

文章编号:1674-599X(2022)04-0001-09

多尺度算法预测沥青混合料剪切疲劳剩余强度

李友云¹,张宇辉¹,何敏²,李宜航¹,陈佳¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.深圳市交通工程试验检测中心有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:为研究沥青混合料的剪切疲劳剩余强度,基于沥青混合料细观结构和多尺度算法建立二维剪切试验数值模型。根据多尺度算法及有限元数值模拟,逐级预测沥青混合料的疲劳剩余强度,并与剪切疲劳剩余强度的试验结果进行了对比。研究表明:沥青混合料细观力学尺度模型能够反映基体及集料对沥青混合料疲劳损伤的影响;多尺度算法逐级预测沥青混合料剪切疲劳剩余强度,避免了在建模过程出现集料缺失的情况;沥青混合料剪切试验获得的剪切疲劳强度与多层迭代算法预测值之间的误差较为稳定,能满足工程要求。

关键词:沥青混合料;剪切疲劳损伤;多尺度预测;细观结构

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Prediction of residual shear fatigue strength of asphalt mixture by multi-scale algorithm

LI youyun¹, ZHANG Yuhui¹, HE Min², LI Yihang¹, CHEN Jia¹

(1.School of Transportation and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Shenzhen Traffic-engineering Testing & Detection Center Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to study the residual shear fatigue strength of asphalt mixture, a two-dimensional numerical model of shear test was established based on the micro-structure of asphalt mixture and the multi-scale algorithm. According to the multi-scale algorithm and the finite element numerical simulation, the fatigue residual strength of asphalt mixture was predicted gradually, and that was compared with the shear residual strength of the test. The results show that the meso-mechanical scale model of asphalt mixture can reflect the influence of matrix and aggregate on the fatigue damage of asphalt mixture. The residual shear fatigue strength of asphalt mixture is predicted gradually by the multi-scale algorithm, which can avoid the absence of aggregate in the modeling process. The error between the fatigue shear strength obtained by the asphalt mixture shear test and the predicted value of the multi-layer iterative algorithm is relatively stable, which meets the engineering requirements.

Key words: asphalt mixture; shear fatigue damage; multi-scale prediction; microstructure

随着计算机技术快速发展,科研人员开始研究沥青混合料内部细观结构对路用性能的影响。DAI^[1]利用X-ray CT图像扫描技术获得沥青混合料内部细观结构,建立了2D和3D有限元模型,通过虚拟加载试验模拟预测出混合料的动态模量和相位角。万成等人^[2]利用数字图像处理技术与有限元建模相结合的方法,建立了沥青混合料三维数值模

型,对数值模型中的混合料单元体进行提取,准确分割出混合料中的集料、砂胶和空隙。张肖宁^[3-4]利用数字图像技术对沥青混合料体积组成、差异性物质辨识、沥青混合料内部结构组成的三维图像重构等开展研究,提出了一个沥青混合料技术研究路线。罗旋等人^[5]研究了骨料粒径对沥青混合料强度的影响,为细观状态下沥青混合料细观参数的获取

收稿日期:2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(11072041)

作者简介:李友云(1973—),男,长沙理工大学教授,博士。

提供了方法。邵腊庚等人^[6]通过对沥青进行微观结构和力学性能试验研究不同制备方法对沥青的影响。朱默等人^[7]对沥青混合料细观内部疲劳损伤进行研究,提出了基于细观力学性能的养护维护方法。

多尺度算法作为本构模型中均质理论的一个方面,在确定材料内部各组成部分分布特征基础上预测非均质材料宏观性能力学参数,采用逐步均匀化的方法对随机非均匀复合材料进行疲劳损伤性能预测。KIM等人^[8]采用连续热力学理论对沥青混合料建立多尺度模型,用有限单元法进行分析,发现用多尺度模型预测大结构尺寸能够减少计算工作量。刘福明等人^[9]采用多尺度有限元建模方法建立模型,模拟沥青混合料的间接拉伸情况,将数值模拟结果与试验结果比对,所建模型可以分析由集料和裂纹的分布及定位引起的各向异性,可以计算及评价沥青混合料的性能。陈玉丽等人^[10]介绍了多尺度复合材料力学研究发展进程,将多尺度分析方法应用于非均质材料力学性能的试验中,解决了对于非均匀连续介质和离散体系如何进行多尺度分析的问题。牛冬瑜等人^[11]对沥青混合料细观损伤尺度效应开展研究,发现选择合适的颗粒接触主力链配位参数可以优化混合料内部骨架细观结构,

