

基于多尺度均匀化的钢筋混凝土柱 偏心受压性能模拟研究

李维康^{1,2}, 王江^{1,2}, 许斌^{1,2}

(1. 华侨大学土木工程学院, 361021 厦门; 2. 福建省智慧基础设施与监测重点实验室(华侨大学), 361021 厦门)

摘 要: 基于等效均匀化理论, 通过建立细观数值模型和细观均匀化数值模型, 多尺度模拟研究混凝土骨料的细观因素对钢筋混凝土柱偏心受压力学行为的影响。结果表明: 模拟结果与参考试验结果吻合良好, 从构件层次验证了细观均匀化数值模型的有效性; 细观数值模型和细观均匀化数值模型均能有效反映骨料的随机分布对钢筋混凝土偏心受压力学性能和损伤分布的影响; 与细观数值模型相比, 细观均匀化数值模型对骨料不同形状的敏感性较差; 细观均匀化数值模型可以节省计算空间, 提高计算效率。

关键词: 钢筋混凝土柱偏心受压; 细观数值模型; 细观均匀化数值模型; 骨料的细观因素

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-4939(2025)05-1119-10

Influence of aggregate parameters on mechanical properties of reinforced concrete columns under eccentric compression

LI Weikang^{1,2}, WANG Jiang^{1,2}, XU Bin^{1,2}

(1. Civil Engineering College of Huaqiao University, 361021 Xiamen, China; 2. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province (Huaqiao University), 361021 Xiamen, China)

Abstract: The influence of meso-factors of concrete aggregate on the mechanical behavior of reinforced concrete columns under eccentric compression is studied by establishing a meso-numerical model and a meso-homogenization numerical model, which is based on the equivalent homogenization theory. The results show that the simulation results are in good agreement with the reference test results, which verifies the effectiveness of the mesoscopic homogenization numerical model at the component level. Both mesoscopic numerical model and mesoscopic homogenization numerical model can effectively reflect the influence of random distribution of aggregate on mechanical properties and damage distribution of reinforced concrete under eccentric compression. Compared with the mesoscopic numerical model, the mesoscopic homogenization numerical model is less sensitive to different shapes of aggregates. The meso-homogeneous numerical model can save computational space and improve computational efficiency.

Key words: eccentrically compressed reinforced concrete column; meso-numerical model; meso-homogenization numerical model; meso-factor of aggregate

收稿日期: 2023-03-22

基金项目: 华侨大学科学研究基金资助项目 (No. 605-50Y18016)

通信作者: 许斌, 教授. E-mail: binxu@hqu.edu.cn

引用格式: 李维康, 王江, 许斌. 基于多尺度均匀化的钢筋混凝土柱偏心受压性能模拟研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1119-1128.

LI Weikang, WANG Jiang, XU Bin. Influence of aggregate parameters on mechanical properties of reinforced concrete columns under eccentric compression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1119-1128.

混凝土是由骨料、砂浆、微裂纹、气泡等材料组成的多相复合材料,骨料的随机分布和不同形状是造成混凝土随机性和非均质性的主要原因,其细观尺度的构成会影响钢筋混凝土构件的力学行为。因此,研究混凝土骨料的细观因素对钢筋混凝土构件力学行为的影响具有重要意义。

近年来,国内外学者为从细观层次研究混凝土构件力学行为,建立了许多细观数值模型,包括格构模型^[1]、随机粒子模型^[2]、随机力学特性模型^[3]、随机骨料模型^[4-6]。高政国等^[5]提出二维混凝土多边形和凸多面体随机骨料的投放算法。刘光廷等^[4]基于随机骨料模型,模拟了单边裂缝受拉试件从损伤到断裂破坏的过程。杜承斌等^[7]针对实际工程中骨料级配与体积分数编写了骨料的投放算法,并进行了三维混凝土随机骨料数值试件的受压破坏研究。为从材料层次和构件层次深入研究混凝土细观组分对其力学行为影响,许多学者先后通过细观数值模拟,研究了混凝土材料的单轴抗拉、抗压、抗剪、弯拉^[8-11]和钢筋混凝土柱轴心受压、偏心受压的宏观力学特性^[12-15]。此外,CHEN等^[16-17]还基于细观模型对非接触式搭接的钢筋混凝土桥柱进行了数值仿真研究。

