

文章编号: 1000-4750(2015)01-0096-08

环氧沥青混凝土裂纹起裂与失稳扩展的临界特征

钱振东¹, 王江洋²

(1. 东南大学智能运输系统研究中心, 江苏, 南京 210018; 2. 苏州市公路管理处, 江苏, 苏州 215007)

摘 要: 为了获取环氧沥青混凝土的裂纹起裂与失稳扩展临界点, 重构了环氧沥青混凝土非均质(集料、砂浆和空隙)多层次(矿料级配)结构三维虚拟试件, 采用离散元方法实施了单边切口小梁虚拟三点弯曲试验, 借助数字摄像法捕捉了室内小梁试件表面裂纹发展情况, 分析了裂缝发展过程中裂缝尖端张开位移(*CTOD*)和裂缝口张开位移(*CMOD*)之间的变化关系。研究表明: 裂尖张开位移 δ_{25} 参数的使用为理解实际流入断裂带用于裂缝扩展的那部分能量开辟了一条新思路; 裂缝尖端张开位移和裂缝口张开位移关系曲线的两个转折点描述了裂缝起裂和临界失稳扩展状态, 环氧沥青混凝土断裂过程中裂缝的扩展经历了起裂、稳定扩展和失稳扩展 3 个阶段; δ_{25} -*CMOD* 曲线分析法可以作为研究沥青混凝土材料断裂行为的辅助手段。

关键词: 环氧沥青混凝土; 三维离散元方法; 虚拟断裂试验; 裂尖张开位移; 裂缝口张开位移

中图分类号: U414 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0666

CRITICAL CHARACTERIZATION OF CRACK INITIATION AND UNSTABLE PROPAGATION FOR EPOXY ASPHALT CONCRETE

QIAN Zhen-dong¹, WANG Jiang-yang²

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

2. Suzhou Highway Bureau, Suzhou, Jiangsu 215007, China)

Abstract: In order to determine the critical points of the crack initiation and unstable propagation for epoxy asphalt concrete (EAC), firstly, a three-dimensional (3D) virtual specimen of EAC with heterogeneous (coarse aggregates, asphalt mastic and air voids) and multilayer (aggregate gradation) morphological features was reconstructed. Secondly, the virtual three-point bending test of a single-edge notched beam was implemented using the discrete element method (DEM), and a digital camera method was used to capture the surface crack development of the experimental beam specimen. Finally, the changing relationship between the crack tip opening displacement (*CTOD*) and the crack mouth opening displacement (*CMOD*) throughout the crack development was analyzed. The results indicate that the introduction of δ_{25} representing *CTOD* provides a new idea for understanding the energy occurring in the fracture zone used for crack propagating. Additionally, the two governing points on the relationship curve between *CTOD* and *CMOD* approximately describe the initiation and critical unstable propagation of cracks, respectively. Meanwhile, the crack development of EAC includes three stages, namely, initiation, stable and unstable propagation. Furthermore, it is found that the analysis method based on the δ_{25} -*CMOD* curve can be used as a supplemental tool to investigate the fracture behavior of EAC.

Key words: epoxy asphalt concrete; three-dimensional discrete element method; virtual fracture test; crack tip opening displacement; crack mouth opening displacement

收稿日期: 2013-07-24; 修改日期: 2014-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178114); 国家科技支撑计划课题项目(2009BAG15B03)

通讯作者: 钱振东(1969-), 女, 江苏人, 教授, 博士后, 博导, 主要从事铺面材料与结构研究(E-mail: qianzd@seu.edu.cn).

作者简介: 王江洋(1985-), 男, 江苏人, 工程师, 博士, 主要从事道路与桥梁工程研究(E-mail: jywangseu@gmail.com).

裂缝是钢桥面环氧沥青混凝土铺装的主要病害形式,若得不到有效防治,裂缝会迅速扩张,影响钢桥面铺装的使用性能与寿命,造成不利的社会与经济影响。钱振东等^[1]研究成果表明,在环氧沥青钢桥面铺装层内出现的裂缝型式以 I 型裂缝为主。过去数十年间,带切口小梁三点弯曲试验是测试和分析沥青混凝土 I 型断裂参数一种较为普遍的试验手段,该方法易于获取沥青混凝土的断裂韧度、裂缝口张开位移和裂尖张开位移,并以此为基础进行抗裂指标的设计和材料组成的优选。但此类现象试验法需要消耗大量时间和器材成本,所得数据结果的重复和再现缺乏稳定性。

近年来,伴随着图像处理技术与计算机科学的快速发展,构建能够还原沥青混凝土细观结构的数值模型进行虚拟试验逐渐成为研究热点。离散单元法^[2-3]凭借其能够处理应力不连续、大变形问题等方面的优势,被相关学者用来预测沥青混凝土的劲度模量^[4]、开展虚拟蠕变试验^[5]以及研究断裂行为^[6-8]等。总体而言,离散元方法在沥青混凝土断裂行为模拟方面的研究可分为三个阶段:①模型中未考虑集料的不规则形状和沥青砂浆组分,仅以随机分布的不同半径二维圆盘单元作为集料混合物进行加载,研究了粘结强度比、颗粒摩擦系数和加载速率对微裂缝扩展的影响^[6];②在利用图像技术获取细观结构信息基础上,建立了沥青混凝土二维非均质离散元模型,研究了 I 型与复合型断裂行为,并在二维尺度下初步分析了粗集料对沥青混凝土断裂机理的影响^[7];③建立了能够考虑集料不规则形状、矿料级配和空隙特征的沥青混凝土三维离散元模型,通过对比分析室内结果验证了模型的有效性,并演示了裂纹的三维扩展过程^[8]。上述三个阶段研究成果初步验证研究了细观离散元模型数值结果与试验结果的匹配性,以及温度、加载速率、集料强度等宏观条件对断裂行为的影响,为利用离散元方法深入揭示沥青混凝土裂缝扩展过程中的相关规律、机理行为保留了进一步研究空间。

