

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.06.017

混凝土细观单元本构关系研究

朱亚超¹, 王立成², 宋玉普²

(1. 沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001; 2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过劈裂和剪切试验得到砂浆-骨料复合试件界面的粘结抗拉强度, 界面的 I 型断裂特征通过三点弯曲试验得到。并采用改进的 J 积分方法, 利用试验结果提出了砂浆-骨料界面的拉伸软化曲线模型。另外, 将光纤传感器分别埋置于砂浆中和粘贴在骨料表面, 测量单轴受压试验中砂浆、骨料的变形过程及二者间的相对滑移值, 从而建立了砂浆-骨料界面的粘结滑移本构关系曲线。同时, 根据试验及分析结果, 提出了砂浆-骨料界面的细观力学本构关系, 为数值模拟提供了可靠的分析模型。

关键词: 混凝土; 细观; 本构关系; 刚体弹簧元

中图分类号: TU502; TB115.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)06-0089-06

Study on the Constitutive Relationship of Meso-scale Concrete Structure

ZHU Yachao¹, WANG Licheng², SONG Yupu²

(1. Shenyang Aluminum & Magnesium Engineering & Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110001, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In this study, the bond strength of the mortar-aggregate interface was determined through the splitting tensile test and the direct shear test with the composite mortar-aggregate specimens. Three point bending test was conducted to obtain the fracture parameters of type I mortar-aggregate interface. Through the modified J-integral method, the mortar-aggregate interface softening curve model under tensile stress was developed based on the test results. Meanwhile, the uniaxial compression test was conducted to investigate the bond slip of the interface, in which the optical fiber sensors were used to measure the strains of mortar and aggregate. And then, the bond slip relationship between mortar and coarse aggregate was established. Also the meso-scale constitutive relationship commonly used in the current numerical simulation of concrete was analyzed. With the experimental result, the constitutive relationship of mortar-aggregate interface was proposed. These findings provided valid analysis models for the numerical simulations.

Keywords: concrete; meso-scale; constitutive relationship; Rigid Body Spring Model (RBSM)

在细观层次上对混凝土材料进行力学分析时, 混凝土可被认为是由骨料、水泥砂浆以及二者界面过渡区组成的三相复合材料^[1-2]。混凝土试件在受力过程中内部微裂缝多在砂浆与骨料界面先形成, 然后逐渐扩展贯通直至试件最终破坏。而混凝土细观数值模拟能够很好的反映混凝土试件裂缝形成、扩展及贯通最终导致破坏的全过程, 这对分析混凝土材料的损伤演化过程具有重要的价值, 因而混凝土细观数值模拟越来越受到人们的关注。

目前基于细观层次的混凝土数值分析模型主要

分为: 格构网络模型、随机颗粒模型^[3]、微平面模型^[4]、随机骨料模型^[5]等。研究表明, 界面过渡层的本构关系对混凝土材料数值分析的结果有很大影响^[6-7]。在微观层次上, 很多学者对混凝土材料做了大量的研究工作, 然而尚缺少微观到细观层次联系的纽带, 在混凝土的细观力学分析中缺少直接的应用^[8]。

本文中, 首先改进了原有的一些试验方法, 并提出了一种新的试验方法来研究混凝土中砂浆-骨料界面的本构关系。通过劈裂和剪切试验得到砂浆-

骨料复合试件界面的粘结抗拉强度,通过三点弯曲试验得到界面的 I 型断裂特征。并采用改进的 J 积分方法,利用试验结果提出了砂浆-骨料界面的拉伸软化曲线模型。另外,对含单个骨料的砂浆试件开展了单轴受压试验,将光纤传感器分别埋置于砂浆中和粘贴在骨料表面,测量了在单轴受压试验中砂浆、骨料的变形过程及二者间的相对滑移值,从而建立了砂浆-骨料界面的粘结滑移本构关系曲线。结合试验结果提出了砂浆-骨料界面的细观力学本构关系。最后将本文提出的界面过渡层的本构关系应用到细观刚体弹簧元中,对含骨料的砂浆试件进行了单轴受压与单轴受拉试验的数值模拟分析。