混凝土细观数值模型需要用细小的网格划分不同材料的界面层,以满足变形协调的要求,导致计算量大、计算效率低等问题^[3-9]。即为体现混凝土的不均匀性,又为提高计算效率,马怀发等^[10]基于均匀化思想,提出了一种分析桥梁结构的并行多尺度建模方法。金浏^[18]基于混凝土细观等效化模型,模拟了混凝土矩形和钢筋混凝土柱轴心受压力学行为。王江等^[19]基于细观均匀化模型,模拟研究了骨料的随机分布和不同形状对混凝土材料单轴受拉宏观力学性能的影响。以上混凝土细观均匀化力学模型均基于弹性损伤本构,未考虑混凝土弹塑性阶段影响因素。

本研究基于CDP模型和复合材料细观力学提出混凝土均匀化力学模型,考虑到骨料的随机分布和不同形状,建立了包含随机分布的圆形、椭圆形和多边形骨料的钢筋混凝土柱细观模型和对应的细观均匀化模型,高效地模拟了钢筋混凝土柱在偏心受压状态下的力学行为和损伤分布,并与已有试验结果进行对比^[20],验证了细观均匀化模型的可行性和有效性,为钢筋混凝土柱的多尺度建模和高效力学行为分析提供了重要的手段和模拟基础。

1 均匀化理论及本构关系

1.1 骨料、砂浆及钢筋

骨料通常采用线性弹性本构模型描述其力学性能,其应力-应变关系表现为一条倾斜的线段。斜率代表弹性模量 E_{ag} ,端点 $A(\varepsilon_{c,ag,max}, \delta_{c,ag,max})$ 、 $A'(\varepsilon_{t,ag,max}, \delta_{t,ag,max})$ 分别为骨料抗压、抗拉的峰值点,如图1所示。

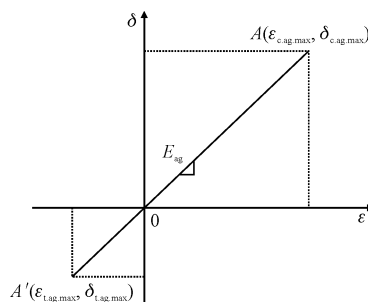


图1 骨料本构关系模型

Fig. 1 Aggregate constitutive model

砂浆中存在微裂纹、气泡等缺陷,导致其在受力过程中出现软化现象,故采用塑性损伤本构模型描述其力学性能。 E_{mo} 为砂浆弹性模量,受压极限弹性应变为 x_0 ,砂浆抗压和抗拉峰值点分别为 $A(\varepsilon_{c,mo,max}, \delta_{c,mo,max})$ 、 $A'(\varepsilon_{t,mo,max}, \delta_{t,mo,max})$,如图2所示。

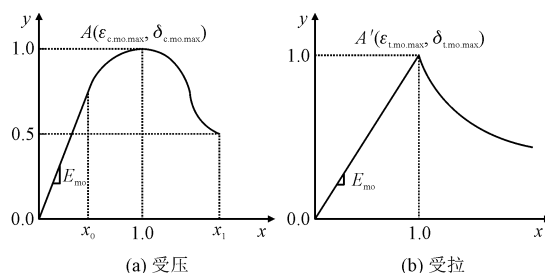


图2 砂浆本构关系模型

Fig. 2 Mortar constitutive model

通过Sidoroff的能量等价原理计算塑性损伤因子^[21]。砂浆塑性损伤以压缩、拉伸塑性损伤因子 d_c 、 d_t 为指标。 d_c 、 d_t 分别表示砂浆在受压、受拉状态下的损伤程度,通常在0~1范围内。当 d_c 、 d_t 为0时,表示砂浆没有损伤;当 d_c 、 d_t 为1时,表示砂浆因损伤而失效。

压缩塑性损伤因子表达式如下。

当 $x \leq 1$ 时

$$d_c = 1 - \sqrt{\frac{E_0 \varepsilon_c}{f_c^*} [\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)x + (\alpha_a - 2)x^2]} \quad (1)$$

当 $x > 1$ 时

$$d_c = 1 - \sqrt{\frac{E_0 \varepsilon_c}{f_c^*} \cdot \frac{1}{\alpha_d (x - 1)^2 + x}} \quad (2)$$

拉伸塑性损伤因子表达式如下。

当 $x \leq 1$ 时

$$d_t = 0 \quad (3)$$

当 $x > 1$ 时

$$d_t = 1 - \sqrt{\frac{1}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x}} \quad (4)$$

式中: E_0 为砂浆的初始弹性模量; f_c^* 为砂浆抗压强度; α_a 、 α_d 分别为砂浆受压塑性损伤本构上升段、下降段参数; α_t 为砂浆受拉塑性损伤本构下降段参数。

