

混凝土拉伸断裂的细观力学模拟

张子明 赵吉坤 倪志强

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 应用细观力学理论,假设混凝土三相组成服从 Weibull 分布,建立了混凝土随机分布二维结构模型,对混凝土单边裂纹拉伸数值试样进行仿真研究,得出了裂纹在砂浆、骨料及界面中的扩展路径和试件的宏观应力-应变曲线。

关键词 混凝土;断裂;数值模拟;随机骨料模型

中图分类号 :TU528 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2005)03-0287-04

在土木、水利结构工程中,混凝土作为重要的建筑材料已有百余年历史。混凝土是由粗骨料、细骨料、水泥、水泥水化产物、未水化水泥颗粒、空隙和裂纹等组成的复合材料。混凝土的力学性能是混凝土结构设计的重要依据。过去人们对混凝土力学性能的探索,主要依靠试验技术和测试手段。随着试验技术的发展,混凝土各种力学性能被揭示出来,并在设计中作为结构安全的控制指标。刚性试验机和伺服试验机的出现,以及高频响应测试系统的应用,使人们能够测定出混凝土应力-应变全过程曲线。微型试验机和扫描电镜相组合,揭示了混凝土裂缝尖端的秘密,混凝土在受力后产生损伤,裂纹绕过骨料,随着荷载增加逐步扩展,最后贯通,从而导致混凝土的破坏。

进行混凝土的力学试验是研究混凝土力学性能和破坏过程最基本的方法。但是,由于试验结果受各种因素(如加载条件、试验机刚度、测试系统精度以及试验费用等)的影响,往往不能准确地反映材料的固有特性。因此,根据材料细观成分(如基体、颗粒、空隙)的力学行为及它们的相互作用建立宏观对象的本构关系(图 1),对进一步认识混凝土的破坏机理,配置满足工程设计要求的混凝土,充分利用混凝土的力学性能,设计和建造出经济、安全和合理的建筑物,具有重要的理论意义和实用价值。

混凝土是对拉应力敏感的准脆性材料,研究混凝土拉伸断裂显得更为重要。拉伸断裂,也就是断裂力学中的 I 型裂纹扩展问题,是线性断裂力学研究较为成熟的部分。尽管如此,用经典断裂力学研究混凝土材料时,仍然存在许多问题。例如混凝土是非均匀的,不满足断裂力学的材料均匀性假设,混凝土断裂过程中存在断裂过程区等。用于研究拉伸断裂的试样可以分为直接拉伸试样、3 点(4 点)弯曲试样和劈裂试样。按照断裂力学的研究思路,试样中一般要预制一个或两个初始裂纹,以保证断裂从预制裂纹尖端开始扩展。

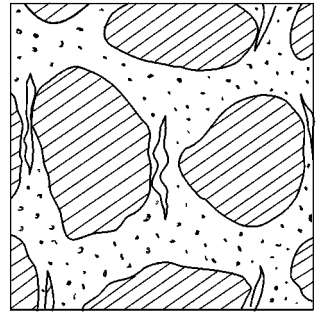


图 1 混凝土材料的细观结构

Fig.1 Meso-structure
of concrete

1 基本假定和数值模型

1.1 基本假定

假定混凝土为由砂浆基质、骨料及它们之间的界面组成的三相复合材料^[1,2]。为了考虑各相组分的非均匀性,各组分材料性质按照给定的 Weibull 分布赋值,细观单元满足弹性损伤本构关系,用有限元法计算应力场和位移场。同时,将最大拉应变准则和摩尔库仑准则分别作为该损伤本构关系的损伤阈值。

为了描述材料性质的非均匀性,假定组成材料细观单元的力学性质满足 Weibull 分布^[3,4],该分布的概率密度函数为

$$f(u)=\frac{m}{u_0}\left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right]$$

(1)

