

细观尺度下大孔隙环氧沥青混合料损伤演化分析

王江洋¹, 钱振东¹, 王亚奇²

(1. 东南大学 智能运输系统研究中心, 南京 210018; 2. 镇江市公路管理处, 江苏 镇江 212028)

摘要: 通过数字图像技术获取了大孔隙环氧沥青混合料的多相细观结构, 建立了包含集料、沥青砂浆、空隙在内的细观结构有限元仿真模型, 引入了内聚力模型, 通过劈裂试验数值模拟, 对内部结构应力响应、裂纹扩展及损伤演化过程进行了分析. 研究表明: 空隙、集料等细观结构的不均匀分布, 对混合料的应力响应及其分布均造成一定影响; 劈裂试验模拟过程中, 损伤变量 D 值达到 1 时, 试件开始启裂, 预设内聚力单元模拟的启裂位置与室内试验观察较为一致, 而后裂缝开始扩展, 但扩展速率逐渐变小; 双线性内聚力模型较好地模拟了混合料损伤规律与裂纹启裂、扩展路径.

关键词: 大孔隙环氧沥青混合料; 双线性内聚力模型; 非均质细观结构; 裂纹扩展与损伤演化

中图分类号: U 416.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)08-1223-07

Analysis of Damage Evolution in Heterogeneous Porous Epoxy Asphalt Mixture Based on Micro-Scale

WANG Jiang-yang¹, QIAN Zhen-dong¹, WANG Ya-qi²

(1. Intelligent Transport System Research Center, Southeast University, Nanjing 210018, China;

2. Zhenjiang Highway Management Office, Zhenjiang 212028, Jiangsu, China)

Abstract: The digital image processing was used to capture the microstructure, and the finite-element model including the aggregate, sand mastic and air voids was established. The simulations were performed to investigate crack evolution under monotonic loading using a bilinear cohesive zone model. Results show that the inhomogeneous distributions of the aggregates and the air voids have some influence on the stress distribution. When the damage variable (D) increases to 1, the crack initiation will occur, and there are great agreements between the crack initiating location of simulation and that of experiment. The growth rate of the crack quantities decreases with the crack propagation occurring. The bilinear cohesive zone model can simulate the damage evolution, crack initiation and propagation well.

Key words: porous epoxy asphalt mixture; bilinear cohesive zone model; heterogeneous microstructure; crack propagation and damage evolution

大孔隙沥青路面是由粗集料含量达 80% 左右的沥青混合料组成的道路面层, 混合料采用骨架-空隙结构, 具有优良的排水、抗滑、降噪等功能^[1]. 而热塑性沥青材料的抗氧化不足是缩短大孔隙沥青

路面使用寿命的主要原因. 在此背景下, Herrington 等^[2] 首先对环氧改性 (epoxy modified) 开级配排水路面 (open-graded porous asphalt, OGPA) 开展了潜在效益研究, 通过老化和未老化试件的 Cantabro 试

收稿日期: 2012-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178114); 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B03).

作者简介: 王江洋(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事新型路面材料的研发与应用、桥面铺装设计与维修成套技术方面的研究, E-mail: jywangseu@gmail.com.

验测试表明 相比普通 OGPA 混合料, 固化后的环氧改性 OGPA 混合料表现出更优的粘聚强度和抗氧化性能. 环氧沥青混合料 (epoxy asphalt mixture, EAM) 近年来在国内大跨钢桥铺装中得到广泛应用, 成功解决了钢桥面铺装永久变形、推移、拥包等技术难题^[3-4]. 钱振东等^[5]在钢桥铺面研究基础上, 采用环氧沥青制备出大孔隙环氧沥青混合料 (porous EAM, PEAM), 路用性能测试结果表明, PEAM 兼具良好排水、抗滑性能的同时提高了大孔隙沥青混合料的力学强度、高温性能和水稳定性等.

