

文章编号:1671-8879(2008)03-0011-05

沥青混合料微细观结构的研究进展

汪海年,郝培文

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:回顾了沥青混合料微细观结构静态及动态识别的研究进展,论述了基于混合料微细观结构的力学特征数值模拟的研究进展,讨论了沥青混合料微细观结构研究中存在的问题,并对其研究方向进行展望。多项研究表明:CCD 数码拍照技术与 X-ray CT 无损扫描技术可有效地识别沥青混合料内部结构的分布,这两种新技术有着不同的精度与适用范围;X-ray CT 是研究沥青混合料内部结构对外部同步加载响应机理的重要途径;有限元、离散元和边界元等诸多数值模拟方法为全面分析沥青混合料微细观结构与宏观路用性能的关系提供了新的途径。

关键词:道路工程;沥青混合料;微细观结构;识别方法;数值模拟;综述

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Advances in microstructure study on asphalt mixture

WANG Hai-nian, HAO Pei-wen

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The review of the static and dynamic discrimination on microstructure of asphalt mixture was presented. The advances of numerical simulation on microstructure mechanics of asphalt mixture were presented. Some problems and the developing trends in microstructure study on asphalt mixture were discussed. Many researches show that the technology of CCD digital image and X-ray CT can discriminate spatial distribution of the internal structure of asphalt mixture effectively, while they have different scanning accuracies and application scopes. X-ray CT provides an important method to study the response mechanism of internal structure of asphalt mixture to external synchronous load. Many numerical simulation methods, such as finite element method, discrete element method and boundary element method, can provide new methods to study the relationship between microstructure and macro performance of asphalt mixture. 26 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; microstructure; discrimination method; numerical simulation; review

0 引言

美国 SHRP(Strategic Highway Research Program)

研究计划提出了关于沥青胶结料与混合料的 Superpave 设计体系。Superpave 是基于体积法的混合料设计方法,比传统的 Marshall 设计法前进了

收稿日期:2007-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578016)

作者简介:汪海年(1977-),男,江苏涟水人,博士,E-mail:wanghn@chd.edu.cn

一大步,但仍缺乏有效的理论依据与验证手段^[1]。目前,按 Superpave 与 Marshall 设计法设计的沥青路面仍然存在较多的工程病害。Superpave 设计法与传统的 Marshall 设计法多限于采用表象法研究沥青混合料的性能,即研究沥青混合料宏观品质(级配、空隙率和密度等)与路用性能(高温抗车辙、低温抗裂和疲劳等)的关系。然而,沥青混合料的细观与微观结构(集料形状、尺寸、棱角及集料个体在混合料中的空间分布状况、沥青薄膜厚度和沥青砂浆的空间分布等)对混合料的路用性能起到极为重要的影响,这在当前的 Superpave 与 Marshall 设计方法中均未得到充分考虑。沥青混合料微观细观结构研究是阐述沥青混合料行为特征的理论基础与重要途径,国内外关于这方面的研究已经开始。为此,本文论述了基于混合料微观细观结构的力学特征数值模拟的研究进展,讨论了研究中存在的问题,并对研究方向进行了展望。

1 沥青混合料内部结构识别的研究进展

在 SHRP 计划中,研究者已经意识到微观细观结构对沥青结合料与沥青混合料性能的影响。在 SHRP 研究报告(SHRP-A-410)^[2]中,对集料的针片状质量分数、棱角、破碎面等提出一定的要求,而这仅限于沥青混合料宏观性能的评价,对于其内部结构间的微观作用机理研究仍未涉及,也未提出测量与评价沥青混合料内部结构的详细方法。Zhong Q Y 等^[3]利用 CCD 相机拍摄沥青混合料试件的内部结构状况,识别出粒径大于 2 mm 的粗集料,开创性地运用数字图像处理技术定量研究了沥青混合料中粗集料的取向、形状与空间分布规律。随着无损检测技术的发展,X-ray CT 技术也被逐渐地运用到沥青混合料试件内部结构的研究之中。Masad E 等^[4]利用 X-ray CT 技术对旋转压实成型(SGC)试件与搓揉压实成型(LKC)试件的内部结构特征进行了定量研究,认为 SGC 成型的沥青混合料试件的内部空隙率呈“两头大、中间小”分布;而 LKC 成型试件的内部空隙率呈“上端大、下端小”分布。Kwan A K 等^[5]利用 CCD 数码相机对集料的针片状质量分数进行了研究,并提出了通过二维数字图像来研究了集料的三维级配的方法,其研究结果与人工室内测量状况具有较好的一致性。1998 年,美国联邦公路局与特纳公路研究中心(TFHRC)联合提出了 SIMAP 研究计划,运用数字图像、X-ray CT 和光弹镜像技术对沥青混合料内部

