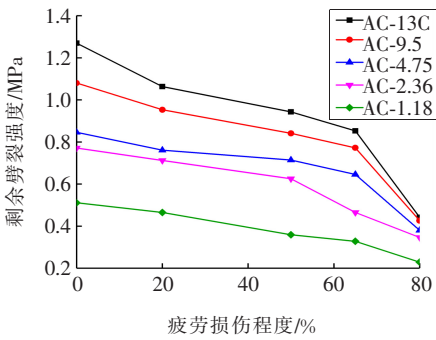


图 2 各档沥青混合料剩余劈裂强度

Fig. 2 Residual splitting strength of each asphalt mixture

2 劈裂疲劳损伤细观模型

2.1 细观结构扫描

通过 X-ray CT 扫描技术获取 AC-13C、AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 不同劈裂疲劳损伤程度的沥青混合料试件的 CT 扫描图像。由 CT 图像分析沥青混合料内部的疲劳损伤变化情况,根据双峰法定选合适的阈值,将各档粒径沥青混合料试件的内部基体、粗集料分离开来,对 CT 图像进行二值化处理,并提取其中的粗集料颗粒和空隙^[16]。

2.2 细观模型建立

沥青混合料随机复合材料由基体和各档集料构成,其中各档集料在统计窗中是以不规则多边形的形式随机分布的。图 3 所示为单个尺度颗粒统计窗 ϵ (常数 ϵ 表示一个尺寸很小的统计窗),图 4 所示为同一尺度颗粒统计域 Ω 。

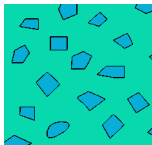


图 3 单个尺度颗粒统计窗 ϵ

Fig. 3 Statistical window ϵ for single size particle

对于沥青混合料这种随机分布材料,可把 ϵ 尺度大小的单胞体统计窗视为计算尺度。根据已知的各档沥青混合料二维细观模型中集料的随机分布情况,在含不同集料的沥青混合料的二维模

型区域建立合理的计算尺度(相当于 ϵ 大小的单胞体统计窗),其计算尺度区域为有限元软件中建立的正方形尺度区域统计窗。在单个颗粒统计窗 ϵ 中有 N 个多边形集料,根据数字图像技术可定量获取集料颗粒的形态特征。可按以下方式确定集料的随机参数:① 确定 ϵ 统计窗中集料颗粒中心点 (x_1^0, x_2^0) 的概率函数 $f_{x_1^0}(x)$ 、 $f_{x_2^0}(x)$ 。② 确定颗粒最大径长 a 、最短径长 b 的概率函数 $f_a(x)$ 、 $f_b(x)$ 。③ 确定边形数 k 的概率函数 $f_k(x)$ 。

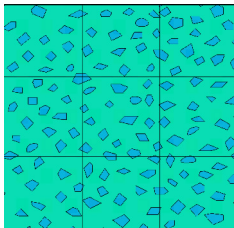


图4 同一尺度颗粒统计域 Ω

Fig. 4 Statistical domain Ω for same size particles

由单个统计窗定义的样本 ω_s 可表示为:

$$\omega_s = x_1^0, x_2^0, a_{1,s}, b_{1,s}, k_{1,s}, \dots, x_{N^0,s}, x_{N^0,s}, a_{N,s}, b_{N,s}, k_{N,s} \tag{1}$$

假设每一个单胞中集料颗粒的概率分布相

同,则统计域可看作是由多个单胞周期性组成的。因此,在每个单尺度统计窗内确定了颗粒分布,就可以确定整个统计域 Ω 的颗粒分布。对于 Ω ,令 $\omega = \{\omega_s, x \in \epsilon, Q_s \subset \Omega\}$,其力学参数可表达为 $\left\{a_{ijk}\left(\frac{x}{\epsilon}, \omega\right)\right\}$ 。又因为沥青混合料包含沥青基质体与骨料两种不同属性的材料,其力学性能参数 $a_{ijk,\epsilon}(x, \omega_s) = a_{ijk}\left(\frac{x}{\epsilon}, \omega_s\right)$ 可表达为:

$$a_{ijk,\epsilon}(x, \omega_s) = \begin{cases} a_{ijk,1}, & x \in e_{i_1} \\ a_{ijk,2}, & x \in (\epsilon Q_s - \bigcup_{i_1=1}^N e_{i_1}) \end{cases} \tag{2}$$

式中: ϵQ_s 为统计窗区域; e_{i_1} 为 ϵQ_s 中的第 i_1 个颗粒, $i_1 = 1, 2, \dots, N$; N 为统计窗中颗粒的数量。

