

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220799

含砖再生混凝土细观损伤机理数值模拟研究

姚泽良^{1,2}, 祁亚伦^{1,2}, 令狐恬晶^{1,2}, 党发宁^{1,2}, 崔婷婷^{1,2}, 闻 硕^{1,2}

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西北干旱地区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究再生砖混凝土力学性能和损伤破坏机理, 将再生骨料形态视为随机凹凸多边形, 将再生砖混凝土视为废砖骨料、废弃混凝土骨料、新旧砂浆、废砖—新砂浆、骨料—旧砂浆、新一旧砂浆等七相非均质复合材料, 基于 PYTHON 的 ABAQUS 开发程序建立了不同骨料投放率、不同砖量的再生混凝土数值模型, 对粗骨料投放率为 45% 的含砖再生混凝土进行了细观力学性能计算分析, 并研究了含砖再生混凝土在荷载作用下的损伤破坏模式。结果表明, 该算法建模高效, 能够建立不同骨料投放率、不同砖量的含砖再生混凝土细观模型, 能满足一定工程需求; 再生砖混凝土的峰值应力和弹性模量随砖量的增加而逐渐降低, 而峰值应变随砖量的增加而增大; 不同砖量的混凝土损伤破坏形态基本一致。

关键词: 再生混凝土; 砖; 破坏模式; 细观性能; 力学指标

中图分类号: TV431; TU528; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0149-05

1 引言

城市化进程的推进产生了大量的废粘土砖、废弃混凝土等建筑垃圾^[1]。因砖强度远低于废弃混凝土骨料, 故很少将砖作为粗骨料制备混凝土^[2]。“十四五”科技规划纲要明确指出, 强化“再生资源”、提升建筑固体垃圾利用率。因此, 再生砖混凝土的研究是当前再生资源开发与绿色建筑科学研究中值得深入开展的科学问题之一。关于再生混凝土力学性能的研究手段主要有宏观试验和细观数值计算等。其中, 宏观试验假设再生混凝土为均质材料, 周期长且结果具有离散性, 无法对其内部破坏机理进行深入研究。细观力学数值法为连接宏观细观破坏的桥梁, 能准确反映混凝土内部损伤破坏演化的全过程^[3], 姚泽良等^[4]将该法应用于混凝土研究领域, 并取得一定的成果。但已有研究主要将骨料简化为椭圆形、圆形、凸边形等形状进行模拟, 与实际骨料的随机凹凸形态存在差异, 无法真实反映再生(砖)混凝土的力学性能。为研究再生砖混凝土力学性能和损伤破坏机理, 本文将再生骨料形态视为随机凹凸多边形, 将再生砖混凝土视为废砖骨料、废混凝土骨料、新旧砂浆、废砖—新砂浆界面(ITZ3)、骨料—

旧砂浆界面(ITZ2)、新一旧砂浆界面(ITZ1)具有三重界面七相非均质复合材料, 基于 PYTHON 的 ABAQUS 开发程序建立了不同骨料投放率、不同砖量的再生混凝土数值模型, 对其进行计算分析, 并研究了再生砖混凝土在荷载作用下的损伤破坏模式。

2 再生砖混凝土随机骨料模型

2.1 随机理论

采用经典理论 Carlo-Monte 原理产生均匀分布在 $[0, 1]$ 的伪随机数, 本文选用乘同余法生成随机数递推公式为:

$$\begin{cases} x_{n+1} = ax_n \pmod{M} & n = 0, 1, 2, \dots \\ \xi_{n-1} = x_{n-1} / M \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_{n+1} 为伪随机数; a 为乘子; x_n 为初始值, 取正奇数; M 为模; \pmod{M} 为除以模数取余数; ξ_{n-1} 为分布函数。

2.2 凹凸型骨料

废粘土砖、废混凝土经机械破碎为粗骨料后为不规则多边形骨料, 外形酷似凹凸多边形。本文应用极坐标公式^[5]确定边界区域内任意骨料顶点 O 位置, 即:

$$\begin{cases} r : r_i [1 + \text{random}(-1, 1) f_r] \\ \theta : \frac{2\pi}{\alpha} [\beta + \text{random}(-1, 1) f_\theta] \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2022-04-21, 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208422); 陕西省教育厅重点项目(20JS092)

