

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.024

数字图像处理技术在混凝土渗流分析中的应用

张文捷^{1,2}, 姚德生¹, 盛金昌¹, 詹美礼¹, 周治荣¹

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.江西省水利厅,江西 南昌 330009)

摘要:采用图像数字化处理技术来反映混凝土内部的砂浆、骨料的分布情况,根据生成的数字图像文件,结合数值分析方法,基于 Comsol 耦合分析程序,可以得到混凝土材料的非稳定渗流过程.数值分析结果表明,该方法可行且有效的,能反映混凝土非均质材料的真实物理过程.

关键词:混凝土;数字图像;图像数字化处理;非稳定渗流

中图分类号:O357.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)06-0731-05

一些研究者在研究混凝土、岩石等一些多孔介质的渗透性时,大多将其等效为连续均质的多孔介质^[1],这种等效不能真实地反映多孔介质不同部位的渗透性.由于直接测量多孔介质的非均质性很难,通常借助统计学的随机抽样方法(如韦伯分布)来处理多孔介质的非均质性,主要假定物理参数服从某一统计规律^[2-3],其结果固然能反映多孔介质的非均质性,但由于是假设的某种随机分布,并不能真正地表示多孔介质的实际情况.

随着功能强大的微型计算机普及和数字视频技术的提高,数字图像处理技术得到迅速发展,并不断应用到不同的领域,近年来该技术已应用到混凝土工程中^[4].

数字图像处理技术主要是通过照相、CT 扫描、电镜扫描等技术将真实物体用对应的数字图像来表示,并将图像以数字形式存储在计算机中,利用计算机对图像信息进行分析、修改和计算来得到所需要的信息和结果.当物体转换为数字图像时,其表面或内部不同介质可以通过灰度或色度的变化在数字图像中得到准确的体现,数字图像精确地反映了物体中不同介质种类及其空间位置或分布^[5],能够真实地反映多孔介质的非均质性.

随着数字图像处理技术的迅速发展,数字图像技术越来越多地被应用到介质的细观结构研究上,盛金昌等^[6]应用数字图像技术研究了裂隙岩体的非稳定渗流,徐文杰等^[7]基于数字图像研究了土石及混凝土内部结构,王宝庭等^[4]应用数字图像处理技术研究了混凝土的力学性能,李智等^[8]研究了沥青混合料数字图像处理技术的方法.数字图像技术本身成了物体细观介质结构和空间分布的一种精确测量和数字表述的方法.近年来,该技术被应用到医学、生物学、地理学、材料科学等各个领域,在土木工程中被用来研究混凝土的微观结构,检测道路铺装裂纹,测量结构变形等,它大幅度提高了人们处理问题的能力^[9].

本文采用图像数字化处理技术来真实客观地反映混凝土内部的砂浆、骨料的分布情况,勾勒出骨料和砂浆的边界轮廓,生成数字图像文件,然后将其和数值方法相结合,利用 Comsol 多物理场耦合软件来分析混凝土的非稳定渗流过程.

1 混凝土图像数字化预处理

数字化处理所需要的图像可以通过多种方式来获得,如数码相机、CT 扫描、SEM 电镜等^[5].由于所拍摄的图片中可能有很多的数字噪声,不能很好地反映混凝土内部结构的真实原貌,因此在数字图像处理之前需要对图片进行去噪预处理,如何获得良好的去噪效果,与所选取的去噪方法有很大的关系.数字图像预处理一般包括二值化处理和去噪滤波处理.

