

混凝土单轴荷载下细观损伤破坏的数值模拟

张子明¹ 赵吉坤¹ 吴 昊¹ 姚朋士²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 东海县水务局, 江苏 东海 222300)

摘要 假设混凝土是由砂浆基质、骨料及它们之间的界面组成的三相复合材料, 混凝土的细观力学性质服从 Weibull 分布, 应用细观力学损伤模型研究了混凝土的宏观力学性质, 并且通过编制有限元程序对混凝土试件在单向拉伸和压缩情况下的破坏过程进行了数值试验. 模拟结果表明, 该模型可以用来研究单轴荷载作用下混凝土结构的破坏机理和多种尺寸试样尺寸效应律.

关键词 混凝土; 细观力学; 随机骨料模型; 损伤与断裂; 数值模拟

中图分类号 :TU528.1

文献标识码 :A

文章编号 :1000-198X(2005)04-0422-04

混凝土作为重要的建筑材料, 已有百余年历史, 其力学性能是科学界和工程界极为关心的课题. 长期以来, 将混凝土视为宏观均质各向同性材料, 在一般情况下可以满足工程要求. 但是, 这种宏观假定很难考虑混凝土材料的细观组成以及力学性质的复杂性. 因此, 人们已经认识到从混凝土细观尺度出发研究混凝土宏观损伤与断裂过程的许多优点. 计算机技术的发展, 为从细观层次研究混凝土宏观力学性质开辟了广阔的前景.

由于混凝土作为非均匀材料的随机性, 用随机方法研究混凝土的力学性质是较为合理的. 1939 年, Weibull 在“最弱环假设”的基础上提出了材料脆性破坏强度统计理论和局部强度的概率密度函数, 并从概率统计学的角度研究结构的宏观强度, 进而研究脆性材料结构的可靠性. 根据脆性破坏的统计断裂理论发展了概率断裂力学^[1~6].

1 研究模型

1.1 随机概率分布

假定混凝土是由砂浆基质、骨料及它们之间的界面组成的三相复合材料. 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, 即单元的应变或应力状态满足最大拉应变准则或摩尔库仑准则时, 单元开始发生拉伸或者剪切损伤.

为了描述材料性质的非均匀性, 假设组成材料细观单元的力学性质满足 Weibull 分布. 该分布概率密度函数为

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

式中: u ——满足 Weibull 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.

材料的每个力学参数都在给定 Weibull 分布参数的条件下按照式(1)赋值. 当 $u_0 = 100$, m 分别为 1.5, 3.0 和 6.0 时, Weibull 分布概率密度函数曲线如图 1 所示. Weibull 分布参数 m

反映了随机变量的离散程度, 当 m 值增大时, 材料细观单元力学参数的概率密度函数曲线变窄, 细观单元力

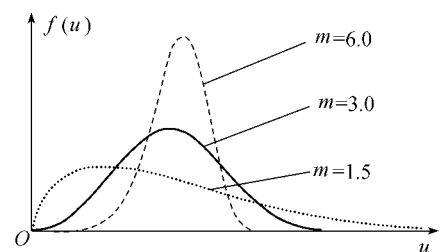


图 1 不同均质度 m 时单元参数的密度函数
Fig.1 Probability density function of element parameters for different degrees of homogeneity

学参数分布较为集中,材料参数较为均匀,接近于给定的参数 u_0 。显然, m 值可反映数值模型中材料的均匀性。因此,将 m 称为均质度。

1.2 数值模型的建立

在数值模型中,研究对象被离散为等面积的长方形(或正方形)单元。要使模型能反映研究对象(如混凝土)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,然后指定局部区域的单元为骨料、界面,以取代原来该单元的力学性质。砂浆和混凝土细观结构试样如图 2 所示。图中颜色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。在骨料颗粒和砂浆基质之间有一层代表界面的单元。

