

骨料形状对混凝土拉伸强度的影响

琚宏昌, 陈国荣, 夏晓舟

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 运用 Monte-Carlo 方法模拟产生了由骨料、水泥砂浆基体和两者之间的胶结带组成的三相复合材料混凝土试件, 采用各向同性的 Mazars 损伤演化模型描述混凝土细观各相弹性损伤退化过程, 利用有限元方法分别进行了混凝土二、三、四级配圆形、多边形骨料试件的单轴拉伸数值模拟。试验结果表明: 同一级配任意多边形骨料试件的极限承载力总体上要大于圆形骨料试件的承载能力; 二、三、四级配混凝土试件强度依次递减; 在应力-应变曲线的软化阶段, 圆形骨料较多边形骨料试件软化曲线平缓; 多边形骨料混凝土试件的脆性指数较圆形骨料混凝土试件的脆性指数高。

关键词 混凝土; 单轴拉伸; 随机模型; 圆形骨料; 多边形骨料; 细观力学; 数值模拟

中图分类号 TU528 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2008)04-0554-05

混凝土是由水、水泥砂浆和骨料组成的复合材料。混凝土材料力学性能试验, 不仅需要花费大量的人力、物力、财力, 而且所得到的试验成果又往往与试验条件、环境条件、操作水平、材料本身的组成及各组分材料特性有关, 因此试验成果相对离散, 难以反映实际混凝土的真实力学指标。

选择适当的混凝土细观结构模型, 在细观层次上划分单元, 将骨料单元、固化水泥砂浆单元和界面单元分别赋予不同的材料力学特征, 采用简单的破坏准则或以损伤模型反映单元刚度的退化过程, 借助于计算机的强大运算能力, 对混凝土复杂的力学行为进行数值模拟, 不仅能够避开外在因素对于试验结果的影响, 而且可直观再现混凝土细观结构损伤和破坏过程。

近十几年来, 人们提出了许多研究混凝土断裂过程的细观力学模型, 最具典型的有格构模型(lattice model)、随机粒子模型(random particle model)、随机骨料模型(random aggregate model)及唐春安等^[1-6]提出的随机力学特性模型等。

近年来, 在随机骨料模型研究方面取得了很大的进展。刘光廷等^[6]用随机骨料模型数值模拟了混凝土材料的断裂。宋玉普^[7]基于随机骨料模型模拟计算了单轴抗拉、抗压的各种本构行为, 引入了断裂力学的强度准则, 模拟了各种受力状态下的裂纹扩展。黎保琨等^[8]对碾压混凝土细观损伤断裂进行了研究, 模拟了碾压混凝土静力特性及试件尺寸效应。王宗敏等^[9]利用凸多边形骨料模型, 按正交异性损伤本构关系, 数值模拟了混凝土应变软化与局部化过程。混凝土细观力学研究成果表明, 混凝土细观力学数值模拟, 能够避开试验条件的客观限制和人为因素对试验结果的影响, 在计算模型合理和各相材料特性数据足够精确的条件下, 可以取代部分试验, 是混凝土细观力学研究的一个重要发展方向。

本文采用随机骨料模型建立三相混凝土数值试件, 运用各向同性 Mazars 损伤演化模型描述混凝土细观各相弹性损伤退化过程, 并利用有限元方法分别进行了混凝土二、三、四级配圆形、多边形骨料试件的单轴拉伸数值模拟。

1 随机骨料模型的生成及网格剖分

将混凝土看作由骨料、硬化水泥胶体以及两者之间的胶结带组成的三相非均质复合材料。借助富勒(Fuller)三维骨料级配曲线确定骨料颗粒数, 按照 Monte-Carlo 方法在试件内随机生成骨料分布模型, 并应用 ADVANCING FRONT 对混凝土试件进行四边形单元剖分, 同时对骨料单元、固化水泥砂浆单元及界面单元分

别赋予相应的材料特征参数.

1.1 骨料颗粒数的确定

混凝土骨料的含量由富勒级配曲线来确定.根据富勒级配理论,将混凝土材料的骨料颗粒按粒度大小规则地组合排列,粗细搭配,使混凝土成为密度最大、空隙最小的混合物.级配曲线是颗粒平均尺寸的函数,它限定了尺寸不得大于某一给定数值的某一种粒径的颗粒的百分数.富勒曲线方程为

$$P = 100\sqrt{\frac{D}{D_{\max}}}$$

(1)

式中: P ——骨料通过筛孔 D 的质量分数; D ——筛孔直径; $D_{\max}$ ——最大粒径.

