

文章编号:1006-7736(2013)02-0128-05

## 基于CT技术和有限元方法的沥青混合料虚拟劈裂试验研究

王聪<sup>1,2</sup>, 郭乃胜<sup>1,2</sup>, 赵颖华<sup>1,2</sup>, 谭忆秋<sup>3</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026;  
3. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**为弄清劈裂荷载条件下, 沥青混合料试件内部的应力分布状态, 基于X-ray CT技术、数字图像处理技术和有限元方法建立二维非均质数值模型, 分析通过试件中心的垂直方向与水平方向路径条件下不同位置截面的内部应力分布情况, 并与均质模型内部应力进行比较。结果表明, 与均质模型不同, 不同位置截面的非均质模型内部应力峰值没有出现在模型中心处, 而是分布在试件中部呈现多峰值状态且较好地反应各个组分的力学行为; 在分析路径上, 不同位置截面的非均质模型应力分布趋势相同, 但应力峰值出现的位置以及应力最大值均存在差异, 说明试验截面的选取对二维虚拟试验结果影响较大。

**关键词:**道路工程; 劈裂试验; X-ray CT; 沥青混合料; 数字图像

中图分类号:U414

文献标志码:A

### Simulation splitting test of asphalt mixture based on X-ray computer technique and finite element method

WANG Cong<sup>1,2</sup>, GUO Nai-sheng<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Ying-hua<sup>1,2</sup>, TAN Yi-qiu<sup>3</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian 116026, China;  
3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To analyze stress distribution in asphalt mixture internal structure under splitting load condition, two-dimension heterogeneous numerical models are established based on X-ray computed technique, digital image processing and finite element method to study stress distribution in different sections under the path of vertical direction and horizontal direction of asphalt mixture specimen, and internal structure stress of the heterogeneous model and homogeneous model. Comparison results show that unlike homogeneous model, the peak value of internal stress of heterogeneous model at different sections is not shown in the mid-

dle of the model, but is distributed in the central parts of the model which exhibits multi-peak value condition, moreover, it reflects mechanics behaviors of different components of asphalt mixtures. The stress distribution trend of heterogeneous models at different sections is identical on analysis path, but there are differences at the position of peak value and the maximum value of internal stress. Therefore, the selection of section has great impact on the result of the two-dimension simulation test.

**Key words:** road engineering; splitting test; X-ray computed technique (CT); asphalt mixture; damage; digital image

## 0 引言

劈裂试验适用于测定沥青混合料在规定温度和加载速率条件下劈裂破坏时的力学性质。然而, 通过该试验仅能获得宏观力学性能指标, 在试验过程中, 其内部力学响应如何无法得知, 继而不能明确沥青混合料的损伤破坏原因。为此, 国内外研究人员尝试利用X-ray CT技术 (CT技术) 和图像处理技术 (DIP技术), 采用虚拟劈裂试验进行沥青混合料的力学行为分析。黄碧霞等<sup>[1]</sup>综合数字图像识别技术、几何形状矢量化原理和有限元网格自动生成理论, 建立沥青混合料二维数值有限元模型, 通过该模型分析沥青混合料内部力学响应。虞将苗等<sup>[2]</sup>利用CT技术、DIP技术和有限元方法 (FEM) 建立基于弹性理论的沥青混合料二维有限元数值模型, 并基于该模型分析劈裂试验过程中混合料内部结构的力学响应。王端宜等<sup>[3]</sup>利用DIP技术和FEM方法建立包含集料、空隙和胶浆的沥青混合料有限元模型, 并以此进行沥青混合料虚拟劈裂试验, 分析级配类型、加载位置等因素对虚拟试验结果的影响。Dai<sup>[4]</sup>基于CT

收稿日期:2012-12-10.

作者简介:王聪(1987-), 男, 博士生, E-mail: lnwangcong@163.com.

通信作者:赵颖华(1954-), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: yhzhaod@dlmu.edu.cn.