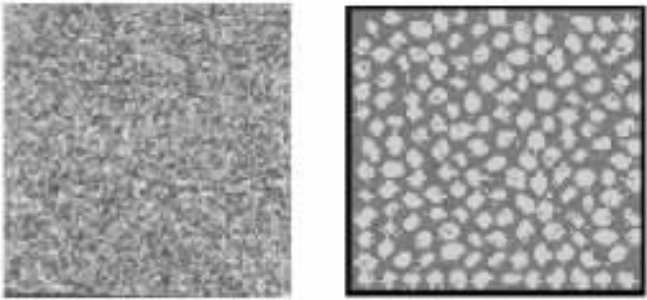


图 2 砂浆、混凝土细观结构试样

Fig.2 Mesoscopic structure of mortar and concrete specimens

2 拉压模型计算

2.1 混凝土数值试样的建立

对于单轴抗压强度为 35 MPa 的混凝土,根据 ACI 规范^[7],

$$E_c = 4730 \sqrt{f_{cyl}} \tag{2}$$

式中 E_c 和 f_{cyl} 分别为混凝土弹性模量和圆柱试样压缩强度。

由式(2),该混凝土的弹性模量为 26 400 MPa。初步选定砂浆的弹性模量为混凝土的 90%,其强度比混凝土高 20%。依次类推得出了骨料和界面的弹性模量和强度。各组分的 Weibull 分布参数如表 1 所示。试样的尺寸为 100 mm × 100 mm,由 100 × 100 个单元组成。

2.2 细观单元的弹性损伤本构关系

按照应变等价原理,应力 σ 作用于受损材料所引起的应变与有效应力 $\bar{\sigma}$ 作用于无损材料所引起的应变等价。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

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\bar{\sigma}}{E_0} = \frac{\sigma}{(1 - D)E_0} \tag{3}$$

或
$$\sigma = E_0(1 - D)\epsilon \tag{4}$$

从而可得
$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \tag{5}$$

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(断裂或者破坏)状态, $0 < D < 1$ 对应不同程度的损伤状态。

2.3 单轴压缩断裂过程的数值模拟

给该试样的上端施加垂直方向的单轴荷载,用位移控制加载,下端在垂直方向约束,下端面中心节点在水平方向也约束,加载位移为 0.002 mm/步。混凝土试样破坏过程如图 3 所示。

混凝土试样在单轴压缩载荷作用下的宏观应力-应变曲线的数值模拟结果如图 4 所示。该结果与混凝土压缩试验的应力-应变全曲线有很好的相似性。

2.4 单轴拉伸断裂过程的数值模拟

单轴拉伸数值模拟中仍选用了单轴压缩试样。试样破坏过程如图 5 所示。图 6 为该混凝土试样在单轴拉伸荷载作用下的宏观应力-应变曲线的数值模拟结果。

与单轴压缩荷载作用时相比,单轴拉伸时,单元的受力状态较为简单,损伤破裂表现为拉伸形式,因此其

应力-应变曲线(图 6)的脆性较为明显.