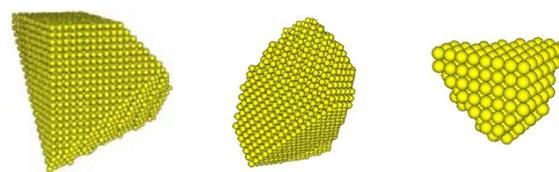
钱振东等^[9]利用带切口小梁的三点弯曲室内试验,测定了环氧沥青混凝土的临界裂尖张开位移 $CTOD_c$ 、临界断裂韧度 K_{Ic} 等参数,但研究中对 $CMOD$ 和 $CTOD$ 的关注点仅是临界失稳时刻,并未涉及起裂时刻及裂缝发展过程中的变化规律。此外,低温条件下的环氧沥青混凝土呈现类似水泥混凝土的强度与准脆性特征,是否能够借鉴适用于混

凝土材料的双 K 断裂理论^[10]来描述其断裂发展过程呢?因此,参考徐世焯等^[11]有关混凝土裂缝行为研究中的分析方法,同时引入裂尖张开位移 δ_{25} 代替传统的 $CTOD$ 参数,继采用三维颗粒流程序 (PFC3D)建立了环氧沥青混凝土细观离散元模型进行虚拟断裂试验^[8]之后,本文采用该虚拟试验方法来研究裂缝发展过程中裂尖张开位移 δ_{25} 与裂缝口张开位移 $CMOD$ 之间的变化关系,探讨 δ_{25} - $CMOD$ 曲线转折点与双 K 断裂理论两控制点的对应关系,进而确定环氧沥青混凝土裂纹起裂与失稳扩展的临界特征。

1 虚拟和室内试验概况

1.1 三维离散元虚拟试件的随机构建

集料尤其是粗集料颗粒的不规则形状对环氧沥青混凝土宏观力学行为具有显著的影响。为此,参照 Liu 等^[12]关于不规则颗粒生成的研究成果,作者提出了单个多面体集料的随机切割算法,详细内容参考文献[8],该算法的核心思想基于一个立方体区域被任意多平面切割即成为拥有不规则形状的多面体区域这一概念,在 PFC3D 内以规则排列的小球单元填充多面体区域即形成如图 1 所示的不同粒径粗集料的典型颗粒形状。



(a) 9.5mm~13.2mm (b) 4.75mm~9.5mm (c) 2.36mm~4.75mm

图 1 典型颗粒的不规则形状

Fig.1 Representative irregular shape of aggregate particles

需要说明的是,在集料颗粒的随机生成过程中,虚拟集料的形状(球度、扁平率)、棱角度以及长轴取向等微观形态特征均可以通过设置、调整生成算法内的形状参数加以实现。

考虑到文中研究并非侧重考察集料形状特征对混合物力学性能的影响,同时兼顾离散元模型的计算效率,将粒径大于 2.36mm 的集料视为粗集料,粒径小于 2.36mm 的细集料和环氧沥青胶结料视为均质的沥青砂浆,因此,文中构建的三维离散元模型由粗集料、砂浆和空隙组成。根据表 1 中的矿料级配、油石比(6.5%)和空隙率(1.68%)等确定了粗集料的体积百分数,共随机生成了 10 个尺寸为长 250mm×宽 35mm×高 30mm 的虚拟试件,图 2 给出

了其中 3 个模型示例。虚拟试件由 30723 个半径为 1mm 的小球单元组成，其中，集料单元平均 11905 个，通过在砂浆模型中随机删除 525 个单元实现空隙生成。有关虚拟试件详细建立步骤参考文献[8]。

表 1 集料级配

Table 1 Gradation of the aggregates

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
质量通过率/(%)	100	97.1	75.0	62.2	44.6	36.4	26.6	17.3	11.4

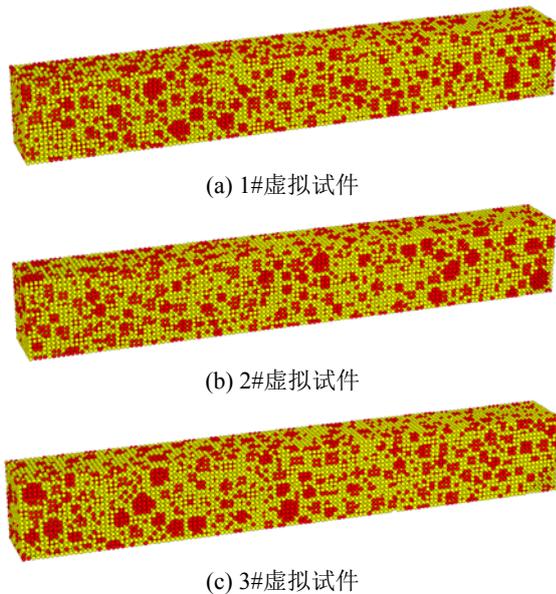


图 2 环氧沥青混凝土三维离散元虚拟试件

Fig.2 3D discrete element virtual specimen of EAC

1.2 离散元模型中各相材料微观力学特性

在上述离散元虚拟试件中，环氧沥青混凝土内部微观组成成分之间存在 4 类接触形式，分别是相邻集料单元之间(agg-agg)、集料内部单元之间(agg-in)、砂浆内部单元之间(mas-in)、集料和砂浆单元之间(agg-mas)的接触。根据 PFC3D 中不同微观接触模型特点^[3]，结合环氧沥青混凝土各相材料力学特性，采用线性刚度和滑动模型描述相邻集料之间接触行为，采用线性刚度与接触粘结模型描述集料内部接触行为，砂浆内部、集料与砂浆界面之间接触行为采用位移软化模型^[7]来描述。