1.1 数字图像的二值化处理

这里利用 Matlab 软件来进行数字图像的二值化处理,先通过 `Graythresh` 命令得到图像的全域阈值,然后通过二值化命令得到在全域阈值下的二值化图像(如果全域阈值下的二值化图像不能很好地反映图像的实际情况,需要编程找到图像的最优阈值,再得到对应的二值化图像)。

原始图像(图 1(a))经过二值化处理后的图像如图 1(b)所示。

1.2 图像去噪、滤波处理

从二值化后的图像(图 1(b))中可以看出,图片中有很多小黑点或白点,属于“椒盐噪声”,这里采用较为简单的“中值滤波”去噪方法(在 Matlab 中通过 `Medfilt2` 命令实现),因为在一些小黑点附近是大量的白色背景,只要选取适当大的模版,就可以滤掉小黑点。如果模版选取过大,可能会造成图像边缘太模糊,在二值图像中可能会扩大块石边缘。

混凝土混合料中的块石颗粒的灰度因种种原因可能接近砂浆的灰度,致使二者的二值化图像边界不易区分,因此需要运用图像滤波技术来增加对比度,锐化块石边界,使块石与砂浆明显地区分开来。二值图像(图 1(b))经去噪滤波处理后的图像(图 1(c))边界清晰分明,能很好地反映块石、砂浆分布情况。

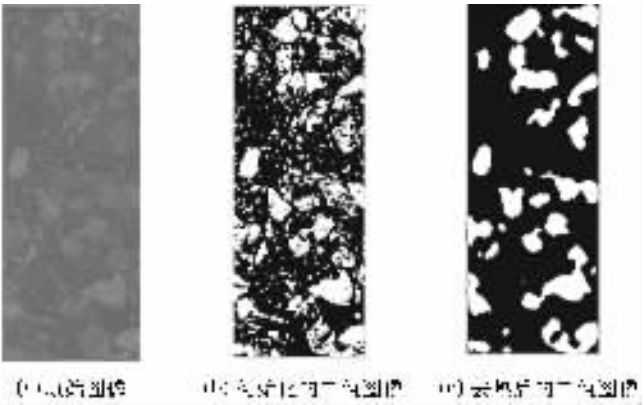


图 1 混凝土切面原始图像及预处理后的图像
Fig. 1 Original and pretreated images of concrete samples

2 混凝土图像数字化处理

二值化、去噪滤波处理后的图像都是标量细观图像,为了能将该图像应用于工程数值模拟,需要将标量细观结构图像转换为矢量细观结构图像,具体处理步骤如下:

a. 在滤波后的二值化图像中,编程搜索块石的个数、每个块石的边界点数以及所有边界点对应的坐标值。在二值化图像中,有的块石颗粒很小,其所对应的边界点数也很少,为了建模计算时减少划分的单元数以及提高计算的效率,这里将边界点数少于 20 的块石当作砂浆处理。同时,由于数字图像处理时是以像素为基本单位的,所得到的边界点对应的也是像素点,为了保证模型边界的光滑度,需要取舍部分像素点并保证边界的不变性,可以通过求解斜率去除部分像素点,将取舍后边界点及坐标,保存在 .txt 文件中。

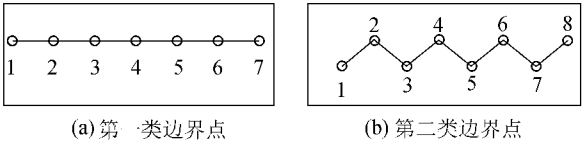


图 2 不同类型的块石边界
Fig. 2 Different boundaries for rock

例如:假设有图 2 所示的两类边界点,在第一类边界点中(图 2(a)),点 1,2,...,7 在同一条直线上,其通过斜率取舍的方法如下:(a)如果这些点都在 x 轴或 y 轴上,即点 1,2,...,7 的 x 值或 y 值相等,则取第一个点以及这条直线上的最后一点,中间的其余点舍去,统计时只统计始末 2 个点即可。(b)如果这些点不在 x 轴或 y 轴上,而是成正负 45 度的倾角,则分别计算 1-2,2-3 的斜率,如果两者的斜率相等则舍去 2 点,再计算 1-3,3-4 的斜率,如果两者的斜率相等再舍去 3 点,同理,一直计算下去直到斜率不再相等时终止。