式中： u ——满足该分布的随机变量(如强度、弹性模量、泊松比等)； u_0 ——与随机变量均值有关的参数； m ——确定 Weibull 分布概率密度函数形状的参数。

1.2 数值模型

研究对象被离散为等面积的正方形单元(1 mm×1 mm)。为了使模型反映混凝土的细观特性,单元的数目必须足够多。由于计算机容量和计算速度的限制,过多的单元数目将耗费大量的计算时间。单元的尺寸选择应根据所研究问题的精度、范围和计算条件而定。

在混凝土的数值模拟中,先用一个 Weibull 分布描述砂浆基质的非均匀性,然后根据混凝土配合比随机确定局部区域的单元为骨料,以取代原来该单元的力学性质。在骨料颗粒和砂浆基质之间有一层代表界面的单元。

按照应变等价原理,应力 σ 作用在受损材料上引起的应变与有效应力 $\bar{\sigma}$ 作用在无损材料上引起的应变 ϵ 等价。根据这一原理,受损材料的本构关系可通过无损材料中的名义应力得到,即

$$\sigma = E_0(1 - D)\epsilon$$

(2)

$$D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

(3)

式中： E, E_0 ——损伤后的弹性模量和初始弹性模量； D ——损伤变量。

采用马扎斯(Mazars)损伤模型, $D = 0$ 对应无损伤状态, $D = 1$ 对应完全损伤状态, $0 < D < 1$ 对应不同程度的损伤状态^[5~7]。

2 单边裂纹拉伸数值试样

单边裂纹拉伸数值试样的几何形状及其受力条件如图 2 所示^[8~10]。试样是边长为 d 的正方形,左边预制裂纹的长度为 a 。仅研究 $a/d = 0.5$ 的情况下,试样尺寸 $d = 50\text{ mm}, 100\text{ mm}, 150\text{ mm}, 200\text{ mm}$ 时断裂扩展过程及其强度特征。该试样混凝土弹性模量为 30 000 MPa,单轴抗压强度为 25 MPa,单轴抗拉强度为 2.0 MPa。按照表 1 给出的 Weibull 分布参数赋值,控制骨料最大粒径为 10 mm,骨料的平面表观密度控制在 45% 以上,各尺寸试样的数值模型如图 3 所示。图 3 中的灰度反映了单元弹性模量的高低,灰度越小,弹性模量越高。试样在垂直方向上承受位移控制的拉伸载荷,每步加载位移为 0.000 4 mm。

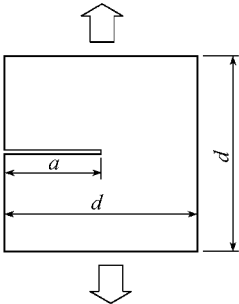


图 2 单边裂纹拉伸试样

Fig.2 Cracks in concrete specimen with tensile stress exerted in one direction

表 1 混凝土的 Weibull 参数赋值

Table 1 Weibull parameters of concrete

材料类型	弹性模量		单轴抗压强度		泊松比	
	均值/MPa	均质度	均值/MPa	均质度	均值/MPa	均质度
砂浆基质	25 000	3.0	125	3.0	0.2	100
骨料	60 000	6.0	500	6.0	0.2	100
界面	15 000	1.5	120	1.5	0.2	100