有利于沥青混合料抗疲劳能力。

目前,从细观角度研究剪切条件下沥青混合料疲劳剩余强度较少,本研究基于沥青混合料细观结构和多尺度算法,预测剪切条件下沥青混合料疲劳剩余强度,并将预测结果与剪切剩余强度试验结果比对,验证算法的有效性。

1 沥青混合料剪切疲劳剩余强度试验与细观骨料分布统计

本研究主要研究 AC-13C 沥青混合料,在 AC-13C 沥青混合料中包含有不同粒径的细集料,为便于逐级预测沥青混合料剪切疲劳强度,把 AC-13C 沥青混合料的细集料划分:AC-4.75 是体现 4.75~9.5 mm 集料特性沥青混合料;AC-9.5 是体现 9.5~13.2 mm 集料特性的沥青混合料;AC-13C 是体现 13.2~16 mm 集料特性的沥青混合料。

1.1 AC-13C 及含不同粒径集料沥青混合料配合比设计

AC-13C 及含不同粒径集料沥青混合料配合比见表 1。根据相应配比设计可制得 AC-13C 沥青混合料及 AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36 标准马歇尔试件。

表 1 AC-13C 及含不同粒径集料沥青混合料级配设计

Table 1 AC-13C and asphalt mixture gradation design with different particle size aggregate

混合料	通过筛孔(mm)的质量分数/%										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	97.0	71.0	50.0	35.0	28.0	19.0	15.0	9.0	6.0	5.00
AC-9.5	-	100.0	73.2	51.5	36.1	28.9	19.6	15.5	9.3	6.2	5.15
AC-4.75	-	-	100.0	70.4	49.3	39.5	27.2	21.5	12.9	8.6	6.64
AC-2.36	-	-	-	100.0	70.0	56.1	38.6	30.5	18.3	12.2	9.42

1.2 沥青混合料疲劳损伤程度划分

根据 Miner 线性损伤理论,疲劳损伤模型的表达式为:

$$N = N_i/N_f$$

式中: N 为疲劳损伤程度; N_i 为荷载循环次数; N_f 为疲劳寿命。

假设试件在不变的荷载循环作用下损伤呈线性演化,即疲劳损伤程度与荷载循环作用次数 N_i 成正比。通过设定 0%、20%、50%、65% 和 80% 五种疲

劳损伤程度,研究多尺度预测各档沥青混合料在不同疲劳损伤程度下剪切疲劳强度的有效性。通过在 0.3 应力水平下设定疲劳荷载值及加载次数进行相应的剪切疲劳试验,得到 0%、20%、50%、65% 和 80% 不同疲劳损伤程度的各材料试件^[12]。

1.3 AC-13C 及含不同粒径集料沥青混合料剪切疲劳剩余强度

对已有 0%、20%、50%、65% 和 80% 损伤程度试件进行剪切疲劳剩余强度试验,得出各试件剪切疲劳

剩余强度。获得各类沥青混合料剪切剩余强度见表2。

表2 各类沥青混合料剪切疲劳剩余强度

Table 2 Residual shear strength of various asphalt

疲劳损伤程度/%	mixtures				MPa
	各细观组分材料试件				
	AC-13C	AC-9.5	AC-4.75	AC-2.36	
0	1.265	1.147	0.732	0.486	
20	1.063	0.997	0.658	0.450	
50	0.933	0.852	0.618	0.395	
65	0.839	0.754	0.559	0.326	
80	0.424	0.417	0.329	0.219	

1.4 沥青混合料细观结构获取

借助工业CT扫描技术获取沥青混合料内部骨料分布状态及其分布规律,为沥青混合料多尺度建模提供重要的依据。沿轴向从高度为15 mm位置开

始,分别对AC-13C、AC-9.5、AC-4.75三种沥青混合料的圆柱体标准马歇尔试件每隔2 mm进行逐层扫描,获得同一试件4张不同层位的CT扫描图片,基于OSTU(最大类间方差)分割法,利用MATLAB分析软件对扫描图片进行二值化处理,通过设置不同阈值将空隙、基体与粗集料分离开。AC-13C沥青混合料的CT扫描图像和二值化图像见表3。

1.5 沥青混合料各档粒径集料统计模型的建立

通过MagicEye·ICT数字图像分析软件,对获取的沥青混合料内部CT扫描图像进行图像测量,测量沥青混合料各档粒径集料中心点坐标、集料直径、集料边形数、集料数目及空间分布特性等。统计各档粒径集料的数量、直径、边数等分布规律,为细观模型的建立作铺垫。各档粒径沥青混合料集料径长分布规律汇总表4,各档粒径沥青混合料集料

