

基于 XCT 扫描图像的混凝土二维细观受压断裂模拟

李俊生, 任文渊, 张爱军, 李伟, 魏汉林

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了研究混凝土细观层次断裂力学特性,对混凝土试件进行原位 XCT 扫描,基于扫描图像提出了具有真实内部结构特征的混凝土二维细观模型,并预先在水泥砂浆和骨料-水泥砂浆界面插入零厚度粘结裂缝单元用以模拟潜在的裂缝。通过对该模型进行混凝土单轴受压数值仿真模拟,讨论其裂缝的发展过程以及不同细观结构和相应参数对混凝土断裂损伤行为的影响。结果表明:数值模拟得到的混凝土二维模型抗压强度与试验测得的强度相接近;混凝土的抗压强度受到水泥砂浆和骨料-砂浆界面裂缝单元的绝对数值影响,其中水泥砂浆裂缝单元强度对材料强度起控制作用;骨料-砂浆界面裂缝单元强度与水泥砂浆裂缝单元强度的比率对裂缝衍生发展有显著影响。

关键词: 混凝土; XCT 扫描图像; 细观模型; 单轴压缩; 数值模拟; 零厚度粘结裂缝单元

中图分类号: TV43; TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2021)06-0170-08

Two-dimensional meso-compression fracture simulation of concrete based on XCT images

LI Junsheng, REN Wenyuan, ZHANG Aijun, LI Wei, WEI Hanlin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the meso-scale mechanical properties of concrete, a two-dimensional finite element model were developed for concrete fracture modelling based on the images from in situ X-ray computed tomography (XCT) tests. Zero-thickness cohesive interface elements (CIEs) were embedded within cement mortar and aggregate - cement mortar interfaces in advance to simulate potential cracks. Meanwhile, numerical simulations of concrete under uniaxial compression were carried out to analyze the crack propagation and the influence of different meso-structures and corresponding parameters on the fracture damage behavior. The simulation results show that the simulated compressive strength of the two-dimensional model of concrete is close to the measured values by laboratory experiments. The compressive strength of concrete is mainly affected by the absolute value of mortar CIEs, in which the CIE strength of cement mortar plays a controlling role on the material strength, and the relative ratio between cement mortar CIE strength and aggregate - cement mortar CIE strength has a significant effect on the development of crack propagation.

Key words: concrete; X-ray computed tomography (XCT); meso-scale model; uniaxial compression; numerical simulation; zero-thickness cohesive elements (CIEs)

1 研究背景

混凝土自问世以来被广泛应用于工程建设中,其破坏问题一直是工程上关注的重点,混凝土的破坏主要是由于内部结构准脆性断裂而导致的。为了

描述和分析混凝土断裂行为,学者们将对混凝土的研究分为了宏观、细观和微观 3 个研究尺度^[1]。

长期以来,人们对混凝土断裂的研究多偏重于从宏观角度进行,在宏观层次中,将混凝土看作是一种各向同性的均匀性物质^[2-3],忽略了混凝土材料内部

收稿日期:2021-06-17; 修回日期:2021-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51978572);陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2017JQ5052)

作者简介:李俊生(1998-),男,四川广元人,硕士研究生,研究方向为混凝土细观断裂模拟。

通讯作者:任文渊(1986-),男,新疆博乐人,博士,讲师,研究方向为混凝土细观断裂模型与有限元数值仿真。

复杂的细观结构。而大量文献表明,混凝土宏观断裂行为是细观尺度上损伤断裂累积与发展的结果^[4-7],所以对混凝土细观层次断裂的研究十分重要。

在细观层次上,混凝土是由粗骨料、水泥砂浆以及两者之间的界面过渡区组成的三相复合材料^[8],而其多相复合材料组成特征又直接决定了其内部力学性能分布的不确定性。随着现代技术的快速发展,学者们尝试在细观尺度上通过数值模拟来分析混凝土的宏观断裂,在以往细观层次的仿真模拟中,对于混凝土内部结构,大多是采用基于随机抽样原理和统计学原理构造的随机细观结构,例如田瑞俊等^[9-10]、刘智光等^[11]、唐欣薇等^[12]利用蒙特卡罗法推算随机数,再将骨料进行随机投放来构建混凝土细观力学模型,但这与真实的混凝土内部结构存在较大的差异。

随着科技的发展,X 射线计算断层扫描技术(X-ray computed tomography, XCT)已广泛应用于材料科学研究领域,利用该技术能动态、无损地量测材料内部结构特征。杨更社等^[13]以岩石材料的 CT 图像为研究对象,分析了岩石损伤特性;李新涛等^[14]将 CT 技术用于碳/碳复合材料的研究;郎颖娴等^[15]基于 CT 图像建立了岩土材料细观模型;于皓^[16]建立了陶瓷基复合材料的 2.5 维模型。目前,CT 技术也逐渐开始应用于混凝土研究中,田威等^[17]、党发宁等^[18]等采用 CT 技术对混凝土细观破坏过程进行了分析,并基于扫描图像获得了更具代表性的几何模型。雷光宇等^[19]基于 CT 图像利用自编程序重建了混凝土模型。然而以上研究大多仅进行了弹性应力分析,对混凝土中复杂裂缝衍生以及内部参数影响涉及较少,基于 XCT 扫描图像的混凝土断裂模拟方法仍然需要进行进一步研究。