在第二类边界点中(图 2(b)),通过计算 1-3,2-4 的斜率,若两者的斜率相等则舍去 2,3 点保留 1,4 点,同理计算 4-6,5-7 的斜率,若两者相等则舍去 5,6 点,这样就保留了 1,4,7 点,舍去了 2,3,5,6 点,这是第一次斜率取舍的结果,同理也可以进行第二轮的斜率取舍,得到更为光滑的多线段。

b. 通过 VBA 编程,读取 .txt 文件中的数据,根据文件中的数据在 AutoCAD 中画出所有的边界点并连接成线,形成块石颗粒的边界。对于少数局部不完善的边界通过手动修改即可得到比较理想的图形,保存为 .dxf 格式文件,这样就把混凝土的主要组成部分(骨料和砂浆)区分开来了,如图 3(a)所示。

3 基于数字图像处理方法的细观非均质材料的非稳定渗流算例分析

以下用非稳定渗流问题来说明如何将处理后的数字图像应用于混凝土渗流数值分析中。二维非稳定渗

流的基本微分方程为

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中： H ——水头； t ——时间； S_s ——储水率， $S_s = \rho g(\alpha + \beta n)$ ，其中 α, β 分别为混凝土骨架和水的压缩系数， n 为混凝土的孔隙率； k ——渗透系数。

从混凝土表面图像中选取一块 176×418 像素的区域作为计算域(选取的像素越多,工作量越大,计算用时越多),如图 1(a)所示。

a. 将得到的 .dxf 图形文件导入到数值软件 Comsol Multiphysics 中,经过有关处理即可得到可以用于数值计算的几何模型,如图 3(b)所示,这样就可以进行有限元网格划分了。

b. 建立像素值与渗透系数之间的关系 $k = f(I)$ 。假设水泥砂浆的渗透系数和像素值之间(色泽、亮度)有一定的关系,而骨料渗透系数为一个很小的固定值,这样就得到混凝土试件的渗透系数分布如图 3(c)所示。

计算模型的尺寸:15 cm $\times$ 36 cm(图形中的尺寸代表的是像素数而不是实际模型的尺寸)。

边界条件:模型的左右边界为不透水边界,下边界设为常水头边界 $H = 200$ m,上边界为常水头边界 $H = 0$ m。

初始条件为 $h(x, y) = 0$ 。

由于混凝土的渗透系数较小,在一定的水头压力作用下,其渗透速度较慢,流速较小。当 $t = 1.8 \times 10^6$ s 时,由图 4(a)及图 5(a)可见,混凝土试样中的水流还未完全渗出,水流在混凝土的内部流动,还未形成贯穿混凝土的渗流通道。当 $t = 3.6 \times 10^8$ s 时,由图 4(b)及图 5(b)可见,混凝土中已经有水流渗出,内部已经形成渗流通道,由图 5(b)还可看到,水流在混凝土中流动时会选择最优的渗流路径,形成集中的渗流通道,在中间狭缝处的流速较大,两侧的流速较小。

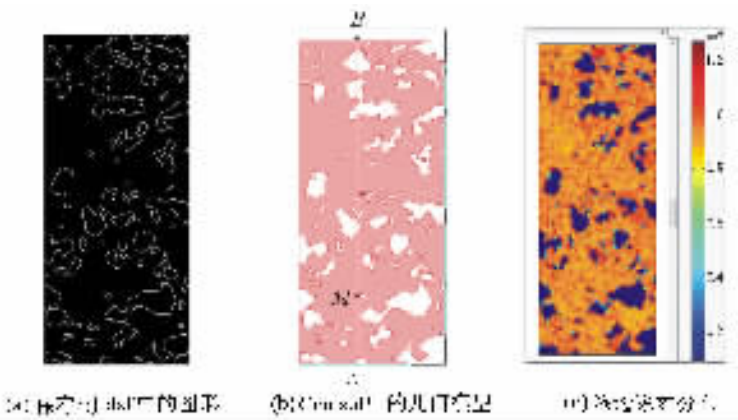


图 3 混凝土的骨料和砂浆边界及渗透系数(单位:cm/s)