参考已有试验数据^[20], 通过细观模拟反演得到骨料和砂浆的材料参数, 如表 1 所示。

表 1 混凝土细观组分力学参数

Tab. 1 Micro-components mechanical parameters of concrete

力学参数	骨料	砂浆	细观模拟结果	试验结果
抗压强度 σ_c /MPa	—	62	65	67.5
抗拉强度 σ_t /MPa	—	5.5	—	—
弹性模量 E /GPa	56	26	38	38.5
泊松比	0.2	0.2	0.2	—

钢筋通过理想塑性本构模型描述其力学性能, 理想塑性本构模型作为一种描述钢筋力学行为的经典模型, 曲线开始表现为一条倾斜的直线, 其斜率为钢筋弹性模量 E_s 。在到达钢筋压缩、拉伸屈服点 $A'_s(\varepsilon'_s, \delta'_s)$ 、 $A_s(\varepsilon_s, \delta_s)$ 后, 变为一条水平的直线, 如图 3 所示, 钢筋材料参数见表 2。

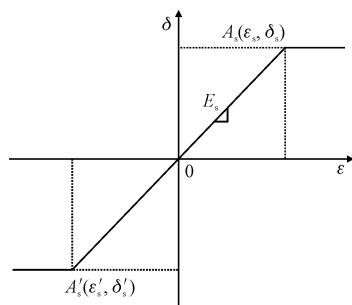


图 3 钢筋应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of steel bar

表 2 钢筋力学性能参数

Tab. 2 Mechanical property parameters of reinforcement

钢筋类型	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	屈服强度 f_y /MPa	配筋率 ρ /%	钢筋截面总面积 A /mm ²
纵筋	210	0.3	561	0.080 5	1 810.40
箍筋	210	0.3	314	0.037 7	5 654.87

1.2 钢筋与混凝土之间的连接单元

通过 Spring2 非线性弹簧单元连接钢筋和混凝土, 模拟钢筋和混凝土之间的黏结滑移作用。黏结滑移本构参考《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)^[22]。图 4 为钢筋和混凝土间的黏结应力滑移本构关系曲线。由图 4 可知, 黏结滑移本构关系曲线主要由特征点决定, 包括劈裂点 $A_{cr}(\tau_{cr}, s_{cr})$ 、峰值点 $A_u(\tau_u, s_u)$ 和残余点 $A_r(\tau_r, s_r)$, 特征点取值见表 3。

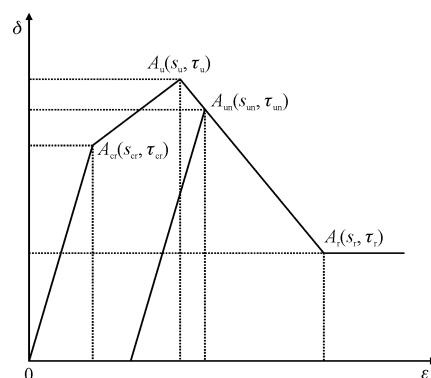


图 4 黏结应力-相对滑移曲线

Fig. 4 Bond stress-relative slip curve

表 3 黏结滑移本构特征值

Tab. 3 Bonded slip constitutive characteristic values

参数	特征点		
	劈裂点 (cr)	峰值点 (u)	残余点 (r)
黏结应力 τ	$2.5f_{t,r}$	$3f_{t,r}$	$f_{t,r}$
相对滑移 s	$0.025d$	$0.04d$	$0.55d$

注: $f_{t,r}$ 为混凝土抗拉强度; d 为钢筋直径。

1.3 均匀化单元的本构关系

细观均匀化单元本构基于均匀化思想和复合材料并联模型, 结合材料力学半力学经验法和塑性损伤本构, 以骨料占比面积为自变量, 依次对均匀化网格内的骨料、砂浆的弹性模量和强度进行等效。具体可分为 3 步: 第 1 步是基于复合材料并联模型等

