

文章编号: 1001-4888(2018)03-0419-09

沥青混合料劈裂试验的细观有限元模拟与测试^{*}

付军, 刘洁, 雷力, 马晓东, 刘智鸿

(武汉理工大学 交通学院, 湖北武汉 430063)

摘要: 为分析沥青混合料的细观尺度破坏机理, 采用数字图像技术将 AC-25 沥青混合料离散为集料、联结料、孔隙三相复合材料, 基于 ANSYS 软件建立马歇尔试件的二维细观有限元模型, 输入各相介质的力学参数, 虚拟细观劈裂破坏试验。基于非接触式光学方法, 测试 AC-25 马歇尔试件劈裂试验中各相介质应变, 并与虚拟细观有限元分析结果进行对比。结果表明, 虚拟细观分析的各相介质参数影响较大, 细观光学应变测试结果大于虚拟细观分析结果, 但虚拟细观应变响应与光学测试结果规律相似, 两种分析中沥青混合料破坏的薄弱环节均为联结料与界面。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 马歇尔劈裂试验; 细观有限元分析; 细观光学试验; 应变响应
中图分类号: U268.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-039

0 引言

劈裂试验是进行沥青混合料抗裂性能评定、破损机理研究的主要途径^[1-3]。但仅从宏观尺度出发, 将沥青混凝土简化为连续均匀的单一介质, 很难全面合理地解释沥青混合料破坏机理。而从细观角度出发, 沥青混合料通常可以分为集料、沥青联结料和孔隙三相介质, 其不同介质的几何物理性质对劈裂破坏的影响值得深入探讨。运用细观方法能够详细分析沥青混合料在劈裂试验中的细观力学响应和细观损伤破坏过程。

近年来, 国内外一些学者针对沥青混合料在劈裂试验中的破损机理进行了细观尺度分析。Roque 和 Buttlar^[4]提出了在评估沥青混合料特性时常见的一种错误, 同时提出了一种测量分析方法, 由此来精确地确定在间接拉伸试验模型中得到的沥青混凝土的特性。Sadd^[5,6]等研究了沥青混凝土材料在受到间接拉伸试验典型荷载和约束的情况下的细观力学响应, 他利用一种特殊的网格框架模型来得到刚度矩阵, 从而预测颗粒之间的荷载传递。这种特殊的网格框架模型最早是由 Dvorkin^[7]等人为了求得注水泥颗粒的弹性解而提出的。皮育晖^[8]等利用有限元软件 ABAQUS, 对沥青混合料劈裂试验进行数值模拟分析, 研究了试验中应力、应变分布及其变化规律, 讨论了网格划分密度、划分形式对模拟结果的影响。为了模拟特定类型的沥青混合料的性能, Ziaei-Rad^[9]等人对以沥青混凝土、沥青玛蹄脂碎石、多孔沥青混凝土、大粒径石料多孔沥青混凝土为代表的特种沥青混合料进行了精确的建模分析, 从而深入研究了路面结构的变形量及路面各组分的应力发展过程。基于细观的二维和三维有限元模型, Mo 和 Huurman^[10,11]等人研究了沥青混合料在移动的车轮荷载作用下, 砂浆和界面区域的应力发展过程。于庆磊^[12]等将数字图像处理技术与原有的 RFPA2D 系统相结合, 通过数字图像处理技术和统计方法表征混合料内部骨料的非均匀性, 从而模拟混合料在单轴荷载作用下破坏过程的变形非线性、应力重分布

^{*} 收稿日期: 2017-02-23; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51072149); 交通运输部科技项目(2015319811320)

通讯作者: 付军(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 从事新结构与新材料、道路与桥梁高性能复合材料跨尺度分析方面的研究工作。

Email: fjgrant@whut.edu.cn

等现象和复杂应力状态下的裂纹扩展过程。邱延峻^[13]等运用 RFEA 真实破裂过程分析系统对马歇尔劈裂试验进行了全过程的数值模拟,发现了裂纹状态随均质度减小趋向离散,均质度越高,试件破坏越趋向于脆性破裂。裴建中^[14]等利用离散元方法生成沥青混合料马歇尔试件,数值模拟了不同粒径及不同加载速率对劈裂强度的影响和试件中裂缝形成的动态过程。

总的说来,对沥青混合料破坏机理的分析,既有数值模拟,也有试验分析和验证,但是针对劈裂试验的结果和有限元分析数值模拟结果进行对比的很少。然而,对材料力学行为的数值模拟方法的预测能力,是依靠与力学试验获得的实际数据进行对比得到验证的。本文结合数字图像处理技术和有限元软件 ANSYS,建立 AC-25 马歇尔试件的二维细观有限元模型,模拟分析劈裂试验过程中的应变分布及其变化规律,同时应用非接触式光学方法测试细观尺度应变。通过对比分析有限元计算与试验结果,为沥青混合料细观破坏机理研究提供参考。