本文基于原位 XCT 扫描图像^[20],提出了具有真实内部结构特征的混凝土细观二维有限元模型,主要通过预先在水泥砂浆和界面过渡区中嵌入零厚度粘结裂缝单元来模拟潜在的复杂裂缝衍生过程。通过对混凝土在单轴受压作用下的受力过程模拟分析,揭示了混凝土内部复杂裂缝的衍生发展过程,探讨了混凝土细观断裂损伤与宏观裂缝的关系,讨论了不同细观结构以及不同参数对混凝土在受压状态下断裂损伤行为的影响,可为混凝土细观断裂模拟及其损伤行为的研究提供参考。

2 基于图像的数值模型构建与验证

2.1 混凝土试件的 XCT 图像获取

本试验中,考虑扫描仪性能及模型简化原则,选

取边长为 40 mm 的立方体混凝土试件进行试验。其配合比为水泥:水:石子 = 1:0.6:4,无细骨料,粗骨料平均粒径为 5 mm,在标准养护条件下养护 28 d。采用 225/320 kV 尼康定制扫描仪完成 XCT 扫描试验^[5],基于扫描图像得到初始的扫描模型。对扫描模型进行简化处理后,将模型裁剪成边长为 37.2 mm 的立方体以降低模型的尺寸,每个方向设置 372 幅断面图像,通过图像处理软件对获得的图像进行降噪、阈值分割等操作,最终得到能反映混凝土试件内部真实结构特征的图像模型,如图 1 所示,图 1 中编号 1[#]、40[#]、100[#]、240[#]为将要进行模拟的 4 个典型断面。图 2 为 100[#]断面的灰度图像,其中黑色、灰色和白色分别代表骨料、水泥砂浆和孔洞。

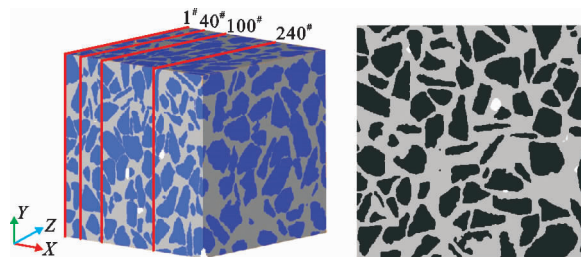


图 1 混凝土图像模型 图 2 100[#]断面的灰度图像

2.2 初始有限元网格模型生成

以图 1 中 100[#]断面为例,进行二维有限元网格模型建立,将 100[#]断面的一部分进一步放大,可以看到图像是由一个个像素点组成(图 3(a))。根据每个像素点的灰度值赋予材料属性,将每个像素点视为一个正方形有限元网格(图 3(b)),结果将使不同材料交界处呈锯齿状,不利于有限元模拟,也不符合实际骨料界面情况。因此需要进行界面圆滑处理,即将交界处的四边形单元划分为两个三角形单元,得到圆滑后的网格(图 3(c))。

2.3 粘结裂缝单元与细观断裂模型

本文采用零厚度四节点粘结裂缝单元(cohesive interface elements, CIEs)模拟混凝土中的潜在裂缝,使用自行研发的 FORTRAN 程序,向生成的初始网格中插入粘结裂缝单元,进而形成最终的细观断裂模型。本文中共有两种粘结裂缝单元,即水泥砂浆裂缝单元(CIE_CEM)和骨料-水泥砂浆界面裂缝单元(CIE_INT)。由于骨料的强度远大于相对界面和水泥砂浆的强度,因而本文假设骨料不会开裂,在骨料中不插入裂缝单元。将裂缝单元预先插入初始网格,不仅可以省去一些复杂计算(如计算应力强度因子^[8]),还能够对复杂多裂缝的衍生发展进行灵活地模拟。基于扫描图像所构建的 100[#]断面有

限元细观断裂模型如图4所示,图4中红线为骨料-水泥砂浆界面单元,其包围面积为骨料,白色区域为孔洞,其余为水泥砂浆。模型结点数和单元数分别为559 166和420 038,其中包括284 296个裂缝单元。

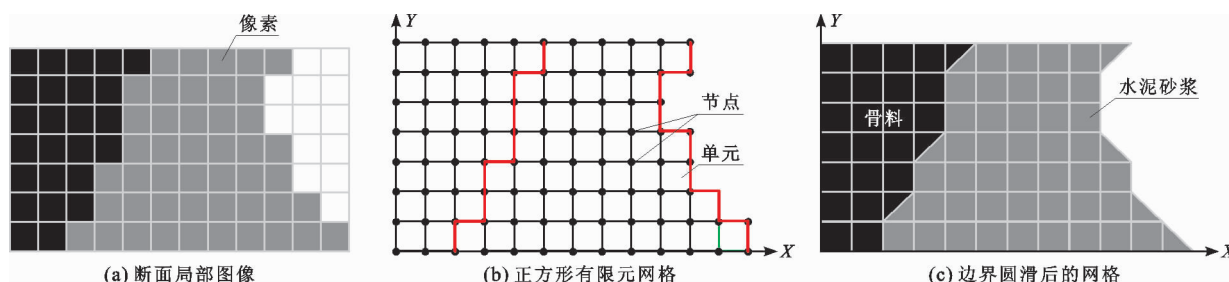


图3 混凝土试件断面局部图像及其有限元网格转换

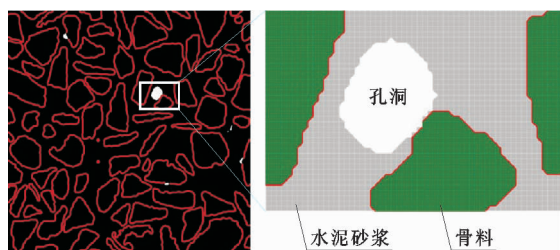


图4 基于扫描图像的100^x断面有限元细观断裂模型

2.4 典型断面数值模拟结果验证

按照上述方法,基于图1中的1[#]断面构建细观断裂模型(以下简称为模型1),图5将本文模型1所得应力-应变曲线与文献[21]中的试验结果以及文献[22]中的模拟结果进行了对比。

