

# 模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟

肖建庄<sup>1,2</sup>, 李文贵<sup>1</sup>, 刘琼<sup>1</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 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:** 提出了模型再生混凝土的概念, 根据各相介质细观力学参数和本构关系建立了数值模型, 对再生混凝土的破坏机理进行了仿真分析. 通过变化再生粗骨料取代率、新硬化水泥砂浆强度、老硬化水泥砂浆强度、老硬化水泥砂浆厚度以及界面过渡区(ITZ)强度等参数, 对模型再生混凝土单向受压性能进行了对比分析. 结果表明: 新硬化水泥砂浆和老硬化水泥砂浆强度对混凝土的初始弹性模量和峰值应力有较大影响, 老硬化水泥砂浆厚度对模型再生混凝土的初始弹性模量和峰值应变有一定影响, 界面过渡区的强度对再生混凝土的初始弹性模量、峰值应力和峰值应变的影响不显著.

**关键词:** 模型再生混凝土; 细观; 单轴受压; 数值模拟; 应力-应变关系

**中图分类号:** TU 528

**文献标识码:** A

## Meso-level Numerical Simulation on Mechanical Properties of Modeled Recycled Concrete Under Uniaxial Compression

XIAO Jianzhuang<sup>1,2</sup>, LI Wengui<sup>1</sup>, LIU Qiong<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:** A modeled recycled concrete is proposed. According to the meso- and micro-level mechanics parameters and constitutive relationships of the five-phase medium materials of recycled concrete, the failure mechanism of recycled concrete is numerically simulated. An investigation is made into the replacement of recycled coarse aggregate, the strength of the new or old hardened cement paste, the thickness of the old hardened cement paste, and the strength of interfacial transition zone (ITZ) on the mechanical properties of modeled recycled concrete under uniaxial compression. The results indicate that the strength of the new and old hardened cement paste have a remarkable influence on

the initial elastic modulus and peak stress. The thickness of the old cement paste has some certain influence on the initial elastic modulus and peak strain. Furthermore, the influence of the strength of interfacial transition zones on the initial elastic modulus, peak stress and peak strain is not distinctive.

**Key words:** modeled recycled concrete; meso-level; uniaxial compression; numerical simulation; stress-strain relationship

再生混凝土技术对于建筑业的可持续发展以及我国节约型社会的构建具有重要意义, 是发展绿色生态混凝土的主要措施之一<sup>[1]</sup>.

与普通混凝土相比, 再生混凝土是一种细观结构更为复杂的5相复合材料, 主要包括: 天然粗骨料、老硬化水泥砂浆、新硬化水泥砂浆、老界面过渡区(老ITZ)和新界面过渡区(新ITZ)<sup>[2]</sup>. 国内外研究者发现再生混凝土的抗拉、抗压强度以及弹性模量较普通混凝土有所降低<sup>[3]</sup>. 因此, 有必要在细观层次上研究再生混凝土的破坏过程, 从而揭示其破坏特征和机理.

## 1 模型再生混凝土

### 1.1 模型再生混凝土的概念

基于Buyukozturk等<sup>[4]</sup>研究含有9颗圆骨料规则分布的普通混凝土模型, 本文提出了模型再生混凝土的概念, 见图1. 再生粗骨料的布置要考虑骨料之间的净距离 $d$ 与骨料半径 $r$ 满足一定的关系: $d = (0.1 \sim 0.3)r$ .

### 1.2 再生混凝土的各相特性

再生混凝土的细观结构对再生混凝土的强度有重要影响<sup>[5]</sup>. 天然粗骨料的弹性模量取50~100 GPa, 抗拉强度取1.4~14 MPa, 抗压强度取70~350

收稿日期: 2010-02-03

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0383); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAK48B03)

第一作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为再生混凝土结构. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

MPa 是比较合适的<sup>[6]</sup>；硬化水泥砂浆的力学性能在很大程度上影响再生混凝土的宏观力学性能，其弹性模量在 10~30 GPa 之间<sup>[7]</sup>；采用扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪可以得到混凝土中 ITZ 厚度约为 40~50  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。Lutz 等的三相模型研究显示，ITZ 的弹性模量是砂浆基体弹性模量的 30%~50%<sup>[9]</sup>。Rasheeduzzafar 等认为再生混凝土中的新 ITZ 强度高于老 ITZ 的强度<sup>[10]</sup>。