1 沥青混合料马歇尔试件细观有限元分析

1.1 二维细观有限元模型

本文采用国内外已有的数字图像处理技术建立马歇尔试件的细观二维有限元模型,由于沥青混合料 AC-25 的原始截面较为复杂,如图 1,因此需要结合 Win Topo Professional 和 CAD 等对试件截面模型进行转化处理,进而导入 ANSYS 软件进行建模分析。其中 Win Topo Professional 是高效的可将光栅图像转化为矢量图形的工具软件,它能输入高达 24 位的光栅图像文件,通过精确矢量化过程得到彩色线条图,转换率可达 95% 以上,转换矢量图相对可靠。在细观尺度中,AC-25 界面是由集料、沥青联结料和气孔组成的多相复合材料。有限元模型及细观组成部分如图 2 所示。



图 1 AC-25 试件原始界面图像

Fig. 1 Original image of AC-25 specimen interface

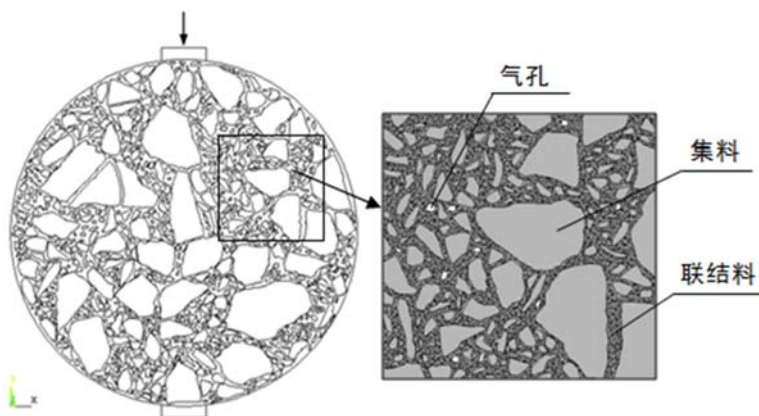


图 2 AC-25 细观有限元模型及细观组成成分

Fig. 2 Microcosmic finite element model and microcosmic composition of AC-25

AC-25 细观模型尺寸大小和宏观马歇尔试件相同,整体为一直径为 101.6mm 的圆形,上下压条宽度为 13mm,厚度为 4mm,内表面与试件同弧度,上下压条尺寸相同。AC-25 细观模型采用 PLANE42 单元来定义单元类型,共有 40350 个单元,33549 个节点,单元划分结果如图 3 所示。设定 AC-25 试件模型处于室温(25℃)状态,此时集料和沥青联结料均为线弹性体,性能参数如表 1 所示^[15],相邻边界的单元按照共享节点处理。本模拟在上压条上边面中点上施加位移荷载,下压条刚体的参考点上设置对称边界条件,并限制底部的水平和垂直位移。

表 1 AC-25 细观有限元模型材料参数(25℃)^[15]

Tab. 1 Material parameters of microcosmic finite element model of AC-25(25℃)