裂缝目前仍是环氧沥青铺面无法避免的主要病害形式^[6]. 研究 PEAM 的破损机理是了解大孔隙沥青路面力学行为、损伤规律、裂缝的形成与扩展和进行路面结构分析的基础. 传统的断裂力学分析中预先设置一个无限“尖”的裂缝, 从而导致裂缝尖端场的奇异性, 这与实际不符. 同时, 沥青混合料是由集料、沥青砂浆 (包含沥青结合料与细集料) 以及空隙组成的非均质复合材料, 其损伤破坏机理受材料的非均质结构影响较大, PEAM 空隙率高、粗集料含量多的特点, 使其细观结构组成及形态的影响较密级配沥青混合料更为显著. 而内聚力模型 (cohesive zone model, CZM) 由于可以考虑裂缝尖端应力场的非线性以及裂缝尖端区域材料的软化和塑性行为, 能准确模拟材料的损伤断裂过程, 因此引起国内外诸多学者的关注. Souza 等^[7]与 Kim 等^[8]借助 CZM 在细观尺度下对沥青混合料的 I 型断裂模式进行了模拟. 张东等^[9]与钮凯健^[10]基于 CZM 分别对沥青混合料劈裂试验和沥青路面裂缝的发展过程进行了数值模拟, 验证了模型的适用性. 已有国外研究成果表明 CZM 能准确模拟材料的损伤断裂过程, 但目前国内尚未将 CZM 推广应用在细观尺度下的沥青混合料断裂分析中; 同时国外研究大都集中在密级配沥青混合料领域, 针对骨架空隙结构的研究报道较少. 因此, 本文引入 CZM, 综合运用图像处理与有限元数值方法, 利用劈裂试验, 在细观尺度下对 PEAM 中的集料、沥青砂浆、空隙之间的应力响应分布和裂纹扩展及损伤演化过程进行仿真分析.

1 双线性内聚力模型

CZM 最初由 Dugdale^[11]和 Barenblatt^[12]提出, 认为裂缝尖端存在一个微小区域抵抗界面的分离, 如图 1(a) 所示, 该区域提供了分离所需的内聚力. CZM 的本构关系是由内聚力区域单元的牵引-分离定律所定义, 该定律描述了界面上的粘聚力与单元

厚度方向上 2 个面之间相对位移的关系, 从断裂特征上来说, 包括双线性 CZM 及指数型 CZM 等. 已有研究结果表明^[13], 双线性 CZM 较指数型更适用于模拟沥青混合料的开裂行为.

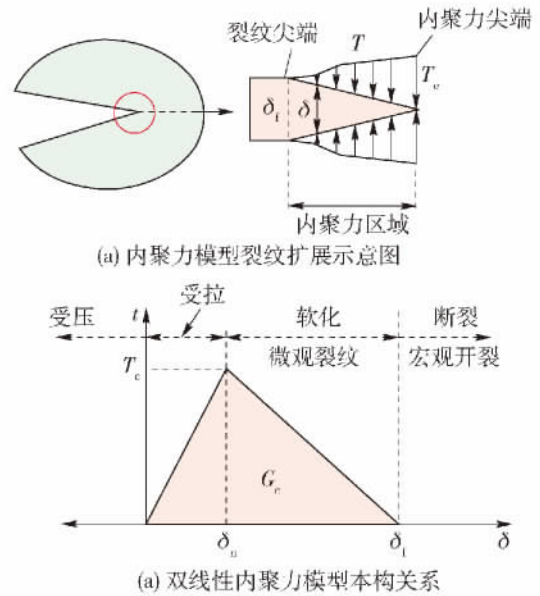


图 1 内聚力模型原理与线性本构关系图

Fig. 1 Illustration of principle and linear constitutive relation of cohesive zone model

图 1(b) 为有限元软件 ABAQUS 提供的线型应力-位移曲线, 通过软件的 Cohesive 单元库 (coh 单元) 实现. coh 单元提供了上述牵引-分离定律, 表达了界面作用的应力同界面之间相对位移的关系. 其中: t 为内聚力; δ 为裂缝面的相对位移; T_c 为材料的开裂强度; δ_n 为内聚力达到 T_c 时裂缝面的位移; δ_f 为失效位移; G_c 为断裂能, 理论上等于曲线下方面积, 表达式为

$$G_c = \frac{1}{2} T_c \delta_f \quad (1)$$

双线性 CZM 假定: 在内聚力达到开裂强度之前 ($\delta \leq \delta_n$), 区域内材料是线弹性的; 达到开裂强度后 ($\delta > \delta_n$), 表现为线性软化行为. $\delta_n < \delta < \delta_f$ 时, 是材料的软化阶段, 即损伤阶段.