本文的应力值为图5节点受力示意图中左侧约束边界节点总反力除以截面面积,应变值为模型最右侧节点的平均应变。查阅文献[21]得到混凝土受压时峰值应变(峰值荷载对应的应变)一般在 $(1.5 \sim 2) \times 10^{-3}$ 之间,由图5可见,本文模拟结果中

本文所采用的混凝土材料及裂缝单元参数如表1所示。对骨料和水泥砂浆赋予线弹性材料属性;裂缝单元遵循二次名义应力起裂准则和线性破坏演化准则。模拟中固定左侧边界,同时对右侧边界施加位移控制的均布荷载。

峰值应变处于此区间,另外峰值应变、材料强度以及曲线软化阶段与文献[21]中的试验结果相近。通过对比验证了本文提出的混凝土细观二维断裂模型的有效性。

模拟所得到的材料强度与文献[21]、[22]的材料强度有所差别,可能是由尺寸效应、模型中各相材料比例不同以及材料属性不同所导致的^[23](本文模型尺寸为 $37.2 \text{ mm} \times 37.2 \text{ mm}$,文献[21]的试块尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,文献[22]的模型尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$)。

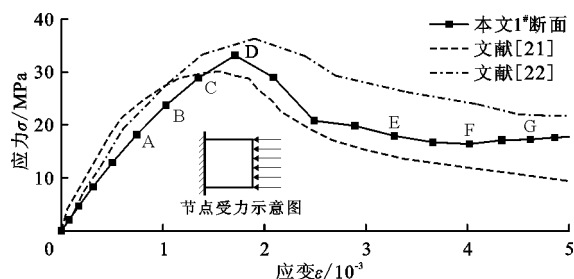


图5 数值模拟单轴压缩应力-应变曲线与相关文献结果对比

表1 模型混凝土材料及裂缝单元各参数取值

材料及单元	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ $10^{-6}(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	初始刚度/ $(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	抗拉强度/ MPa	断裂能/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
骨料	70	0.2	2.5			
水泥砂浆	25	0.2	2.2			
水泥砂浆裂缝单元			2.2	106	6	0.06
界面裂缝单元			2.2	106	3	0.03

3 讨论

通过本文的数值模拟可以发现,混凝土力学性

能受到细观内部结构和材料断裂参数的影响,主要体现在应力-应变曲线和裂缝扩展情况上,以下就此进行讨论。

3.1 细、宏观裂纹分析

3.1.1 细观裂纹分析 为了方便研究,本文将在放大倍数为 1 ($DSF = 1$) 时能观察到的裂缝统称为宏观裂缝,否则为细观裂纹。利用 ABAQUS 中 $SDEG$ (表征单元破坏程度, $SDEG = 1$ 即完全破坏) 大于 0.9 的单元来显示峰值荷载前的细观裂纹发展过程,如图 6 所示,图 6(a)~6(d) 依次对应图 5 中本文应力-应变曲线上的 A、B、C 和 D 点。为了使裂纹清晰可见,采用 $DSF = 50$ 来显示细观裂纹扩展。由图 6 可见,在加载前段骨料-水泥砂浆界面上出现少量裂纹(图 6(a));随着应变的持续增加,裂纹的数量也在增加,且基本平行于加载方向,沿着骨料-水泥砂浆界面产生(图 6(b));在峰值荷载前的 C 点,裂纹数量虽然少于峰值荷载点 D 的裂纹数量,但是差别已不明显(图 6(c)),这说明裂纹在加载早期发展很快,在接近峰值应力时裂纹形态已逐渐趋于稳定;在达到峰值应力时,有细小的砂浆裂纹开始与界面裂纹连接从而形成不明显的宏观裂缝(图 6(d))。骨料-水泥砂浆界面处的裂纹数量明显多于水泥砂浆中的裂纹数量,这也体现出了粘结裂缝单元预插法的一大优势,即能够模拟复杂多裂缝的同时开展。

3.1.2 宏观裂缝分析 荷载达到峰值后,宏观裂缝的发展过程如图 7 所示,图 7(a)~7(d) 依次对应图 5 中本文应力-应变曲线上的 D、E、F 和 G 点,采用

$DSF = 0.1$ 显示宏观裂缝的发展。由图 7 可见,在峰值荷载 D 点时,仍然没有明显的宏观裂缝出现,而随着应变的持续增加,骨料-水泥砂浆间界面开始出现裂缝,并且数量越来越多,并与水泥砂浆中已产生的裂缝连通,从而桥接形成宏观裂缝,最终导致材料破坏。

3.1.3 局部裂缝分析 图 8 显示了图 7 中白色框选局部区域在整个加载过程中的裂缝发展情况 ($DSF = 20$),由图 8 可以清楚地看到,裂缝始于骨料-水泥砂浆界面,当相邻的两个骨料产生裂缝时,裂缝开始与水泥砂浆中的裂缝发生桥接,从而形成贯通的裂缝,最终使材料破坏。这也再次证明了粘结裂缝单元预插法在模拟复杂裂缝开展以及断裂力学模拟上的优势。

