

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.013

基于真实细观结构的多孔混凝土三维重建

梁丽敏, 余红发, 潘浙锋

(南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了获得真实多孔混凝土结构和满足多孔混凝土三维细观力学模拟的需要, 借助工业 CT 图像三维重建方法的原理, 采用数字图形处理技术和 MATLAB 程序实现了多孔混凝土的三维结构重建。结果表明, 重构的三维结构模型接近真实的多孔混凝土, 可以直观地分析混凝土内部的多孔结构和孔的连通性。多孔混凝土的三维重建为有限元方法研究多孔混凝土的孔结构、力学性能及其渗透性提供了一种有效的模型, 为多孔混凝土物理力学性能的数值模拟奠定了基础。

关键词: 三维重建; 数字图形处理; MATLAB; 多孔混凝土

中图分类号: TU317; TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)04-0424-04

多孔混凝土是一种生态友好型材料, 具有广阔的发展前景, 是当前研究的热门课题之一^[1-6]。多孔混凝土研究的内容主要集中在 3 个方面^[6]: 孔隙率与强度关系、制作工艺和施工方法、配合比设计。相对于普通混凝土而言, 多孔混凝土研究还处于初级阶段。近年来国内外已经开展基于微观力学的有限元数值模型对普通混凝土内部强度破坏机理的探索, 并取得了一定的成果。

Bazant 等^[7-8]提出了随机骨料模型, 用“取放”的方法模拟了骨料的大小和位置。高政国等^[9]对混凝土骨料的随机投放算法进行了研究, 建立了二维混凝土随机骨料模型。姜绍飞等^[10]模拟了二维三相随机骨料结构的生成过程。杜修力等^[11]也采用类似方法研究了混凝土的数值模拟问题。孙立国等^[12-13]研究了二维混凝土多边形骨料投放算法以及基于随机骨料数学模型的混凝土弹性模量预测问题。李运成等^[14]建立了混凝土三维细观力学模型。凌丽等^[15]采用三维有限元程序 RFPA^{3D}对矩形钢管混凝土短柱在轴心受压条件下的受力、变形与内部裂缝萌生、扩展及最终破坏的全过程进行了数值模拟分析。姜袁等^[16]则实现了基于 CT 扫描数据混凝土细观结构的三维重建。

普通混凝土的细观损伤力学研究已经从二维发展到三维, 从数值试验模拟发展到基于真实细观结构的三维重建。利用三维重建的混凝土构件进行有限元计算分析, 可以研究混凝土裂缝的发展^[17]、骨料弹性模量对混凝土弹性模量的影响^[18]等。为了真实地反映多孔混凝土内部结构, 正确分析多孔混凝土的力学特性, 本文采用体重重建法来实现多孔混凝土的三维结构重建。

1 三维重建方法

现有的三维重建方法可分为 2 类^[19]: 基于表面的方法和基于体数据的方法。基于表面的方法又称表面重建, 是表示三维物体形状最基本的方法, 通过几何单元拼接拟合物体表面来描述物体的三维结构, 可以提供三维物体形状的全面信息。基于体数据的方法又称体重重建, 是直接将体像素以一定的颜色和透明度投影到显示平面的方法, 体重重建方法不丢失细节, 更加准确地反映体数据所包含的形状结构。本文采用体重重建法来实现多孔混凝土的三维重建。

2 图像获取

本实验采用连续切片方法获取二维图像。切片厚度对三维重建影响较大, 实验过程中严格控制切片厚

度 2 个切片间距为集料粒径的 1/4.切片的具体操作:首先将多孔混凝土切片修平后研磨,使得其表面为一平整平面,利用普通光学相机拍摄获得多孔混凝土截面的二维图像,然后再一次切去较薄一层材料,研磨后拍摄其图像,图像应满足能足够了解物体的立体结构信息要求,最后用计算机软件将所有的平面图像依次连接起来,便可得到研究对象的立体结构图.切片后拍摄获得的多孔混凝土二维图像如图 1 所示.

3 多孔混凝土三维重建

3.1 图像处理

图像的增强、分割等处理是三维重建中必不可少的环节.图像质量好,将减少不必要的数据处理量,使图像显示速度更快.图像处理内容包括图像剪切、灰度直方图均化、灰度变换、平滑和锐化处理、阈值分割等.图 2 是原始图像,图 3 和图 4 是处理过的图像.从图 2~图 4 可以看出,处理过的图像比原始图像更清晰,减少了背景因素的干扰.