表3 AC-13C 沥青混合料细观内部结构

Table 3 Mesoscopic internal structure of the AC-13C asphalt mixture

疲劳损伤程度/%	CT扫描图	二值化图
0		
50		
65		
80		

表4 各档粒径沥青混合料集料径长分布规律汇总

Table 4 Summarization of the distribution of the diameter and length of asphalt mixtures with different sizes

材料类型	测量内容	参数	粒径				
			1.18~2.36 mm	2.36~4.75 mm	4.75~9.5 mm	9.5~13.2 mm	13.2~16 mm
AC-13C	最大径长	频数/次	14	23	28	18	11
		频率/组距	0.153	0.243	0.297	0.192	0.115
	最小径长	频数/次	11	23	34	15	10
		频率/组距	0.129	0.258	0.349	0.176	0.092
AC-9.5	最大径长	频数/次	16	28	36	36	-
		频率/组距	0.146	0.248	0.316	0.293	-
	最小径长	频数/次	22	33	38	27	-
		频率/组距	0.184	0.286	0.317	0.217	-
AC-4.75	最大径长	频数/次	32	55	67	-	-
		频率/组距	0.213	0.348	0.436	-	-
	最小径长	频数	33	59	65	-	-
		频率/组距	0.201	0.376	0.418	-	-

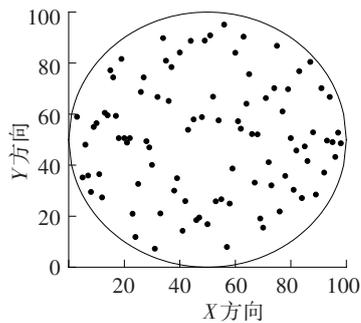
多边形分布规律汇总见表5。

表5 各档粒径沥青混合料集料多边形分布规律汇总

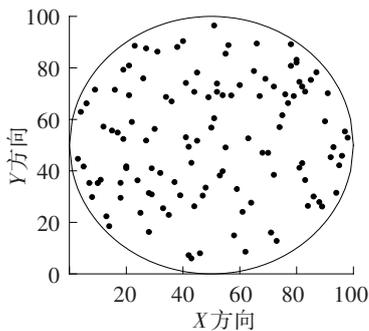
Table 5 Summary of the polygonal distribution of asphalt mixtures with different sizes

材料类型	参数	多边形边数				
		4条	5条	6条	7条	8条
AC-13C	频数/次	16	27	27	19	2
	频率/组距	0.184	0.276	0.293	0.222	0.027
AC-9.5	频数/次	20	35	46	19	3
	频率/组距	0.156	0.307	0.374	0.148	0.016
AC-4.75	频数/次	18	45	66	29	2
	频率/组距	0.106	0.277	0.427	0.176	0.013

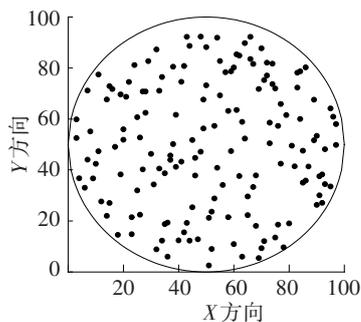
根据 MagicEyeICT 分析软件得出各档混合料集料中心点位置分布规律,如图1所示。



(a) AC-13C 颗粒中心点分布图



(b) AC-9.5 颗粒中心点分布图



(c) AC-4.75 颗粒中心点分布图

图1 各档混合料集料中心点位置分布规律

Fig. 1 Distribution of the center point of asphalt mixtures

with different sizes

由表4、表5、图1可知,从AC-13C、AC-9.5到AC-4.75沥青混合料在相同试件尺寸模型内其对应的集料数量越来越多,符合试验中集料中心点的均匀分布。用Origin软件拟合分析得到各档粒径沥青混合料内部不规则多边形集料在不同尺度范围内的中心点位置、颗粒径长、边形数服从一定概率分布函数,各沥青混合料试件内部集料分布特性拟合得出的统计规律汇总见表6。

表6 各档粒径沥青混合料集料分布统计表

Table 6 Statistics of aggregate distribution of asphalt mixtures with different sizes

材料	最大集料尺度区间/mm	形态特征参数	均值	标准差	分布类型
AC-13C	1.18~16	最大径长	2.763 mm	1.913	正态分布
		最小径长	2.753 mm	1.554	正态分布
		中心点位置	-	-	均匀分布
		边形数	5.568 mm	18.713	正态分布
AC-9.5	1.18~13.2	最大径长	0.100 mm	4.058	泊松分布
		最小径长	0.060 mm	3.136	泊松分布
		中心点位置	-	-	均匀分布
		边形数	5.548 mm	2.234	正态分布
AC-4.75	1.18~9.5	最大径长	-	-	离散型分布
		最小径长	-	-	离散型分布
		中心点位置	-	-	均匀分布
		边形数	5.785	1.685	正态分布