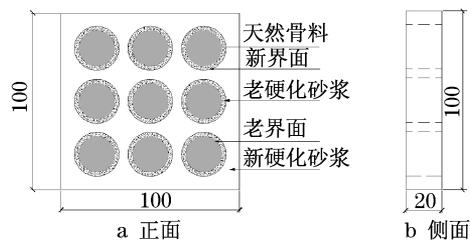


图 1 模型再生混凝土示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Diagram of modeled recycled concrete (unit: mm)

## 2 有限元建模与参数设置

### 2.1 有限元模型

采用 Ansys 有限元软件，天然粗骨料和新老硬化砂浆采用 Solid185 实体单元，新老 ITZ 采用 Solid65 实体单元；新老硬化水泥砂浆单元采用弹塑性材料模型、等向强化的 Von Mises 屈服准则和 Willam-Warnke 参数破坏准则；新老 ITZ 单元考虑开裂失效，采用 William-Warnke 参数破坏准则；模型再生混凝土受破坏后，水泥砂浆采用各向同性的损伤模型，界面过渡区采用弥散裂缝形式的损伤本构。模型共有 18 832 个单元，其中天然骨料单元 8 064 个，老 ITZ 单元 1 152 个，老硬化砂浆单元 3 456 个，新 ITZ 单元 1 152 个，新硬化砂浆 5 008 个，见图 2。有限元模型顶部 X、Y 向位移自由；底部约束 Y 方向的自由度，且约束试件底部边缘中间节点 X 向自由度。在 Y 方向施加竖向位移荷载，选择静力分析。打开大变形，加载位移为  $0.045 \text{ mm} \cdot \text{步}^{-1}$ 。Cnvtol 采用位移收敛准则，收敛精度缺省值是 0.5%。采用完全的 Newton-Raphson 平衡迭代进行非线性求解，荷载步选项中 Nsubst 的制定子步数为 100，最大子步数为 200，最小子步数为 50。

### 2.2 细观本构与力学参数设置

模型再生混凝土中天然粗骨料的粒径为 20 mm，在加载过程中一般不会破坏<sup>[11]</sup>，从而始终假定其本构关系为线弹性。新老硬化水泥砂浆受压、受拉

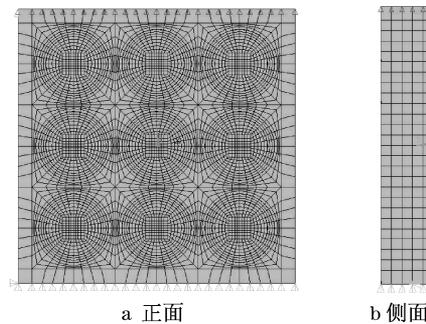


图 2 模型再生混凝土有限元模型

Fig. 2 Finite element model of modeled recycled concrete

本构模型根据单轴受力试验确定，如图 3~图 4 所示。再生混凝土中老硬化砂浆的含量与再生混凝土某一截面处的老硬化砂浆的面积百分比基本相等，老硬化砂浆的厚度取 2.5 mm，再生骨料中老硬化砂浆的体积含量约为 36%<sup>[12]</sup>；新老硬化砂浆的泊松比取 0.22。新老 ITZ 厚度取 50  $\mu\text{m}$ ，取 ITZ 的强度和弹性模量约为硬化砂浆的 50%。设 ITZ 的受拉细观本构关系为弹脆性，泊松比取 0.20。为避免模型参数太多，假设 5 相介质材料相应的细观力学参数见表 1。

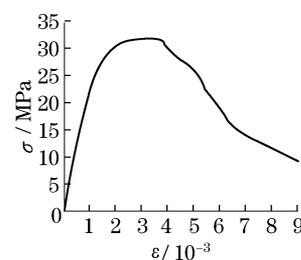


图 3 硬化砂浆单压本构关系  
Fig. 3 Constitutive relationship for hardened mortar under compression