的集料取向、离析、接触状况、空隙分布和胶浆分布等进行识别,并对沥青混合料的内部组成状况进行三维的重建,对其宏观力学与强度机理进行数值模拟。SIMAP 研究计划的实施对沥青混合料内部微观细观结构的研究起到积极地推动作用。然而,由于该计划的高度尖端性与保密性,其研究成果仍未完全公布。Wang L B 等^[6]运用 X-ray CT 技术对 Westrack 试验路取芯试件的空隙分布进行了分析,并提出了运用 X-ray CT 扫描图片对沥青混合料的三维分布进行重构的方法。Masad E 等^[7]认为,基于 X-ray CT 的数字图像处理技术可评价骨料是否形成嵌挤骨架,从而为沥青混合料的级配(如 Bailey 法)研究提供了一个有力的验证手段。

在中国,沥青混合料微观细观结构研究也已展开,同济大学的张倩娜^[8]运用数字图像技术对沥青混合料的内部组成特性进行了初步的识别与分析;华南理工大学的李智^[9]运用数字图像技术对不同成型方法的沥青混合料试件的压实特性进行研究;中国台湾成功大学的 Chen J S 等^[10]运用数字图像技术对不同级配沥青混合料的抗车辙能力进行了研究;华南理工大学的李晓军等^[11]运用 X-ray CT 技术对 SGC 成型的沥青混合料试件的内部孔隙特征进行了研究;王端宜等^[12]运用数字图像技术对沥青混合料内部的级配离析进行了初步研究与探讨。

2 研究的主要内容及手段

2.1 主要研究内容

2.1.1 混合料体积特征研究

沥青混合料体积特征的研究一直是微观细观结构研究的重点,最初的研究主要集中在对粗集料形态特征的分析,如粗集料的周长、直径、针状质量分数和长轴取向等。然而,粗集料形态特征的研究仅是微观细观结构研究的起步,其与工程实践的联系仍有待加强。随着研究的进一步深入,越来越多的学者对沥青混合料组成特性展开研究,如混合料空隙率、级配组成状况和离析状况等^[13]。对混合料组成特性的研究,可以更为方便、直观地了解沥青混合料内部结构的分布、初始损伤,同时也使原先的定性观察研究转为定量计算研究,其研究成果对工程实践具有较强的指导意义。同时也应看到,对混合料体积特征的研究也存在以下几方面的局限性。

(1)目前的混合料内部微观细观研究多为基于二维的识别与分析。由于尚不能完全考虑集料、胶浆及空隙的三维的体积特征,因而其研究结果在多单

元体统计意义上具有代表性,而在考虑某个单元体时仍然具有一定的随机性与变异性。

(2)在研究混合料级配特征时,集料的二维面积级配与三维体积级配间具有一定的差异性。

(3)由于微细观结构研究对检测设备、数据处理系统的软硬件要求较高,目前仍然处于理论研究阶段,尚不能直接用于工程实践。

2.1.2 混合料试件动态加载时的内部结构研究

随着研究的进一步深入,各国研究者在静态研究沥青混合料内部结构形态、尺寸和分布等体积特征的基础之上,对混合料试件在动态加载时内部结构的变化展开定量研究。中国台湾国立成功大学黄隆升^[14]运用数字图像技术对不同类型沥青混合料(SMA、PA、密级配)的粗集料在高温碾压状态下的行为轨迹进行了定量分析,分析不同级配类型对高温抗车辙能力的影响效应,认为沥青混合料的抗车辙能力与4.75 mm以下细集料的通过率密切相关。华南理工大学李晓军^[15]利用X-ray CT技术对SGC成型的沥青混合料试件在动态加载状态下的内部损伤行为进行了实时测量,取得较为满意的效果。Hartman A M等^[16]运用数字图像技术,分析沥青混合料小梁4分点试验的疲劳性能,通过图像采集系统,研究实时加载过程中小梁的变形及破坏特征,并采用了数字图像与内置位移传感器(LVDT)相结合的对比分析方法,使二者结果较为吻合。