效弹性模量;第2步是基于材料力学半力学经验法等效抗拉、抗压强度;第3步是根据等效弹性模量和峰值强度推出对应的塑性损伤本构模型。

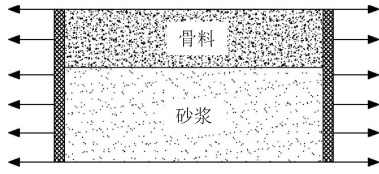


图5 复合材料并联模型示例

Fig. 5 Example of a parallel model of composite materials

第1步弹性模量等效基于Voigt并联模型^[18]。假设骨料和砂浆在受力过程中所产生的位移相同,如图5所示。通过式(5)和式(6)可得等效弹性模量 E' ,即

$$S_{ag} + S_{mo} = 1 \quad (5)$$

$$E' = E_{ag} \cdot S_{ag} + E_{mo} \cdot S_{mo} \quad (6)$$

式中: E_{ag} 、 E_{mo} 、 S_{ag} 、 S_{mo} 分别为骨料、砂浆的弹性模量和对应等效网格单元中所占面积分数。

第2步的峰值强度等效是基于材料力学半力学经验法,认为混凝土复合材料弹性阶段的强度分为2种情况。一种是当骨料占比较高时,混凝土整体的极限应变与骨料破坏应变 $(\varepsilon_{t,c})_{ag,max}$ 相近,混凝土强度主要由骨料控制,将这种情况称为骨料控制强度阶段,此阶段的混凝土抗拉、抗压峰值应力表达式见式(8);另一种是当骨料含量较低时,混凝土整体的极限应变远大于骨料破坏应变 $(\varepsilon_{t,c})_{ag,max}$,认为在到达混凝土整体的极限应变时,含量较少的骨料失效,混凝土强度完全由砂浆控制,将这种情况称为砂浆控制强度阶段,此阶段的混凝土抗拉、抗压峰值应力表达式见式(9)。

$$V_{ag} = \frac{S_{ag}}{S_{ag} + S_{mo}} \quad (7)$$

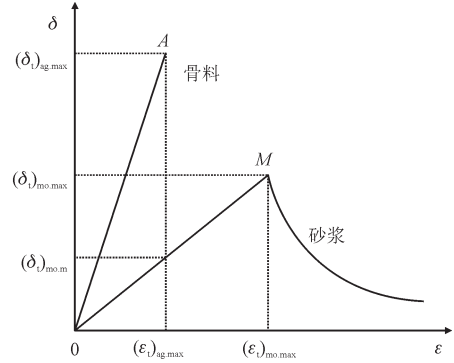
$$\delta'_{t,c} = (\delta_{t,c})_{ag,max} V_{ag} + (\delta_{t,c})_{mo,max} (1 - V_{ag}) \quad (8)$$

$$\delta'_{t,c} = (\delta_{t,c})_{mo,max} (1 - V_{ag}) \quad (9)$$

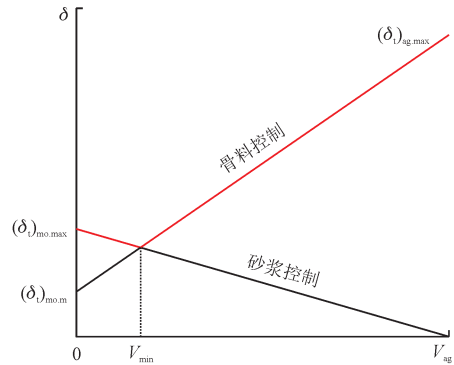
式中: V_{ag} 为骨料在等效网格内所占的比例; $\delta'_{t,c}$ 为等效后材料单元网格弹性阶段的拉、压峰值应力; $(\delta_{t,c})_{ag,max}$ 、 $(\delta_{t,c})_{mo,max}$ 分别为骨料、砂浆的拉、压峰值应力。

以图6混凝土抗拉峰值应力的等效为例,其中 $(\delta_{t,c})_{mo,m}$ 为骨料在拉、压峰值应变时,砂浆所对应的拉、压应力。图6(a)表示骨料和砂浆拉伸的应力-

应变关系曲线,可以看出骨料抗拉峰值应变 $(\varepsilon_{t,c})_{ag,max}$ 明显小于砂浆抗拉峰值应变 $(\varepsilon_{t,c})_{mo,max}$ 。根据上述公式,以骨料占比 V_{ag} 为横坐标,混凝土整体的抗拉峰值应力为纵坐标 δ ,可将上述2种情况绘制为2条相交的直线,如图6(b)所示。骨料控制强度阶段的混凝土强度曲线为一条斜率为正、上升的直线,砂浆控制强度阶段的混凝土强度曲线为一条斜率为负、下降的直线。取标红部分为有效值,等效网格的峰值应力先降低、后升高,基本呈“V”型发展。



(a) 骨料和砂浆本构关系



(b) 骨料面积分数与峰值应力关系

图6 复合材料强度关系曲线

Fig. 6 Composite material strength curve

值得一提的是,混凝土受拉的应力-应变关系曲线的上升段为一条直线,可完全适用于上述混凝土均匀化网格抗拉峰值应力等效。混凝土受压的应力-应变关系曲线上段基本由弹性阶段和塑性阶段组成,通过上述方法只能求出混凝土受压应力在弹性阶段峰值。混凝土均匀化网格的受压峰值应力需在弹性阶段的受压峰值应力的基础上乘以扩大系数 K_i ,即

