

# 模型再生混凝土单轴受压应力分布特征

李文贵<sup>1</sup>, 肖建庄<sup>1, 2</sup>, 袁俊强<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 根据再生混凝土各相材料的力学特性, 对模型再生混凝土进行细观数值分析, 获取模型再生混凝土单轴受压下内部应力分布特征. 通过变参数分析, 讨论不同天然骨料、界面过渡区和老硬化砂浆的力学参数对模型再生混凝土应力分布特征的影响. 结果表明, 模型再生混凝土天然骨料之间的新老界面过渡区处存在拉应力和剪应力集中现象; 天然骨料弹性模量增大, 应力集中现象愈加明显, 界面过渡区弹性模量增大, 应力集中现象则逐渐减弱, 老砂浆弹性模量增大应力集中特征变化不大.

**关键词:** 模型再生混凝土; 细观; 界面过渡区; 老硬化砂浆; 有限元分析

**中图分类号:** TU528

**文献标识码:** A

## Stress Distribution Characteristics of Modeled Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Compression

LI Wengui<sup>1</sup>, XIAO Jianzhuang<sup>1, 2</sup>, YUAN Junqiang<sup>1</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the mechanical properties of each material phase in recycled aggregate concrete (RAC), a two-dimensional modeled RAC was built, and the stress distribution characteristics of the modeled RAC under uniaxial compressive were obtained by meso-level numerical analysis. A parametric analysis was conducted to investigate the sensitivity of the stress distribution of the modeled RAC, which focused on different mechanical parameters of natural aggregate, interfacial transition zone (ITZ) and old hardened mortar. Results show that a concentration of tensile stress and shear stress produces at new and old interfacial transition zones between the natural aggregates. The higher elastic modulus of natural aggregates are, the higher the magnitude

of stress concentration is, and the higher elastic modulus of the interfacial transition are, the lower the magnitude of stress concentration is. Whereas the effects of the elastic modulus of old hardened mortar on stress concentration are not evident.

**Key words:** modeled recycled aggregate concrete; meso-level; interfacial transition zone; old hardened mortar; finite element analysis

数值仿真方法逐渐用于混凝土材料细观微观结构和力学性能方面的研究<sup>[1-5]</sup>. 细观上, 再生混凝土是一种由天然骨料、老界面过渡区、老硬化水泥砂浆、新界面过渡区和新硬化水泥砂浆组成的 5 相复合材料. 新老界面过渡区相对于水泥砂浆空隙率较大, 含有微裂纹, 存在缺陷, 是再生混凝土材料中的薄弱区<sup>[6-7]</sup>. 再生混凝土的老界面过渡区处于天然骨料与老硬化砂浆之间, 新界面过渡区处于老硬化砂浆和新硬化砂浆之间. 由于附着在天然骨料表面的老硬化砂浆存在一些强度退化以及再生粗骨料的机械破碎过程会在老界面过渡区形成细裂纹, 因此再生混凝土相比普通混凝土具有一些初始缺陷, 界面过渡区和老硬化砂浆是再生混凝土的薄弱部位<sup>[8]</sup>.

目前, 针对再生混凝土单轴受压力学性能已进行了大量的试验研究<sup>[9-10]</sup>. 再生混凝土的受压破坏部位主要集中在新老界面过渡区和老硬化砂浆. 以普通混凝土为研究对象, 建立二维细观有限元模型, 可以分析混凝土在单轴受压情况下的应力分布特征<sup>[1, 11-12]</sup>. 本文通过变参数分析讨论了不同天然骨料、老硬化砂浆和界面过渡区的力学参数对再生混凝土应力分布特征的影响.

## 1 模型再生混凝土

Shah 和 Winter 采用单颗骨料混凝土分析模

收稿日期: 2010-12-24

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0383), 国家自然科学基金(51178340)

第一作者: 李文贵(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为再生混凝土力学性能. E-mail: wengui.li1021@gmail.com

通讯作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

型,研究在单轴压情况下界面过渡区应力分布特征<sup>[13]</sup>,Buyukozturk 和 Nilson 提出了 9 颗骨料混凝土研究模型,并进行了试验和有限元分析<sup>[14-15]</sup>,Choi 和 Shah 提出了 1 颗、5 颗和 13 颗骨料的混凝土模型,并采用数字图像相关技术研究其在单轴受压下微裂缝开展信息<sup>[16]</sup>. 本文模型再生混凝土(modeled recycled aggregate concrete)的平面尺寸为 150 mm × 150 mm,天然骨料的直径为 28 mm,附着在天然骨料周围的老硬化砂浆厚度为 5 mm. 再生骨料之间的间距为 9 mm,骨料到试件边缘的距离为 9 mm,新老界面过渡区的厚度均为 0.05 mm,具体尺寸如图 1 所示. 在模型再生混凝土中,新砂浆、老砂浆和天然骨料 3 相材料的体积分数分别为 54.7%,20.7% 和 24.6%,该结果与普通再生混凝土中各组分大致相同<sup>[17]</sup>.