由于统计区域 Ω 逻辑上是由一些服从同一概率分布且尺寸为 ϵ 的统计窗组成的,即 $\Omega = \bigcup_{(\omega_s, t \in Z)} \epsilon(Q_s + t)$ 。在 ϵ 统计窗内材料特性服从概率分布,在正方形区域内将生成的符合概率分布的数据的坐标绘制在尺度区域内,根据各档粒径集料在该尺度下的生成数量,即可得到各档粒径集料沥青混合料的二维 Abaqus 细观模型,如图 5 所示。

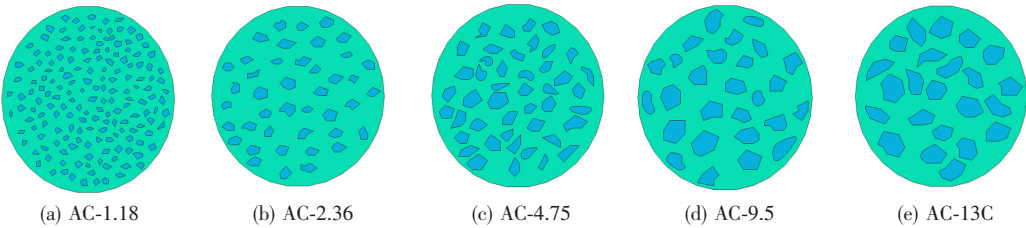


图5 各档沥青混合料的二维 Abaqus 细观模型

Fig. 5 2D Abaqus mesoscopic model of each asphalt mixture

2.3 疲劳过程刚度参数

AC-13C 及含不同粒径集料的沥青混合料是由多档集料及基体构成的复合材料。若将全部粒径的集料都建立在一个尺度模型内,会使同一个模型内包含大量粒径跨度较大的集料,进而会导致模型内集料分布杂乱无章甚至缺失的情况出现,影响计算结果。此外,在这种情况下有限元软件网格划分过程也特别复杂。因此,计算多粒径沥青混合料力学性能参数需要采用使不同尺度逐步均匀化的方法,且需满足尺度区域的尺寸为公

称最大粒径 5 倍以上的条件。各沥青混合料的计算尺度见表 3。

表3 各档沥青混合料的计算尺度

Table 3 Calculating scales of each asphalt mixture				
AC-1.18	AC-2.36	AC-4.75	AC-9.5	AC-13C
8 mm× 8 mm	17 mm× 17 mm	35 mm× 35 mm	55 mm× 55 mm	65 mm× 65 mm

多尺度算法计算不同集料尺度模型疲劳过程刚度参数的计算流程为:① 使用 Abaqus 有限元软件建立正方形沥青混合料尺度模型;② 给沥青

混合料疲劳过程对应的等效基体和骨料参数分别赋予尺度模型;③在网格划分中将模型选为 tri 单元,得到单元编号、边界节点以及节点坐标等信息;④将得到的有限元单元信息导入 MATLAB 程序,并输出材料文本信息;⑤根据编制的 C++ 程序处理文本信息,并计算得到由多尺度算法均匀化后的材料刚度参数^[17]。

根据该算法的计算流程,将得到的沥青砂的疲劳过程刚度参数作为 AC-1.18 基体材料的刚度参数。先均匀化 AC-1.18 的刚度参数,然后均匀化 AC-2.36 的刚度参数,接着均匀化 AC-4.75、AC-9.5 的刚度参数,最后均匀化 AC-13C 尺度模型得到其刚度参数。各档沥青混合料疲劳过程的刚度参数见表 4。

表 4 各档沥青混合料疲劳过程刚度参数

Table 4 Stiffness parameters of each asphalt mixture in fatigue process

材料类型	性质	参数	疲劳损伤程度				
			0% N_f	20% N_f	50% N_f	65% N_f	80% N_f
沥青砂	基体	弹性模量/MPa	356.700	288.100	258.100	209.900	150.800
		泊松比	0.320	0.320	0.330	0.330	0.340
1.18~2.36 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	—	—	32.700	—	—
		泊松比	—	—	0.210	—	—
AC-1.18	基体	弹性模量/MPa	962.716	867.946	801.719	417.206	317.423
		泊松比	0.306	0.310	0.313	0.314	0.318
2.36~4.75 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	—	—	40.500	—	—
		泊松比	—	—	0.200	—	—
AC-2.36	基体	弹性模量/MPa	1 291.429	1 180.291	969.669	837.818	463.794
		泊松比	0.282	0.285	0.288	0.292	0.296
4.75~9.5 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	—	—	48.100	—	—
		泊松比	—	—	0.200	—	—
AC-4.75	基体	弹性模量/MPa	1 429.520	1 324.711	1 128.416	896.373	485.270
		泊松比	0.274	0.277	0.279	0.283	0.285
9.5~13.2 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	—	—	55.400	—	—
		泊松比	—	—	0.200	—	—
AC-9.5	基体	弹性模量/MPa	1 672.678	1 602.186	1 229.243	937.553	529.589
		泊松比	0.266	0.271	0.275	0.278	0.282
13.2~16 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	—	—	61.500	—	—
		泊松比	—	—	0.190	—	—
AC-13C	基体	弹性模量/MPa	1 921.717	1 726.733	1 293.354	1 030.066	577.707
		泊松比	0.265	0.267	0.269	0.274	0.280

