

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.014

含缺陷混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟

姚 婷¹, 杜成斌², 孙立国²

(1. 江苏博特新材料有限公司, 江苏 南京 210008; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:将混凝土看成由骨料、砂浆、界面和缺陷等组成的四相复合材料,通过圆形孔隙和币状裂隙表征缺陷,采用应力-裂缝宽度模型反映骨料、砂浆和界面的非线性本构关系,得到了轴拉荷载作用下试件破坏过程的应力-应变全曲线和弯拉荷载作用下的荷载-位移全曲线,并对圆形孔隙和币状裂隙及其含量对混凝土破坏过程和极限荷载的影响进行了分析.结果表明:圆形随机骨料试件的极限荷载高于任意多边形骨料试件的极限荷载,缺陷会弱化混凝土宏观力学性能;与圆形孔隙相比,币状裂隙对混凝土的破坏作用更大.

关键词:混凝土; 圆形孔隙; 币状裂隙; 数值模拟; 四相复合材料; 损伤

中图分类号: TB12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)01-0066-07

混凝土是由粗骨料、细骨料、水泥水化物、未水化水泥颗粒、孔隙及裂纹等组成的非均质复合材料^[1].混凝土宏观力学性能非常复杂,以往主要通过试验方法对其进行研究^[2].试验方法试验周期长,耗费的物力和人力较多,得出的结论与试验条件及所选取的材料有很大关系,并具有一定的随机性,而且多侧重于宏观角度,忽略了混凝土内部细观结构的高度复杂性与非均匀性,所以难以揭示混凝土材料的变形或破坏机制,尤其是载荷作用下,随机分布的微裂纹、孔洞及骨料界面等这些混凝土构件中天然存在的大量的细观缺陷的扩展对混凝土性能的影响.细观力学方法^[3-4]正是基于混凝土的这些特性,对细观结构的特性及其各种缺陷的不均匀性与混凝土宏观力学性能之间的关系进行研究的.

人们通过对混凝土细观结构的认识,提出了很多关于混凝土断裂和损伤研究的细观力学模型和方法.最常用的细观模型有网格模型^[5-6]、随机力学特性模型^[7]、随机粒子模型^[8]、微观模型^[9]、随机骨料模型^[10-11]等,这些模型都是在假定混凝土是由水泥砂浆基质、骨料和两者之间的黏结界面组成的三相复合材料的基础上,采用细观层次上简单的本构关系和破坏准则,来对复杂的宏观损伤断裂过程进行模拟的.由于裂隙、孔洞等缺陷的存在,混凝土具有高度异质性,所以混凝土的破损起始于混凝土在受载前就已经存在的原始缺陷即孔隙或裂隙^[12-13].本文将缺陷直观地反映在混凝土随机骨料模型中,把混凝土看成四相复合材料,以非线性有限元方法为工具,通过对混凝土四相复合材料的细观数值模拟来研究混凝土宏观力学性能和破坏过程,以揭示混凝土破坏的细观机制.

1 数值模型的建立

将混凝土视为骨料、砂浆和界面组成的三相复合材料,将原始缺陷(包括圆形孔隙和币状裂隙)看成混凝土的组成相,即把圆形孔隙和币状裂隙分别看做一相材料,建立了混凝土随机骨料模型,如图 1 所示.采用渐进网格法剖分单元,得到如图 2 所示的模型网格.

2 混凝土单轴拉伸数值模拟

假定混凝土各相材料在峰值荷载前呈线性状态,在峰值荷载后呈脆性应变软化状态,并以拉应力-裂缝宽度模型来描述混凝土各相组分的软化行为.运用大型有限元软件 ABAQUS 进行非线性有限元计算,可以得到混凝土的应力-应变全曲线^[14].

收稿日期: 2010-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(50779011, 50539030-1-1) 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104)