建立的二维细观模型可以真实准确地得出各档沥青混合料集料分布特性,为各尺度区域建立细观尺度模型作铺垫。沥青混合料内部集料的建立实际上就是利用集料分布几何特征分布函数,借助计算机来生成集料的过程,其内部集料分布的中心点位置、径长、边形数都可以根据得到的各档沥青混合料内部集料几何特征分布函数(中心点分布函数、径长分布函数、边形分布函数)生成;再根据该档粒径集料对应在该尺度下的数量即可唯一确定一个二维细观统计模型。

2 沥青混合料尺度模型

AC-13C及含不同粒径集料沥青混合料是由各档集料及基体构成的复合材料,各档集料粒径尺寸大小范围从0.075 mm到16 mm;将全部粒径尺寸集料建立在一个尺度模型内,会导致模型内包含大量

不同粒径且跨度较大的集料,集料种类过多及离散影响计算结果,在有限元软件网格划分过程中较为复杂,因此采用不同尺度逐步均匀化的计算方法计算多粒径沥青混合料力学性能参数。沥青混合料AC-4.75、AC-9.5、AC-13C的计算尺度分别为35 mm×35 mm、55 mm×55 mm、65 mm×65 mm。

沥青混合料随机复合材料由基体和各档集料构成,各档集料在统计窗中是以不规则多边形形状随机分布的,尺度统计窗 ε 如图2所示,由多个同一尺度的统计窗组成的整体结构 Ω 如图3所示。沥青混合料这种随机分布材料可以把 ε 尺度大小的单胞体统计窗视为其所选取的计算尺度,根据各档沥青混合料二维细观模型中集料随机分布情况,对含不同集料的沥青混合料二维模型区域建立合理的计算尺度,其计算尺度区域选用在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 个多边形骨料,其随机参数确定方式为:

- ① 分别确定 ε 统计窗中集料颗粒的中心点 (x_p, x_{2p}) ,横、竖两个坐标的概率函数 $f_{x_p}(x), f_{x_{2p}}(x)$;
 - ② 确定颗粒最大径长 a 、最短径长 b 概率函数 $f_a(x), f_b(x)$;
 - ③ 确定边形数 k 概率函数 $f_k(x)$ 。
- 则单个统计窗可以定义的样本 ω^s 为:
- $$\omega^s = (x_1^s, x_2^s, a_1^s, b_1^s, k_1^s, \dots, x_{(N-1)}^s, x_N^s, a_N^s, b_N^s, k_N^s)。$$

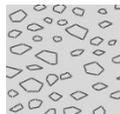


图2 尺度颗粒统计窗 ε

Fig. 2 Scale particle statistical window ε

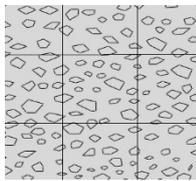


图3 同一尺度颗粒形成统计区域 Ω

Fig. 3 Statistical regions (Ω) of the particles with the same scale

假设在每一个单胞中骨料颗粒的概率分布相同,可知整个统计区域是由许多的单胞周期性组成的,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结构 Ω 的颗粒分布。对于整个 Ω ,令 $\omega = \{\omega^s, x \in \varepsilon Q^s \subset \Omega\}$,其力学参数的表达式为 $\{a_{ijk}(\frac{x}{\varepsilon}, \omega)\}$ 。因为沥青混合料分为沥青基质体与骨料两种不同属性材料,则其力学性能参数 $a_{ijk}^{\varepsilon}(x, \omega^s) = a_{ijk}(\frac{x}{\varepsilon}, \omega^s)$ 表达式为:

$$a_{ijk}^{\varepsilon}(x, \omega^s) = \begin{cases} a_{ijk}^1 & x \in e_{i_1} (i_1 = 1, \dots, N) \\ a_{ijk}^2 & x \in \varepsilon Q^s - \bigcup_{i_1=1}^N e_{i_1} \end{cases}$$