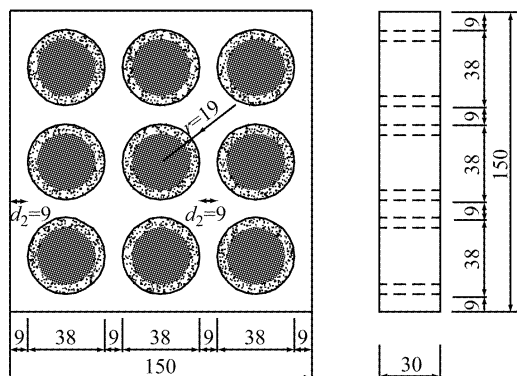


图 1 模型再生混凝土示意图(单位:mm)

Fig.1 Modeled recycled aggregate concrete (unit:mm)

## 2 有限元分析

### 2.1 材料特性

采用有限元软件 ABAQUS 建立模型再生混凝土的线弹性二维有限元模型,各相材料特性均假定为线弹性,考虑各相材料的弹性模量和泊松比. 天然骨料和新老硬化砂浆的弹性模量和泊松比根据各相材料试验数据确定. 天然骨料的弹性模量( $E_A$ )取 70 000 MPa,泊松比( $\nu_A$ )取 0.16 保持不变. 老硬化砂浆的弹性模量( $E_{OM}$ )取 25 000 MPa,泊松比( $\nu_{OM}$ )为 0.22. 新硬化水泥砂浆的弹性模量( $E_{NM}$ )取 30 000 MPa,泊松比( $\nu_{NM}$ )取 0.22,均保持不变.

混凝土材料中,界面过渡区的厚度大约为 50  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>,弹性模量大约为砂浆的 30%~50%<sup>[19]</sup>,取界面过渡区的强度为硬化砂浆强度的 50%. Rasheeduzzafar 和 Khan 认为再生混凝土中新界面过渡区强度一般大于老界面过渡区强度<sup>[7]</sup>. 再生混凝土老界面过渡区的弹性模量( $E_{OITZ}$ )取 13 000 MPa,泊松比( $\nu_{OITZ}$ )为 0.20. 新界面过渡区的弹性模量( $E_{NITZ}$ )取 15 000 MPa,泊松比( $\nu_{NITZ}$ )为 0.20, Ramesh 和 Sotelino 等认为界面过渡区泊松比与硬化砂浆泊松比接近,处于 0.02~0.26 之间<sup>[20]</sup>. 各相材料的力学参数设定如表 1 所示.

### 2.2 有限元模型

选用 CPS4R 单元(4 节点减缩积分平面应力单元),采用扫掠网格划分方法进行单元划分,最后划

表 1 各相材料力学参数设定

Tab.1 Mechanical properties of each phase materials

各相材料	体积分数 / %	弹性模量 / MPa	泊松比 $\nu$
天然骨料 (A)	24.62	30 000, 50 000, 70 000	0.16
老硬化砂浆 (OM)	20.72	20 000, 25 000, 30 000	0.22
新硬化砂浆 (NM)	54.00	30 000	0.22
老界面过渡区 (OITZ)	0.18	13 000, 19 000, 25 000	0.20
新界面过渡区 (NITZ)	0.48	15 000, 23 000, 30 000	0.20

分得到 18 148 个规则的四边形单元<sup>[21]</sup>. 模型再生混凝土划分单元后的有限元模型如图 2 所示. 根据变化材料力学参数的需要,共建立 7 个数值仿真试件.

有限元模型顶部 X, Y 位移和 XY 向转动保持自由;约束模型底部 Y 位移的自由度,保持 X 和 XY 方向自由. 在模型顶部沿 Y 方向施加轴向向下的均布荷载 30.0  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . 选择静力分析,设置一个荷载步,关闭大变形开关,采用自动搜索,直至计算完毕. 模型再生混凝土中各相材料特性均为线弹性,通过单向受压加载讨论应力分布特征,根据应力分布

集中现象发现模型再生混凝土的薄弱部位,进而探讨再生混凝土在单轴受压下微裂缝出现和开展的一般规律.

### 2.3 计算结果

采用 ABAQUS 的后处理功能,提取模型再生混凝土 Y 向应力( $S_{22}$ , 竖向)、X 向应力( $S_{11}$ , 水平)、XY 向应力( $S_{12}$ , 剪切)和 Von Mises(等效)应力的应力云图,如图 3 所示. 其中,应力符号的规定为受拉为正,受压为负.

