

基于数字图像的沥青混合料离散元几何建模方法

周基^{1,2}, 田琼³, 芮勇勤¹, 英红⁴

- (1. 长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 长沙 410004;
2. 湖南科技学院 土木工程学院, 湖南 永州 425100; 3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082;
4. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 沥青混合料的性能与其细观结构密切相关, 离散元方法在解决沥青混合料这种复杂、多相、不连续介质材料的细观问题时, 具有很大优势。针对以往沥青混合料离散元建模不能较好模拟集料颗粒形状的问题, 结合数字图像处理技术, 提出了一种新的沥青混合料离散元几何建模方法, 主要有3个步骤: 1) 使用特征聚类方法, 将沥青混合料切片图像中的集料与沥青砂浆分离; 2) 并利用链码边界跟踪和线段表算法将分离的集料区域填充为离散元中的“聚粒”; 3) 用离散元的圆盘单元填充沥青胶砂区域, 实现沥青混合料切片图像的二维离散元几何建模。利用该模型, 较好地模拟了沥青混合料在贯入荷载作用下变形的动态过程。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 离散元; 数字图像; 聚粒

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0136-05

A DEM Geometric Modeling Method of HMA Based on Digital Imaging Processing

ZHOU Ji^{1,2}, TIAN Qiong³, RUI Yong-qin¹, YING Hong⁴

- (1. Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology Engineering, Changsha 410004, P. R. China; 2. Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425100, Hunan, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 4. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China)

Abstract: The performance of asphalt mixture is closely related with microscopic structure. Discrete element method (DEM) has the great advantage in solving microscopic problem of the asphalt mixture with complex, multiphase and discontinuous medium materials. To solve the problem the past DEM could not perfectly simulate aggregate particle shape in HMA, a geometric modeling method of DEM based on the digital image processing was established. Firstly, the aggregate and asphalt mastic were separated from the sliced image of HMA using features clustering method. Then the aggregate ranges were filled with balls as DEM “clump” using chain code boundary tracking algorithm and lines table filling algorithm. Finally, the asphalt mastic regions were filled with balls. The simulation test of dynamic deformation process of asphalt mixture under penetration load are in good agreement with those from practice.

Key words: road engineering, HMA, DEM, digital imaging processing, clump

收稿日期: 2011-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51034005); 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金项目(kfj080305)

作者简介: 周基(1982-), 男, 博士生, 主要从事道路工程研究, (E-mail) hnkjxy_zhouji@163.com。
英红(通讯作者), 男, 博士, (E-mail) yinghongcq@tom.com。

沥青混合料是一种由集料、沥青和空隙构成的多相混合、各相异性材料。有限元方法,由于插值函数是连续的,在处理细观问题时仍有很大不足。离散元方法在处理材料细观问题时,具有先天优势^[1-2]。Cundall^[3]在接触力学的基础上建立了离散元方法的基本理论,目前较流行的离散元程序是ITASCA公司的PFC软件。早期的离散元程序,大多利用刚性圆盘或刚性小球来模拟2D或3D集料颗粒,利用蒙特卡罗法、单一粒径或随机粒径来模拟颗粒级配;如王端宜^[4-5],Ullidtz^[6],Abbas^[7],能够初步模拟沥青混合料细观问题;田莉^[8]在随机理论的基础上利用FISH语言的混合料的多面体颗粒生成算法,模拟集料的形状;但这些方法均不能较真实地反映集料的几何形状。

近年来,随着数字图像处理技术的发展,基于图像处理技术的沥青混合料细观结构特征研究逐渐活跃起来,张婧娜^[9]、李智^[10]、彭勇^[11]等利用图像分析了混合料中集料排布特征;汪海年^[12]探索了混合料图像中集料形状特征与抗剪能力的关系,魏鸿^[13]分析了图像中集料颗粒接触的变异性,孙朝云^[14]对混合料图像处理算法进行了较系统整理。

将图像处理技术和离散元技术结合起来,利用真实试件图像建立离散元几何模型,模型中的颗粒形状、空间分布与真实试件非常相似,由此为基础,进行混合料力学响应的数值仿真,与实际结果更加接近。