作者简介: 姚婷(1983—),女,山西运城人,硕士,主要从事工程材料的力学特性和行为研究. E-mail: yaoting@cnjsjk.cn

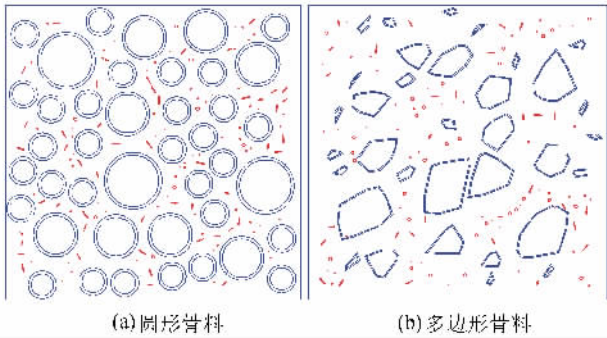


图 1 随机骨料模型

Fig. 1 Random aggregate model

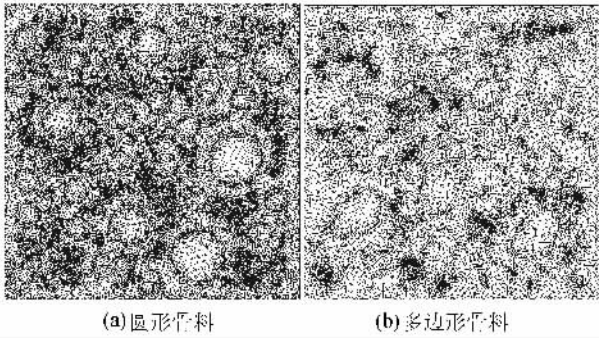


图 2 随机骨料模型网格

Fig. 2 Mesh generation of random aggregate model

2.1 计算模型

试件尺寸取为 400 mm × 100 mm,考虑到计算量和网格划分的难度,将试件中间部分作为非线性区,两侧作为弹性区进行模拟.各相材料力学参数根据文献[15]取值(表 1).界面厚度取为 0.2 mm,缺陷含量取为 1.5%.圆形孔隙最大孔径为 0.5 mm,币状裂隙最大长轴为 1 mm.混凝土单轴拉伸试件计算简图如图 3 所示,其网格如图 4 所示,单元总数为 92 952,节点总数为 48 102.

表 1 各相材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of various materials

材料 类型	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	裂缝宽度/ mm
混凝土	30.0	0.17		
砂浆	26.0	0.22	2.47	0.053
骨料	55.5	0.16	5.37	0.053
界面层	25.0	0.16	1.16	0.030

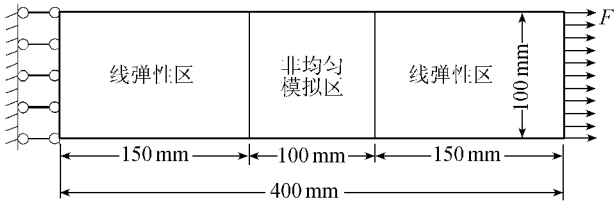


图 3 混凝土单轴拉伸试件

Fig. 3 Uniaxial tensile specimen of concrete

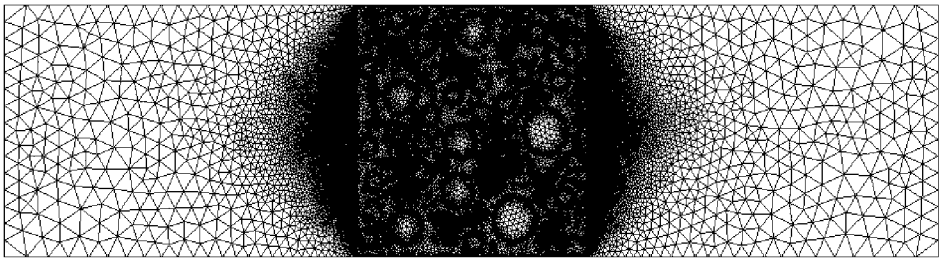


图 4 模型网格

Fig. 4 Mesh generation of model

为减小计算网格的敏感性,Hillerborg 等[16]提出了断裂能 G_f 的概念,即以单位面积裂纹扩展所需能量作为材料力学参数.该方法用应力-位移关系曲线而非应力-应变关系曲线来描述混凝土的软化性质,采用的拉应力-裂缝宽度关系曲线如图 5 所示,其中 f_t 表示抗拉强度, ϵ 表示应变.

2.2 模拟结果

试件单轴拉伸模拟得到的应力-应变关系曲线如图 6 所示,单轴拉伸损伤分布如图 7 所示.

