

三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟

任朝军¹ 杜成斌¹ 戴春霞²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098 ; 2.江苏省鸿源招标代理有限公司,江苏 南京 210017)

摘要 将混凝土看成是由骨料、界面和砂浆组成的非均质复合材料,采用非线性有限元软件 Marc 对东江拱坝三级配混凝土试件单轴受拉、单轴受压破坏的全过程进行数值模拟.按照试件的实际配比计算出各种粒径骨料的数目,采用蒙特卡罗法对混凝土骨料进行随机投放,生成试件的随机骨料模型.研究中,单轴受拉时采用最大拉应力准则,并考虑了材料的软化,单轴受压时采用线性莫尔-库伦准则.结果表明,混凝土的力学性能与其内部的细观结构组成密切相关,材料的宏观破坏是细观结构破坏累积的结果,无论是受拉时的开裂还是受压时的屈服,几乎都首先发生在界面上.

关键词 细观力学;单轴破坏;三级配混凝土;随机骨料模型

中图分类号:TV431 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)02-0177-04

混凝土是一种多相非均质复合材料,其力学性能受材料细观结构的影响较大.为了得到混凝土的各种力学参数,通常要做大量的试验,耗费大量的人力物力,而所得的结果却有一定的局限性.以细观力学为基础的数值模拟方法可以方便准确地研究混凝土的各种力学性能,许多学者在该领域进行了卓有成效的研究,提出了多种数学模型. Gursor^[1]于 1977 年提出了 Gurson 模型,用以描述微孔洞损伤对材料塑性变形的影响. Tvergaard^[2]在 Gurson 工作基础上,提出了改进的 Gurson 模型,使其更具有一般性,并且考虑了微孔洞之间相互作用的效应. Bazant^[3]等提出了随机粒子模型,主要用于模拟颗粒固体材料.本文以计算细观力学为基础,从细观层次上研究混凝土力学破坏的机理,为大体积混凝土静、动力学性能研究提供可能的新途径.

1 数值模拟的本构模型

单轴受拉试件采用的非线性本构模型见图 1,该模型能够很好地模拟材料的脆性破坏^[4].模型采用最大拉应力破坏准则,并且考虑了材料的软化现象,当材料中的最大主拉应力超过给定的值时,在垂直于最大主拉应力的方向产生裂纹.采用软化模量对裂纹出现后材料的软化现象进行描述.对于轴压试件,采用线性莫尔-库伦本构关系.

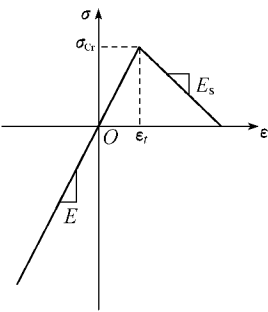


图 1 非线性本构模型

2 随机骨料模型的生成和网格剖分

本文采用随机骨料模型对东江拱坝三级配混凝土试件的单轴破坏进行数值模拟^[5].轴拉试件采用 450 mm × 450 mm × 3 600 mm 的等截面试件,其应力均匀段为 450 mm × 450 mm × 1 400 mm.平面等效试件尺寸为 450 mm × 1 400 mm,采用 Walraven 公式将满足三级配的累积分布概率转化为二维的 $D < D_0$ 概率,计算出 3 种代表粒径(60 mm、30 mm 和 12 mm)的骨料个数分别为 31、106 和 825.受压试件采用 $\varnothing$ 450 mm × 450 mm 的圆柱体,其平面等效尺寸为 398.8 mm × 450 mm,计算出 3 种代表粒径骨料数目分别为 9、30 和 235,采用蒙特卡罗方法生成随机骨料模型,见图 2(a) 2(b).

网格剖分之前,预先将颗粒的半径放大 0.05 倍,将其作为界面层的外边界,内边界为将原半径内缩 0.05 倍.网格剖分骨料、界面和砂浆 3 个部分分别进行,然后对 3 种不同的材料参数分别赋值.计算采用的力学

收稿日期:2004-07-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(59739180);江苏省建筑工程管理局资助项目(JS200348);河海大学学科(院士)基金资助项目(02-01)
作者简介:任朝军(1980—),男,河南许昌人,硕士,主要从事混凝土的细观数值模拟研究.