材料	弹性模量/MPa	泊松比	极限拉伸应变/ $\mu\epsilon$
集料	55.5e3	0.16	97
沥青联结料	500	0.24	600

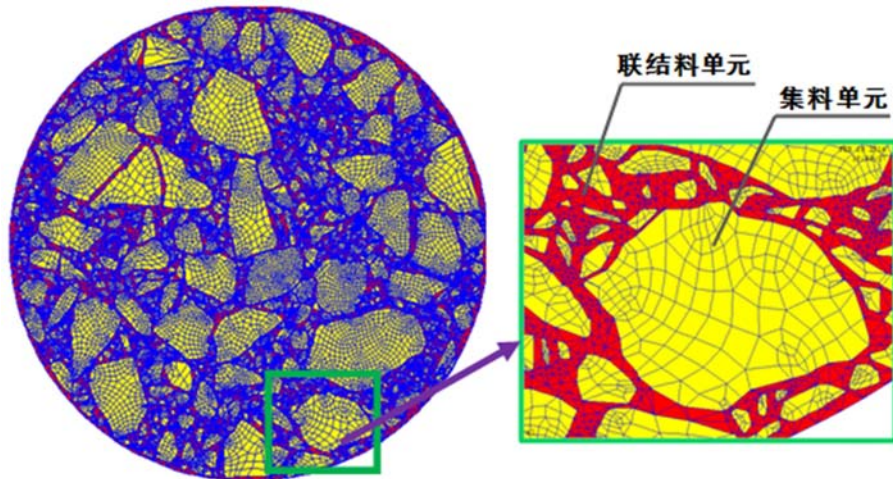
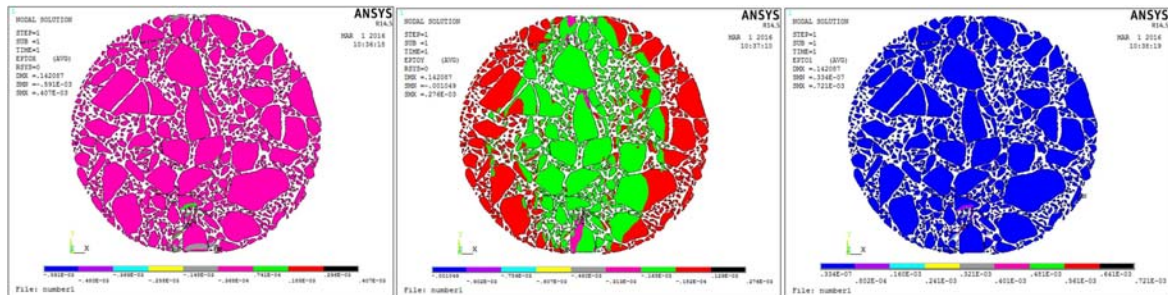
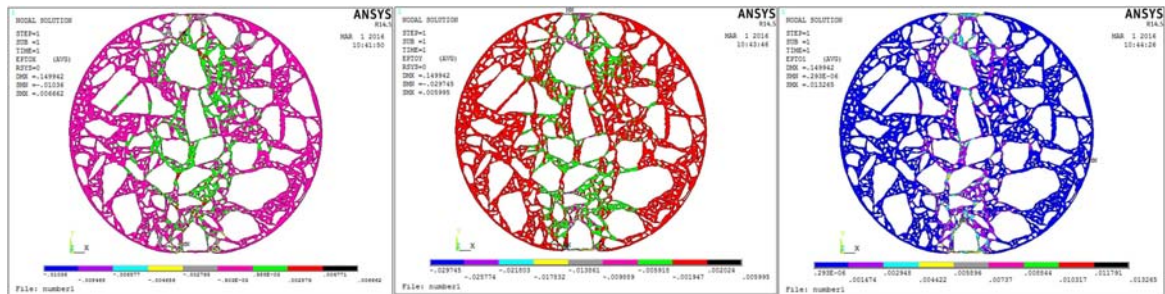


图3 AC-25 劈裂试验细观模型有限元单元划分

Fig. 3 Finite element cell division of microcosmic model in splitting test

1.2 虚拟劈裂试验

在细观模型上通过分级加载来模拟劈裂试验,本模拟施加位移荷载且逐步加载,每次逐步增加 0.05mm,按照 0, -0.05mm, -0.10mm, -0.15mm, -0.20mm, -0.25mm 位移荷载依次进行静态加载。为了将 IDT 模拟结果与细观光学试验的结果进行对比分析,取细观光学试验中对应的两个位移荷载状态的应变云图进行讨论。通过计算,当施加位移荷载为 -0.07mm 时,试件出现微小裂纹,当位移荷载为 -0.19mm 时,裂纹贯穿试件。AC-25 细观界面集料和联结料的各个方向应变如图 4 和图 5 所示。

图4 集料 ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_1 (位移荷载 -0.07mm)Fig. 4 ϵ_x , ϵ_y and ϵ_1 of aggregate (displacement load is -0.07mm)图5 联结料 ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_1 (位移荷载 -0.19mm)Fig. 5 ϵ_x , ϵ_y and ϵ_1 of coupling material (displacement load is -0.19mm)

通过在细观模型上进行分级加载计算,集料及沥青联结料各向应变状态的变化趋势曲线如图 6、图 7 所示。可以看出,AC-25 细观界面集料和沥青联结料的 X 向应变、Y 向应变和第一主应变均根据逐步位移荷载呈线性趋势增长。集料的第一主应变与 X 向应变相差很小,第一主应变略大于 X 向应变,相差大约 8% 左右。沥青联结料的第一主应变大于 X 向应变,两者相差约为 30% 左右。因此,建议将