从图 6 可以看出,各种混凝土随机骨料模型的单轴受拉应力-应变全曲线都有线性段和软化段,它可以清楚地解释混凝土拉伸破坏发展的全过程.即在加载初始阶段,混凝土应力与应变呈较好的线性关系,而随着应力的继续加大,混凝土出现少量塑性变形,曲线呈微凸状,斜率渐减;当应力达到混

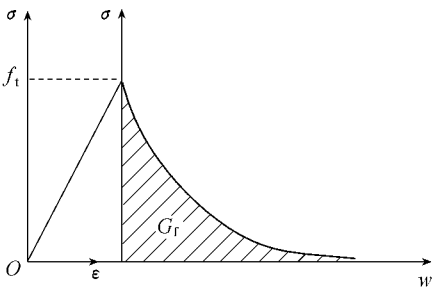


图 5 应力-裂缝宽度关系曲线

Fig. 5 Relationship between stress and crack width

凝土极限强度时,试件内出现与加载方向相垂直的横向裂缝,试件开始破坏,承载力下降.随着荷载的不断加大,试件内裂缝沿横向迅速延伸、扩展,承载力继续下降,但曲线渐趋平缓.这种曲线变化趋势与混凝土的有关试验结果较为一致.同时,从图 6 还可以得到混凝土的单轴极限抗拉强度以及各种模型下极限抗拉强度从大到小的顺序:圆形无缺陷、多边形无缺陷、圆形含缺陷、多边形含缺陷.这一结果也与实际情况相符.

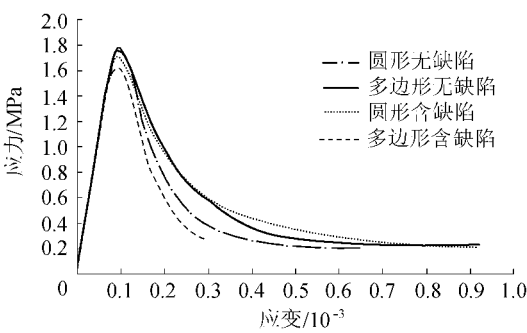


图 6 单轴拉伸应力-应变关系曲线

Fig. 6 Relationship between uniaxial tensile stress and strain

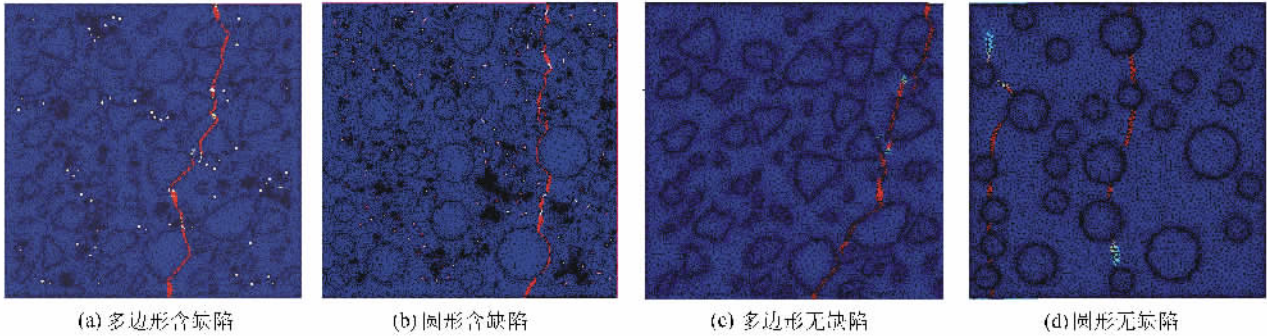


图 7 单轴拉伸损伤分布

Fig. 7 Damage distribution of random aggregate model under uniaxial tensile load

从图 7 可以看出,试件首先在大骨料界面处或缺陷处产生与加载方向相垂直的裂纹,然后不断扩展,最后形成贯穿性裂纹,直到破坏.很明显,骨料分布结构、骨料形状和缺陷分布对混凝土破坏路径和裂纹扩展有一定的影响.

3 混凝土梁弯拉数值模拟

各相材料参数、缺陷参数、混凝土试件尺寸和模型网格划分同前,混凝土四点弯曲梁试件计算简图如图 8 所示.弯拉数值模拟得到的荷载-位移关系曲线如图 9 所示,弯拉损伤分布如图 10 所示.

