

界面初始缺陷对混凝土单轴抗拉强度的影响

王娟¹,管巧艳²,孔宇田³,余闪闪¹

(1. 郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院,河南 郑州 450003;
3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550081)

摘要:为了研究内部微裂纹等初始缺陷对混凝土强度的影响,在细观层次上将混凝土看作由粗骨料、砂浆、界面和界面初始缺陷组成的四相复合材料,建立了考虑界面初始缺陷的混凝土细观数值模型来预测混凝土单轴抗拉强度,讨论分析了界面初始缺陷分布和界面初始缺陷含量对混凝土单轴抗拉强度的影响。数值模拟结果表明:界面初始缺陷分布对混凝土的单轴抗拉强度几乎没有影响;界面初始缺陷含量对混凝土强度影响较大;混凝土的单轴抗拉强度随着界面初始缺陷含量的增大而减小,当界面过渡区的初始缺陷含量从10%增大到50%时,试件的抗拉强度由基准试件强度的94%下降到约60%。

关键词:混凝土;单轴抗拉强度;界面过渡区;初始缺陷;数值模拟

中图分类号:TU502 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2016)05-0046-04

Influences of initial interfacial defects on uniaxial tensile strength of concrete//WANG Juan¹, GUAN Qiaoyan², KONG Yutian³, YU Shanshan¹ (1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450003, China; 3. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to investigate the influences of initial defects, such as the internal tiny cracks, on the concrete strength, concrete was considered to be a four-phase composite composed of coarse aggregate, mortar matrix, interfacial transitional zones (ITZs), and initial interfacial defects at the meso-level, and a numerical model for mesoscale modeling of concrete, considering initial interfacial defects, was developed to predict the uniaxial tensile strength of concrete. The influences of the initial interfacial defect distribution and the amount of defects on the uniaxial tensile strength of concrete are discussed. Results show that the initial interfacial defect distribution has little influence on the uniaxial tensile strength, while the amount of initial interfacial defects has a large influence on the concrete strength. Results also indicate that the uniaxial tensile strength decreases with the increase of the amount of initial interfacial defects. When the volume fraction of initial interfacial defects in the transition zone increases from 10% to 50%, the uniaxial tensile strength of samples in comparison to the strength of samples without defects decreases from 94% to about 60%.

Key words: concrete; uniaxial tensile strength; interfacial transition zone; initial defect; numerical simulation

混凝土在受力之前其内部已存在由多种原因所形成的孔隙、微裂纹等初始缺陷。研究表明,混凝土的破坏实际上是这些初始缺陷在荷载作用下不断扩展、汇合,最终贯通形成宏观裂缝所导致的^[1];且其对混凝土宏观力学性能影响较大^[2-4]。因此,研究混凝土细观结构对其自身力学性能的影响时,不应忽略初始缺陷的作用。近年来已有学者开始重视初始微裂纹对混凝土强度的影响,对传统的混凝土三相材料模型^[5-7]进行了有益的补充^[4,8-12]。赵吉坤^[8]在细观层次上建立了由粗骨料、砂浆、界面和随机微缺陷组成的三维混凝土四相复合材料模型,模拟了单轴荷载作用下混凝土的弹塑性损伤破坏过程,结果表明,随机微缺陷的存在会对混凝土破坏过程中裂纹的萌生部位及其扩展路径产生一定的影响。邬昆^[4]考虑了初始缺陷在界面中的分布,并建立了相应的二维混凝土细观数值计算模型,研究发现,在细观数值模型中引入初始微缺陷可以更好地模拟混凝土的软化性能。王娟等^[9-10]将混凝土看作由粗骨料、砂浆、界面和界面初始缺陷组成的四相复合材料,建立了三维随机缺陷界面弹簧元模型,模拟了混

基金项目:水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金(2016002);国家自然科学基金(51309203);中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201512)