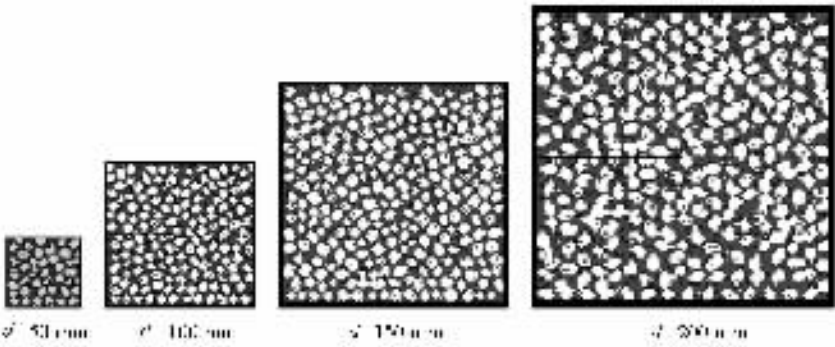


图 3 不同尺寸混凝土试样数值模型

Fig.3 Numerical model of concrete specimens of different sizes

在同一组 Weibull 分布样本中,单元数量直接影响数值仿真的计算结果.研究表明,在裂纹过程区应布置较密的单元,单元数量对数值试样宏观应力-应变曲线的上升段影响不大,取 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的正方形单元能够保证数值试样宏观应力-应变曲线的上升段和下降段均有足够的精度.

3 数值模拟结果

试样的应力-应变曲线如图 4 所示.可以看出,随着试样尺寸的增大,抗拉强度不断降低,荷载-位移曲线的脆性增强.典型试样($d = 200\text{ mm}$)的断裂过程如图 5 所示.在试样受力的初期,裂纹尖端处于明显的拉应力集中区,并出现弥散性破裂点,这些破裂点主要分布在骨料与砂浆基质之间的界面单元.裂纹的扩展也是绕过骨料,曲折地向前扩展,最终形成大致与拉伸应力作用方向垂直的主裂纹,导致试样拉伸破坏.

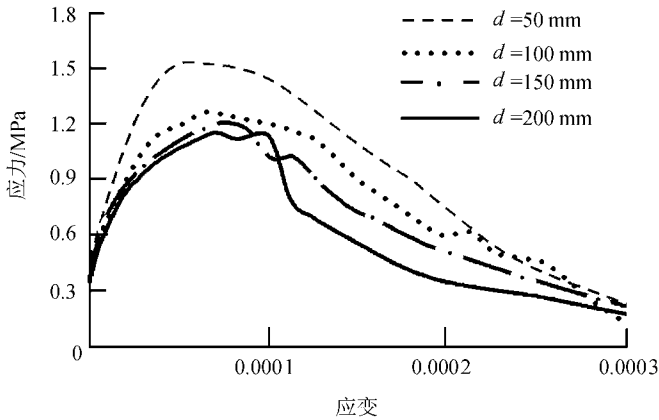


图 4 不同尺寸试样单轴拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves for concrete specimens of different sizes subjected to uniaxial tension