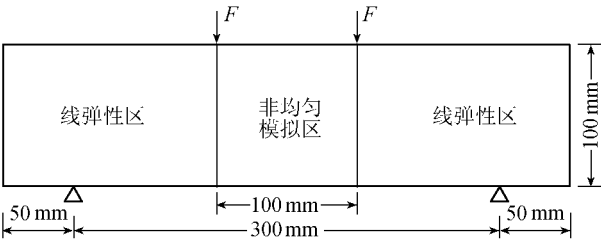


图 8 混凝土四点弯曲梁试件

Fig. 8 Four-point bending specimen of concrete

观察图 9 可以看出,任意多边形骨料试件的极限荷载要小于圆形骨料试件的极限荷载,这是因为多边形骨料本身就存在不规则尖角,容易出现应力集中.而整体上无缺陷混凝土试件的极限荷载要高于含缺陷混凝土试件的极限荷载,这就一定程度上证明了缺陷是造成混凝土破坏的原因之一.

图 10 为混凝土弯拉数值试验的弯拉损伤图,从破坏的过程来看,裂缝都是围绕界面和缺陷展开,加载初期,混凝土不出现损伤,随着荷载的不断加大,界面和缺陷处都存在着应力集中现象,弯拉试件下表面慢慢出现多条微裂纹,并不断有新的单元产生拉伸损伤,随着荷载的继续加大,混凝土下表面上多条细裂纹汇聚成一条宏观裂纹,并向上沿伸,贯穿界面与缺陷,开始相互连通.在试样达到其峰值载荷时,试件内大量单元同

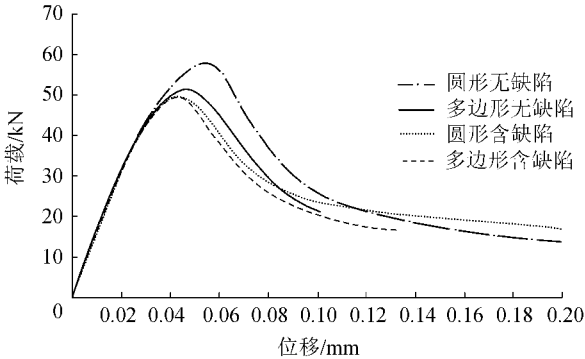


图 9 弯拉荷载-位移关系曲线

Fig. 9 Relationship between load and displacement under bending load

时发生拉伸损伤,使得宏观裂纹带形成.

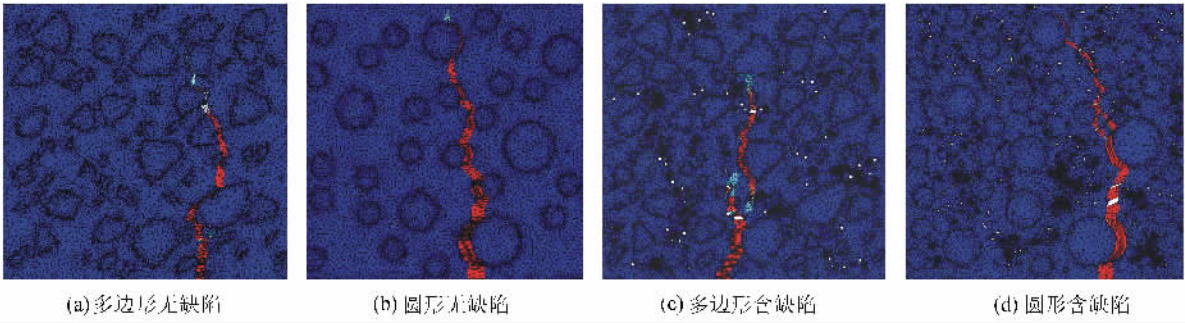


图 10 弯拉损伤分布

Fig. 10 Damage distribution of random aggregate models under bending load

4 缺陷对混凝土破坏过程的影响

采用前述模型对不同缺陷含量的混凝土数值模型进行单轴受拉和四点弯曲过程模拟. 考虑到划分网格和计算量的大小以及骨料和缺陷投放的难易程度,取圆形孔隙孔径为 1.5 mm,币状裂隙长半轴长为 2mm、长细比为 10:1,设圆形孔隙含量(亦称孔隙率)分别为 0,1%,3%,5%和 7%,币状裂隙含量(亦称裂隙率)为 3%.

4.1 圆形孔隙对混凝土破坏过程的影响

4.1.1 轴拉荷载作用下的混凝土应力-应变关系曲线和破坏过程

不同孔隙率下的混凝土单轴受拉应力-应变关系曲线如图 11 所示,相应的破坏损伤分布如图 12 所示.

