

文章编号:1671-8879(2006)01-0016-04

基于计算机层析识别的沥青混合料有限元模型

虞将苗, 李晓军, 王端宜, 张肖宁

(华南理工大学 道路工程研究所, 广州 510640)

摘要:应用数字图像处理技术,结合有限元建模方法,建立了包含集料、空隙和胶浆在内的沥青混合料有限元模型,并模拟研究了沥青混合料劈裂试验过程中,由于空隙分布、加载方向以及集料与胶浆模量比等指标的变化对沥青混合料内部微观力学特性的影响,发现沥青混合料中空隙与集料颗粒的分布对最大拉应力分布有很大影响,集料与胶浆模量比的变化则只影响最大拉应力值的大小而不影响其出现的位置。结果表明,该方法可进一步推广应用于不同条件下沥青混合料微观力学响应仿真。

关键词:道路工程; 沥青混合料; 计算机层析识别(CT); 有限元; 数字图像处理; 微观力学

中图分类号:U414.75 **文献标识码:**A

Finite Element Modeling of Asphalt Mix with X-ray Computerized Tomograph Processing

YU Jiang-miao, LI Xiao-jun, WANG Duan-yi, ZHANG Xiao-ning

(Institute of Road Engineering Research, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper studied the micromechanics behavior in asphalt mixture by digital processing combined with finite element modeling techniques. The finite element model of asphalt mixture with aggregate, air void, and asphalt mastic were established, the indirect tensile test of asphalt mixture were simulated with consideration of air void distribution, different loading directions, and different aggregate-asphalt modulus ratios. It is pointed that the distribution of air voids and aggregates has significant effects on the maximum tension stress distribution; however, the changes in aggregate-asphalt modulus ratio only have influence on the value of the maximum tension stress, not on the location of the maximum tension stress. The results indicate that the proposed method can be extended to the numerical simulations of asphalt concrete micromechanics behavior with viscoelastic and fracture mechanics. 5 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixtures; Computerized Tomograph (CT); finite element; digital image process; micromechanics

0 引言

利用数字图像技术和数值模拟技术,针对传统

沥青混合料研究方法的局限性,从微观尺度研究混合料结构对其性能的影响,进行沥青混合料内部结构分析和沥青混合料力学性能虚拟实验模拟是近年

收稿日期:2005-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50278037)

作者简介:虞将苗(1979-),男,浙江东阳人,工学博士研究生。

来国内外关注的课题^[1-3]。沥青混合料的体积组成及沥青胶浆的粘弹特性,使得其力学性能复杂,在实际工程当中加载频率、加载幅度以及环境的变化更加剧了这种复杂性。采用虚拟实验模拟技术有助于解决这类复杂问题。恰当地选择描述混合料内部结构和胶浆特性的模型,完成从微观结构分析到宏观力学响应的过渡,是混合料虚拟实验模拟技术成功的关键。

近年来,计算机层析识别(Computerized Tomograph,简称CT)技术已被应用于土体、岩石及沥青混合料的内部结构分析中^[4-5]。

利用数字图像处理(Digital Image Processing,简称DIP)技术,将所研究的沥青混合料微(细)结构CT图像转化为数字格式,采用自适应网格剖分技术完成前处理并和常用的有限元(FEM)分析软件(ABAQUS,ANSYS,FRACE2D)等结合,不仅可以有效地再现沥青混合料的微观结构,同时在有限元建模过程中,既可以采用有限元软件固有的材料本构关系,也可以根据沥青胶浆的力学特性推导材料的本构关系,这使得将沥青混凝土上的微结构和粘弹性力学行为联系在一起成为可能。文献检索表明:国内外目前利用数字图像处理(DIP)技术和有限元(FEM)技术相结合来分析沥青混合料的性能,主要集中在分析集料形状、分布和级配混合料力学性质的影响;而对影响混合料力学性能较大的空隙及其分布研究很少^[2-3,6-8]。这主要是因为:在以往的研究中,多采用扫描仪或数码相机等光学仪器作为成像手段。采用这种办法研究沥青混合料内部结构,无法从颜色上区分空隙和沥青胶浆。为了克服这一缺陷,本文以与光学成像原理完全不同的CT图像为例,论述了基于CT识别的DIP有限元法,并分别对不同材料性质,不同加载方向沥青混合料的劈裂试验进行了模拟。