作者简介: 姚泽良(1976-), 女, 博士、副教授, 研究方向为土木工程, E-mail: yaozeliang@xaut.edu.cn

式中, r_i 为 O 点随机半径; $\text{random}(\)$ 为随机函数; f_r 为 $0\sim 1$ 半径波动; α 、 β 分别为骨料边数、角点数(范围均为 $4\sim 9$); f_θ 为角度波动比例, 在 $0\sim 0.5$ 范围内波动。

凹凸型骨料几何信息用边数 α 、角点数 β 、旋转角度 θ 、极半径 r 等参数表述, 见图 1。

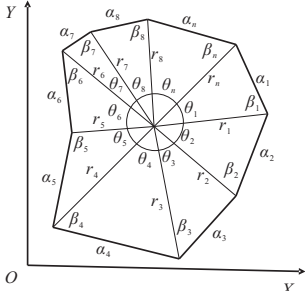


图 1 凹凸型骨料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concave-convex aggregate

2.3 程序开发

为与工程实际相符, 本文采用 Carlo-Monte 法使骨料模型大小、形状、位置随机分布在投放区域内, 算法步骤如下。

步骤 1 骨料生成与投放。生成骨料边数和旋转角度(初始角度为 0°), 且每次需随机增加相应的角度, 最大角度不得超过 360° , 由 Walraven 公式可知骨料各级配面积, 并按粒径降序投放。

步骤 2 干涉判断。选择高效简便的几何判断规则对骨料进行投放总面积超限及相交判断。

步骤 3 获取界面。骨料形心为坐标原点由外向内缩放, 按一定比例关系依次获取单个界面和多重界面的骨料。

2.4 计算模型

含砖再生混凝土具有多重界面结构, 分别为废砖—新砂浆界面(ITZ3)、碎石—旧砂浆界面(ITZ2)、新旧砂浆界面(ITZ1), 为简化计算将三种界面厚度均定义为 0.5 mm , 老砂浆厚度为 1.5 mm ^[6]。三重界面、砖骨料、废弃混凝土骨料及新、旧砂浆建立边长 100 mm 七相含砖再生混凝土模型(骨料投放率为 45%), 见图 2。

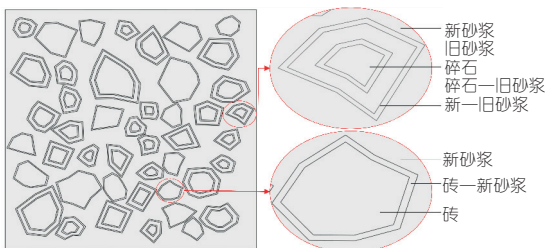


图 2 七相含砖再生混凝土模型

Fig. 2 Seven-phase brick recycled concrete model

以本文算法在 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 区域内进行投放得到砖含量不同时的细观模型图(骨料填

充率为 45%)及骨料投放率不同时的细观模型图(含砖量为 30%)见图 3。由图 3 可知, 生成砖含量分别为 0 、 10% 、 20% 、 30% 的细观模型及骨料填充率分别为 45% 、 50% 、 55% 、 60% 的细观模型, 验证了该算法的高效性和合理性, 满足一定工程需求。

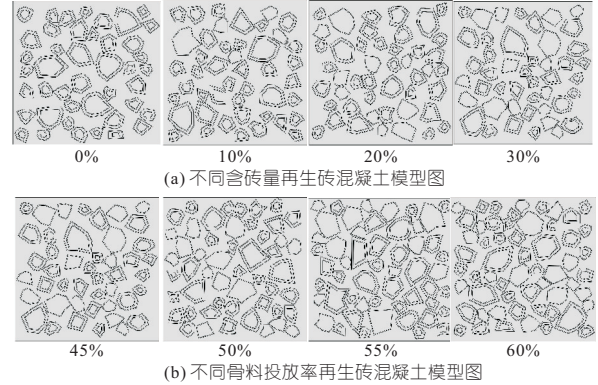


图 3 再生砖混凝土模型

Fig. 3 Recycled brick concrete model

3 再生砖混凝土数值计算模拟

3.1 有限元模型

由于混凝土损伤演化过程受网格尺寸的影响较小^[7], 且网格大小为 2 mm 时其应力—应变曲线表现较为平缓。因此, 本文选取全局种子为 2 mm 的三角形单元对不同砖量边长为 100 mm 的细观模型进行网格划分, 不同砖量的细观模型的砖骨料单元、总单元数量及随机生成的不同粒径的骨料数量见表 1。

