

混凝土界面特性与力学性能的细观数值分析

杜敏^{1,2}, 杜修力², 金浏²

(1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:将混凝土等效为由骨料、水泥砂浆及二者间的界面所构成的三相复合材料, 利用蒙特卡罗方法建立混凝土随机骨料模型。采用线性应力-裂缝宽度关系来表征混凝土材料的各相软化力学行为, 利用扩展有限元法对单轴拉伸条件下混凝土材料的界面特性与力学性能进行数值分析。分析结果表明, 随着界面强度提高, 混凝土强度、断裂能和延性增大, 破坏模式由单一贯通裂纹向多条非贯通裂纹过渡; 混凝土弹性模量随界面弹性模量的增加而增大; 界面厚度减小时, 混凝土材料的强度、弹性模量、断裂能增加, 界面厚度对混凝土力学性能弱化作用变小。

关键词:混凝土; 界面; 骨料; 扩展有限元; 强度; 断裂能; 弹性模量

中图分类号: TU528.1; TV331

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0235-04

A Mesoscopic Simulation Analysis of Interface Transition Zone Characteristics Effect on Mechanical Properties of Concrete

DU Min^{1,2}, DU Xiuli², JIN Liu²

(1. Institute of Disaster-prevention Science and Technology, Sanhe 065201, P. R. China;

2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The concrete was equivalent to a three-ingredient compound material, which was composed by aggregate, mortar and interface transition zone (ITZ). The random aggregate model was established using the Monte Carlo method. The relation between linear stress and crack was analyzed, which was used to describe the mechanics of concrete ingredients. The extended finite element method was used to simulate the failure response to various ITZ characteristics of concrete under uniaxial tension. With the tensile strength of ITZ increasing, the tensile strength, fracture energy and ductility of concrete are enhanced. The fractured modes are altered. The concrete's elastic modulus increases with the elastic modulus of ITZ. With the thickness of ITZ decreasing, the tensile strength, elastic modulus and fracture energy of concrete increase. The interface thickness effect on concrete is reduced.

Key words: concrete; interface; aggregate; extended finite element; strength; fracture energy; elastic modulus

混凝土作为重要的工程结构材料, 其力学性能是进行结构抗震设计及静、动力仿真分析的重要理论基础^[1], 从特征尺度上混凝土可分为微观、细观和宏观层次^[2]。在细观层次上, 混凝土可以看作是由粗细骨料、砂浆基质及过渡区界面 (Interface Transition Zone, ITZ)、微裂纹或孔隙等组成的多相复合材料。其中处于骨料与砂浆交界处的界面相是混凝土细观组分中的薄弱环节, 混凝土的破坏首先从界面处产生继而向其他组分中扩展, 对混凝土的宏观力学性能及破坏产生重大影响^[3]。Lybuimove 等^[4]首先从细观层次提出界面过渡区概念, ITZ 是决定混凝土力学性能主要因素。在混凝土中经常可发现位于骨料粒子与砂浆间界面区的断裂路径^[5-6]。与基体相比, ITZ 具有低强度、低弹性模量和高渗透性等特点, 从而导致混凝土性能 (强度、弹性模量、断裂) 在很大程度上与 ITZ 的几何和物理性能有关^[7]。郑建军等^[8]将不均匀界面层划分成一系列同心球壳单元, 提出了考虑不均

匀界面时混凝土弹性模量预测解析法。Bentur 等^[9]认为 ITZ 结构及其性能变化对混凝土强度的影响通常在 20%~30% 范围内。Prokopski 等^[10]通过采用石蜡对白云石骨料以及卵石骨料进行表面处理, 研究了 ITZ 对混凝土抗压强度的影响, 对骨料进行表面处理可使混凝土的抗压强度降低 50% 以上。于庆磊等^[11]采用数字图像的处理手段获取混凝土界面过渡区的形状与分布, 模拟了界面强度对混凝土拉伸破坏的影响, 发现混凝土抗拉强度随界面强度的增加而增大。田瑞俊等^[12]对全级配细观混凝土梁进行了弯拉数值实验, 得出了弯拉梁承载力随界面强度的增加而增大的结论。关于界面强度对混凝土断裂能、延性、弹性模量及破坏模式影响的文献很少, 界面弹性模量和厚度是界面层的重要参数, 对混凝土的宏观力学性能及破坏过程具有一定影响, 需要进行深入研究。

