

多尺度再生随机骨料混凝土材料及梁试件分析

石春香¹, 石 权¹, 庄仁杰²

(1. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418; 2. 上海市浦东新区建设(集团)有限公司, 上海 200135)

摘要: 编写 MATLAB 代码随机生成基于塑性损伤本构关系的随机骨料程序确定骨料的位置信息, 针对再生骨料混凝土的损伤演化, 从细观角度上认为再生骨料混凝土由多相材料夹杂而成并考虑其不同材料之间的层间效应, 利用有限元软件 DIANA 分别建立二维再生随机骨料混凝土模型和多尺度耦合再生骨料混凝土梁模型, 研究了单轴拉伸压缩下混凝土裂缝开展路径以及应力应变关系, 并与已有实验结果进行比较, 分析了三点受弯下不同骨料取代率再生混凝土梁的断裂行为。所建立的多尺度数值模型为再生骨料混凝土材料及结构分析提供了可行的研究途径。

关键词: 多尺度; 再生骨料混凝土; 细观结构

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0237-05

Analysis of multi-scale recycled random aggregate concrete materials and beam specimens

SHI Chunxiang¹, SHI Quan¹, ZHUANG Renjie²

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. Shanghai Pudong New Area Construction(Group) Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: MATLAB code was written to randomly generate random aggregate program based on plastic damage constitutive relation to determine the position information of aggregate. In view of the damage evolution of recycled aggregate concrete, it was considered from the mesoscopic point of view that recycled aggregate concrete was composed of multiphase materials. Considering the interlayer effect between different materials, two-dimensional recycled random aggregate concrete model and multi-scale coupled recycled aggregate concrete beam model were established respectively by using finite element software DIANA. The crack development path and stress-strain relationship of concrete under uniaxial tensile and uniaxial compression were studied and compared with the existing experimental results, and then, the fracture behavior of recycled concrete beams with different aggregate replacement ratios under three-point bending was analyzed. The established multi-scale numerical model can provide a feasible research approach for the material and structural analysis of recycled aggregate concrete.

Key words: multi-scale; recycled aggregate concrete; meso-structure

近年来, 众多学者基于不同研究尺度构建不同类型的细观力学模型, 用以研究再生骨料混凝土各项材料的力学性能^[1-4]。同济大学肖建庄教授课题组^[5-7]做了大量的研究, 采用格构模型模拟轴心拉压条件下再生骨料混凝土各相力学性能以及再生骨料混凝土的各相细观组分对整体性能影响。党娜娜等研究学者^[8-9]认为再生骨料混凝土由五种不同材质构成, 采用随机骨料模型从细观层次上分析其损伤破坏及裂纹开展情况。于勇等^[10]利用界面元技术建立中尺度模型研究影响再生混凝土拉伸性能的因素, 结果表明新旧界面过渡区以及旧砂浆附着量对其都有显著影响。随着电子显微

镜(SEM)和 X 射线断层扫描技术进步, 再生混凝土微观结构特征得以被发现, 对于寻求再生骨料混凝土破坏的真正原因大有裨益^[11-12]。

基于以上学者研究, 运用 MATLAB 随机生成基于塑性损伤本构关系的随机骨料程序确定随机骨料的位置信息, 考虑再生骨料混凝土细观结构特点以及多相夹杂的再生骨料信息, 采用有限元软件 DIANA 分别构建二维随机骨料再生混凝土模型和多尺度耦合再生骨料混凝土梁模型, 分析再生混凝土模型单轴拉伸压缩下混凝土应力应变关系以及裂缝开展路径和损伤机理。并分析了三点受弯下再生混凝土梁的断裂行为, 梁中心部分是

考虑界面单元的细观模型,在细观尺度区域采用蒙特卡罗方法和填充算法,采用递进的网格划分,梁两侧部分的宏观区域采用均匀弹性参数的线弹性模型,并就不同骨料取代率对再生骨料混凝土梁整体性能影响以及损伤破坏展开分析。

1 再生骨料混凝土细观模型

再生骨料混凝土梁细观部分采用蒙特卡罗方法和填充算法生成随机骨料位置信息的再生骨料混凝土细观结构。根据 Walraven 公式,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 $P_c(n=D_0/D_{\max})$ 为