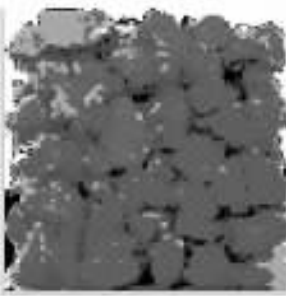


图 2 原始图像

Fig. 2 Original image

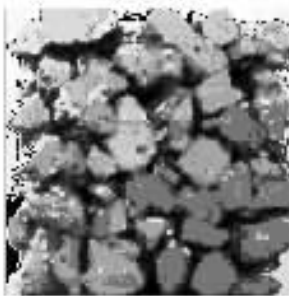


图 3 直方图均化图像

Fig. 3 Histogram equalized image



图 4 阈值分割图像

Fig. 4 Threshold image

3.2 三维重建过程

在实验中,用 MATLAB 对多孔混凝土的 n 幅经过图像增强和分割处理后的连续切片图像进行三维重建.

3.2.1 体数据集采集

利用 n 幅多孔混凝土连续切片图像进行三维体数据集 D 的构造,得到的体数据集 D 是一个 $x \times y \times n$ 的矩阵.三维体数据集构造如图 5 所示,具体过程如下:

```
for ii = 1 :1 :n
    image{ii}= imread([ '二维图像地址 ' int2str(ii). 'fnt ']); % 图
    片数据的读入 ,fnt 为文件格式
end ;
```

```
D = cat( 3 ,image{1} ,image{2} ,... ,image{ii} ,... ,image{nn} ); %构造三维数据
```

3.2.2 体数据预处理

构造所得到的体数据集 D 数据量大,在体重建中速度慢,并且可能在计算中超出内存.利用 reducevolume 函数减少数据量,对数据集 D 进行预处理.利用 Smooth 函数对数据进行平滑处理.具体函数为

```
[ x y z D ]= reducevolume( D [ a b c ])
D = smooth3( D , 'filter ')
```

其中: a , b , c 为 x , y 和 z 轴数据抽取的比例, filter 表示采用相应的滤波算子对数据进行平滑处理.

3.2.3 体数据在显示平面累计投影

利用 isosurface 函数计算体数据集 D 在显示平面上的累计投影.具体函数为

```
fv = isosurface( D , 'isovalue ')
```

其中 isovalue 为绘制的等值面的取值.



图 1 多孔混凝土切片图像

Fig. 1 Slice image of porous concrete

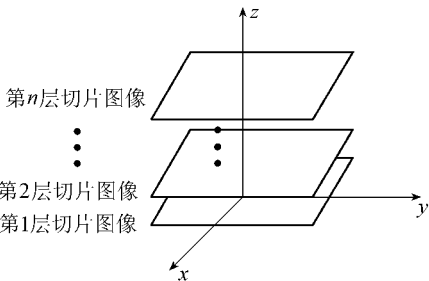


图 5 三维体数据集构造示意图

Fig. 5 Structure of three-dimensional volume data

3.2.4 三维重建碎片构造

使用 `patch` 函数对图像子区域进行分类,可以定义结果图像的颜色、光线等信息.具体函数表示为

```
p1 = patch(fv, 'FaceColor', 'yourscolor1', 'EdgeColor', 'yourscolor2')
```

其中 `yourscolor` 为自定义颜色.

3.2.5 图像颜色、阴影及显示效果的设置

利用 `view` `daspect` `colormap` `camlight` `lighting` 等函数设置显示图像的效果.`view(3)` 是 MATLAB 默认的三维观察视角函数,`daspec([x y z])` 定义 x 轴、 y 轴和 z 轴的显示比例;`colormap()` 定义图像的颜色集,将指定的数值颜色向量(矩阵)映射到对应的颜色;`camlight` 创建一个照相机光线的位置,本文采用左、右 2 个光源来增强重建模型感官效果;`lighting` 设置图像的照明效果,显示图像的光线阴影.

根据上述重建步骤对多孔混凝土切片进行了重建,结果如图 6 所示.试件为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体.图 7 是三维重建 1/5 结构.