本文基于细观数值分析方法, 将混凝土等效为骨料、砂

浆和界面组成的三相复合材料,建立随机骨料模型,采用扩展有限元法进行单轴拉伸破坏模拟,研究界面强度、弹性模量及界面厚度对混凝土强度、弹性模量、断裂能、延性及破坏模式的影响规律。

1 混凝土细观扩展有限元建模

混凝土扩展有限元建模方法是在传统有限元方法框架内,基于单位分解法及水平集理论而提出的模拟裂纹在材料体内扩展过程的新型数值模拟方法^[13-14]。单位分解法保证了扩展有限元方法的收敛性,水平集理论确定裂纹位置、追踪裂纹发展。混凝土细观扩展有限元建模方法是一种非常有效的方法,用于模拟任意性、求解相关路径裂纹的裂纹初始及裂纹扩展过程,而不用要求重新划分网格^[15-16]。

1.1 单元非连续位移场的建立

为实现断裂分析,扩展函数通常包括裂纹尖端附近渐进函数,用于模拟裂纹尖端附近应力奇异性,间断函数用于表示裂纹面处位移跳跃,整体划分特性的位移向量函数为:

$$u = \sum_{I=1}^n N_I(x) \left[u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha} \right] \quad (1)$$

式中, $N_I(x)$ 为常用的节点位移形函数; u_I 为有限元位移求解对应的连续部分; a_I, b_I^{α} 为节点扩展自由度向量; $H(x)$ 为沿裂纹面的间断跳跃函数; $F_{\alpha}(x)$ 为裂纹尖端应力渐进函数。右端第一项可用于模型中所有节点;第二项只对形函数被裂纹内部切开的单元节点有效;第三项对形函数被裂纹尖端切开单元节点有效,裂纹面的间断跳跃函数为:

$$H(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 是所考察的点, x^* 是离 x 最近的裂纹面上的点,且 n 是 x^* 处裂纹的单位外法向矢量。对于各向同性的弹性体,裂纹尖端附加的改进函数为:

$$F_{\alpha}(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

式中 r, θ 为局部裂尖场坐标系统中的极坐标。

1.2 断裂准则及裂纹扩展方向确定

最大拉应力开裂准则、平面应变下最大拉应力:

$$\sigma_{\max} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{K_I^2}{8\pi r} \sin^2 \theta + \frac{K_{II}^2}{2\pi r} \left(1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta\right) + \frac{K_I K_{II}}{2\pi r} \cos \theta \sin \theta} \quad (4)$$

式中, K_I, K_{II} 为 I、II 型裂纹的应力强度因子。当达到允许应力 σ_c 时,裂纹失稳扩展。裂纹沿着垂直于最大拉应力方向开展,开裂角 θ_c 为:

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (5)$$

式中 θ_c 方向从前段裂纹延伸线逆时针量起。

1.3 混凝土细观随机骨料模型建立

将混凝土看作由骨料、砂浆和界面组成的三相复合材料,建立二级配混凝土的随机骨料模型,如图 1 所示,平面尺寸为 150 mm × 150 mm。

混凝土细观各相材料采用如图 2 所示的本构关系曲线,

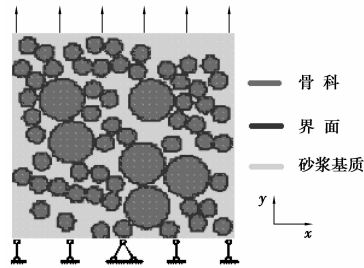


图 1 混凝土随机骨料模型

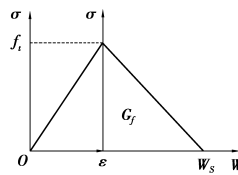


图 2 混凝土细观组分本构行为

即细观组分(骨料、砂浆和界面)在达到各自的峰值应力前,应力-应变关系是线弹性的;当达到峰值应力后,采用线性应力-裂缝宽度关系来表征混凝土材料的软化力学行为。图中, f_t 为混凝土细观材料的极限拉伸强度; G_f 为断裂能; W 为张开位移, W_s 为极限张开位移。