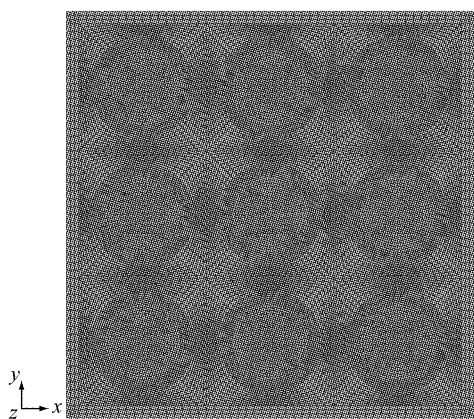


图 2 模型再生混凝土有限元模型

Fig. 2 Finite element model of modeled RAC

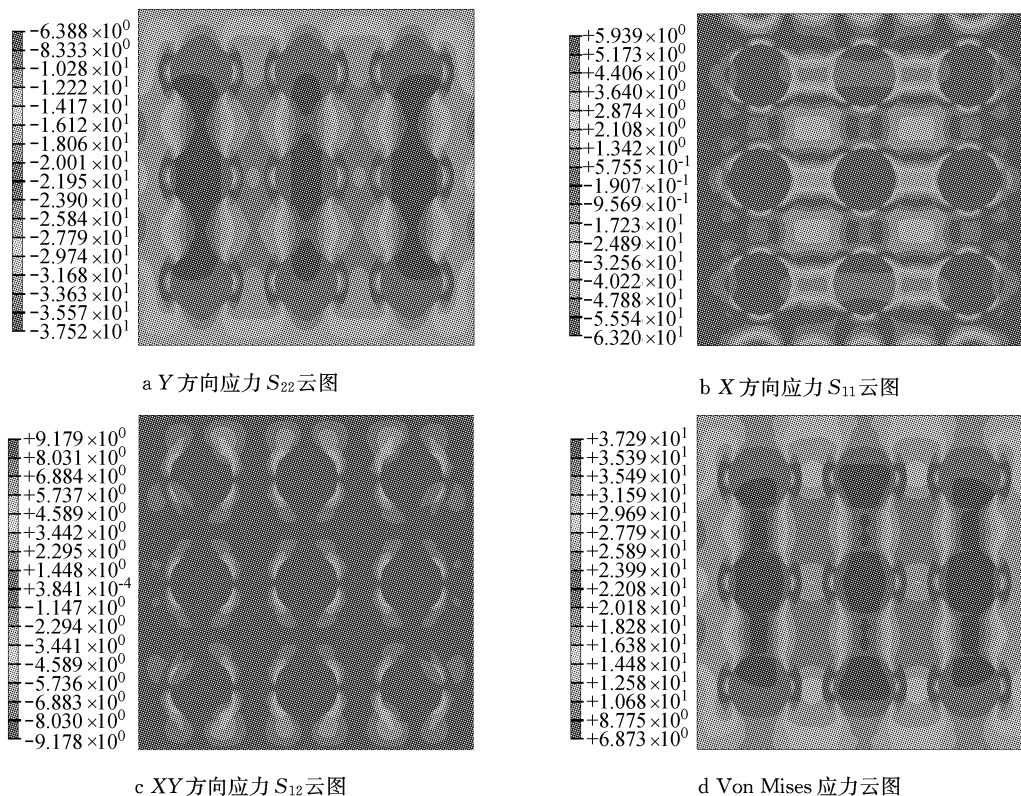


图 3 模型再生混凝土应力分布云图

Fig. 3 Stress distribution of modeled RAC

凝土 X 向变形满足 Y 轴对称分布,试件各相材料的变形不均匀,在界面过渡区和老砂浆处变形出现不连续现象.Y 向变形满足 Y 轴对称分布,试件中天然骨料的变形最小,界面过渡区的变形最大,从底部到顶部 Y 向变形分布不连续。

在同济大学混凝土材料试验室制作的模型再生混凝土试件见图 5. 采用 Instron 5592 刚性试验机对模型再生混凝土试件进行单轴受压试验研究,如图 6 所示. 在单轴加载过程中拍摄试件表面图片后,通过数字图像相关处理技术——细观力学变形测试

在单轴受压荷载作用下,模型再生混凝土的 Y 向  $S_{22}$  在天然骨料处较大,在骨料两侧的界面过渡区位置较小,新界面过渡区最为明显. X 向  $S_{11}$  在天然骨料处较小,在骨料两侧的新界面过渡区较大,另外骨料之间的新砂浆处也较大. XY 向  $S_{12}$  在骨料周围角度大概为  $45^\circ$  对应的界面过渡区位置较大,其中新界面过渡区位置最为明显. 等效应力值 Von Mises 在天然骨料位置较大,骨料两侧的界面过渡区较小,其中新界面过渡区最为明显。

模型再生混凝土的 X 向( $U_1$ )和 Y 向( $U_2$ )位移分布情况如图 4 所示. 根据模型中各单元的位移分布云图,可以得知各相材料的变形情况. 模型再生混

(optical fringe pattern analysis)<sup>[22]</sup> 处理后得到试件表面的 X, Y 向位移灰度图,结果见图 7. 通过比较分析,有限元数值仿真计算结果与试验测试结果基本吻合,说明本文建立的有限元模型是有效和可靠的。

