

混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟

夏晓舟 章 青 汤书军

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:在细观层次上,把混凝土看作是由水泥砂浆、骨料及二者之间的界面组成的复合材料,应用渐变网格剖分方法对随机投放的骨料、界面和水泥砂浆进行网格剖分,删除多余节点,重新排列节点顺序,生成三维随机骨料分布的细观有限元数值模型.利用该模型分别进行了混凝土的单轴拉伸、压缩、劈拉和梁弯曲等数值试验,分析了不同界面参数、不同砂浆损伤参数、不同加载形式对混凝土试件的变形特点、破坏形式以及承载能力的影响,探讨了混凝土宏观力学性能(如应变软化和剪胀等性质)的细观机制.

关键词:随机骨料分布;网格渐变剖分;三维细观数值模型;数值试验;Mazars 损伤模型

中图分类号: TU528.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)03-0319-07

混凝土细观上的破坏特性要采用扫描电镜等先进的实验设备进行测试,只有加载和测试同时进行,才能反映该载荷水平下的损伤破坏情形,所以试验需要精心设计且需花费大量人力和物力,即便如此,试验成果仍然相对离散.近年来,随着计算机技术的高速发展,以及图形软件和网格剖分软件的升级,用数值实验进行材料损伤破坏过程的研究已成为热点.细观数值试验模型由原来的二维^[1-8]发展到三维,由圆骨料^[1-3]发展到椭圆骨料^[4]进而到任意多边形骨料^[5-7]模型,由原来的密剖分圆形(包括椭圆)骨料^[8]到稀疏剖分骨料模型,这些模型均能满足精度要求.对于三维问题,映射网格方法^[1-3,6]剖分的网格规模过大,以目前的单机不得不采用波前算法,但该方法内、外存数据来回交换,特别耗时.为此,本文采用渐变方式只在骨料表面密集但在骨料内部可以变得稀疏的网格剖分方法,既可以有效减少单元数目,又能体现混凝土的细观构造特性,借助细观有限元模型进行损伤破坏的追踪模拟及宏观性能的探讨.

为了探讨混凝土试件细观破坏特征和极限承载能力,本文采用 Mazars 损伤模型模拟水泥砂浆的本构行为,采用 Mohr-coulomb 破坏准则分析界面的强度特性,并以弥漫裂缝的损伤模型模拟界面单元破坏后的本构行为,采用 Drucker-Prager 模型模拟骨料的本构行为.借助三维细观损伤有限元模型进行单轴拉伸、劈拉、压缩、不同围压下的压缩试验和梁弯曲等数值试验,从而分析不同界面强度参数和不同砂浆的损伤参数对混凝土试件的变形特点、破坏特征以及承载能力的影响.

1 三维细观有限元模型的建立

在进行数值试验时,混凝土可简化为由骨料、水泥砂浆及二者之间的界面层组成的复合材料.骨料是随机分布的,由混凝土的级配和骨料占有率便可算出骨料颗粒数.考虑到网格映射的方法自由度大,一般的计算机内存不够,而且内外存数据的来回交换使得计算特别耗时,为此,本文采用实体骨料剖分方法.待骨料随机投放后,按网格渐变的剖分方法,即按骨料边界密集而内部逐步稀疏的原则进行剖分,这样既能有效减少单元数,节省计算量,又能保证精度要求.对于界面层,厚度不能取得过低,以至于剖分界面单元形状不好,导致计算不精确,一般取骨料粒径的 1/20,当然这要视骨料边界处的单元密集度而定.整体剖分后,界面与骨料交界处、界面与水泥砂浆交界处都会产生重复的节点,因而必须删除那些多余节点并重新进行排序.界面与骨料的网格剖分如图 1 所示.

收稿日期:2006-09-08

基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金重点资助项目(50539090);国家自然科学基金资助项目(50679022)

作者简介:夏晓舟(1976—),男,江西泰和人,博士,主要从事混凝土细观破坏力学方面的研究.