内聚力达到开裂强度后, ABAQUS 软件引入了一个无因次的损伤因子 D ($0 \leq D \leq 1$) 表征材料破坏水平. 对于 I 型断裂 D 的表达式为^[14]

$$D = \frac{\delta_f (\delta_{\max} - \delta_n)}{\delta_{\max} (\delta_f - \delta_n)} \quad (2)$$

式中: δ_{\max} 是加载过程中界面张开位移达到的最大值; δ_f 由式 (1) 计算. $D = 0$ 时, 表示材料无损伤; $D = 1$ 时, 表示材料已经断裂.

2 基于细观结构的有限元建模

2.1 材料参数

本文所用环氧沥青与文献 [5] 中相同,集料选用玄武岩,矿粉为石灰岩. 混合料采用 OGFC-13 级配,如表 1 所示,通过析漏试验和飞散试验确定最佳油石比为 5.1%,空隙率为 22%. 国内外学者在进行沥青混凝土细观力学分析时,对于 AC-16 级配,通常以 2.36 mm 作为划分粗细集料的界限^[10]. 本文 PEAM 中 2.36 mm 粒径以上集料的质量分数为 84.2%,因此砂浆中的细料由沥青中掺含 2.36 mm 通过率以下的细集料与矿粉构成是合适的,同时粗集料含量较高能高限度发挥图像的识别能力. 采用比表面积法^[15]确定砂浆级配,如表 1 所示,油砂比(细料裹附的沥青质量与细料质量的比值)为

27.97%.

本文室内试验均在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下进行,对应 PEAM 的低温抗裂性能,同时降低沥青材料的温度敏感性,便于数值仿真中材料参数的获取. 劈裂试验有限元细观模型由集料、砂浆和 coh 单元组成,如图 2 所示. 模型中各相均需赋予各自的材料参数,即弹性模量(集料、砂浆、coh 单元),抗拉强度和断裂能(coh 单元). 本文细观模型中假定集料和砂浆均为线弹性材料,集料模量取 30 GPa ^[16],泊松比 0.25;通过 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的单轴压缩试验获取砂浆弹性模量 E 为 750 MPa;为保证沥青砂浆与 coh 单元变形的协调性,假设两者弹性模量相同,coh 单元的抗拉强度与断裂能参数通过 PEAM 的劈裂试验和切口小梁三点弯曲试验结果进行试算校核,取抗拉强度 5.47 MPa,断裂能 445 J/m^2 .

表 1 PEAM 和沥青砂浆各档集料配比

Tab. 1 Gradation of mixture and mastic

级配类型	筛孔通过率/%									
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
PEAM	100	96.7	70.0	22.4	15.8	12.5	9.3	7.3	6.1	4.8
环氧沥青砂浆	100	100	100	100	100	79.1	58.9	46.2	38.6	30.4



(a) 单轴压缩试验-弹性模量(E)



(b) 劈裂试验-抗拉强度(T_c)



(c) 单边切口三点弯曲断裂试验-断裂能(G_c)

图 2 有限元模型材料参数的确定

Fig. 2 Determination of FEM model parameters

2.2 细观结构数字图像获取

采用 Superpave 旋转压实仪制备试样,固化环氧沥青属热固性材料,将成型好的试件放入 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内养生 5 h 固化后钻芯获取混合料试样. 为了获取 PEAM 的内部细观结构,对混合料试样运用数字图像处理技术.