对于离散元模型而言，室内试验测得的材料参数可以理解为是模型微观特性的宏观反映，无法或很难直接为模型中的微观组件单元提供力学参数，有关材料微观特性与宏观特性之间的转换关系参考文献[3]。在获取微观特性过程中，首先需要确定各相材料的宏观试验参数。通过圆柱体单轴压缩试验、劈裂试验和带切口小梁的三点弯曲试验，获取环氧沥青砂浆-10℃条件下的弹性模量 E 、抗拉强度

σ_t 和断裂能 G_f 分别为 6.5GPa、13.2MPa 与 465.5N/m，泊松比 $\nu=0.35$ ；玄武岩集料的弹性模量、抗拉强度和泊松比按照 Wang^[13]的研究成果，分别取 56.1GPa、27.6MPa 和 0.23；对于界面力学参数，目前缺乏公开报道的试验方法，当集料与砂浆刚度确定后，PFC3D 会自行计算并赋予界面刚度，抗拉强度与断裂能则通过试算校核来确定。

文中用来描述砂浆和界面开裂行为的位移软化模型，其本构关系类似双线性内聚力模型^[7]，主要涉及 3 个材料参数：内聚力强度 σ_{max} 、内聚力断裂能 φ_c 和临界裂纹面张开位移 δ_{sep} ，在两参数已知条件下即可根据本构关系获得第三参数。室内试验通常很难直接获取临界张开位移，因此将抗拉强度和断裂能作为 σ_{max} 和 φ_c 的估计值换算得到 PFC3D 的输入参数 δ_{sep} 。表 2 所列是在模拟过程中与实测结果不断对比分析确定的离散元模型微观特性。

表 2 环氧沥青混凝土三维离散元模型的材料微观特性(-10℃)

Table 2 Material microscopic properties for the three-dimensional DE model of EAC (-10℃)

材料 相类	材料宏观力学参数			接触 类型	离散元模型的材料微观特性			
	E /GPa	σ_t /MPa	ν		法向刚度/ (GN/m)	切向刚度/ (GN/m)	粘结力/ N	δ_{sep} /m
集料	56.1	27.6	0.23	agg-agg	0.224	0.0911	—	—
				agg-in	0.224	0.0911	110	—
砂浆	6.5	13.2	0.35	mas-in	0.026	0.0093	53	3.8×10^{-5}
界面	—	10.5	0.35	agg-mas	—	—	42	3.2×10^{-5}

1.3 裂尖张开位移与裂缝口张开位移的测量

以表 1 所示级配成型环氧沥青混凝土车辙试验板，所用环氧沥青结合料为国产 2910 型钢桥面铺装用结合料，由两个组分构成，分别为环氧树脂和基质沥青与添加剂。混合料集料为玄武岩，矿质填料为石灰岩矿粉。待环氧沥青混凝土车辙板完全固化后切割成小梁试件，油石比 6.5%，空隙率 1.7%，每组 10 个平行试件在 UTM 试验机上进行-10℃条件下的单边切口小梁三点弯曲断裂试验，加载速率 1mm/min，如图 3 所示。

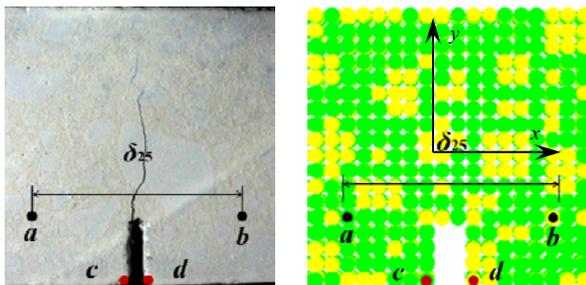


图 3 单边切口小梁断裂试验

Fig.3 Single-edge notched beam fracture test

Song 等^[14]提出了一个名为 δ_{25} 的位移参数来定义沥青混凝土的裂尖张开位移, 可利用位移传感器、张贴应变片或数字摄影等方法获取该参数。 δ_{25} 起源于 Schwalbe 等^[15]于 1995 年提出的用于描述金属材料 *CTOD* 的 δ_5 参数, δ_{25} 将跨越切口尖端的标距长度由 5mm 延长至 25mm, 其原因是为了弱化切口尖端附近粗集料的影响, 认为量测 *CTOD* 的标距长度以粗集料最大公称粒径的 3 倍左右为宜。文中所用级配的最大公称粒径为 9.5mm, 引入 δ_{25} 代表 *CTOD* 来开展研究是合适的。