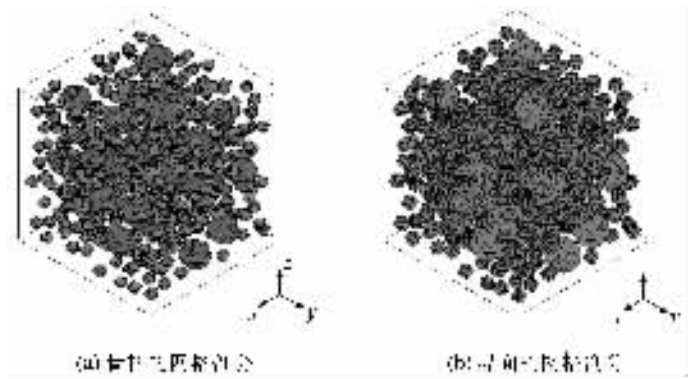


图 1 网格剖分

Fig.1 Mesh generation

2 细观各组分的本构关系

骨料采用 Drucker-Prager^[9]本构模型,界面采用 Mohr-coulomb^[9]的破坏准则,破坏后采取弥漫裂纹的损伤模型^[10]模拟界面开裂后的行为,水泥砂浆则采用各向同性的 Mazars 损伤本构模型^[11-12].对于不同的加载工况,采用的损伤本构模型也不尽相同,下面分别叙述.

2.1 单轴拉伸情况

根据单轴拉伸应力应变曲线,假定在峰值应力前,应力-应变为线性关系,材料无损伤,或者初始损伤不扩展,即 $\sigma = \epsilon E_0$,应力大于峰值应力后,应力应变曲线可用 $\sigma = \epsilon E_0(1 - D_T)$ 近似描述,其中 E_0 为初始弹模, D_T 为拉伸损伤变量. Mazars 采用下式来描述峰值应力后的软化曲线,即

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

式中: A_T, B_T ——拉伸时的材料参数; ϵ_f ——峰值应力对应的应变.对于摩擦型材料,取 $0.5 < A_T < 1, 10^4 < B_T < 10^5$ 以及 $0.5 \times 10^{-4} < \epsilon_f < 1.5 \times 10^{-4}$.由式(1)很容易导出如下损伤演化方程:

$$\begin{cases} D_T = 0 & \epsilon \leq \epsilon_f \\ D_T = 1 - \frac{\epsilon(1 - A_T)}{\epsilon_f} - \frac{A_T}{\exp[B_T(\epsilon - \epsilon_f)]} & \epsilon > \epsilon_f \end{cases} \tag{2}$$

对于劈裂和梁弯曲同样采取拉损伤模型.

2.2 单轴压缩情况

单轴压缩时的应变张量为

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu\epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu\epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (\epsilon_1 < 0) \tag{3}$$

定义等效应变为 $\epsilon^* = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2} = -\sqrt{2}\nu\epsilon_1$. $\epsilon_i (i = 1, 2, 3)$ 为主应变.当等效应变与损伤应变阈值相等时,即 $\epsilon^* = \epsilon_f$,则 $-\epsilon_1 = \epsilon_f/(\nu\sqrt{2})$.和单轴拉伸类似,单轴压缩应力应变曲线可以用下式来描述:

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_0 \epsilon_1 & -\epsilon_1 \leq \frac{\epsilon_f}{\nu\sqrt{2}} \\ \sigma_1 = E_0 \left\{ \frac{\epsilon_1(1 - A_C)}{-\nu\sqrt{2}} + \frac{A_C \epsilon_1}{\exp[B_C(-\nu\epsilon_1\sqrt{2} - \epsilon_f)]} \right\} & -\epsilon_1 > \frac{\epsilon_f}{\nu\sqrt{2}} \end{cases} \tag{4}$$

式中 A_C, B_C 为材料压缩时的材料参数,其变化范围一般为 $1 < A_C < 1.5, 1000 < B_C < 2000$.同理,当等效应变超过损伤应变阈值时,应力应变曲线可用 $\sigma = \epsilon E_0(1 - D_C)$ 来描述,其中 D_C 为压缩损伤变量.于是很容易导出单轴压缩时的损伤演化方程

$$\begin{cases} D_C = 0 & \epsilon^* \leq \epsilon_f \\ D_C = 1 - \frac{\epsilon_1(1 - A_C)}{\epsilon^*} - \frac{A_C}{\exp[B_C(\epsilon^* - \epsilon_f)]} & \epsilon^* > \epsilon_f \end{cases} \tag{5}$$