2.2 试件内部结构信息的采集方法

2.2.1 CCD数码相机拍照

采用数码相机拍照技术对沥青混合料结构进行识别与分析时,主要是利用各种材料具有不同的色彩来区分。从混合料色彩来看,集料呈现为灰色或白色,沥青胶浆接近黑色,而空隙通常为深黑色。因此,在选择石料时,宜选用色泽较浅的石灰岩,这样集料与沥青胶浆间的色泽反差较大,便于对图像中的集料进行边缘识别与提取,为后续研究提供方便。

在数码拍照前,需将混合料试件按指定位置切开,获取其内部结构信息。通常情况下,集料颗粒的边缘在切割时易发生松散破碎,出现许多松散连接的颗粒群,边缘模糊,从而导致后期处理困难。如果条件允许,宜将试件在-5℃冷液中冷冻约2 h,然后再进行切割,集料边缘松散状况可得到显著改善。

2.2.2 X-ray CT无损扫描

利用CT技术对沥青混合料试件内部结构进行扫描时,宜采用密度较大的玄武岩、辉绿岩等石料,可增强集料与沥青胶浆间的亮度对比,便于集料边

缘的检测与识别。

利用CT技术进行研究的特点:①成像精度较高,在研究混合料试件内部结构时宜采用工业CT。以俄罗斯生产的BT500型工业CT机为例,其最大工作电压为450 kV,检测的几何灵敏度可达到0.05 mm,成像的图片为 100×10^4 像素;②无损伤检测,在监测中,不会破坏样品的整体性,同时可多次对试件的不同层面(包括横向与纵向)重复扫描。

2.3 数字图像的后期处理

利用数码相机拍照、X-ray CT扫描和高精度扫描仪采集沥青混合料试件的内部结构信息,所获得的数字图像用于定量分析前通常需进行一定的处理,如:滤波去噪、图像增强、图像阈值化、颗粒复原、颗粒分离和集料内部的空洞还原。

经过处理后,可对集料颗粒的边缘进行识别与提取,还可以对颗粒的周长、质心、半径、面积和长轴取向进行计算,亦可对混合料间的空隙、沥青胶浆的面积组成进行计算。

目前,许多成熟的软件均可用于数字图像分析,常用的有:Photoshop、Image Pro Plus、Scion Image、IMAQ、Image Tool、Matlab、Optimas等。这些软件各有特色,可用其一种或几种组合。

3 力学特性的数值模拟

随着检测技术的不断发展,研究者对沥青混合料内部微细观结构的认识也更为深入。同时,越来越多的学者致力于研究沥青混合料内部微细观结构与外部宏观力学性能之间的关系。Masad E等^[17]运用数字图像技术对沥青混合料内部的构成状况进行分析(长轴取向、集料间的接触方式),将其转换至ABAQUS有限元软件中,对混合料试件水平向与垂直向的模量进行数值模拟,以分析集料的长轴取向及各向异性状况对混合料模量的影响效应。结果表明,试件水平向的硬度模量比垂直向高约30%。Guddati M N等^[18]提取数码图像中石料的空间分布状况,采用粘弹性连续介质破坏模型,运用网格桁架结构对间接拉伸试验(IDT)的试件进行微观力学研究。Zhong Q Y等^[19]运用数字图像技术分析沥青混合料试件内部结构后,提出数字图像技术与有限元相结合的成套方法,对沥青混合料的微观强度机理进行数值模拟。Soares J B等^[20]根据沥青混合料内部结构的二维分布特征,利用断裂力学理论与有限元相结合的方法,对沥青混合料在间接拉伸试验(IDT)的开裂行为进行数值模拟。You Z P^[21]利