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

式中: P_k 为骨料体积占总体积的百分比; P_c 是骨料在再生骨料混凝土中某一部分的任何点上 $D < D_0$ 的粒径的概率; D_0 是筛子尺寸, D_{\max} 是最大粒子的直径; P_k 是再生骨料混凝土中所有骨料的体积百分比。根据塑性损伤的本构关系,参考郭梦欢^[9]关于多尺度梁分析时,对于各项弹性力学参数的确定以及姚泽良等人试验研究,对再生骨料混凝土五相材料(新旧硬化水泥砂浆、内外界面、天然骨料)和宏观混凝土赋予相应的材料参数,各相材料参数^[8,13]如表 1。

表 1 各相材料参数

Tab. 1 Material parameters of each phase

| 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 $\times 10^{-6}$ $/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$ | 受压断裂能 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 受拉断裂能 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ |
|-------|----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|--|--|--|
| 新硬化砂浆 | 27.45 | 26.78 | 1.6 | 0.33 | 2.36 | 42 500 | 140 |
| 老硬化砂浆 | 19.27 | 18.17 | 1.66 | 0.22 | 2.38 | 40 000 | 160 |
| 外界面 | 27.23 | 12.2 | 1.36 | 0.33 | 2.37 | 15 000 | 102.15 |
| 内界面 | 27.23 | 12.2 | 1.36 | 0.33 | 2.36 | 13 500 | 102.15 |
| 天然骨料 | 78 | 80 | 6 | 0.24 | 2.37 | 90 500 | 80 |
| 混凝土 | 29.79 | 43.5 | 2.16 | 0.3 | 2.4 | 35 975 | 95 |

通过计算机语言 MATLAB 自编算法,先确定再生骨料位置随机信息,若确定了分布在该部分中的骨料位置和粒径,就会在骨料周围生成旧的 ITZ,并在旧的 ITZ 周围生成老硬化水泥砂浆圆,最后,新的 ITZ 圆围绕新硬化水泥砂浆基体中的旧硬化水泥砂浆生成。再生粗骨料外围附着旧砂浆,内外砂浆层界面区域(ITZ)厚度均为 0.5 mm,老砂浆厚度为 1.2 mm,如图 1 所示。

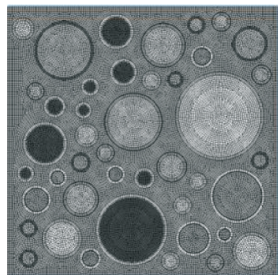


图 1 再生骨料混凝土网格模型

Fig. 1 Recycled aggregate concrete grid model

2 再生骨料混凝土分析

2.1 再生骨料混凝土的本构模型

选用 DIANA 软件混凝土结构裂缝模型中的总应变裂缝模型。受压情况下,选用由 Saenz 提出单轴受压时的应力应变曲线关系公式为

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left(\alpha + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_c} - (2\alpha - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0c}} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^3}$$

式中: E_0 是混凝土初始弹性模量; E_s 是混凝土割线模量; α 是应力-应变曲线参数; ϵ_c 是应力达到峰值时的应变。DIANA(如图 2 所示)设定 $f_c/3$ 是当应变达到 ϵ_c 时应力达到峰值, f_c 是混凝土抗压强度值, G_c/h 表示裂缝处单位宽度的断裂能,是由纵横坐标与曲线围成的面积表示。采用 Mazars 提出的单轴受拉损伤模型,当 $\epsilon \ll \epsilon_c$ 时, $\sigma\epsilon$ 呈线性关系;当 $\epsilon > \epsilon_c$ 时, $\sigma\epsilon$ 呈指数规律下降,全曲线公式为

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \epsilon & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_c \\ E_0 [\epsilon_c (1 - A_T) + \frac{A_T \epsilon}{\exp[B_T (\epsilon - \epsilon_c)]}] & \epsilon > \epsilon_c \end{cases}$$

式中: E_0 是线弹性阶段的弹性模量; A_T 、 B_T 是材料常数。指数模型情况下应力-应变本构关系曲线如图 3 所示。同样,曲线与纵横坐标围成的面积是单位宽度断裂能 G_f/h 。