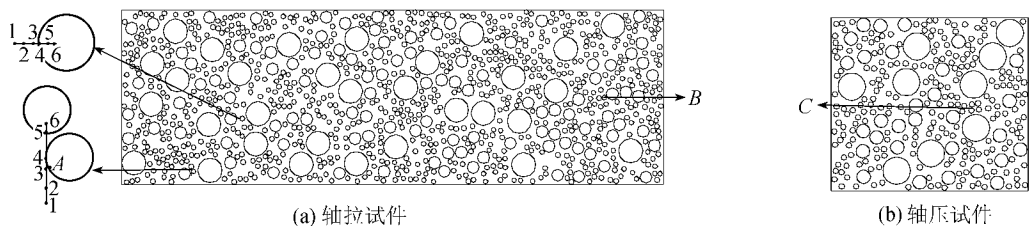


图 2 试件随机骨料模型

Fig.2 Random aggregate model of specimen

参数见表 1^[6~8]. 本文采用 Advancing Font 网格自动剖分方法, 单元为四结点等参元. 剖分后轴拉试件的单元总数为 92 260, 节点总数为 92 614, 轴压试件的单元总数为 26 228, 节点数目为 26 428. 二者采用的单元边长约为 3 mm, 界面单元的厚度为颗粒半径的 0.1 倍.

3 单轴受拉试件的计算结果分析

对于轴拉试件, 用弧长法计算时, 初始弧长取 0.1, 最大弧长取 0.3, 加载方向为水平方向, 得到试件的极限承载力为 293.6 kN, 极限抗拉强度为 1.45 MPa, 与试验得到的极限抗拉强度 1.6 MPa 误差为 9.3%, 计算的总增量步数为 22 步. 由计算结果可知, 在第 16 个增量步, 荷载为 265.3 kN, 达到了极限荷载的 90%, A 点附近(界面, 坐标为(180.9, 31.5), 坐标原点在左下角)和 B 点附近(界面, 坐标为(1240.4, 223.6))几个界面单元的应力达到了极限拉应力(A, B 位置见图 2a)), 最先出现微裂纹, 而试件其他部分的骨料和砂浆仍然处于弹性阶段. 随着荷载的继续增加, A, B 之间一些界面单元的应力逐渐达到极限拉应力, 试件在这些地方出现微裂纹. 荷载继续增加, 这些裂纹不断扩张、合并, 第 22 增量步时在 A 点附近形成一条贯穿试件的大裂缝, 试件破坏, 见图 3.



图 3 单轴受拉试件最终裂缝

Fig.3 Final cracks of specimen subjected to uniaxial tension

荷载-位移曲线见图 4, 曲线明显出现下降段, 并且在初始破坏点开裂很长时间后, 试件的荷载-位移曲线才出现弯曲, 即试件宏观裂缝的出现要明显滞后于微裂缝, 由此可以得出试件的宏观破坏是细观破坏累积的结果. 细观层次的破坏和损伤是宏观破坏的内因和基础的结论. 图 5 为 A 点的应力-应变关系曲线, 其有关数值与计算采用的参数基本一致, 说明计算的精度和结果是可靠的. 图 6(a)给出了纵坐标为 170 mm 的水平面上(见图 2a)左边局部放大图)各种材料开裂前后(分别为第 17 步和第 18 步)水平应力比较, 其中 1、2 为砂浆节点, 3、4 为界面节点, 5、6 为骨料节点. 由图 6(a)可以看出, 开裂后界面单元的应力急剧下降到零. 由于界面的开裂, 相邻骨料和砂浆单元的应力得到较大释放, 均比开裂前有较大的减小, 其中 3、4 点附近为最终破坏裂缝的位置. 图 6(b)为横坐标为 180 mm 的竖直面(见图 2a)左边的局部放大图)不同材料开裂前后(分别为第 17 步和第 18 步)的应力比较, 其中 1、2 为砂浆节点, 3、4 为界面节点, 5、6 为骨料节点. 界面开裂后, 立即退出工作, 原本由界面和与其相邻的砂浆、骨料共同承受的荷载全部由砂浆和骨料来承受, 表现在图 6(b)上就是界面节点的应力急剧下降, 而相邻砂浆和骨料节点的应力明显增大. 通过砂浆和骨料的传递, 该竖直面上另外一些界面单元逐渐开裂.

表 1 计算采用的力学参数

Table 1 Mechanical parameters adopted in calculation						
类型	弹性模量 E/GPa	泊松比	软化模量 E_s/GPa	抗拉强度 σ_t/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/MPa
骨料	55.5	0.16	11.1	6.0	42.5	23.53
界面	25.0	0.16	5.0	2.0	30.0	4.80
砂浆	26.0	0.22	5.2	2.5	30.0	5.88

