

# 基于破损分区理论和 CT 数重建混凝土数值模型

方建银,李 娜,党发宁,潘 优,任 劼

(西安理工大学 土木建筑工程学院,陕西 西安 710048)

**摘 要:**为了建立能真实反映混凝土试样内部细观结构的数值模型,分析大体积混凝土的损伤演化特性,利用便携式动力加载设备结合医用 Marconi M8000 螺旋 CT 扫描仪进行混凝土单轴压缩 CT 扫描试验,获得单轴压缩条件下混凝土试样的 CT 扫描图像。基于破损分区理论,提出了确定阈值的概率统计法,并将混凝土 CT 扫描图像分为骨料区、硬化水泥石区和孔洞裂纹区。进而基于 CT 扫描图中每个分辨单元的坐标,建立结构随机型数值混凝土模型,并对单轴静力压缩和拉伸条件下混凝土的损伤演化特性进行数值模拟。研究表明:结构随机型数值混凝土模型的细观结构与混凝土试样非常接近,该模型中骨料与砂浆的黏结界面厚度仅为 0.04 mm 左右,与真实混凝土试样的界面厚度(10~50  $\mu\text{m}$ )非常接近;在单轴拉、压应力状态下,混凝土细观裂纹均在强度相对薄弱的初始缺陷处开始萌生,随着应力的增加,裂纹绕着骨料并随强度较弱的界面扩展贯通,界面的强弱在很大程度上决定了混凝土的强度;在单轴压应力状态下,混凝土试样中裂纹较多且大多呈剪切裂纹,而在单轴拉应力状态下初始试样的起裂点较多,有多条裂纹同时发展,但随着应力水平的提高,试样中最终只产生 1 条与加载方向近乎垂直的主裂纹;无论是在单轴压缩还是单轴拉伸应力状态下,由于加载速度较慢,试样中裂纹扩展均不穿越骨料。

**关键词:**桥梁工程;混凝土;CT 试验;模型重建;损伤裂纹

中图分类号:U445.57

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.008

## Reconstruction of concrete numerical model based on damage zoning theory and CT number

FANG Jian-yin, LI Na, DANG Fa-ning, PAN You, REN Jie

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to establish a numerical model which truly reflect the internal mesoscopic structure of concrete specimen, and study the damage evolution characteristics of mass concrete, the uniaxial compression CT scanning test of concrete was carried out based on portable power load equipment combined with medical Marconi M8000 spiral CT. CT images of concrete samples under uniaxial compression were obtained. Based on the damage partition theory, a probability statistics method to determine the threshold was proposed, and the CT scan images of concrete were divided into aggregate area, hardened cement area and crack area. Based on the coordinates of each resolution unit in the CT scan, a structural random numerical concrete model was

收稿日期:2019-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51679199);陕西省教育厅自然科学专项项目(18JK0547);

西安理工大学科技创新计划项目(2016CX026);西安理工大学博士启动基金项目(107-451116012)

作者简介:方建银(1981-),男,宁夏灵武人,讲师,工学博士,E-mail:fjylxr@163.com。

established, and the damage evolution characteristics of concrete under uniaxial static compression and tension were studied. The results show that the mesoscopic structure of structural random numerical concrete model is very close to the mesoscopic structure of concrete samples, and the interface thickness between aggregate and mortar in this model is only about 0.04 mm, which is very close to the interface thickness of real concrete samples (10 to 50  $\mu\text{m}$ ). In the condition of uniaxial tension and compressive stress, concrete microscopic cracks start to initiate at the initial defect with relatively weak strength, with the increase of stress, cracks expand and connect around the interface with relatively weak strength of aggregate, and the strength of the interface largely determines the strength of concrete. In the condition of uniaxial compressive stress, there are more cracks in the concrete samples and most of them are shear cracks. In the condition of uniaxial tensile stress, there are more crack initiation points in the samples at the beginning, and several cracks developed simultaneously, and however, with the increase of the stress level, only one major crack nearly perpendicular to the loading direction is finally generated in the sample. Under uniaxial compression or uniaxial tensile stress, due to the slow loading speed, the crack growth in the sample does not pass through the aggregate. 2 tabs, 9 figs, 22 refs.

**Key words:** bridge engineering; concrete; CT test; model reconstruction; damage crack

## 0 引言

自 Roelfstra 等提出数值混凝土 (numerical concrete) 的概念以来, 基于有限元的细观数值模型被广泛地应用于岩石及混凝土的研究中<sup>[1-2]</sup>。细观层面上混凝土被看作是由骨料(粗骨料和细骨料)、硬化水泥石及界面所组成的多相非均质材料<sup>[3]</sup>。混凝土各组分的力学特性决定了其强度及裂纹演化形式<sup>[4-5]</sup>。因此, 基于混凝土各组分的力学特性, 研究其宏、细观力学特性之间的关系是当前混凝土力学特性研究的重要内容之一。