第一主应变作为 AC-25 细观界面联结料的破坏应变参考指标。

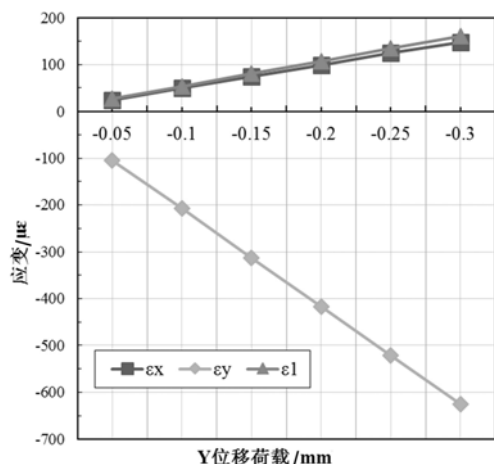


图 6 细观分析集料各向应变状态曲线
Fig. 6 Curves of the state of aggregate's strain in the microcosmic analysis

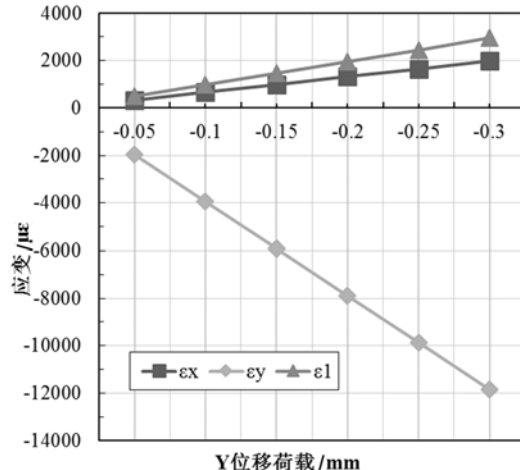


图 7 细观分析联结料的各向应变状态曲线
Fig. 7 Curves of the state of coupling material's strain in the microcosmic analysis

2 劈裂试验的非光学接触测试

2.1 原理及公式

(1) 试验仪器及准备

为了与有限元模拟的结果对比分析,观察 AC-25 试件的破坏路径,以及测定试件即将破裂时和完全破裂时的细观界面应变状态,进行 AC-25 细观光学劈裂试验。AC-25 试件是根据马歇尔试件制备的,直径为 101.6mm,高为 63.5mm,再利用切割机床切割试件剖面,形成 AC-25 细观界面,尺寸为直径 101.6mm,高 40mm。本试验基于双目立体视觉原理,采用三维数字图像相关方法,对马歇尔试件表面的三维形貌和荷载作用下的三维变形进行测量。图像测量系统如图 8 所示。

本试验中运用的主要仪器为多功能全自动沥青压力试验仪和 PMLAB DIC-3D。其中多功能全自动沥青压力试验仪采用电动加载的方式,以 10mm/min 的加载速度对马歇尔试件施加位移荷载。PMLAB DIC-3D 是一种基于非接触式应变光学系统的光学测量仪器,它能够通过比较荷载作用下测量区域内各点的三维形貌的变化,得到被测物体全场三维位移分布及应变分布。针对固定测量视场用户,可运用便携式测量头。PMLAB DIC-3D 针对特定测量视场,无需现场标定,其测量精度最小可以达到 50 个微应变;其分辨率为 1296×964pixel,最高帧频达到 30fps,图像由高分辨率 CCD 摄像机采集,图像采集速度为 5 帧/s,采集到的变形后图像将被同步存储入计算机进行分析处理。

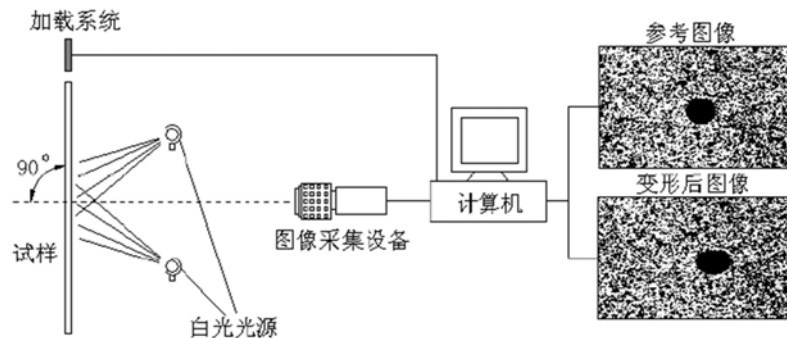


图 8 图像测量系统
Fig. 8 Measurement system of images

(2) 材料非均质性描述^[12]

根据以往的研究经验,通常运用统计数学的方法来描述材料的非均匀性。假设集料和联结料细观单元的弹性模量和强度均服从 Weibull 分布:

$$\phi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \quad (1)$$

式中, α 为细观单元力学性质参数,如弹性模量、强度等; $\phi(\alpha)$ 为细观单元力学性质 α 的统计分布密度; m 为分布函数的形状函数,将其定义为材料的均匀性系数,它反映了材料的均质性; α_0 为细观单元力学性质的平均值。从上式可以看出,随着材料均匀性系数 m 的增加,细观单元的力学性质会收敛于一定的范围内,材料性质将趋于均匀。整个式子体现了材料内部介质细观力学性质非均匀性的分布情况。