2 混凝土界面特性对力学性能影响

2.1 界面强度对混凝土力学性能和破坏模式的影响

为了研究界面强度对混凝土断裂能、延性、模量及破坏模式的影响,本文改变界面区的抗拉强度,各细观组分的力学参数如表 1 所示,最终破坏形态如图 3 所示。

表 1 混凝土各组分力学性质

材 料	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	断裂能 /($N \cdot m^{-1}$)
骨 料	50.00	0.16	5.47	262.56
砂 浆	30.00	0.22	3.37	161.76
界面 1	18.00	0.22	2.00	96.00
界面 2	18.00	0.22	2.50	120.00
界面 3	18.00	0.22	2.85	136.80
界面 4	18.00	0.22	3.00	144.00

由图 3 可知当界面强度不同时,混凝土起裂位置、扩展的方向及路径都有很大的不同。当界面抗拉强度较低时,混凝土的断裂过程表现为界面中萌生的局部裂纹相互作用,桥接贯通,多形成一条贯通的宏观断裂带,当界面抗拉强度较高时,特别是与水泥砂浆的抗拉强度接近时,水泥砂浆材料本身的非均匀性对混凝土开裂起控制作用,界面和砂浆中微裂纹可能会同时扩展形成多条非贯通裂纹。不同界面强度时混凝土的应力应变关系如图 4 所示,由图可知界面强度影响着混凝土的抗拉强度,随着界面强度的提高,混凝土抗拉强度在增加。当界面强度不同时,混凝土下降段曲线也明显的不同,表明界面强度影响着混凝土的破坏过程,进而影响了混凝土的断裂能。由于裂纹扩展总是沿着阻力最小的路

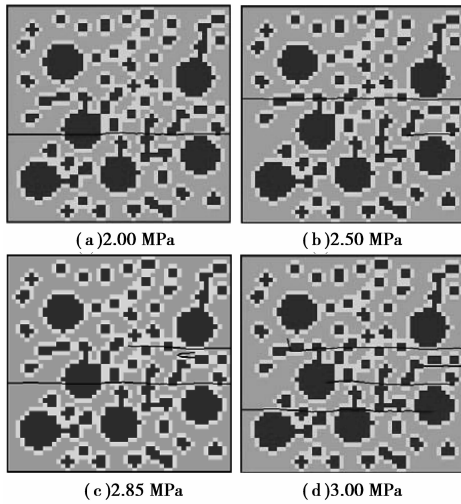


图 3 不同界面强度下混凝土的破坏模式

径,所以混凝土的破坏首先从界面处产生,继而向其他组分中扩展,因此界面强度的增加,增大了裂纹扩展所需要的能量。

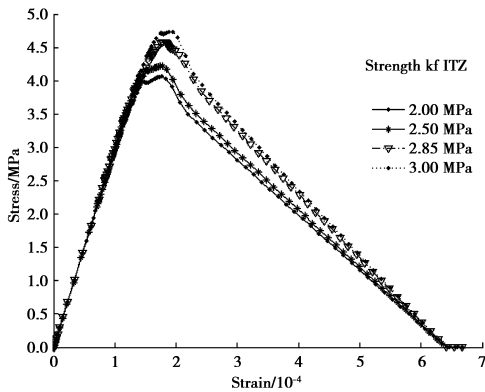


图 4 不同界面强度下混凝土宏观应力应变曲线

不同界面强度时混凝土破坏的断裂能数值如表 2 所示,强度每增加 1 MPa,断裂能平均增加 $47.50 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。即随着界面强度增加,混凝土断裂能量增加,延性增大。