3.2 不同细观结构效应

为了探究细观结构非均质性对材料性能影响,基于 372 幅断面图像生成有限元模型,在相同条件下进行单轴压缩数值模拟,并选取图 1 中的其余 3 个典型断面(40[#]、100[#]、240[#])与 1[#] 断面结果进行比较,为分析不同细观结构影响,统计了 4 个断面骨料及孔洞占比(表 2),图 9 为混凝土试件受压模拟时 4 个断面相应的应力-应变曲线,图 10 为 40[#]、100[#]、240[#] 断面相应的宏观裂缝形态 ($\varepsilon = 4.622 \times 10^{-3}$, $DSF = 0.1$)。

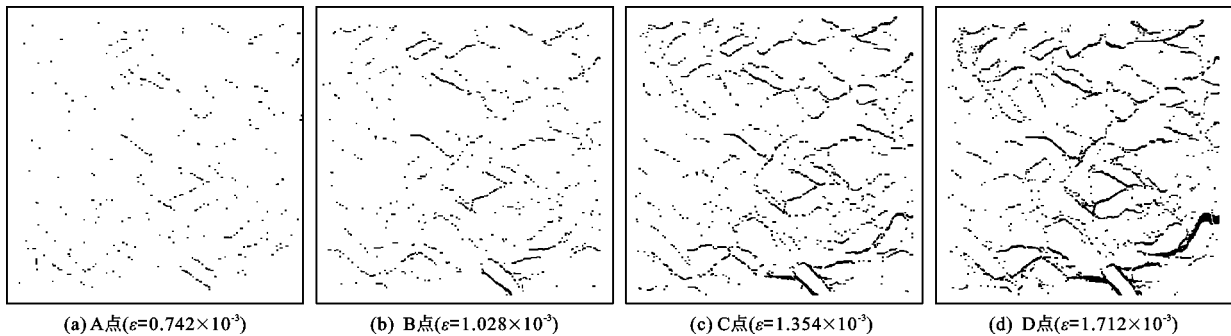


图 6 数值模拟混凝土细观裂纹发展过程

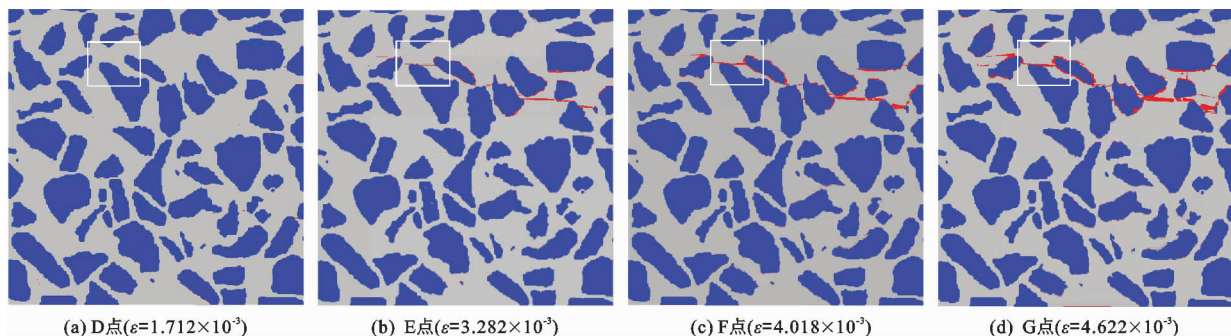


图 7 数值模拟混凝土宏观裂缝发展过程

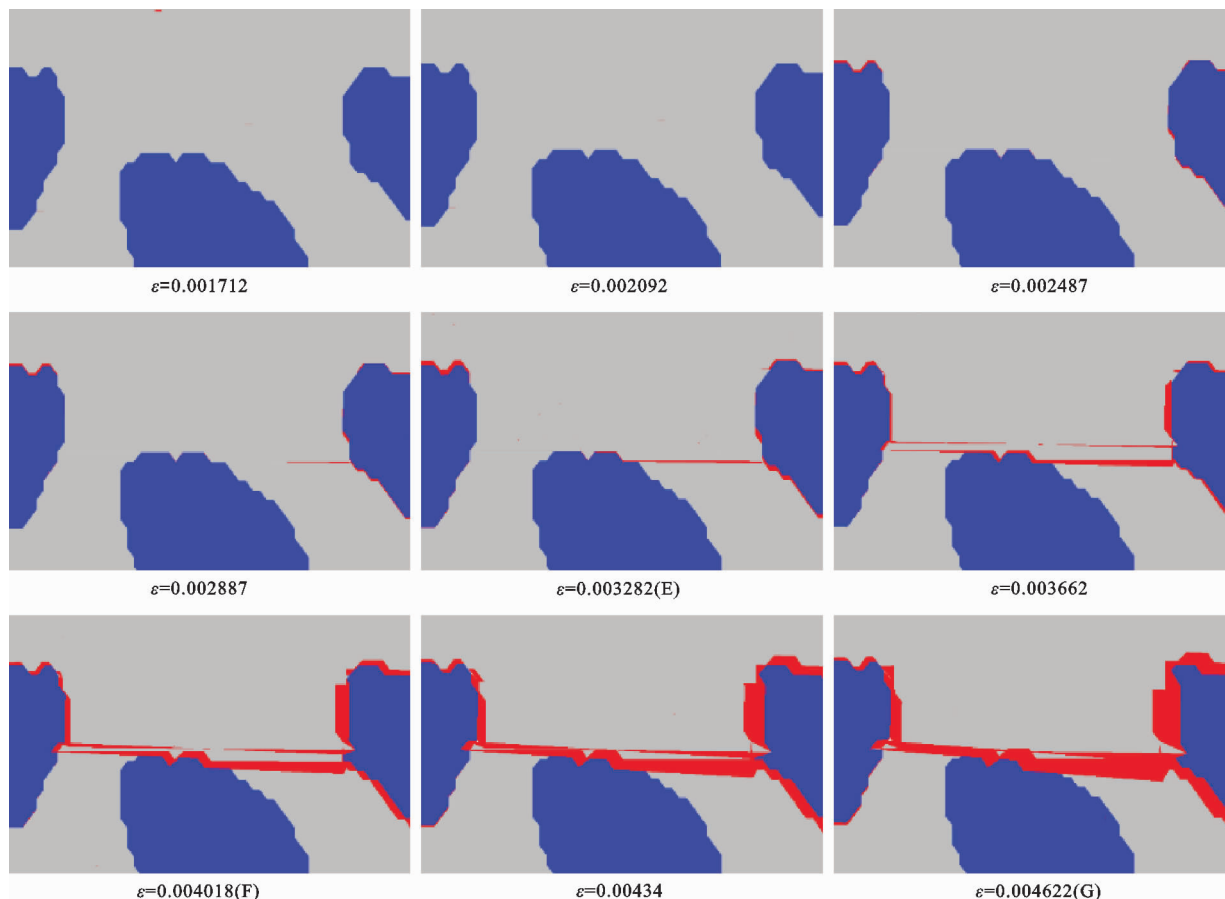


图8 数值模拟混凝土局部区域的裂缝扩展过程

表2 混凝土试件4个典型断面骨料及孔洞占比

断面编号	骨料占比/%	孔洞占比/%
1 [#]	43.9	0
40 [#]	46.5	0.14
100 [#]	48.7	0.20
240 [#]	44.0	4.00

综合表2和图9、10可以看出,当断面骨料占比相近时(1[#]与240[#]断面),过多的孔洞减小了有效抗压面积,形成了薄弱带,从而大幅降低了混凝土的抗压强度;当断面孔洞占比相近时(40[#]与100[#]断面),100[#]断面骨料占比更大,抗压强度略高于40[#]断面的抗压强度。由图9、10还可以看出,因细观结构的不同而形成了不同的宏观裂缝分布,无明显贯通宏观裂缝的断面(100[#]断面)软化阶段强度几乎没有下降;40[#]和1[#]断面的材料强度以及曲线软化阶段均相近,只是40[#]断面在孔洞附近出现了更多的裂缝,同样在240[#]断面中,由于两个大孔洞的存在,孔洞周围出现了较多的不规则裂缝,而且大部分裂缝扩展到骨料处停止或绕过骨料扩展。文献[24]中也得

到了相同结果,可见模型中内部细观结构、成分占比的随机分布对材料受压时应力-应变曲线以及内部裂缝的衍生发展影响很大。

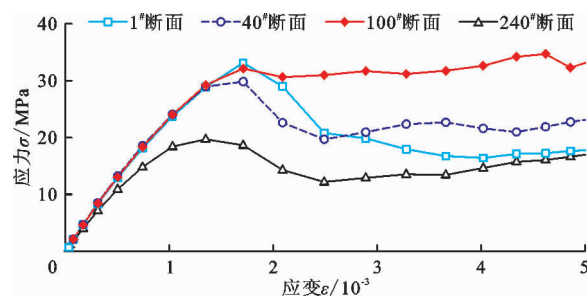


图9 混凝土试件4个典型断面的应力-应变曲线

3.3 蒙特卡罗模拟

图11为混凝土试件沿X方向372个断面的模拟应力-应变曲线及抗压强度概率分布。由图11可以看出,模拟得到的应力峰值大多在25~35 MPa之间,抗压强度基本服从正态分布,其抗压强度平均值为29.3 MPa,标准差为4.2 MPa,与文献[21]中试验得到的抗压强度相吻合;在240[#]断面处含有多个大孔洞(图10(c)),导致其抗压强度比其他断面

低很多,同时模拟得出的各断面应力 - 应变曲线峰值和软化阶段的差异也反映了不同细观结构对材料性能的影响。

3.4 参数分析

文中采用的混凝土试件中粘结裂缝单元 (CIEs) 的强度取决于抗拉强度 t_n 以及断裂能 G_F 。由

表 1 可知,水泥砂浆的抗拉强度为 $t_{nc}=6$ MPa、断裂能 $G_{Fc}=0.06$ N/mm;骨料 - 水泥砂浆界面的抗拉强度 $t_{ni}=3$ MPa、断裂能 $G_{Fi}=0.03$ N/mm,在参数分析中,每次只改变这 4 个参数 (t_{nc} 、 G_{Fc} 、 t_{ni} 和 G_{Fi}) 中的 1 个。图 12 显示了 4 个不同参数的改变对应力 - 应变曲线的影响。