1 细观单元本构关系的试验研究

对于砂浆和骨料的本构关系,很多学者已经进行了大量的试验研究工作,但关于界面本构关系的研究目前还很少涉及,各个学者进行细观数值模拟时基本根据经验公式采用简单的损伤模型和破坏准则。为此作者针对界面过渡层的力学特性开展了系列试验研究和理论分析^[9-12]。

1.1 界面粘结强度

对基于砂浆-粗骨料的复合试件通过劈裂试验和剪切试验分别测量界面的粘结强度,其中高强砂浆(60 MPa,简称为 HM)、普通砂浆(30 MPa,简称为 NM)与骨料之间过渡层的粘结劈拉强度(f_{st})分别为 2.57 MPa 和 1.59 MPa。另外, HM、NM 砂浆与骨料

之间过渡层的剪切强度(f_s)分别为 2.32 MPa 和 1.55 MPa。显然,砂浆本体强度越高,界面过渡层的粘结强度也越高^[9]。

1.2 界面拉伸本构关系

对砂浆-骨料复合试件,采用三点弯曲梁式试验测量了界面过渡层的断裂力学性质。利用改进的 J 积分法给出界面层的拉伸软化曲线^[13],从而建立其拉伸本构关系。对于所有试件得到的 $\sigma-w$ 关系取平均值后如图 1 所示^[10]。

由于软化曲线的双线性表达式在数值模拟中应用起来更加方便,本文采用 CEB-FIP Code 1990^[14]的方法来拟合双线性软化曲线。双线性拉伸软化曲线的表达式为:

$$\begin{cases} \sigma = f_t - (f_t - \sigma_s) \frac{w}{w_s}, & 0 \leq w \leq w_s \\ \sigma = \sigma_s \frac{w_0 - w}{w_0 - w_s}, & w_s \leq w \leq w_0 \\ \sigma = 0, & w \geq w_0 \end{cases} \quad (1)$$

在双线性表达式中,需要确定四个参数 σ_s 、 w_s 、 f_t 和 w_0 。文献[14]提出了确定参数 σ_s 和 w_s 的表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= 0.15f_t \\ w_s &= 2G_F/f_t - 0.15w_0 \end{aligned} \quad (2)$$

双线性软化曲线表达式中的控制参数如表 1 所示。

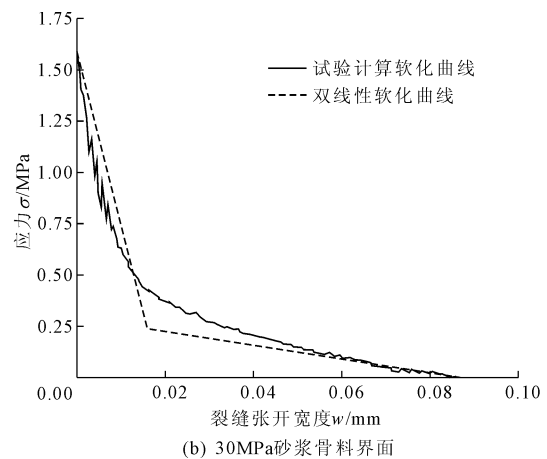
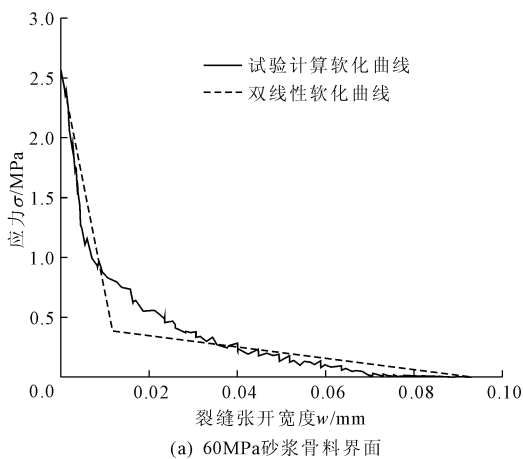


图 1 拉伸软化段应力-裂缝宽度曲线

表 1 双线性软化曲线的控制参数

砂浆类型	f_t /MPa	w_0 /mm	G_F /($N \cdot m^{-1}$)	$\sigma_s^{[14]}$ /MPa	$w_s^{[14]}$ /mm	$G_F^{[14]}$ /($N \cdot m^{-1}$)
NM	1.588	0.0868	23.72	0.238	0.0160	23
HM	2.567	0.0931	33.31	0.385	0.0118	33