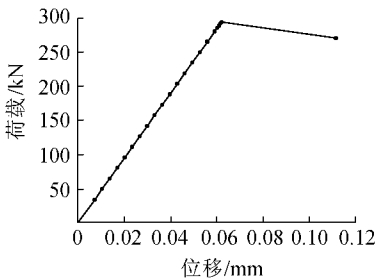


图 4 荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve

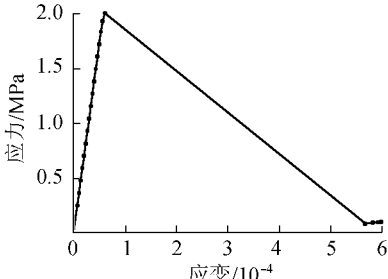


图 5 A 点的应力-应变关系

Fig.5 Stress-strain curve at point A

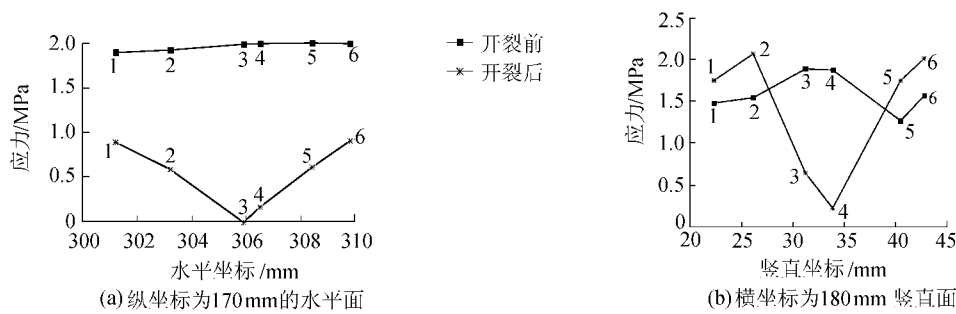


图 6 不同平面上各点开裂前后的水平应力

Fig.6 Horizontal stress at each point in different planes before and after cracking

图 7 (a) 给出了界面强度分别为 1.8 MPa、2.0 MPa 和 2.2 MPa 时 B 点 (界面) 的应力-应变关系, 对应的破坏荷载分别为 167.3 kN、293.6 kN 和 313.9 kN。由图 7 (a) 可以看出, 试件的极限承载力随着界面强度的增大而增大, 且界面强度的大小只影响试件的极限承载力, 对其他力学参数影响很小。图 7 (b) 给出了界面软化模量不同时 B 点的应力-应变关系比较。随着软化模量的增大, 下降段逐渐变陡, 但下降段对软化模量的变化不是太敏感。

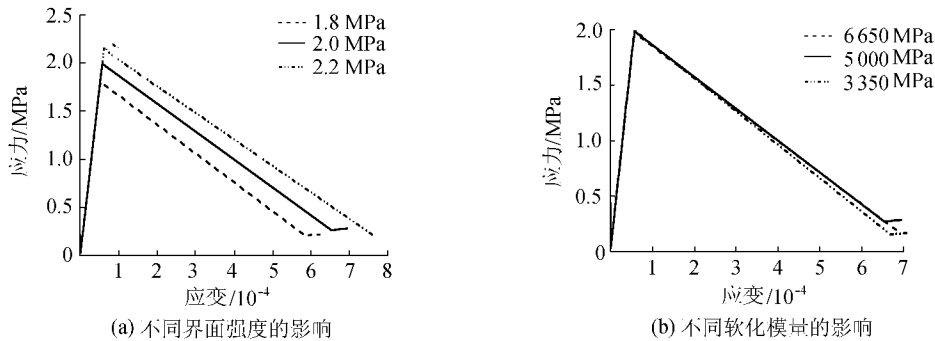


图 7 不同界面参数时 B 点的应力-应变关系

Fig.7 Stress-strain curves for point B with different interface parameters

4 单轴受压试件的计算结果分析

弧长法计算时初始弧长取 0.1, 最大弧长取 0.3, 加载方向为竖直方向, 得到试件的极限承载力为 4 165.3 kN, 抗压强度为 23.21 MPa, 与试验得到抗压强度 21.1 MPa 的误差为 8.3%, 计算总增量步为 87 步。图 8 为计算得到的荷载-位移曲线。由于采用了线性莫尔-库伦准则, 认为足够多的单元产生屈服结构即破坏, 故曲线未见有下降段。第 37 增量步的荷载为极限荷载