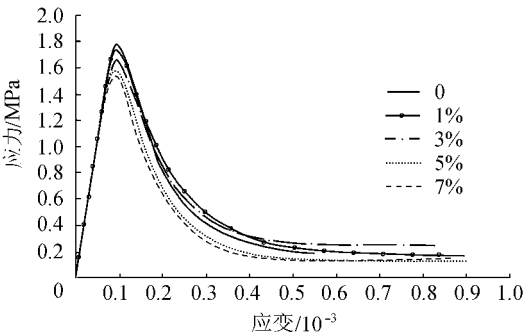


图 11 不同圆形孔隙率下单轴受拉应力-应变关系曲线

Fig. 11 Relationship between stress and strain of concrete specimens with different pore contents under uniaxial tension

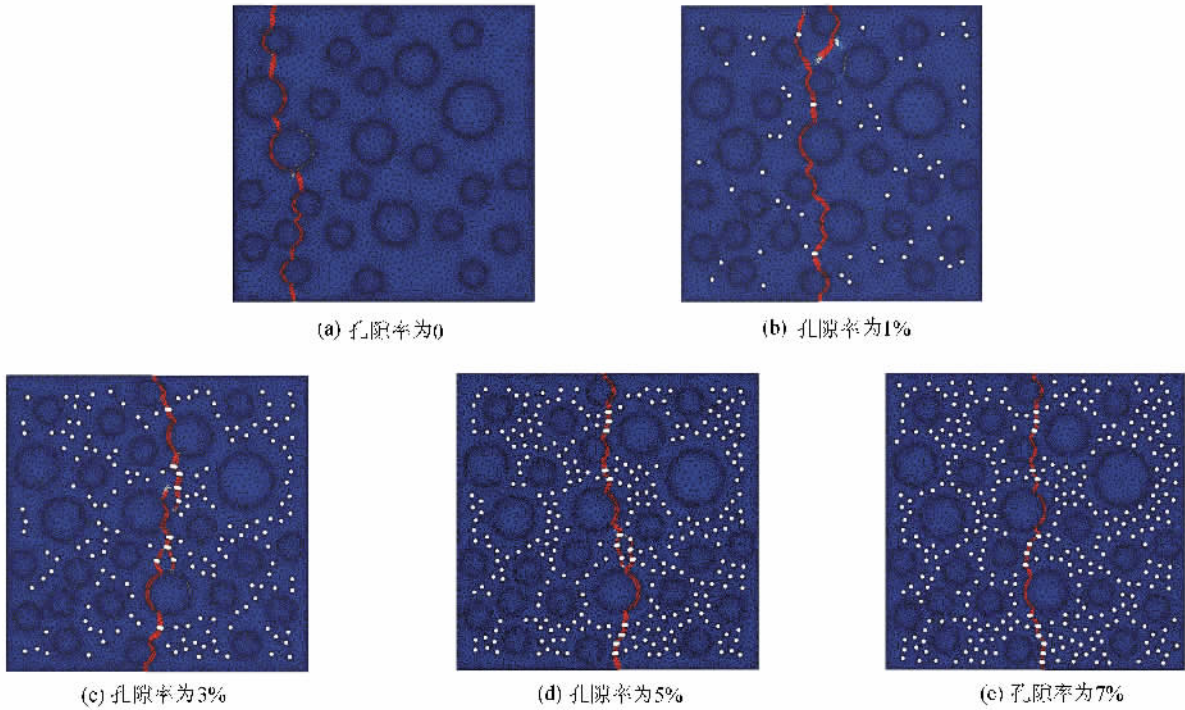


图 12 不同圆形孔隙率下单轴受拉破坏损伤分布

Fig. 12 Damage distribution of concrete specimens with different pore contents under uniaxial tension

从图 11 可以看出,不同缺陷含量下混凝土的应力-应变关系与混凝土本身应有的应力-应变关系基本一样.而对每一条曲线而言,其上升段差别不大,这说明缺陷含量对混凝土弹性模量的影响不是很大.相比之下,应力-应变关系曲线峰值后的离散性相对要大一些.由于各个试件引入了缺陷,具有明显的非线性特征,且各个试件的网格划分和单元的空间分布、数目及大小等都千差万别,这就会使其中的某一个单元先发生损伤,最终的破坏形态也会有所差别.这种破坏形态的离散性在试验中也是屡见不鲜的.

图 12 表明,不同圆形孔隙率下混凝土的破坏路径有所不同,随着缺陷含量的增大,裂缝穿过缺陷相的现象也会越来越明显.