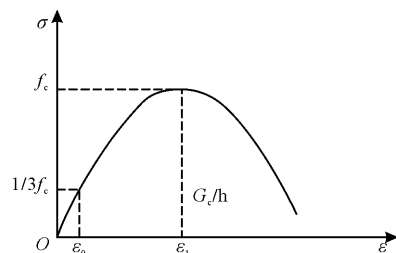


图 2 单轴压缩下应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship under uniaxial compression

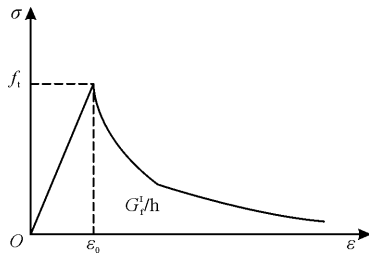


图3 单轴拉伸下应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship under uniaxial tension

2.2 单轴拉压下结果分析

使用有限元软件 DIANA 构建如图 4、5 所示 150 mm × 150 mm 单轴拉压加载为边界条件的 100% 取代率再生骨料混凝土二维模型, 一共生成 8 177 个网格单元, 在内外界面 ITZ 处进行局部加密。

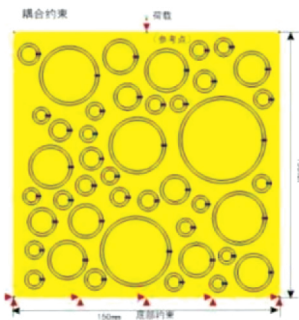


图4 单轴拉伸下随机骨料模型

Fig. 4 Random aggregate model under uniaxial tension

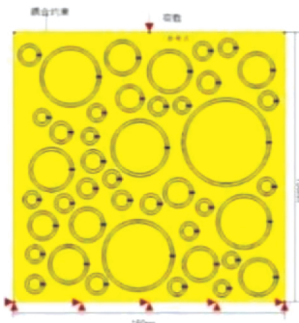


图5 单轴压缩下随机骨料模型

Fig. 5 Random aggregate model under uniaxial compression

该模型采用刚性位移加载, 单轴拉压加载位移大小为 0.05 mm 将位移荷载 0.1 mm/s 施加到模型顶部设置的参考点上, 参考点与试件绑定. 模型底部的材质点在 x 和 y 方向固定. 荷载步为 1.0(100), 平衡迭代最大迭代次数为 10.

如图 6、7, 当再生骨料混凝土受拉时, 内界面最先出现裂纹, 之后沿着内界面向老砂浆、外界面扩展, 依次传递给新砂浆, 随着荷载不断延伸扩展最后贯穿形成一条沿着 x 方向的裂缝. 并且除了天然骨料外, 各相材料内部均出现损伤裂纹. 当再生骨料混凝土在受压时, 内界面最先出现

裂纹, 之后沿着内界面向老砂浆、外界面扩展, 依次传递给新砂浆, 随着荷载不断增大, 裂纹不断延伸扩展最后贯穿形成一条沿着对角线方向约 45° 方向的主裂缝, 周围环绕着许多细微裂缝. 并且除了天然骨料外, 各相材料内部均出现损伤裂纹. 图 8 为再生混凝土细观模型在拉压作用下应力-应变关系图, 参考试验结果(刘琼^[13])研究发现再生骨料混凝土应力-应变关系与试验结果拟合较好.