对于二维平面问题,可用累积分布函数表示混凝土中一个内截面上任一点 $D < D_0$ 的概率,即

$$P_c(D < D_0) = P_k[1.065(D_0/D_{\max})^{1/2} - 0.053(D_0/D_{\max})^4 - 0.013(D_0/D_{\max})^5 - 0.0045(D_0/D_{\max})^8 + 0.0025(D_0/D_{\max})^{10}]$$

(2)

式中 P_k 为骨料体积与混凝土总体积的百分比.根据式(2)即可产生混凝土结构横截面上的骨料分布.

根据混凝土中骨料含量比例和骨料级配的比例,以典型的二级配、三级配和四级配混凝土标准试件为实例,分别计算出各试件的颗粒数,并实现了上述骨料模型的生成过程.试验所采用的试件为:湿筛二级配混凝土试件,边长为 150 mm 的正方形;湿筛三级配混凝土试件,边长为 300 mm 的正方形;湿筛四级配混凝土试件,边长为 450 mm 的正方形.所采用的骨料粒径为:小石 15 mm;中石 30 mm;大石 60 mm;特大石 120 mm.各级配混凝土试件截面内所含的圆形骨料颗粒数见表 1.

1.2 随机骨料的生成

设 t 为计算机在 $(0,1)$ 上产生的均匀分布的随机数,圆形骨料的骨料中心点为 (x_c, y_c) ,且 $x_c \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y_c \in [y_{\min}, y_{\max}]$ 则

$$\begin{cases} x_c = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})t \\ y_c = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min})t \end{cases}$$

(3)

式中: $x_{\min}, x_{\max}$ ——产生随机骨料区域的最小、最大横向坐标; $y_{\min}, y_{\max}$ ——产生随机骨料区域的最小、最大纵向坐标.同时要求 2 个骨料之间不相互侵入,要求任意 2 个圆的中心距离大于这 2 个球半径之和,即要求新生成的骨料 i 与前面所有的骨料 $j = 1, 2, \dots, i-1$ 满足

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > r_i + r_j$$

(4)

式中 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ ——任意 2 个圆形骨料的圆心; d_{ij} ——2 个圆心间的距离.多边形骨料是从圆形骨料演变而来的,即在圆形骨料内,随机生成凸多面体,然后进行凸多面体的延伸,延伸后的凸多面体相互之间也不能有侵入的现象发生.

1.3 网格的自动生成

混凝土中骨料边界形状都是不规则的,为适应这种不规则边界,应用 ADVANCING FRONT 网格生成器分别对混凝土圆形骨料和多边形骨料试件进行四边形单元剖分.

2 本构关系

假定混凝土各组分(骨料、硬化水泥砂浆和两者之间的界面)均为各向同性材料.各组分材料均采用各向同性的 Mazars 损伤本构模型^[10].以硬化水泥砂浆为例,说明各相材料的本构关系及损伤变量的变化规律.

根据单轴拉伸应力-应变关系曲线,假定在应力峰值之前,应力-应变为线性关系,材料无损伤,或者说初始损伤不扩展,即应力 $\sigma = E_0 \epsilon$ (ϵ 为应变),应力在大于应力峰值后,应力-应变曲线可用 $\sigma = (1 - D_t) E_0 \epsilon$ 来近似描述.其中 E_0 为弹性模量, D_t 为拉伸损伤变量. Mazars 采用式(5)来描述峰值应力以后的软化曲线.

$$\sigma = E_0 \left\{ \epsilon (1 - A_t) + \frac{A_t \epsilon}{\exp[B(\epsilon - \epsilon_f)]} \right\}$$

(5)

式中: A_t, B_t ——拉伸时的材料参数; ϵ_f ——峰值应力的应变.对于混凝土这类摩擦型材料,取 $0.5 < A_t < 1.0$, $10^4 < B_t < 10^5$, $0.5 \times 10^{-4} < \epsilon_f < 1.5 \times 10^{-4}$.由式(5)可导出损伤演化方程为

$$\begin{cases} D_t = 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon_f) \\ D_t = 1 - \frac{\varepsilon(1 - A_t)}{\varepsilon_f} - \frac{A_t}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} & (\varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases} \quad (6)$$

3 数值试验

3.1 数值试验的加载方式

为了得到完整的曲线,采用控制应变加载方式.这里的应变为试件上端面轴向平均位移与试件高度之比.试件上端面施加垂直方向的荷载,下端部受垂直方向约束,下端部中间部分固定^[11].

