

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.015

基于随机骨料模型的再生混凝土单轴压缩数值模拟

姚泽良, 段东旭, 党发宁, 张芳芳

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用计算机语言 MATLAB 自编基于塑性损伤本构关系的再生混凝土随机骨料程序, 利用大型软件 ABAQUS 建立再生混凝土双界面细观结构计算模型, 对模型的抗压性能、应变峰值、应力分布、损伤状态等关键性能进行了系统的计算分析, 研究了不同界面砂浆强度、厚度等因素对再生混凝土关键性能的影响。结果表明: 单轴压缩荷载作用下再生混凝土的内外界面区域出现损伤破坏, 其原因是该区域存在拉应力集中和剪应力集中; 在较弱的界面区最先出现损伤, 之后损伤逐渐向砂浆区域扩展; 新老砂浆的强度对再生混凝土抗压性能的影响显著; 老硬化砂浆在一定程度上弱化了再生混凝土的性能。

关键词: 损伤塑性; 再生混凝土; 随机骨料; 细观结构

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)04-0475-06

Numerical simulation of recycled concrete under uniaxial compression based on random aggregate model

YAO Zeliang, DUAN Dongxu, DANG Faning, ZHANG Fangfang

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the concrete damage plasticity constitutive model, a program of the concrete random aggregate is developed. The bifacial mesoscopic structure models of the recycled concrete random aggregate are established by the finite element software ABAQUS. The mesoscopic mechanical properties of the recycled concrete, such as the compressive strength, peak strain, damage development, stress distribution and so on are studied. The effects of the new and old hardened mortar strength, the strength and thickness in the internal and external interface area on the mechanical properties are analyzed. The results show that there exist tensile stress and shear stress concentration problem in the internal and external interface area of the recycled concrete under uniaxial compression. The damage failure is mainly caused by the concentration of the tensile stress and shear stress. The initial damage occurs first in the weaker interfacial region, with the damage developed to the mortar area. The strength of the new and old hardened mortar strength has greatly affected the concrete compressive strength, and it has a small impact on the interface region and the outer interface strength. The old hardened mortar may weaken the mechanical properties of the recycled concrete.

Key words: damage plasticity; recycled concrete; random aggregate; mesoscopic structure

全球产生的废弃混凝土量逐年增加, 废弃混凝土回收利用问题已成为学术界和工程界研究的热点问题之一。发展再生混凝土技术是实现建筑资源可持续发展的的重要途径之一^[1]。国内外的许多研究表

明再生混凝土的力学性能与普通混凝土相比有所弱化^[2], 因为再生混凝土具有更为复杂的细观结构, 而大部分的试验研究基本上不会考虑细观结构, 得到的结果就很难揭示出再生混凝土力学性能的实质。

收稿日期: 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208422); 陕西省科技攻关资助项目(2014K08-19); 西安市科技计划资助项目(2017080CG/RC043(XALG030)); 西安市碑林区科技计划资助项目(GX1818)

作者简介: 姚泽良, 女, 博士后, 副教授, 研究方向为钢筋混凝土结构。E-mail: yaozeliang@sina.com

为了能系统掌握再生混凝土的力学特性,有必要对再生混凝土在细观结构上进行研究^[3]。

近年来,国内外学者针对再生混凝土技术开展了一定的研究^[4-5],研究成果主要体现在再生混凝土的细观力学模型方面。Hrennikooff 提出了以理论物理学为基础的格构模型,由于该模型忽略了较小颗粒,在模拟受压时存在局限性。Mohamed 和 Hansen^[6]提出了 M-H 模型,该模型考虑了混凝土细观组分和力学性质的随机性,但在模拟复杂应力条件下的断裂问题时存在局限性。以上分析表明,现有再生混凝土计算模型还存在一定不足,如何有效构建骨料模型有待深入研究。

为了研究再生混凝土材料在单轴压缩下的损伤机理和各相材料性能对宏观力学性能的影响,通过 MATLAB 和有限元软件 ABAQUS 建立再生混凝土随机骨料计算模型,计算分析了在单轴压缩作用下再生混凝土损伤开展及其力学性能。