4.1.2 弯拉荷载作用下的混凝土荷载-位移关系曲线和破坏过程

不同孔隙率下的混凝土弯拉荷载-位移关系曲线如图 13 所示,相应的破坏损伤分布如图 14 所示.

从图 13 可以看出 不同孔隙率下混凝土的荷载-位移关系曲线线型非常相像,而且也符合混凝土弯拉破坏的一般规律.随着孔隙率的加大,极限荷载逐渐减小.曲线初始段近似为直线,当荷载达到一定程度后,曲线开始偏离线性,混凝土出现塑性变形,曲线微凸,斜率慢慢减小,直到为 0,曲线的切线呈水平状,所在点对应荷载即为极限荷载.随后,试件的承载力不断下降,且荷载-位移关系曲线的离散性要更大一些.

图 14 表明,不同孔隙率下混凝土的破坏形态和破坏位置也不尽相同.当数值试件中不含缺陷时,混凝土的破坏是沿着界面这个薄弱环节展开的,而随着孔隙率的不断加大,破坏大多都贯通圆形孔隙而导致最终破坏,这说明缺陷对于混凝土力学性能及破坏过程的影响是不容忽视的.

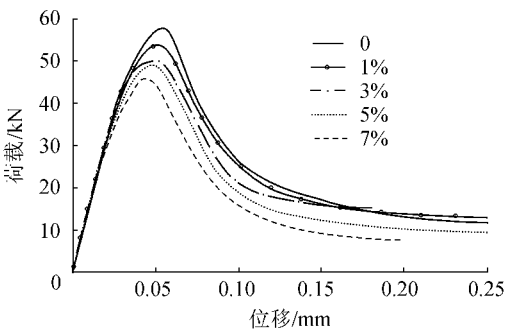


图 13 不同圆形孔隙率下弯拉荷载-位移关系曲线
Fig. 13 Relationship between load and displacement of concrete specimen with different pore contents under bending load

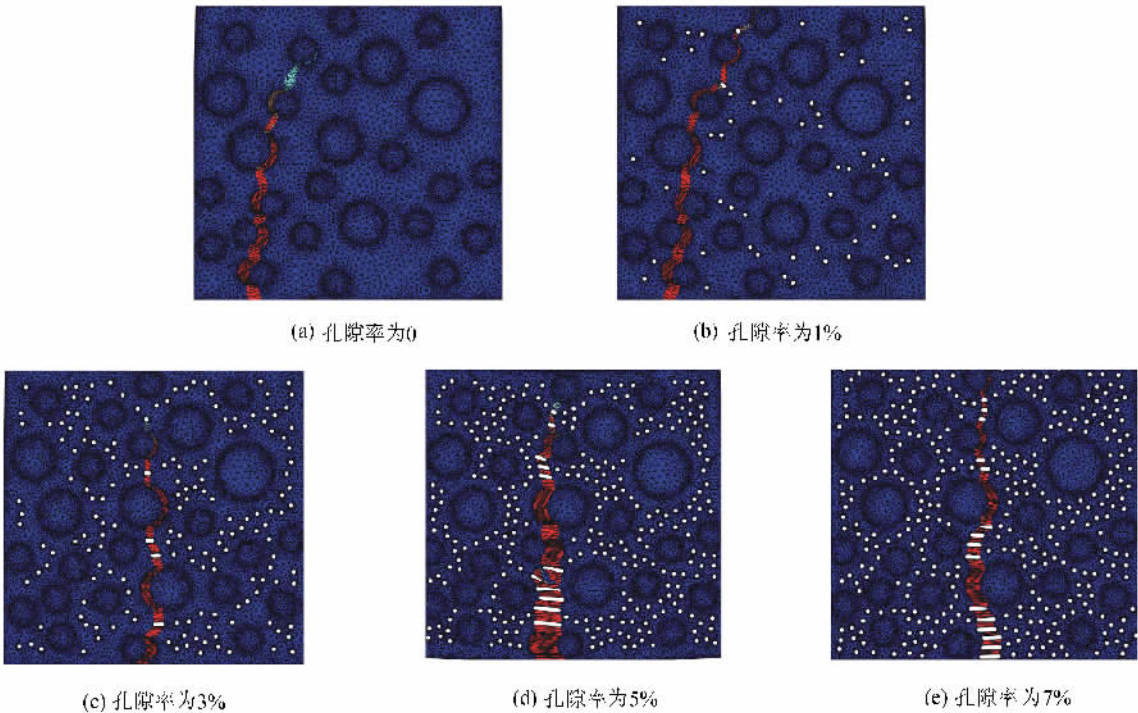


图 14 不同圆形孔隙率下弯拉破坏损伤分布

Fig. 14 Damage distribution of concrete specimens with different pore contents under bending load

4.2 币状裂隙对混凝土破坏过程的影响

考虑缺陷含量为 3% 时数值模拟得到的应力-应变关系曲线和荷载-位移关系曲线如图 15 所示,2 种荷载作用下含币状裂隙时随机骨料模型混凝土的破坏损伤分布如图 16 所示.