式中: εQ^s 为统计窗区域; e_{i_1} 为 εQ^s 中的第 i_1 个颗粒; N 为统计窗中的最大颗粒数。

由于统计区域 Ω 逻辑上由一些服从同一概率分布且尺寸为 ε 的统计窗组成,即表示为:

$$\Omega = \bigcup_{(\omega^s, t \in Z)} \varepsilon(Q^s + t)。$$

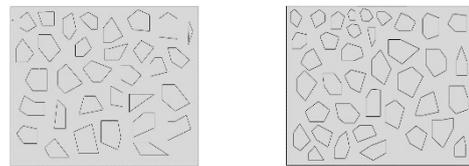
最后可知在 ε 统计窗内材料特性服从各种概率分布,在正方形区域内生成符合概率分布的数据坐标绘制于尺度区域内,根据该档骨料在该尺度下的生成数量即得到各档粒径集料沥青混合料在该尺度下的二维模型。

3 多尺度数值试验预测沥青混合料剪切疲劳强度

3.1 二维剪切试验数值模型的建立

在二维剪切细观模型中,骨料的分布是由沥青混合料内部骨料的中心点坐标、径长、边形数确定的,每一个骨料分布的中心点位置、径长、边形数在表6各档粒径沥青混合料集料分布统计表中已经说明,根据该档粒径骨料对应在该尺度下的数量即可确定一个二维剪切细观统计模型。

如AC-4.75沥青混合料,第一步生成满足该尺寸范围内的中心点坐标;第二步以中心点为原点在4.75~9.5 mm范围内生成最大径长和最小径长;第三步通过边形数分布函数在中心点生成相应边数形成骨料。二维Abaqus剪切细观模型如图4所示。



(a) AC-4.75模型

(b) AC-9.5模型



(c) AC-13C模型

图4 各档沥青混合料Abaqus细观模型

Fig. 4 The Abaqus mesoscopic model of asphalt mixtures with different sizes

3.2 沥青混合料疲劳过程均匀化剪切强度参数多尺度数值试验

将含不同粒径集料沥青混合料,对骨料尺寸

进行分组,多层迭代均匀化其强度参数。按尺寸可将骨料分成 m 组,表示为 $l^p (p = 1, 2, \dots, m)$, 各组对应的统计窗尺度分别为 $\varepsilon^p (p = 1, 2, \dots, m)$, 满足 $\varepsilon^p < \varepsilon^{p+1} (p = 1, 2, \dots, m-1)$, 每组集料在对应的统计窗口中服从相应概率分布,同时各个组集料尺寸满足: $\lambda^p \leq l^p < \lambda^{p+1} (p = 1, 2, \dots, m)$ 。假定沥青与 2.36 mm 以下集料混合的沥青砂强度指标为 b_0 , 集料强度指标为 b_0^1 , 各尺度对应的沥青混合料强度参数计算期望值分别为 $b^p (p = 1, 2, \dots, m)$ 。根据多尺度算法思路可知,在 ε^p 尺

度窗口下强度指标计算期望值 b^p 作为下一个窗口 ε^{p+1} 下基体强度指标,考虑骨料强度指标在 ε^m 窗口中作为不变的参数指标,通过逐层迭代的多尺度数值试验方法预测出沥青混合料疲劳过程剪切强度参数。

3.3 AC-4.75 沥青混合料疲劳损伤过程预测

将小于 2.36 mm 沥青混合料假设为均质体,通过试验得出疲劳过程沥青均质体结果,带入 AC-4.75 沥青混合料的基体材料,按流程进行第一层预测,见表 7。

表 7 不同损伤程度 AC-4.75 沥青混合料模拟参数及结果

Table 7 Simulation parameters and results of the AC-4.75 asphalt mixture with different damage degrees

材料	性质	参数	疲劳损伤程度/%				
			0	20	50	65	80
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
		黏聚力/kPa	225.115	208.891	177.411	156.127	143.521
		内摩擦角/(°)	34.52	32.73	28.15	27.47	23.35
		剪切强度/MPa	0.504 7	0.471 4	0.411 6	0.340 8	0.228 7
4.75~9.5 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	48 100				
		泊松比	0.20				
		黏聚力/kPa	0				
		内摩擦角/(°)	43.56				
AC-4.75	混合料	模拟剪切应力值/MPa	0.754 2	0.672 2	0.635 3	0.574 4	0.341 6

由 AC-2.36 向 AC-4.75 第一层预测中,基体材料是 AC-2.36 的沥青混合料、骨料为 4.75~9.5 mm 集料,在整个疲劳过程中 AC-4.75 沥青混合料剪切应力值从 0.754 2 MPa 降至 0.341 6 MPa。对 AC-4.75 沥青混合料强度指标实现了均匀化,并作为下一尺度