1 基于图像的离散元建模的基本思路

PFC2D颗粒流是根据离散元理论,采用显示差分技术,在计算循环中交替使用力-位移定律和牛顿定律,模拟颗粒介质的运动及其相互作用的过程^[15]。建模时,一般集料颗粒内部单元定义为平行粘结,沥青胶砂、集料颗粒之间的接触为接触粘结,滑动模型采用库伦摩尔准则。

数字图像是图像信号转换为数字信号后,存储为1个2维矩阵。它的行标和列标即为该像素的图像坐标,因此,1个灰度图像的像素点包含了2个信息:图像坐标和灰度值。在使用图像进行离散元几何建模时,灰度值用以判断该像素是属于集料区域或沥青砂浆区域,为离散元的圆盘颗粒提供密度、接触类型,法向刚度、切向刚度等材料属性;像素点的图像坐标为离散元的圆盘颗粒提供坐标信息。

PFC2D颗粒流模型的生成,需要编制命令流文件,每个单元用Ball命令生成,需要指定每个单元的id号、圆心坐标、圆盘的半径及单元的接触类型和材

料属性。单元id编号,可按照圆盘单元生成的次序递增赋值;圆盘的半径统一定义为每个像素所代表试件的物理尺寸的一半。混合料图像中的集料颗粒使用Clump“聚粒”模拟,聚粒内部使用平行粘结,因此需要边界跟踪技术描绘出集料颗粒的外轮廓,在此基础上,使用线段表颗粒填充算法对每个集料颗粒实现“聚粒”操作。沥青胶砂区域可直接用Ball命令生成的圆盘填充,圆盘的坐标通过胶砂区域的图像坐标获得。其中难点为图像分割方法和集料颗粒的“聚粒”生产算法。

2 图像分割方法

图像分割是沥青混合料切片图像离散元建模的基础,一般将混合料图像分为2类,集料和沥青胶砂;文献[7-11],一般用最大类间方差法对混合料图像进行分割,由于集料来源复杂,图像中集料与沥青胶砂的灰度直方图未必存在双峰特性,因此,使用最大类间方差法有时会失效,造成集料与沥青胶砂的边界分割误差较大。使用聚类法,将属于集料或沥青胶砂的像素按照灰度级分别进行归类,从而实现集料与沥青胶砂的分离。

聚类法的基本思想是根据目标的不同特征将它们划分为不同的类,聚类的方法很多,如K-均值聚类法、模糊聚类、ISODATA聚类等。K-均值聚类法是将图像分成K个区域的常用方法。令 $X = (x_1, x_2)$ 代表一个像素的坐标, $g(X)$ 代表这个像素的灰度值,K-均值聚类法就是最小化如下指标:

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in Q_i} g(X) - \mu_j^{i+1}$$

其中: Q_j 代表在第*i*次迭代后分类*j*的像素集合; u_j 表示第*j*类的均值。上式表示每个像素到其对应类均值的距离和。

K-均值聚类法的求解步骤如下:

- 1) 任意选K个初始类的均值,即聚类中心: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$;
- 2) 在第*i*次迭代时,根据如下准则将每个像素都赋给K类之一($j = 1, 2, \dots, k, l = 1, 2, \dots, k, l \neq j$),即

$$x \in Q_j$$

如果 $g(x) - \mu_l^i < g(x) - \mu_j^i$,即将每个像素赋值给均值离它最近的类。

- 3) 对 $j = 1, 2, \dots, k$,更新类均值:

$$\mu_j^{i+1} = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in Q_j^i} g(x)$$

其中, N_j 为 Q_j^i 中的像素个数。

4) 如果对所有的 $j = 1, 2, \dots, k$, 有 $\mu_j^{i+1} = \mu_j^i$, 则算法收敛, 结束, 否则执行第 22 步, 继续迭代。

使用特征聚类法对沥青混合料图像进行分割时, K 值为 2, 即分为 2 类。通常, 沥青胶砂颜色较黑, 初始聚类中心可在灰度范围 10 ~ 40 之间选取; 集料因来源不同, 灰度变化范围较大, 可根据切面图像中集料的灰度进行大致估计。