破坏准则为最大拉应变破坏准则,用弹性模量的折减来反映试件的损伤程度.假定 $\varepsilon \leq \varepsilon_f$ 时,试件的各个部位不会发生破坏,应力-应变呈线性关系; $\varepsilon > \varepsilon_f$ 时,发生损伤的单元将赋予损伤后新的弹性模量.二级配单轴拉伸混凝土试件损伤破坏分布如图 1 所示.二、三、四级配混凝土单轴拉伸应力-应变关系曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出:在数值模型加载到某荷载步以前,应力-应变近似呈线性关系,表明混凝土试件未发生损伤,在该步之后,应变增幅明显加大,说明混凝土试件内部的某些单元已发生损伤,细观结构的破坏已引起宏观响应;再继续加载,由于试件内部的损伤进一步加剧,应变值急剧增大.

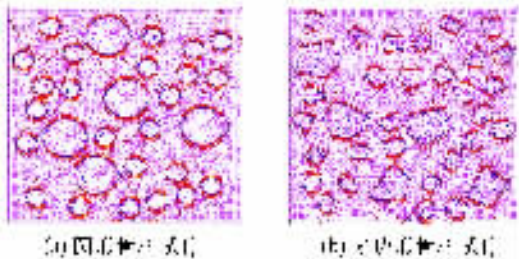


图 1 单轴拉伸混凝土试件损伤破坏分布
Fig.1 Damage distributions of concrete specimens under uniaxial tension

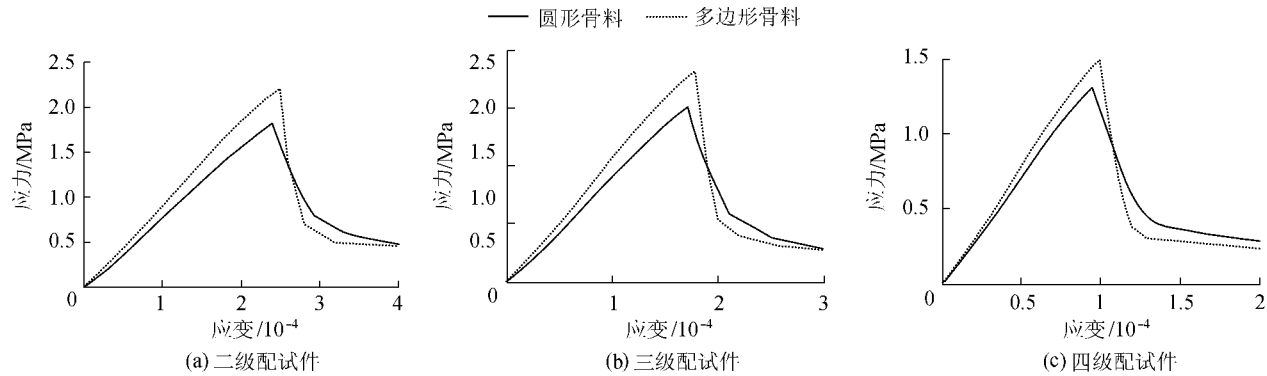


图 2 混凝土试件单轴拉伸应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves of concrete specimens under uniaxial tension

3.2 数值试验结果分析

从图 2 可以看出:在同一级配应力-应变关系曲线上,一方面,圆形骨料的拉伸强度低于多边形骨料的拉伸强度,另一方面,圆形骨料试件在应力峰值之前的曲线斜率小于多边形骨料的曲线斜率,而在应力峰值之后的软化阶段,圆形骨料试件的软化曲线则比多边形骨料试件的软化曲线平缓;二级配试件的极限应力值明显高于三级配试件的极限应力值,而三级配试件的极限应力值又明显高于四级配试件的极限应力值;二、三、四级配混凝土试件,随着级配的升高,试件尺寸的增大,其峰值应力对应的应变值在减小.