表 2 不同界面强度作用下混凝土的断裂能

材 料	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	混凝土断裂能 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
界面 1	18.00	0.22	2.00	199.40
界面 2	18.00	0.22	2.50	205.80
界面 3	18.00	0.22	2.85	223.00
界面 4	18.00	0.22	3.00	226.60

2.2 界面模量对混凝土力学性能和破坏模式影响

弹性模量是界面的一个重要参数,为了研究界面弹性模量对混凝土力学性能的影响。将界面弹性模量由 20 GPa 增

大到 28 GPa,界面的抗拉强度取值为 3.0 MPa,断裂能为 $144.00 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,骨料、砂浆参数如表 1 所示。对不同界面模量的混凝土细观模型进行拉伸数值实验,得到混凝土应力应变关系如图 5 所示,随着界面弹性模量的增加,混凝土抗拉强度降低,断裂能也随着降低,混凝土材料的弹性模量增加。混凝土弹性模量随界面弹性模量增长情况如图 6 所示,可见提高界面的弹性模量,在一定程度上提高了混凝土弹性模量,但是随着界面弹性模量的增大,混凝土弹性模量增大的速度变缓。根据图 6 混凝土材料与界面弹性模量间的增长规律,可由混凝土弹性模量反推出界面弹性模量,从而解决混凝土细观数值研究中界面层力学参数的取值问题。

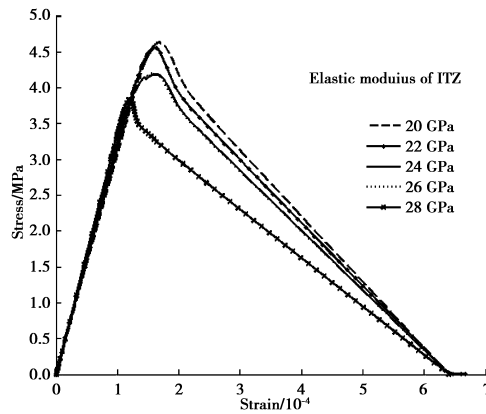


图 5 不同界面模量作用下混凝土的应力应变曲线

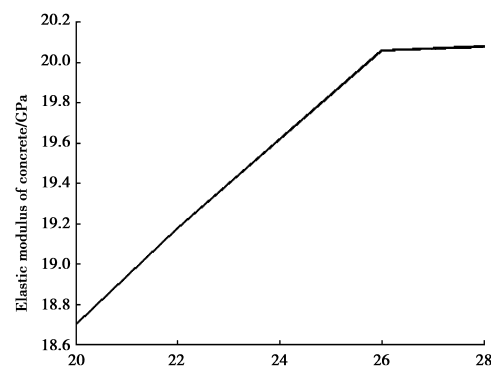


图 6 混凝土弹性模量与界面弹性模量的关系曲线

2.3 界面厚度对混凝土力学性能和破坏模式影响

有关试验和理论分析均表明,混凝土界面面积率是影响混凝土宏观力学性能的重要参数^[17],混凝土界面面积率主要取决于界面厚度^[18]。本文选取界面厚度为 1、2、3 mm 的三种细观模型进行研究。数值计算结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,随着界面厚度的减小,混凝土的强度、弹性模量、断裂能都得到增加。每降低 1 mm 界面厚度,混凝土强度平均增加 6.8%,断裂能增加 5.5%。由于界面层是混凝土的薄弱层,界面厚度越小,界面面积率越小,对混凝土力学性能弱化的程度越小。