2.3 多轴应力状态情况

多轴应力状态下 ,拉、压损伤之间存在耦合效应 ,Mazars^[11]建议用下式描述单元的总损伤.

$$D = \alpha_T D_T + \alpha_C D_C$$
 (6)

当 $\alpha_C = 0$ 时为纯拉伸 , $\alpha_T = 0$ 时为纯压缩 组合情况 $\alpha_C + \alpha_T = 1$. 耦合系数 α_T, α_C 定义为

$$\begin{cases} \alpha_T = \sum_i \frac{H_i \epsilon_{Ti} (\epsilon_{Ti} + \epsilon_{Ci})}{\tilde{\epsilon}^2} \\ \alpha_C = \sum_i \frac{H_i \epsilon_{Ci} (\epsilon_{Ci} + \epsilon_{Ti})}{\tilde{\epsilon}^2} \end{cases}$$
 (7)

式中 H_i 为 Heaviside 函数 , $\tilde{\epsilon}^2 = \sum_i H_i (\epsilon_{Ti}^2 + \epsilon_{Ci}^2 + 2\epsilon_{Ti}\epsilon_{Ci})$, $\epsilon_i = \epsilon_{Ti} + \epsilon_{Ci}$, ϵ_{Ti} 和 ϵ_{Ci} 分别为正主应力和负主应力引起的应变.

3 各种试验损伤破坏过程的数值模拟

运用三维细观有限元模型分别进行单轴拉伸、劈裂、单轴压缩、假三轴(不同围压下的压缩试验)和梁弯曲的数值试验 ,水泥砂浆根据受载情况赋予各自对应的损伤模型 ;界面赋予 Mohr-coulomb 破坏准则 ,破坏后按弥散裂缝形式^[11-12]的损伤本构进行试验 ,即界面破坏后 ,假设裂缝均匀的充满整个单元空间 ,且沿裂缝垂直的方向的弹模折减一个系数 ,相当于损伤参数 ;骨料赋予 Drucker-Prager 本构模型 ,材料参数见表 1^[3]. 对于单轴拉伸、劈裂和假三轴试验 ,采用直径为 100 mm ,高为 200 mm 的混凝土圆柱体试件 ,对于单轴压缩试验 ,采用 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土方块试件 ,对于梁弯曲试验 ,采用 150 mm × 220 mm × 1 600 mm 的长方体试件 ,且只在梁中部区域(150 mm × 220 mm × 220 mm)采用随机骨料的细观有限元模型 ,两端采用宏观的混凝土有限元模型 .混凝土赋予 Drucker-Prager 本构模型的数值模拟结果及分析分别叙述如下 .

3.1 单轴拉伸

对混凝土圆柱试块逐步施加轴向拉伸位移荷载 ,底部轴向约束 ,损伤破坏情况如图 2 所示 ,顶部平均拉应力和轴向平均应变的关系曲线如图 3 所示 .

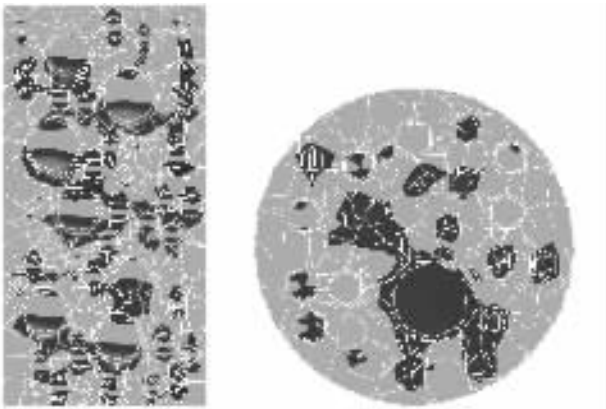


图 2 极限荷载下纵剖面 and 横截面的损伤分布
Fig.2 Damage distribution in longitudinal section and transverse section under limit loads

3.2 劈裂

对混凝土圆柱块进行劈裂试验(图 4) ,一侧施加线分布约束 ,另一侧逐步施加线分布荷载 ,所得极限荷载为 69.23 kN ,劈裂抗拉强度计算公式为

$$f_{ts} = 2P/\pi LD$$
 (8)