### 3 变参数分析

模型再生混凝土在单轴受压情况下,改变其组成材料中的天然骨料、新老界面过渡区和老硬化砂浆的材料特性,讨论应力分布特征变化情况. 为了比

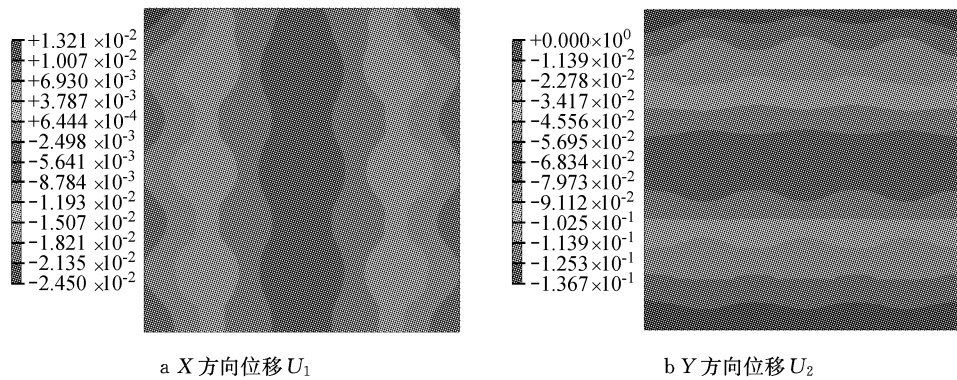


图 4 模型再生混凝土位移分布云图

Fig.4 Displacement distribution of modeled RAC

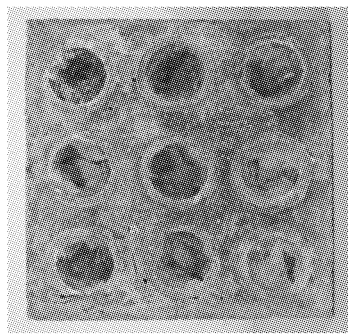


图 5 模型再生混凝土试件

Fig.5 Specimen of modeled RAC

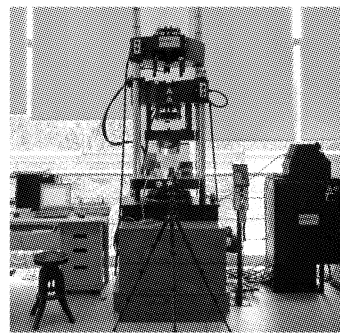
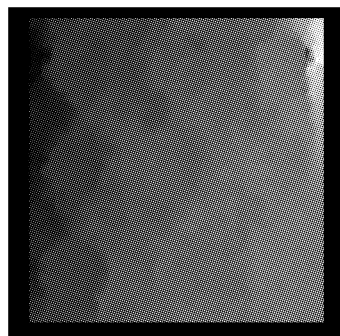
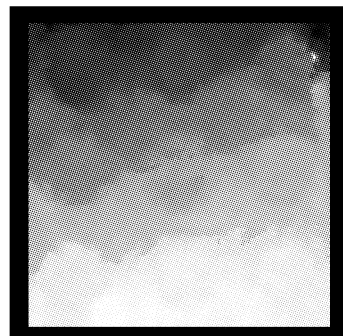


图 6 模型再生混凝土加载装置

Fig.6 Loading setup of modeled RAC



a X 向位移



b Y 向位移

图 7 试件位移分布灰度图

Fig.7 Grey-scale map of displacement distribution for modeled RAC specimen

较不同计算参数下模型再生混凝土单轴受压应力分布特征,在试件中选取特定位置提取各单元节点的应力值,绘制应力值与相应位置的分布曲线.所选取的位置分别为试件横截面(Section A—A)、老界面过渡区(OITZ-B)和新界面过渡区(NITZ-C),具体如图 8 所示.

本文通过变参数分析,讨论模型再生混凝土在单轴受压下相关截面和新老界面过渡区应力  $S_{22}$ 、 $S_{11}$  和  $S_{12}$  的分布情况和应力集中现象.界面过渡区实际上是一种非线性梯度材料且材料特性随着混凝土使用时间发生改变.本文把界面过渡区简化成匀

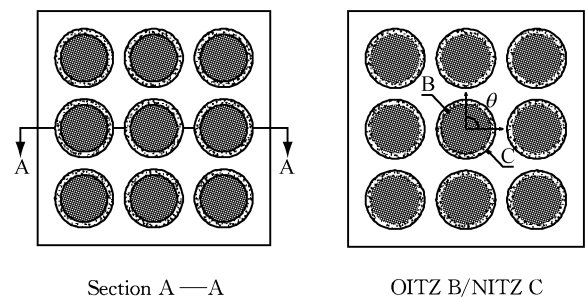


图 8 横截面和新老界面过渡区位置

Fig.8 The location of cross section and ITZs

质弹性材料,代表实际界面过渡区平均力学性能.对

不同各相材料力学参数下模型再生混凝土的弹性应力分布规律进行分析,进一步精细化探讨再生混凝土内部应力集中和各相材料相容性特征,为再生混凝土破坏机理和改性措施研究提供定性的理论依据。

3.1 天然骨料

天然骨料的弹性模量分别取 30 000,50 000 和 70 000 MPa,其余各相材料的力学参数保持不变。提取模型再生混凝土横截面 A—A 的 Y 向应力  $S_{22}$  值和 X 向应力  $S_{11}$  值(表 2),绘制不同天然骨料弹性模量下的变化曲线图。由图 9a 可知,随着天然骨料弹性模量增大,界面过渡区承受的竖向荷载减少,天然骨料承受的竖向荷载增加。天然骨料弹性模量取为 30 000 MPa 时,新砂浆承担较大的竖向荷载。

由图 9b 可知,天然骨料两侧界面过渡区部位出现拉应力集中现象,随着天然骨料弹性模量增大,集中现象愈加突出。 $S_{11}$  幅值最大值出现在新老砂浆之间的新界面过渡区部位,随着天然骨料弹性模量增大,应力集中位置基本保持不变。再生混凝土是一种抗拉强度较低的多相复合材料,界面过渡区处受拉应力集中将会导致界面过度处的微裂缝不断扩展而发生破坏。

由图 9c~9d 可知,老界面过渡区  $S_{11}$  满足 Y 轴对称分布,  $0\sim\pi/2$  范围内幅值最大值出现在  $\pi/5$  左右。 $S_{12}$  满足原点对称,  $0\sim\pi/2$  之间应力幅值出现在  $\pi/7$  左右。随着天然骨料弹性模量增大,老界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值位置和分布规律基本保持不变。