Fig. 3 Boundaries for aggregate and mortar in concrete and their permeability coefficients(units : cm/s)

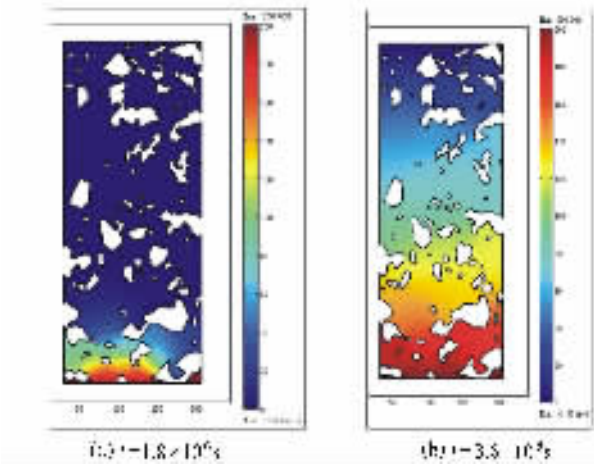


图 4 不同时刻各点的水头值分布

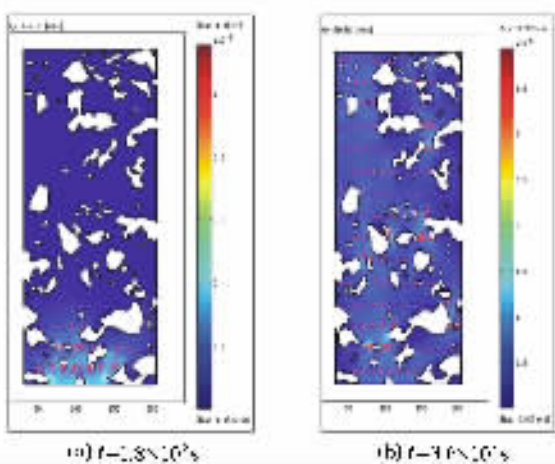


图 5 不同时刻各点的流速分布

Fig. 4 Distribution of hydraulic heads at different times

Fig. 5 Distribution of flow velocities at different times

图 6 给出了不同时刻点 M 处的水头、流速变化曲线。由图 6(a)可知,点 M 处的水头随着时间的持续在不断增大,由零直到趋于稳定;由图 6(b)可知,点 M 处的流速在刚开始有水流通过时,流速较大,以后随着水力梯度的减小,流速逐渐减小直至达到稳定状态。

图 7 给出了 3 个不同时刻($t = 1 \times 10^6$ s, 9×10^6 s, 9×10^7 s) AB 剖面的水头、流速值(图中间断部分代表混凝土中的块石,计算区域不包括块石)。由图 7(a)可见,在同一时刻 AB 剖面水头近似直线减小,随着时间的

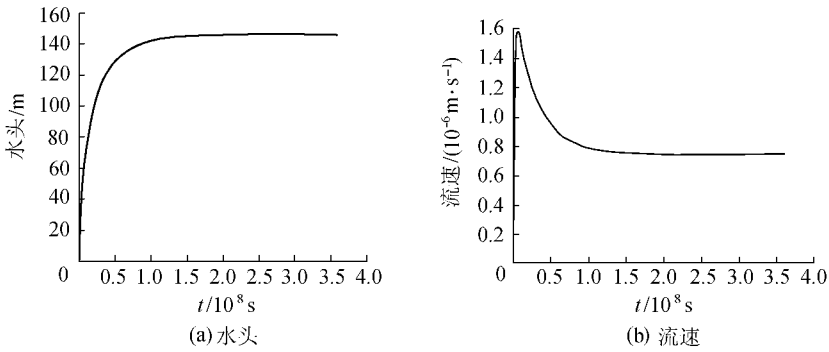


图 6 不同时刻 *M* 点处的水头、流速变化

Fig. 6 Variations of hydraulic heads and flow velocities at point *M* and at different times