3 劈裂强度的计算方法

劈裂强度获取的基本思路是:以有限元计算软件模拟二维劈裂抗拉试验,首先,给圆柱模型试件添加荷载上压条及约束下压条,下压条宽度为 12.7 mm、内侧曲率半径为 50.5 mm;然后,将上

压条作用于模型并沿竖直方向向下压,采用分级加载方法控制上压条的竖向位移;最后,当满足破坏准则,即模型应变达到试验应变时,导出内部拉应力最大值的均值作为劈裂强度。

3.1 劈裂试验数值计算

1) 在 Abaqus 有限元软件的 Property 模块中给材料赋予相应的属性,按照《公路工程沥青及沥

青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中对沥青混合料劈裂试验的要求,在模型底部设置下压条(宽度为 12.7 mm、内侧曲率半径为 50.5 mm),使刚体固定并保持全约束状态($x=y=z=0$)。上压条尺寸与下压条相同,在 Load 模块里设置上压条刚体材料($x=z=0$)。在劈裂试验过程中,下压条的位置固定不变,上压条沿 y 方向向下移动。劈裂试件的受力状态及破坏形式如图 6~7 所示。

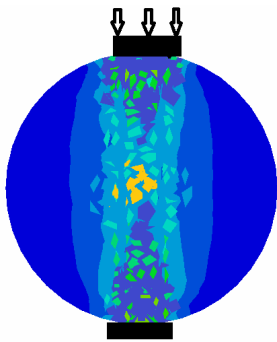


图 6 劈裂试件受力状态
Fig. 6 Force state of split specimen

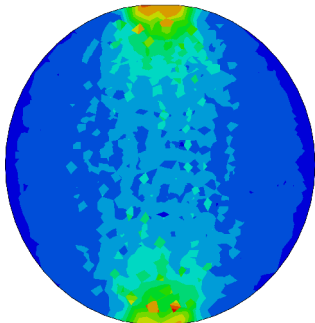


图 7 劈裂试件破坏形式
Fig. 7 Failure mode of split specimen

2) 设定沥青混合料试件破坏准则,根据破坏准则中峰值荷载对应的竖向位移,在 Abaqus 的 Step 模块中设置 20 个竖向位移增量步,即将竖向位移分为 20 步进行;设定上压条竖直方向每一步的下压位移量,当下压位移量达到竖向破坏位移时,试件破坏。每一步的下压位移量 Δh 为:

$$\Delta h = \text{峰值荷载对应的竖向位移}/20 \quad (3)$$

以无损情况下的 AC-1.18 沥青混合料为例,其试验峰值荷载对应的竖向位移为 5.16 mm。在 Abaqus 中设置竖向位移为 5.4 mm,将其分为 20 个下压步,则每个下压步的位移为 0.27 mm。在劈裂试验过程中,可得到 AC-1.18 沥青混合料的应力、应变和位移参数。

3) 由细观模型模拟出的力学参数呈非线性变化。非线性有限元分析采用增量迭代法,在 Step 模块中选择通用分析步用于非线性分析。将变量输出为二进制文本(Odb),供 CAE 后处理。

4) 在模型、力学、输出参数设置完成后,由 Job 进行提交。在 Monitor 中监测迭代步数,完成进度等步骤,最后输出力学分析需要的参数。

3.2 强度破坏准则

在 Abaqus 有限元软件庞大的力学参数数据中,筛选出达到沥青混合料极限强度的参数较困难。因此,在数值模拟过程中需设定不同损伤程度的沥青混合料破坏极限的参数,例如劈裂破坏强度、破坏时压条竖向位移、沥青混合料竖向应变等。为合理设置材料的属性参数,选取数值模拟破坏时所对应的压条竖向位移(即达到试件极限拉应力),来判断试件是否已达到破坏状态。疲劳损伤过程中各档沥青混合料破坏时的参数见表 5。