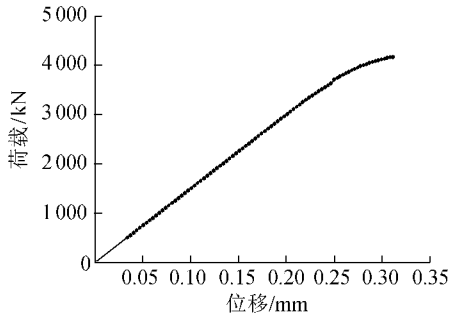


图 8 荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curve

的 61%, 试件中 C 点 (324.4, 189.3) (位置见图 9 (b)) 处几个界面单元的等效应力达到了屈服应力, 材料开始屈服, 荷载-位移曲线出现非线性。随着荷载的增大, 其他骨料处的界面单元逐渐出现屈服, 大约在第 60 增量步, 几乎每个骨料处都有界面单元屈服, 此时, 试件的屈服开始由逐渐增多变为沿着界面不断扩展、贯通, 最终在第 87 增量步导致试件破坏。同时, 随着荷载的加大, 屈服应变的变化率也在逐渐增大。图 9 是界面黏聚力 c 分别为 4.4 MPa、4.8 MPa 和 5.4 MPa 时 C 点的应力-应变关系, 对应的极限承载力分别为 3 967.9 kN、4 165.3 kN 和 4 330.4 kN。结果表明, 随着界面黏聚力的提高, 试件的承载能力逐

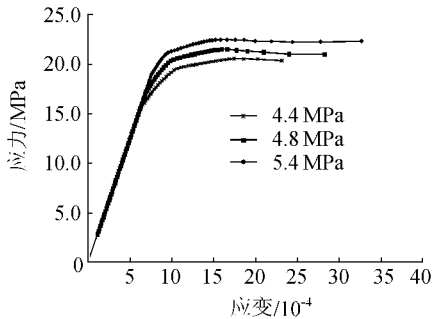


图 9 界面黏聚力 c 不同时 C 点的应力-应变关系

Fig.9 Stress-strain curves of different cohesions

渐提高,而且界面的黏聚力对应力-应变关系曲线的塑性段有一定的影响,黏聚力越大,屈服段的长度越长.

5 结 语

a. 计算结果与试验结果比较一致,表明采用计算细观力学方法研究混凝土结构的破坏过程是可行的.对于极限荷载的求解问题,弧长法是非常有效的计算方法.

b. 混凝土宏观破坏明显滞后于细观破坏,也就是说,宏观破坏是细观破坏逐渐积累的结果,而细观破坏则是宏观破坏的内因.

c. 界面是混凝土的薄弱部分.随着界面强度的提高,混凝土的极限承载能力逐渐提高,而随着界面软化模量的增大,下降段逐渐变陡,但下降段对软化模量的变化不是太敏感.

影响混凝土结构强度的因素还有很多,如材料的初始损伤、颗粒的任意形状,以及对混凝土强度有较大影响界面参数的选取,这些都有待于以后进一步深入研究.

致谢:本文研究过程中得到了中国水利科学研究院陈厚群院士的关心和指导,在此谨向陈院士表示感谢!

参考文献:

[1] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth ,I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media [J]. J Eng Mater Tech ,1977 ,99(1) 2—15.

[2] TVERGAARD V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain condition[J]. International Journal of Fracture ,1981 ,17 (4) 389—407.

[3] BAZANT Z P ,OH B H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. Journal of Engineering Mechanics ,ASCE , 1985 ,111(4) 559—582.

[4] 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,2002.140—141.

[5] 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].水力发电,1986 (5) 8—14.

[6] 尚岩.大体积混凝土静、动力学性能的数值模拟[D].南京:河海大学,2004.

[7] 刘斌.碾压混凝土细观损伤断裂的仿真模拟[D].北京:北京工业大学,2000.

[8] 唐春安,傅宇方,朱万成.界面性质对颗粒增强复合材料破坏模式影响的数值模拟分析[J].复合材料学报,1999 (10): 113—120.

Meso-structure numerical simulation of uniaxial failure
of three-graded concrete

REN Chao-jun¹, DU Cheng-bin¹, DAI Chun-xia²

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

2. Hongyuan IFB Surrogate Limited Company of Jiangsu Province , Nanjing 210017 , China)

Abstract Concrete was taken as inhomogeneous composites consisting of mortar , aggregate and their interface . Numerical simulation was carried out by use of nonlinear finite element software Marc , which could simulate the whole failure process of specimens of three-graded concrete subjected to uniaxial compression and tension for the Dongjiang arch dam . The Monte Carlo method was used to generate the random aggregate model , and the number of aggregate of different sizes was determined according to the actual mix proportion . The maximum tensile stress criterion and the linear Mohr-Coulomb criterion were adopted in the study of specimens subjected to uniaxial tension and uniaxial compression , respectively , with the softening of materials taken into account . The results indicate that the mechanical performance of concrete is closely related to its meso-structure , and the meso-failure is the result of accumulation of damages to its meso-structure . The results also show that the interface is the weakest part , where tension-induced cracks or compression-induced yield are most likely to occur .

Key words meso-mechanics ; uniaxial failure ; three-graded concrete ; random aggregate model