下 AC-9.5 沥青混合料基体的剪切强度参数指标。

3.4 AC-9.5 沥青混合料疲劳损伤过程预测

AC-9.5 沥青混合料的基体材料取 AC-4.75 沥青混合料模拟参数,经多层迭代算法预测 AC-9.5 的剪切强度,见表 8。

表 8 不同损伤程度 AC-9.5 沥青混合料模拟参数及结果

Table 8 Simulation parameters and results of the AC-9.5 asphalt mixture with different damage degrees

材料	性质	模拟参数	疲劳损伤程度/%				
			0	20	50	65	80
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
		黏聚力/kPa	294.798	275.760	239.453	221.369	198.461
		内摩擦角/(°)	38.57	36.28	32.54	30.74	26.43
		剪切强度/MPa	0.754 2	0.672 2	0.635 3	0.574 4	0.341 6
9.5~13.2 mm 集料	骨料	弹性模量/MPa	55 400				
		泊松比	0.20				
		黏聚力/kPa	0				
		内摩擦角/(°)	44.39				
AC-9.5	混合料	模拟剪切应力值/MPa	1.184 1	1.032 0	0.897 1	0.791 9	0.448 0

由AC-4.75向AC-9.5第二层预测中,基体材料是AC-4.75的沥青混合料、骨料为9.5~13.2 mm集料,在疲劳过程中AC-9.5的弹性模量大于AC-4.75的、泊松比小于AC-4.75的、黏聚力大于AC-4.75的。在整个疲劳过程中AC-9.5沥青混合料剪切应力值从1.184 1 MPa降至0.448 0 MPa。对AC-9.5沥青混

合料强度指标实现了均匀化,并作为下一尺度下AC-13C沥青混合料基体的剪切强度参数指标。

3.5 AC-13C 沥青混合料疲劳损伤过程强度预测

AC-13C沥青混合料的基体材料取AC-9.5沥青混合料模拟参数,经多层迭代算法预测AC-13C的剪切疲劳强度,见表9。

表9 不同损伤程度AC-13C沥青混合料模拟参数及结果

Table 9 Simulation parameters and results of the AC-13C asphalt mixture with different damage degrees

材料	性质	模拟参数	疲劳损伤程度%				
			0	20	50	65	80
AC-9.5	基体	弹性模量/MPa	1 672.678	1 602.186	1 229.242	937.550	529.589
		泊松比	0.266	0.271	0.275	0.278	0.282
		黏聚力/kPa	416.639	384.002	328.837	307.154	284.036
		内摩擦角/(°)	40.16	38.87	34.65	32.31	26.52
		剪切强度/MPa	1.184 1	1.032 0	0.897 1	0.791 9	0.448 0
13.2~16 mm集料	骨料	弹性模量/MPa	61 500				
		泊松比	0.19				
		黏聚力/kPa	0				
		内摩擦角/(°)	44.87				
AC-13C	混合料	模拟剪切应力值/MPa	1.319 1	1.093 4	0.985 0	0.862 0	0.449 7

由AC-9.5向AC-13C第三层预测中,基体材料是AC-9.5的沥青混合料、骨料为13.2~16 mm集料,在疲劳过程中AC-13C的弹性模量大于AC-9.5的、泊松比小于AC-9.5的、黏聚力大于AC-9.5的。在整个疲劳过程中AC-13C沥青混合料剪切应力值从1.319 1 MPa降至0.449 7 MPa。

4 多层迭代算法预测与剪切试验强度对比分析

将多层迭代算法预测的沥青混合料剪切疲劳强度与室内剪切疲劳试验得出的剪切强度结果进行对比,建立不同粒径沥青混合料疲劳损伤过程强度的绝对误差与相对误差曲线,为验证基于多尺度有限元试验方法预测沥青混合料强度的有效性,数值模拟结果与剪切试验结果相对误差应在10%以内。

4.1 AC-4.75 沥青混合料疲劳过程数值模拟分析

含4.75~9.5 mm集料的AC-4.75沥青混合料剪切疲劳强度对比见表10。

表10 AC-4.75 沥青混合料剪切疲劳强度参数

Table 10 The shear strength parameter table of the AC-4.75 asphalt mixture

项目	疲劳损伤程度%				
	0	20	50	65	80
剪切试验强度值/MPa	0.732 0	0.658 0	0.618 0	0.559 0	0.329 0
多尺度算法强度值/MPa	0.754 2	0.672 2	0.635 3	0.574 4	0.341 6
绝对误差/MPa	0.022 2	0.014 2	0.017 3	0.015 4	0.012 6
相对误差/%	3.03	2.16	2.79	2.75	3.83