技术,利用有限元软件 ABAQUS 建立沥青混合料二维数值非均质模型,并应用该模型对其黏弹性能进行研究.结果表明,该数值模型可以较好地分析沥青混合料黏弹性能.汪海年等<sup>[5]</sup>基于 CT 技术与黏弹性理论,对沥青混合料二维数值非均质模型进行虚拟劈裂试验研究,分析了加载方向、加载速率和空隙特征等因素对虚拟劈裂试验的影响效果.Wang 等<sup>[6]</sup>基于有限元方法和黏弹性理论,采用不同轴向压力对环氧沥青混合料数值非均质模型的劈裂试验进行模拟,分析了不同加载方向下混合料劲度模量变化的原因.目前,国内外研究人员对沥青混合料二维数值非均质模型的劈裂试验已经进行了部分研究,而对于在二维条件下不同截面的沥青混合料二维数值非均质模型应力分布状态研究较少,特别是对最佳试验面的选取问题鲜有报道.为此,本文基于黏弹性理论,利用 CT 技术、DIP 技术和 FEM 建立沥青混合料二维数值非均质模型,分析均质模型与非均质模型在虚拟劈裂试验条件下的应力分布状态,并通过定量分析不同截面位置非均质模型在两种路径上内部应力的分布状态,研究沥青混合料二维条件下最佳试验面的选取问题.

1 蠕变试验

本试验材料为:辽河 AH-90<sup>#</sup>沥青、辽宁本溪石灰岩的粗集料和石屑、辽宁辽阳的砂子和矿粉.根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)推荐的级配范围进行沥青混合料(SAC-16)级配组成设计,采用与沥青混合料试件中细集料( $\leq 2.36$  mm)比例相同的集料与沥青组成沥青砂浆(AS-16),级配组成见表 1.由马歇尔试验方法确定沥青混合料的最佳沥青用量为 3.92%.按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)推

荐的沥青混合料试件成型方法(马歇尔击实法)要求制作沥青混合料和沥青砂浆试件.蠕变试验采用 MTS810 材料试验机,加载方式为单向轴压,蠕变应力为 0.12 MPa. Burgers 模型可以较好地表征沥青混合料的蠕变性能,因此目前仍被广泛应用于沥青混合料的黏弹性能研究<sup>[7-8]</sup>.本研究根据室内单轴压缩蠕变试验结果,选用 Burgers 模型对沥青混合料黏弹性能进行表征(表 2).

2 数值模型

本研究提取沿试件高度方向上 5 个横截面内部结构特征信息.其中,截面位置分别为试件的上、下两端、1/4 处、中点和 3/4 处,如图 1 所示.运用 DIP 技术对获取的 CT 图像进行处理,通过几何矢量化等方法将处理完成的图像导入有限元软件 ABAQUS 的 Sketch 模块,建立沥青混合料二维非均质数值模型,该模型为直径 102 mm 的圆形,并基于该模型进行虚拟劈裂试验.根据试验要求,模型上下两端的压条为刚体,其与模型接触良好,可以传递压力的作用.试件两侧无约束条件,对模型底部压条的竖向位移、横向位移和垂直于截面方向的转角进行约束.试件上端压条产生向下的竖向位移,运用位移对模型顶部施加劈裂荷载,加载速率为 50 mm/min.利用 Mesh 模块对模型进行网格划分,其网格节点数为 99 951 个,单元总数为 49 243 个,单元类型 CPS6M,有限元模型如图 2 所示.粗集料与沥青砂浆的弹性模量分别为 50 000 MPa 和 37.73 MPa,泊松比分别为 0.2 和 0.35,沥青砂浆黏弹性属性采用 AS-16 的 Burgers 模型参数.均质模型同为直径 102 mm 的圆形模型,材料均匀分布其内部结构中,泊松比与非均值模型相同,材料黏弹性属性采用 SAC-16 的 Burgers 模型参数.