表 2 不同天然骨料弹性模量下界面过渡区应力分布特征

Tab.2 Stress distribution for ITZs with different elastic modulus of natural aggregate MPa									
$E_A$	$E_{MRC}$	$S_{11}$ (OITZ-B)		$S_{12}$ (OITZ-B)		$S_{11}$ (NITZ-C)		$S_{12}$ (NITZ-C)	
		最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值
30 000	28 770	-3.67	3.77	-5.08	5.08	-2.29	2.34	-3.54	3.54
50 000	32 240	-5.33	4.90	-7.24	7.24	-2.64	2.76	-3.81	3.81
70 000	34 350	-6.61	5.41	-8.26	8.26	-2.80	3.52	-3.94	3.94

注:  $E_{MRC}$  为试件的弹性模量。

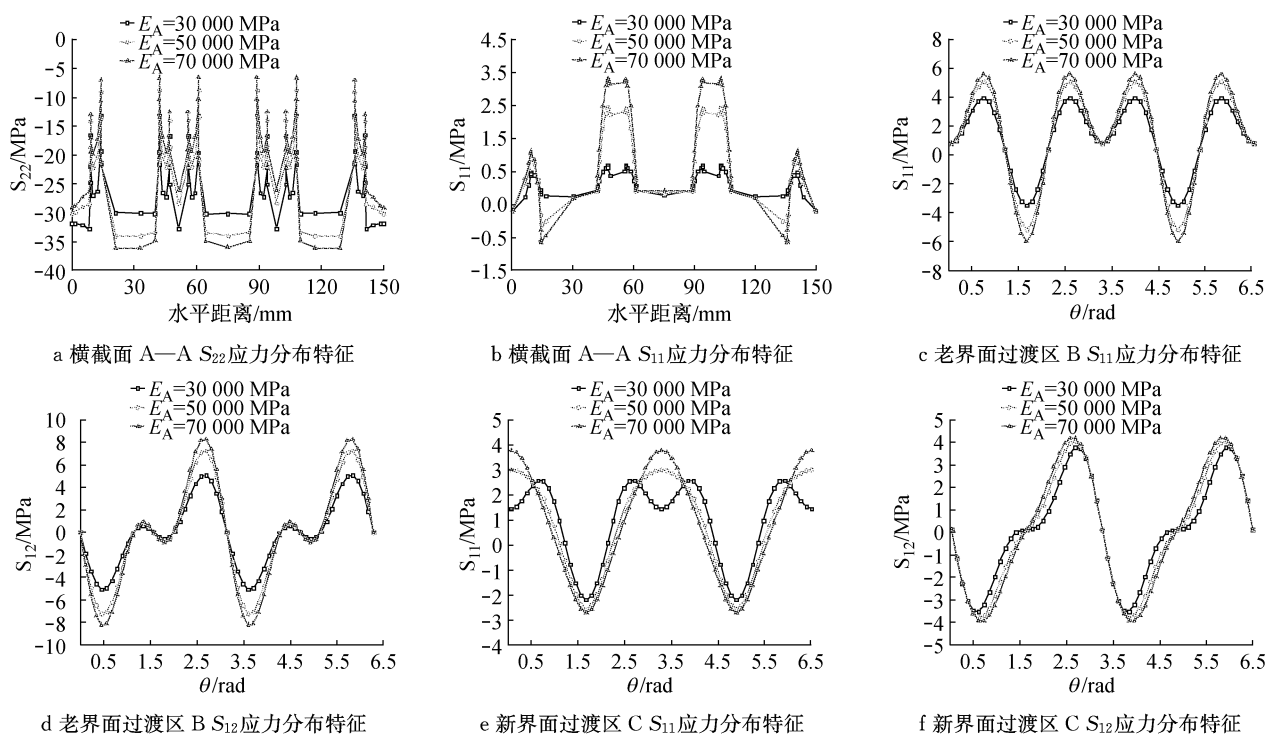


图 9 不同天然骨料弹性模量的影响分析

Fig.9 The influence of natural aggregate with different elastic modulus

由图 9e~9f 可知,新界面过渡区  $S_{11}$  满足 Y 轴对称分布,幅值出现在再生骨料两侧,随着天然骨料弹性模量增大, $S_{11}$  幅值位置和分布规律发生变化。 $S_{12}$  分布规律随着天然骨料弹性模量增大而发生

$S_{12}$  满足原点对称,  $0\sim\pi/2$  弧度范围内幅值最大值出现在  $\pi/6$  左右,不随天然骨料弹性模量改变发生变化。 $S_{12}$  分布规律随着天然骨料弹性模量增大而发生

变化。

### 3.2 界面过渡区

老界面过渡区弹性模量分别取 13 000, 19 000 和 25 000 MPa, 新界面过渡区弹性模量依次分别取 15 000, 23 000 和 30 000 MPa, 其余各相材料的力学参数保持不变。由图 10a 可知, 随着界面过渡区弹性模量增大, 界面过渡区承受的竖向荷载增大, 天然骨料  $S_{22}$  应力值基本保持不变, 仍承受较大的竖向荷载。

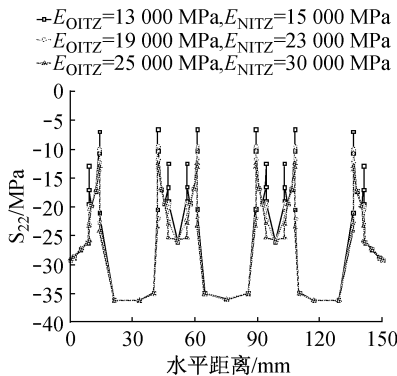
由图 10b 可知, 天然骨料两侧界面过渡区处出现拉应力集中现象,  $S_{11}$  应力幅值最大值出现在新界面过渡区处。随着界面过渡区弹性模量增大, 新界面过渡区  $S_{11}$  应力变化不大, 应力集中现象仍然很突出。