从图 15 可以看出,当缺陷含量为 3% 时,2 种混凝土试件的轴拉极限强度相差 0.4 MPa 左右,弯拉极限荷

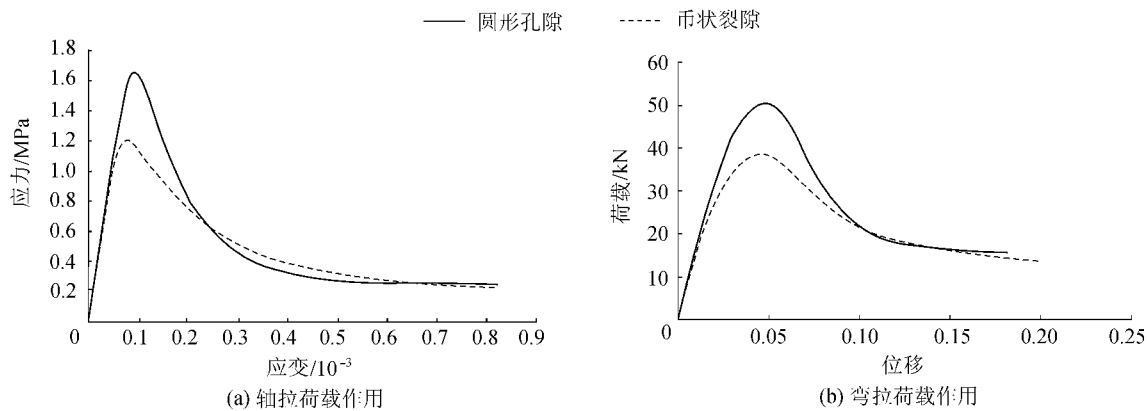


图 15 缺陷含量为 3% 时的应力-应变关系曲线和荷载-位移关系曲线

Fig. 15 Stress-strain and load-displacement curves of concrete specimens with defects of 3%

载相差 10 kN 以上.由此可见,币状裂隙对于混凝土的一系列物理、力学性能特别是强度和耐久性能会产生比圆形孔隙更为不利的影响.这主要是因为币状裂隙比圆形孔隙在受荷载后更能引起高度的应力集中,圆形孔隙比较圆滑,不像币状裂隙那样有明显的尖角.因此,币状裂隙对混凝土力学性能的影响较大.

图 16 表明,无论是轴拉还是弯拉荷载作用,大部分情况下,混凝土试件梁开裂都是围绕界面和币状裂隙的,而且甚至有绕过界面连通裂隙的情况.由此可见,币状裂隙对混凝土破坏过程及破坏路径的影响是不可忽视的.与圆形孔隙率为 3% 时的破坏损伤相比,破坏路径也不尽相同.由此可见,混凝土试件的破坏与缺陷形状和缺陷分布有很大关系.

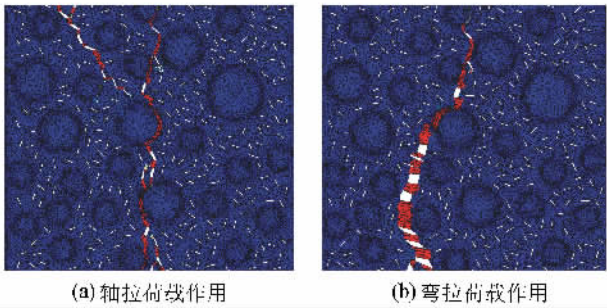


图 16 币状裂隙情况下的破坏损伤分布

Fig. 16 Damage distribution of concrete specimen with penny cracks under different forms of load

5 结 论

- a. 含缺陷混凝土试件的极限抗拉强度和极限荷载都小于不含缺陷混凝土试件的极限抗拉强度和极限荷载.
- b. 随着缺陷含量的增大,混凝土试件极限荷载会逐渐减小.缺陷形态和含量对混凝土试件的破坏形态和破坏位置有一定影响,但破坏总是围绕界面和缺陷展开.
- c. 缺陷和界面是影响混凝土破坏的主要因素.币状裂隙时,破坏裂缝有绕过界面连通缺陷的情况发生,缺陷尤其币状裂隙对混凝土破坏过程及破坏路径的影响较大.