表 1 沥青混合料级配组成

Tab. 1 Gradation composition of asphalt mixtures

级配 类型	筛孔累计通过百分率/%										
	19 mm	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
SAC-16	100	98.4	92.2	81.9	45.3	31.1	25.4	20.1	15.8	11.9	9.3
AS-16	—	—	—	—	—	100	72.06	51.47	36.76	27.94	17.65

表 2 沥青混合料及沥青砂浆的 Burgers 模型参数

Tab. 2 Burgers model parameters of asphalt mixtures and asphalt mortar

级配 类型	Burgers 模型参数				
	$E_1/\text{MPa}$	$\eta_1/10^4 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_2/\text{MPa}$	$\eta_2/10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	相关系数
SAC-16	190.87	115.56	255.27	125.52	0.998
AS-16	28.67	13.11	24.36	8.17	0.997

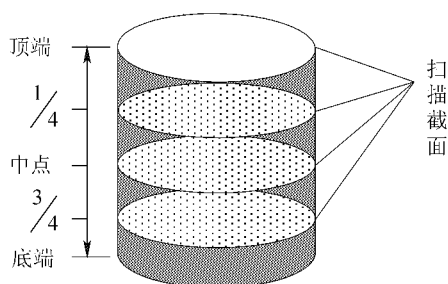


图 1 扫描示意图

Fig. 1 Scanning sketch drawing

### 3 结果分析

本研究选取沿  $x$  方向路径与  $y$  方向路径的水平应力  $S_{11}$  和竖向应力  $S_{22}$  进行沥青混合料试件的内部应力分析,具体分析路径如图 2 所示.此外,通过描述非均质模型与均质模型的应力在分析路径上的变化规律,给出两种模型在虚拟劈裂试验中试件内部应力分布状态差异,并探讨二维虚拟试验选取试验面的重要性.非均质模型与均质模型的虚拟劈裂试验在  $x$  方向路径上的应力分布曲线如图 3 所示.从图 3 可以看出,不同截面的非均质模型在  $x$  方向路径上的水平应力  $S_{11}$  分布除在少数位置处为负值外,绝大部分位置处均为正值,而且  $S_{11}$  分布曲线变化状态总体呈“两端小,中部大”的形状,该种分布状态与均质模型中  $S_{11}$  在  $x$  方向路径上的相似.