表 1 单元数量及粒径数量

| 砖量 /% | 砖单元 数目 | 总单元 数目 | 粒径 | | | 总数 |
|----------|-----------|-----------|------|-------|-------|----|
| | | | 5~10 | 10~15 | 15~20 | |
| | | | mm | mm | mm | |
| 0 | 0 | 7 870 | 20 | 17 | 6 | 43 |
| 10 | 278 | 7 826 | 20 | 19 | 6 | 45 |
| 20 | 518 | 7 702 | 22 | 17 | 7 | 46 |
| 30 | 703 | 7 750 | 21 | 18 | 6 | 45 |

本文对有限元模型采用位移加载方式, 在模型上部创建耦合约束(RP-1), 在下部采用固定约束, 在 RP-1 处分别施加 -0.5 、 0.2 mm 的位移荷载, 对投放率为 45% 的含砖再生混凝土分别进行单轴拉伸和单轴压缩数值计算分析, 模型加载方式及边界条件见图 4。

3.2 参数设置

对模型中各组分单元本构关系, 选用 ABAQUS 混凝土塑性损伤本构模型, 即 CDP 模型。该模型能够有效反映混凝土材料, 单轴受力

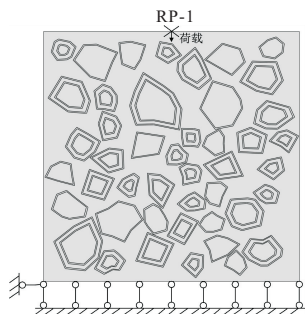


图 4 加载方式及边界条件

Fig. 4 Loading mode and boundary conditions

后所产生的塑性变形及刚度退化现象,见图 5。

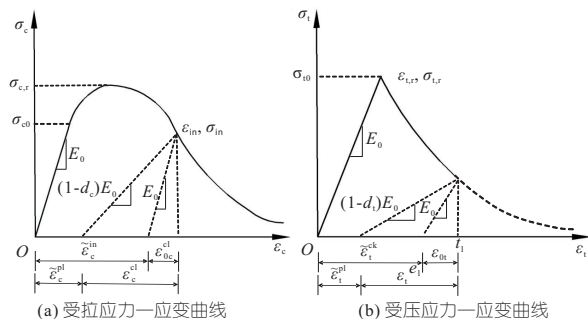


图 5 CDP 模型单轴应力—应变曲线

Fig. 5 Uniaxial stress-strain curve of CDP

在使用 CDP 模型时需定义相应的塑性参数,包括粘性系数(5×10^{-4})、偏心率(0.1)、膨胀角(30°)、影响屈服面形态的系数(0.666 7)、双轴抗压强度与单轴抗压强度的比值(1.16)。根据文献[8,9],界面强度约为相应砂浆强度的 0.7 倍,废砖—新砂浆界面(ITZ3)的强度高于碎石—旧砂浆界面(ITZ2)和新一旧砂浆界面(ITZ1)的强度,本文以每立方米混凝土中再生粗骨料为 930 kg、砂为 658 kg、水泥为 412 kg、水为 158 kg 的配合比进行再生混凝土的试配,研究了不同砖量(0%、10%、20%、30%)再生混凝土的力学性能,表 2 为各材料力学参数。

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameter

| 材料名称 | 泊松比 μ | 弹性模量 /GPa | 抗拉强度 /MPa | 抗压强度 /MPa |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 新砂浆 | 0.22 | 30 | 3.0 | 32.00 |
| 旧砂浆 | 0.22 | 30 | 2.5 | 30.00 |
| 碎石 | 0.16 | 80 | 10.0 | 80.00 |
| 砖 | 0.20 | 14 | 0.8 | 11.86 |
| ITZ3 | 0.20 | 23 | 2.3 | 22.00 |
| ITZ2 | 0.20 | 20 | 1.6 | 18.00 |
| ITZ1 | 0.20 | 22 | 2.0 | 20.00 |

3.3 再生砖混凝土单轴压缩数值模拟

3.3.1 含砖量对混凝土压应力的影响

数值计算模型再生粗骨料粒径均为 5~20 mm,边长为 100 mm 立方体与试验一致,模拟了砖含量为 0%、10%、20%、30%时混凝土受轴向压

缩全过程,将数值模拟结果与边长 100 mm 的试验值^[9]进行对比,结果见表 3。由表 3 可知,模拟值大于试验值,其误差在 10% 以内,其主要原因在于数值计算未考虑再生粗骨料破碎时产生的初始缺陷,满足精度要求。