为了验证试验计算得到的软化曲线和拟合得到的双线性软化曲线在对混凝土力学性能数值模拟时的差异,对素混凝土立方体试件采用细观刚体弹簧元进行受压模拟来比较两种曲线对模拟结果的影响。模拟试件的尺寸为 150 mm × 150 mm,试件模型

见图 2。采用圆形骨料,骨料面积占试件总面积的 40%。计算所用材料参数见表 2。

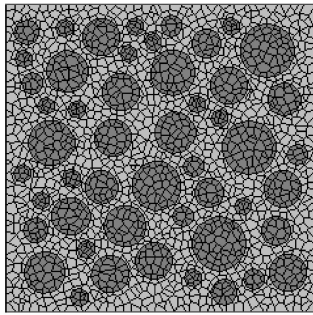


图 2 素混凝土试件的计算模型

表 2 混凝土组成材料的力学性能参数

类型	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	抗拉强度 f_t /MPa
骨料	50.0	0.25	30.00
砂浆	21.9	0.18	2.69
界面	—	—	1.63

试件破坏形态如图 3 所示。图 4 为两种状况下计算所得应力 - 应变曲线。从图 4 中可以看出,两种软化条件下的受压试件的应力 - 应变曲线几乎重合,抗压强度分别为 22.86 MPa 和 23.31 MPa,这说明两种软化曲线对数值模拟结果的影响不大。为了使用上的方便,建议在数值模拟时使用双线性软化曲线。

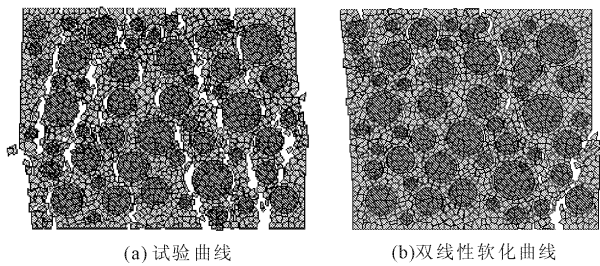


图 3 混凝土试件的破坏形态

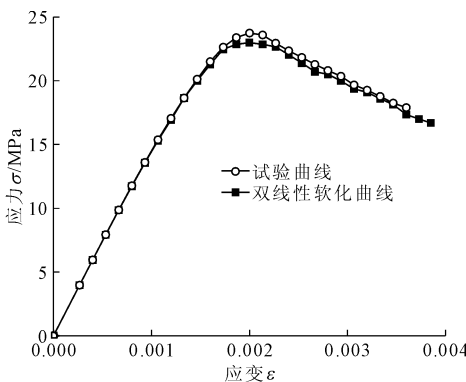


图 4 混凝土试件的应力 - 应变曲线

1.3 界面剪切本构关系

利用本文作者提出的基于光纤测试技术的新型试验方法^[11-12],即在砂浆中埋放单个骨料,分别将光纤传感器埋置于砂浆中和粘贴在骨料表面,测量了试件加载过程中骨料、砂浆的应变及两者间的相对滑移量。通过试验数据的分析,建立砂浆 - 骨料界面的剪切本构关系。加载试验过程如图 5 所示。