数值混凝土模型是研究混凝土细观力学特性的重要手段。Wittmann 等首先提出了利用随机分布多边形混凝土骨料模型来研究混凝土的细观力学特性, 在此基础上, 很多学者在数值混凝土模型方面开展了大量工作<sup>[6]</sup>。Wang 等在椭圆形和多边形骨料模型的基础上, 建立了包含孔隙的数值混凝土模型, 研究了不同骨料形状及孔隙率对混凝土抗拉强度的影响<sup>[7]</sup>。邓勇军等基于随机数建立三维混凝土细观几何模型, 定量研究细观因素对混凝土弹道偏转的影响<sup>[8]</sup>。王元战等在考虑骨料粒径大小和位置分布的基础上, 建立了三维球形随机骨料模型, 提出了基于三维球形随机骨料模型的氯离子扩散细观数值模拟方法, 探究了界面厚度、扩散系数以及粗骨料体积分数对混凝土中氯离子扩散性质的影响<sup>[9]</sup>。吴成等利用随机骨料模型研究了砂浆、骨料种类及粗骨料

体积分数等对靶板抗侵彻能力的影响, 并建立了细观混凝土侵彻深度模型<sup>[10]</sup>。宋来忠等使用自由曲线曲面变形技术, 建立了更加接近自然增强颗粒形状的混凝土骨料, 并去掉一些学者在研究中的“凸性”限定条件, 获得了与实际更接近的混凝土细观结构模型<sup>[11]</sup>。张煜航等在传统 Voronoi 图形的基础上, 通过控制多面体的随机度和引入缩放因子等参数, 建立了具有级配的随机骨料模型<sup>[12]</sup>。王梦蔚等利用 CT 扫描技术对混凝土的细观组成结构进行了观察<sup>[13]</sup>。覃茜等利用混凝土 CT 扫描图, 基于 MATLAB 软件, 对混凝土中的初始缺陷分布进行了区分<sup>[14]</sup>。段跃华等利用工业 CT 获取沥青混凝土试件内部结构断层图像, 采用傅里叶描述子表征颗粒轮廓, 采用球面调和变换对颗粒的三维表面轮廓进行表征<sup>[15]</sup>。田威等基于 CT 扫描技术重建了混凝土的三维孔隙结构, 并对冻融循环条件下混凝土试样内部孔隙率、孔隙分布进行了动态分析<sup>[16]</sup>。

通过分析发现, 当前对数值混凝土建模研究主要可以分为两大类: 一种是利用随机数建立随机骨料模型<sup>[1-3, 6-12]</sup>; 另一种是基于 CT 图像重建数值混凝土模型<sup>[12-16]</sup>。然而, 对于随机骨料模型的研究大多使用假定的尺度形态或随机场性质, 与真实混凝土骨料的多样性存在一定差距, 不能直接、准确地表示材料内部的结构; 且随机骨料模型所建立的界面厚度大多在毫米量级, 与真实混凝土界面厚度(10~50  $\mu\text{m}$ <sup>[17-18]</sup>)存在较大差距。界面作为骨料与硬化

水泥石的过渡带,其强弱对混凝土的力学特性和裂纹的扩展方式有着很大影响<sup>[19-20]</sup>。因此,模拟损伤和断裂过程就不能利用宏观尺度的荷载-位移曲线来对其进行准确地验证。而目前,利用 CT 图像重建混凝土数值模拟方面的研究大多是通过图像对比建立与混凝土试样对应的数值混凝土模型,这些模型与真实混凝土非常接近,为混凝土的细观力学特性研究提供了有效方法,但这些研究<sup>[14-16]</sup>只是对应地建立了混凝土中骨料、砂浆、孔隙等的随机分布,未能考虑界面过渡带的影响。

在前人研究的基础上,本文利用混凝土的 CT 图像,以图像中分辨点的坐标及 CT 数为对象,基于模糊集合理论,研究了分区阈值的确定方法,建立了既可以考虑混凝土骨料、砂浆及孔洞,又可以考虑界面等细观结构的二维中尺度结构随机型数值混凝土模型;并在对 ANSYS 软件进行二次开发的基础上,引入双折线损伤本构模型进行了相应的数值模拟试验,研究了单轴拉、压应力状态下混凝土的损伤裂纹演化规律。

## 1 破损演化理论

### 1.1 完整度与破损度

将 CT 扫描图的全体称为全域,用集合表示为  $\Omega = \{x, y, z\}$ ,  $x, y, z$  为研究区域上的任意分辨点坐标,则可定义完整度  $P(x, y, z)$  为

$$P(x, y, z) = [H(x, y, z) + 1\ 000] / [\max H(x, y, z) + 1\ 000]$$

式中:  $H(x, y, z)$  为空间点  $(x, y, z)$  的 CT 数,其定义为

$$H(x, y, z) = 1\ 000(\mu_t - \mu_w) / \mu_w$$

式中:  $\mu_t$  为矿物的 X 射线线性衰减系数;  $\mu_w$  为水的 X 射线线性衰减系数。

定义完整度的补集为破损度  $d(x, y, z)$ , 即

$$d(x, y, z) = 1 - P(x, y, z)$$

不论是完整度还是破损度,其值均在  $[0, 1]$  区间。

### 1.2 $\lambda$ 水平完整域与破损域

设  $0 \leq \lambda \leq 1$ , 定义集合  $\{(x, y, z) | (x, y, z) \in \Omega, \text{且 } \lambda \leq P(x, y, z) \leq 1\}$  为试样的  $\lambda$  水平完整域  $P_\lambda$ 。