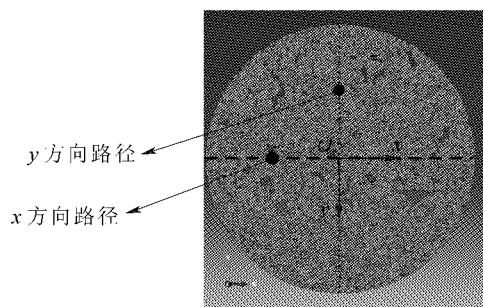


图 2 有限元模型及分析路径

Fig. 2 Finite element model and analysis path

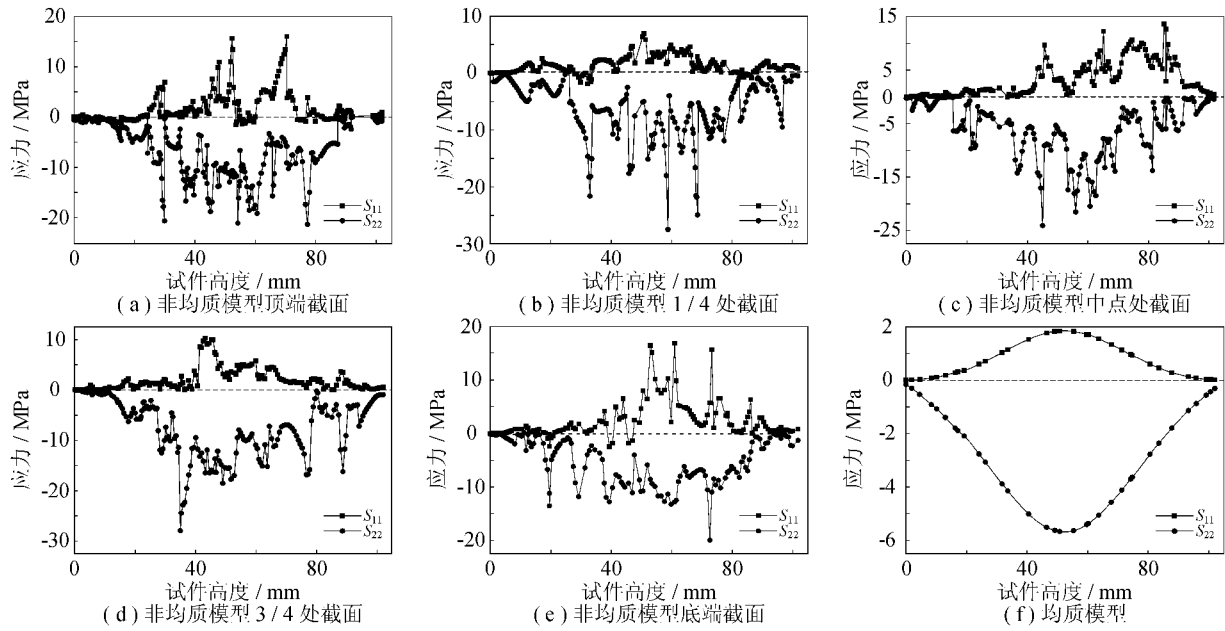
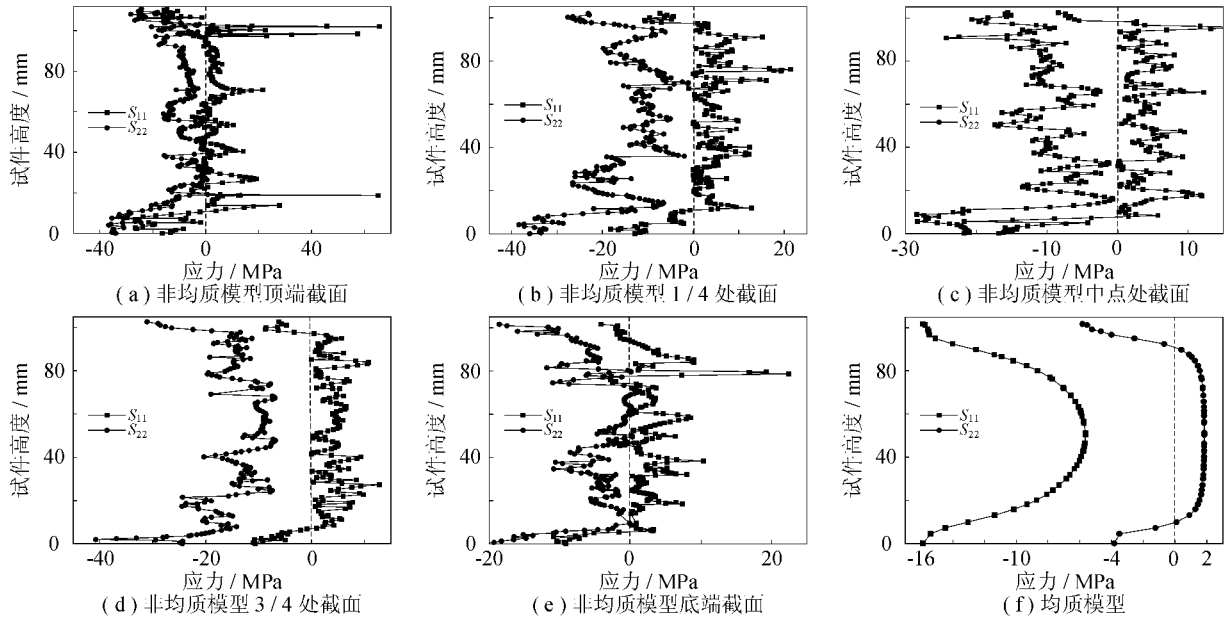
另外,与均质模型不同,非均质模型中  $S_{11}$  的最大值没有出现在试件的中点处,而是分布在试件中部,呈现多峰值的状态.非均质模型的这种分布状态表明,在  $x$  方向上试件绝大部分位置受到的水平应力为拉应力(正值为拉应力,负值为压应力),极少部分位置受到的水平应力为压应力;而均质模型在  $x$  方向路径上承受水平应力均为拉应力,最大拉应力位于模型中部.此外,由图 3 可以看出,非均质模型的竖向应力  $S_{22}$  在  $x$  方向路径上的分布均为负值,应力曲线分布变化状态亦总体呈“两端小,中部大”

的分布状态,且该曲线在其中部出现最大值.非均质模型与均质模型的竖向应力  $S_{22}$  在  $x$  方向路径上分布状态相似.