作者简介:王娟(1981—),女,副教授,博士,主要从事混凝土细观力学研究。E-mail:wangjuan@zzu.edu.cn

凝土的单轴抗拉强度和单轴抗压强度。杜修力等^[11-12]采用理论和数值模拟方法研究了缺陷对混凝土性能的影响,认为混凝土强度随缺陷的增加呈一定规律下降。

本文基于 ANSYS 软件进行二次开发,建立了考虑初始缺陷的混凝土四相复合材料细观数值模型来预测橡胶混凝土单轴抗拉强度,分析初始缺陷对混凝土抗拉强度的影响。由于粗骨料周围的界面相具有更加明显的非均匀性,其内部孔隙率的含量及非均匀性远高于砂浆基体,本文侧重研究界面初始缺陷位置和含量对混凝土单轴抗拉强度的影响。

1 考虑界面初始缺陷的混凝土细观数值模型

1.1 本构关系和破坏准则

普通混凝土破坏后的断面中较少观测到粗骨料的断裂等破坏情况,因此模型中粗骨料采用线弹性本构关系,不考虑破坏。砂浆基体和界面采用弹脆性本构关系,初始缺陷单元假设为无承载能力的裂缝单元,用弱化的界面单元表示。破坏准则采用最大拉应力准则。

1.2 细观参数的确定

本文细观数值模型中需确定两类参数:细观结构参数和细观材料参数。细观结构参数主要为粗骨料、界面及与初始缺陷相关的几何参数;细观材料参数主要为细观各相组分的力学性能参数。

1.2.1 细观结构参数的确定

粗骨料的几何参数根据试验情况选取,本文采用李伟政等^[13]的试验数据资料,粗骨料为一级配,体积分数约为 45%。砂浆初始缺陷含量(含缺陷单元占总单元的百分比)取为 2%,界面初始缺陷含量取为 10%。界面层厚度取为 0.1 mm,如图 1 所示(图中 h_i 为界面层厚度)。界面作为混凝土中的薄弱部位,其结构疏松,内部孔隙率远高于砂浆基体中的孔隙率且孔隙分布没有规律性,考虑到数值计算的规模和效率,本文对界面内的初始缺陷作以下假设:①初始缺陷在界面内均匀随机分布;②界面内初始缺陷采用弱化的界面单元模拟;③定义界面初始缺陷含量 p_1 为

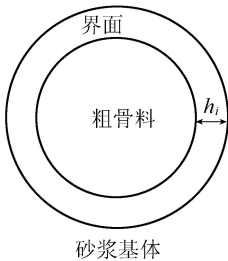


图 1 混凝土界面过渡区简化示意图

$$p_1 = \frac{N_1}{N_2} \times 100\% \tag{1}$$

式中: N_2 为界面单元总数; N_1 为界面缺陷单元数, $N_1 = \text{int}(p_1 N_2)$,其中 $\text{int}()$ 为取整函数。

1.2.2 细观材料参数的确定

细观材料参数主要为粗骨料、砂浆及界面的弹性模量、泊松比和抗拉强度等力学性能参数。本文参照已有的研究成果对各材料赋予适当的性能参数,如表 1 所示。

表 1 细观材料参数取值

材 料	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
粗骨料		60	0.2
硬化水泥砂浆	3.05	20	0.2
界 面	2.44	16	0.2

2 混凝土单轴抗拉强度数值模拟

采用前文建立的细观数值模型对文献[14]中单轴受拉试验进行了数值模拟,试件尺寸为 100 mm×100 mm,单元尺寸取为 1.5 mm,采用位移加载方式,建立混凝土细观结构模型如图 2 所示,其中粗骨料体积分数取为 45%,界面缺陷含量取为 20%。数值模拟中每组试件采用 3 个随机骨料样本,单轴抗拉强度计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,样本离散性较小,且数值模拟结果与试验结果的误差均在 5% 以内,表明本文模型稳定性较好。

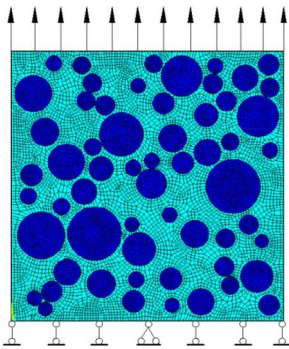


图 2 混凝土试件单轴受拉试验有限元模型示意图

表 2 单轴抗拉强度数值计算结果与试验结果对比

随机样本	计算值/MPa	试验值/MPa	相对误差/%
分布 1	2.11	2.03	3.90
分布 2	1.98	2.03	2.40
分布 3	2.13	2.03	4.90