采用低成本、试验操作简易的数字摄影法, 为便于捕捉成像, 在试件正对摄像机一面涂刷白色颜料。如图 4(a)所示, 根据需要的时间点截取图像, 借助 Image-Pro Plus 软件量测 a 、 b 间距离(δ_{25})与 c 、 d 间距离(*CMOD*), 再从 UTM 试验机中提取采集的同步时间与荷载 P , 即可得到 P - δ_{25} 曲线和 P -*CMOD* 曲线。对于三维离散元模型, 如图 4(b)所示, δ_{25} 可以通过切口尖端两侧沿 x 正负方向第 7 个球单元 (半径 1mm) 的位移差值来表示(a 、 b 两处球单元的球心实际相距 26mm), 在模拟过程中记录 a 、 b 两处沿厚度 z 方向上共 26 个球单元的位移(28 个单元有 2 个为空隙, 不计入), b 处 13 个球单元 x 方向上的位移均值与 a 处间的差值即为 δ_{25} 。采用类似的方法记录 c 、 d 处沿 z 方向上球单元的位移, 计算出 *CMOD* 的值。



(a) 室内试验 (b) 虚拟试验
图 4 *CMOD* 与 δ_{25} 的标识

Fig.4 Identification of *CMOD* and δ_{25}

2 模拟与试验结果分析

2.1 荷载与各项位移参数关系曲线

为开展单边切口小梁虚拟三点弯曲试验, 在图 2 所示虚拟试件跨中的底部向上删除了 111 个单元, 形成了 0.2 逢高比的预制切口。采用 PFC3D 的“墙”来匹配试验室中小梁支座、加载压头位置与加载方式: ① 支座跨度 200mm, 固定墙支座的竖向自由度; ② 跨中墙压头的加载速率为 1mm/min; ③ 模

拟过程中采集微观裂纹数量、压头反力、 δ_{25} 和 *CMOD*。选取实验室 2#试件与 1#虚拟试件的 δ_{25} 和 *CMOD* 结果绘于图 5 中。

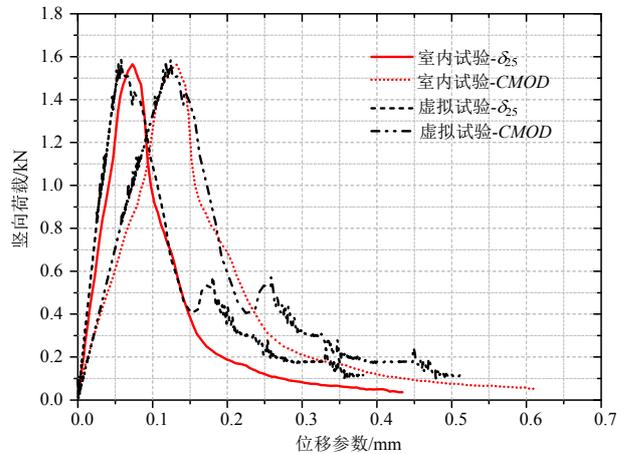


图 5 荷载-*CMOD* 曲线和荷载- δ_{25} 曲线

Fig.5 Load versus *CMOD* curves and load versus δ_{25} curves

由图 5 可以看出, 量测 δ_{25} 与 *CMOD* 的区别主要表现在, P -*CMOD* 曲线由开始加载至峰值前的初始斜率明显低于 P - δ_{25} 曲线, 说明 *CMOD* 在初始加载阶段中可能包含了材料分离之外较多的其他部分位移; 室内试验与虚拟试验中峰值荷载对应的 *CMOD* 分别为 0.132mm 和 0.124mm, 反观 P - δ_{25} 曲线, 实测与模拟时极值点荷载对应的 δ_{25} 与 *CMOD* 相比分别降低了 44%和 53%, 可以认为 δ_{25} 参数的使用体现了一个更为合理的断裂过程, 即在应力水平增至一定程度形成断裂过程区并促使宏观裂缝出现之前, 裂缝尖端附近的位移很小。

图 5 所示两种方法测得的 δ_{25} 、*CMOD* 与荷载间的关系曲线, 二者初始刚度与峰值荷载较为接近, 模拟结果的峰后软化曲线出现了一处较为明显的荷载上升再回落的波动, 通过分析图 6 所示 1#虚拟试件中裂纹的发展情况可知: δ_{25} 由 0.152mm 增至 0.191mm(*CMOD* 由 0.225mm 增至 0.271mm) 期间, 模型内部增多了 203 条裂纹, 其中包含 10 条集料内部裂纹, 集料破坏可能是造成曲线波动的原因, 整体来看室内试验与虚拟试验结果的匹配程度较好。

需要说明的是, 采用 δ_{25} 参数较为显著地降低了断裂能(基于 P - δ_{25} 曲线包围面积)结果, 这说明基于跨中挠度或 *CMOD* 获得的断裂能有可能高估了实际流入断裂带用于裂缝扩展的那部分能量, δ_{25} 参数为未来研究中进行校核试算内聚力断裂能提供了技术支持。