表 1 混凝土各组分材料参数

Table 1 Material parameters of each component of concrete

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	内聚力/ MPa	摩擦角/ (°)	强化模量/ MPa
骨 料	52 000	0.23	10.0	70	弹脆性
水泥砂浆	26 000	0.20	3.0	50	2 500
界 面	20 000	0.18	1.7	45	弹脆性
混凝土	28 000	0.167	2.5	55	5 000

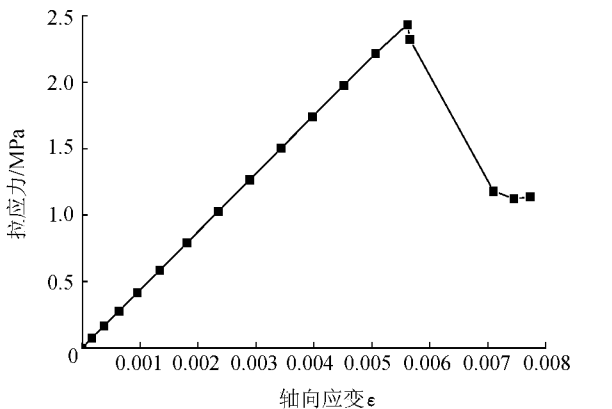


图 3 拉应力和轴向平均应变的关系曲线
Fig.3 Relationship between tensile stress and axial mean strain

式中： L ——柱体的长度； D ——柱体直径。

算出混凝土的抗拉强度值为 2.2 MPa，与单轴拉伸试验相比要小一些。由劈裂试验得到的极限承载有一定的随机性，因为不同的荷载施加部位（沿周边）由于骨料的随机分布将会导致不同的结果，所以要通过劈裂试验来推求抗拉强度，需进行多组试验，每组试验对应不同的荷载施加部位（相应的位移约束也应调整到与荷载共线的部位），然后将所有劈裂试验的结果进行统计平均，以最终确定混凝土的抗拉强度。

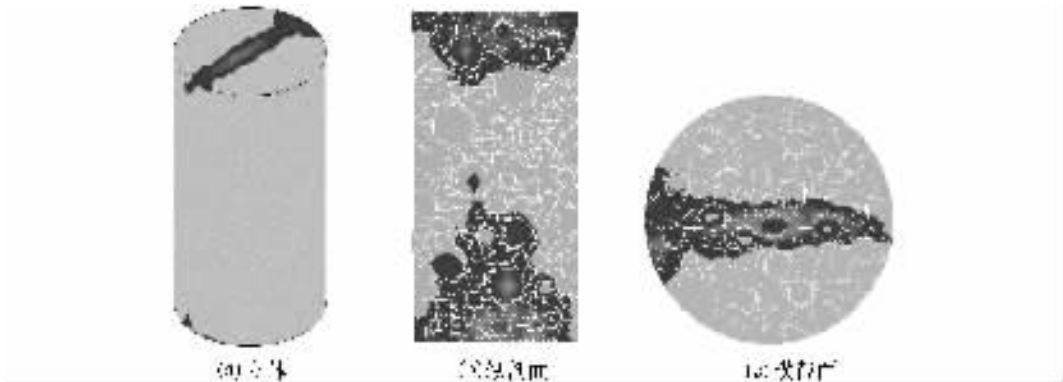


图 4 劈裂损伤分布

Fig.4 Splitting damage distribution

3.3 单轴压缩

对混凝土方块分别进行 2 种压缩试验。加载机与试块表面接触时会产生摩擦，从而限制试块的横向变形，若人为地增强混凝土试块的承载能力，则测出来的抗压强度偏高，应用到工程上则会产生风险，所以通常要在试块表面抹上油以消除摩擦影响。通过细观数值试验模拟损伤破坏结果如图 5 和图 6 所示。对比这 2 种情形下的损伤分布，不难发现不考虑摩擦影响时试块更易破坏，且损伤几乎分布整个试块空间，承载能力比有摩擦影响时要低得多，为 22.8 MPa，而有摩擦影响时则为 35.7 MPa。