混凝土在单轴受拉荷载作用下的开裂过程如图 3 所示。在加载之前,界面中存在的随机缺陷如图 3(a) 所示;加载到峰值强度的 50% 之前,破坏单元开始由界面初始缺陷位置处沿界面扩展,如图 3(b) 所示,此阶段的破坏主要发生在界面附近;当应力达到 70% 峰值荷载时,已有较多的界面裂缝出现,裂缝已由界面逐步向砂浆基体中扩展,砂浆单元开始

破坏,如图 3(c)所示;达到峰值应力后,破坏单元扩展迅速,并开始聚集,最终贯通形成垂直于加载方向的宏观断裂裂缝,使试件逐渐失去承载能力,最终的破坏裂缝如图 3(d)所示。由图 3 可以看出,数值模拟结果与混凝土的一般破坏过程比较吻合。

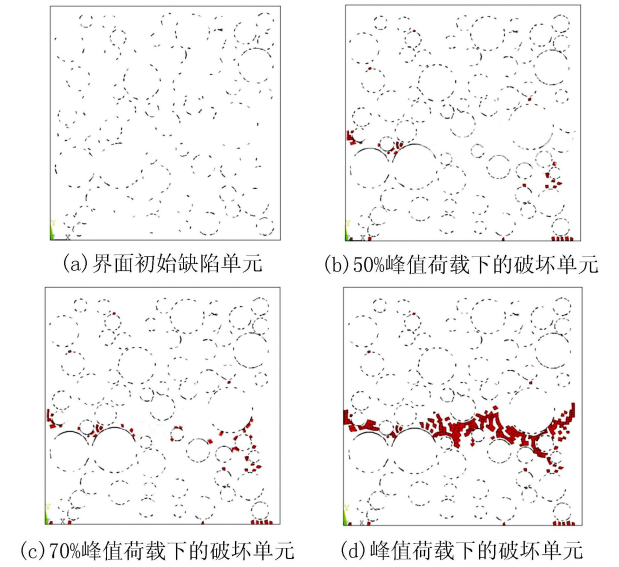


图 3 单轴受拉荷载作用下混凝土试件开裂过程示意图

3 界面初始缺陷分布对混凝土单轴抗拉强度的影响

由于试验条件限制,无法精确给出初始缺陷的具体分布,本文假设初始缺陷在界面内随机分布。为了分析该假设条件对计算结果的影响,采用本文模型计算了 6 个不同界面初始缺陷分布情况下混凝土试件的抗拉强度,界面初始缺陷含量取为 10%,界面初始缺陷分布见图 4。6 个试件的抗拉强度分别为 2.161 MPa、2.145 MPa、2.163 MPa、2.095 MPa、2.151 MPa 和 2.052 MPa,标准差为 0.04 MPa,可见界面初始缺陷分布对混凝土的抗拉强度影响较小。图 5 为 6 个试件最终破坏形态,可以看出界面初始缺陷分布不同影响的是混凝土试件的裂缝起裂位置,但试件的最终破坏形态较为一致,均为拉断破坏。

4 界面初始缺陷含量对混凝土单轴抗拉强度的影响

界面过渡区结构疏松、孔隙率远高于砂浆基体,Ollivier 等^[14]的研究表明:骨料表面孔隙率可高达 48%,远高于砂浆基体中的孔隙含量。由于界面孔隙率随距离骨料表面远近而变化,本文以 50% 的界面初始缺陷为上限,分别计算了界面初始缺陷含量为 10%、20%、30%、40%、50% 时的混凝土单轴抗拉强度。每组试验取 3 个随机骨料样本,并对结果进行归一化处理,以不含初始缺陷时的混凝土单轴