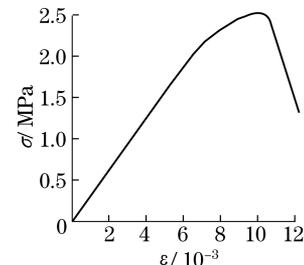


图 4 硬化砂浆单拉本构关系  
Fig. 4 Tensile constitutive relationship for hardened mortar under tension

表 1 模型再生混凝土各相材料细观力学性能

Tab. 1 Meso-level mechanical properties of each phase in modeled recycled concrete

各相材料	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	泊松比
天然粗骨料	70	10.0	250	0.16
老硬化砂浆	25	2.5	30	0.22
新硬化砂浆	30	3.0	32	0.22
老界面	13	1.3	15	0.20
新界面	15	1.5	16	0.20

### 3 破坏过程模拟与机理分析

对再生混凝土的单向受压过程进行数值模拟分析,计算过程中共有 52 个荷载子步,计算过程大约需要 300 min(计算机主要硬件配置,CPU:Pentium (R) Dual E2140 1.60 GHz; SDRAM:2×1G DDR2-

667; Mother board;SIS672).  $U_Y$ (Y 向位移)分布云图可以反映模型再生混凝土内部各相材料的变形情况; $S_Y$ (Y 向主应力)分布云图可以反映模型再生混凝土在受力过程中内部应力的发展与重分布情况.对数值模拟结果进行后处理,在荷载子步为 15 和 39 时,分别提取  $U_Y$  位移和  $S_Y$  主应力云图,如图 5 和图 6 所示.

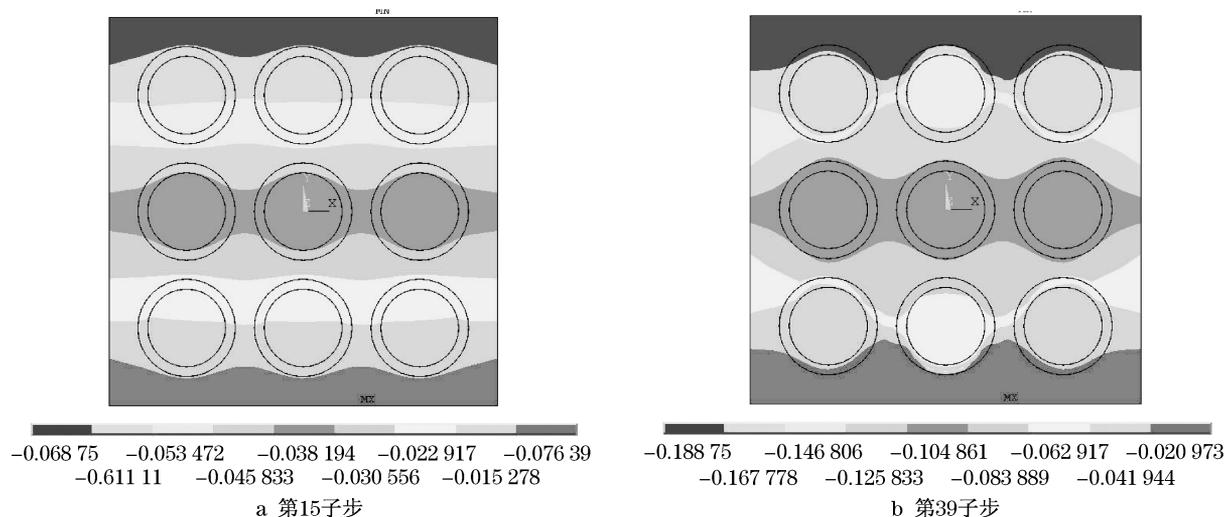


图 5 Y 向位移云图(共 52 子步)(单位:mm)

Fig.5 Displacement contour map in Y direction (52 subsets in sum) (unit:mm)