参考文献:

[1] 宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京 中国水利水电出版社,2002 32-36.

[2] 王祥林,卢东红,王力平.水泥石的动态性能研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,28(5) 7-11. (WANG Xiang-lin,LU Dong-hong,WANG Li-ping. Study on dynamic behaviors of the concrete rock [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,1995,28(5) 7-11. (in Chinese))

[3] 黄克智,徐秉业.固体力学发展趋势[M].北京 北京理工大学出版社,1995 196-198.

[4] 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. (in Chinese))

[5] VERVUURT A,SCHLANGEN E,VAN MIER J G M. Tensile cracking in concrete and sandtone :part 1 :basic instruments[J]. Materials and Strucures,1996,29(1) 9-18.

- [6] SCHLANGEN E, GARBOCAI E J. Fracture simulations of concrete using lattice models : computational aspects [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 57(2/3) : 319-322.
- [7] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂 数值试验 [M]. 北京 : 科学出版社, 2003 : 125-130.
- [8] BAZANT Z P, TABBARA M R, KAZEMI M T, et al. Random particle models for fracture of aggregate or fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8) : 1686-1705.
- [9] MOHAMED A R, HANSEN W. Micromechanical modeling of concrete response under static loading : part 1 : model development and validation [J]. Materials Journal, 1999, 96(2) : 196-203.
- [10] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用 [J]. 水利学报, 2006, 37(6) : 662-667. (DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6) : 662-667. (in Chinese))
- [11] 应宗权, 杜成斌, 孙立国. 基于随机骨料数学模型的混凝土弹性模量预测 [J]. 水利学报, 2007, 38(8) : 933-937. (YING Zong-quan, DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Prediction of concrete elastic modulus based on numerical random aggregate model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8) : 933-937. (in Chinese))
- [12] 蒋林华. 混凝土材料学 [M]. 南京 : 河海大学出版社, 2006 : 175-202.
- [13] MINDESS S. Fracture process zone detection [C] // SHAH P, CARINTERI A. Fracture Mechanics Test Methods for Concrete. London : Chapman & Hall, 1991 : 231-255.
- [14] 应宗权, 杜成斌, 刘冰. 混凝土梁弯拉断裂过程的细观分析 [J]. 东南大学学报 : 自然科学版, 2007, 37(2) : 213-216. (YING Zong-quan, DU Cheng-bin, LIU Bing. Meso-scope analysis of fracture process of concrete beam under bending [J]. Journal of Southeast University : Natural Science Edition, 2007, 37(2) : 213-216. (in Chinese))
- [15] 刘文彦, 叶文瑛, 葛辉, 等. 东江拱坝全级配混凝土力学性能的试验研究 [J]. 水利水电技术, 1986(5) : 3-14. (LIU Wen-yan, YE Wen-ying, GE Hun, et al. Experimental research on mechanical properties of full graded concrete of Dongjiang Arch Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1986(5) : 3-14. (in Chinese))
- [16] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6) : 773-781.

Numerical simulation of meso-damage and failure process of concrete with defects

YAO Ting¹, DU Cheng-bin², SUN Li-guo²

(1. Jiangsu Bote New Materials Co., Ltd., Nanjing 210008, China ;

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The concrete was regarded as a kind of four-phase composite material consisting of aggregate, mortar, interfacial transition and random micro-defects. The defects were characterized as circular pores and penny cracks. The stress-crack width model was employed to depict the nonlinear constitutive relationship among the aggregate, mortar and interfacial transition. The stress-strain curves of specimens during failure process under uniaxial tensile load as well as the load-displacement curves under bending tension were obtained. The influences of the circular pores and penny cracks as well as their contents on the failure process and the ultimate load of concrete were analyzed. The results show that the ultimate load of concrete specimens with circular aggregate is larger than that with arbitrary polygon aggregate. The defects can weaken the macro-mechanical properties of concrete. The penny cracks are more disadvantageous than the circular pores.

Key words : concrete ; circular pore ; penny crack ; numerical simulation ; four-phase composite material ; fracture