1 CT成像原理与数字图像处理

1.1 CT成像原理

CT技术是利用X射线或 γ 射线穿透物体断面进行旋转扫描,收集射线经此层面不同物质衰减后的信息,进行放大和模数转换后,由计算机在CT的探测空间范围内,与空间某点相关的各个方向射线进行空间解算,得出与该点射线吸收系数 μ 直接关联的数值CTp,从而形成一幅物体层面的 μ 数字图像。物质的密度越大,CT数值越大,表现在图像上亮度越高。在沥青混合料CT图像中(图1(a)),集

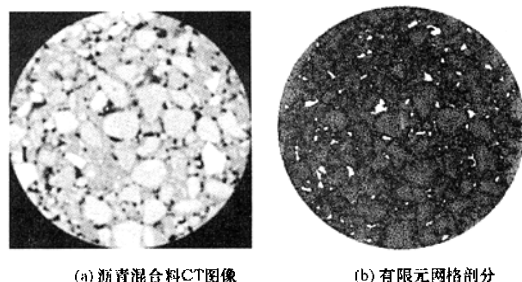


图1 沥青混合料CT图像与有限元网格图

料的密度最大,CT数也最大,因此表现在图像中为白色或灰白色;而空隙的密度最小,CT数也最小,因此表现在图像中为黑色。沥青胶浆密度介于空隙和集料之间,CT数也介于两者之间,表现为灰色偏黑。沥青混合料3种组成的不同色彩对比,使得将CT图像转入普通PC机后进行颗粒、胶浆和空隙的分离成为可能。

1.2 颗粒、胶浆和空隙的数字转换

CT图像的数字转换可以利用CT机完成,也可以将CT图像转入普通PC机完成。数字转换的技术路线为:

- (1)将CT机获取的图像转入普通PC机中;
- (2)分别确定区分空隙与沥青胶浆的阈值 T_1 及区分沥青胶浆和集料的阈值 T_2 ;
- (3)利用切片技术将CT图像分为由集料、沥青胶浆和空隙三部分组成的切片;
- (4)采用反复试验(trial-and-error)方法微调阈值 T_1 和 T_2 ;
- (5)利用颗粒分析技术分别提取切片中集料和空隙的像素单位坐标;
- (6)测定试件实际尺寸单位与像素单位之间的比例,将集料和空隙的像素单位坐标转换为实际尺寸单位坐标;
- (7)利用闭合的多边形分别代表集料和空隙,并将所得到的多边形集合转换为CAD文件(.dxf);
- (8)利用开发的程序或现有软件完成有限元网格剖分(图1(b))。

确定阈值 T_1 和 T_2 是数字转换过程的重点,较为常用的方法有双峰法^[4]和导数法^[5]。双峰法表明:灰度分布图中,2个峰值之间应为同一介质(图2);导数法表明:灰度一阶偏导数分布图中,2个峰值之间应为同一介质。本文分别利用双峰法和导数法进行了试算,结果发现对于CT图像,这两种方法差别不大,本文采用双峰法进行计算。