2.2 测试结果

试验时先将沥青混凝土马歇尔试件放入保温水箱(25℃)半小时以上,然后取出进行劈裂试验。根据 PMLAB DIC-3D 仪器观察,AC-25 界面在加载到-0.07mm 时,界面上下两端产生人为几乎观察不到的微小裂纹。此时 AC-25 界面上下两段裂纹处的 X 向应变、Y 向应变和第一主应变如表 2 所示,界面上上下两端处 X 向应变、Y 向应变、第一主应变云图如图 9 所示。

表 2 界面应变状态(位移-0.07mm)

Tab. 2 Strain state of interface (displacement load is -0.07mm)

位移荷载/mm	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\epsilon_y/\mu\epsilon$	$\epsilon_1/\mu\epsilon$
-0.07	495	-2973	583

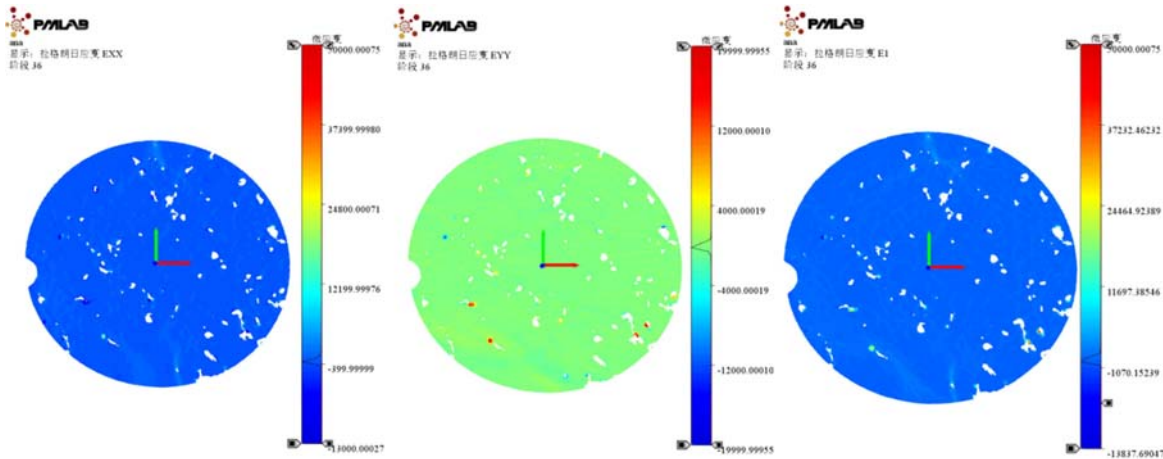


图 9 ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_1 云图(位移荷载为-0.07mm)

Fig. 9 Contours of ϵ_x , ϵ_y and ϵ_1 (displacement load is -0.07 mm)

AC-25 试件加载到-0.19mm 时,其界面产生较大的裂纹,如图 10,此时可以观察到宏观裂缝(图 11)。AC-25 中间裂纹的 X 向应变、Y 向应变和第一主应变见表 3,界面中间裂纹 X 向应变、Y 向应变和第一主应变如图 12 所示。

表 3 宏观裂缝时应变状态(位移-0.19mm)

Tab. 3 Strain state of interface (displacement load is -0.19mm)

位移荷载/mm	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\epsilon_y/\mu\epsilon$	$\epsilon_1/\mu\epsilon$
-0.19	1918	-10682	2574

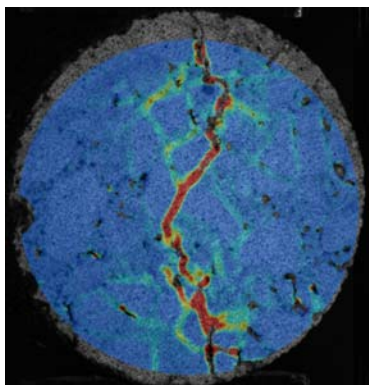


图 10 加载到 -0.19mm 时的测试裂纹
Fig. 10 Testing cracks
(displacement load is -0.19mm)

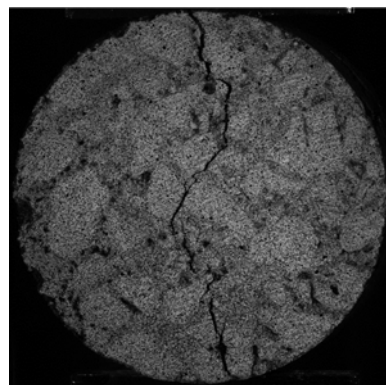


图 11 加载到 -0.19mm 时的原始裂纹
Fig. 11 Original cracks (displacement load is -0.19mm)