由表 3 可知, 新界面过渡区和老界面过渡区的  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值随界面过渡区弹性模量增大而降低, 界面过渡区处的应力集中现象也逐渐减弱。老界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值均大于新界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值, 老界面过渡区的应力集中现象较新界面过渡区更为明显。由于界面过渡区占模型混凝土的体积分数很小, 界面过渡区弹性模量的变化对模型再生混凝土弹性模量影响不大。

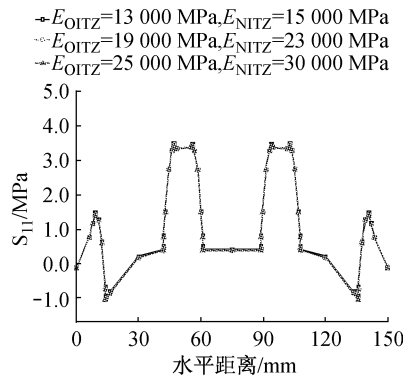
由图 10c~10d 可知, 老界面过渡区  $S_{11}$  满足  $Y$  轴对称分布,  $0 \sim \pi/2$  弧度范围内幅值最大值出现在  $\pi/5$  左右。  $S_{12}$  满足原点对称,  $0 \sim \pi/2$  弧度之间的幅值出现在  $\pi/7$  左右。随着界面过渡区弹性模量增大,  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值位置和分布规律基本保持不变。

表 3 不同界面过渡区弹性模量下界面过渡区应力分布特征

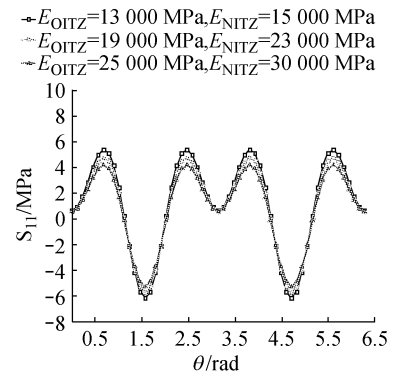
Tab.3 Stress distribution characteristic for ITZs with different elastic modulus of ITZs											MPa
$E_{\text{OITZ}}$	$E_{\text{NITZ}}$	$E_{\text{MRC}}$	$S_{11}(\text{OITZ-B})$		$S_{12}(\text{OITZ-B})$		$S_{11}(\text{NITZ-C})$		$S_{12}(\text{NITZ-C})$		
			最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	
13 000	15 000	34 350	-6.16	5.41	-8.26	8.26	-2.80	3.52	-3.94	3.94	
19 000	23 000	34 450	-5.73	4.80	-7.40	7.40	-1.04	3.49	-2.46	2.46	
25 000	30 000	34 510	-5.30	4.18	-6.52	6.52	-1.75	3.47	-2.07	2.07	



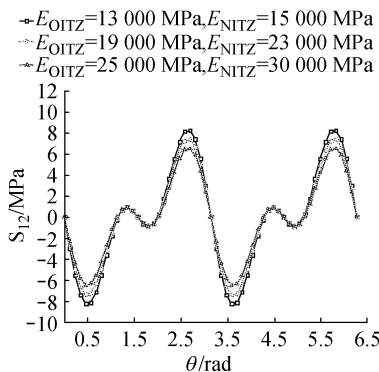
a 横截面 A—A  $S_{22}$  应力分布特征



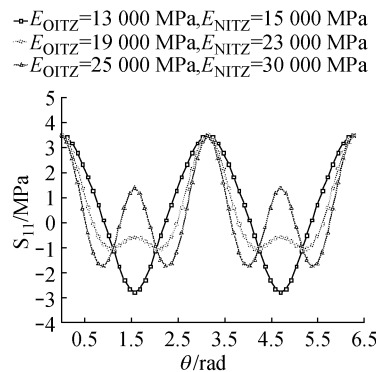
b 横截面 A—A  $S_{11}$  应力分布特征



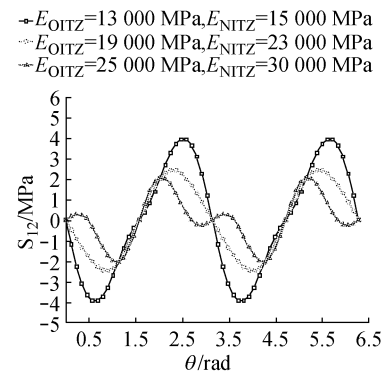
c 老界面过渡区 B  $S_{11}$  应力分布特征



d 老界面过渡区 B  $S_{12}$  应力分布特征



e 新界面过渡区 C  $S_{11}$  应力分布特征



f 新界面过渡区 C  $S_{12}$  应力分布特征

图 10 不同界面过渡区弹性模量的影响分析

Fig.10 The influence of ITZs with different elastic modulus

由图 10e~10f 可知,新界面过渡区  $S_{11}$  满足原点对称分布,应力幅值出现在再生骨料两侧,随着界面过渡区弹性模量增大,  $S_{11}$  应力幅值位置发生变化,分布规律也发生一定变化. 新界面过渡区  $S_{12}$  满足原点对称,随着界面过渡区弹性模量增大,  $S_{12}$  应力幅值位置和分布规律均发生变化.