表 3 再生砖混凝土强度对比

Tab. 3 Strength comparison of recycled brick concrete

| 含砖量/% | 峰值强度/MPa | | 相对误差 /% |
|-------|----------|-------|---------|
| | 模拟值 | 试验值 | |
| 0 | 35.89 | 33.43 | 7.36 |
| 10 | 31.35 | 30.07 | 4.26 |
| 20 | 28.19 | 26.38 | 6.86 |
| 30 | 24.97 | 23.23 | 7.49 |

不同含砖量混凝土受轴向压缩,所得应力—应变曲线见图 6。图 6 中上升段处基本为直线段,视为线弹性段,表示混凝土的弹性模量。由图 6 可知,随含砖量的增加混凝土的弹性模量逐渐减小,增加含砖量其峰值应力呈下降趋势,而峰值应变则不断增大,含砖量为 30% 时变化最显著,下降段更加迅速,说明砖的加入使混凝土延性降低,更具有脆性。

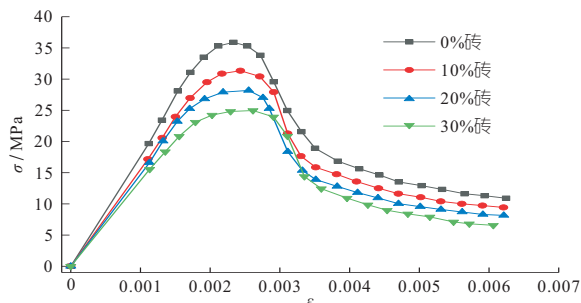


图 6 不同含砖量单轴压缩应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of different brick quantities of uniaxial compressive

3.3.2 含砖量对混凝土受压损伤的影响

轴向压缩下不同含砖量混凝土损伤演化过程见图 7。由图 7 可知,普通再生混凝土(不含砖)损伤率先在骨料—旧砂浆界面(ITZ2)开展,接着新一旧砂浆界面(ITZ1)发生破坏,随后两界面间的老砂浆出现损伤并延伸至新砂浆,最终形成连贯的损伤带使试件破坏,其界面区是最薄弱处,这与文献[10]试验研究结果一致;而再生砖混凝土先损伤破坏,接着骨料—旧砂浆界面(ITZ2)出现损伤,随后废砖—新砂浆界面(ITZ3)与新一旧砂浆界面(ITZ1)几乎同时破坏,其原因在于低强度砖加快废砖—新砂浆界面(ITZ3)破坏速率,最后损伤向老、新砂浆扩展,并形成贯通的损伤带最终致试件破坏,砖骨料成为最薄弱处,混凝土的破坏形态不随砖量的变化发生改变,这与文献[11]试验描述相符。

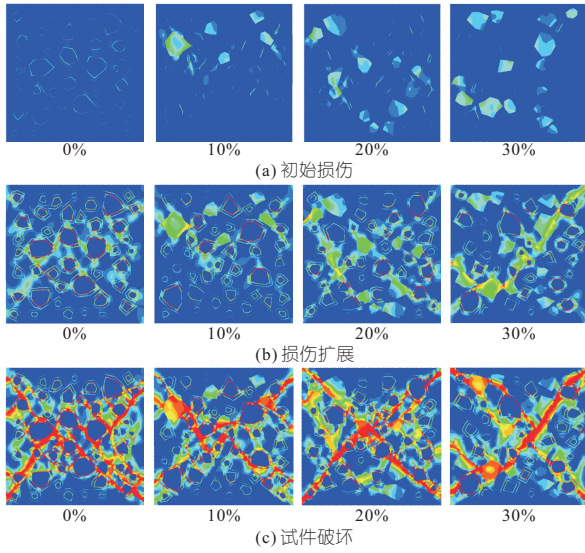


图 7 不同含砖量混凝土轴向受压损伤演化过程

Fig. 7 Evolution process of axial compression damage of concrete with different brick quantities