由表10可知,含4.75~9.5 mm集料沥青混合料在疲劳前中期剪切试验疲劳强度与多层迭代算法预测的疲劳强度绝对误差在0.014~0.023 MPa之间,当疲劳损伤程度达到80%时绝对误差达到0.012 6 MPa。在整个疲劳损伤过程中,剪切强度试验值与预测值相对误差得在4%以内,该级的数值模拟强度满足精度要求。

4.2 AC-9.5 沥青混合料疲劳过程数值模拟分析

含9.5~13.2 mm集料的AC-9.5沥青混合料剪切疲劳强度对比见表11。

表11 AC-9.5 沥青混合料剪切疲劳强度参数

Table 11 The shear strength parameter table of the AC-9.5 asphalt mixture

项目	疲劳损伤程度/%				
	0	20	50	65	80
剪切试验强度值/MPa	1.147 0	0.997 0	0.852 0	0.754 0	0.417 0
多尺度算法强度值/MPa	1.184 1	1.032 0	0.897 1	0.791 9	0.448 0
绝对误差/MPa	0.037 1	0.035 0	0.045 1	0.037 9	0.031 0
相对误差/%	3.23	3.51	5.29	5.03	7.43

由表11可知,不同于AC-4.75集料沥青混合料误差变化情况,含9.5~13.2 mm集料沥青混合料在整个疲劳过程中试验值与预测值绝对误差较大,范围为0.030~0.046 MPa,相对误差在8%范围内,多尺度算法预测的剪切疲劳强度满足计算精度要求。

4.3 AC-13C 沥青混合料疲劳过程数值模拟分析

含13.2~16 mm集料的AC-13C沥青混合料剪切疲劳强度对比见表12。

表12 AC-13C 沥青混合料剪切疲劳强度参数

Table 12 The shear strength parameter table of the AC-13C asphalt mixture

项目	疲劳损伤程度/%				
	0	20	50	65	80
剪切试验强度值/MPa	1.265 0	1.063 0	0.933 0	0.839 0	0.424 0
多尺度算法强度值/MPa	1.319 1	1.093 4	0.985 0	0.862 0	0.449 7
绝对误差/MPa	0.054 1	0.030 4	0.052	0.023	0.025 7
相对误差/%	4.28	2.86	5.57	2.74	6.06

由表12可知,AC-13C沥青混合料的剪切疲劳强度误差变化情况,在整个疲劳过程中,试验值与预测值的绝对误差在0.055 MPa以内,比AC-4.75沥青混合料,AC-9.5沥青混合料的绝对误差都大,其相对误差值在7%以内,满足计算精度要求。

4.4 各档粒径沥青混合料误差分析

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变化规律及造成其误差的原因,将沥青混合料疲劳损伤过程强度误差变化趋势图。如图5~6所示。

由表13绝对误差与相对误差的变化趋势可知,AC-4.75沥青混合料绝对误差值在整个疲劳损伤过程中没有出现较大的波动,但AC-9.5沥青混合料、AC-13C沥青混合料波动明显;从相对误差的角度

分析,各类沥青混合料的相对误差值在疲劳中期(疲劳程度在0%~65%时)较为平稳,当损伤程度大于65%时,相对误差表现出离散程度变大及趋势上升的状态。

沥青混合料疲劳损伤后期误差趋势波动明显,是因为:①基于多尺度有限元计算方法,建立沥青混合料二维细观模型并进行预测得出的强度参数与通过试验得出的剪切强度参数存在一定的误差;②多尺度有限元方法是基于从含小粒径的沥青混合料逐步迭代到较大粒径集料沥青混合料预测其强度参数的计算方法,每次逐级预测含不同粒径集料沥青混合料误差就有可能累积到下一档粒径集料沥青混合料的强度参数预测当中。