利用数码相机采集切片试样断面 RGB 图片,如图 3(a) 所示. 借助 Matlab 软件将断面切片转化为灰度图像. 图像的二值化是通过把图像的灰度分成不同的等级,然后通过设置灰度阈值的方法把背景和目标物分离开来. 本文中图像灰度等级范围从 0

(黑)到 255(白),通过灰度阈值将原始图像转化为二值化图像(白色代表 2.36 mm 粒径以上的集料,黑色代表沥青砂浆,此处不考虑空隙的存在),最后对二值化图像进行几何矢量化处理,如图 3(b)和(c)所示.

2.3 细观结构有限元模型

利用 AutoCAD2004 的 DXF 接口,将矢量化后的信息导入 ABAQUS 有限元软件中,分别对集料和沥青砂浆构建有限元模型,如图 3(d)和(e)所示,其中砂浆有限元模型中除了预留“空位”给对应位置的集料外,其余“空洞”则表征空隙. 将两部分模型

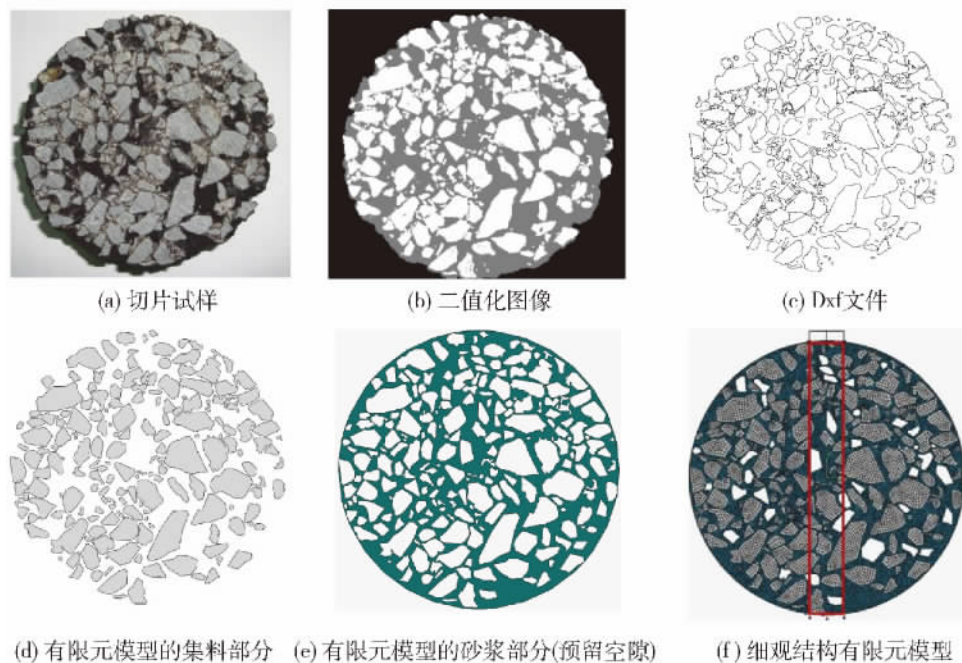


图3 图像处理与有限元模型生成过程

Fig. 3 Procedure for projection of microstructural image into FEM mesh

组合后形成如图 3 (f) 所示的 PEAM 细观结构有限元模型, 多余的白色部分“空洞”代表空隙, 且不赋予材料参数. 假设集料与砂浆的接触形式为完全连续, 集料与砂浆分别采用四边形为主网格和三角形网格, 集料的种子密度为 1.0 mm, 砂浆为 0.6 mm, 网格划分算法采用 ABAQUS 中的自由网格算法.

Soares 等^[17]在研究中发现沥青混合料在低温时裂纹穿过集料扩展, 而本文 PEAM 劈裂试验中, 裂纹均绕开集料, 沿着集料-砂浆界面或原有孔洞扩展, 如图 4 所示. 因此, 作者在有限元模型中按照室内试验真实情况, 在最易开裂面上布置 coh 单元, 模型如图 5 所示.