3.4 再生混凝土拉伸数值模拟

3.4.1 含砖量对混凝土拉应力的影响

建立含砖量分别为 0%、10%、20%、30% 再生混凝土模型进行轴向拉伸数值模拟, 所得应力—应变曲线见图 8。由图 8 可知, 不同含砖量再生混凝土单轴拉伸下应力—应变曲线均经历上升段、下降段。上升段包括基本为直线段的线弹性段和凸曲线的非线弹性段, 下降段包括峰值应力后的软化阶段和近水平的收敛阶段, 与《混凝土结构设计规范》^[12] 描述一致。由线弹性段可知含砖量不断增加, 混凝土弹性模量逐渐减小, 含砖量增加峰值应力下降, 峰值应变增大, 当含砖量为 30% 时变化最为明显, 这与单轴受压应力—应变曲线表现一致。

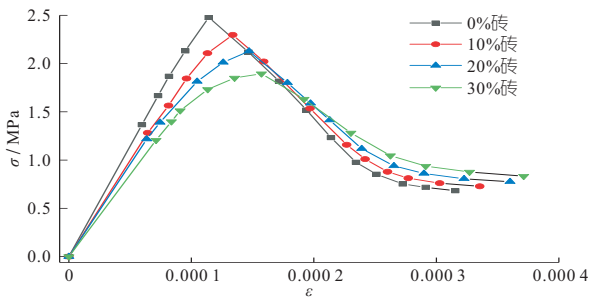


图 8 不同含砖量单轴拉伸应力—应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of different brick quantities of uniaxial tensile

3.4.2 含砖量对混凝土受拉损伤的影响

不同含砖量混凝土单轴拉伸损伤演变过程见图 9。由图 9 可知, 普通再生混凝土(不含砖)骨料—旧砂浆界面(ITZ2)先出现拉伸损伤, 接着新一旧砂浆界面(ITZ1)发生拉伸破坏, 随后拉伸破坏发展至旧、新砂浆, 并逐渐形成均匀连贯的损

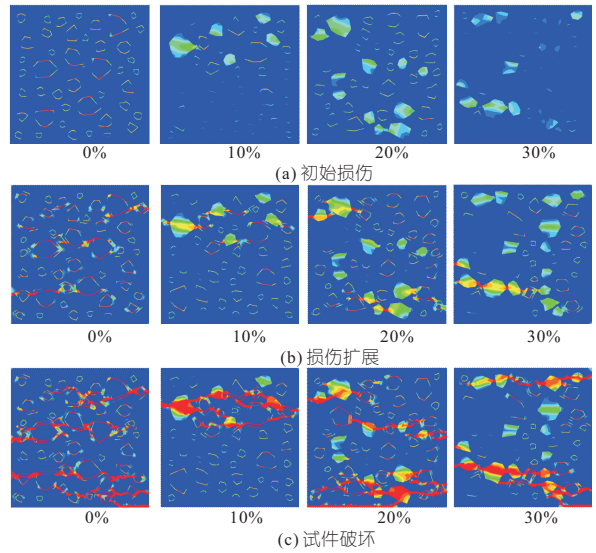


图 9 不同含砖量混凝土轴向受拉损伤演化过程

Fig. 9 Evolution process of axial tensile damage of concrete with different brick quantities

伤带, 使试件破坏; 而含砖再生混凝土拉伸损伤先在砖骨料处开展, 接着骨料—旧砂浆界面(ITZ2)处发生破坏, 随后废砖—新砂浆界面(ITZ3)先于新一旧砂浆界面(ITZ1)出现拉伸损伤, 其原因在于砖脆性大易发生拉伸破坏, 最后损伤带扩展到老、新砂浆, 最终会在砖骨料集中处发展成多条连续贯通的损伤带使试件破坏, 出现此现象的原因是损伤带可贯穿砖骨料。

4 结论

a. 本文算法建模效率高, 能够生成不同砖量、不同骨料投放率的含砖再生混凝土细观模型, 可满足不同的工程需求。

b. 再生混凝土随含砖量的增加峰值应力和弹性模量呈下降趋势, 峰值应变呈上升趋势, 当含砖量为 30% 时这种作用最明显。砖的加入弱化了再生混凝土力学性能, 使应力—应变曲线下降段的下降速率加快, 增大了混凝土的脆性。

c. 含砖再生混凝土与普通再生混凝土(不含砖)具有相似的破坏形态, 但破坏模式有所不同。含砖再生混凝土单轴受力发生破坏时损伤带都会贯穿砖骨料, 其中单轴受拉破坏时再生混凝土损伤带出现在砖骨料集中区域, 说明砖具有极大的脆性。

参考文献:

[1] 张军辉, 丁乐, 张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 135-154.