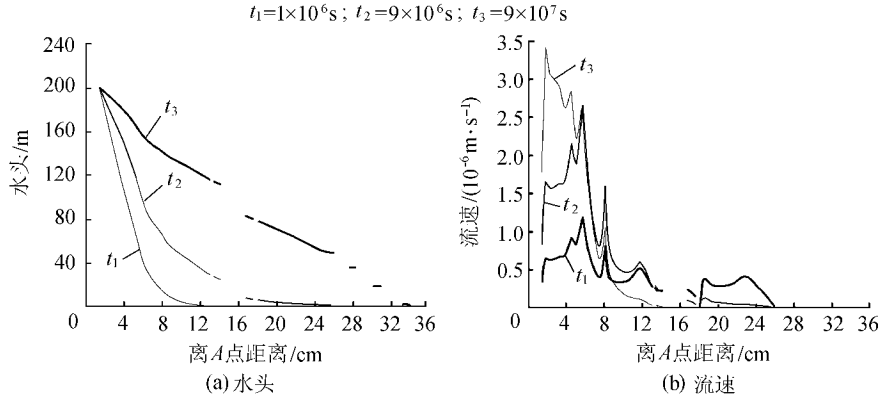


图 7 在不同时刻 *AB* 剖面水头和流速

Fig. 7 Variations of hydraulic heads and flow velocities along line *AB* at different times

持续剖面对应点处的水头在不断增大. 由图 7 (b) 可见, 随着时间的推移, 对应点的流速在不断增大, 中间的峰值是由于集中渗流通道的缘故, 在狭窄的地方流速较大.

在数字图像处理技术得到的模型中, 可以直观清晰地表示混凝土中的渗流情况、渗流通道的分布以及任意时刻任意位置的渗流, 这是等效连续介质法等难以做到的.

4 结 论

- a. 采用数字图像处理技术来描述混凝土砂浆、块石的分布是可行的, 能真实反应混凝土内材料的分布情况.
- b. 混凝土中块石对地下水的影响是显著的, 在混凝土中会形成渗流集中现象.
- c. 数字图像处理技术不仅能计算混凝土的渗流问题, 还可以用来计算研究混凝土、岩石的应力问题以及溶解等多场耦合过程, 这需要更深入的研究探讨.

参考文献 :

[1] 盛金昌, 速宝玉, 詹美礼, 等. 裂隙岩体随机渗流模型及数值分析[J]. 重庆大学学报 : 自然科学, 2000, 23(增刊) : 1402-1407.
(SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, Zhan Mei-li et al. FEM stochastic seepage model and mathematical analysis of jointed rock masses[J].
Journal of Chongqing University : Natural Science Edition, 2000, 23(5) : 1402-1407. (in Chinese))

[2] BLAIR S C, COOK N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques : part I, a nonlinear rule-based mode[J].
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7) : 837-848.

[3] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and
Mining Sciences, 1997, 34(2) : 249-261.

[4] 王宝庭, 徐道远, 宋玉普. 数字图像处理技术在混凝土研究中的应用[J]. 河海大学学报 : 自然科学版, 1999, 27(4) : 60-63.
(WANG Bao-ting, XU Dao-yuan, SONG Yu-pu. Application of digital image processing technique to concrete research[J]. Journal of
Hohai University : Natural Sciences, 1999, 27(4) : 60-63. (in Chinese))

[5] 岳中琦. 岩土细观介质空间分布数字表述和相关力学数值分析的方法、应用和进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25