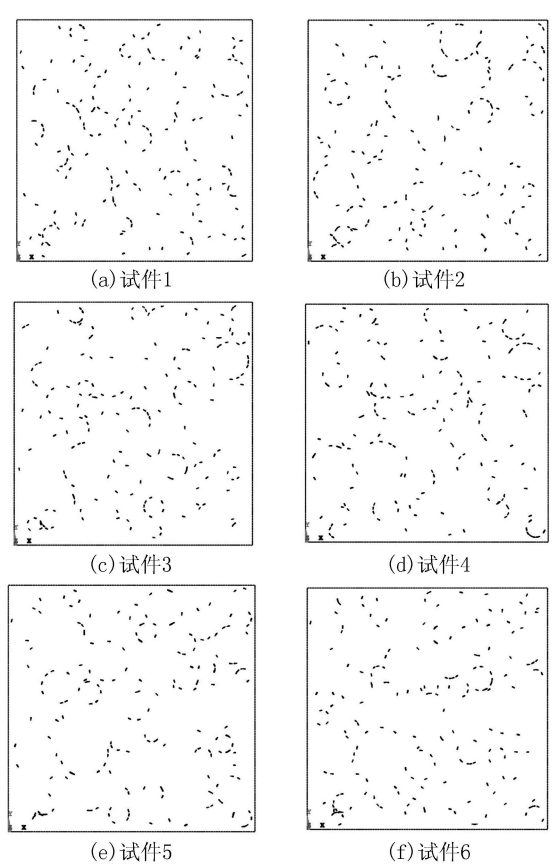


图 4 不同界面初始缺陷分布

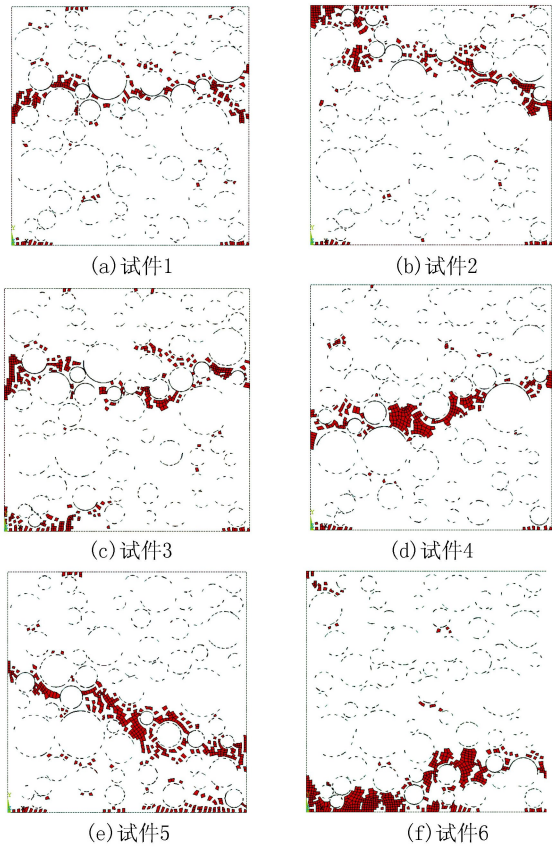


图 5 不同界面初始缺陷分布下混凝土试件最终裂缝抗拉强度为 1, 所得结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,混凝土抗拉强度随着缺陷含

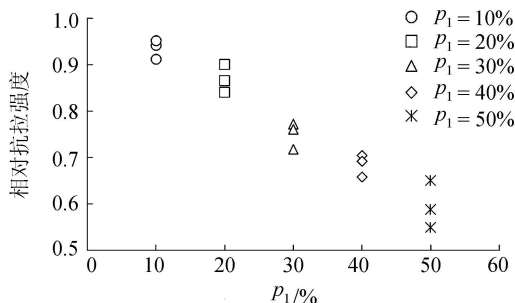


图6 界面初始缺陷含量对混凝土单轴抗拉强度的影响

量的增加而明显降低,当界面过渡区的初始缺陷含量从10%增大到50%时,试件的抗拉强度由基准试件混凝土强度的94%下降为基准试件强度的60%。对强度计算结果进行线性回归分析,可得出抗拉强度与界面初始缺陷含量的关系如下:

$$f_{tc}/f_{t0} = 1 - 0.8p_1 \quad (2)$$

式中: f_{tc} 为含初始缺陷试件的抗拉强度; f_{t0} 为不含初始缺陷试件的抗拉强度。式(2)的可决系数 $R^2 = 0.98$,可见混凝土抗拉强度与界面初始缺陷含量呈较强的线性相关性。