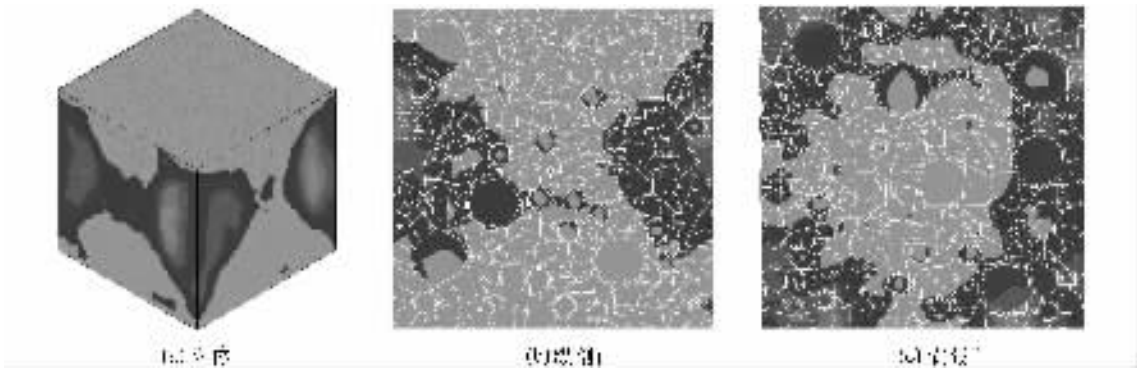


图 5 考虑摩擦影响的方块单轴压缩时损伤分布

Fig.5 Damage distribution in concrete block under uniaxial compression with consideration of friction effect

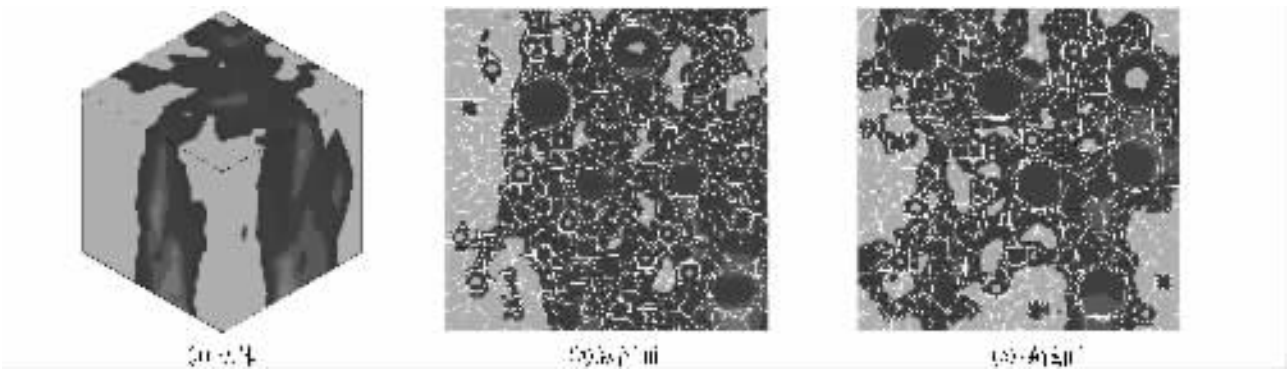


图 6 不考虑摩擦影响的方块单轴压缩时损伤分布

Fig.6 Damage distribution in concrete block under uniaxial compression without consideration of friction effect

3.4 不同围压下的假三轴试验

对混凝土圆柱体试块分别进行不同围压下的压缩试验,即假三轴试验,以考察混凝土的软化特性和硬化特性.围压和轴压是同步逐渐递加上去的,对于围压,不同递加比例对应的轴向压应力和压应变之间的关系曲线如图 7 所示.图 7 所标示的围压 σ_2 和 σ_3 的值,为试件在加载过程中达到的最大值.这里的压应变为受压试件上端面轴向平均位移与试件高度之比.从关系曲线可以看出,当围压低时,屈服强度低,随着围压增大,峰值强度和屈服强度都增高,且软化也逐步呈现脆性特征,即围压越大,压碎的可能性比压剪的可能性大.为了考察砂浆的力学特性与宏观混凝土的力学特性之间的关系,本文研究了砂浆损伤参数对混凝土单轴压缩力学性能的影响,如图 8 所示.从图 8 可以看出,损伤参数 A_c 越大,混凝土强化特性表现得越强,软化特性相差不大,而损伤参数 B_c 越大,混凝土强化特性却表现得越弱.