3 基于链码的边界跟踪

混合料图像分割后, 得到 2 类图像, 即集料和沥青胶砂; 为实现对集料颗粒进行 Clump“聚粒”操作, 需要将图像中每个集料颗粒的封闭区域识别出来, 链码边界跟踪方法是一种常用的目标跟踪算法。

图 1(a) 中 8 个数字 (0—7) 代表链码的搜索方向; 在图 1(b) 中, 黑色点代表目标, 边界跟踪的目的是将黑色点的外轮廓跟踪出来, 它由 A—I 8 个点组成, 链码边界跟踪的过程如图 1(b) 所示, 从 A 点一直跟踪到 I 点, 然后回到 A 点, 形成一个封闭的链, 即为链码。

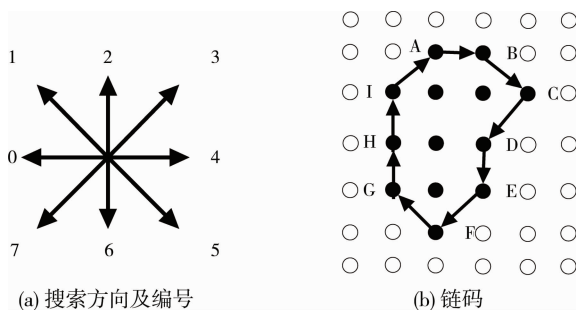


图 1 链码边界跟踪算法

4 基于线段表的集料颗粒 Clump“聚粒”算法

使用链码跟踪技术, 将目标区域的轮廓提取出来后, 需要使用线段表算法将离散元的圆盘颗粒填充到目标区域内, 线段表的原理为: 一个封闭区域由多条紧密相连的像素点组成的水平线段构成, 每一条水平线段均用该线段的左右两端点来标识, 线段表由该封闭区域中的所有水平线段端点按扫描顺序依次排列起来。由于线段表具有上述的结构特点, 可以方便的获取区域内各像素点坐标数据, 这些点的坐标即是离散元颗粒填充所需要的圆盘单元的圆心坐标。

利用线段表进行离散元颗粒填充的步骤如下:

将链码表转换为线段表, 转换时, 首先根据起始点坐标和链码表计算出封闭区域内所有边界点的坐标, 如表 1 中所示的计算过程, 将图 1 中目标区域的边界各点 A—I 点的坐标全部计算出来。

然后, 根据边界点的类型分别处理; 边界点分为 2 类, 一类为双顶点, 即该点的右(左)边为区域内的点, 而且其左(右)边不是区域中的点, 如图 1(b) 中的 A、B 2 点; 第二类为单顶点, 即由单点构成的封闭区域的顶点, 如图 1(b) 中的 F 点。对得到的线段表, 先按纵坐标排序, 再按横坐标排序。

最后, 进行离散元颗粒填充, 由线段表, 得到目标区域各行的左端点和右端点, 进而得到从左端点到右端点上的各像素点坐标, 以这些像素点坐标为离散元颗粒圆盘的圆心坐标, 半径为像素所代表的物理长度的一半, 得到圆心坐标后, 用 Ball 命令建立离散元圆盘单元, 依次将线段表中所有的端点间的像素点按照上述方法填充完毕, 最后, 将该线段表中所有圆盘用 Clump 命令定义为一个“聚粒”, 聚粒的 id 与链码跟踪的目标区域编号一致。

表 1 图 1 中目标区域链码的线段表计算结果

线段表序号	左边界点	左边界点坐标	右边界点	右边界点坐标	线段表边界点类型
1	A	(3,2)	B	(4,2)	双顶点
2	I	(2,3)	C	(5,3)	双顶点
3	H	(2,4)	D	(4,4)	双顶点
4	G	(2,5)	E	(4,5)	双顶点
5	F	(3,6)	F	(3,6)	单顶点