$$K_i = \frac{\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)^2 + (\alpha_a - 2)^3}{\alpha_a x_i + (3 - 2\alpha_a)x_i^2 + (\alpha_a - 2)x_i^3} \quad (10)$$

$$\delta'_{oc} = K_i \cdot \delta'_c \quad (11)$$

式中: α_a 为混凝土受压应力-应变关系曲线上段参数; x_i 为弹、塑性分界点; δ'_c 为混凝土弹性阶段受压

峰值应力; δ'_{oc} 为混凝土受压峰值应力。

2 细观及细观均匀化模型的建立

2.1 细观模型的建立

2.1.1 随机骨料模型的建立

由参考试验^[20]可知,偏心柱试件尺寸 $960\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,混凝土骨料总占比为 0.7 ,其中粗骨料所占比例为 0.37 。基于 Fuller 级配曲线^[23]和 Walraven 公式^[24]转换,可得二维随机骨料模型骨料级配参数,见表4。

基于混凝土骨料级配参数,将混凝土视为由骨料、砂浆组成的两相复合材料,采用 Monte-Carlo 方法^[4],通过 Matlab 程序将二维圆形、椭圆形、多边形骨料随机投放,共生成5个二维偏心柱几何模型,如图7所示。

表4 随机骨料模型级配

Tab.4 The gradation of random aggregate model

试件	骨料形状	大骨料 粒径/mm	小骨料 粒径/mm	大骨料 颗粒数	小骨料 颗粒数
偏心柱	圆形	16	8	163	454
	椭圆形	16	8	209	594
	多边形	16	8	187	528

注:椭圆形、多边形骨料以其长轴为粒径。

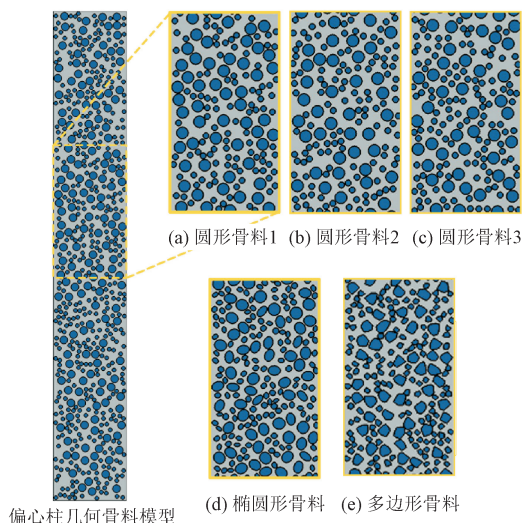


图7 偏心柱骨料几何模型

Fig.7 Geometric model of eccentric column aggregate

2.1.2 细观模型有限元设置

混凝土细观模型采用“拓分法”分别创建骨料、砂浆区域,并赋予材料属性。假设在受力过程中骨

料和砂浆黏结完好,骨料与砂浆区域的相互作用设置为绑定约束,砂浆边界设为主面,骨料边界设为次面。骨料、砂浆网格形状分别设置为三角形和以四边形为主,网格类型分别为 CPS3 三结点平面应力三角形单元和 CPS4R 四结点双线性平面应力四边形单元,以提高计算收敛程度,减少迭代次数,控制网格尺寸为 2 mm 。为防止偏心柱在模拟加载过程中出现应力集中,在偏心柱模型两端设置刚性垫块,并与混凝土绑定约束。在偏心柱模型加载侧和约束侧分别设置参考点,参考点和垫块表面间设置“点-面”耦合约束。

2.2 细观均匀化模型的建立

以尺寸为 $960\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的混凝土偏心柱圆形随机骨料模型为例,考虑骨料最大粒径和试件尺寸,选用 $20\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 四边形网格将偏心柱随机骨料模型划分成480个均匀化单元,如图8所示。