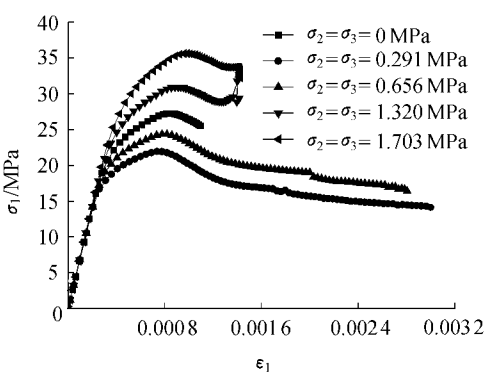


图 7 不同围压下的应力应变关系曲线

Fig.7 Stress-strain curves for different confining pressures

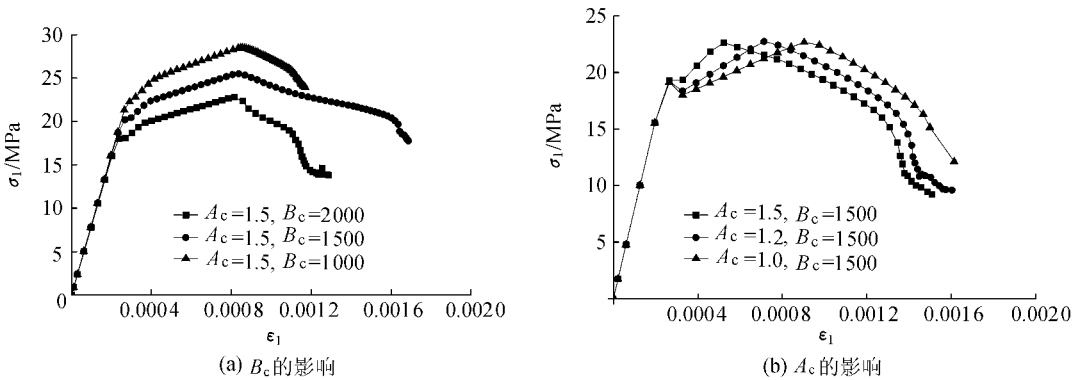


图 8 砂浆损伤参数对混凝土压缩特性的影响

Fig.8 Effect of mortar damage parameters on compression property of concrete

3.5 梁弯曲试验

对梁试件进行 4 点弯曲试验(图 9),梁截面的损伤分布如图 10 所示,梁中央底部的损伤演化如图 11 所示.从图 11 可以看出,刚出现损伤的时候,损伤是均匀分布的,但很快损伤聚集,逐步局部化,最终发展成宏观裂纹,向梁的上部延伸.梁的承载能力主要受控于界面的力学性质.从图 12 可以看出,界面强度越强,界面软化模量越小(越缓),梁的承载能力就越强.同样,砂浆的损伤参数 A_T 越小,即软化段越缓,则它阻止损伤出现局部化的能力就越强,因而导致梁的承载能力也越高,如图 13 和图 14 所示(另一损伤参数 B_T 都取 10000).

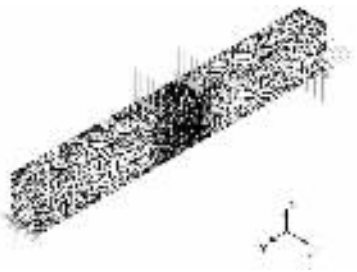


图 9 4 点弯曲梁网格剖分及载荷和约束
Fig.9 Loads , constraints and mesh generation for 4-point bending beam

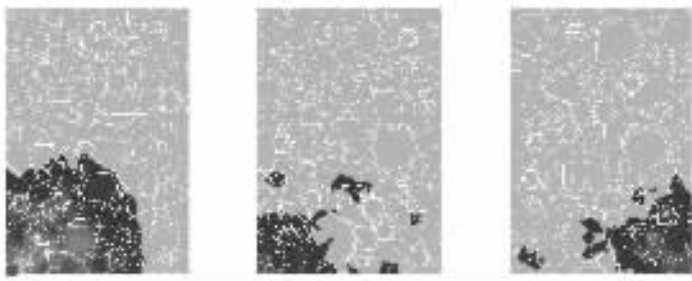


图 10 梁中部任意 3 个横截面的损伤分布

Fig.10 Damage distributions in three random transverse sections located at the middle of beam