5 实例

利用 VC++6.0 编制了沥青混合料图像离散元几何建模程序, 程序运行结果如图 2。图 2(a), 为沥青混合料车辙板的界面灰度图像, 首先, 对图像进行平滑处理, 消除随机噪声, 用直方图均衡算法对图像的灰度进行拉伸, 增强集料与沥青胶砂图像的对比度; 利用特征聚粒算法进行图像分割, 对分割后的图像利用 Photoshop 将粘连的集料颗粒分离; 然后, 利用链码边界跟踪方法实现集料颗粒的识别, 如图 2(b) 中, 识别出 139 个集料颗粒, 并对每个颗粒进行编号; 将每个集料颗粒的链码转换为线段表, 利用线段表中的线段端点, 提取该颗粒区域内的像素点的图像坐标, 由此控制离散元的圆盘坐标填充集料颗粒, 从而完成对集料颗粒的 Clump“聚粒”操作; 最后, 对剩余区域, 即沥青胶砂区域, 利用 Ball 命令和胶砂的图像坐标进行颗粒填充, 完成整个混合料图

像的离散元几何建模,如图 2(c)所示,每个集料颗粒分别用彩色表示,胶砂区域用兰色圆盘显示。

将图 2(c)中的几何模型导入 PFC^{2D} 软件,图 2(d—f)为沥青混合料在贯入荷载作用下发生变形的数值模拟过程,采用图 2(c)的几何模型,试件的两侧和底面用固定墙约束,顶面用移动墙以匀速贯入的方式模拟车轮的累积荷载,移动墙的尺寸为试件长度的一半,位于试件顶面的中部,每个时步贯入试件 2×10^{-4} mm。图 2(e)为 5 000 个时步时混合料的变

形情况,此时,移动墙的两侧有轻微的隆起,移动墙下部的两侧沥青胶砂有轻微的滑动。图 2(f)为 30 000 个时步时混合料的变形情况,移动墙两侧附近的混合料具有明显的隆起,移动墙下部两侧的胶砂存在明显的滑动,并且图中混合料出现了较大的裂隙,这与实际情况相近。综上,利用图像技术将集料作为“聚粒”进行离散元建模,能够较好地模拟混合料在贯入荷载作用下变形的动态过程。

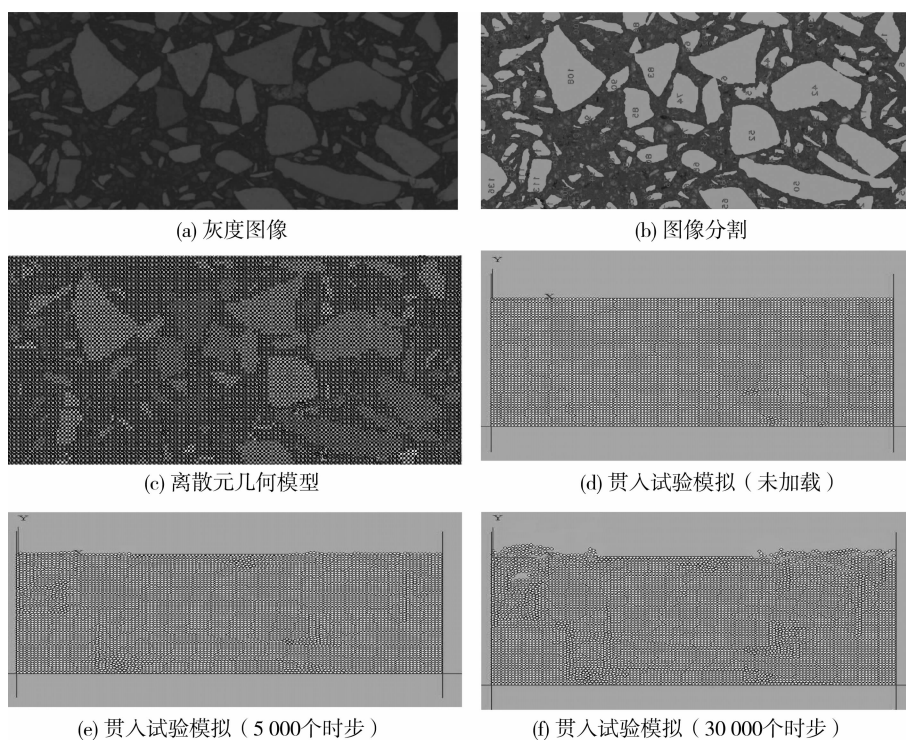


图 2 基于图像的离散元几何建模及数值仿真

6 结语

1)提出了一种基于图像的沥青混合料离散元几何建模方法,首先利用特征聚类法对混合料图像进行分割,得到集料和沥青胶砂 2 部分图像,利用链码边界跟踪方法对每个集料颗粒进行识别,再通过线段表算法实现对集料区域的离散元“聚粒”操作,最后对沥青胶砂区域进行离散元颗粒填充,进而完成整个图像的离散元几何建模。