图4 劈裂试验试件破坏面

Fig. 4 Fracture face of specimen

根据《公路工程沥青与沥青混合料试验规程 (JTJ 052—2000)》中的劈裂试验方法, 采用顶部控制应变加载方式进行竖向加载, 劈裂条宽度为 12.7

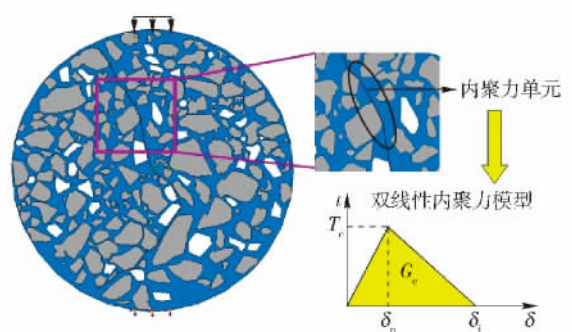


图5 基于内聚力模型的劈裂试验有限元模型

Fig. 5 Numerical model based on the CZM for IDT test

mm, 采用 1 mm/min 的加载速率评价沥青混合料的 -15 °C 低温抗裂性能. 模型的底部采用竖直和水平方向均固定的约束形式.

3 结果与分析

3.1 基于细观结构的应力响应

本文中大孔隙环氧沥青混合料的空隙率高达 22%, 首先假定集料与沥青砂浆的模量比 $\lambda = 1$, 仅研究空隙分布对试件内部结构应力响应的影响. 选取无空隙理想弹性体作为计算比较模型, 在图 3 (d) 模型中沿径向截取加载条宽度、模型高度的一块区域, 计算此区域某加载时刻沿径向的 σ_{xx} 应力响应, 其中模型的圆心为 $(0, 0)$ 点, 距圆心的距离用 s 表示, 见图 6 所示.

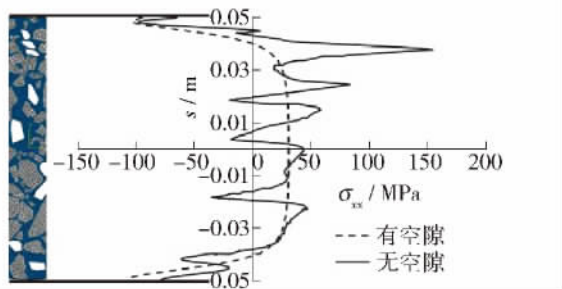


图 6 无空隙理想状态和考虑空隙的模型应力响 ($\lambda = 1$)
 Fig. 6 Internal stress distribution of the models with and without air voids ($\lambda = 1$)

图 7 所示为密级配环氧沥青混合料 (EAM) 细

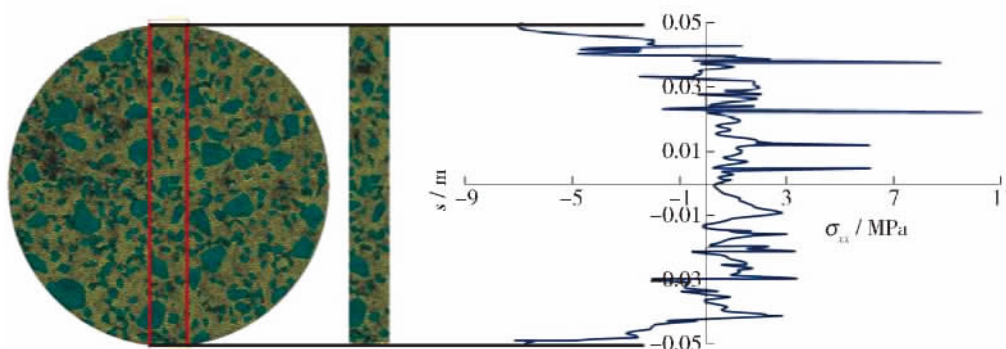


图 7 密级配环氧沥青混合料有限元模型内部应力响应^[18]
 Fig. 7 Internal stress distribution of the model for dense gradation EAM^[18]