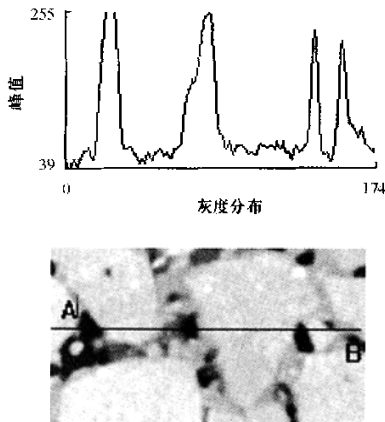


图2 扫描图像与灰度直方图对比

2 算例及结果分析

沥青混合料的劈裂试验是对规定尺寸的圆柱体试件,通过一定宽度的圆弧形压条施加荷载,将试件劈裂直至破坏的试验。试验过程中假定:材料为均质、各向同性体,但混合料的组成特性与假设条件有一定矛盾。作为算例,采用 DIP-FEM 的方法,利用混合料试件 CT 图像建模,计算了不同条件下,劈裂试验中混合料内部的力学响应。图 1(a)为分析所用的混合料试件 CT 图像,图 1(b)为采用 4 节点等参元剖分后的网格图,网格数 30 143 个,节点数 93 222 个。试件直径为 101.63 mm。采用等位移加载,使试件顶部沿加载方向产生 0.5 mm 位移。为对比各向异性的影响,分别从竖直和水平 2 个方向进行了加载模拟,具体加载方向如图 3 所示。假设:胶浆和集料均为线弹性体,集料弹性模量 $E_a = 15\ 000\text{ MPa}$,集料弹性模量与胶浆弹性模量比 $\lambda = E_a/E_m = 1, 10, 30, 100$,泊松比均为 0.25。计算过程中,压应力为正,拉应力为负。

2.1 空隙分布对劈裂试验的影响

为了对比空隙的存在对力学性质的影响,首先假定 $\lambda = 1$,计算了等面积无空隙分布的理想弹性体和存在空隙分布情况下的应力分布。图 4 是沿不同加载方向径向 σ_r 的分布图。从图 4 中可以看出,无论水平方向加载,还是竖直方向加载,受空隙分布影响,尽管假设集料和胶浆力学性质相同, σ_r 分布并不均匀,应力集中出现集料、胶浆和空隙的交界处;最大拉应力出现在空隙与颗粒的交界处,而不是试件的中心处,最大拉应力值分别是理想条件下的 3.25 倍(水平加载)和 2.86 倍(竖直加载)。之所以不同方向的加载结果会有差别,主要是受到了沥青混合料内部空隙分布的非均匀性的影响。同时,由于空隙分布的不均

匀性,也使得沥青混合料试件内部最大拉应力产生位置并不一定处于试件中心。

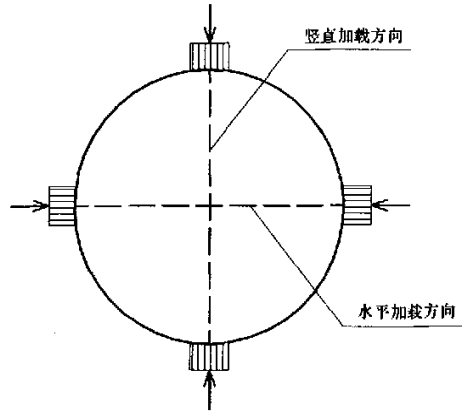
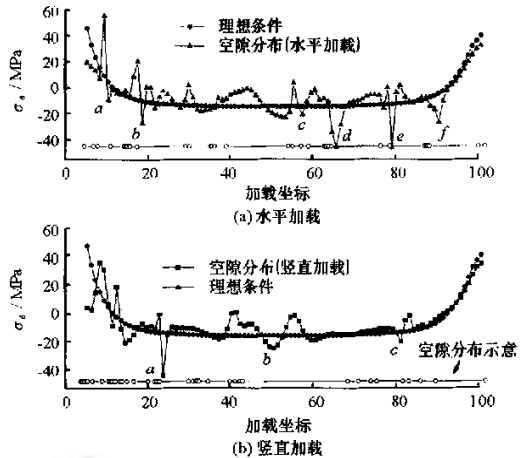


图3 加载方向示意图

图4 $\lambda=1$ 时,理想弹性体和空隙分布弹性体不同加载方向径向的 σ_r 分布

2.2 加载方向与模量比的影响

考虑到胶浆和集料的力学性质差别较大,计算了集料弹性模量与胶浆弹性模量比 $\lambda = E_a/E_m = 10, 30, 100$,泊松比均为 0.25 时的应力分布。不同加载方向径向 σ_r 分布如图 5 所示。与 $\lambda=1$ 时类似,应力集中仍主要出现在集料、胶浆和空隙的交界处。但与 $\lambda=1$ 时不同的是,随 λ 变大,各个加载方向、各向异性对力学响应的影响程度均有明显增大,如图 5 所示,表现为拉应力峰值较之 $\lambda=1$ 时明显增多。沿径向方向,最大拉应力出现位置与 $\lambda=1$ 时相同,说明 λ 的变化只影响最大拉应力的大小而未影响其出现位置。随 λ 增大,相同应变荷载条件下,产生的拉应力越小。最大径向拉应力未出现在试件中部。对于试件中部, λ 相同时,不同加载方向拉应力基本相同。