定义集合  $\{(x, y, z) | (x, y, z) \in \Omega, \lambda \leq d(x, y, z) \leq 1\}$  为试样的  $\lambda$  水平破损域  $d_\lambda$ 。

### 1.3 $\lambda_1$ - $\lambda_2$ 截理

细观上混凝土可以分为骨料、砂浆、界面以及孔洞裂纹 4 个分区,为此,引入  $\lambda_1$ - $\lambda_2$  截理来对其进行

定义。 $\lambda_1, \lambda_2$  分别为混凝土各组分分区的阈值,取值范围  $[0, 1]$ 。

设  $0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq 1$ , 定义集合

$$\{(x, y, z) | \lambda_1 \leq d(x, y, z) \leq \lambda_2, (x, y, z) \in \Omega, 0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq 1\}$$

或集合

$$\{(x, y, z) | \lambda_1 \leq P(x, y, z) \leq \lambda_2, (x, y, z) \in \Omega, 0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq 1\}$$

二者均为试样截面的  $\lambda_1$ - $\lambda_2$  完整域或破损域截理,记为  $d_{\lambda_1-\lambda_2}$  或  $P_{\lambda_1-\lambda_2}$ 。图 1 为试样完整域截理。由图 1 可知,截理可以清晰区分混凝土中各组份(骨料、硬化水泥石、裂纹)。

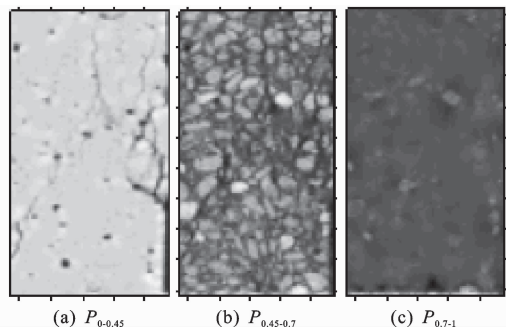


图 1 完整域截理

Fig. 1 Intercepted sections of perfect fields

## 2 破损分区理论在 CT 试验中的应用

### 2.1 单轴压缩 CT 试验

本文试验采用西安理工大学研制的便携带式动力加载设备和 Marconi M8000 螺旋 CT 扫描仪。

试验采用级配 C15 混凝土圆柱体试件,尺寸为  $\Phi 60\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ ,水灰比为 0.4,骨料粒径为 5~20 mm,标准条件下养护 28 d 后进行试验。

本文试验横向扫描了 24 层,纵向扫描了 70 层,整个试验过程中共扫描 11 次,由于试验过程所得 CT 图像较多,且前 4 次扫描图像变化不大,本文选择加载步 1、5、6、7、8、9、10、11,共 8 个断面开展研究,如图 2 所示。

### 2.2 基于模糊集合的分区

#### 2.2.1 定量化分区

基于细观层面研究,一般将混凝土看成是由骨料、砂浆以及界面组成的非均质体,为了使建模更准确,本文将初始缺陷也考虑进去,根据完整度和截理的概念将混凝土划分为 4 个部分:将完整域截理  $P_{0-\lambda_1}$  称为孔洞裂纹区;  $P_{\lambda_1-\lambda_2}$  为硬化水泥石区;  $P_{\lambda_2-1}$  为骨料区;将不同组分之间的过渡区称为界面。