密级配环氧沥青混合料属悬浮密实结构,应力峰值由高强度热固性环氧沥青砂浆与粗集料间的粘结力承担,受沥青材料性质影响较大。而 PEAM 属骨架空隙结构(22%空隙率),混合料强度以骨料间的内摩阻力和嵌挤力为主,如图 6 所示,空隙阻碍了应力的传递同时导致应力集中的产生,由于空隙无法承担应力,因此属于材料构造的薄弱环节。PEAM 和密级配 EAM 的室内强度性能试验结果对比如表 2 所示,由表 2 可知,PEAM 的马歇尔稳定度、辟裂模量 S_T 、弯拉模量 S_B 均低于密级配 EAM,亦证明了空隙对大孔隙环氧沥青混合料的结构强度影响较大。

表 2 PEAM 与 EAM 的室内试验结果对比 (-15 °C)
 Tab.2 Laboratory test results of PEAM and EAM

材料类型	S_T /MPa	S_B /MPa	马歇尔稳定度 / kN
PEAM	1 406	1 988	10.3
EAM	4 173	6 430	45.5

3.2 裂纹扩展与损伤演化分析

当 CZM 模型中的拉应力超过抗拉强度时,试件在这个区域内就会发生损伤,裂缝形成过程中, D 值

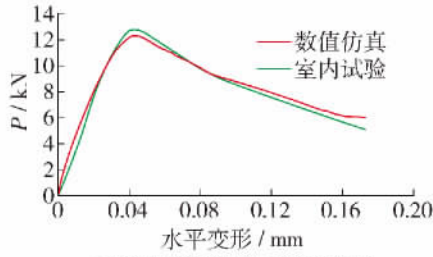
观有限元模型(空隙率 2% 左右,未纳入模型)的内部应力响应^[18],此模型中集料与砂浆分别赋予了不同属性,由图可见在集料-砂浆界面出现了应力集中现象。图 6 对应的 PEAM 模型中尽管假定集料与砂浆的力学性质相同,但受空隙分布的影响,应力值波动较大、分布不均匀,同时又具有一定的规律性。在砂浆-空隙界面出现应力集中现象,最大拉应力出现在靠近顶部的空隙界面处,而不是理想状态下的试件中心位置,显然,对 PEAM 模型中的集料与砂浆分赋参数时,会出现和图 7 中在集料-砂浆界面发生应力集中现象的相似情形。

从 0 增到 1。图 8(a) 所示为劈裂试验的双线性 CZM 数值模拟(基于图 5 模型)和试验结果,由图可见,室内劈裂试验测得的峰值应力比数值模拟预测结果高 6.1%,两者的荷载-变形曲线吻合较好,证明本文中采用的材料力学参数与有限元技术的正确和可靠性,以此为基础进行损伤演化分析。

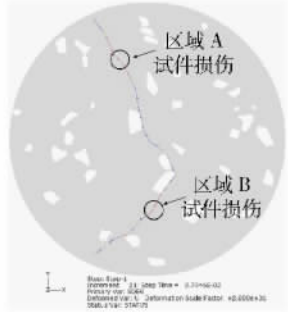
本文结合图 8(a)~8(e),在荷载-变形曲线中选取 4 个加载时间段,分别对应损伤、启裂、扩展和失效,描述 PEAM 细观模型在劈裂试验中裂纹扩展与损伤演化过程。

1) 试件损伤阶段。选取裂纹启裂区域 A 作为分析对象,研究区域内 coh 单元的平均 D 值与荷载 P 的关系,如图 9(a) 所示,随着荷载的增加,该单元开始出现损伤,并且急剧增大,荷载 P 由 3.5 kN 增至 8.5 kN 期间,损伤值 D 从 0 变为 0.98。荷载从 8.5 kN 增加到 11.5 kN 的过程中,试件 A 区域处于接近抗拉强度、损伤急剧累积阶段(如图 8(b) 所示),同时其他区域的损伤值以及受损长度也在逐渐增加。

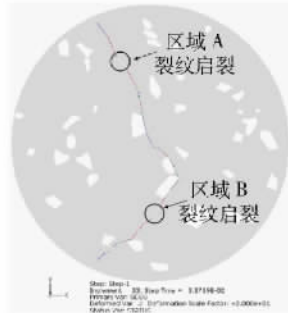
2) 裂纹启裂阶段。随着荷载的继续增大,区域 A、B 中的损伤值就会达到 1,内聚力界面单元开始