综合图 2、3 可以发现,在劈裂荷载作用下,非均质模型在  $x$  方向路径上竖向应力  $S_{22}$  均为压应力,竖向应力峰值作用位置与模型中粗集料的位置有关,即最大压应力出现于粗集料集中的位置.这说明,当试件受到劈裂荷载作用时,沥青混合料试件中粗集料在  $x$  方向路径上承受最大竖向压应力,砂浆与界面承受较小的竖向压应力,该现象符合沥青混合料强度构成原理.因此,理论上  $x$  方向路径上的竖向应力  $S_{22}$  不是沥青混合料损伤开裂的主要原因.此外,非均质模型中水平应力  $S_{11}$  作为压应力出现的位置均为空隙尖角附近的砂浆处.这是由于在试件受到劈裂荷载时,粗集料和沥青砂浆对空隙产生挤压作用,使得空隙产生较大压缩变形,从而对空隙附近的沥青砂浆产生水平压应力.

劈裂荷载作用下非均质模型与均质模型在  $y$  方向路径上的应力分布曲线如图 4 所示.从图 4 可以看出,水平应力  $S_{11}$  的分布在非均质模型上下两端为负值,中间部分均为正值,且模型上下两端  $S_{11}$  的绝对值较大,中间部分  $S_{11}$  值较小.非均质模型不同位置截面  $S_{11}$  的曲线变化趋势与均质模型条件下  $S_{11}$  的曲线变化趋势基本相同,均呈“盆式”状.  $S_{11}$  在非均质模型中部的分布呈多峰值状态,与其在均质模型中部的分布状态不同.在非均质模型中,  $S_{11}$  的峰值同样出现在混合料组分的界面处.非均质模型的竖向应力  $S_{22}$  在  $y$  方向路径的分布均为负值,模型上下两端  $S_{22}$  的绝对值较大,中间部分  $S_{22}$  的绝对值较小.此外,非均质模型  $S_{22}$  的曲线变化趋势与均质模型条件下  $S_{22}$  的变化趋势基本相似,两种模型在  $y$  方向路径上承受的应力均为压应力,而非均质模型  $S_{22}$  变化离散性较大.此外,综合图 2、4 可以看出,在劈裂荷载作用下,非均质模型与均质模型上下端部承受水平应力均为压应力,两种模型的中部材料承受水平应力均为拉应力,非均质模型的最大拉应力出现于材料组分的界面位置,均质模型的中部材料承受的拉应力数值相等.

同理,综合图 3、4 可以看出,无论在  $x$  方向或者  $y$  方向路径上,不同位置截面的应力  $S_{11}$  和  $S_{22}$  分布趋势总体相同,但由于各个截面的几何模型不同导致每个截面应力  $S_{11}$  和  $S_{22}$  的峰值、最大值和波动幅值等方面存在较大差异,其中  $x$  方向路径条件下应力  $S_{11}$  与  $S_{22}$  的最大值标准方差分别为 11.25 MPa、

图3 不同位置截面在  $x$  方向路径上的应力分布Fig. 3 Stress distribution along  $x$  direction of different location section图4 不同位置截面在  $y$  方向路径上的应力分布Fig. 4 Stress distribution along  $y$  direction of different location section

22.45 MPa,  $y$  方向路径条件下应力  $S_{11}$  与  $S_{22}$  的最大值标准方差分别为 27.78 MPa、29.36 MPa。另外,不同位置截面在分析路径上的最大应力见表 3、4。由表 3、4 可以看出,不同位置截面在  $x$  方向路径上的  $S_{11}$  最大拉应力两端较大,1/4 处与 3/4 处相对较小。其中,底端较 1/4 处和 3/4 处分别大 1.44 倍、0.64 倍,顶端较 1/4 处和 3/4 处分别大 1.32 倍、0.56 倍,而在  $x$  方向路径上的  $S_{22}$  最大压应力差异较小;在  $y$  方向路径上,顶端截面的  $S_{11}$  最大拉应力均大于其他

截面,分别为 2.08 倍、3.04 倍、4.10 倍和 1.92 倍,且不同位置截面在  $y$  方向路径上的  $S_{22}$  最大压应力差异较大。由此表明,试验截面位置对于二维虚拟劈裂试验结果具有重要影响,即无法选取任意截面作为二维虚拟劈裂试验的最佳试验截面。

另外,在相同位置截面条件下, $y$  方向路径的最大拉应力较  $x$  方向路径的最大拉应力大,从而说明沥青混合料在受到劈裂外荷载时, $y$  方向路径上的材料首先达到极限拉应力值,从而材料在  $y$  方向路

径上首先产生损伤开裂,这种现象符合室内劈裂试验的宏观破坏形式.此外,与均值模型相比,非均质模型的多峰值应力分布状态更符合试件真实的受力情况,且在非均质模型中可以明确组分相界面处的应力值,这为进一步分析和跟踪沥青混合料损伤破坏奠定了基础.