表3 不同界面厚度时混凝土的力学性能

材料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa/(N·m ⁻¹)	断裂能/GPa/(N·m ⁻¹)	抗拉强度/GPa	模量/GPa	断裂能/(N·m ⁻¹)
骨料	50.00	0.16	5.47	262.56			
砂浆	30.00	0.22	3.37	161.76			
界面 1 mm	20.00	0.22	2.00	96.00	4.76	17.53	225.30
界面 2 mm	20.00	0.22	2.00	96.00	4.40	16.88	210.05
界面 3 mm	20.00	0.22	2.00	96.00	4.17	16.36	202.30

3 结语

通过对不同界面性质的混凝土细观力学模型进行单轴拉伸数值实验,分析了界面强度、界面弹性模量及界面厚度对混凝土力学性能和破坏模式影响,得到以下结论:

1)界面的存在影响混凝土的破坏模式及宏观力学性能,随着界面强度的提高,混凝土的宏观断裂模式由单一贯通裂纹向多条非贯通裂纹过渡,混凝土抗拉强度增大,断裂能增加,延性增大。

2)界面弹性模量对混凝土的弹性模量有较大的影响,随着界面弹性模量的增加,混凝土弹性模量得到提高。

3)界面厚度越小,界面面积率越小,对混凝土力学性能弱化的程度越小。界面厚度每减小1 mm,混凝土抗拉强度增加6.8%,断裂能增加5.5%。

参考文献:

- [1] 赵吉坤. 混凝土四相复合模型的三维细观破坏模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4):37-43.
- [2] 郑晓霞, 郑锡涛, 樊林虎. 多尺度方法在复合材料力学分析中的研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(1): 41-56.
- [3] 高英力, 马保国, 王信刚. 钢筋保护层混凝土细观界面过渡区优化及耐久性[J]. 2009, 31(4):19-24.
- [4] Lybimove C T Y, Pinns E R. Crystallization structure in concrete contact zone between aggregate and cement in concrete [J]. Colloid Journal, 1962(24): 491-498.
- [5] Guo L P, Carpinteri A, Roncella R, et al. Fatigue damage of high performance concrete through a 2D mesoscopic lattice model [J]. Computational Materials Science, 2009, 44(4):

1098-1106.

- [6] Abid A S, Saleh H A, Abbas H, et al. Predicting residual strength of non-linear ultrasonically evaluated damaged concrete using artificial neural network[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(4): 42-50.
- [7] 王瑶, 周继凯, 沈德建, 等. 混凝土中骨料-浆体界面过渡区的力学性能研究综述[J]. 水利科学进展, 2008, 28(2): 89-94.
- [8] 郑建军, 吕建平, 吴智敏. 考虑不均匀界面时混凝土弹性模量预测[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5):141-146.
- [9] Bentur A, Alexander M G. A Review of the work of the RILEM TC159-ETC: engineering of the interfacial transition zone in cementations composites[J]. Material Structure, 2000, 33(226): 82-87.
- [10] Prokopski G, Halbiniakj. Interfacial transition zone incementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(4):579-583.
- [11] 于庆磊, 杨天鸿, 唐春安, 等. 界面强度对混凝土拉伸断裂影响的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6):643-649.
- [12] 田瑞俊, 杜修力, 彭一江. 基于细观力学全级配混凝土梁弯拉试验的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(1):1-3.
- [13] Kazuki S, Tomoaki U. Evaluation on reproduction of priori knowledge in XFEM [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(4):424-433.
- [14] Man H K. Damage distribution and size effect in numerical concrete from lattice analyses[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(9):867-880.
- [15] Belytschko T, Gracie R, et al. A review of extended/generalized finite element methods for material modeling[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(4):043001:1-24.
- [16] Kov, Varol. Size effect in normal-and high-strength concrete with different notches under the axial load[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(9):433-445.
- [17] Zheng J J, Zhou X Z. Prediction of the chloride diffusion coefficient of concrete[J]. Materials and Structures, 2007, 40(7): 693-701.
- [18] Zheng J J, Peng G J, Shao L. Calculation of ITZ area fraction Considering the influence of shape effect[J]. Concrete, 2009(7):70-72.

(编辑 郭飞)