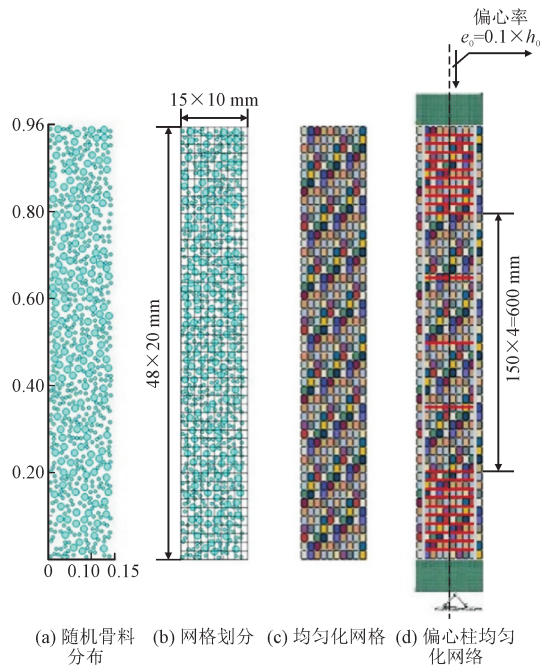


图8 均匀化网格划分示例

Fig.8 Example of uniform meshing

通过 Matlab 和 Python 程序依次对每个均匀化单元的骨料、砂浆本构关系进行等效和 ABAQUS 本构关系参数输入,建立钢筋混凝土偏心柱细观等效均匀化模型。各均匀化单元弹性模量和拉、压强度分布如图9所示。由图9可知,均匀化单元的弹性模量、抗压和抗拉强度基本符合正态分布,反映了骨料投放的随机性和均匀化单元尺寸的合理性。

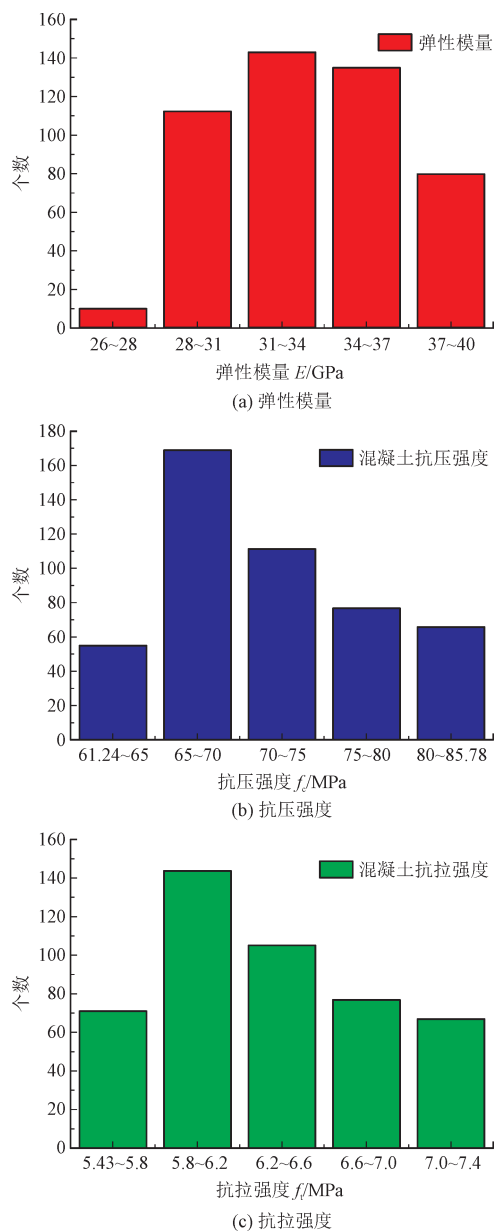


图9 均匀化网格材料参数分布

Fig.9 Uniform grid material parameter distribution

2.3 钢筋有限元设置

钢筋网格单元为 T2D2 二节点二维桁架单元, 控制网格尺寸为 2 mm, 钢筋材料参数见表 2。偏心柱构件尺寸和配筋设置如图 8(d) 所示, 箍筋间距为 150 mm, 两端加密以防加载过程中的局部破坏。通过 Spring2 弹簧单元连接钢筋和混凝土节点, 模拟钢筋与混凝土之间的黏结滑移作用。

与细观模型相同, 在偏心柱加载侧和约束侧设置刚性垫块, 以防止在加载过程中混凝土出现应力集中, 影响偏心柱力学行为数值模拟。混凝土与垫块间采用绑定约束, 钢筋与垫块间采用“点-面”耦合

约束。在垫块上、下侧偏心处分别设置参考点, 参考点和垫块表面设置“点-面”耦合约束。在上侧参考点施加竖向偏心位移荷载, 偏心率 $e_0 = 0.1 \times h_0$, h_0 为截面深度 150 mm。下侧参考点偏心位置约束 X 、 Y 向位移, 转角自由。