界面只是 2 种材料之间很薄的一层过度区域,

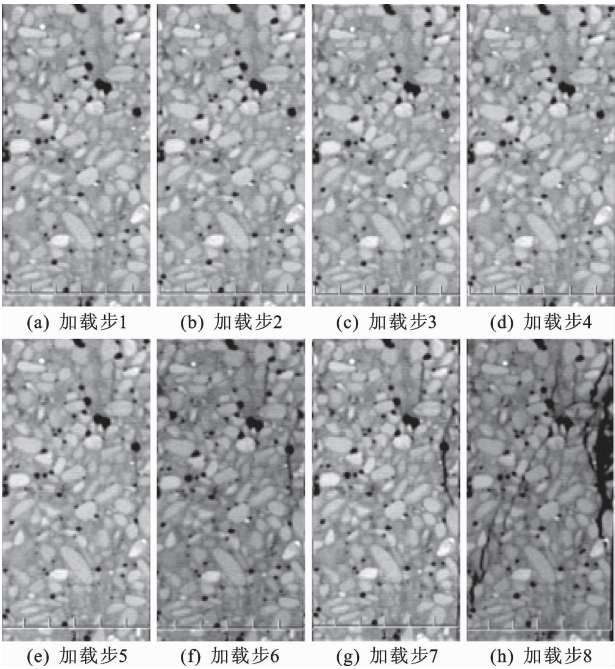


图 2 试样加载阶段扫描图

Fig. 2 Scanning diagrams of sample at loading stage

在本文建模中仅占一个分辨单元的厚度(约 0.04 mm),因此不用单独分区。

由于本文分区是以 CT 数为依据,因此在分区划分中将砂浆中的细骨料也划入骨料区,砂浆中仅剩水泥水硬化物,为了便于表达,将其称为硬化水泥石。

2.2.2 分区阈值确定

CT 扫描图像是一个 CT 数不连续分布的灰度图像,对其进行分区研究的重点是如何找出代表分区界限的特征 CT 数,即分区阈值。

根据细观上混凝土的组成可以发现,在混凝土 CT 扫描图上,代表骨料、硬化水泥石和孔洞的区域,其各自的 CT 数概率分布必然是连续的。然而,不同区域之间 CT 数概率分布必然会存在一定的阶跃式变化。基于此,本文以 1 次 CT 扫描试验的 1 幅 CT 图作为研究对象,其所有分辨单元构成 1 个集合  $\Omega$ ,  $\Omega$  中 CT 数分布的概率统计关系如图 3 所示。

由图 3 可知,完整度为 0.7 和 0.84 时,其对应的 CT 统计单元出现了阶跃式变化,所以初步可以认为分区阈值  $\lambda_1$  为 0.7,  $\lambda_2$  为 0.84。

在建模过程中发现,初步定义的分区阈值尚不够精确,不能满足准确分区的要求,为此需要进行细化。分别以初步选定的分区阈值为中心,选取 2 个较小区域进行研究。表 1 是分别以 0.7 和 0.84 为中心选取 2 个小统计区 CT 分辨单元的统计情况。

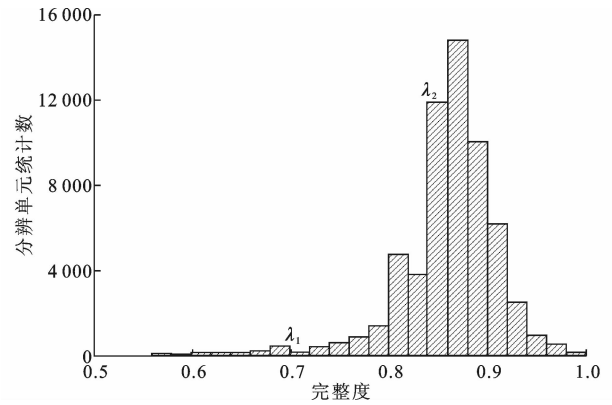


图 3 CT 数概率分布统计

Fig. 3 Probability distributions statistics of CT number

由表 1 可知,CT 统计单元真正出现阶跃式变化时的完整度分别为 0.698 和 0.843,即分区阈值  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  应取 0.698 和 0.843。

由于本文采用概率统计的思想来确定分区阈值,所以将其称为确定阈值的概率统计法。

表 1 不同阈值下分辨单元的累积概率

Tab. 1 Cumulative probabilities of resolution cell in different thresholds

阈值	累积概率	阈值	累积概率	阈值	累积概率
0.668	1.375	0.718	2.593	0.833	22.237
0.673	1.566	0.723	2.926	0.838	22.237
0.678	1.566	0.728	2.926	0.843	30.538
0.683	1.767	0.733	3.326	0.848	30.538
0.688	1.999	0.738	3.326	0.853	41.837
0.693	1.999	0.808	9.819	0.858	41.837
0.698	2.306	0.813	12.267	0.863	54.751
0.703	2.306	0.818	15.937	0.868	54.751
0.708	2.593	0.823	15.937	0.873	66.271
0.713	2.593	0.828	15.937	0.878	66.271

3 基于破损理论的数值模拟

3.1 结构随机型数值混凝土模型

为了使数值计算模型能够与物理试验相对应,本文以第 1 节单轴压缩 CT 扫描试验所得 CT 图像为基础重建数值模型,如图 4 所示。

首先需要对 CT 扫描图像进行处理,包括图像的定位、图像 CT 数的提取两方面内容。本文利用 ENVI 软件读取 DICOM 格式的 CT 扫描数据文件,然后根据图像进行详细定位,定位精度为 1 个 CT 像素点(约 0.004 mm)。据此确定模型重建范围,本次模型重建范围共 122 980 个像素点。再利用 ENVI 软件将 DICOM 格式的 CT 扫描数据文件另存为 txt 文件,完成 CT 数的提取。利用完整度  $P(x,y,z)$  的概念,将提取的 CT 数进行量纲一化处



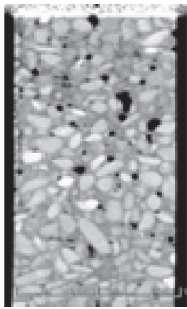


图 4 混凝土 CT 扫描  
Fig. 4 CT scan of concrete

理,然后利用截理的概念将 CT 扫描图像划分为骨料区、硬化水泥石区和孔洞裂纹区,即  $P_{0-\lambda_1}$ 、 $P_{\lambda_1-\lambda_2}$ 、 $P_{\lambda_2-1}$ 。

该种划分方法将砂中密度较大且粒径稍大一些的碎石子也划分为骨料,即细骨料,其数值重建模型更能反映材料实际情况,模拟效果更理想。

根据以上定义在对 ANSYS 软件进行二次开发的基础上,重建结构随机型数值混凝土模型,如图 5 所示。本文建模过程中数据的处理均是利用 Fortran 程序来实现。