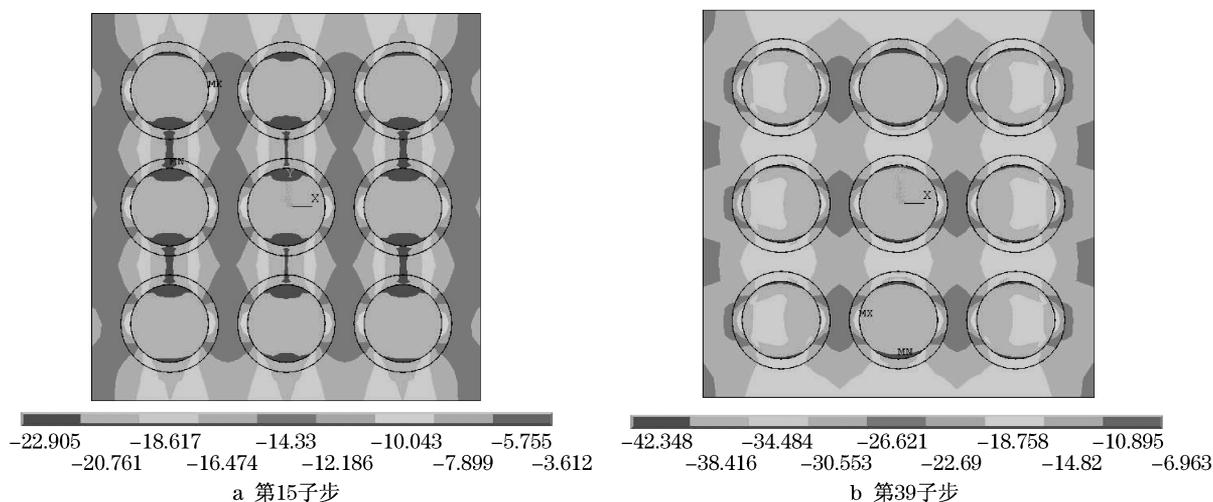


图 6 Y 向主应力分布(共 52 子步)(单位:MPa)

Fig.6 Principal stress distribution in Y direction (52 subsets in sum) (unit:MPa)

由如图 5 可知,在初始加载阶段,模型的变形比较均匀.随着荷载的增大,由于各相材料的力学性能的差异,在 Y 向出现相对错动.当 ITZ 不能承受由于错动引起的应力,将在强度薄弱处出现裂缝,之后在 ITZ 区域发生破坏.裂缝随着荷载的增大,逐渐向硬化砂浆部位扩展.

由如图 6 可知,在模型再生混凝土单向受压的初始阶段,5 相介质材料均处于线弹性状态,同相介质的应力分布基本一致.随着荷载的增大,模型再生混凝土各相的应力分布不均匀.在加载过程中,裂缝开展处应力不均匀分布,而远离裂缝处的应力分布则相对稳定.

## 4 单轴受压性能变参数仿真分析

假设 5 相介质材料的强度与弹性模量相关, 选

取再生粗骨料取代率、新硬化砂浆强度、老硬化砂浆强度、老硬化砂浆厚度以及新老 ITZ 强度等为模拟对比参数, 模型再生混凝土仿真试件的变参数情况见表 2.

表 2 细观力学变参数一览表

Tab.2 List of meso-level mechanical parameter variations

仿真试件	对比参数	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	厚度/mm	泊松比	再生粗骨料取代率/%
NC-1-1	天然粗骨料	70	10.0	250	10.0	0.16	0
RC-1-2	天然粗骨料	70	10.0	250	10.0	0.16	55.6
	老硬化砂浆	25	2.5	30	2.5	0.22	
	老界面	13	1.3	15	0.05	0.20	
RC-1-3	天然粗骨料	70	10.0	250	10.0	0.16	100
	老硬化砂浆	25	2.5	30	2.5	0.22	
	老界面	13	1.3	15	0.05	0.20	
RC-2-1	新硬化砂浆	25	2.0	17		0.22	100
RC-2-2	新硬化砂浆	30	3.0	32		0.22	100
RC-2-3	新硬化砂浆	35	4.0	47		0.22	100
RC-3-1	老硬化砂浆	20	1.5	15	2.5	0.22	100
RC-3-2	老硬化砂浆	25	2.5	30	2.5	0.22	100
RC-3-3	老硬化砂浆	30	3.5	45	2.5	0.22	100
RC-4-1	老硬化砂浆	25	2.5	30	1.5	0.22	100
RC-4-2	老硬化砂浆	25	2.5	30	2.5	0.22	100
RC-4-3	老硬化砂浆	25	2.5	30	3.5	0.22	100
RC-5-1	老界面	8	0.8	10	0.05	0.20	100
	新界面	10	1.0	11	0.05	0.20	
RC-5-2	老界面	13	1.3	15	0.05	0.20	100
	新界面	15	1.5	16	0.05	0.20	
RC-5-3	老界面	18	1.8	20	0.05	0.20	100
	新界面	20	2.0	21	0.05	0.20	