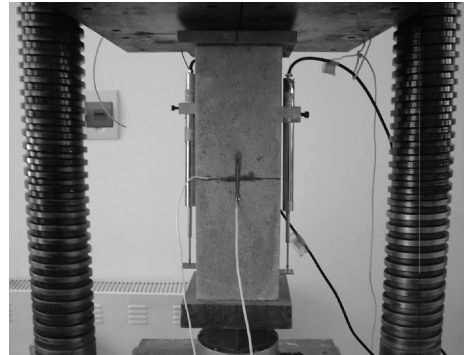


图 5 含单个骨料砂浆试件的单轴受压试验加载图

图 6 为单轴受压试验砂浆和骨料的应变 - 荷载关系曲线,砂浆和骨料间的相对变形值即为相对的粘结滑移量。

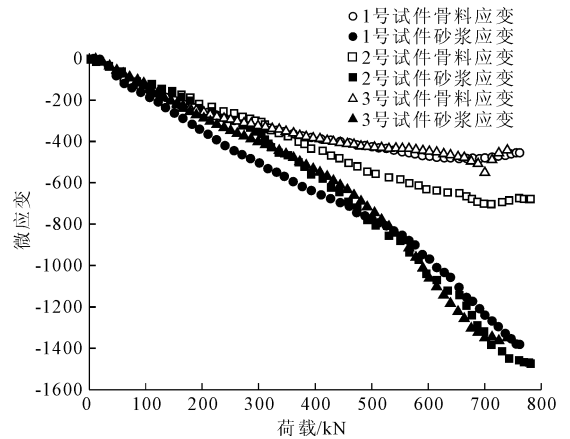


图 6 砂浆和骨料的应变 - 荷载关系

根据砂浆 - 骨料间粘结滑移关系的基本特征,本文作者提出了剪切本构关系的简化模型,如图 7 所示。

2 细观单元本构关系及材料参数

基于 Lemaitre 应变等价原理,可以得到损伤材料的本构关系,即:

$$\sigma = E_0(1 - D)\epsilon \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (3)$$

式中: E_0 和 E 分别为材料的初始弹性模量和损伤后的弹性模量; D 为材料的损伤变量, $D = 0$ 表示无损

伤状态, $D = 1$ 为完全损伤(破坏或者断裂) 状态, $0 < D < 1$ 表示材料不同程度的损伤。图 8 所示为不同文献基于损伤力学提出的几种拉伸本构关系, 几种模型控制参数的选取稍有不同。

拉伸软化特性对于砂浆 - 骨料界面而言是个非常重要的特点, 因此可以通过基于虚拟裂缝模型^[18] 的应力 - 裂缝宽度来表达界面的拉伸本构关系。文献^[19] 在数值模拟时采用了直线表达的拉伸软化本构模型, 其拉伸本构关系曲线如图 9(a) 所示, 图 9(b) 所示为本文提出的双线性拉伸本构关系曲线。