1 再生混凝土细观骨料模型

参考党娜娜等^[7-8]在随机骨料模型结构上的相关处理方法,考虑将再生混凝土骨料形态视为圆形,在天然骨料外围均匀附着砂浆,其中内外砂浆界面区域厚度为 0.5 mm,老硬化砂浆厚度为 1 mm,见图 1。

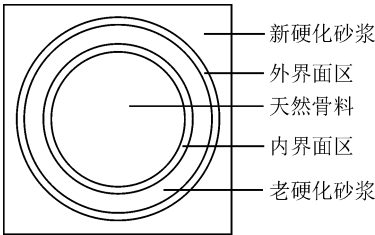


图 1 再生骨料细观

Fig. 1 Meso scale of recycled aggregate

根据 Walraven 公式^[9],由三维级配曲线转换为试件截面上任意点具有骨料直径 $D < D_0$ 的概率 P_c ^[9] ($n = D_0/D_{\max}$) 为:

$$P_c(D < D_0) = P_k(1.605n^{\frac{1}{2}} - 0.053n^4 - 0.012n^6 - 0.0045n^8 - 0.0025n^{10})$$

(1)

式中: P_k 为骨料体积占总体积的百分比。

模型中再生骨料取代率为 100%,骨料粒径范围是 5~20 mm,骨料含量取为 40%。根据 Walraven 公式^[7-9]计算得到 14 个骨料颗粒,其中 10 个颗粒直径为 5~10 mm,3 个颗粒直径为 10~15 mm,1 个颗粒直径为 15~20 mm。

2 损伤塑性本构模型

选用 ABAQUS 软件自带的损伤塑性本构模型

(简称 CDP 模型)。CDP 模型属连续介质塑性损伤模型,该模型以 Lee、Fenves 模型和 Lubliner^[10] 模型为基础,需要定义损伤、塑性等参数。

2.1 CDP 模型塑性参数

根据 CDP 模型要求,定义流动法则、屈服函数、粘性特性等相关塑性参数。根据《混凝土结构设计规范》中相关规定,合理选取再生混凝土的膨胀角、偏心率等相关塑性参数,见表 1。

表 1 相关系数
Tab. 1 Relative parameters

偏心率	膨胀角/(°)	k	f_{b0}/f_{c0}	粘性系数
0.1	38	0.666 67	1.16	1E-005

2.2 CDP 模型压缩损伤参数

2.2.1 单轴压缩下应力-应变关系

当 $x \leq 1$ 时:

$$y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3$$

(2)

当 $x > 1$ 时:

$$y = \frac{x}{\alpha_d (x - 1)^2 + x}$$

(3)

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}$$

(4)

$$y = \frac{\sigma}{f_c}$$

(5)

式中: f_c 为单轴压缩下混凝土抗压强度; α_a , α_d 分别为单轴压缩下应力-应变曲线上升、下降的相应数值; ϵ_c 为与 f_c 相对应的压应变峰值。单轴压缩下应力-应变关系见图 2。

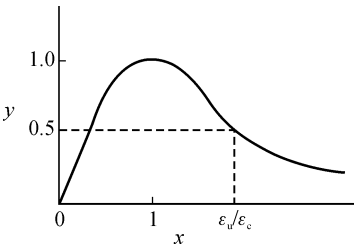


图 2 单轴压缩下应力-应变关系

Fig. 2 Stress strain curves under uniaxial compression

2.2.2 压缩损伤指标

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$$

(6)

式中: E_c 为弹性模量; ϵ_c^{pl} 为单轴压缩时的塑性应变; b_c 为塑性应变占比。

2.3 CDP 模型拉伸损伤参数

2.3.1 单轴受拉时应力-应变关系

当 $x \leq 1$ 时:

$$y = 1.2x - 0.2x^6$$

(7)

当 $x > 1$ 时:

$$y = \frac{x}{\alpha_t (x - 1) 1.7 + x} \tag{8}$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_t} \tag{9}$$

$$y = \frac{\sigma}{f_t} \tag{10}$$

式中： f_t 为混凝土抗拉强度； α_t 为单轴受拉时应力-应变曲线下降段数值； ϵ_t 为与 f_t 相对应的压应变峰值。单轴压缩应力-应变关系曲线见图 3。