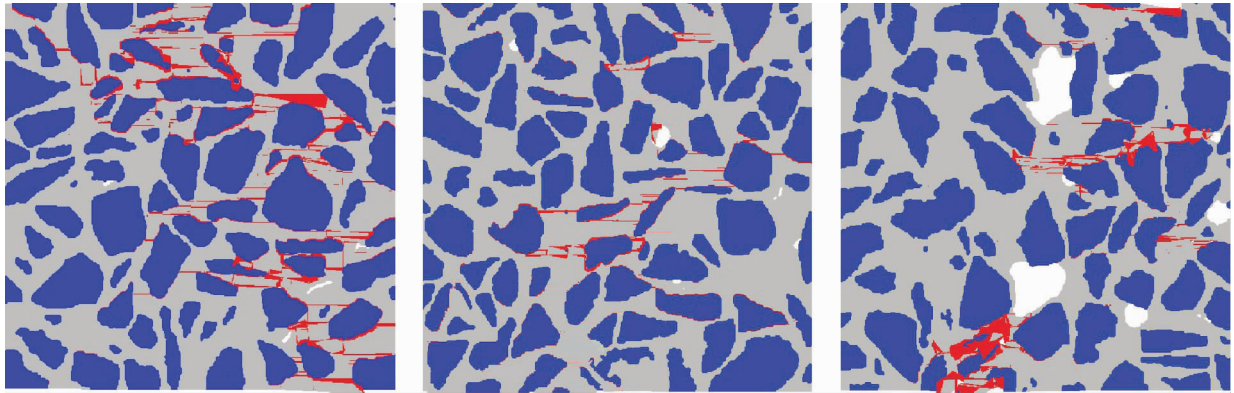


图 10 40#、100#、240#断面的宏观裂缝形态 ($\varepsilon=4.622 \times 10^{-3}$)