3.2 数值试验

3.2.1 数值试验条件

数值试验的材料参数如表 2 所示,利用杀死单元的方法来实现材料的裂纹及孔洞模拟。

表 2 混凝土各组分材料参数<sup>[21]</sup>

Tab. 2 Material parameters of concrete components

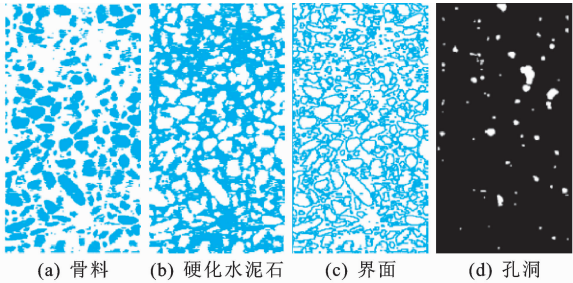
材料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
骨料	58.731	0.240 7	9.25	2 800
砂浆	17.458	0.196 0	2.78	2 200
界面	13.967	0.200 0	1.56	2 000

数值试验采用双折线损伤本构模型,其损伤变量  $D$  为

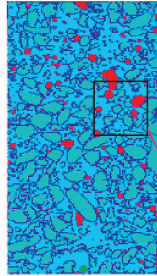
$$D=\begin{cases} 0 & \epsilon_{\max}<\epsilon_0 \\ 1-\frac{\eta-\kappa}{\eta-1}\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{\max}}+\frac{1-\kappa}{\eta-1} & \epsilon_0\leq\epsilon_{\max}\leq\epsilon_r \\ 1-\kappa\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{\max}} & \epsilon<\epsilon_{\max}\leq\epsilon_u \\ 1 & \epsilon_u<\epsilon_{\max} \end{cases}$$

式中: $\kappa$  为强度残余系数; $\epsilon_0$  为抗拉强度对应的主拉应变; $\epsilon_r$  为抗拉残余应变, $\epsilon_r=\eta\epsilon_0$ , $\eta$  为残余应变系数; $\epsilon_u$  为极限拉应变, $\epsilon_u=\zeta\epsilon_0$ , $\zeta$  为极限应变系数, $\zeta>\eta$ ; $\epsilon_{\max}$  为加载历史上主拉应变的最大值, $\lambda$  取 0.1, $\eta$  取 5, $\zeta$  取 10<sup>[22]</sup>。

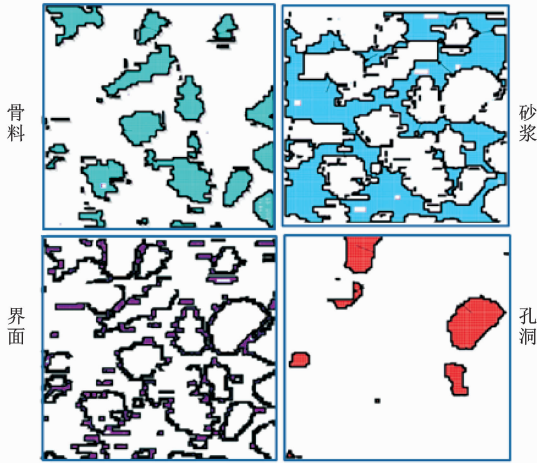
数值试验约束条件与 CT 扫描试验一致,采用刚性的位移加载方法进行加载。



(a) 骨料 (b) 硬化水泥石 (c) 界面 (d) 孔洞



局部放大



骨料

砂浆

界面

孔洞

(e) 结构随机型数值混凝土模型

图 5 结构随机型数值混凝土模型

Fig. 5 Numerical concrete model of stochastic structure

3.2.2 静力单轴压缩数值试验

根据数值试验条件,利用所建结构随机型数值混凝土模型进行单轴压缩应力状态下的数值模拟试验,其轴向位移云图见图 6,裂纹扩展见图 7。加载次数  $N$  取 1~7。

由图 6 可知,在压应力状态下,刚开始试样的轴向位移分布较均匀,随着加载次数的增加,试样两端位移变化较大而中间变化较小,此时位移分布很不均匀,初始缺陷处位移变化较大,且处于持续增大状态。这是由于试样中初始缺陷处容易产生应力集中,进而产生裂纹。

由图 7 可知,在单轴压应力状态下,试样中刚开始多个地方产生裂纹,且裂纹总是从初始缺陷位置开始萌生、扩展进而贯通,最后形成宏观裂纹,且裂纹大都是绕着骨料在强度相对较弱的界面处产生,主裂纹整体上呈剪切裂纹状态,与荷载方向大致成 45°。