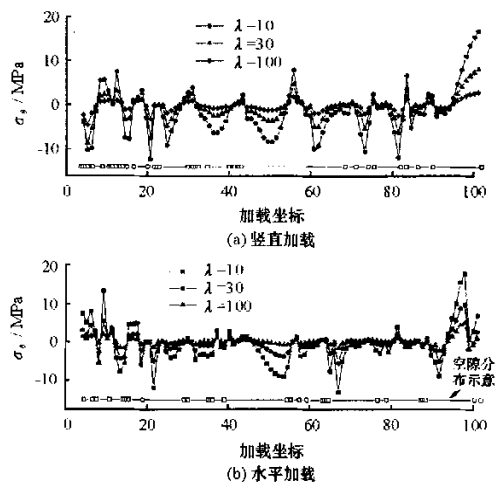


图5 $\lambda \neq 1$ 时,空隙分布弹性体不同加载方向径向的 σ_x 分布

3 结 语

(1)提出了一种新颖的将沥青混合料微结构和其宏观力学行为仿真联系在一起的方法。开发的数字图像处理工具可以将CT图像转化为数字格式的CAD文件。将转换后的数字格式文件和有限元软件结合,可以较真实地再现沥青混合料的微结构对混合料力学性能的影响。

(2)以混合料的劈裂试验为例,分析了空隙、模量和加载方向对力学性能的影响。结果表明:应力集中出现在集料、胶浆和空隙的交界处;径向最大拉应力出现位置受空隙分布的影响很大,混合料劈裂裂纹初始位置并不一定产生在试件的中部。

(3)由于胶浆的影响,沥青混合料的力学特性表现为粘弹特性。作为一种尝试,本文只对胶浆为线弹性条件下的情况进行了模拟。并仍在采用流变学原理分析胶浆的力学性质,与基于CT识别的混合料有限元模型耦合,进行混合料粘弹性力学响应的模拟。

参考文献:

References:

[1] Masad Eyad, Tashman Laith, Some Davan, et al. Micromechanics Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.

[2] 张肖宁,李智,虞将苗. 沥青混合料的体积组成及其数字图像处理技术[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2002,30(11):113-118.
ZHANG Xiao-ning, LI Zhi, YU Jiang-miao. Evaluating the Volumetric Properties of Asphalt Mixtures with Digital Image Processing Technique[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2002,30(11): 113-118.

[3] 李晓军,张登良. 路基填土单轴受压细观结构CT监测分析[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):205-209.
LI Xiao-jun, ZHANG Deng-liang. Monitoring Changes of Structures of Road Foundation Soil in Uniaxial Compression Test with CT[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(2):205-209.

[4] Masad Eyad, Somadevan Niranjan. Microstructural Finite-element Analysis of Influence of Localized Strain Distribution on Asphalt Mix Properties[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,128(10):1106-1115.

[5] Yue Q Z, Chen S Q, Tham L G. Finite Element Modeling of Geomaterials Using Digital Image Processing[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30:375-397.

[6] 武建民,李晓军. 沥青混合料小梁疲劳试验的有限元模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):5-8.
WU Jian-min, LI Xiao-jun. Simulation of Asphalt Mixtures Beam Test with Finite element Method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):5-8.

[7] 徐皓,倪富健,刘清泉,等. 排水性沥青混合料渗透系数测试研究[J]. 中国公路学报,2004,17(3):1-5.
XU Hao, NI Fu-jian, LIU Qing-quan, et al. Research on Hydraulic Conductivity of Asphalt Mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 1-5.

[8] 葛折圣,黄晓明. 运用损伤力学理论预测沥青混合料的疲劳性能[J]. 交通运输工程学报,2003,3(1):40-42.
GE Zhe-sheng, HUANG Xiao-ming. Prediction of Asphalt Mixtures Fatigue Properties Using Damage Mechanics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003,3(1):40-42.