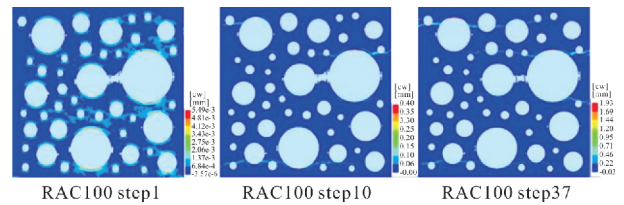


图6 受拉情况下再生骨料混凝土裂缝开展

Fig. 6 Crack development of recycled aggregate concrete under tension

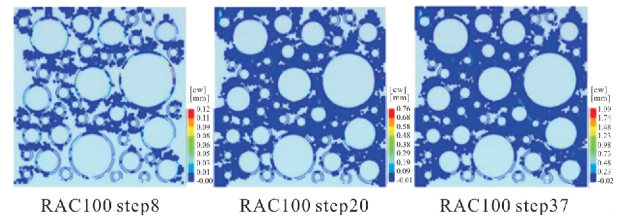
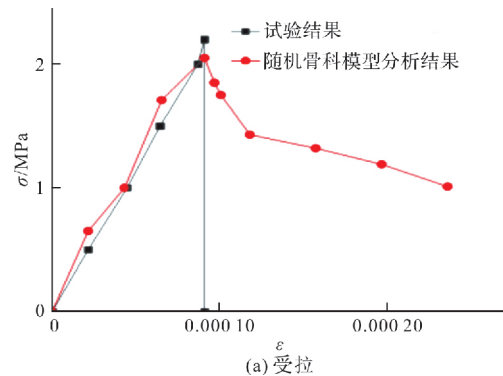
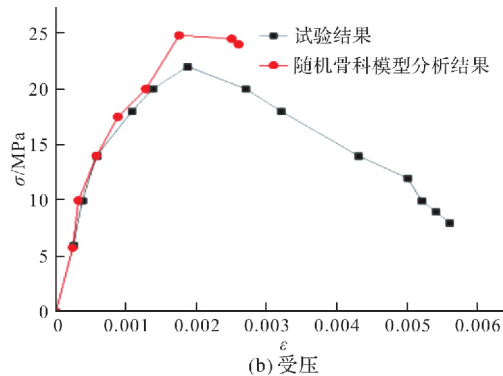


图7 受压情况下再生骨料混凝土裂缝开展

Fig. 7 Crack development of recycled aggregate concrete under compression



(a) 受拉



(b) 受压

图8 模拟结果与试验结果-应力应变关系

Fig. 8 Simulation results and test results-stress-strain relationship

3 多尺度再生骨料混凝土梁数值模拟分析

通过有限元分析软件 DIANA 构建 $1\ 600\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 二维多尺度再生骨料混凝土梁模型, 如图 9 所示。

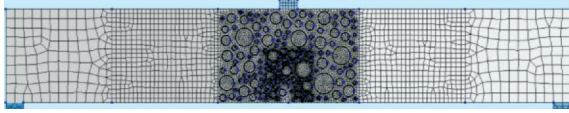


图 9 多尺度再生骨料混凝土梁网格模型

Fig. 9 Multi-scale recycled aggregate concrete beam grid model

其中在梁跨中部分采用中尺度模型研究分析, 大小为 $400\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$, 两边采用宏观角度研究分析, 大小分别为 $600\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 。中尺度部分考虑是基于细观考虑的再生骨料混凝土, 由新砂浆、外界面、老砂浆、内界面、再生骨料组成, 并且各相组分材料参考表 1 各项参数; 宏观部分材料采用均质单一属性的混凝土材料属性。并在中尺度区域底部预设细小窄裂缝, 裂缝宽度为 $2\ \text{mm}$, 深度为 $45\ \text{mm}$ 。对于不同区域网格划分精细程度不同, 细观区域采用精细的网格划分, 单元大小选用 $5\ \text{mm}$, 靠近中尺度区域选用单元大小为 $15\ \text{mm}$ 的网格, 最后两端网格采用单元大小 $20\ \text{mm}$ 的网格, 共生成 $24\ 195$ 个网格单元。宏观区域与中尺度区域采用刚性连接耦合在一起, 对于荷载施加处可以采用顶点加载的方式施加在钢板中点, 采用三弯点实验加载方式, 支座约束采用合并的方式将钢板与梁耦合起来, 需要定义钢板与梁接触面材料性质, 再生骨料混凝土模型试件几何尺寸和加载方式。将位移荷载 $0.05\ \text{mm/s}$ 施加到模型钢板中点, 荷载步为 $5(99)$, 平衡迭代最大迭代次数为 10 , 如图 10 所示。

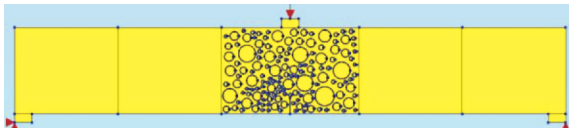


图 10 三弯点加载方式随机骨料模型荷载以及约束方式

Fig. 10 Load and restraint method of random aggregate model under three points bend loading mode