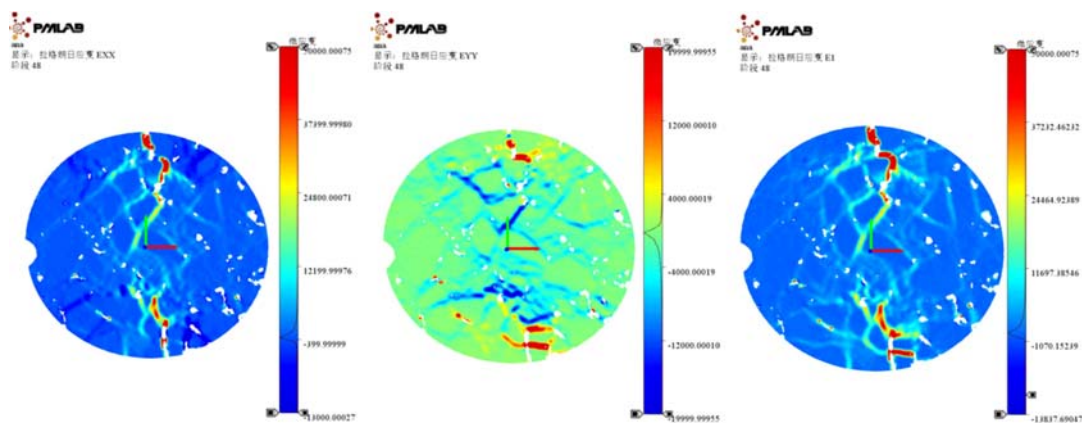


图 12 ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_1 云图(位移荷载为 -0.19mm)
Fig. 12 Contours of ϵ_x , ϵ_y and ϵ_1 (displacement load is -0.19mm)

3 分析与讨论

根据 AC-25 细观光学试验发现, AC-25 界面在加载到 -0.07mm 时界面开始出现很微小裂纹, 在加载到 -0.19mm 时界面完全开裂。为了对有限元模拟与试验结果进行对比分析, 下面分别以加载到 -0.07mm (裂纹产生时)和 -0.19mm (显著开裂时)时界面的应变状态进行对比分析。

3.1 界面裂缝产生时应变状态对比分析

AC-25 界面加载到 -0.07mm 时, 试验界面有微小裂纹产生, 此时有限元模拟细观界面和试验上下两端裂纹处的应变状态如表 4, 对比结果如图 13。

表 4 -0.07mm 时的有限元模拟与试验应变
Tab. 4 Strain in FE modeling and test when load is -0.07mm

AC-25 界面	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\epsilon_y/\mu\epsilon$	$\epsilon_1/\mu\epsilon$
细观集料计算值	34.5	-145.6	37.4
细观联结料计算值	461.0	-2671.8	687.8
试验测试数据	495	-2973	583

由表 4 和图 13 可见, 荷载位移加载到 -0.07mm 时, 试验 AC-25 界面出现微小裂纹, 此时在 X 向应变上, 试验应变值 $>$ 细观联结料应变值 $>$ 细观集料应变值, 试验 X 向应变与细观联结料相差较小, 为 7% 左右, 在 X 向应变上试验应变值接近细观联结料应变值, 而细观集料的 X 向应变为 $34.5\mu\epsilon$, 几乎可

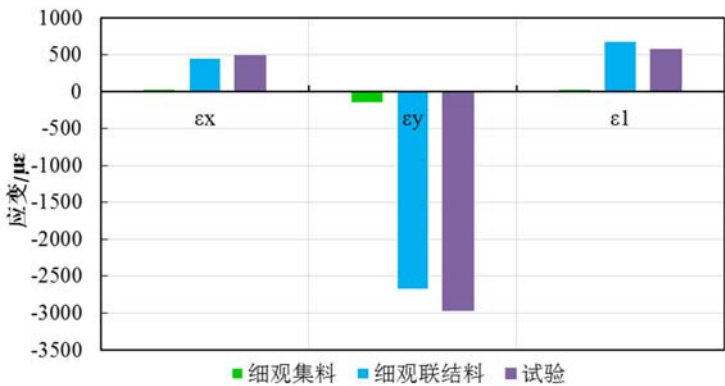


图 13 -0.07mm 时有限元模拟与试验应变对比

Fig. 13 Stress comparison between FE modeling and test when load is -0.07mm

以忽略。

AC-25 界面在 Y 向应变上是压应变,其具体数值:试验应变值>细观联结料应变值>细观集料应变值。试验 Y 向应变与细观联结料相差较小,为 10.2%左右,在 Y 向应变上试验应变值更接近细观联结料应变值,而细观集料的 Y 向应变较小。