### 3.3 老硬化砂浆

老硬化砂浆弹性模量依次分别取为 20 000, 25 000 和 30 000 MPa,其余各相材料的力学参数保持不变. 由表 4 可知,随老砂浆弹性模量增大,老界面过渡区的  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值变化不大. 随着老砂浆弹性模量增大,新界面过渡区  $S_{11}$  幅值最大值减小,  $S_{12}$  幅值增大. 老界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值均大于新界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值,老界面过渡区的应力集中现象更为明显. 随着老砂浆弹性模量增大,模型再生混凝土弹性模量有所提高.

由图 11a 可知,随着老硬化砂浆弹性模量增大,

新硬化砂浆承担的竖向荷载减少,老硬化砂浆和天然骨料承担的竖向荷载增加. 横截面 A—A 的  $S_{22}$  分布特征基本不变. 由图 11b 可知,天然骨料两侧界面过渡区处出现拉应力集中现象,  $S_{11}$  幅值最大值出现在新界面过渡区处. 随着老硬化砂浆弹性模量增大,界面过渡区处拉应力集中现象稍有减弱.

由图 11c~11d 可知,老界面过渡区  $S_{11}$  满足 Y 轴对称分布,  $0 \sim \pi/2$  弧度范围内应力幅值出现在  $\pi/5$  左右.  $S_{12}$  满足原点对称,  $0$  到  $\pi/2$  之间的应力幅值出现在  $\pi/7$  左右. 随着老砂浆弹性模量的增大,老界面过渡区  $S_{11}$  和  $S_{12}$  应力幅值出现位置和分布规律基本保持不变. 由图 11e~11f 可知,新界面过渡区  $S_{11}$  满足原点对称分布,幅值出现在再生骨料两侧,随着界面过渡区弹性模量增大,  $S_{11}$  应力幅值位置和分布规律也发生一些变化. 新界面过渡区  $S_{12}$  应力满足原点对称,随着界面过渡区弹性模量增大,  $S_{12}$  应力幅值出现位置和分布规律发生变化.

表 4 不同老硬化砂浆弹性模量下界面过渡区应力分布特征

Tab.4 Stress distribution characteristic for ITZs with different elastic modulus of old hardened mortar MPa									
$E_A$	$E_{MRC}$	$S_{11}$ (OITZ-B)		$S_{12}$ (OITZ-B)		$S_{11}$ (NITZ-C)		$S_{12}$ (NITZ-C)	
		最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值	最小值	幅值最大值
20 000	32 329	-6.21	5.48	-8.37	8.37	-1.89	4.14	-3.46	3.46
25 000	34 213	-6.19	5.64	-8.45	8.45	-2.76	3.75	-3.77	3.77
30 000	35 961	-6.16	5.74	-8.46	8.46	-3.44	3.38	-3.99	3.99