用高精度扫描仪采集沥青混合料试件的内部结构信息后,采用离散元方法对试件的劲度模量进行粘弹性数值模拟,取得了较好的效果。Birgisson B等^[22]运用边界元方法对沥青混合料的微观结构强度进行了二维数值模拟。结果表明,边界元法能够较好地描述沥青混合料内部裂纹的产生、发展及其在混合料内的分布状况。

3.1 有限元法

在沥青混合料微观结构的分析中。Masad E等、Zhong Q Y等、Abbas A R等^[23]均采用有限元法对沥青混合料内部结构与外部宏观力学性能间的关系进行了数值模拟。目前,在土木工程领域,ABAQUS有限元软件有着较高的使用率。

然而,采用有限元法模拟沥青混合料的微观力学特征时也存在一定的局限性:①在处理大应变、非连续介质及结构层间滑移时存在固有的缺陷;②未考虑模拟失效时高应力状况下的模量骤减;③尚不能全面地考虑混合料中空隙的影响效应。

3.2 离散元法

离散元法是近30多年来发展起来的用于解决非连续介质力学的数值方法,其基本特征在于允许各个离散块体发生平动、转动,甚至分离,弥补了有限元法或边界元法的介质连续和小变形的限制,已经较为成功地运用于解决岩石解理、边坡滑落和采矿等方面的研究。离散元法在沥青混合料内部结构性能的模拟中也得到了应用,Buttlar W G等^[24]、O'Sullivan C^[25]、You Z P等采用离散元法对混合料内部结构的力学性能进行数值模拟。

离散元法可较好地模拟沥青混合料内部裂缝的产生、发育及内部结构间的滑移。然而,离散元法在计算中时步需要很小,阻尼系数难以确定,且单元数目很多(与有限元法相比),其计算量极大。

目前较为成熟的离散元商业软件较少,只有离散单元思想提出者Cundall加盟的ITASCA公司开发的UDEC、3DEC、PFC2D、PFC3D系列软件具有较高的采用率。

3.3 边界元法

边界元法是近50年来发展起来的一种数值方法,在土木工程领域也得到了逐步应用。Soranakom C等^[26]采用边界元法模拟沥青混合料在荷载作用下的变形特征。由于边界元法只需对边界进行离散,通常情况下其计算速度与精度较有限元法高。但对于沥青混合料这种强度不均匀性、非线性及大变形的材料,该方法的适用程度仍有待进一步的研究。边界元

软件的商业化程度较低,研究者在采用边界元法进行研究时,一般都是针对某一问题专门编制程序进行计算,其前、后处理的工作量较大。

4 结 语

(1)在沥青混合料内部结构的识别与分析方面,目前基于二维的识别已经取得很好的精度与效果,沥青混合料内部结构空间分布状况的三维重建将是今后研究的重点。同时,运用成熟的内部结构识别理论来开发成套的检测仪器与设备,如用于评价混合料的级配离析与检测混合料的内在损伤,可以更方便快捷地指导工程实践。

(2)利用CCD与X-ray CT相结合的方法研究沥青混合料的微观特征。CCD数码拍照与X-ray CT无损扫描有着不同的精度及适用范围,将两种方法有机地结合起来将是今后的发展趋势。

(3)在混合料试件同步加载分析方面,X-ray CT呈现出很强的潜力及应用前景。提高动态加载的识别精度,并将动态加载过程分析与数值模拟结果进行对比验证将是今后一段时间的研究重点。

(4)在对混合料内部结构行为的数值模拟方面,运用各种数值方法对内部结构力学响应模拟的研究已经展开。然而,无论是有限元法、离散元法还是边界元法,均存在一定的局限性,若能将有限元与离散元耦合使用,将会取得更好的效果。同时,沥青胶浆与集料间的作用效应研究将是各种数值模拟手段都亟待解决的一个关键问题。

参考文献:

References:

- [1] U S Department of Transportation. Simulation, imaging and mechanics of asphalt pavement [R]. Virginia: Turner-Fairbanks Highway Research Center, 1998.
- [2] Kennedy T W, Huber G A, Harrigan E T. Superior performing asphalt pavements (Superpave) [R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 1994.
- [3] Zhong Q Y, Bekking W, Morin I. Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure [C]//TRB. Transportation Research Record 1492. Washington D C: TRB, 1995: 53-60.
- [4] Masad E, Muhunthan B, Shashidhar N, et al. Quantifying laboratory compaction effects on the

- internal structure of asphalt concrete [C]//TRB. Transportation Research Record 1681. Washington D C; TRB,1999;179-185.
- [5] Kwan A K, Mora C F, Chan H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing [J]. Cement and Concrete Research, 1999,29(9):1403-1410.
- [6] Wang L B, Frost J D, Shashidhar N. Microstructure study of WesTrack mixes from X-ray tomography images[C]//TRB. Transportation Research Record 1767. Washington D C; TRB,2001;85-94.
- [7] Masad E, Button J. Implications of experimental measurements and analyses of the internal structure of HMA [C]//TRB. Transportation Research Record 1891. Washington D C; TRB,2004;212-220.
- [8] 张倩娜. 基于数字图像处理技术的沥青混合料微观结构分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [9] 李智. 基于数字图像处理技术的沥青混合料体积组成特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [10] Chen J S, Liao M C. Evaluation of internal resistance in hot-mix asphalt (HMA) concrete[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(6): 313-319.
- [11] 李晓军, 张肖宁. CT技术在沥青胶结颗粒材料内部结构分析中的应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(2): 14-16.
LI Xiao-jun, ZHANG Xiao-ning. Application of X-ray computerized tomography in analysis of inner structure of asphalt mix [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(2): 14-16.
- [12] 王端宜, 李维杰, 张肖宁. 用数字图像技术评价沥青路面的表面离析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 16-20.
WANG Duan-yi, LI Wei-jie, ZHANG Xiao-ning. Evaluation of surface segregation of asphalt pavement by using digital image technique [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(1): 16-20.
- [13] 彭勇, 孙立军, 杨宇亮, 等. 一种基于数字图像处理技术的沥青混合料均匀性研究新方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 10-12.
PENG Yong, SUN Li-jun, YANG Yu-liang, et al. A new way to study homogeneity of HAM based on digital image disposal technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(11): 10-12.
- [14] 黄隆升. 沥青混凝土土宏观车辙及微观轨迹之行为机制分析[D]. 台南: 成功大学, 2003.
- [15] 李晓军. 沥青混合料破损识别与仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [16] Hartman A M, Gilchrist M D. Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 60-68.
- [17] Masad E, Tashman L, Samedavan N, et al. Micromechanics-based analysis of stiffness anisotropy in asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.
- [18] Guddati M N, Feng Z, Kim Y R. Towards a micromechanics-based procedure to characterize fatigue performance of asphalt concrete [C]//TRB. Transportation Research Record 1789. Washington D C; TRB, 2002; 121-128.
- [19] Zhong Q Y, Chen S, Tham L. Finite element modelling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 375-397.
- [20] Soares J B, Freitas F A, Allen D H. Considering material heterogeneity in crack modelling of asphaltic mixtures [C]//TRB. Transportation Research Record 1832. Washington D C; TRB, 2003; 113-120.
- [21] You Z P. Development of a micromechanical modelling approach to predict asphalt mixture stiffness using the discrete element method [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2003.
- [22] Birgisson B, Soranakom C, Napier J, et al. Microstructure and fracture in asphalt mixtures using a boundary element approach [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 116-121.
- [23] Abbas A R, Papagiannakis A, Masad E. Linear and nonlinear viscoelastic analysis of the microstructure of asphalt concretes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 133-139.
- [24] Buttlar W G, You Z P. Discrete element modelling of asphalt concrete [C]//TRB. Transportation Research Record 1757. Washington D C; TRB, 2001; 111-118.
- [25] O'Sullivan C. The application of discrete element modelling to finite deformation problems in geomechanics [D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [26] Soranakom C, Birgisson B, Napier J A, et al. Simulation of fracture initiation in hot mix asphalt mixtures [C]//TRB. Transportation Research Record 1849. Washington D C; TRB, 2003; 183-190.