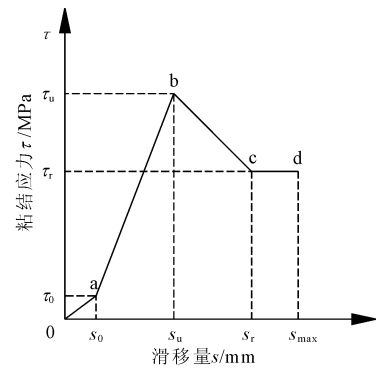


图 7 砂浆 - 骨料界面剪切本构关系简化模型

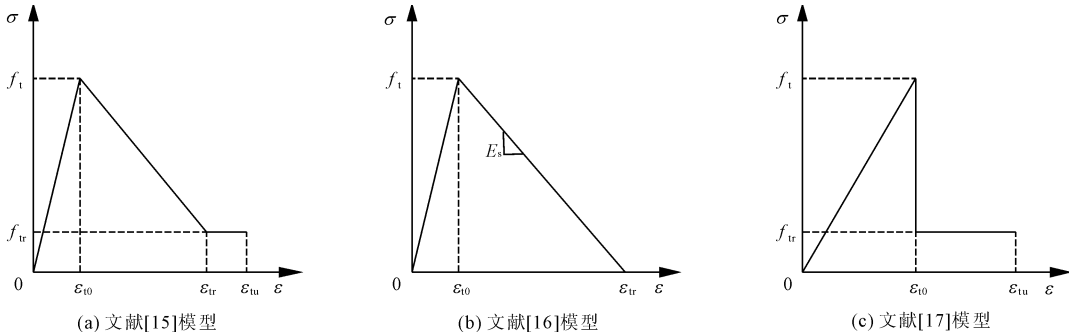


图 8 基于损伤力学的拉伸本构关系

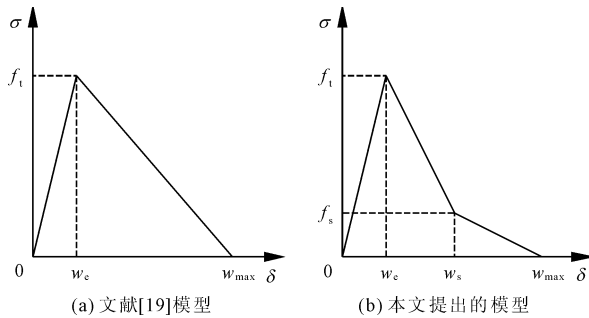


图 9 基于断裂力学的拉伸本构关系

根据本文试验结果, 60 MPa 的 HM 系列和 30 MPa 的 NM 系列试件的 w_e 分别为 0.0114 mm 和 0.0097 mm, 通过计算得到 w_{max} 的平均值分别为 0.0931 mm 和 0.0868 mm。

对于剪切损伤的本构模型, 文献^[16] 采用了弹脆性损伤本构模型, 如图 10(a) 所示, 图 10(b) 所示为文献^[17] 采用的剪切本构关系模型。

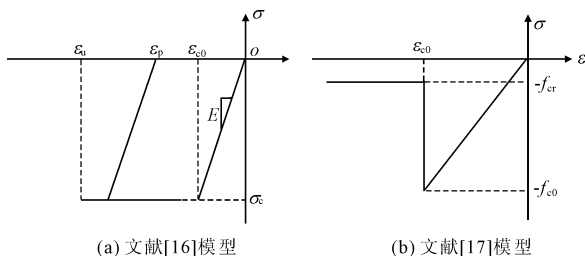


图 10 剪切本构关系模型

基于试验, 文献^[11 - 12] 提出了砂浆 - 骨料界面剪切本构关系的简化模型, 如图 7 所示, 曲线表达式为:

$$\begin{cases} \tau = \frac{\tau_0}{s_0} s, & 0 < s \leq s_0 \\ \tau = \frac{\tau_0 s_u - \tau_u s_0}{s_u - s_0} + \frac{\tau_u - \tau_0}{s_u - s_0} s, & s_0 < s \leq s_u \\ \tau = \frac{\tau_u s_r - \tau_r s_u}{s_r - s_u} - \frac{\tau_u - \tau_r}{s_r - s_u} s, & s_u < s \leq s_r \\ \tau = \tau_r, & s > s_r \end{cases} \quad (4)$$

文献^[17] 假定混凝土各相组成材料的力学参数服从 Weibull 分布, 参数分布取值如表 3 所示。

表 3 混凝土组成材料的 Weibull 分布参数

类型	弹模平均值 E /GPa	抗拉强度 f_t /MPa	均质度
骨料	80.0	500	6.0
砂浆	28.6	175	3.0
界面	15.0	150	1.5

文献^[19] 建立了界面过渡层抗拉强度 f_{ti} 与混凝土水灰比 W/C 的关系:

$$f_{ti} = -1.44W/C + 2.3 \quad (5)$$

本文则通过试验得到界面的粘结抗拉强度, 对应于 30 MPa 的 NM 系列普通砂浆试件和 60 MPa 的 HM

系列高强砂浆试件, f_{st} 分别为 1.59 MPa 和 2.57 MPa。

3 混凝土试件的细观数值模拟

混凝土试件在受力过程中, 裂缝通常先在砂浆-骨料界面产生, 然后随着荷载增加而逐渐扩展, 而且还有一些裂缝会扩展到砂浆中。基于试验提出砂浆-骨料界面的拉伸本构关系, 采用细观刚体弹簧元法分别模拟了含骨料的砂浆试件单轴受压、受拉破坏过程, 分析了裂缝产生、扩展与贯通的规律。模拟单轴受压试件的尺寸为 150 mm × 450 mm, 与试验中试件的尺寸相同, 采用的材料参数也与试验相同, 试件的单元数为 2 751。试件在单向压应力作用下的破坏模式与裂缝位置如图 11 所示。图 12 为数值模拟和试验得到的应力应变曲线, 通过数值模拟得到的抗压强度为 32.76 MPa, 而试验实测到的抗压强度为 34.73 MPa。在加载过程中, 裂缝先在砂浆-骨料界面产生, 然后沿着加载方向逐渐扩展到砂浆内, 最后形成贯通裂缝导致试件的最终破坏, 破坏模式也与试验结果相似。