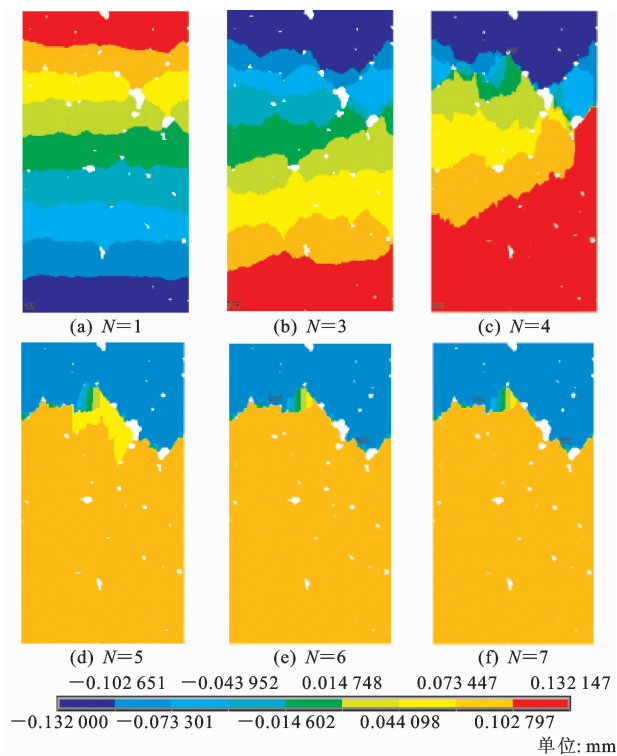


图 6 单轴压缩试验轴向位移云图

Fig. 6 Axial displacement nephograms under uniaxial compression test

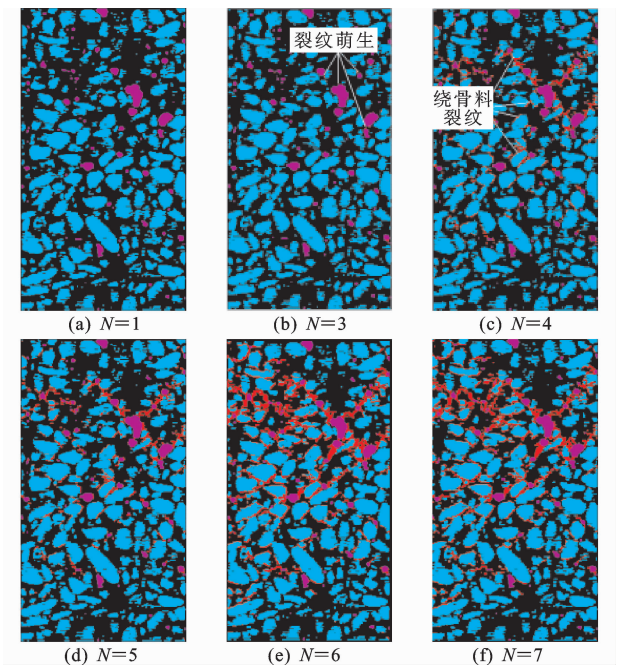


图 7 单轴压缩荷载作用下裂纹扩展

Fig. 7 Crack propagations under uniaxial compression loading

综合分析裂纹状态可知,在压缩应力状态下,初始缺陷及骨料尖端处容易产生应力集中现象,所以这些地方更容易产生裂纹;另外,因为静力压缩持续时间较长,裂纹有足够的时间在强度相对较弱的初始缺陷及界面中扩展,所以裂纹几乎不穿越骨料。