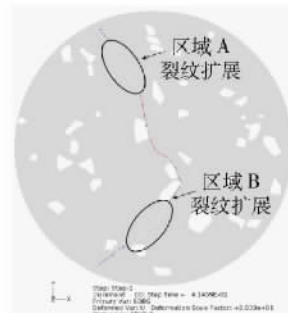
(a) CZM模拟结果和试验结果



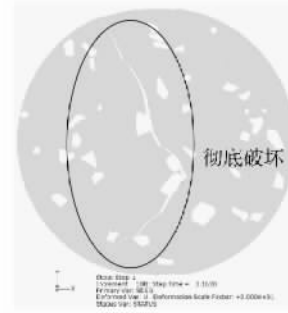
(b) 部分损伤



(c) 裂纹启裂



(d) 裂纹扩展



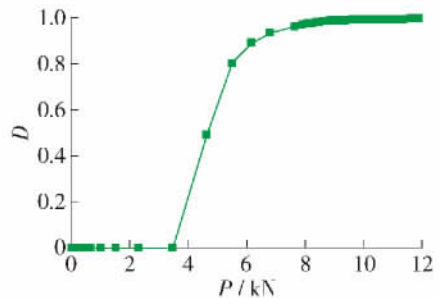
(e) 彻底破坏

图8 模型的裂纹扩展及损伤演化过程

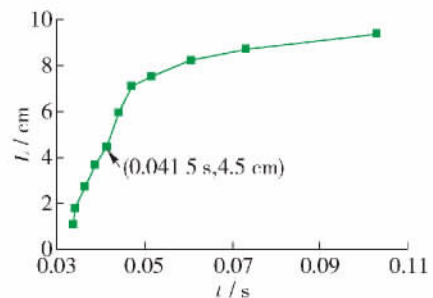
Fig. 8 Damage evolution process of splitting test

发生分离,从而裂纹启裂,产生宏观裂缝,如图8(c)所示. 试验中启裂荷载达到峰值应力的88%,高于Soares等^[17]研究密级配沥青混合料启裂荷载对应的峰值应力百分数,此现象主要是由PEAM的骨架空隙结构受力特点所致,强度是以骨料间的内摩阻力和嵌挤力为主,沥青材料的黏弹性被弱化,混合料呈现出更为明显的脆性特征. 虽然本文数值模拟时基于室内破坏情形,在模型对应位置上预设coh单元,但使用CZM模型模拟出的裂纹启裂部位与室内试验观察情况较为一致,说明双线性CZM模型用来分析沥青混合料裂缝形成的适用性较好.

3) 裂缝扩展阶段. 荷载达到11.8 kN后,裂缝启裂,荷载继续增加,裂缝开始扩展,如图8(d)所示,荷载上升至峰值后开始下降. 图9(b)是裂缝随加载时间变化的扩展情况,试件处于图8(d)所示情况时,对应图9(b)中的加载时间为0.0415 s,裂缝长度(L)为4.5 cm,此后裂缝逐渐扩展,但扩展速率变小,这是因为开裂最初总是沿着材料构造的薄弱面发生,高强度的骨料本身就是阻止裂缝扩展的因素,同时扩展后期受到两端压条的约束也越大.



(a) 损伤变量D随荷载P变化图



(b) 裂缝长度随时间变化图

图9 裂纹启裂与扩展分析

Fig. 9 Analysis of crack initiation and propagation

4) 试件失效阶段. 裂缝不稳定扩展后荷载迅速减小,发生低温脆性破坏. 如图8(d)所示,CZM模型中的所有coh单元此时 $D = 1$,均已失效,试件彻底破坏,图中可见模型在外观上已产生明显的竖向变形.