AC-25 界面在第一主应变上,细观联结料应变值>试验应变值>细观集料应变值。试验第一主应变与细观联结料相差较小,为 15%左右,在第一主应变上试验应变值更接近细观联结料应变值,而细观集料的第一主应变较小,几乎可以忽略。

3.2 界面显著开裂时应变状态对比分析

AC-25 界面加载到-0.19mm 时,试件界面产生较大的宏观裂纹,有限元模拟细观界面和试验应变状态如表 5,对比结果如图 14。

表 5 -0.19mm 时的有限元模拟与试验应变

Tab. 5 Strain in FE modeling and test when load is -0.19mm

AC-25 界面	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\epsilon_y/\mu\epsilon$	$\epsilon_l/\mu\epsilon$
细观集料计算值	93.9	-396.2	101.6
细观联结料计算值	1251.2	-7496.4	1867.6
试验测试数据	1918	-10682	2574

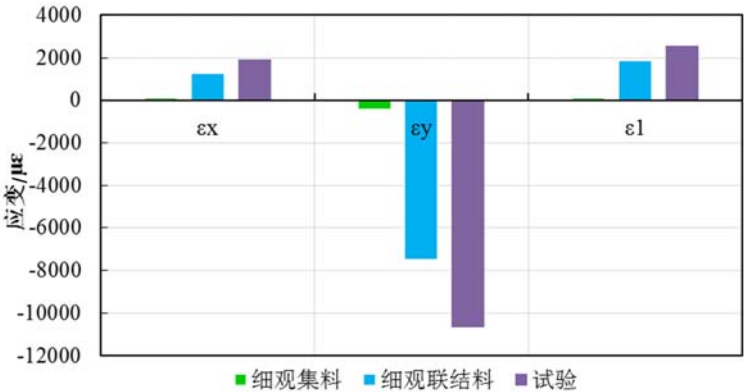


图 14 -0.19mm 时有限元模拟与试验应变对比

Fig. 14 Strain comparison between FE modeling and test when load is -0.19 mm

由表 5 和图 14 可见,荷载位移加载到-0.19mm 时,试验 AC-25 界面出现较大裂纹,在其界面可以清晰地看到裂纹,此时在 X 向应变上,试验应变值>细观联结料应变值>宏观应变值>细观集料应变值,试验 X 向应变与细观联结料相差 35%左右,试验 X 向应变与宏观相差 58%左右,在 X 向应变上试

验应变值更接近细观联结料应变值,而细观集料的 X 向应变几乎可以忽略。

AC-25 界面在 Y 向应变上是压应变,其具体数值:试验应变值>细观联结料应变值>宏观应变值>细观集料应变值。试验 Y 向应变与细观联结料相差较小,为 10.2%左右,试验 Y 向应变与宏观相差较大,为 80.5%左右,在 Y 向应变上试验应变值更接近细观联结料应变值,而细观集料的 Y 向应变较小。

AC-25 界面在第一主应变上,试验应变值>细观联结料应变值>宏观应变值>细观集料应变值。试验第一主应变与细观联结料相差 30%左右,试验第一主应变与宏观相差较大,为 85%左右,在第一主应变上试验应变值更接近细观联结料应变值,而细观集料的第一主应变为 $101.6\mu\epsilon$,几乎可以忽略。

可以看出无论是在界面裂纹初始阶段还是界面显著开裂阶段,细观光学应变测试结果始终略大于虚拟细观分析的结果。这是因为在实际的沥青混凝土马歇尔试件施加位移荷载初期,存在着刚体位移,对细观光学试验结果有一定的影响。其次,实际沥青混凝土试件中很难完全避免微裂纹与孔隙,但为了有效实现细观有限元模拟分析,常常忽略这些微裂纹与孔隙。另外,本文中设定各项材料性能参数均为 25℃时的数值,弹性模量等细观参数取值也源于相关参考文献,难免对试验结果造成影响。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 数字图像技术结合有限元数值分析模型,可以较好地模拟沥青混合料劈裂试验的细观破坏过程,第一主应变在细观破坏应变参数中居于主导地位。

(2) 非接触式光学方法为沥青混合料劈裂试验的细观应变测试提供了良好的试验验证手段。光学细观测试结果与有限元细观分析结果规律相似,证明了细观有限元模型的合理性与准确性。

(3) 细观数值分析与光学试验均发现,当沥青混合料马歇尔试件出现微小裂纹和显著裂缝时,沥青联结料的应变均远大于集料的应变,且超过沥青联接料的极限应变,因此沥青混合料的破坏通常始于联结料。