### 4.1 再生粗骨料取代率

试件 NC-1-1, RC-1-2 和 RC-1-3 的再生粗骨料取代率分别为 0, 55.6% 和 100%. 通过数值模拟计算表明(图 7): 随着再生粗骨料取代率的提高, 模型再生混凝土的初始弹性模量依次降低; 与 NC-1-1 相

比, RC-1-2 和 RC-1-3 的初始弹性模型分别降低 2.26%, 3.99%; 模型再生混凝土的峰值应力也依次减少, 分别降低 1.68%, 1.77%, 这与试验结果相吻合<sup>[11-12]</sup>; 峰值应变的变化规律不明显, 依次为 0.001 54, 0.001 49 和 0.001 54.

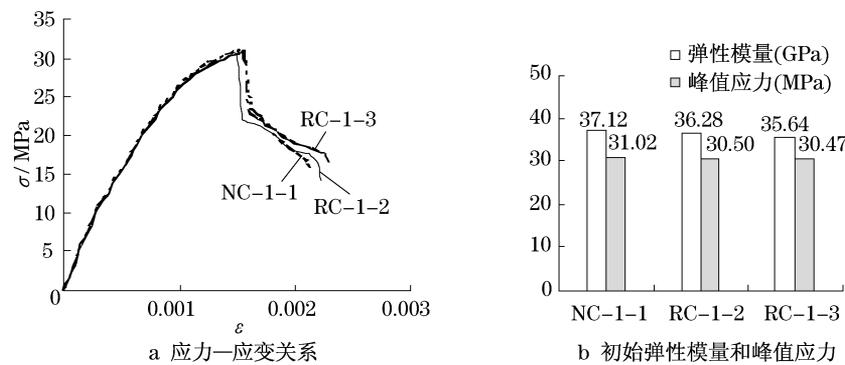


图 7 再生粗骨料取代率对单轴受压性能的影响

Fig.7 Influence of recycled aggregate replacement on the compressive behavior

#### 4.2 新硬化水泥砂浆强度

如图8所示,随着新硬化砂浆强度的提高,模型再生混凝土的初始弹性模量依次增大,与RC-3-1相比,RC-2-2,RC-2-3的初始弹性模型分别增大11.20%,21.31%;模型再生混凝土的峰值应力依次增大,分别提高62.25%,82.38%,这与再生混凝土

的宏观力学试验结果相吻合<sup>[12-13]</sup>.峰值应变依次为0.001 07,0.001 54和0.001 15,随着新硬化砂浆强度的提高,峰值应变的变化规律不明显,除新硬化砂浆强度的提高,这可能还与新老硬化砂浆之间的强度差有关.

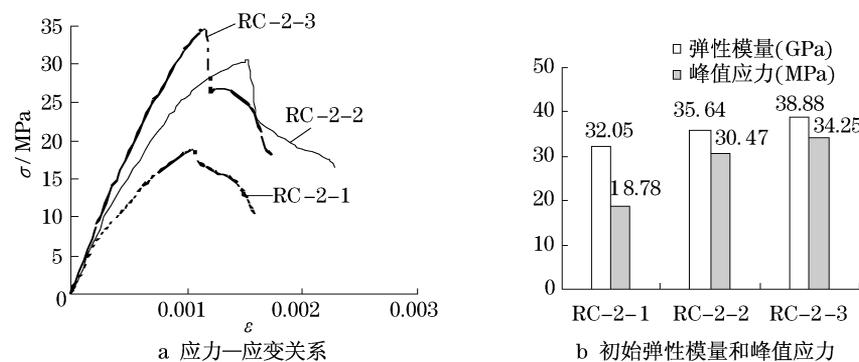


图8 新硬化砂浆强度对单轴受压性能的影响

Fig.8 Influence of the strength of new hardened mortar on the compressive behavior

#### 4.3 老硬化水泥砂浆强度

如图9所示,随着老硬化砂浆强度的提高,再生混凝土的初始弹性模量依次增大,与RC-3-1相比,RC-3-2,RC-3-3的初始弹性模型分别增大5.04%,8.90%;模型再生混凝土的峰值应力依次增大,分

别提高67.51%,68.55%.这与再生混凝土的宏观力学试验结果相吻合<sup>[12,14]</sup>.峰值应变依次为0.000 87,0.001 54和0.001 23,随着老硬化砂浆强度的提高,峰值应变的变化规律不明显,除老硬化砂浆强度外,这可能还与新老硬化砂浆之间的强度差有关.