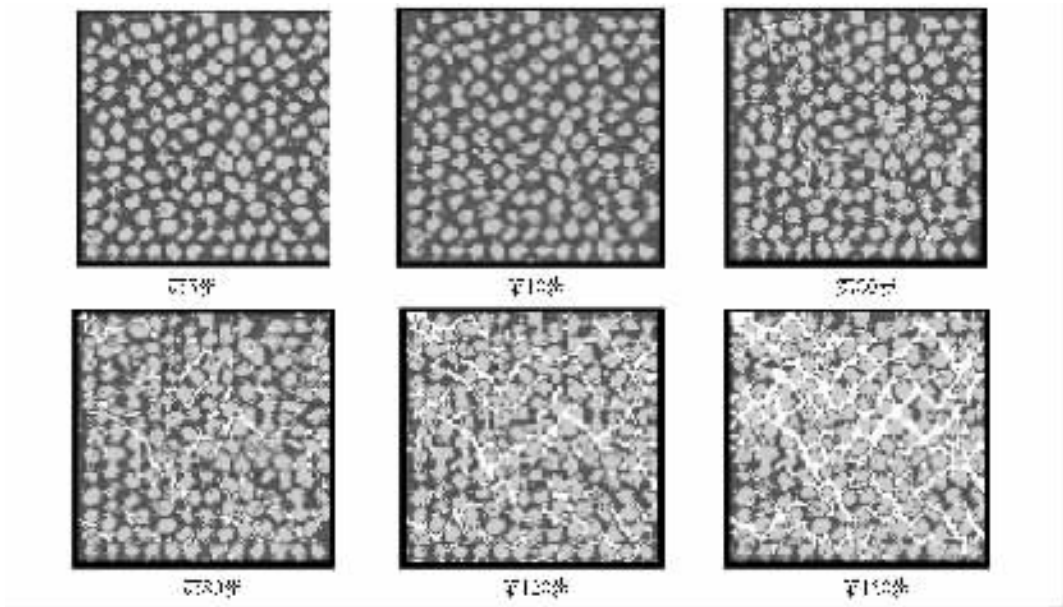


图 3 混凝土试样在单轴压缩载荷作用下的破坏过程

Fig.3 Failure process of concrete specimen under uniaxial compression

3 结 论

a. 模型的优越性. 将混凝土看作三相复合材料进行细观力学数值模拟, 可以使人们更清楚地认识混凝土的断裂过程和破坏机理, 为改善混凝土的力学性能和研制高性能混凝土提供科学依据. 该模型能够考虑混凝土初始损伤和力学性能的差异, 单元的力学性能服从 Weibull 分布. 由于计算机容量和计算速度的限制, 可在局部区域采用这种模型, 其他部分按照各向同性的均质材料进行计算.

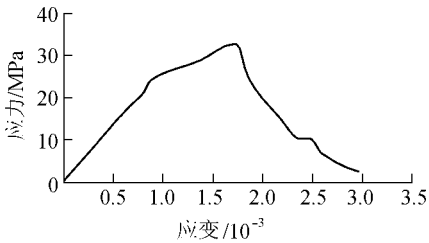


图 4 混凝土单轴压缩时的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of concrete specimen under uniaxial compression