表 5 疲劳损伤过程中各档沥青混合料破坏时的参数

Table 5 Failure parameters of each asphalt mixture in fatigue damage process

沥青混合料类型	劈裂试验参数	疲劳损伤程度				
		0% N_f	20% N_f	50% N_f	65% N_f	80% N_f
AC-1.18	峰值荷载/kN	5.115	4.662	3.615	3.275	2.276
	劈裂强度/MPa	0.511	0.465	0.359	0.328	0.229
	峰值荷载对应的竖向位移/mm	5.16	5.56	6.52	8.01	8.51
AC-2.36	峰值荷载/kN	7.703	7.091	6.264	4.582	3.356
	劈裂强度/MPa	0.771	0.712	0.625	0.465	0.346
	峰值荷载对应的竖向位移/mm	4.33	4.91	5.86	6.52	8.11
AC-4.75	峰值荷载/kN	8.542	7.689	7.211	6.523	3.842
	劈裂强度/MPa	0.846	0.761	0.714	0.646	0.380
	峰值荷载对应的竖向位移/mm	4.03	4.67	5.41	5.82	7.21

表 5 (续)
Table 5 (continued)

沥青混合料类型	劈裂试验参数	疲劳损伤程度				
		0% N_f	20% N_f	50% N_f	65% N_f	80% N_f
AC-9.5	峰值荷载/kN	10.905	9.627	8.493	7.799	4.301
	劈裂强度/MPa	1.080	0.953	0.841	0.772	0.426
	峰值荷载对应的竖向位移/mm	3.12	3.28	3.52	4.17	4.65
AC-13C	峰值荷载/kN	12.832	10.741	9.525	8.613	4.467
	劈裂强度/MPa	1.270	1.063	0.943	0.853	0.442
	峰值荷载对应的竖向位移/mm	2.91	3.10	3.29	3.54	4.79

3.3 劈裂强度的结果分析

将沥青砂浆的抗拉强度作为 AC-1.18 的基体参数,并将含小粒径集料的 AC-1.18 的力学参数作为初始迭代值和下一级基体参数代到 AC-2.36 的材料力学属性中,模拟劈裂试验过程,得出强度指标等参数。通过逐层迭代的多尺度数值试验方法,得到沥青混合料的疲劳过程及劈裂强度。列出含不同粒径集料沥青混合料经数值模拟得到的劈裂强度,计算每层迭代后的强度差值百分率,即:

强度差值百分率 = $100\% \times (\text{该级劈裂强度} - \text{上一级劈裂强度}) / \text{上一级劈裂强度}$ (4)

各档沥青混合料的劈裂强度和强度差值百分率如图 8~9 所示。

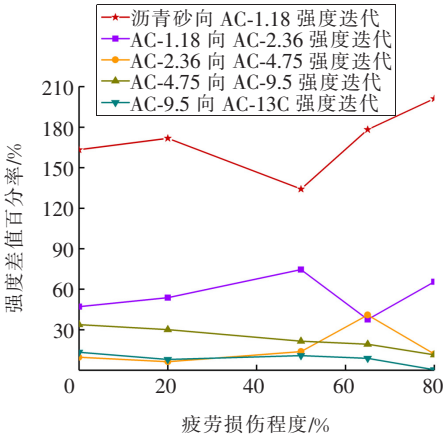


图 9 各档沥青混合料的强度差值百分率
Fig. 9 Percentage of strength difference of each asphalt mixture

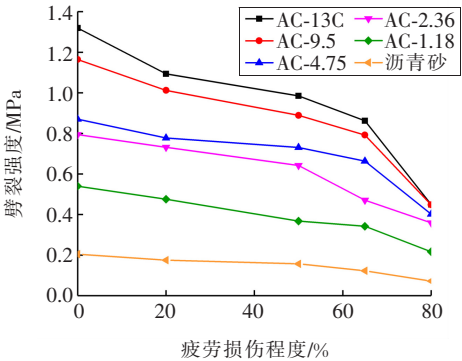


图 8 各档沥青混合料的劈裂强度

Fig. 8 Splitting strength of each asphalt mixture

由图 8~9 可知,随着疲劳损伤程度的增加,沥青混合料的劈裂强度呈现衰减趋势;沥青砂向 AC-1.18 强度迭代的强度差值百分率明显高于其他相邻层次,相邻两层之间强度差值百分率越大,说明在同一种沥青混合料试件中该级集料与上一级集料的强度变化越大,即 1.18~2.36 mm 集料的加入使得含该档集料沥青混合料的劈裂强度得到了较大幅度的提升。

4 多尺度算法与劈裂疲劳试验结果的对比

为判断由多尺度算法计算得到的沥青混合料的劈裂强度是否满足精度要求,将其与室内劈裂疲劳试验结果进行对比分析。根据多层迭代的思路,按照 AC-1.18、AC-2.36、AC-4.75、AC-9.5、AC-13C 的顺序依次对比分析各沥青混合料的差异性和有效性。图 10 所示为 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度的对比,图 11 所示为 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度的误差。