3 偏心柱数值分析

3.1 细观和细观均匀化模型的验证

3.1.1 应力场分析

图 10 为圆形骨料偏心柱细观和细观均匀化模型的应力分布。

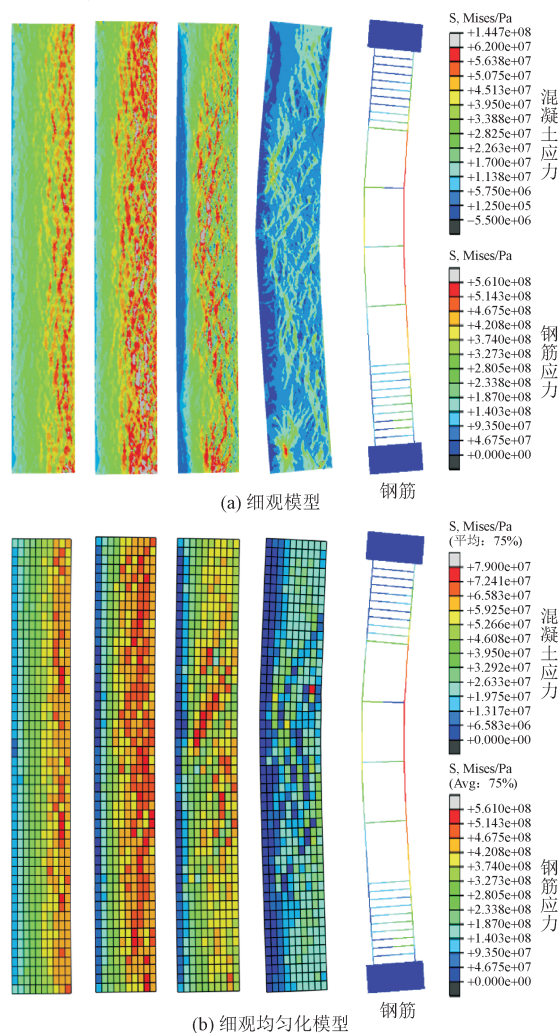


图10 钢筋混凝土柱试件应力分布

Fig.10 Stress distribution of reinforced concrete column

从左至右依次为弹塑性阶段、峰值阶段、下降阶段、残余阶段以及破坏时的钢筋应力分布。在弹塑性阶段, 柱偏压侧大量压应力区域, 且出现少量高应力值的红色区域, 高应力传递路线主要为“骨料-砂

浆-骨料”。处于峰值阶段的柱偏压侧高应力值的红色区域增多,细观模型骨料区域最大应力值约为144.7 MPa,砂浆区域最大应力值约为62 MPa。在下降阶段,由于砂浆损伤后失效,砂浆单元承载力下降,偏压侧高应力红色区域减少。偏心柱在残余阶段高应力值的红色区域完全消失,此阶段柱已经失效破坏,应力传递方式完全改变,在原先未发生损伤的部位形成新的应力传递路线。从钢筋应力分布可知,两侧钢筋均处于受压状态,偏压侧纵筋率先压缩屈服,箍筋呈外凸趋势。细观模型和细观均匀化模型的应力分布的位置和过程基本相同,说明细观均匀化模型可较好反映应力分布过程,从构件层次验证了细观等效均匀化模型的可行性。

3.1.2 破坏形式

图11为圆形骨料偏心柱细观和对应均匀化模型压缩损伤分布与试验破坏结果对比。压缩损伤主要出现在骨料上下侧的砂浆区域,最终破坏形式表现为柱中偏压侧局部压缩破坏,模拟结果的损伤范围、形状与参考试验基本一致。通过细观和细观均匀化模拟结果对比可知,细观模型损伤主要围绕骨料生成,分布范围较大,主要分布在柱偏压侧的中部位置。细观均匀化模型损伤分布位置基本和细观模型基本相同,可较好地反映偏心柱混凝土损伤分布和破坏形式。

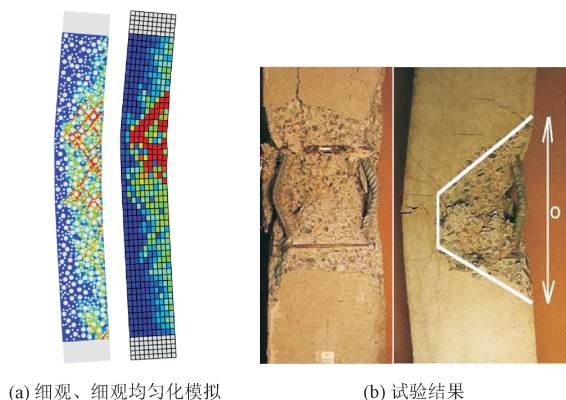


图11 圆形骨料混凝土偏心柱破坏模式

Fig. 11 Failure modes of eccentric columns made of circular aggregate concrete

3.1.3 荷载-柱中挠度曲线

图12为其对应的荷载-柱中挠度曲线对比。细观模型峰值荷载为 $F_0 = 1\,021.3\text{ kN}$,对应柱中挠度为 $l_0 = 2.77\text{ mm}$ 。细观均匀化模型峰值荷载为 $F_1 = 1\,023.4\text{ kN}$,对应柱中挠度为 $l_1 = 2.83\text{ mm}$ 。参考试验峰值荷载为 $F = 1\,007.0\text{ kN}$,对应柱中挠度为 $l = 2.71\text{ mm}$ 。结果相差不超过5%,模拟结果与试验结