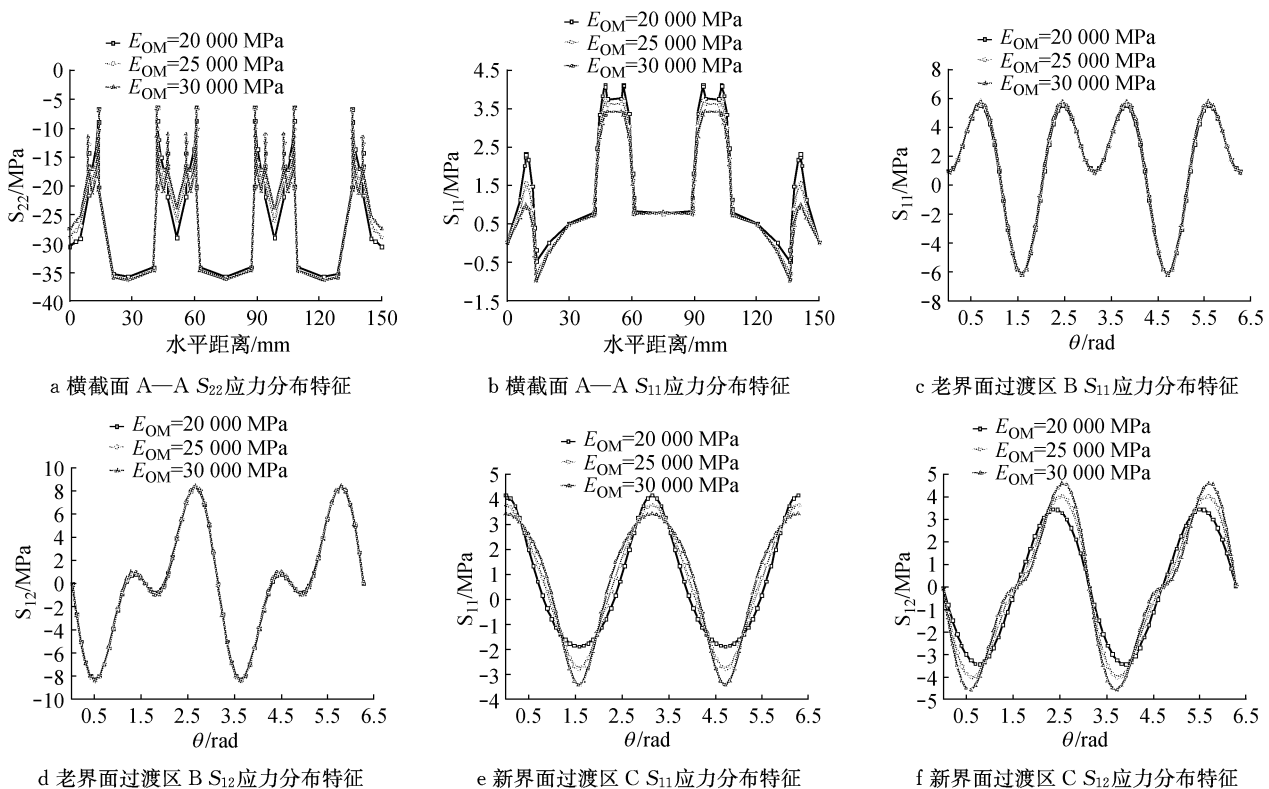


图 11 不同老硬化砂浆弹性模量的影响分析

Fig. 11 The influence of old mortar with different elastic modulus



## 4 结论

(1) 在单轴受压作用下,模型再生混凝土天然骨料之间的新老界面过渡区出现拉应力和剪应力集中现象,将导致试件内部微裂缝的产生和已有细裂缝的扩展。

(2) 随着天然骨料弹性模量增大,天然骨料两侧的老新界面过渡区处的拉应力集中和剪应力集中现象愈加突出。

(3) 随着界面过渡区弹性模量增大,新老界面过渡区处的拉应力和剪应力现象有减弱趋势。

(4) 随着老硬化砂浆弹性模量增大,老界面过渡区应力变化不大,新界面过渡区应力分布集中现象略有增加。

## 参考文献:

- [1] Agioutantis Z, Chatzopoulou E, Stavroulaki M. A numerical investigation of the effect of the interfacial zone in concrete mixtures under uniaxial compression: the case of the dilute limit [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30:715.
- [2] 郭翔,李杰. 基于细观物理机制的混凝土损伤数值仿真 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(3): 259.  
WU Xiang, LI Jie. Meso-mechanism-based simulation of concrete damage process [J]. *Chinese Journal of Building Materials*, 2009, 12(3):259.
- [3] 刘光廷,王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂 [J]. *清华大学学报:自然科学版*, 1996, 36(1): 84.  
LIU Guangting, WANG Zongmin. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model [J]. *Chinese Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1996, 36(1): 84.
- [4] Sun Z H, Garboczi E J, Shah S P. Modeling the elastic properties of concrete composites: experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation [J]. *Cement & Concrete Composites*. 2007, 29: 22.
- [5] 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, 16(4): 112.  
TANG Chun'an, FU Yufang, ZHU Wancheng. Numerical approach to effect of interface properties on failure modes in particle-filled composite [J]. *Chinese Journal of Acta Materiae Compositae Sinica*, 1999, 16(4): 112.
- [6] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2004 18: 461.
- [7] Rasheeduzzafar, Khan A. Recycled concrete—a source for new aggregate [J]. *Cement, Concrete and Aggregates*. 1984, 6(1): 17.
- [8] 肖建庄,刘琼,李文贵,等. 再生混凝土细微观结构和破坏机理研究 [J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 24.  
XIAO Jianzhuang, LIU Qiong, LI Wengui, et al. On the micro- and meso- structure and failure mechanism of recycled concrete [J]. *Chinese Journal of Qingdao Technological University*, 2009, 30(4): 24.
- [9] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等. 再生混凝土的抗压强度研究 [J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2004, 32(12): 1558.  
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. *Chinese Journal of Tongji University: Natural Science*, 2004, 32(12): 1558.
- [10] Xiao J Z, Li J B, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. *Cement and Concrete Research*. 2005, 35(6): 1187.
- [11] Ramesh G, Sotelino E. D, Chen W. F. Effect of transition zone on elastic stresses in concrete materials [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1998, 10(4): 275.
- [12] Hirsch T. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic modulus of cement paste matrix and aggregate [J]. *ACI Journal*, 1962, 59(3): 427.
- [13] Shah S P, Winter G. Inelastic behavior and fracture of concrete [J]. *ACI Journal*, 1966, 63(9):925.
- [14] Buyukozturk O, Nilson A H, Slate F O. Stress-strain response and fracture of a concrete model in biaxial loading [J]. *ACI Journal*, 1971, 68(8):590.
- [15] Buyukozturk O, Nilson A H, Slate F O. Deformation and fracture of particulate composite [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Divis*, 1972, 98(3):581.
- [16] Choi S, Shah S P. Propagation of microcracks in concrete studied with subregion scanning computer vision (SSCV) [J]. *ACI Journal*, 1999, 96(2):255.
- [17] 刘琼,肖建庄,李宏. 老砂浆对再生混凝土力学性能影响模拟试验 [J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2009, 41:76.  
LIU Qiong, XIAO Jianzhuang, LI Hong. The study of the effect of old mortar on the mechanical properties of recycled concrete [J]. *Chinese Journal of Sichuan University: Engineering Science*, 2009, 41:76.
- [18] Maso J C. Interfacial transition zone in concrete [C]//RILEM Report of Technical Committee 108-ICC Interfaces in Cementitious Composites. London: E & FN SPON, 1996:47–60.
- [19] Lutz M P, Monteiro P J M, Zimmerman R W. Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar [J]. *Cement Concrete Research*, 1997, 27(7):1117.
- [20] Ramesh G, Sotelino E D, Chen W F. Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(4):611.
- [21] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.  
ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al.. ABAQUS finite element analysis and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [22] Zhang D S, Luo M, Arola D D. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 033605.