3.2.3 静力单轴拉伸数值试验

根据结构随机型数值混凝土模型,结合第3.2.1节的材料参数及损伤变量,开展了单轴拉伸数值模拟试验研究,其位移云图见图 8,裂纹分布见图 9。

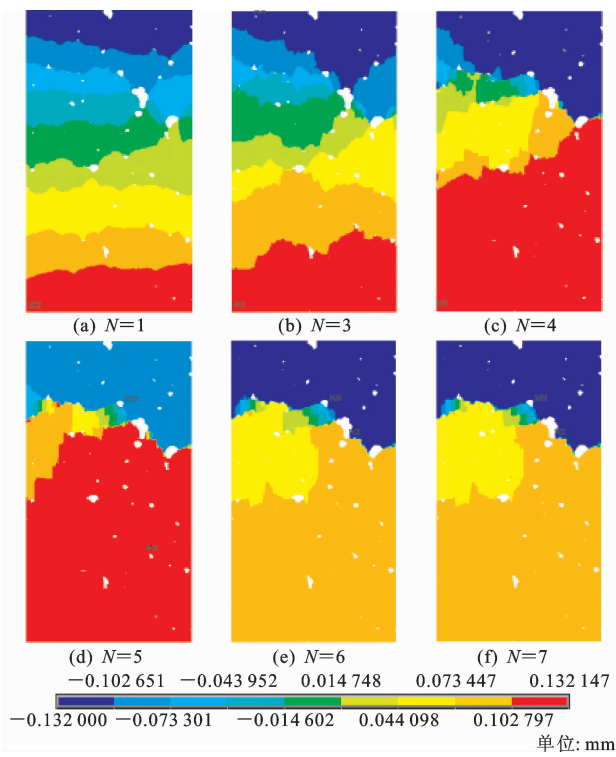


图 8 单轴拉伸试验轴向位移云图

Fig. 8 Axial displacement nephograms under uniaxial tensile test

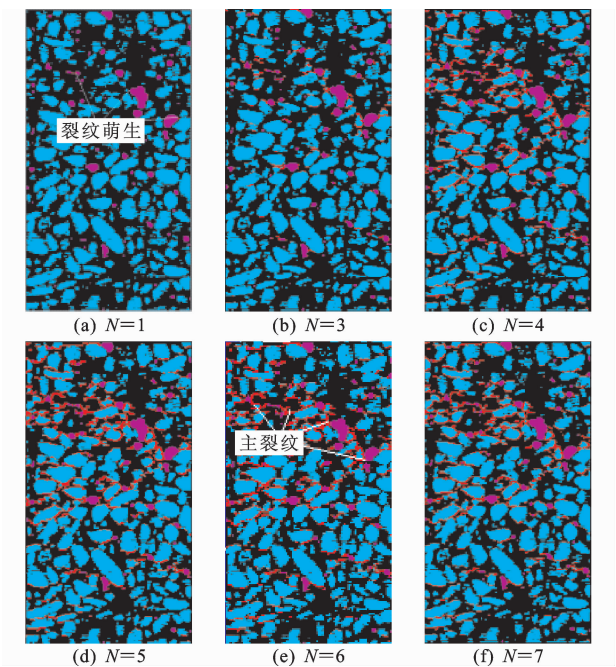


图 9 单轴拉伸荷载作用下裂纹扩展

Fig. 9 Crack propagations under uniaxial compression loading

由图 8 可知:在单轴拉伸应力状态下,试样中的

轴向位移最初变化较为均匀,呈现两端大中间小的特点,但随着加载次数的增加,试样中的纵向位移发展表现出较强的不均匀性;随着加载次数的继续增大,纵向位移出现了整体变化较均匀、局部变化较大的现象,这种现象与单轴压缩荷载作用下的情况稍有不同。在单轴拉伸应力状态下,刚开始加载位移变化较小,其内部应力集中现象不明显,随着应力水平的增大,试样中应力集中现象越来越明显,初始缺陷处产生了初始裂纹,且裂纹随加载增大逐步扩展贯通,致使试样中的应变能释放比较充分,因此,在试验后期,试样中的其他部分位移分布比较均匀。

根据图 9 可知,在单轴拉伸应力状态下,第 3 次加载之前,由于各单元的应力尚未超出其材料的极限应力,因此并没有裂纹产生,但在第 3 次加载时,初始缺陷处便开始出现损伤裂纹,且多点同时产生裂纹。随着荷载增加,裂纹逐渐增多,但最终主裂纹只有 1 条,且裂纹是绕着骨料随材料强度较弱的界面发展。这是由于静力加载速率较慢,裂纹具有充足的时间在材料强度相对较弱处扩展贯通,加载过程中随着主裂纹的产生,材料应变能得到释放,从而抑制了其他裂纹的产生,导致裂纹扩展几乎不贯穿骨料。

## 4 结 语

(1)基于 CT 图像建立数值混凝土模型,其材料各组分的分区阈值对建模的准确性影响较大,本文确定阈值的概率统计法符合混凝土细观组成结构的分布特性,能够快速准确地对混凝土 CT 扫描图像进行定量分区,保证了数值模型与物理模型细观组成的一致性。

(2)数值模拟试验的适用性很大程度上取决于模型的准确性,基于 CT 分辨点坐标及 CT 数重建的结构随机型数值混凝土模型,可真实反映混凝土试样细观组分(骨料、砂浆、孔隙及界面)的随机性。利用 CT 分辨单元的坐标来判断混凝土细观组分的方法,使建模误差在 1 个分辨点以内,所建数值模型与物理试样非常接近。该模型考虑了骨料与砂浆之间的过渡界面建模,所建界面厚度仅为 1 个 CT 分辨单元大小,较接近真实的界面厚度。

(3)利用结构随机型数值混凝土模型对单轴拉、压应力状态下混凝土的细观损伤演化规律的研究,反映了混凝土试样在较高应力状态下,其损伤裂纹经历了萌生-缓慢扩展-缓慢贯通-突然快速贯通的过程,损伤裂纹是从初始缺陷处开始产生,且裂纹扩展贯通绕着骨料随材料强度较弱的界面进行。静力压

缩荷载作用下试样裂纹主要为剪切裂纹,且裂纹大致与大主应力方向成  $45^\circ$ 。静力拉伸荷载作用下,试样最终只形成 1 条与大主应力方向几乎垂直的拉裂纹,但不论是在静力拉伸还是压缩荷载作用下,试样的损伤裂纹几乎均不穿越骨料,这与物理试样 CT 试验结果是一致的。

(4)本文成果可为大体积混凝土静动力学特性分析提供一定的研究方法和理论依据,但本文仅从二维角度开展了混凝土的细观组成结构研究,下一步应扩展到三维角度,并结合 CT 数,研究材料非均质性对大体积混凝土的静动力学特性的影响。