5 结 论

a. 界面初始缺陷的分布对混凝土的单轴抗拉强度及破坏形态几乎没有影响,但会影响混凝土试件最终断裂位置。

b. 界面初始缺陷含量对混凝土的单轴抗拉强度影响较大,随着界面初始缺陷含量的增大混凝土抗拉强度明显降低,当界面过渡区的初始缺陷含量从10%增大到50%时,混凝土抗拉强度由原来的94%下降到了60%左右。

c. 混凝土单轴抗拉强度与界面初始缺陷含量间存在较强的线性相关性。

参考文献:

[1] 覃维祖,王栋民,丁建彤. 混凝土:微观结构、性能和材料[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[2] 李曙光,陈改新,鲁一晖. 基于数字图像处理的混凝土微裂纹定量分析技术[J]. 建筑材料学报,2013,16(6):1072-1077. (LI Shuguang, CHEN Gaixin, LU Yihui. Automatic quantitative analysis of microcracks in concrete based on digital image processing techniques[J]. Journal of Building Materials,2013,16(6):1072-1077. (in Chinese))

[3] 杜修力,揭鹏力,金浏. 考虑初始缺陷影响的混凝土梁动态弯拉破坏模式分析[J]. 工程力学,2015,32(2):74-81. (DU Xiuli, JIE Pengli, JIN Liu. Dynamic flexural-tensile failure mode analysis of concrete beam with initial defect[J]. Engineering Mechanics,2015,32(2):74-81. (in Chinese))

[4] 郇昆. 非局部多尺度方法及其在混凝土重力坝细观分析中的应用[D]. 北京:清华大学,2010.

[5] 宋来忠,彭刚,姜袁. 混凝土三维随机参数化骨料模型[J]. 水利学报,2012,43(1):91-98. (SONG Laizhong, PENG Gang, JIANG Yuan. A three-dimensional model for concrete with random parameterized irregular aggregate[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(1):91-98. (in Chinese))

[6] 马怀发,陈厚群,吴建平,等. 大坝混凝土三维细观力学数值模型研究[J]. 计算力学学报,2008,25(2):241-247. (MA Huaifa, CHEN Houqun, WU Jianping, et al. Study on numerical algorithm of 3D meso-mechanics model of dam concrete[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2008,25(2):241-247. (in Chinese))

[7] 郑建军,周欣竹,姜璐. 混凝土杨氏模量预测的三相复合球模型[J]. 复合材料学报,2005,22(1):102-107. (ZHENG Jianjun, ZHOU Xinzhu, JIANG Lu. Three-phase composite sphere model for the prediction of young's modulus of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2005,22(1):102-107. (in Chinese))

[8] 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. (ZHAO Jikun. 3D meso-scale failure simulation of four-phase composite concrete[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering,2009,31(4):37-43. (in Chinese))

[9] WANG Juan, LI Qingbin, QING Longbang. Interfacial spring element model with random defects for 3D simulation of concrete strength under uniaxial tension[J]. Advanced Materials Research,2011,248:5975-5980.

[10] 王娟,李庆斌,卿龙邦,等. 混凝土单轴抗压强度三维细观数值仿真[J]. 工程力学,2014,31(3):39-44. (WANG Juan, LI Qingbin, QING Longbang, et al. 3D simulation of concrete strength under uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics,2014,31(3):39-44. (in Chinese))

[11] 杜修力,金浏. 含孔隙混凝土复合材料有效力学性能研究[J]. 工程力学,2012,29(6):70-77. (DU Xiuli, JIN Liu. Research on effective mechanical properties of concrete composite material with pores[J]. Engineering Mechanics,2012,29(6):70-77. (in Chinese))

[12] 金浏,杜修力. 孔隙率变化规律及其对混凝土变形过程的影响[J]. 工程力学,2013,30(6):183-190. (JIN Liu, DU Xiuli. Variation of porosity and its effect on the deformation process of concrete[J]. Engineering Mechanics,2013,30(6):183-190. (in Chinese))

[13] 李伟政,过镇海. 二轴拉压应力状态下混凝土的强度和变形试验研究[J]. 水利学报,1991,22(8):51-56. (LI Weizheng, GUO Zhenhai. Experimental study on strength and deformation of concrete under biaxial tension-compression stress state[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1991,22(8):51-56. (in Chinese))

[14] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete[J]. Advanced Cement Based Material,1995,2(1):30-38.

(收稿日期:2016-01-07 编辑:熊水斌)