从图 10~11 可以看出,无论是多尺度数值模拟结果还是试验结果,AC-1.18 沥青混合料的劈裂强度均随着疲劳损伤程度的加剧而呈下降趋势,但数值模拟结果整体上大于试验结果。其原因可能是影响室内劈裂试验的因素较多,如试验加载器具、骨料差异、沥青混合料试件本身存在空隙、微裂纹等,使测得的劈裂强度偏小。而在数值

模拟中,材料参数的赋值、加载过程等没有差异,二维细观模型内也不存在空隙等因素。虽然由两种方法得到的劈裂强度有所差异,但二者的绝对误差均在 0.03 MPa 以内,相对误差的绝对值也均在 10% 以内,满足精度要求。

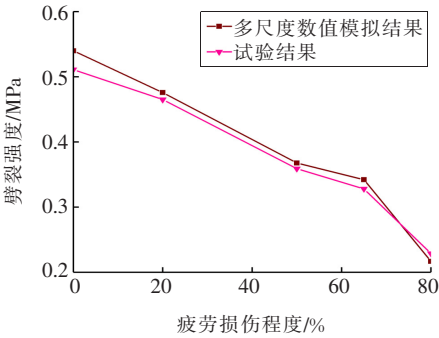


图 10 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度对比
Fig. 10 Comparison of splitting strength of AC-1.18 asphalt mixture

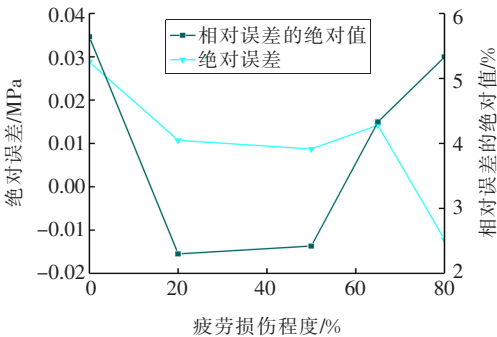


图 11 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度误差
Fig. 11 Error of splitting strength of AC-1.18 asphalt mixture

图 12 所示为 AC-2.36 沥青混合料劈裂强度的对比,图 13 所示为 AC-2.36 沥青混合料劈裂强度的误差。从图 12~13 可以看出,随着疲劳损伤程度的增加,AC-2.36 沥青混合料的劈裂强度从 0.80 MPa 左右衰减至 0.35 MPa 左右,疲劳损伤前期(0%~40%)的强度衰减速率小于损伤中后期(40%~80%)的衰减速率,表明该档集料对提升疲劳损伤前期的劈裂强度更有利。对于 AC-2.36 沥青混合料的劈裂强度,多尺度数值模拟结果大于试验结果,但两者相对误差的绝对值均在 4% 以内,且与上一级 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度的相对误差相比,AC-2.36 沥青混合料的更小,说明该级别沥青混合料劈裂强度的数值模拟结果更接近试验结果。

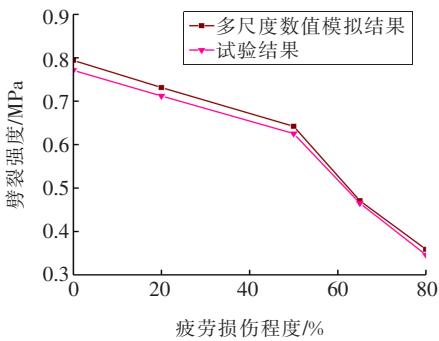


图 12 AC-2.36 沥青混合料劈裂强度对比
Fig. 12 Comparison of splitting strength of AC-2.36 asphalt mixture

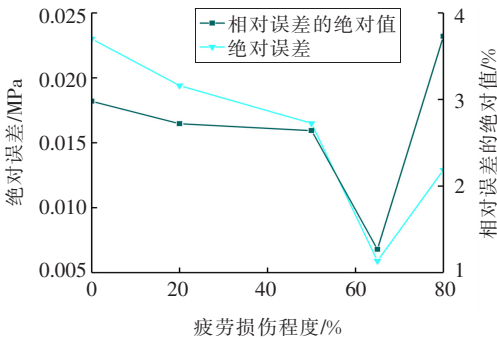


图 13 AC-2.36 沥青混合料劈裂强度误差
Fig. 13 Error of splitting strength of AC-2.36 asphalt mixture

图 14 所示为 AC-4.75 沥青混合料劈裂强度的对比,图 15 所示为 AC-4.75 沥青混合料劈裂强度的误差。从图 14~15 可以看出,随着疲劳损伤程度的增加,AC-4.75 沥青混合料的劈裂强度从 0.85 MPa 左右衰减至 0.38 MPa 左右。与 AC-1.18 沥青混合料劈裂强度衰减趋势不同的是,AC-4.75 沥青混合料劈裂强度的衰减呈现出在疲劳损伤前期和中期(0%~70%)衰减慢、后期(70%~80%)衰减快的特点。在疲劳损伤后期,劈裂强度突然下降,说明该档集料在疲劳损伤的前期和中期能保持良好的抗疲劳性能。AC-4.75 沥青混合料劈裂强度相对误差的绝对值均在 6% 以内,精度满足要求。