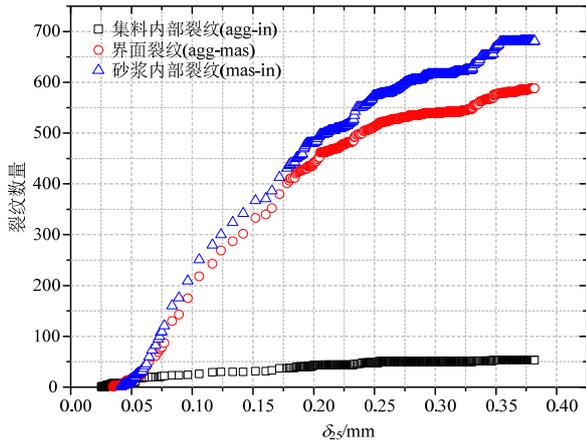


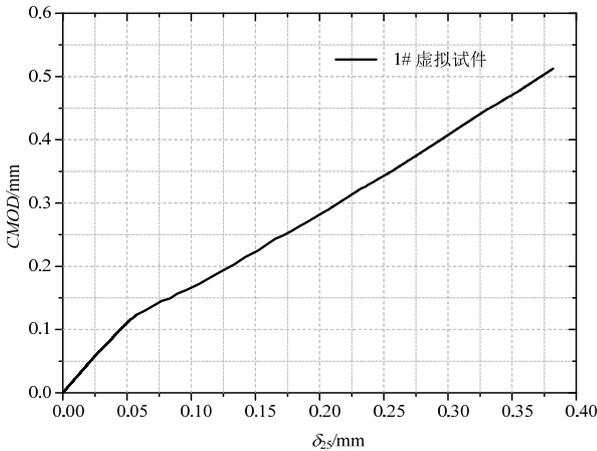
图6 1#虚拟试件微观裂纹数量与 δ_{25} 关系曲线

Fig.6 Crack number versus δ_{25} curves for 1# virtual specimen

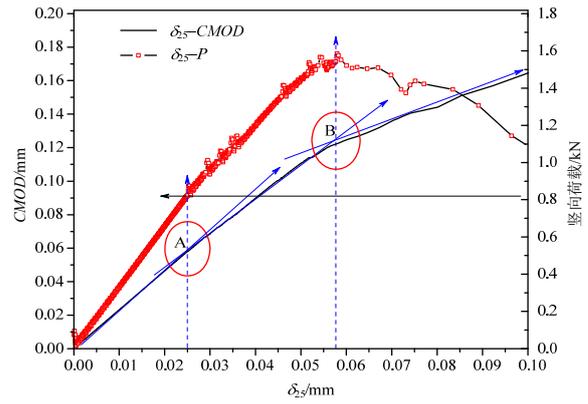
2.2 裂缝发展过程中 δ_{25} 与 $CMOD$ 变化关系

从图5可以看出, $P-\delta_{25}$ 曲线与 $P-CMOD$ 曲线形状的相似程度很高, 可以推测 δ_{25} 与 $CMOD$ 之间可能存在着某种相关关系。因此, 通过进一步分析10个实验室小梁试件与10个三维离散元虚拟试件的 $\delta_{25}-CMOD$ 曲线发现, 所有真实试件与数值模型的 $\delta_{25}-CMOD$ 曲线具有相似的变化趋势: 随着 $CMOD$ 的增加, 摄影记录或模拟测得的 δ_{25} 大致经历了3个阶段。考虑到篇幅, 仅以1#、3#虚拟试件和2#、4#实验室试件为例来演示 δ_{25} 与 $CMOD$ 间的关系, 见图7~图10。

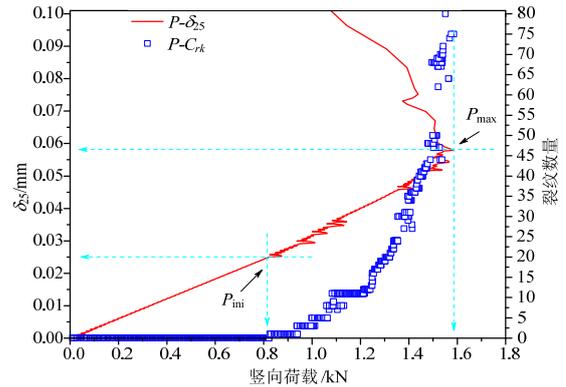
图7~图10的(a)子图给出了模拟与实测得到的整个裂缝发展过程中的 $\delta_{25}-CMOD$ 曲线, 总体来看, 二者之间看似存在单一的线性关系, 但当放大曲线的局部观察发现, 如图7~图10的(b)子图所示, $\delta_{25}-CMOD$ 曲线可以划分为由两个转折点连接的三线性线段。只是由于起裂和失稳时刻的裂缝尖端张开位移数值很小, 所以未能在图7~图10的(a)子图中反映出来而已。