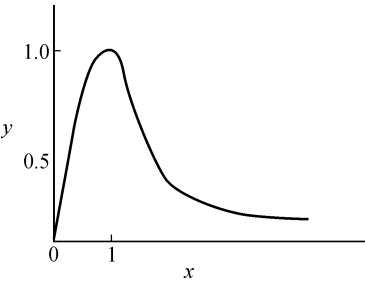


图 3 单轴拉伸下应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain curves under uniaxial tension

2.3.2 损伤指标

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \tag{11}$$

式中： E_c 为弹性模量； ϵ_t^{pl} 为受拉塑性应变； b_t 表示塑性应变占比。

3 再生混凝土细观力学性能数值模拟分析

3.1 二维平面模型

通过计算机语言 MATLAB 自编算法，建立再生混凝土的二维平面随机模型。该算法运用了 Monte Carlo 法^[11]生成随机数的原理，可随机生成混凝土再生骨料的位置坐标。

已有研究^[12]表明，代表性体积元 RVE 常被视为混凝土宏观力学性能和其细观结构的纽带，其边长应大于等于三倍最大骨料粒径^[13]。因此，本文通过算法获取骨料的位置坐标后，在 ABAQUS 中生成了 60 mm×60 mm 二维平面模型。

3.2 设置力学参数和网格划分

根据塑性损伤的本构关系，对再生骨料中五相材料赋予相应的材料参数。根据相关试验资料^[14]，选取的五相材料参数见表 2。在划分网格时，全局尺寸为 0.5，外边四边布种尺寸为 1，为保证计算精度三个圆环在厚度方向补三层种子。天然骨料内部采用过渡网格，过渡值为 2~2.5。网格划分完成后，对模型添加位移荷载和约束（见图 4），模型上部设有耦合约束，在参考点作用有一 0.05 mm 位移，模型下部设法向约束，下部中点处设有水平约束。

表 2 五相材料系数

Tab. 2 Parameters of five phase Materials

材料名称	弹模 E/GPa	抗压强度 f_c/MPa	抗拉强度 f_t/MPa	泊松比 γ	密度 $\rho/(\text{t}/\text{mm}^3)$
新硬化砂浆	23.68	26.78	1.91	0.22	2.36×10^{-9}
老硬化砂浆	19.27	18.17	1.66	0.22	2.38×10^{-9}
外界面	23.68	12.2	1.22	0.2	2.37×10^{-9}
内界面	19.27	10.2	1.02	0.2	2.36×10^{-9}
天然骨料	80	80	10	0.16	2.37×10^{-9}

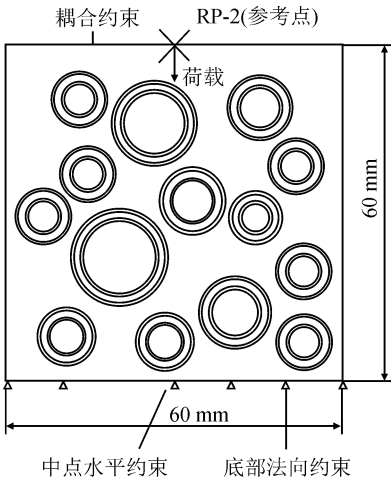


图 4 随机骨料模型

Fig. 4 Random aggregate model

本文建立的二维平面随机骨料模型共生成 19 021 个单元，包括 3 006 个老硬化砂浆单元、6 957 个新硬化砂浆单元、3 006 个老界面区单元、3 006 个新界面区单元数量以及 3 046 个天然骨料单元数量。图 5 为二维平面随机骨料模型的局部网格。