图 16 所示为 AC-9.5 沥青混合料劈裂强度的对比,图 17 所示为 AC-9.5 沥青混合料劈裂强度的误差。从图 16~17 可以看出,随着疲劳损伤程度的增加,AC-9.5 沥青混合料的劈裂强度从 1.20 MPa 左右降至 0.40 MPa 左右。在疲劳损伤过程的前期和中期,劈裂强度大致呈线性衰减趋势,并衰减

至 0.80 MPa 左右;在疲劳损伤程度为 65%时,劈裂强度骤降;并在疲劳损伤程度为 80%时,降至 0.40 MPa 左右,说明该档集料在前期及中期抵挡疲劳损伤的作用明显。AC-9.5 沥青混合料劈裂强度的绝对误差从疲劳损伤前期的 0.08 MPa 左右降至后期的 0.02 MPa 左右,说明在前期和中期数值模拟结果与试验结果相差较大,但从相对误差的角度来看,劈裂强度相对误差的绝对值均在 7% 以内,满足精度要求。

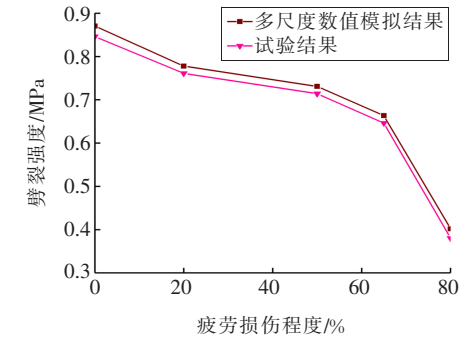


图 14 AC-4.75 沥青混合料劈裂强度对比
Fig. 14 Comparison of splitting strength of AC-4.75 asphalt mixture

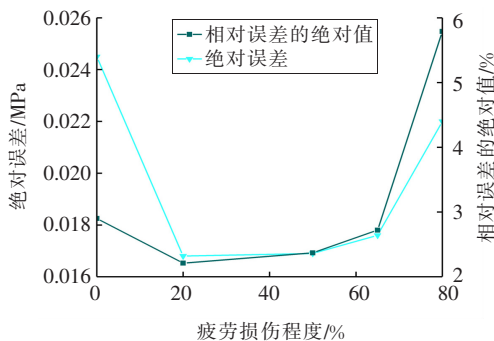


图 15 AC-4.75 沥青混合料劈裂强度误差
Fig. 15 Error of splitting strength of AC-4.75 asphalt mixture

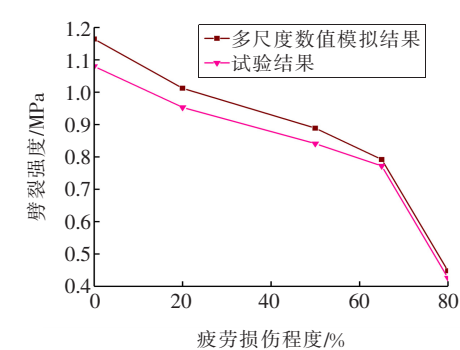


图 16 AC-9.5 沥青混合料劈裂强度对比
Fig. 16 Comparison of splitting strength of AC-9.5 asphalt mixture

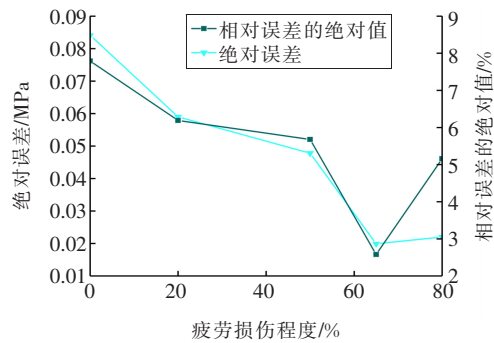


图 17 AC-9.5 沥青混合料劈裂强度误差
Fig. 17 Error of splitting strength of AC-9.5 asphalt mixture

图 18 所示为 AC-13C 沥青混合料劈裂强度的对比,图 19 所示为 AC-13C 沥青混合料劈裂强度的误差。

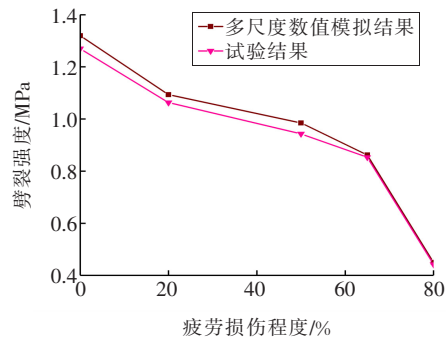


图 18 AC-13C 沥青混合料劈裂强度对比
Fig. 18 Comparison of splitting strength of AC-13C asphalt mixture