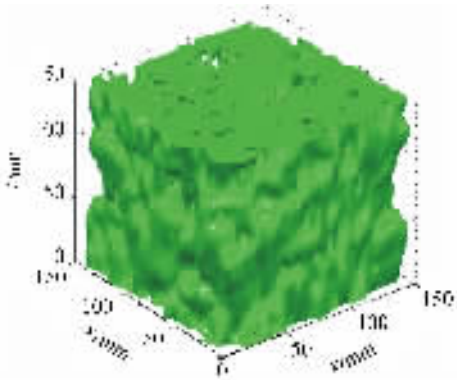


图 6 多孔混凝土的三维重建图像

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction image of porous concrete

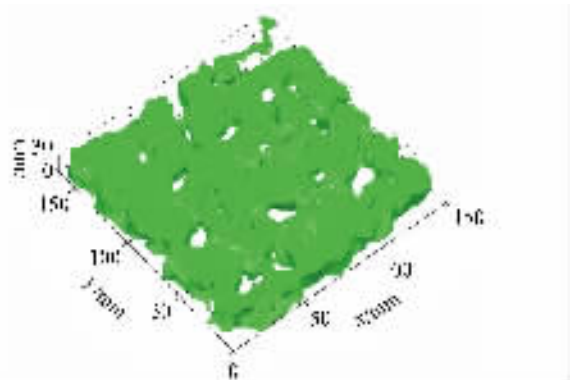


图 7 三维重建 1/5 结构

Fig. 7 Image of 1/5 thickness of three-dimensional reconstruction of porous concrete

从图 6 和图 7 可以看出,经过重建,可以清晰地看到多孔混凝土内部真实的孔结构.

4 结 论

纵观普通混凝土细观力学的发展过程,发现随着高性能的计算机及数值计算理论的迅速发展,基于数值分析方法的若干模型及软件已经应用于模拟混凝土的力学反应和破坏模式分析.多孔混凝土的内部细观结构决定了其局部应力和应变分布,并能影响到其最终破坏模式.多孔混凝土的真实三维结构重建能够定性定量地分析混凝土内部的多孔结构和孔的连通性.利用真实三维结构进行多孔混凝土损伤演化过程模拟,将从细观层次上揭示多孔混凝土内部的破坏机理.多孔混凝土真实三维结构的建立为有限元方法研究多孔混凝土的孔结构、力学性能及其渗透性提供了一种有效的模型,为多孔混凝土物理力学性能的数值模拟奠定了基础.

参考文献:

- [1] TETSUO K, MAMORU K, TAKAYOSHI K, et al. Development of the environment-friendly hybrid permeable concrete pavement[J]. Concrete Journal 2001, 39(3): 36-43.
- [2] 李化建, 孙恒虎, 肖雪军. 生态混凝土研究进展[J]. 材料导报, 2005(3): 17-20, 24. (LI Hua-jian, SUN Heng-hu, XIAO Xue-jun. Advance in research on eco-concrete[J]. Materials Review 2005(3): 17-20, 24. (in Chinese))
- [3] 王武祥. 透水性混凝土路面砖的种类和性能[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2003(1): 17-19. (WANG Wu-xiang. Kinds of water-penetrable concrete road bricks and their properties[J]. Building Block and Block Building 2003(1): 17-19. (in Chinese))
- [4] 郑木莲, 王秉纲, 胡长顺. 大孔混凝土组成设计及路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(4): 6-10. (ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Component design and performance of porous concrete[J]. Journal of Changan Highway University: Natural Science 2003, 23(4): 6-10. (in Chinese))
- [5] 郝静华. 多孔混凝土材料组成设计方法研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2007(2): 57-60. (HAO Jing-hua. Design methods research on composition of porous concrete materials[J]. Journal of Highway and Transportation and Development: Applied Technique, 2007(2): 57-60. (in Chinese))
- [6] 谢新生, 汤巍, 王锦叶. 多孔生态混凝土强度与孔隙率的实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(6): 19-23. (XIE