3.2.1 脆性分析

断裂力学一般用与断裂韧度有关的量来表示材料的韧性,但要有对裂纹的试件的测定才能获得断裂韧度这个物理量.为了能直观定量地描述混凝土试件抵抗断裂的能力,而又不需要做混凝土试件的断裂试验,可以利用应力-应变关系曲线定义的脆性指数^[4]来代替断裂韧度.如图 3 所示,将材料的应力-应变曲线以峰值应力所对应的应变为界限分成 2 段.脆性指数定义为图 3 中 I 和 II 部分之比,即

$$B = \frac{\int_0^{\varepsilon_0} \sigma \varepsilon d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_0}^{2\varepsilon_0} \sigma \varepsilon d\varepsilon} \quad (7)$$

式中 ϵ_0 为应力峰值所对应的应变.由此可见,脆性指数 B 反映了应力-应变曲线的脆性,脆性指数 B 越大,该曲线的峰值后段越陡,材料越脆.

运用上述脆性指数的定义,可以对圆形和多面体骨料的混凝土试件进行脆性分析,如图 4 所示.由图 4 可见,随着级配的升高,尺寸的增大,混凝土试件的脆性指数也会增大.多边形骨料混凝土试件的脆性指数明显高于圆形骨料混凝土试件的脆性指数.

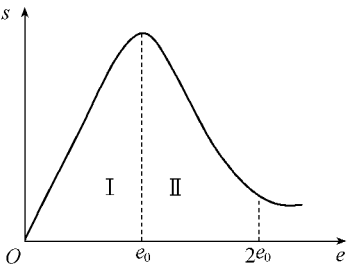


图 3 脆性指数的定义

Fig.3 Definition of brittleness index

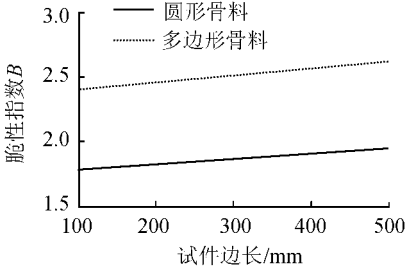


图 4 混凝土试件脆性指数变化趋势

Fig.4 Changing trend of brittleness index for concrete specimens

3.2.2 圆形骨料试件较多边形骨料试件软化曲线平缓的物理解释

在应力-应变关系曲线的软化阶段,圆形骨料试件的软化曲线与多边形骨料试件的软化曲线相交,圆形骨料试件的软化曲线比多边形骨料试件的软化曲线平缓.这是数值试验的宏观现象,该现象必然存在微观和细观的物理成因.

混凝土试件是由骨料、硬化水泥砂浆和两者之间的胶结层组成的复合材料.在这三相材料中,胶结层的强度是最弱的.在混凝土试件承载、裂缝尖端扩展到骨料以后,裂缝有 2 种继续扩展的方式:一种是向骨料内部扩展,这种扩展方式主要在骨料强度较低而砂浆强度较高的情况下发生;另一种情况是裂缝沿结合面扩展,裂缝沿结合面扩展的方向与原始裂缝成纯角^[8].裂缝扩展方向与向量 n_c 和 n_a 的关系如图 5 所示.

当裂缝已经沿结合面扩展后,进一步的扩展是沿结合面还是偏离结合面进入砂浆基体,由裂缝扩展方向的单位向量 n_c 和骨料的外法线方向的单位向量 n_a 决定.当 $n_c \cdot n_a > 0$ 时,裂缝进入砂浆基体,在砂浆基体中扩展.当 $n_c \cdot n_a < 0$ 时,裂缝仍沿着骨料和砂浆的结合面扩展.