通过模拟分析计算得到的混凝土梁加载点荷载-位移曲线如图 11 所示, 此时梁加载点处最大荷载为 $11.119\ 45\ \text{kN}$, 位移大小为 $0.094\ 12\ \text{mm}$ 。研究了不同取代率下 (0% , 25% , 75% , 100% , CC 表示天然混凝土, RAC25 表示取代率为 25% 的再生骨料混凝土, 以此类推) 多尺度再生骨料梁破坏及其裂缝扩展情况。不同分析步时所对应的裂缝宽度开展情况如图 12 所示。

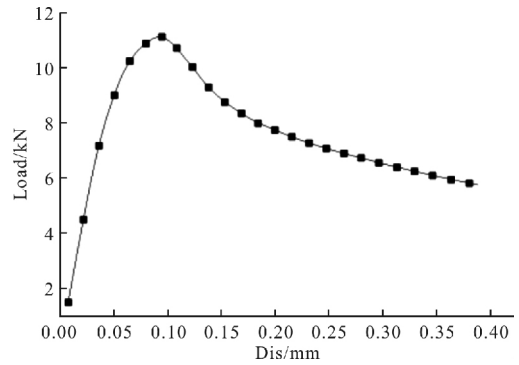


图 11 多尺度再生骨料混凝土梁荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curve of Multi-scale recycled aggregate concrete beam

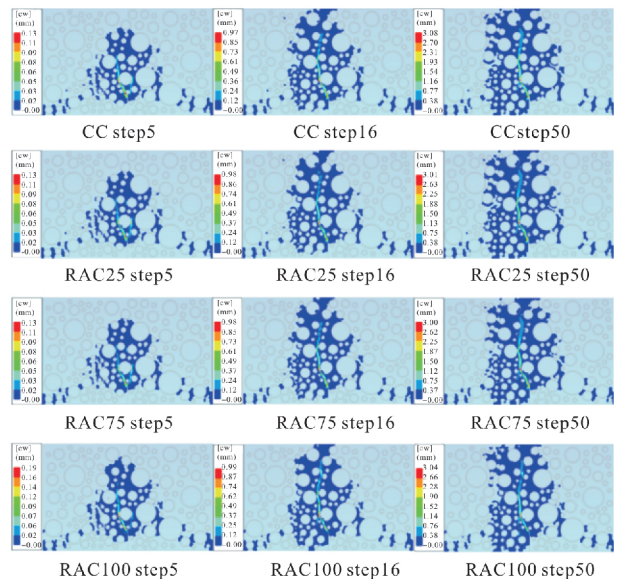


图 12 受弯情况下不同取代率下的再生骨料混凝土裂缝开展对比 (Ecw1 表示裂缝宽度)

Fig. 12 Comparison of crack development of recycled aggregate concrete with different replacement rates under compression (Ecw1 represents the crack width)

在三点受弯荷载作用下, 提取步长 5 、 16 和 50 情况下裂缝宽度发展情况, 在预设裂缝口尖端处产生应力集中现象, 最先在新砂浆处观察到裂缝产生, 随着位移荷载不断加大, 裂缝由外界面传递到老砂浆-内界面区域, 并沿着主裂缝不断发展, 最终形成一条贯穿整块梁的竖直裂缝。裂缝经第一颗骨料时, 分成两支沿着不同方向发展, 随着位移荷载不断加大, 最终沿着主裂缝发展, 主要由底部缺口处不断沿着新砂浆-外界面-老砂浆-内界面并绕过骨料不断攀升, 直至贯穿整个梁形成一条沿着 y 方向的主裂缝, 周围环绕着许多细微裂缝。取代率越高, 外界面出现裂纹越早, 除了天然骨料外, 各相材料内部均出现损伤裂纹。

4 结论

采用基于有限元思想耦合宏观与中尺度区域

二维多尺度建模的方法,运用 MATLAB 随机生成基于塑性损伤本构关系的随机骨料程序确定随机骨料的位置信息,利用有限元软件 DIANA 构建二维再生骨料混凝土随机骨料模型和多尺度再生骨料混凝土梁模型.研究再生骨料混凝土单轴拉伸和压缩以及再生骨料混凝土梁在三点受弯下裂缝开展路径和损伤机理,并与已有实验结果进行比较得到如下结论:

(1)当再生骨料混凝土受拉与受压时,均为内界面最先出现裂纹,之后沿着内界面向老砂浆、外界面扩展,依次传递给新砂浆,随着荷载不断延伸扩展最后贯穿形成主裂缝.有所不同的是,受拉时形成一条沿着 x 方向的裂缝,受压时形成一条沿着对角线方向约 45° 方向的主裂缝.并且除了天然骨料外,各相材料内部均出现损伤裂纹;

(2)多尺度耦合再生骨料混凝土梁在三点受弯状态下时,再生骨料取代率较低时,外界面最先出现裂缝,并随着荷载的加大,裂缝宽度不断加大并沿着 Y 方向由外界面、新砂浆不断扩展延伸形成开裂路径.当取代率大于 25% 时,内界面最先产生裂缝,并且取代率越高,裂缝形成得越早,之后沿着老砂浆向外界面、新砂浆不断发展最终形成一条贯穿 Y 方向的主裂缝.由于本文所采用多尺度耦合再生骨料混凝土梁是基于细观与宏观角度考虑,梁中各项材料参数来源多篇参考文献,并经过一定试验验证,具有一定实验依据.但本文所采用耦合多尺度梁模型由于再生骨料尺寸大小、位置信息以及制备试件等较难实现,尚未进行试验验证分析.

结果表明:采用随机骨料模型建立的再生骨料混凝土模型对于研究其损伤破坏以及裂缝发展具有很好的模拟效果,所建立的多尺度再生骨料梁数值模型为再生骨料混凝土材料及结构分析提供了可行的研究途径.

参考文献 References

- [1] EGUCHI K, TERANISHI K, NAKAGOME A. et al. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21:1542-1551.
- [2] ZHOU Xiang, XIE Youjun, LONG Guangcheng, et al. DEM analysis of the effect of interface transition zone on dynamic splitting tensile behavior of high-strength concrete based on multi-phase model[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 149(2):106577
- [3] YOUNIS K H, MUSTAFA S M. Feasibility of using nanoparticles of SiO_2 to improve the performance of recycled aggregate concrete[J]. Adv. Mater. Sci. Eng. 2018, 2018(3):1-11
- [4] Erdem S, Dawson A R, Thom N H. Influence of the

micro-and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates[J]. Cem. Concr. Res. 2012, 42(2):447-458.

- [5] 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):24-30.
XIAO Jianzhuang, LIU Qiong, LI Wengui, et al. Study on the microstructure and failure mechanism of recycled concrete[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2009, 30(4):24-30.
- [6] 肖建庄,李文贵,刘琼.模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):791-797.
XIAO Jianzhuang, LI Wengui, LIU Qiong. Meso-numerical simulation of uniaxial compression performance of model recycled concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39(6):791-797.
- [7] XIAO J Z, LI W G, CORR D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52(10):82-99.
- [8] 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(S1):58-62.
DANG Nana, PENG Yijiang, ZHOU Huaping, et al. Mesoscopic damage analysis method for recycled concrete materials based on random aggregate model[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33(S1):58-62.
- [9] GUO Menghuan, Frédéric Grondin, Ahmed Loukili. Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar[J]. Journal of Building Engineering, 2019,28(10):101040
- [10] YU Yong, ZHENG Yu, GUO Yongchang, et al. Mesoscale finite element modeling of recycled aggregate concrete under axial tension[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266(PA):121002
- [11] THOMAS C, BRITO J de, CIMENTADA A. et al. Macro-and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245:118843
- [12] CHEN Xueqin, WANG Guotong, DONG Qiao, et al. Microscopic characterizations of pervious concrete using recycled Steel Slag Aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254(8):120149
- [13] 刘琼,肖建庄,李文贵.再生混凝土轴心受拉性能试验与格构数值模拟[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(S1):119-124.
LIU Qiong, XIAO Jianzhuang, LI Wengui. Axial tensile performance test and lattice numerical simulation of recycled concrete[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(S1):119-124.

(编辑 沈波)