- Xin-sheng ,TANG Wei ,WANG Jin-ye. Experimental study on strength and porosity ratio of porous ecological concrete[J]. Journal of Sichuan University :Engineering Science Edition 2008 40(6) :19-23.(in Chinese))
- [7] BAZANT Z P ,TABBARA M R ,KAZEMI M T et al. Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1990 ,116(8) :1686-1705.
- [8] 王宗敏 ,邱志章. 混凝土细观随机骨料结构与有限元网格剖分[J]. 计算力学学报 ,2005 ,22(6) :728-732.(WANG Zong-min , QIU Zhi-zhang. Random aggregate structure of mesoscopic concrete and finite element mesh[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics ,2005 22(6) :728-732.(in Chinese))
- [9] 高政国 ,刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2003 43(5) :710-714.(GAO Zheng-guo ,LIU Guang-ting. Two-dimensional random aggregate structure for concrete[J]. Journal of Tsinghua University :Natural Science 2003 43(5) :710-714.(in Chinese))
- [10] 姜绍飞 ,邱云飞 ,陈仲堂. 混凝土细观层次损伤数值模拟 随机骨料结构的生成[J]. 沈阳建筑大学学报 :自然科学版 ,2007 (2) :182-186 ;194.(JIANG Shao-fei ,QIU Yun-fei ,CHEN Zhong-tang. Numerical simulation of micro mechanics of concrete-production of random aggregate structure[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University :Natural Science 2007(2) :182-186 ;194.(in Chinese))
- [11] 杜修力 ,田瑞俊 ,彭一江. 均匀化在数值混凝土单轴拉伸试验中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报 :自然科学版 ,2007(5) :742-746.(DU Xiu-li ,TIAN Rui-jun ,PENG Yi-jiang. Application of homogenization on the uniaxial tension test for the numerical concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University :Natural Science 2007(5) :742-746.(in Chinese))
- [12] 孙立国 ,杜成斌 ,戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模拟[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 33(3) :291-295.(SUN Li-guo ,DU Cheng-bin ,DAI Chun-xia. Numerical simulation of random aggregate model for mass concrete[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2005 33(3) :291-295.(in Chinese))
- [13] 孙立国. 三级配 全级配 混凝土骨料形状数值模拟及其应用[D]. 南京 河海大学 ,2005.
- [14] 李运成 ,马怀发 ,陈潇. 混凝土三维细观力学模型分析[J]. 山东商业职业技术学院学报 ,2007 ,7(3) :98-101.(LI Yun-cheng , MA Huai-fa ,CHEN Xiao. Analysis of concrete 3-D meso-mechanical model[J]. Journal of Shandong Institute of Commerce and Technology 2007 ,7(3) :98-101.(in Chinese))
- [15] 凌丽 ,唐春安 ,王述红 ,等. 钢管混凝土柱破坏过程的三维数值模拟[J]. 东北大学学报 :自然科学版 ,2008 ,29(10) :1505-1508.(LING Li ,TANG Chun-an ,WANG Shu-hong et al. 3D-Numerical simulation on failure process of concrete-filled steel tube column [J]. Journal of Northeastern University :Natural Science 2008 29(10) :1505-1508.(in Chinese))
- [16] 姜袁 ,柏巍 ,戚永乐 ,等. 基于 CT 扫描数据的混凝土细观结构的三维重建[J]. 三峡大学学报 :自然科学版 ,2008 ,30(1) :52-55.(JIANG Yuan ,BAI Wei ,QI Yong-le et al. Reconstruction of 3D model of concrete mesostructure with CT original data[J]. Journal of China Three Gorges University :Natural Sciences 2008 ,30(1) :52-55.(in Chinese))
- [17] KWAN A K H ,WANG Z M ,CHAN H C. Mesoscopic study of concrete II : nonlinear finite element Analysis[J]. Computers and Structures ,1999 ,70(5) :545-556.
- [18] VAN MIER J G M ,VAN VLIET M R A ,WANG T K. Fracture mechanisms in particle composites : statistical aspects in lattice type analysis[J]. Mechanics of Materials 2002 34(11) :705-724.
- [19] 曾笋 ,董芳华 ,陈晓 ,等. 利用 MATLAB 实现 CT 断层图像的三维重建[J]. CT 理论与应用研究 ,2004 ,13(2) :24-29.(ZENG Zheng ,DONG Fang-hua ,CHEN Xiao et al. Three dimensions reconstruction of CT image by MATLAB[J]. CT Theory and Applications , 2004 ,13(2) :24-29.(in Chinese))

Actual mesostructure-based three-dimensional reconstruction of porous concrete

LIANG Li-min , YU Hong-fa , PAN Zhe-feng

(College of Aerospace Engineering , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,
Nanjing 210016 , China)

Abstract : In order to obtain actual structure of porous concrete and to meet the needs of three-dimensional micro-mechanical simulation of porous concrete , the principles of industrial three-dimensional reconstruction of CT images were employed , and the digital graphic process and the MALAB program were adopted to achieve the three-dimensional reconstruction of porous concrete . The results show that the reconstruction view of three-dimensional structure model is cloese to the actual structure of porous concrete , and the internal porous structure and the connectivity of concrete can be directly analyzed . The three-dimensional reconstruction of porous concrete provides an effective model for its porous structure , mechanical property and pemeability by using finite element methods , and it lays the foundation for numerical simulation of physical and mechanical properties of porous concrete .

Key words : three-dimensional reconstruction ; digital image processing ; MATLAB ; porous concrete