(a) 整个断裂过程的 $\delta_{25}-CMOD$ 曲线



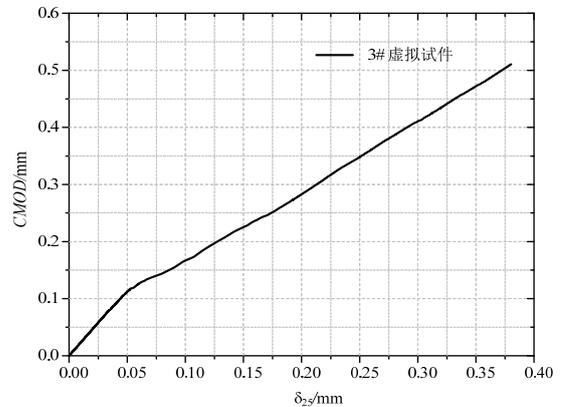
(b) $\delta_{25}-CMOD$ 关系曲线的两个转折点



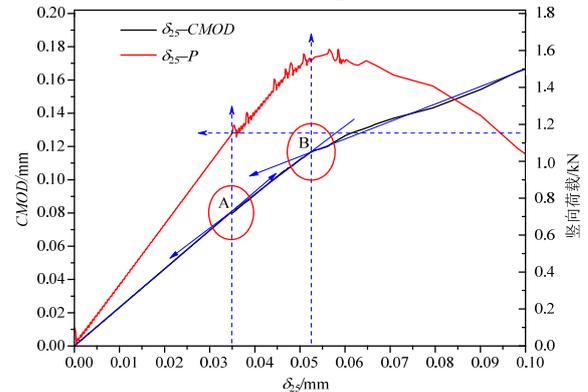
(c) 两转折点与起裂点和失稳点的对应关系

图7 1#虚拟试件 δ_{25} 与 $CMOD$ 关系分析

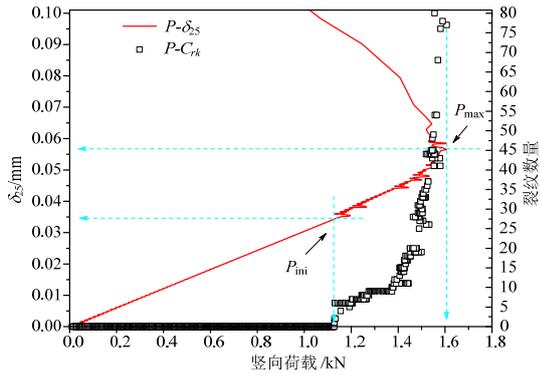
Fig.7 Relationship between δ_{25} and $CMOD$ for 1# virtual specimen



(a) 整个断裂过程的 $\delta_{25}-CMOD$ 曲线



(b) $\delta_{25}-CMOD$ 关系曲线的两个转折点

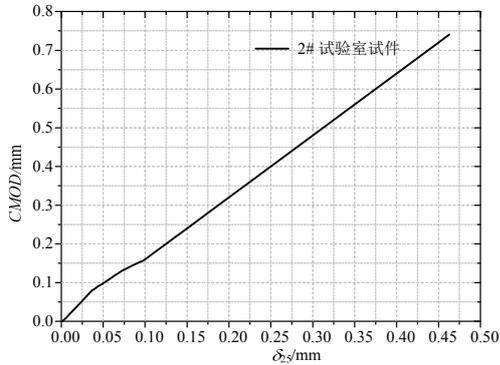


(c) 两转折点与起裂点和失稳点的对应关系

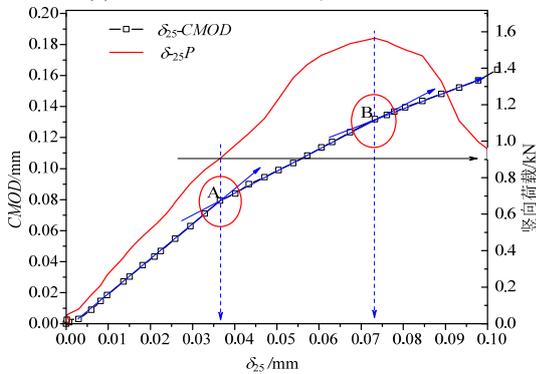
图8 3#虚拟试件 δ_{25} 与 $CMOD$ 关系分析

Fig.8 Relationship between δ_{25} and $CMOD$ for 3# virtual specimen

观察图 7~图 10 的(b)子图可以发现, 在 δ_{25} 小于 0.1mm 范围内, δ_{25} - $CMOD$ 曲线存在 A、B 两个转折点。徐世焯和 Reinhardt 创立的双 K 断裂理论^[16] 描述了混凝土断裂由线弹性到非线性最后至失稳破坏的 3 阶段过程: 裂缝初始的起裂、裂缝的稳定扩展与裂缝的失稳扩展。文中模拟得到的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线也是三段直线, 低温下的环氧沥青混凝土又与水泥混凝土的断裂特性非常相似, 二者之间是否存在某种联系呢?



(a) 整个断裂过程的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线

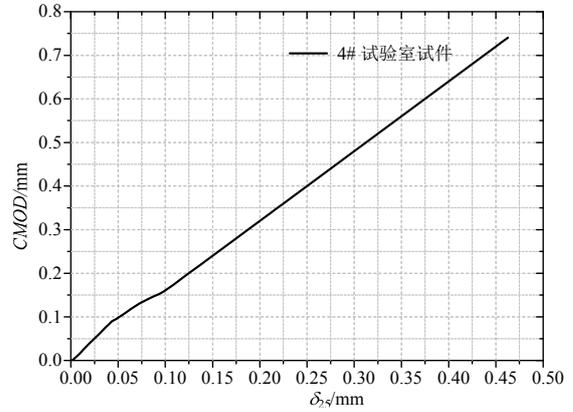


(b) δ_{25} - $CMOD$ 关系曲线的两个转折点

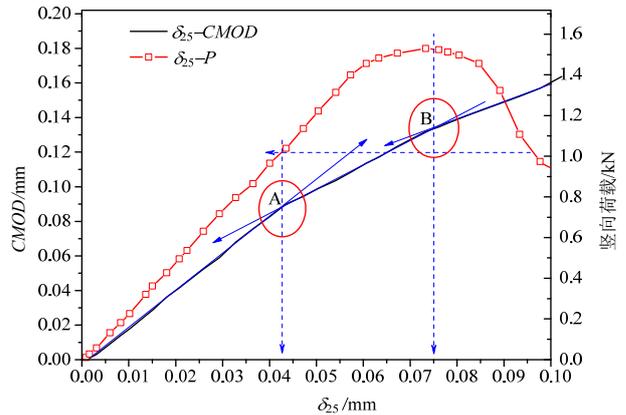
图9 2#实验室试件 δ_{25} 与 $CMOD$ 关系分析

Fig.9 Relationship between δ_{25} and $CMOD$ for 2# laboratory specimen

文中在图 7(c)和图 8(c)中给出了虚拟断裂试验过程中记录的微观裂纹数量随荷载发展的关系曲线, 将图 7 和图 8 的(b)子图分别与各自的(c)子图对比可以发现, A 点基本与起裂时刻(虚拟试件中出现第一条微观裂纹)对应, B 点则与虚拟试件的失稳时刻(荷载到达极值点)对应。