表 3 不同位置截面在  $x$  方向路径上的最大应力

Tab. 3 Maximal stress along  $x$  direction of different sections

应力	不同位置截面的最大应力/MPa				
类型	顶端	1/4 处	中点	3/4 处	底端
$S_{11}$	15.98	6.89	13.63	10.27	16.84
$S_{22}$	-21.32	-27.49	-24.05	-27.94	-19.95

表 4 不同位置截面在  $y$  方向路径上的最大应力

Tab. 4 Maximal stress along  $y$  direction of different sections

应力	不同位置截面的最大应力/MPa				
类型	顶端	1/4 处	中点	3/4 处	底端
$S_{11}$	65.65	21.32	16.27	12.87	22.46
$S_{22}$	-36.66	-36.51	-28.51	-40.75	-22.14

## 4 结 论

(1) 无论在  $x$  方向路径上还是  $y$  方向路径上,非均质模型与均质模型的应力曲线变化趋势均相同.均质模型最大压应力和最大拉应力均位于模型中心,而非均质模型中最大拉应力作用于粗集料与沥青砂浆的界面.与均质模型相比,非均质模型在分析应力分布和界面应力值等方面存在明显优势.

(2) 在  $x$  方向路径与  $y$  方向路径上,不同位置截面非均质模型的应力  $S_{11}$  与  $S_{22}$  分布趋势相同,但应力峰值出现的位置以及应力最大值均存在差异.由此说明,试验截面位置对于二维虚拟劈裂试验结果具有重要影响.

(3) 非均质模型中最大拉应力作用于材料的界面处,且  $y$  方向路径的最大拉应力大于  $x$  方向路径的最大拉应力,据此推断出沥青混合料损伤开裂位置主要集中于  $y$  方向最大拉应力处.

## 参考文献 (References):

- [1] 黄碧霞,陆阳,张华. 基于图像识别的沥青混合料有限元建模[J]. 路基工程,2007(6):5-6.  
HUANG Bi-xia, LU Yang, ZHANG Hua. Finite element modeling of asphalt mixture based on image recognition technology[J]. Subgrade Engineering, 2007 (6): 5-6. (in Chinese)
- [2] 虞将苗,李晓军,王端宜,等. 基于计算机层析识别的沥青混合料有限元模型[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):16-19.  
YU Jiang-miao, LI Xiao-jun, WANG Duan-yi, et al. Finite element modeling of asphalt mixture with X-ray computerized tomography processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 16-19. (in Chinese)
- [3] 王端宜,吴文亮,张肖宁. 基于数字图像处理方法和有限元建模方法的沥青混合料劈裂试验数值模拟[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(4):968-973.  
WANG Duan-yi, WU Wen-liang, ZHANG Xiao-ning. Numerical simulation of splitting test of asphalt mixture based on DIP-FEM[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(4):968-973. (in Chinese)
- [4] DAI Q L. Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite element and discrete element models[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(2): 163-173.
- [5] WANG Hai-nian, HAO Pei-wen. Numerical simulation of indirect tensile test based on the microstructure of asphalt mixture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(1): 21-29.
- [6] WANG Jiang-yang, QIAN Zhen-dong. Indirect tension test of epoxy asphalt mixture using microstructural finite-element model[J]. Journal of Southeast University, 2011, 27(1): 65-69.
- [7] WANG Hai-nian, HAO Pei-wen, YOU Zhan-ping. Characterization of the viscoelastic property of asphalt mastic[J]. Pavements and Materials, 2011 (212): 115-122.
- [8] LIU Yu, YOU Zhan-ping. Determining Burger's model parameters of asphalt materials using creep-recovery testing data[J]. Pavements and Materials, 2008(334):26-36.