- (5):875-888.(YUE Zhong-qi. Digital representation of meso-geomaterial spatial distribution and associated numerical analysis of germechanics methods applications and developments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2006 ,25(5) :875-888. (in Chinese))
- [6] 盛金昌,刘继山,赵坚.基于图像数字化技术的裂隙岩体非稳定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1402-1407.(SHENGJin-chang ,LIU Ji-shan ,ZHAO Jian. Analysis of transient fluid flow in fractured rock masses with digital image-based method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2006 ,25(7):1402-1407.(in Chinese))
- [7] 徐文杰,岳中琦,胡瑞林.基于数字图像的土、岩和混凝土内部结构定量分析和力学数值计算的研究进展[J].工程地质学报,2007,15(3) :289-312.(XU Wen-jie ,YUE Zhong-qi ,HU Rui-lin. Current status of digital mage based quantitative analysis of internal structures of soils ,rocks and concretes and associated numerical simulation[J]. Journal of Engineering Geology ,2007 ,15(3) :289-312. (in Chinese))
- [8] 李智,徐伟,王绍怀,等.沥青混合料数字图像处理技术的方法研究[J].公路交通科技,2003,12(6) :13-16.(LI Zhi ,XU Wei , WANG Shao-huai ,et al. Study on asphalt mixture digital image processing[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2003 ,12(6) :13-16.(in Chinese))
- [9] YUE Zhong-qi ,MORIN I. Digital image processing for aggregate orientations in asphalt concrete :reply to discussion by Ashraf M. Ghaly [J]. Canadian Journal of Civil Engineering ,1997 ,24 :334-334.
- [10] 徐文杰,胡瑞林,岳中琦.基于数字图像处理的土石混合体细观结构[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(1) :51-53.(XU Wen-jie ,HU Rui-lin ,YUE Zhong-qi. Meso-structure character of soil-rock mixtures based on digital image[J]. Journal of Liaoning Technical University :Natural Science ,2008 ,27(1) :51-53.(in Chinese))
- [11] 徐文杰,胡瑞林,王艳萍.基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PEC2D 模型[J].煤炭学报,2007,32(4) :358-362.(XU Wen-jie ,HU Rui-lin ,WANG Yan-ping. PEC model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing [J]. Journal of China Coal Society ,2007 ,32(4) :358-362.(in Chinese))
- [12] 陈沙,岳中琦,谭国焕.基于数字图像的非均质岩土工程材料的数值分析方法[J].岩土工程学报,2005,27(8) :956-964. (CHEN Sha ,YUE Zhong-qi ,TAN Guo-huan. Digital image based numerical modeling method for heterogeneous geomaterial[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2005 ,27(8) :956-964.(in Chinese))
- [13] 韩思奇,王蕾.图像分割的阈值法综述[J].系统工程及电子技术,2002,24(6) :91-94.(HAN Si-qi ,WANG Lei. A survey of thresholding methods for image segmentation[J]. Systems Engineering and Electronics ,2002 ,24(6) :91-94.(in Chinese))
- [14] 岳中琦,陈沙,郑宏,等.岩土工程材料的数字图像有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6) :889-897.(YUE Zhong-qi ,CHEN Sha ,ZHENG Hong ,et al. Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2004 ,23(6) :889-897.(in Chinese))

Application of digital image processing technology in seepage analysis

ZHANG Wen-jie^{1,2}, YAO De-sheng¹, SHENG Jin-chang¹, ZHAN Mei-li¹, ZHOU Zhi-rong¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Jiangxi Department of Water Resources , Nanchang 330009 , China)

Abstract: Digital image processing technology was employed to identify the distribution of mortar and aggregate in concrete. Based on the generated digital images and combined with numerical analysis , the unsteady flow processes in concrete could be traced using the Comsol coupled program. The numerical results show that the present method is feasible and effective and can depict the actual processes of heterogeneous materials such as concrete.

Key words : concrete ; digital image ; digital image processing ; unsteady flow