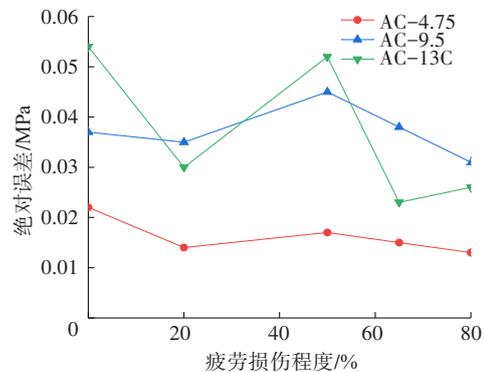


图5 沥青混合料疲劳过程绝对误差变化

Fig. 5 Change of the absolute error in fatigue process of asphalt mixture

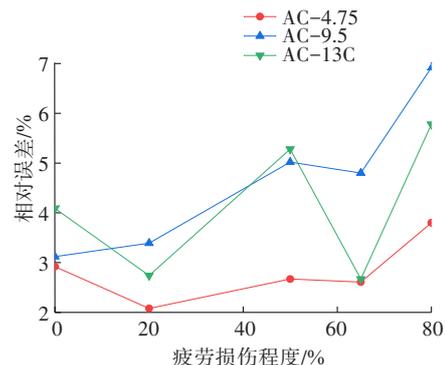


图6 沥青混合料疲劳过程相对误差变化

Fig. 6 Change of the relative error in fatigue process of asphalt mixture

5 结论

1) 建立合理的沥青混合料细观力学尺度模型,能够反映基体及集料对沥青混合料疲劳损伤的影响,从而更有效控制沥青混合料设计范围。

2) 剪切疲劳试验可知,随着粗集料被一级级剔除,其对应的试件的剪切强度在不断减小,粗集料试件在抵抗破坏中起着主要作用。

3) 通过二维尺度模型沥青混合料样本不同疲劳损伤状态强度参数进行分析可知随着集料粒径尺寸不断增大其试件弹性模量不断增大,泊松比不断减小,黏聚力和内摩擦角不断增大。

4) 多层迭代算法逐级预测程序考虑了每一档集料存在于沥青混合料中,避免了各类集料在建模过程集料缺失的情况,使得在细观角度预测沥青混合料材料特性成为可能。

5) 沥青混合料剪切试验获得疲劳剪切强度与多层迭代算法预测疲劳剪切强度进行对比分析,每一层的相对误差均在10%以内,符合工程要求,验证了建立尺度模型可行性和算法有效性。

参考文献(References):

- [1] DAI Q L. Two-and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with X-ray computed tomography images [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 1102-1114.
- [2] 万成,张肖宁,贺玲凤,等.基于真实细观尺度的沥青混合料三维重构算法[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2813-2820.(WAN Cheng, ZHANG Xiaoning, HE Lingfeng, et al. 3D reconstruction algorithm of asphalt concrete based on real microscopic scale [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2813-2820. (in Chinese))
- [3] 张肖宁.基于X-ray CT的沥青混合料计算机辅助设计技术的研究进展[J].交通科学与工程,2010,26(2):1-8. (ZHANG Xiaoning. Advances in computer aided design of asphalt mixtures based on X-ray CT [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(2): 1-8. (in Chinese))
- [4] 张肖宁.沥青混合料材料结构数字图像技术的基本方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(10): 166-173. (ZHANG Xiaoning. Basic methods of digital image technology for material structure of asphalt mixtures [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(10): 166-173. (in Chinese))
- [5] 罗旋,李友云,胡迪.AC-13沥青混合料细观组分材料强度特性研究[J].公路工程,2017,42(4): 294-298.(LUO Xuan, LI Youyun, HU Di. Research on mesoscopic component of AC-13 asphalt mixture with strength properties [J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 294-298. (in Chinese))
- [6] 邵腊庚,王高超,严二虎,等.不同制样方法对沥青微观测试的影响[J].交通科学与工程,2018,34(1): 8-12. (SHAO Lageng, WANG Gaochao, YAN Erhu, et al. Influence of different sample preparation methods on asphalt micro test [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 8-12. (in Chinese))
- [7] 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 Youyun, et al. Study on preventive maintenance based on micro-mechanical properties of asphalt mixture with fatigue damage [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (1): 76-80, 101. (in Chinese))
- [8] KIM Y R, ARAGÃO F T S, ALLEN D H, et al. Damage modeling of bituminous mixtures considering mixture microstructure viscoelasticity and cohesive zone fracture [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37(8): 1125-1136. (in Chinese))
- [9] 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 Fuming, WANG Duanyi. Multiscale simulation of damage evolution of asphalt mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 1-6. (in Chinese))
- [10] 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 Yuli, 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. (in Chinese))
- [11] 牛冬瑜,谢希望,牛艳辉,等.粗集料接触参数对沥青混合料损伤演化的影响[J].中国公路学报,2020,33(10): 201-209. (NIU Dongyu, XIE Xiwang, NIU Yanhui, et al. Influence of contact parameters of coarse aggregate on damage evolution of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 201-209. (in Chinese))
- [12] 黄开.多尺度算法预测沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2019. (HUANG Kai. Multi-scale algorithm for predicting mechanical properties of asphalt mixture fracturing fatigue damage [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese))

(责任编辑:刘国奇;校对:李脉 欧兆虎;英文编辑:陈璐)