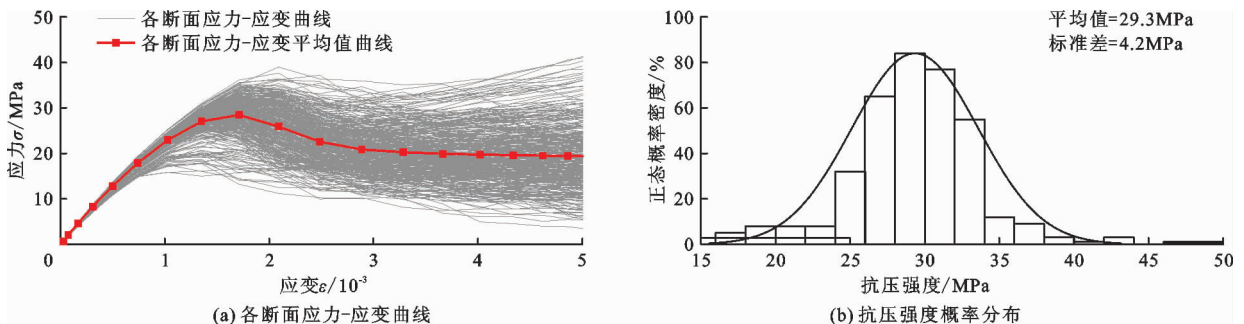


图 11 混凝土试件沿 X 方向各断面的模拟应力 - 应变曲线及抗压强度概率分布

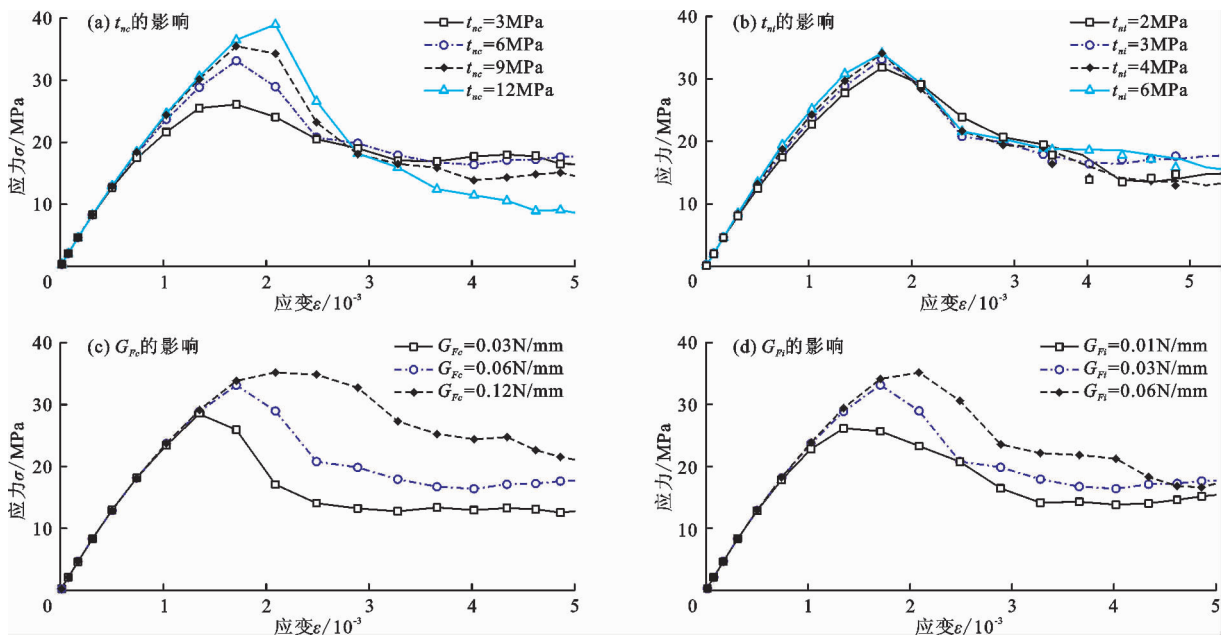


图 12 混凝土试件 4 个不同参数的改变对应力 - 应变曲线影响

由图12(a)、12(b)可见,对于二维受压而言,相较于界面粘结单元强度,水泥砂浆粘结单元强度对材料强度起主要控制作用。对比图12(a)和图12(c),无论是水泥砂浆强度 t_{nc} 还是断裂能 G_{Fc} ,均对材料的峰值荷载影响较大,随着断裂能 G_{Fc} 的增大,混凝土试件抗压强度也增大,但更多的是影响曲线峰值后的软化过程,相对单元强度 t_{nc} 所产生的影响要小;图12(c)、12(d)也表明断裂能对峰值荷载特别是峰值后的软化过程影响显著,其中水泥砂浆单元断裂能 G_{Fc} 对应力-应变曲线的影响比骨料-水泥砂浆界面单元断裂能 G_{Fi} 要大。由图12(a)还可以看出,当 t_{nc} 值从3 MPa增大至6 MPa时,试件强度相应从26.1 MPa跃升到了33.1 MPa,但当 t_{nc} 超过6 MPa后,试件强度进一步增大的幅度在减小,这与细观/宏观裂缝扩展进程有关。在材料断裂参数相关研究中,普遍认为骨料-水泥砂浆界面是混凝土的薄弱点,即在模拟中赋予界面较砂浆和骨料更小的断裂参数,这使得在加载早期裂纹从界面开始萌发扩展,而随着外部荷载持续作用,裂纹逐渐从界面向水泥砂浆中发展,这时可以认为由水泥砂浆单

元强度控制材料破坏,断裂能则更多地控制峰值后的软化过程^[25],这与本文结果一致。也有学者提出界面单元强度才是混凝土断裂的主要因素^[26],总的来说,界面过渡区、水泥砂浆粘结单元强度以及断裂能绝对数值均会影响混凝土的断裂损伤行为,但该3个因素中哪个起主导作用还需进一步研究。