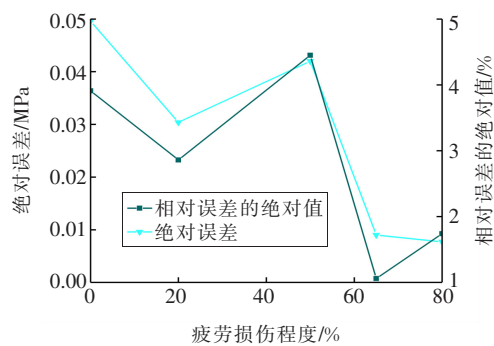


图 19 AC-13C 沥青混合料劈裂强度误差
Fig. 19 Error of splitting strength of AC-13C asphalt mixture

从图 18~19 可以看出,随着疲劳损伤程度的增加,AC-13C 沥青混合料的劈裂强度从开始的 1.30 MPa 左右降至中期的 0.90 MPa 左右,最终骤降至后期的 0.40 MPa 左右,整体呈前期和中期慢、后期快的衰减规律。与 AC-1.18、AC-2.36 和

AC-4.75 沥青混合料相比,AC-13C 沥青混合料劈裂强度的绝对误差较小,为 0.01~0.05 MPa;与 AC-9.5 沥青混合料相比,基本持平。AC-13C 沥青混合料劈裂强度相对误差的绝对值均在 5% 以内,数值模拟结果与试验结果之间的误差满足精度要求。

为分析不同疲劳损伤程度下 AC-13C 及各档粒径沥青混合料误差的变化规律及误差形成的原因,将各档沥青混合料劈裂强度的绝对误差和相对误差的绝对值汇总并绘制成图,结果如图 20~21 所示。

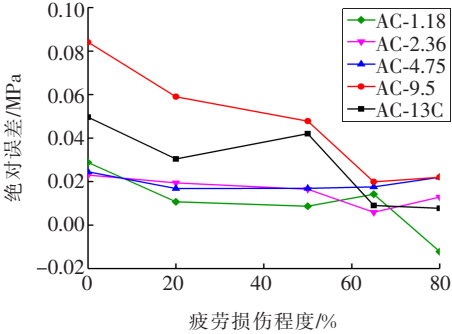


图 20 各档沥青混合料劈裂强度的绝对误差
Fig. 20 Absolute error of splitting strength of each asphalt mixture

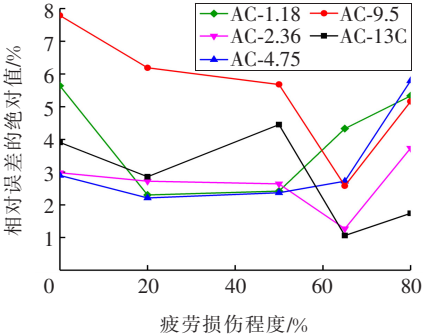


图 21 各档沥青混合料劈裂强度相对误差的绝对值
Fig. 21 Absolute value of relative error of splitting strength of each asphalt mixture

从图 20~21 可以看出,在疲劳损伤过程的前期和中期,沥青混合料劈裂强度的试验结果与数值模拟结果之间的误差较为稳定,但在疲劳损伤后期,误差波动明显。出现这种现象的原因有两点:一是由基于多尺度算法建立的沥青混合料二维细观模型得出的劈裂强度与由试验得出的劈裂强度之间存在一定的误差;二是多尺度算法是一种从含小粒径集料的沥青混合料逐步迭代至含较

大粒径集料的沥青混合料,并计算沥青混合料劈裂强度的方法,所以在计算沥青混合料的劈裂强度时,就有可能将上一级劈裂强度的误差传递到下一级劈裂强度的计算中。当然,由于模型数量有限或模型建立时骨料的分布、形状和尺寸等的影响,都会使沥青混合料劈裂强度的数值模拟结果与试验结果之间存在偏差,但最终劈裂强度相对误差的绝对值均在 10% 以内,满足工程中误差精度的要求。

5 结论

本研究以 AC-13C 及含不同粒径集料的 AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 沥青混合料的细观力学特性为研究对象,由基于多尺度算法建立的沥青混合料二维细观模型计算出了不同疲劳损伤程度下各档沥青混合料的劈裂强度,并与室内劈裂试验结果进行了对比分析,得到如下结论:

1) 通过劈裂疲劳试验得到了不同疲劳损伤程度下各档沥青混合料试件的劈裂强度。随着粗集料被逐级剔除,对应试件的劈裂强度在不断减小,说明粗集料在试件抵抗疲劳破坏的过程中起主要作用。