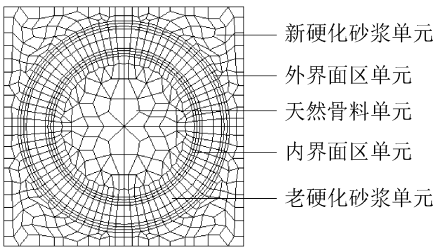


图 5 网格局部

Fig. 5 Local grids

3.3 单轴受压下再生混凝土抗压强度和峰值应变

采用刚性位移加载，分析时间为 1 秒，最大增量步设为 1×10^{-4} ，最小增量步设为 1×10^{-8} ，初始增量步设为 0.01。加载结束后，提取结果。由于单元总数量太多，只能按比例提取部分单元（老硬化砂浆单元、老界面区单元、新界面区单元、天然骨料单元数各提取 40 个，新硬化砂浆单元提取 80 个）的应力-应变值。本文采用数值平均的方法对计算所得

到的应力和应变值进行处理分析,图 6 为处理后的应力平均值随应变平均值的变化情况。

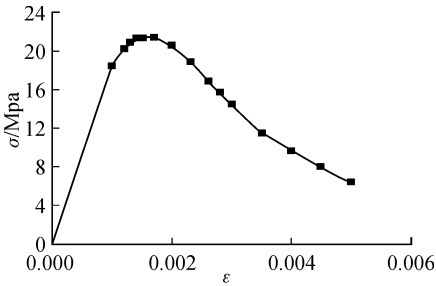


图 6 应力-应变变化关系

Fig. 6 Change relationship between stress and strain

由图 6 可知,单轴受压下再生混凝土抗压强度的峰值约为 21.34 MPa,与之对应的应变峰值约为 0.001 7。由以上数据表明,单轴受压下再生混凝土抗压强度远小于天然骨料的抗压强度,再生混凝土抗压强度介于新硬化砂浆强度和老硬化砂浆强度之间。同时,经对比,该计算结果与实验值^[15]吻合较好,表明所选细观模型具有较好的计算精度。

3.4 损伤机理分析

提取不同分析步下对应的损伤带,研究再生混凝土在单轴压缩荷载作用下的损伤机理,见图 7。

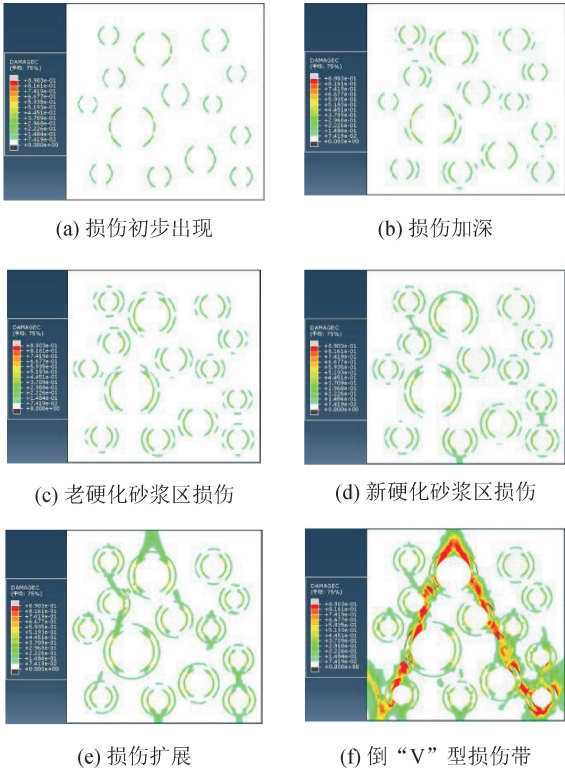


图 7 损伤开展

Fig. 7 Damage development

分析表明,在再生骨料的内界面区最先出现初始损伤,接着损伤依次向外界面区、老硬化砂浆区、新硬化砂浆区发展,除了天然骨料,各相材料内部均出现了损伤带,内、外界面区出现的损伤均匀分布在