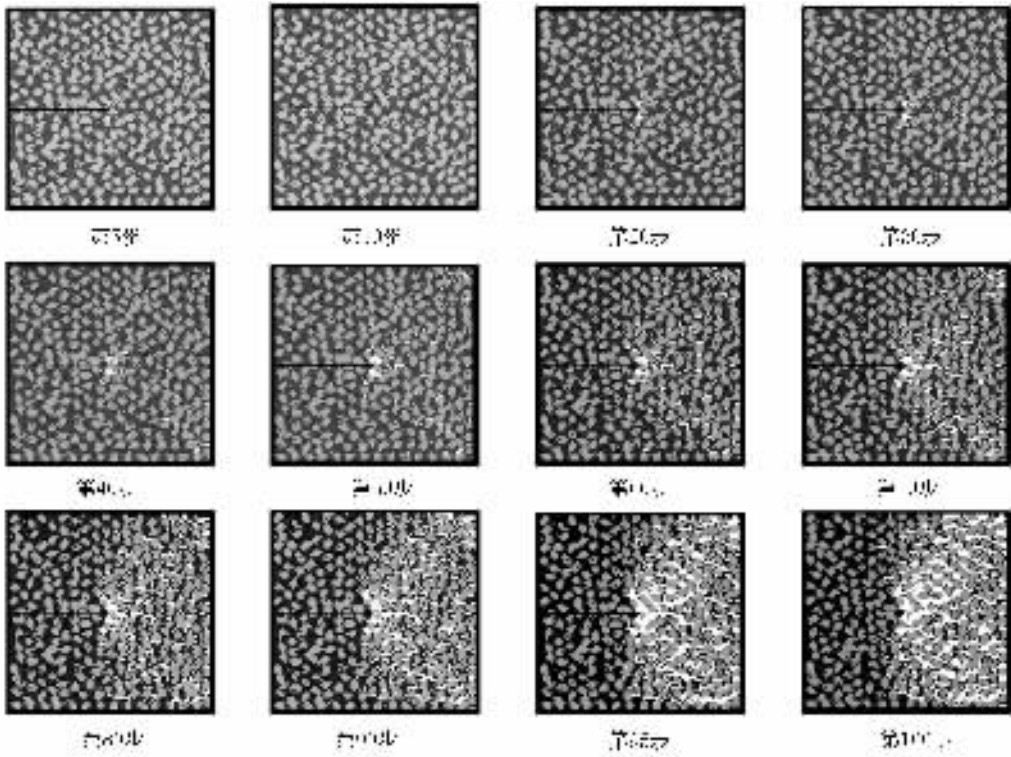


图 5 单边裂纹拉伸试样断裂过程

Fig.5 Cracking process of concrete specimen with tensile stress exerted in one direction

4 结 语

a. 从混凝土的细观组成出发,采用随机骨料模型,再现了裂纹在基质、骨料及界面中的扩展,并通过多组不同尺寸试件的数值模型试验,得出了试件的宏观应力-应变曲线.从这些曲线可以看出,较小尺寸的混凝土试件,具有较好的承载能力,反映了混凝土结构破坏的尺寸效应规律.

b. 结构破坏的尺寸效应是准脆性材料的固有特征,对大体积混凝土结构尤为重要.仅通过实验手段研究尺寸效应是极为困难的.随着计算机技术的发展,可以采用细观力学数值仿真补充实验无法获得的一些数据.

c. 在综合应用实验、理论和数值仿真方法研究复杂应力状态下混凝土结构破坏的尺寸效应方面,仍需做大量的工作.

参考文献:

- [1] 刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报,1996,36(1):84—89.
- [2] 朱万成.混凝土断裂过程的细观数值模型及其应用[D].沈阳:东北大学,2001.
- [3] 尹双增.断裂·损伤理论及应用[M].北京:清华大学出版社,1992.50—62.
- [4] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.20—30.
- [5] 张子明,周红军.温度对混凝土强度的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2004,33(6):674—679.
- [6] 张子明,冯树荣.基于等效时间的混凝土绝热温升[J].河海大学学报(自然科学版),2004,33(5):345—349.
- [7] 黄海燕,张子明.混凝土的统计尺寸效应[J].河海大学学报(自然科学版),2004(3):291—294.
- [8] 张子明,郑国芳,宋智通.早期混凝土温度裂缝分析[J].水利水运工程学报,2004(2):41—44.
- [9] 张子明,王嘉航,宋智通.寒冷气候下混凝土的破坏机理[J].红水河,2004,23(1):67—70.
- [10] 张子明,郑国芳,田为军.混凝土温度特性参数的反分析[J].工程力学,2003,20(增刊):420—425.

Mesomechanical simulation of concrete tension fracture

ZHANG Zi-ming, ZHAO Ji-kun, NI Zhi-qiang

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :It was supposed that concrete was a three-phase composite, which was composed of mortar, aggregate and their interface, and that the meso-structure of concrete followed the Weibull distribution. By use of the mesomechanical theory, a two-dimensional random distribution structural model of concrete was developed for numerical simulation of cracks in concrete specimens with tensile stresses exerted in one direction. With the model, the routes of crack extension in mortar, aggregate, and their interface, as well as the macro stress-strain curve of concrete specimens, were derived.

Key words :concrete; fracture; numerical simulation; random aggregate model