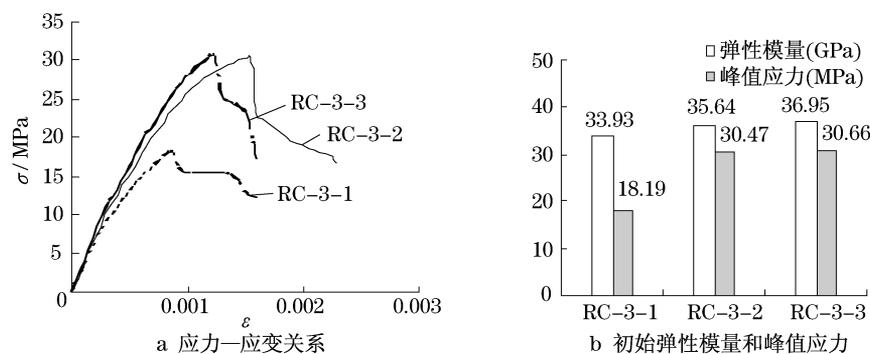


图9 老硬化砂浆强度对单轴受压性能的影响

Fig.9 Influence of the strength of old hardened mortar on the compressive behavior

#### 4.4 老硬化水泥砂浆厚度

如图10所示,随着老硬化砂浆厚度的增大,模型再生混凝土的初始弹性模量依次减少,与RC-4-1相比,RC-4-2,RC-4-3的初始弹性模型分别降低2.20%,4.53%;峰值应力也依次减少,分别降低1.58%,2.94%.这与再生混凝土的宏观力学试验结果相吻合<sup>[15]</sup>.峰值应变依次为0.001 59,0.001 54和0.001 54.由此可知,随着老硬化砂浆厚度的增大,模型再生混凝土的峰值应变稍有降低.

如图11所示,随着界面强度的提高,模型再生混凝土的初始弹性模量稍有提高,与RC-5-1相比,RC-5-2,RC-5-3的初始弹性模型分别提高0.76%,1.10%;峰值应力也依次增大,分别提高0.20%,0.36%.这与再生混凝土的宏观力学试验结果相吻合<sup>[16]</sup>.峰值应变依次为0.001 54,0.001 54和0.001 54.由此可知,随着界面强度的增大,再生混凝土的峰值应变变化不大,说明提高界面过渡区的强度对初始弹性模量、峰值应力和峰值应变的影响并不十分显著.

#### 4.5 界面过渡区强度

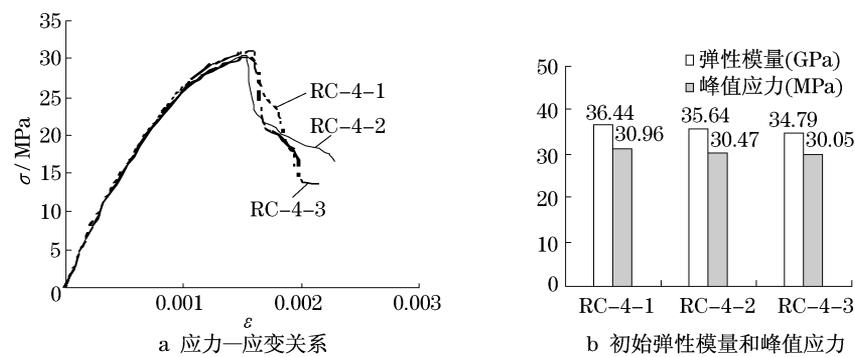


图10 老硬化砂浆厚度对单轴受压性能的影响

Fig.10 Influence of the thickness of old hardened mortar on the compressive behavior