再生骨料的左右两侧;随着荷载的持续增加,损伤继续扩展延伸,直至试件破坏(极限损伤值为 0.89),最终形成倒“V”型分布的损伤破坏带。

3.5 应力分布

为了研究在单轴压缩荷载作用下再生混凝土的破坏原因,分别提取试件的水平向应力云图(S11)、竖向应力云图(S22)、剪切应力云图(S12),见图 8。

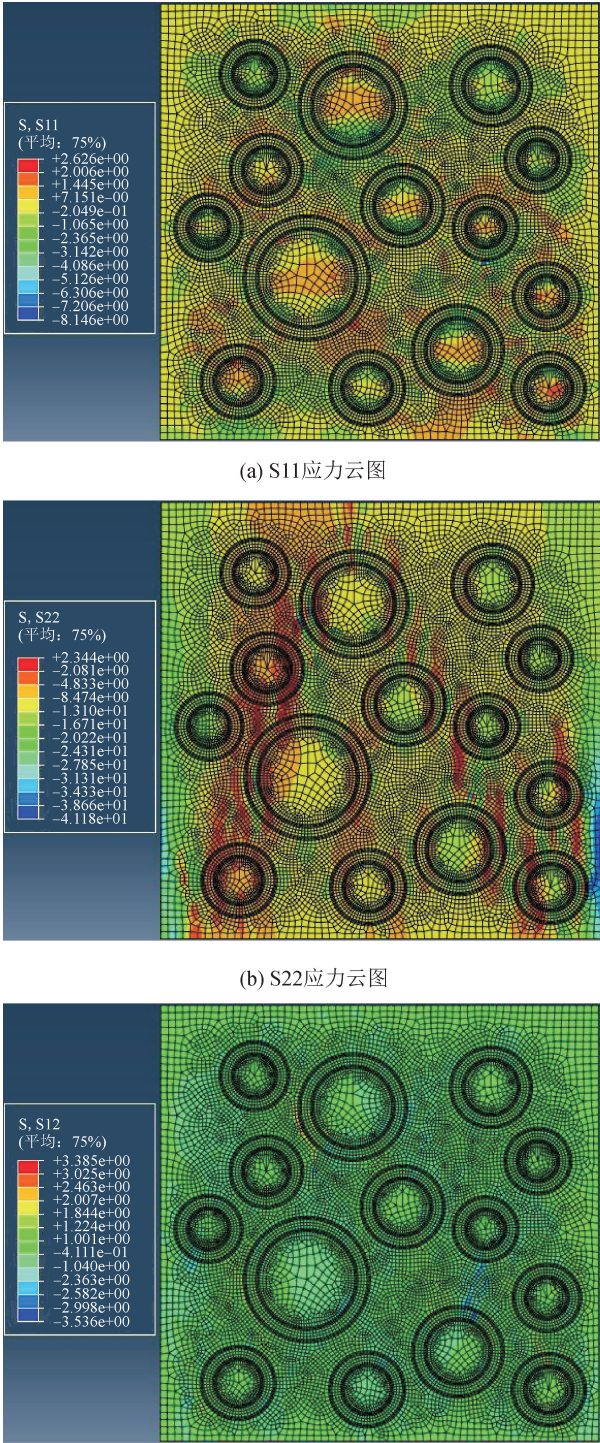


图 8 应力云图

Fig. 8 Stress cloud

图 8 中“+”为拉应力,“-”为压应力。分析表明,水平应力 S11(图 8(a))的最大应力值出现在新硬化砂浆区和天然骨料区,S11 的最大应力值处于 2.01~2.63 MPa 之间;竖向应力 S22(图 8(b))的最大应力值出现在老硬化砂浆区以及内、外界面区域,S22 的最大应力值在-2.08~2.34 MPa 之间;剪应力 S12(图 8(c))的最大应力值分布在内、外界面区中,S12 的最大应力值在 3.03~3.39 MPa 之间,表明在单轴压缩荷载作用下再生混凝土试件内、外界面区存在拉应力和剪切应力集中现象。

这里取混凝土抗压强度的十分之一作为其抗拉强度值,即 2.13 MPa。同时,根据 Motack 混凝土抗剪强度公式计算,混凝土抗剪强度可取其抗压强度的 0.12 倍(按照),按该公式计算得到混凝土抗剪强度为 2.56 MPa。由图 8 可知,剪切应力(S12)大于 2.56 MPa 的区域与竖向应力(S22)大于 2.13 MPa 的区域基本重合,其重合区均呈倒“V”型分布,均基本位于内外界面区,其原因主要是再生混凝土在内外界面区域出现了拉应力集中和剪切应力,即损伤带与拉应力和剪应力集中区重合。因此,单轴压缩下再生混凝土的损伤破坏主要由拉应力和剪应力集中导致。