4.2 展望

(1) 本文细观有限元分析建立在材料线弹性和多相界面变形协调的假设基础之上,尤其对沥青混凝土开裂过程的界面区域模拟尚不够精确和深入,需要下一步深入探讨。

(2) 本文中细观光学测试时存在一定误差,需更深入总结分析原因并改善沥青混凝土试件加载过程。

参考文献:

- [1] Pasetto M, Baldo N. Influence of the aggregate skeleton design method on the permanent deformation resistance of stone mastic asphalt[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(sup3):S96—S101.
- [2] Islam M R, Hossain M I, Tarefder R A. A study of asphalt aging using indirect tensile strength test[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95:218—223.
- [3] Katman H Y, Ibrahim M R, Matori M Y, et al. Tensile strength of reclaimed asphalt pavement[J]. International Journal of Civil & Environmental Engineering, 2012, 12(3):14—19.
- [4] Roque R, Buttlar W G. The development of a measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode (with discussion)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1992, 61:304—332.
- [5] Sadd M H, Dai Q, Parameswaran V, et al. Microstructural simulation of asphalt materials: modeling and experimental studies[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2):107—115.
- [6] Sadd M, Dai Q, Parameswaran V, et al. Simulation of asphalt materials using finite element micromechanical model with damage mechanics[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1832:86—95.
- [7] Dvorkin J, Nur A, Yin H. Effective properties of cemented granular materials[J]. Mechanics of Materials, 1994,

- 18(4):351—366.
- [8] 皮育晖, 张久鹏, 黄晓明, 等. 沥青混合料劈裂试验数值模拟[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8):1—6 (PI Yuhui, ZHANG Jiupeng, HUANG Xiaoming, et al. Numerical simulation of indirect tensile tests of asphalt mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8):1—6(in Chinese))
- [9] Ziaei-Rad V, Nouri N, Ziaei-Rad S, et al. A numerical study on mechanical performance of asphalt mixture using a meso-scale finite element model[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 57:81—91.
- [10] Mo L T, Huurman M, Wu S P, et al. 2D and 3D meso-scale finite element models for ravelling analysis of porous asphalt concrete[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44:186—196.
- [11] Mo L T, Huurman M, Wu S P, et al. Investigation into stress states in porous asphalt concrete on the basis of FE-modelling[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43:333—343.
- [12] 于庆磊, 唐春安, 朱万成, 等. 基于数字图像的混凝土破坏过程的数值模拟[J]. 工程力学, 2008, 25(9):72—78 (YU Qinglei, TANG Chunan, ZHU Wangcheng, et al. Digital image-based numerical simulation on failure process of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9):72—78 (in Chinese))
- [13] 邱延峻, 闫常赫, 艾长发. 非均质沥青混合料劈裂试验全过程数值模拟[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2):12—16 (QIU Yanjun, YAN Changhe, AI Changfa. Numerical simulation of split test process for asphalt mixture under heterogeneous state[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2):12—16 (in Chinese))
- [14] 裴建中, 常明丰, 陈拴发, 等. 沥青混合料间接拉伸试验的数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(5):6—10 (PEI Jianzhong, CHANG Mingfa, CHEN Shuanfa, et al. Numerical simulation of indirect tensile test for asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(5):6—10 (in Chinese))
- [15] Buttlar W, You Z. Discrete element modeling of asphalt concrete: microfabric approach[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1757:111—118.

On the mesoscopic finite element simulation and measurement of bituminous mixture splitting experiment

FU Jun, LIU Jie, LEI Li, MA Xiao-dong, LIU Zhi-hong

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: In order to analyze the meso-scale failure mechanism of bituminous mixture, digital image technology was adopted to separate AC-25 bituminous mixture into a three-phase composite material: aggregate, coupling material and pore. Based on ANSYS software, two-dimensional meso-scale finite element model of Marshall specimen was established. By inputting the mechanical parameters of each phase medium, virtual mesoscopic splitting failure experiment was carried out. Based on non-contact optical method, the strain of each phase medium in splitting experiment of AC-25 Marshall specimen was measured. Obtained results were compared with that from the virtual meso-finite element analysis. Results show that the parameters of each phase medium have great influence on the virtual mesoscopic analysis. The results of meso-optical strain experiment are larger than that from virtual meso analysis's. However, the virtual strain response is similar to meso-optical experimental results, and in above two kinds of analysis, the weak links of bituminous mixture's failure are both coupling material and different material interface.

Keywords: road engineering; bituminous mixture; marshall splitting experiment; mesoscopic finite element analysis; meso-optical experiment; strain response