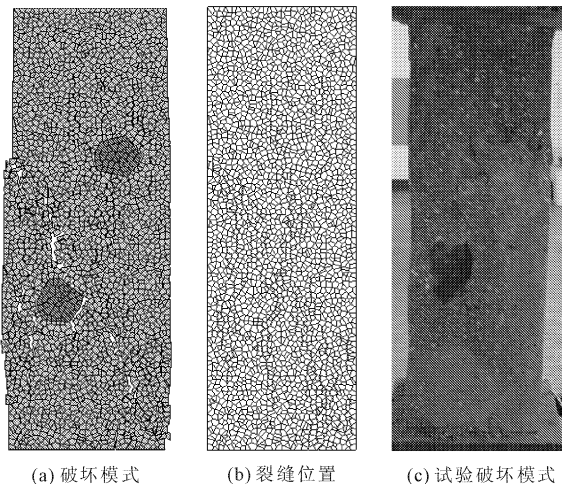


图 11 单轴受压试件数值模拟和试验的破坏模式

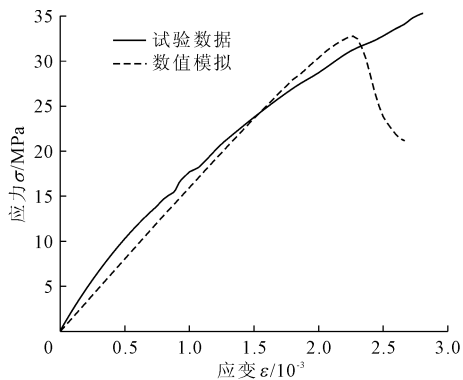


图 12 单轴受压试件的应力应变曲线

mm, 与试验中试件的尺寸相同, 采用的材料参数也与试验相同。试件在单向拉应力作用下的破坏模式与裂缝位置如图 13 所示。图 14 为数值模拟和试验得到的应力应变曲线, 通过数值模拟得到的抗拉强度为 1.22 MPa, 而试验实测到的抗压强度为 1.26 MPa。与单轴受压破坏过程不同, 单轴受拉破坏时是几个裂缝的相互贯通而破坏的, 不像单轴受压时是由很多个微裂缝逐渐扩展直至贯通而破坏的。单轴受拉时, 试件中的微裂缝出现之后扩展非常迅速, 很快就相互贯通进而试件破坏。从图 13 中可以看到试件断裂在砂浆-骨料界面这一薄弱环节上产生。

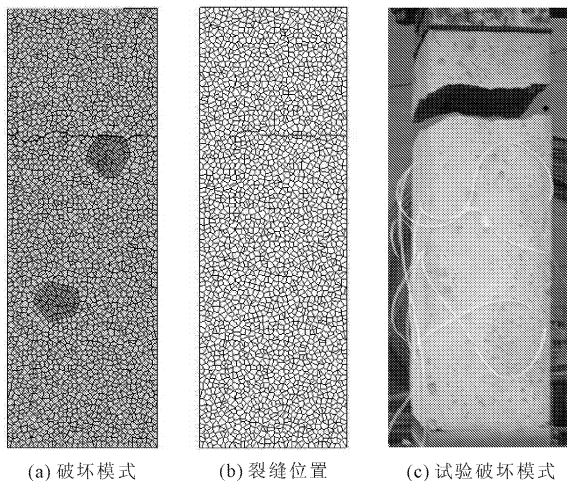


图 13 单轴受拉试件数值模拟和试验的破坏模式

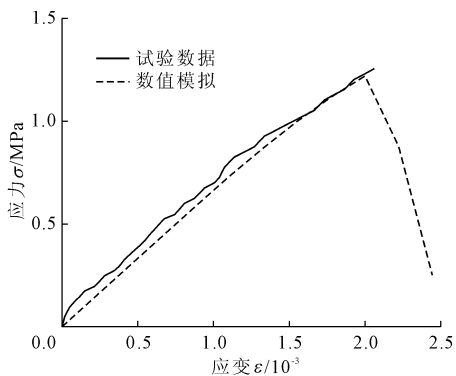


图 14 单轴受拉试件的应力应变曲线

通过细观刚体弹簧元法对含骨料的砂浆试件进行的单轴受压与单轴受拉数值模拟结果可以看出, 本文提出的砂浆-骨料界面的拉伸本构关系可以用在细观数值模拟中, 并且破坏模式与试验的破坏模式基本相同。采用细观数值模拟能够有效的预测裂缝位置和试件破坏的过程。