(a) 整个断裂过程的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线



(b) δ_{25} - $CMOD$ 关系曲线的两个转折点

图10 4#实验室试件 δ_{25} 与 $CMOD$ 关系分析

Fig.10 Relationship between δ_{25} and $CMOD$ for 4# laboratory specimen

为进一步验证上述分析, 将点 A 对应荷载与虚拟试验中首条裂纹对应起裂荷载 P_{mi} 、室内摄影法测得的起裂荷载 P_{mi} , 点 B 对应的 δ_{25} 与 P - δ_{25} 曲线峰值荷载对应的裂缝尖端张开位移 δ_{25c} , 点 B 对应的 $CMOD$ 与 P - $CMOD$ 曲线峰值荷载对应的裂缝口尖端张开位移 $CMOD_c$ 等结果汇总列于表 3。

从表 3 数据可以看出, 虚拟试验中 δ_{25} - $CMOD$ 曲线点 A 对应荷载与首条裂纹对应法得到的 P_{max} 基本相等, 相对误差均值分别仅为 3.16%和 1.54%。此外, 点 B 对应的 $CMOD$ 、 δ_{25} 与图 5 曲线中获取的临界值相比, 误差均值分别保持在 3%和 5%以内。

总体来看, 针对虚拟试验过程, 表 3 中有关数据之间最大相对误差不超过 7%, 误差均值小于 5%,

都在沥青混凝土试验允许的误差范围之内,因此文中认为 δ_{25} - $CMOD$ 曲线上的 OA 段意味着裂缝处于弹性阶段, A 点代表了裂缝起裂状态; AB 段可以看做裂缝的稳定扩展阶段, B 点代表了失稳点; B 点之后裂缝发生失稳扩展直至破坏。由此可见,

δ_{25} - $CMOD$ 曲线对裂缝起裂与失稳扩展的监测结果与双 K 断裂理论的起裂与失稳相吻合,证明了环氧沥青混凝土断裂过程中裂缝的扩展经历了起裂、稳定扩展和失稳扩展 3 个阶段过程,同时也为起裂荷载的确定提供了一种新方法。

表 3 有关 δ_{25} 与 $CMOD$ 的部分虚拟与室内试验结果

Table 3 Parts of virtual and laboratory test results about δ_{25} and $CMOD$

编号	$CMOD_c/\mu\text{m}$	$\delta_{25_c}/\mu\text{m}$	$CMOD/\mu\text{m}$			$\delta_{25}/\mu\text{m}$			P_{mi}/kN			P_{max}/kN		
			A 点	B 点	误差/(%)	A 点	B 点	误差/(%)	A 点	模拟	误差/(%)	B 点	模拟	误差/(%)
模拟-1#	123.95	57.99	58.06	122.56	1.12	25.01	57.02	1.67	0.8218	0.8476	3.04	1.5232	1.5859	4.20
2#	118.63	54.00	100.26	117.52	0.94	43.83	52.54	2.70	1.4277	1.3465	6.03	1.6142	1.6700	3.34
3#	120.77	56.51	79.27	116.87	3.23	34.21	52.56	6.99	1.1252	1.1552	2.60	1.5464	1.6067	3.75
5#	121.34	55.46	64.32	118.45	2.38	37.43	53.56	3.43	1.0346	1.0835	4.51	1.5421	1.5824	2.55
8#	122.68	57.43	62.67	120.67	1.64	33.53	54.35	5.36	0.8542	0.9106	6.19	1.5436	1.5745	1.96
均值	121.47	56.28	72.92	119.21	1.86	34.80	54.01	4.03	1.0527	1.0687	4.48	1.5539	1.6039	3.16
			A 点	B 点	误差/(%)	A 点	B 点	误差/(%)	A 点	摄影	误差/(%)	B 点	实测	误差/(%)
试验-2#	131.78	73.27	79.34	129.85	1.46	36.51	71.54	2.36	0.9046	1.1234	19.5	1.5546	1.5643	1.90
4#	132.24	73.29	88.91	134.12	1.42	42.84	75.56	3.10	1.0237	1.1546	11.3	1.5243	1.5295	0.34
5#	126.68	65.73	78.63	121.76	3.88	35.45	62.26	5.28	1.0543	1.2393	14.9	1.5742	1.5925	1.15
7#	128.63	68.63	77.32	123.45	4.03	38.92	64.62	5.84	0.9185	1.1834	22.4	1.5832	1.6143	1.93
8#	120.38	61.32	75.47	118.43	1.62	39.74	57.84	5.68	0.8913	1.1367	21.6	1.5369	1.5747	2.40
均值	127.94	68.45	79.93	125.52	2.48	38.69	66.36	4.45	0.9585	1.1675	17.9	1.5546	1.5751	1.54