对多边形骨料试件而言,在裂缝进入骨料和砂浆的结合面后,因 n_c 和 n_a 是一个确定的值, $n_c \cdot n_a$ 也是个确定的值, $n_c \cdot n_a > 0$ 时裂缝沿垂直于最大拉应力的方向进入砂浆基体进行扩展, $n_c \cdot n_a < 0$ 时裂缝将沿着多面体的结合面进行扩展.而对圆形骨料而言, n_a 是一个变化的值, $n_c \cdot n_a$ 也是一个变化的值,这样,裂缝进入结合面后会很快脱离结合面,而不可能沿着球形骨料的结合面长距离扩展.不同形状骨料试件的裂纹扩展轨迹如图 6 所示.因此,圆形骨料混凝土试件软化速率较多边形骨料混凝土试件的软化速率慢,反映在应力-应变图上,圆形骨料试件的软化曲线较多边形骨料试件的软化曲线平缓.

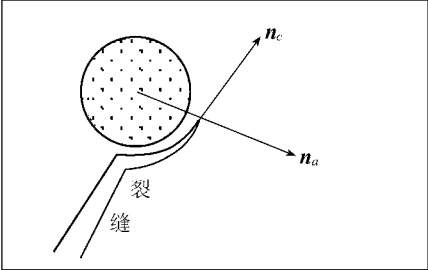


图 5 裂缝扩展方向与向量 n_c 和 n_a 的关系

Fig.5 Crack propagation direction n_c and vector n_a

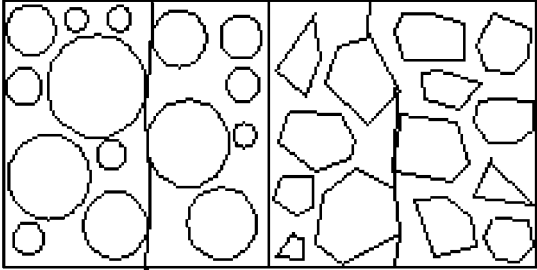


图 6 不同形状骨料试件的裂纹扩展轨迹

Fig.6 Crack propagating trajectories of aggregates with two shapes

4 结 论

通过对混凝土细观结构试件的数值模拟,得到以下结论 (a)二、三、四级配混凝土试件随着级配的升高,试件尺寸的增大,其峰值应力对应的应变值依次减小 (b)同一级配任意多边形骨料试件的极限承载力总体

上要大于圆形骨料试件的极限承载能力(c)多边形骨料混凝土试件的脆性指数明显高于圆形骨料混凝土试件的脆性指数(d)在达到极限应力之前,同等级配多边形骨料较圆形骨料有较大的刚度,但在极限应力之后的软化阶段,圆形骨料试件较多边形骨料试件的软化曲线平缓。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WITTMANN F H, ROELFDTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Mater Sci Engng, 1984, 68: 239-248.
- [3] 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.
- [4] 任朝军,杜成斌,戴春霞.三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(2):177-180.
- [5] 孙立国,杜成斌,戴春霞.大体积混凝土随机骨料数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(3):291-295.
- [6] 刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报:自然科学版,1996,36(1):84-89.
- [7] 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.
- [8] 黎保琨,彭一江.碾压混凝土试件细观损伤断裂的强度与尺寸效应分析[J].华北水利水电学院学报,2001,22(3):50-53.
- [9] 王宗敏,邱志章.混凝土细观随机骨料结构与有限元网格剖分[J].计算力学学报,2005,22(12):728-732.
- [10] 李兆霞.损伤力学及其应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [11] 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(10):27-35.

Influence of aggregate shape on tensile strength of concrete

QU Hong-chang, CHEN Guo-rong, XIA Xiao-zhou

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Concrete is conceptualized as a three-phase composite consisting of mortar, aggregate and their interface. The Monte-Carlo method is used to generate the random aggregate model, the Mazars isotropic damage evolution model is employed to describe the meso-mechanics deterioration of elastic damage of the concrete, and the finite element method is adopted to numerically simulate the uniaxial tension tests of two, three and four grade specimens with circular and polygonal aggregates, respectively. The results show that the ultimate load capacity of an arbitrary polygonal aggregate specimen is greater than that of a circular one of the same grade, and that the concrete strength from two grade up to four grade decreases in sequence. It is also concluded that, during the softening stage of the stress-strain curve, the softening curves of the circular aggregate specimens are gentler than those of the polygonal ones, and that the brittleness indexes of the polygonal aggregate specimens are larger than those of the circular ones.

Key words: uniaxial tension; random aggregate model; circular aggregate; meso-mechanics; numerical simulation