2) 在疲劳损伤过程的前期和中期,沥青混合料试件劈裂强度试验结果与数值模拟结果之间的误差比较稳定;但在疲劳损伤后期,该误差波动较大,表明数值模拟结果的精度有所降低。

3) 粒径为 1.18~2.36 mm 集料的加入对沥青混合料劈裂强度的大幅提升起了关键的作用。

4) 由多尺度数值模拟方法计算得到的劈裂强度和由劈裂疲劳试验测得的劈裂强度之间的误差是客观存在的。但两者之间相对误差的绝对值均在 10% 以内,该精度可以满足工程需要,说明用多尺度算法计算沥青混合料疲劳过程的劈裂强度是有效的。

〔参考文献〕

[1] 谭忆秋,邢超,任俊达,等. 基于颗粒堆积理论的沥青混合料细观结构特性研究[J]. 中国公路学报,2017, 30(7):1-8.
TAN Yi-qiu, XING Chao, REN Jun-da, et al. Research on mesostructured characteristics of asphalt

- mixture based on particle packing theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 1-8.
- [2] 牛冬瑜, 谢希望, 窦晖, 等. 粗集料接触参数对沥青混合料力学性能影响分析[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(3): 265-271.
- NIU Dong-yu, XIE Xi-wang, DOU Hui, et al. Impact analysis of contact parameters of coarse aggregate on mechanical properties of asphalt mixture[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(3): 265-271.
- [3] 张辉, 潘友强, 张志祥, 等. 玄武岩—页岩混杂增强的沥青混合料路用性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 16-23.
- ZHANG Hui, PAN You-qiang, ZHANG Zhi-xiang, et al. Experimental study on pavement performance of basalt-shale hybrid reinforced asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2021, 18(4): 16-23.
- [4] 吕松涛, 陈杰. 基于加速加载试验的沥青混合料刚度衰变规律研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 1-6, 13.
- LYU Song-tao, CHEN Jie. Study on stiffness decay regularity of asphalt mixture based on accelerated loading test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5): 1-6, 13.
- [5] 欧阳心和, 李友云, 李沛洪, 等. 含不同粒径集料沥青混合料劈裂抗拉强度研究[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 300-304.
- OUYANG Xin-he, LI You-yun, LI Pei-hong. Study on splitting tensile strength about asphalt mixtures with different diameter aggregates[J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 300-304.
- [6] 蔡旭, 祝凤丹, 吴旷怀, 等. 沥青混合料骨架稳态参数及模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 39-46, 96.
- CAI Xu, ZHU Feng-dan, WU Kuang-huai, et al. Steady-state parameters and model for asphalt mixture skeletons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 39-46, 96.
- [7] LI P L, SU J F, MA S S, et al. Effect of aggregate contact condition on skeleton stability in asphalt mixture[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(2): 196-202.
- [8] 朱默, 黄博, 李友云, 等. 基于沥青混合料疲劳损伤细观力学性能的预防性养护研究[J]. 公路与汽运, 2020(1): 76-80, 101.
- ZHU Mo, HUANG Bo, LI You-yun, et al. Research on preventive maintenance based on the micromechanical properties of fatigue damage of asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1): 76-80, 101.
- [9] 蒋玮, 沙爱民, 肖晶晶, 等. 多孔沥青混合料的细观空隙特征与影响规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 67-74.
- JIANG Wei, SHA Ai-min, XIAO Jing-jing, et al. Microscopic void features and influence of porous asphalt concrete[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(1): 67-74.
- [10] 付军, 刘洁, 雷力, 等. 沥青混合料劈裂试验的细观有限元模拟与测试[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 419-427.
- FU Jun, LIU Jie, LEI Li, et al. On the mesoscopic finite element simulation and measurement of bituminous mixture splitting experiment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3): 419-427.
- [11] GHAVAMIAN F, SIMONE A. Accelerating multi-scale finite element simulations of history-dependent materials using a recurrent neural network[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 357: 112594.
- [12] SU H Z, HU J, LI H. Multi-scale performance simulation and effect analysis for hydraulic concrete submitted to leaching and frost[J]. Engineering with Computers, 2018, 34(4): 821-842.
- [13] 刘福明, 王端宜. 沥青混合料损伤演化的多尺度模拟[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 1-6.
- LIU Fu-ming, WANG Duan-yi. Multiscale simulation of damage evolution of asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 1-6.
- [14] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(1): 1-68.
- CHEN Yu-li, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(1): 1-68.
- [15] 裴世源, 徐华. 非均质复合材料力学性能的不确定性多尺度计算方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 8-13, 28.
- PEI Shi-yuan, XU Hua. Deterministic multiscale method for heterogeneous composite material[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 8-13, 28.

(下转至第 80 页)