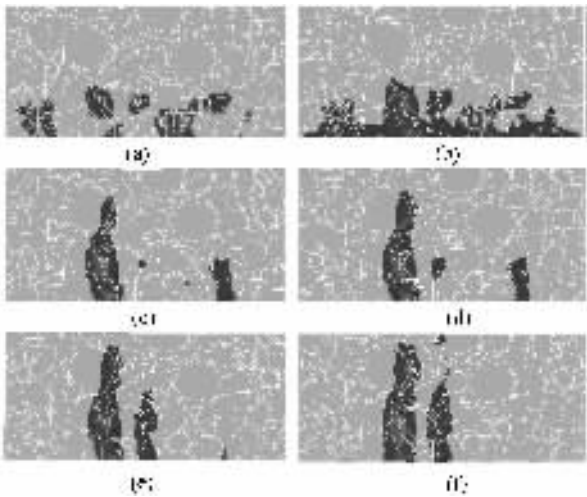


图 11 梁中央下半部纵剖面损伤演化过程

Fig.11 Damage process for longitudinal section in lower part at the center of beam

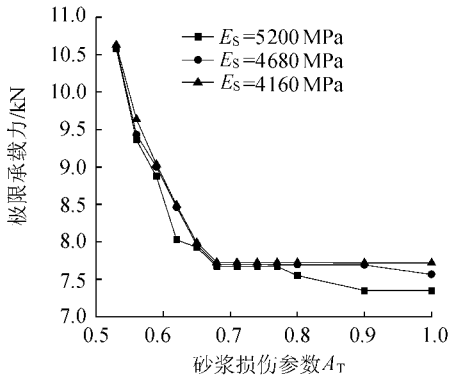


图 13 界面软化模量 E_S 和砂浆损伤参数 A_T 对承载能力的影响

Fig.13 Effects of interface softening modulus E_S and mortar damage parameter A_T on bearing capacity

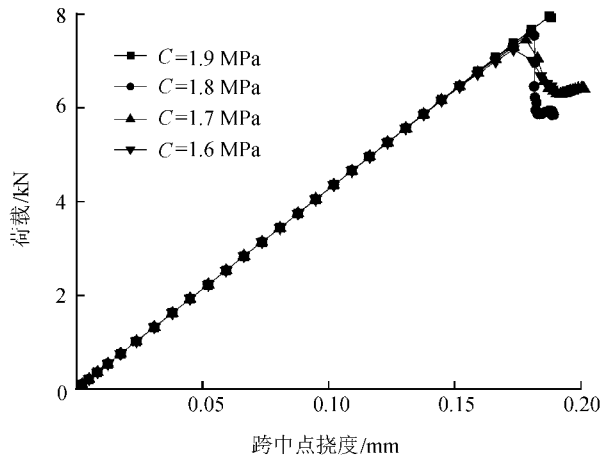


图 12 界面强度 C 对承载能力的影响

Fig.12 Effect of interface strength on bearing capacity

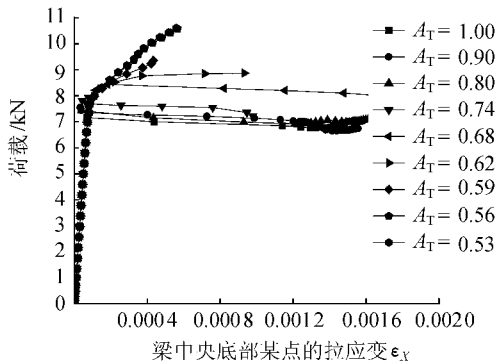


图 14 砂浆损伤参数 A_T 对承载能力的影响 ($E_S = 5\,200\text{ MPa}$)

Fig.14 Effect of damage parameter A_T on bearing capacity ($E_S = 5\,200\text{ MPa}$)

4 结 论

本文从混凝土的微观结构出发,将混凝土简化为由水泥砂浆、骨料及二者之间的界面组成的三相复合材料,根据试件尺寸随机生成骨料,采用渐进网格剖分的方法剖分骨料,在不影响计算精度的前提下,在单机下进行三维细观有限元的模拟。