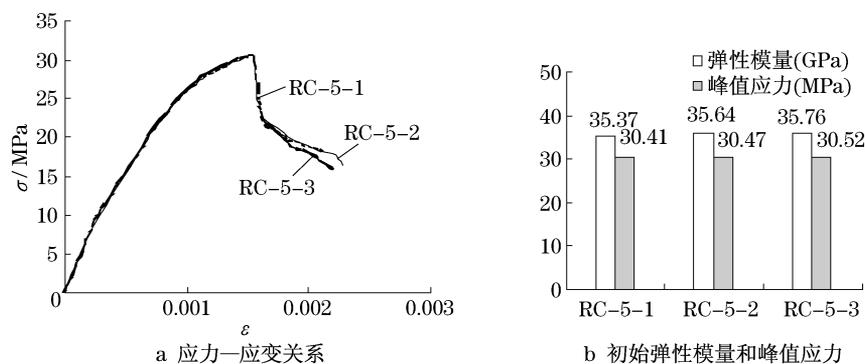


图11 界面过渡区强度对单轴受压性能的影响

Fig.11 Influence of the strength of ITZs on the compressive behavior

## 5 结论

对模型再生混凝土的单向受压性能进行了细观数值模拟与计算分析,可得到以下结论:

(1) 模型再生混凝土最先在较为薄弱的界面过渡区处产生裂缝,然后向老硬化水泥砂浆扩展,最后延伸到新硬化水泥砂浆;

(2) 随着再生粗骨料取代率增大,模型再生混凝土的初始弹性模量和峰值应力均有小幅降低;

(3) 增大新硬化砂浆的强度,模型再生混凝土的初始弹性模量和峰值应力均有大幅提高;提高老硬化砂浆的强度,模型再生混凝土的初始弹性模量和峰值应力均增大,其峰值应力的增大较为显著;随着老硬化砂浆厚度增大,模型再生混凝土的初始弹性模量和峰值应力均降低,峰值应变稍有降低;

(4) 提高界面过渡区的强度,模型再生混凝土的初始弹性模量、峰值应力和峰值应变的影响并不十分显著;

(5) 在其他因素相同的情况下,新老硬化水泥砂浆的强度对再生混凝土抗压强度有较大影响。在

老砂浆满足强度要求时,建议新配制再生混凝土的强度与废混凝土的强度接近。

## 参考文献:

- [1] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press,2008.
- [2] 肖建庄,刘琼,李文贵,等.再生混凝土细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]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30 (4):24.
- [3] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(11):1445.  
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35 (11):1445.
- [4] 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.
- [5] Tama V W Y, Gaob X F, Tama C M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing

- approach [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (6):1195.
- [6] 吴科如,张雄. 建筑材料[M]. 上海:同济大学出版社,1994.  
WU Keru, ZHANG Xiong. Building materials [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1994.
- [7] Olley P. Construction materials reference book [M]. Butterworth: Oxford Press, 1992.
- [8] Maso J C. Interfacial transition zone in concrete [R]. Toulouse: E & FN Spon, 1996.
- [9] 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.
- [10] Rasheeduzzafar I B, Khan A. Recycled concrete—a source for new aggregate [J]. Cement Concrete and Aggregates (ASTM), 1984, 6(1):17.
- [11] 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]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32 (12):1558.
- [12] Hansen T C. Recycled aggregate and recycled aggregate concrete (second state of art report, development from 1945 – 1985) [J]. Material and Structures, 1986, 19(5):20.
- [13] Tu T Y, Chen Y Y, Hwang C L. Properties of HPC with recycled aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (5):943.
- [14] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5):735.
- [15] Tam W Y V, Tam C M, Le K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1):82.
- [16] 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 (6):461.

• 下期文章摘要预报 •

## 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构

吕西林, 陈云, 毛苑君

可恢复功能结构是一种新型的减震控制结构,它不仅能在地震时保护人们的生命财产安全,也能帮助人们在大地震之后,尽快恢复正常生活,是结构抗震设计的一个理想的新方向.可恢复结构体系主要包括可更换结构构件,摇摆结构,以及自复位结构等.针对21世纪以来国内外可恢复结构体系的研究现状进行了综述分析,详细介绍了正在研究的两种双肢剪力墙可更换构件即可更换连梁与可更换剪力墙脚部构件的设计概念.