2)使用链码边界跟踪和线段表颗粒填充技术,能够将图像中的集料坐标引入到离散元几何建模中,较好的保留了图像中集料的几何特征,并且将每个颗粒做为“聚粒”处理,更加符合实际情况,此外,由于图像中颗粒的编号与“聚粒”保持一致性,方便通过变形前后的图像颗粒坐标变化校准离散元模型的材料参数。

3)基于图像的沥青混合料离散元模拟方法为研究这种复杂的、多相、介质不连续的材料力学响应提供了新的途径,它的几何模型来源于真实试件的图像,仿真试验说明,将集料颗粒做成“聚粒”,能够模拟混合料在荷载作用下变形的动态过程,其结果与实际情况接近。

参考文献:

- [1] HYUNWOOK KIM, MICHAEL P WAGONER, WILLIAM G BUTTLAR. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008:552-563.
- [2] ZHANPING YOU, SANJEEV ADHIKARI AND QINGLI DAI, DEM models of idealized asphalt mixtures [C]//Pavemnets and Materials: Charactrization, Modeling, and Simulation(GSP 182), 2008.

- [3] CUNDAL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Geotechnique*, 1979, 47-65.
- [4] 王端宜, 张肖宁, 王绍怀. 用虚拟试验方法评价沥青混合料的级配类型[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(2): 48-51.
WANG DUAN-YI, ZHANG XIAO-NING, WANG SHAO-HUAI. Evaluation on grading type of asphalt mixture with virtual test method[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2003, 31(2): 48-51.
- [5] 王端宜, 张肖宁, 王绍怀. 水泥混凝土路面沥青加铺层材料的设计[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(12): 78-83.
WANG DUAN-YI, ZHANG XIAO-NING, WANG SHAO-HUAI. Design of asphalt overlay material used on concrete pavements [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2005, 33(12): 78-83.
- [6] ULLIDTZ P. Distinct element method for study of failure in cohesive particulate media [C]//TRB. *Transportation Research Record* 1757, 2001: 11-118.
- [7] ABBAS A R. Simulation of the micromechanical behavior of asphalt mixtures using the discrete-element method [D]. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Washington State Univ., 2004.
- [8] 田莉, 刘玉, 王秉纲. 沥青混合料三维离散元模型及其重构技术[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2007, 27(4): 23-27.
TIAN LI, LIU YU, WANG BIN-GANG. 3D DEM model and digital restructure technique for asphalt mixture simulation [J]. *Journal of Chang' an University: Natural Science Edition*, 2007, 27(4): 23-27.
- [9] 张婧娜. 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.
- [10] 李智. 沥青混合料体积组成及其数字图像处理技术[J]. *华南理工大学学报*, 2002, 38(11): 113-118.
LI ZHI. Evaluating the volumetric properties of asphalt mixtures with digital image processing technique[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*. 2002, 38(11): 113-118.
- [11] 彭勇, 孙立军, 董瑞琨. 沥青混合料均匀性评价新方法的探讨[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(2): 166-170.
PENG YONG, SUN LI-JUN, DONG RUI-KUN. Discussion about new method for evaluating homogeneity of hot-mix asphalt[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2005, 33(2): 166-170.
- [12] 汪海年, 郝培文. 集料二维形状特征的图像描述[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(6): 747-752.
WANG HAI-NIAN, HAO PEI-WEN. Digital description of two-dimensional shape characteristics of coarse aggregate [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6): 747-752.
- [13] 魏鸿, 英红, 凌天清. 沥青混合料集料接触特性切片图像评价方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(3): 69-75.
WEI HONG, YING HONG, LING TIAN-QING. Aggregates contact characteristics evaluation of asphalt mixtures by analyzing cut images[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(3): 69-75.
- [14] 孙朝云. 沥青混合料组成特征数字图像处理系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [15] Itasca Consulting Group. Inc., PFC^{2D} (particle flow code in 2 dimensions) [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group. Inc., 1999.

(编辑 胡玲)