图13(a)和13(b)分别显示了当 $t_{nc}=3$ MPa($t_{ni}/t_{nc}=1$)时,在试件水泥砂浆中以及在界面上的峰值前细观裂纹状况;图13(c)和13(d)为相同荷载下 $t_{nc}=6$ MPa($t_{ni}/t_{nc}=0.5$)时,在试件水泥砂浆中以及在界面上的峰值前细观裂纹状况($\varepsilon=0.001354$, $DSF=50$)。比较图13(a)~13(d)可知,当水泥砂浆和界面的单元强度相同时($t_{ni}=t_{nc}=3$ MPa),出现在水泥砂浆中和界面上的细观裂纹数量相当;而当水泥砂浆单元强度加倍时($t_{nc}=6$ MPa, $t_{ni}=3$ MPa),裂纹更多地出现在界面上,这是因为界面的单元强度小于砂浆单元强度,裂纹更多的从界面上开始发展。大量的裂纹最初在界面上出现,然后在峰值到达之前逐渐稳定,之后继续发展并与新出现在水泥砂浆中的裂纹相连,形成贯通裂缝。

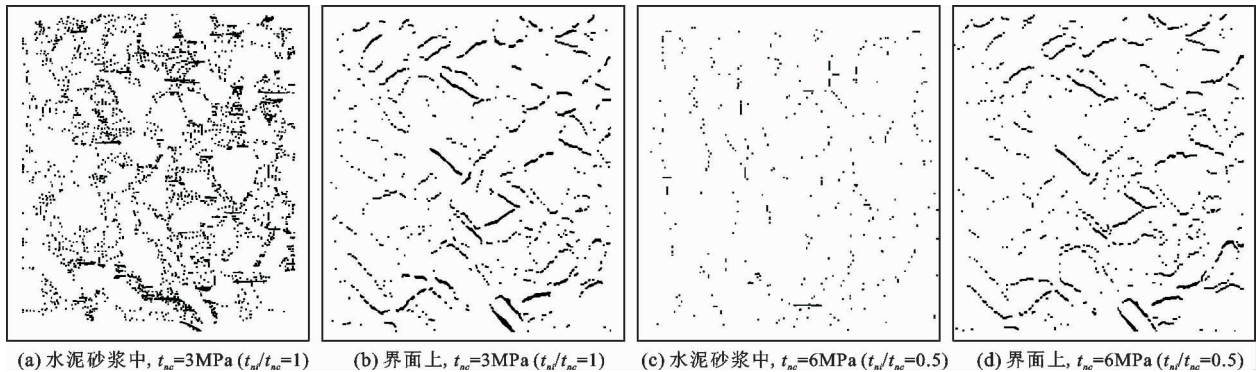


图13 不同 t_{nc} 和 t_{ni} 值水泥砂浆和界面上的细观裂纹发展状况($\varepsilon=1.354 \times 10^{-3}$)

图14(a)和14(b)分别展示了 $t_{nc}=3$ MPa($t_{ni}/t_{nc}=1$)和 $t_{nc}=12$ MPa($t_{ni}/t_{nc}=0.25$)时,混凝土试件中宏观裂缝发展状况($\varepsilon=0.004622$, $DSF=0.1$)。图14(a)和14(b)所呈现宏观裂缝有明显差别, $t_{nc}=12$ MPa的宏观裂缝数量明显比 $t_{nc}=3$ MPa的多。骨料-砂浆界面单元强度与水泥砂浆单元强度的相对比率对裂纹的位置和数量有显著的影响,其比率越小,则裂纹更多地出现在界面上,其比率越大,则裂纹更多地出现在水泥砂浆中,进而影响结构的宏观裂缝行为和承载能力,这一规律在他人研究中也得到了印证^[26]。由此可见,材料参数的取值对于数值模拟非常重要,参数的真实性及准确性决定着数值模拟结果的精度。

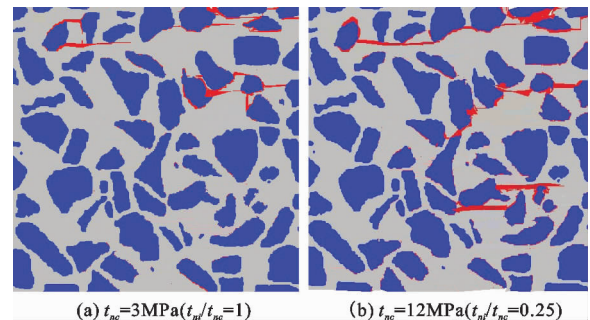


图14 不同 t_{nc} 和 t_{ni} 值水泥砂浆和界面上的宏观裂缝发展状况($\varepsilon=4.622 \times 10^{-3}$)