需要说明的是,采用摄影法观察试件表面裂纹发展所获取的 P_{mi} 均高于点 A 对应荷载,最大误差超过 20%,误差均值也高达 17.9%。这是由于裂缝尖端的实际位置可能出现在试件表面或者内部,因此,当摄影捕捉到试件表面出现细微裂纹时,材料内部等其他位置可能已发生了起裂,致使出现“起裂荷载”偏大现象。根据前文分析,同样可以将室内试验获取的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线上的点 A、B 分别作为环氧沥青混凝土裂纹起裂与失稳扩展的临界点。未来研究中可以使用光弹贴片法或电阻应变片法,进一步依靠试验室手段来验证起裂荷载。

3 结论

本文通过构建包含粗集料、砂浆和空隙的环氧沥青混凝土三维离散元模型进行了虚拟断裂试验,结合室内摄影法实测结果,分析了裂尖张开位移和裂缝口张开位移之间的变化关系,主要结论如下:

(1) 虚拟试验与摄像法测得的 δ_{25} 、 $CMOD$ 与荷载间的关系曲线,二者初始刚度与峰值荷载较为接近,室内试验与虚拟试验结果的匹配程度较好。

(2) 代表 $CTOD$ 的 δ_{25} 参数的使用,体现了一个更为合理的断裂过程,并为理解实际流入断裂带用于裂缝发展的那部分能量提供了一条新思路。

(3) 裂缝发展过程中的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线上两个

转折点分别与双 K 断裂理论中的起裂和失稳扩展临界点相对应,环氧沥青混凝土的断裂过程可描述为裂缝初始起裂、稳定扩展至失稳破坏 3 个阶段过程。

本文采用的基于离散元模拟的 δ_{25} - $CMOD$ 曲线分析法为确定沥青混凝土材料裂缝的起裂与失稳扩展临界点提供了一种新方法,未来研究中将进一步讨论适用于环氧沥青混凝土的双 K 断裂模型。

参考文献:

- [1] 钱振东, 罗剑, 敬淼淼. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 2(18): 61-64.
Qian Zhendong, Luo Jian, Jing Miaomiao. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 2(18): 61-64. (in Chinese)
- [2] 侯艳丽, 张楚汉. 用三维离散元实现混凝土 I 型断裂模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 37-43.
Hou Yanli, Zhang Chuhuan. Mode I-fracture simulation of concrete based on 3D discrete element method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 37-43. (in Chinese)
- [3] 侯艳丽, 周元德, 张楚汉. 用 3D 离散元实现 I/II 型拉剪混合断裂的模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 1-7.
Hou Yanli, Zhou Yuande, Zhang Chuhuan. I/II tensile-shear mixed mode fracture simulation by 3D discrete element method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 1-7. (in Chinese)

- [4] Liu Y, Dai Q L, You Z P. Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(4): 324–333.
- [5] You Z P, Liu Y, Dai Q L. Three-dimensional microstructural-based discrete element viscoelastic modeling of creep compliance tests for asphalt mixtures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(1): 79–87.
- [6] 李蕊, 常明丰, 李彦伟, 等. 沥青混合料裂缝扩展过程细观力学模拟[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 6(11): 1–9.
Li Rui, Chang Mingfeng, Li Yanwei, et al. Micromechanics simulation of micro-crack extension process for asphalt mixture [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 6(11): 1–9. (in Chinese)
- [7] Kim H, Wagoner M P, Buttlar W G. Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test [J]. *Materials and Structures*, 2009, 42(5): 677–689.
- [8] Wang J Y, Qian Z D, Wang L B. Three-dimensional fracture modeling of epoxy asphalt concrete using a heterogeneous discrete element model [C]// *Proceedings of the Annual Meeting 92nd of Transportation Research Board (TRB)*. Washington D.C, 2012.
- [9] 钱振东, 李智, 陈春红. 钢桥面环氧沥青混凝土铺装层 I 型裂缝的断裂判据[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(5): 34–38.
Qian Zhendong, Li Zhi, Chen Chunhong. Fracture criterion for mode I crack of epoxy asphalt concrete paving course of steel deck bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(5): 34–38. (in Chinese)
- [10] 徐世焱, 吴智敏, 丁生根. 双 K 断裂参数的实用解析方法[J]. *工程力学*, 2003, 20(3): 57–61.
Xu Shilang, Wu Zhimin, Ding Shenggen. A practical analytical approach to the determination of double-K fracture parameters of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(3): 57–61. (in Chinese)
- [11] 徐世焱, 张秀芳, 卜丹. 混凝土裂缝扩展过程中裂尖张开位移(CTOD)与裂缝嘴张开位移(CMOD)的变化关系分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 64–70.
Xu Shilang, Zhang Xiufang, Bu Dan. Relationship between crack tip opening displacement (CTOD) and crack mouth opening displacement (CMOD) throughout development of concrete crack [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 64–70. (in Chinese)
- [12] Liu Y, You Z P. Visualization and simulation of asphalt concrete with randomly generated three-dimensional models [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(6): 340–347.
- [13] Wang L B. *Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics* [M]. New York: McGraw Hill, 2011: 292–293.
- [14] Song S H, Wagoner M P, Paulino G H, et al. δ_{25} Crack opening displacement parameter in cohesive zone models: experiments and simulations in asphalt concrete [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(10): 850–856.
- [15] ASTM STP 1256, Introduction of δ_5 as an operational definition of the CTOD and its practical use [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995: 763–778.
- [16] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasibrittle fracture, Part I: Experiment investigation of crack propagation [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98(2): 111–149.