4 结论

(1) 砂浆-骨料界面的断裂参数可以通过三点

模拟单轴受拉试件的尺寸也是 150 mm × 450

弯曲试验得到。界面的拉伸软化曲线可以采用改进的 J 积分的方法计算得到。根据砂浆 - 骨料界面的粘结滑移关系的基本特征,提出了界面剪切本构关系的简化模型。

(2) 采用细观刚体弹簧元法对含骨料的砂浆试件进行了单轴受压与单轴受拉的数值模拟,模拟结果与试验测得的结果相一致。说明本文提出的拉伸本构关系模型可以方便有效地在数值模拟中使用。

参考文献:

- [1] Zaitsev Y B, Wittmann F H. Simulation of crack propagation and failure of concrete[J]. *Materials and Structures*, 1981, 14(5):357-365.
- [2] 西德尼·明德斯, J·弗朗西斯·杨, 戴维·达尔文. 混凝土[M]. 吴科如, 张雄, 姚武等译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] Bazant Z P, Tabbara M R, Kazemi M T, et al. Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116(8):1686-1705.
- [4] Bazant Z P, Oh B H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111(4):559-582.
- [5] 朱万成, 唐春安, 赵文, 等. 混凝土试样在静态荷载作用下断裂过程的数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2002, 19(6):148-153.
- [6] 王立成, 陈桂斌. 基于细观刚体弹簧元的轻骨料混凝土力学性能数值模拟[J]. *水利学报*, 2008, 39(5):588-595.
- [7] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2004, 2(2):124-130.
- [8] 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]. *水利水电科技进展*, 2008, 28(2):89-94.

- [9] Song Yupu, Zhu Yachao, Wang Licheng. Experimental research on the bond strength of mortar - aggregate interface in concrete[C]//The 9th International Conference on Civil and Environmental Engineering, China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 朱亚超, 宋玉普, 王立成. 砂浆 - 骨料界面拉伸软化性能试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(1):91-95.
- [11] 朱亚超, 宋玉普, 王立成, 等. 混凝土中砂浆 - 骨料界面粘结滑移性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2011, 27(5):839-845.
- [12] 朱亚超. 混凝土中砂浆 - 骨料界面力学性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [13] Niwa J, Sumranwanich T, Tantermisirikul S. New method to determine tension softening curve of concrete[J]. *Fracture Mechanics of Concrete Structures. Proceedings of FRAMCOS - 3*, 1998, 1:347-356.
- [14] Comite E. Euro - international Du B. Eton, CEB - FIP Model Code 1990: Design Code [M]. London: Thomas Telford, Lausanne, 1993.
- [15] 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, 35(10):27-35.
- [16] 刘庭金, 朱合华, 莫海鸿. 非均质混凝土破坏过程的细观数值试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(22):4120-4133.
- [17] 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.
- [18] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P - E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6:773-781.
- [19] Nagai K, Sato Y, Ueda T. Meso-scale simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBSM [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2004, 2(3):359-374.

(上接第 57 页)

- [8] 王凤池, 燕晓, 叶霄鹏. 橡胶水泥土强度特性与机理的试验研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 24(2):46-51.
- [9] 史富民. 橡胶水泥土桩复合地基竖向荷载试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [10] 张达德, 张家豪. 砂土围压下的废轮胎拉拔试验评估[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3):733 - 737.
- [11] 李丽华. 废旧轮胎条加固岸堤影响分析[J]. *工业建筑*, 2013(S1):434-437.

- [12] 陈辉. 废旧轮胎碎片混合土工特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.
- [13] 孙书伟, 林杭, 任连伟. FLAC3D 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2011.
- [14] 牛志荣. 地基处理技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004:257-260.
- [15] 王杰. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003:265.