运用三维细观有限元模型分别进行了单轴拉伸、劈裂、单轴压缩、假三轴(不同围压下的压缩试验)和梁弯曲的数值试验,并对各试验的损伤分布、损伤演化及裂纹发展整个破坏过程进行了追踪模拟,得出以下结论:

- a. 由劈裂试验得出的抗拉强度低于单轴拉伸试验得出的抗拉强度,原因可能是劈裂试验施加荷载的部位与骨料的随机分布有很大关联。
- b. 对单轴压缩试验而言,考虑施加荷载与试件表面的摩擦效应的情况下,得到的单轴抗压强度远大于不考虑摩擦效应所得到的单轴抗压强度,且二者之间的损伤分布存在极大的差异。对于不考虑摩擦效应的试块,其损伤分布几乎充满整个试块,而考虑摩擦效应的情形,损伤只分布在试块周围的一些地方。
- c. 对不同围压下的压缩试验,当围压低时,混凝土屈服强度低,随着围压的加大,峰值强度和屈服强度都增高,且软化也逐步呈现脆性特征,即围压越大,压碎的可能性比压剪的可能性大。
- d. 损伤参数 A_c 越大,混凝土强化特性表现得越强,软化特性相差不大,而损伤参数 B_c 越大,混凝土强

化特性却表现得越弱.

e. 界面强度参数越强,界面软化模量越小(越缓),梁承受弯曲的能力就越强;同样,砂浆的损伤参数 A_T 越小,即软化段越缓,则它阻止损伤出现局部化的能力就越强,因而导致梁的承载能力也越强.

由于本文采用的是应力空间中的本构关系,不能很有效地处理材料的下降段,尤其是受拉情形,这一点从梁弯曲数值试验即可看出,对于单轴拉伸,如果采用力加载的模式进行控制,则很难得到下降段的应力-应变关系.所以本文建立的混凝土细观各组分的应变空间本构关系将使得细观数值试验更为有效,也能更好地揭示一些宏观力学性质的内在机理.

参考文献:

[1] 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,1996,36(1):84-89.
[2] 彭一江,黎保琨.碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J].水利学报,2001,11(6):19-22.
[3] 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(10):27-58.
[4] 李友云,崔俊芝.具有大量椭圆颗粒/孔洞随机分布区域的计算机模拟及其改进三角形自动网格生成算法[J].计算力学学报,2004,21(5):540-545.
[5] 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.
[6] 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.
[7] WANG Zong-min, KWANAKH C. Meso-scopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh [J]. Computer and Structures, 1999, 70: 533-544.
[8] DE SCHUTTERG T. Random particle model for concrete based on Delaunay triangulation[J]. Material Structure, 1993, 26: 67-73.
[9] 陈惠发.工程材料的本构方程:塑性卷[M].余天庆,译.武汉:华中科技大学出版社,1999.
[10] Bazant Z P. Nonlocal damage theory based on micromechanics crack interaction[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 120: 593-617.
[11] MAZARS J. Application de la mecanique de l'endommagement au comportement non lineaire et A la rupture du beton de structure[J]. These de Doctoral d'Etat, Paris VI, 1984.
[12] 余天庆,钱济成.损伤理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,1993.

Numerical simulation of meso-damage process for concrete material

XIA Xiao-zhou, ZHANG Qing, TANG Shu-jun

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

Abstract :In mesoscopic aspect, concrete was taken as a three-phase composite consisting of cement mortar matrix, aggregates and their interfaces. By use of gradually-transitional mesh generation method, the random distributed aggregates, the interfaces and the mortar matrix are meshed in turn. By deletion of the redundant nodes and reordering of the nodes, a meso-finite element model for 3D randomly distributed aggregates was finally established. The model was applied to numerical simulation of uniaxial tensile test, uniaxial compression test, splitting tensile test, and bending test of beam. The deformation characteristics, failure modes and the carrying capacity under different interface parameters, different mortar damage parameters and different loading patterns were analyzed, and the meso-mechanism of some macro-mechanical performances of concrete (such as strain softening and shear dilatancy) was discussed.

Key words :random aggregate distribution; gradually-transitional mesh generation; three-dimensional meso-numerical model; numerical experiment; Mazars damage constitutive model