3 结论

1) 受内部空隙影响,有限元模型中在砂浆-空隙界面出现应力集中现象,最大拉应力出现在靠近顶部的空隙界面处;空隙分布对 PEAM 结构强度影响较大,其强度性能劣于密级配环氧沥青混合料。

2) 双线性 CZM 纳入有限元细观模型中,损伤变量 D 值达到 1 时,内聚力界面单元开始发生分离,试件发生裂纹启裂,启裂荷载为峰值应力的 88%;预设 coh 单元模拟出的裂纹启裂部位与室内试验观察情况较为一致。

3) 启裂后,荷载继续增加,裂缝开始扩展,但扩展速率逐渐变小;裂缝不稳定扩展后荷载迅速变小,CZM 模型中的所有 coh 单元此时 $D = 1$,均已失效,试件彻底破坏。

4) 双线性 CZM 模型可以用于分析沥青混合料的损伤断裂问题,包括损伤规律、裂纹启裂及扩展路径等。

参考文献:

- [1] LIU Q Q, CAO D W. Research on material composition and performance of porous asphalt pavement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(4): 135-140.
- [2] HERRINGTON P, ALABASTER D. Epoxy modified open-graded porous asphalt [J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9(3): 481-498.
- [3] GAUL R. A long life pavement for orthotropic bridge decks in China [C]//GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics. Changsha: ASCE, 2009: 1-8.
- [4] 罗桑,钱振东. 环氧沥青混凝土铺装表面特性试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 219-222.
LUO Sang, QIAN Zhen-dong. Experimental research on surface characteristics of epoxy asphalt concrete pavement [J]. Journal of Beijing University Technology, 2012, 38(2): 219-222. (in Chinese)
- [5] 李泽昊,钱振东,罗桑,等. 大孔隙环氧沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2011(12): 11-14.
LI Ze-hao, QIAN Zhen-dong, LUO Sang, et al. Road performance study of porous epoxy asphalt mixture [J]. Highway, 2011(12): 11-14. (in Chinese)
- [6] 陈磊磊,钱振东,何长江,等. 钢桥面沥青铺装裂缝处治技术效果评价[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(6): 888-892.
CHEN Lei-lei, QIAN Zhen-dong, HE Chang-jiang, et al. Effect evaluation of treatment technique for cracking on asphalt steel deck surfacing [J]. Journal of Beijing University Technology, 2011, 37(6): 888-892. (in Chinese)
- [7] SOUZA F V, SOARES J B, ALLEN D H, et al. Model for

predicting damage evolution in heterogeneous viscoelastic asphalt mixtures [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1891: 131-139.

- [8] KIM H, WAGONER M P, BUTTLAR W G. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone element model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8): 52-563.
- [9] 张东,黄晓明,赵永利. 基于内聚力模型的沥青混合料劈裂试验模拟[J]. 东南大学学报, 2010, 40(6): 1276-1281.
ZHANG Dong, HUANG Xiao-ming, ZHAO Yong-li. Simulation of indirect tension test of asphalt mixture based on cohesive zone model [J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(6): 1276-1281. (in Chinese)
- [10] 钮凯健. 基于内聚力模型的沥青路面裂缝发展过程模拟[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2007.
NIU Kai-jian. Research on simulation for fracture expanding processes of asphalt pavements based on cohesive zone model [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2011. (in Chinese)
- [11] DUGDALE D. Yielding of steel sheets containing slits [J]. Journal of Mechanics and Physics Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [12] BARENBLATT G. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture [J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [13] SONG S H, PAULINO G H, BUTTLAR W G. Abilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material [J]. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(18): 2829-2848.
- [14] Dassault Systems Simulia Corp. Abaqus analysis user's manual [R/OL]. USA: Dassault Systems Simulia Corp [2012] <https://www.sharcnet.ca/software/Abaqus/6.11.2/books/usb/default.htm>.
- [15] 汪海年. 沥青混合料微观结构及其数值仿真研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2007.
WANG Hai-nian. Research on numerical simulation of the asphalt mixture microstructure [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [16] WANG L B. Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics [M]. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [17] SOARES J B, FREITAS F A C, ALLEN D H. Considering material in heterogeneity of the material [J]. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 2003, 1832: 113-120.
- [18] WANG Jiang-yang, QIAN Zhen-dong. Indirect tension test of epoxy asphalt mixture using microstructural finite-element model [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2011, 27(1): 65-69.

(责任编辑 郑筱梅)