b. 结果的可靠性. 无论是应力-应变特性还是试验的断裂形

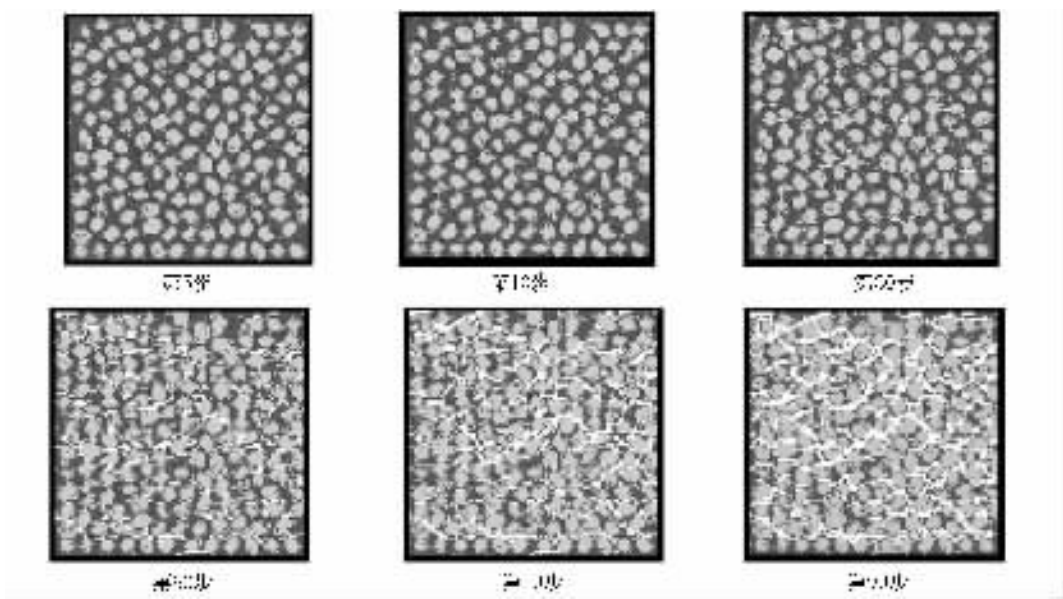


图 5 混凝土试样在单轴拉伸时的破坏过程

Fig.5 Failure process of concrete specimen under uniaxial tension

式 都与实际试验具有较好的一致性.在对同一混凝土数值试样在单轴压缩和拉伸荷载作用下断裂过程的数值模拟中,得到了该混凝土数值试样的宏观弹性模量、单轴压缩强度、单轴拉伸强度等力学性质参数,这些参数与该级配的实际混凝土具有较好的对应关系.因此,建立的数值模型能够反映混凝土在单轴荷载作用下的力学特性.

c. 细观与宏观的关系.从数值模拟结果可以看出,混凝土单轴压缩、拉伸的轴向应力-应变特性与混凝土中的微结构变化联系紧密,微裂缝的稳态扩展和非稳态扩展使混凝土的宏观应力-应变特性产生非线性和不可逆特性,混凝土的破坏也是微裂纹扩展的结果.混凝土细观力学的二维数值模型揭示了混凝土拉压破坏的一般规律,还需用三维细观力学数值模型对混凝土在复杂荷载作用下的破坏机理做进一步研究.

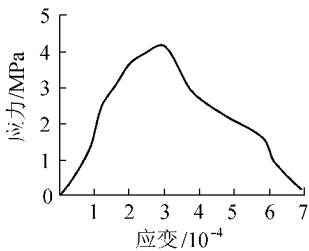


图 6 混凝土单轴拉伸时的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of concrete specimen under uniaxial tension

参考文献：

[1] 张子明,赵吉坤,倪志强.混凝土拉伸断裂的细观力学模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):287—290.
[2] 蔡四维,蔡敏.混凝土的损伤断裂[M].北京:人民交通出版社,1999.52—69.
[3] 高路彬.混凝土本构理论[M].成都:西南交通大学出版社,1993.23—26.
[4] 徐定华,徐敏.混凝土材料学概论[M].北京:中国标准出版社,2002.72—79.
[5] 谢和平,鞠杨.混凝土微细观损伤断裂的分形行为[J].煤炭学报,1998,22(6):586—590.
[6] 唐春安.岩石声发射规律的数值模拟初探[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4):368—374.
[7] 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.
[8] 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,2003.51—65.
[9] 徐道远.黏聚裂纹模型及其在混凝土开裂中的应用[J].水利学报,1989(9):18—24.
[10] BAZANT Z P,OH B. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J].J Engineering Mechanics,1985,111(4):559—582.
[11] BAZANT Z P. Crack band theory for fracture of concrete[J].Material and Construction,1983,16:155—177.
[12] HU X Z, WITTMANN F. Size effect on toughness induced by crack close to free surface[J]. Eng Fracture Mechanics,2000,65(2,3):209—221.

Numerical simulation of meso-damage of concrete subjected to uniaxial loads

ZHANG Zi-ming¹, ZHAO Ji-kun¹, WU Hao¹, YAO Peng-shi²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Water Affair Bureau of Donghai County, Donghai 222300, China)

Abstract :Under the assumption that concrete is a three-phase composite, which is composed of mortar matrix, aggregate and their interface, and that the mesomechanical property of concrete satisfies the Weibull distribution, the damage model of mesomechanics is used to investigate the macromechanical property of concrete. Numerical simulation is made of the failure process of concrete specimens under uniaxial tension and compression by compilation of an FEM program. The result shows that the model can be used to study the mechanism of concrete failure and size effect of concrete structures under uniaxial loads.

Key words :concrete ; mesomechanics ; random aggregate model ; damage and fracture ; numerical simulation