4 再生混凝土力学性能影响因素分析

4.1 各相材料强度影响

再生混凝土材料中各相材料的强度都会影响宏观力学性能,设置了 8 个工况研究各相材料强度的增加和降低对宏观性能的影响。表 3 统计了各相材料强度降低 20%对再生混凝土试件抗压强度和峰值应变的影响,表 4 统计了各相材料强度增加 20%对再生混凝土试件抗压强度和峰值应变的影响,工况 1、2、3、4 分别对应新硬化砂浆、老硬化砂浆、内界面区、外界面区的强度。

表 3 各相材料强度降低 20%对宏观性能的影响
Tab.3 Effect of each phase strength of reduced 20% on the macroscopic properties

工况	调整系数	应变峰值 ϵ	抗压强度 σ/MPa
基准	1	0.001 7	21.34
1	0.8	0.001 55(-8.7%)	18.76(-12.1%)
2	0.8	0.001 59(-6.5%)	19.72(-7.6%)
3	0.8	0.001 62(-4.7%)	20.34(-4.6%)
4	0.8	0.001 61(-5.1%)	20.14(-5.6%)

表 4 各相材料强度增加 20%对宏观性能的影响
Tab.4 Effect of the each phase strength of added 20% on the macroscopic properties

工况	调整系数	应变峰值 ϵ	抗压强度 σ/MPa
基准	1	0.001 7	21.34
1	1.2	0.001 85(+9.1%)	23.77(+11.4%)
2	1.2	0.001 82(+6.9%)	23.03(+7.9%)
3	1.2	0.001 78(+4.9%)	22.24(+4.2%)
4	1.2	0.001 77(+4.5%)	22.24(+4.2%)

各相材料的强度降低 20%时,再生混凝土试件的抗压强度和峰值应变均呈现出不同程度的降低,通过上表可知新、老硬化砂浆区材料强度对再生混凝土的宏观抗压性能影响较大,内、外界面区材料强度对再生混凝土的宏观抗压性能影响较小。

各相材料的强度增加 20%时,再生混凝土试件的抗压强度和峰值应变均呈现出不同程度的增加,通过上表可知新、老硬化砂浆区材料强度对再生混凝土的宏观抗压性能影响较大,内、外界面区材料强度对再生混凝土的宏观抗压性能影响较小。

4.2 老砂浆厚度影响

再生骨料由普通混凝土加工而成,与天然骨料相比再生骨料表面多一层老硬化砂浆,其细微观结构也更加复杂^[16]。将老硬化砂浆厚度分别设置为 1.2 mm,1.4 mm 两个方案(表 5 中的工况 5、6)与厚度为 1 mm 的原工况进行对比。

表 5 老砂浆厚度影响
Tab.5 Thickness effect of old mortar

工况	厚度/mm	应变峰值 ϵ	抗压强度 σ/MPa
基准	1	0.001 7	21.34
5	1.2	0.001 59(-6.5%)	19.99(-6.3%)
6	1.4	0.001 56(-8.2%)	19.40(-9.1%)

分析表 5 可得,随着老硬化砂浆厚度的增大,试件的抗压强度和峰值应变不断降低,表明老硬化砂浆对再生混凝土的力学性能起弱化作用。

5 结 论

通过自编基于塑性损伤本构关系的再生混凝土随机骨料程序,利用大型软件 ABAQUS 建立再生混凝土双界面细观结构计算模型,对模型的抗压性能、应变峰值、应力分布、损伤状态等关键性能进行了系统的计算分析,得到的结论如下。