## 参考文献:

### References:

- [1] REN W, YANG Z, SHARMA R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 133: 24-39.
- [2] 李朝红,王海龙,徐光兴. 混凝土梁受弯破坏的三维细观数值试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 50-55.  
LI Chao-hong, WAGN Hai-long, XU Guang-xing. Mesoscopic 3-D numerical test of bending fracture of concrete beam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 50-55.
- [3] WANG H N, HUANG Z, LI L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT microstructure images[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [4] 张楚汉,唐欣薇,周元德,等. 混凝土细观力学研究进展综述[J]. 水力发电学报, 2015, 34(12): 1-18.  
ZHANG Chu-han, TANG Xin-wei, ZHOU Yuan-de, et al. State-of-the-art literature review on concrete meso-scale mechanics[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(12): 1-18.
- [5] 杜修力,金 浏. 细观分析方法在混凝土物理/力学性质研究方面的应用[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 355-371.  
DU Xiu-li, JIN Liu. Applications of meso-scale analysis methods on the study of the physical/mechanical properties of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 355-371.
- [6] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Materials Science and Engineering, 1985, 68(2): 239-248.
- [7] WANG X F, YANG Z J, YATES J R, et al. Monte

- Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 35-45.
- [8] 邓勇军, 陈小伟, 姚勇, 等. 基于细观混凝土模型的刚性弹体正侵彻弹道偏转分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 377-386.
- DENG Yong-jun, CHEN Xiao-wei, YAO Yong, et al. On ballistic trajectory of rigid projectile normal penetration based on a meso-scope concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 377-386.
- [9] 王元战, 何明伟, 李青美, 等. 基于混凝土三维球形随机骨料模型的氯离子扩散细观数值模拟[J]. 水道港, 2017, 38(1): 59-65.
- WANG Yuan-zhan, HE Ming-wei, LI Qing-mei, et al. Micro-scale numerical simulation for chloride diffusion based on concrete three-dimensional spherical random aggregate model[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(1): 59-65.
- [10] 吴成, 沈晓军, 王晓鸣, 等. 细观混凝土靶抗侵彻数值模拟及侵彻深度模型[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1364-1371.
- WU Cheng, SHEN Xiao-jun, WANG Xiao-ming, et al. Numerical simulation on anti-penetration and penetration depth model of mesoscale concrete target[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1364-1371.
- [11] 宋来忠, 廖大乾. 混凝土细观结构的数值模拟研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2018, 40(6): 56-60.
- SONG Lai-zhong, LIAO Da-qian. Research on numerical simulation of meso-structure of concrete[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2018, 40(6): 56-60.
- [12] 张煜航, 陈青青, 张杰, 等. 混凝土三维细观模型的建模方法与力学特性分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 1-8.
- ZHANG Yu-hang, CHEN Qing-qing, ZHANG Jie, et al. 3D mesoscale modeling method and dynamic mechanical properties investigation of concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 1-8.
- [13] 王梦蔚, 卢广达, 黄丹. 基于CT扫描试验及数字图像处理的混凝土宏细观建模研究[J]. 混凝土, 2014(11): 27-30.
- WANG Meng-wei, LU Guang-da, HUANG Dan. CT-scan-based digital image processing technology and macro/mesosopic modeling for concrete[J]. Concrete, 2014(11): 27-30.
- [14] 覃茜, 徐千军. 基于CT图像的混凝土初始缺陷分布规律研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 959-966.
- QIN Xi, XU Qian-jun. Statistics of the initial defects within concrete based on CT image[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 959-966.
- [15] 段跃华, 张肖宁, 李智, 等. 基于工业CT的混凝土集料二维及三维轮廓表征方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 9-15.
- DUAN Yue-hua, ZHANG Xiao-ning, LI Zhi, et al. Methods about digital representation on surface profile of concrete aggregates from 2-D to 3-D based on X ray computed tomography[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 9-15.
- [16] 田威, 张鹏坤, 谢永利, 等. 冻融环境下基于CT技术混凝土孔隙结构的三维分布特征[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(3): 49-55.
- TIAN Wei, ZHANG Peng-kun, XIE Yong-li, et al. 3D distribution characteristics on concrete porous structure under freeze-thaw environment based on CT technique[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(3): 49-55.
- [17] 唐欣薇, 张楚汉. 混凝土细观力学模型研究: 非均质影响[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 56-62.
- TANG Xin-wei, ZHANG Chu-han. Meso-scale modeling of concrete: Effects of heterogeneity[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 56-62.
- [18] 崔宏志, 邢锋. 用SEM和FT-IR研究轻骨料混凝土界面过渡区[J]. 混凝土, 2010(1): 18-20.
- CUI Hong-zhi, XING Feng. Study of interfacial transition zone of lightweight aggregate concrete by using SEM and FT-IR[J]. Concrete, 2010(1): 18-20.
- [19] CWIRZEN A, PENTTALA V. Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(4): 671-679.
- [20] ZHENG J J, LI C Q, ZHOU X Z. Thickness of interfacial transition zone and cement content profiles around aggregates[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(7): 397-406.
- [21] 方建银, 党发宁, 王平, 等. 混凝土特性数值方法研究及CT试验[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1293-1299.
- FANG Jian-yin, DANG Fa-ning, WANG Ping, et al. Research on numerical method for features of concrete and its CT testing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1293-1299.
- [22] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004, 35(10): 27-35.
- MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Meso structure numerical simulation of concrete specimens[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 27-35.