4 结论

本文基于XCT扫描图像建立了具有真实内部结构特征的混凝土有限元模型,通过预先插入零厚

度裂缝单元,模拟了混凝土试件二维受压中裂缝的发展过程,探讨了不同细观结构以及相应参数对混凝土断裂损伤行为的影响,得到的主要结论如下:

(1) 粘结裂缝单元预插法具有能够模拟复杂多裂缝同时发展的优势。混凝土细观裂纹总是从界面开始发展,随着应变的增加,裂纹的宽度和数量迅速增加,在峰值应变前基本稳定,并逐渐与水泥砂浆中的裂纹发生桥接而形成贯通的宏观裂缝。

(2) 模型中内部细观结构、成分形状和大小的随机分布对混凝土受压时应力-应变曲线以及内部裂缝衍生发展影响很大。界面、水泥砂浆粘结裂缝单元强度以及断裂能均会影响混凝土的断裂损伤行为,其中水泥砂浆粘结裂缝单元强度对材料的强度起控制作用,而断裂能则更多地影响混凝土在受压中的软化过程。另外,界面单元强度与水泥砂浆单元强度的比率越小,则裂纹更多地出现在界面上,比率越大,则裂纹更多地出现在水泥砂浆中。

(3) 目前的混凝土断裂数值模拟研究大多基于学者自己对材料各组分的假设值,所得出的结果带有一定程度的主观性,未来可以考虑对混凝土中各组分真实断裂参数进行实测,以此建立模型进行模拟并与试验进行对比,其结果将更具参考价值。

参考文献:

- [1] 徐世焯,董丽欣,王冰伟,等. 我国混凝土断裂力学发展三十年[J]. 水利学报,2014,45(S1):1-9.
- [2] 杜修力,金浏. 考虑孔隙及微裂纹影响的混凝土宏观力学特性研究[J]. 工程力学,2012,29(8):101-107.
- [3] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]. 北京:北京工业大学建筑工程学院,2014.
- [4] 黄海燕,杨冠颖,沈超明,等. 混凝土强度尺寸效应的细观数值分析[J]. 混凝土,2007(4):11-13+16.
- [5] 任文渊,杨贞军,黄宇劼. 基于X射线计算断层扫描图像的混凝土细观断裂模拟[J]. 水利学报,2015,46(4):452-459.
- [6] 李朝红,王海龙,徐光兴. 混凝土损伤断裂的三维细观数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(2):463-469.
- [7] 朱琳,党发宁,丁卫华,等. 基于CT图像和K-Means聚类算法研究混凝土细观损伤[J]. 水力发电学报,2019,38(5):37-45.
- [8] 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.
- [9] 田瑞俊. 基于细观力学的(全级配)混凝土静、动态力学性能研究[D]. 北京:北京工业大学建筑工程学院,2008.
- [10] 田瑞俊,杜修力,彭一江. 混凝土压缩断裂过程及尺寸效应的数值模拟[J]. 工业建筑,2008,38(4):68-72+112.
- [11] 刘智光,陈健云. 混凝土破坏过程的复合型界面损伤模型与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(3):1144-1152.
- [12] 唐欣薇,张楚汉. 基于改进随机骨料模型的混凝土细观断裂模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(3):348-351+356.
- [13] 杨更社,刘慧. 基于CT图像处理技术的岩石损伤特性研究[J]. 煤炭学报,2007,32(5):463-468.
- [14] 李新涛,张东生,冯志海,等. X射线CT技术在C/C复合材料研究中的应用[J]. 宇航材料工艺,2016,46(1):42-51+64.
- [15] 郎颖娴,梁正召,段东,等. 基于CT试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学,2019,40(3):1204-1212.
- [16] 于皓. 基于XCT技术的陶瓷基复合材料导热系数预测及应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [17] 田威,韩女,张鹏坤. 基于CT技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):3069-3075.
- [18] 党发宁,雷光宇,丁卫华,等. 混凝土静动力破坏过程的CT细观试验研究[J]. 水力发电学报,2015,34(1):189-196.
- [19] 雷光宇,韩霖昌,张扬,等. 基于CT图像的混凝土细观力学层次模型重建[J]. 水力发电学报,2016,35(3):105-112.
- [20] HUANG Yujie, YANG Zhenjun, REN Wenyuan, et al. 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 67-68: 340-352.
- [21] 沈蒲生,梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社,2012.
- [22] CHEN Qingqing, ZHANG Yuhang, ZHAO Tingting, et al. Mesoscale modelling of concretes subjected to triaxial loadings: Mechanical properties and fracture behaviour[J]. Materials, 2021, 14(5): 1099.
- [23] YANG Zhenjun, SU Xiangting, CHEN Jianfei, et al. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(17): 3222-3234.
- [24] 张峰. 基于声发射特性下的含骨料混凝土裂隙演化特性及其统计损伤本构研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(5):182-188.
- [25] 杨贞军,黄宇劼,尧锋,等. 基于粘结单元的三维随机细观混凝土离散断裂模拟[J]. 工程力学,2020,37(8):158-166.
- [26] 周正峰,康玉峰,罗君豪,等. 基于黏聚区模型的混凝土细观断裂分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021,51(2):270-277.