1) 当施加单轴压缩荷载时,再生混凝土的内外界面区域出现损伤破坏,其主要原因是该区域存在

拉应力集中和剪应力集中。

2) 在内界面骨料区最先出现损伤,损伤分布比较均匀,表明该区域的力学性能相对较弱。随着荷载的施加,损伤朝外界面区发展。随着荷载继续增大,损伤区域继续扩大到老砂浆区和新砂浆区,直至试件破坏。

3) 砂浆强度对再生混凝土的宏观性能影响明显,内、外界面区强度对再生混凝土宏观性能的影响相对较小。随着老硬化砂浆厚度的增大,再生混凝土试件的抗压强度和峰值应变不断降低,建议在再生混凝土骨料的加工过程中应尽可能的减少老硬化砂浆含量。

参考文献:

- [1] 王磊,李泉龙,陈杏.再生粗骨料混凝土的变形性能及影响因素分析[J].建筑结构,2016,46(2):30-34.
WANG Lei, LI Quanlong, CHEN Xing. Deformation property and influencing factor analyses of recycled carse aggregate concrete[J]. Building Structures, 2016, 46(2): 30-34.
- [2] 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):1445-1449.
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): 1445-1449.
- [3] 金浏.细观混凝土分析模型与方法研究[D].北京:北京工业大学,2014.
JIN Liu. Study on model and method of microscopic concrete analysis [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [4] 张晓龙.荷载损伤混凝土损伤指标选取及其对耐久性的影响[D].杭州:浙江大学,2015.
ZHANG Xiaolong. Load damage concrete damage index selection and its impact on durability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 王玉琳,王向东,韩金启,等.基于损伤理论的混凝土 I-II 复合型裂缝扩展角[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(6):51-54.
WANG Yulin, WANG Xiangdong, HAN Jinqi, et al. Propagation angle of I-II mixed mode crack in concrete based on damage theory[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36(6): 51-54.
- [6] MOHAMED A R, HANSEN W. Micromechanical modeling of concrete response under static loading—Part 1: model development and validation[J]. Materials Journal, 1999, 96 (2):196-203.
- [7] 党娜娜,彭一江,周化平,等.基于随机骨料模型的再生混凝土材料细观损伤分析方法[J].固体力学学报,2013,33(增刊1):58-62.
DANG Nana, PENG Yijiang, ZHOU Huaping, et al. A meso-mechanical damage method base on random aggregate model for recycled aggregate concrete[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33(S1): 58-62.
- [8] 段东旭.基于细观结构的再生混凝土力学性能研究[D].西安:西安理工大学,2018.
DUAN Dongxu. Mechanical properties of recycled concrete based on microstructure[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [9] SCHLANGEN E, VAN MIERJ G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. Materials and Structures, 1992,25(9): 534-542.
- [10] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989,25(3):299-326.
- [11] 徐钟济.蒙特卡罗法[M].上海:上海科技出版社,1985.
- [12] 章继峰,王振清,周健生,等.基于 Python-Abaqus 复合材料代表体积分的数值模型[J].宇航材料工艺,2009,(3):25-29.
ZHANG Jifeng, Wang Zhenqing, Zhou Jiansheng, et al. Numerical modeling of composite representative volume element(RVE) based on Python-Abaqus[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009,(3):25-29.
- [13] Andrade J E, TU Xuxin. Multiscale framework for behavior of prediction in granular media[J]. Mechanics of Material, 2009,41(6):652-669.
- [14] 刘琼.再生混凝土破坏机理的试验研究和格构数值模拟[D].上海:同济大学,2010: 25-55.
LIU Qiong. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete and its numerical simulation of lattice[D]. Shanghai: Tongji University, 2010: 25-55.
- [15] 王丽.基于真实骨料模型的再生混凝土细观破坏数值模拟[D].山东:山东农业大学,2015:24-25.
WANG Li. Numerical simulation of meso failure of recycled concrete based on real aggregate model[D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2015:24-25.
- [16] 肖建庄,李宏.再生混凝土单轴受压疲劳性能[J].土木工程学报,2013,46(2):62-69.
XIAO Jianzhuang, LI Hong. Investigation on the fatigue behavior of recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Chinese Civil Engineering Journal, 2013,46(2): 62-69.

(责任编辑 王绪迪)