- [2] HE ZIMING, SHEN AIQIN, WU HANSONG, et al. Properties and mechanisms of brick-concrete recycled aggregate strengthened by compound modification treatment[J]. Construction and building materials, 2020, 315:125678.
- [3] 付兵彬,熊勃勃,卢晓春. 混凝土多尺度模型构建[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 116-119, 49.
- [4] 姚泽良,段东旭,党发宁,等. 基于随机骨料模型的再生混凝土单轴压缩数值模拟[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 475-480.
- [5] 汪奔,王弘,张志强,等. 基于网格生成的随机凹凸型混凝土骨料细观建模方法[J]. 计算力学学报, 2017, 34(5): 591-596.
- [6] 徐福卫,田斌,徐港. 界面过渡区厚度对再生混凝土损伤性能的影响分析[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 122-128.
- [7] 金浏,蒋轩昂,杜修力. 轻骨料无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应: 细观模拟[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 57-67.
- [8] 刘超,余伟航,刘化威,等. 再生砖骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13025-13031.
- [9] 杨莹莹. 砖粒含量对再生混凝土基本性能影响试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [10] 张翠霞. 破碎卵石再生混凝土力学性能及无损检测试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [11] 陈杰,耿悦,王玉银,等. 含碎红砖再生混凝土基本力学性能及其应力-应变关系[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 184-192.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

Numerical Simulation of Mesoscopic Damage Mechanism of Recycled Concrete Containing Brick

YAO Ze-liang^{1,2}, QI Ya-lun^{1,2}, LINGHU Tian-jing^{1,2}, DANG Fa-ning^{1,2}, CUI Ting-ting^{1,2}, WEN Shuo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and damage mechanism of recycled brick concrete, the shape of recycled aggregate was regarded as a random concave convex polygon. Recycled brick concrete was regarded as seven-phase heterogeneous composite materials such as waste brick aggregate, waste concrete aggregate, new and old mortar, waste brick-new mortar, aggregate-old mortar, new and old mortar. Based on the ABAQUS development program of PYTHON, the numerical model of recycled concrete with different aggregate rate and different brick quantity was established. The meso-mechanical properties of recycled concrete containing brick with 45% coarse aggregate content were analyzed. The damage and failure patterns of recycled concrete containing bricks under load were studied. The results show that the algorithm is efficient in modeling, and can establish the mesoscopic model of recycled concrete containing bricks with different aggregate rates and different brick quantities, which can meet certain engineering requirements; The peak stress and elastic modulus of recycled brick concrete gradually decrease with the increase of brick quantity, while the peak strain increases with the increase of brick quantity; The damage and failure patterns of concrete with different brick quantities are basically the same.

Key words: recycled concrete; brick; failure mode; microscopic performance; mechanical index

(上接第 164 页)

Dynamic Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel Material Under Variable Amplitude Cyclic Loading

HUANG Hu, XIONG Yan-lai, CAO Ke-lei, ZHANG Xian-cai

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Dynamic strength is an important parameter for dam stability and safety analysis, which is of great significance to engineering design. Variable amplitude cyclic loading and unloading test was carried out to explore the effect of different confining pressure and cement content on the dynamic stress-strain relationship of cemented sand gravel (CSG) material by large dynamic triaxial instrument. Based on the Mohr Coulomb strength criterion, the evolution law of dynamic strength parameters of CSG materials during plastic deformation was studied by taking the dynamic strain as the plastic internal variable. The results show that the dynamic cohesion and dynamic internal friction angle increase with the increase of cement content. As the dynamic strain increases, the dynamic cohesion decreases rapidly, the dynamic internal friction angle increases, and the friction force generated by the shear slip between the aggregates dominates. When the peak dynamic stress is reached, the effective stress surface between aggregates decreases obviously, the dynamic cohesion decreases gently, the dynamic internal friction angle decreases with a certain hysteresis. The law of dynamic cohesion with dynamic strain conforms to the power function relationship. The law of dynamic internal friction angle and dynamic strain change conforms to the quadratic function relationship. The research results can provide a theoretical reference for the optimization of seismic design of CSG dam.

Key words: cemented sand and gravel material; variable amplitude cyclic loading; plastic stage; dynamic cohesion; dynamic internal friction angle