果吻合良好。细观和细观均匀化模拟曲线在弹性阶段基本重合。在弹塑性阶段,细观均匀化模型的弹性模量损伤速率较慢,这是由于规整的长方形网格划分,应力水平较为平均。因此,细观均匀化模型的承载力也略高于细观模型。在下降段,细观均匀化模型明显比细观模型承载力下降更快,这是由于均匀化网格均采用塑性损伤本构描述其材料属性,不存在弹性的骨料部分,使损伤较细观模型更为集中。

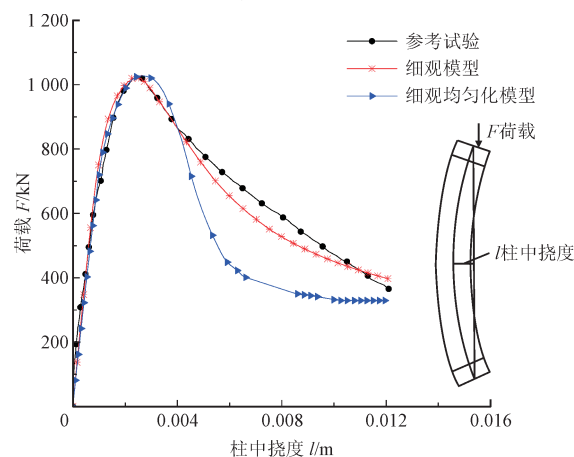


图12 圆形骨料细观模型、均匀化模型荷载-柱中挠度曲线

Fig. 12 Load-column deflection curve of circular aggregate meso-model and homogenization model

3.2 细观及对应均匀化模型的对比分析

图13为3个圆形骨料随机分布的细观模型和细观均匀化模型压缩损伤分布对比。由细观模型的压缩损伤分布可知,塑性损伤集中分布位置基本相同,最终破坏形式皆为混凝土柱偏压侧压碎破坏。因骨料的不同分布导致损伤位置出现偏移,模型a损伤位置明显较高;模型b损伤位置正位于偏压侧中部;模型c损伤位置上下均有,各模型损伤分布位置明显不同。经分析,这是因骨料间距差异导致,骨料间距越小的区域更容易形成“骨料-砂浆-骨料”的应力传递路线。因此,骨料的随机分布对偏心柱压缩损伤的分布位置存在较大的影响。由于均匀化方法实质上对等效单元内骨料、砂浆的弹性模量和强度进行了“平均化”处理。细观均匀化模型中高应力的“骨料”区域减少,低应力的“砂浆”区域增多,使细观模型中的部分压缩损伤未能在细观均匀化模型当中显示。其次,由于细观均匀化模型不存在弹性骨料,均通过塑性损伤本构模型描述其力学性能,在受力过程中更容易存在损伤集中,使损伤分布出现差异。

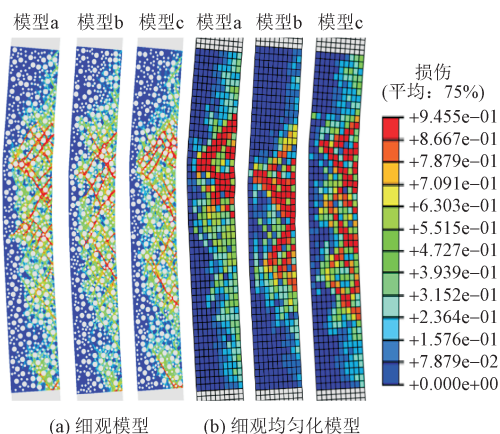


图 13 随机分布的圆形骨料偏心柱模型的压缩损伤分布

Fig. 13 Compressive damage distribution of eccentric circular aggregate column model with different distribution

图 14 为 3 组圆形骨料随机分布的细观模型和细观均匀化模型的荷载与柱中挠度关系曲线。由图 14 可知, 3 组细观模型的模拟曲线变化幅度较小, 曲线上升段与试验曲线吻合良好。细观模型 a 的荷载峰值与试验值接近, 细观模型 b 和模型 c 荷载峰值较小。在偏心受压状态下, 柱高应力区域一般出现在偏压侧, 偏心侧骨料间距较小区域容易出现密集的应力传递路线。当应力增大到一定程度时, 这些“密集”区域会率先出现损伤, 损伤越多、越密集的偏心柱承载力越大。

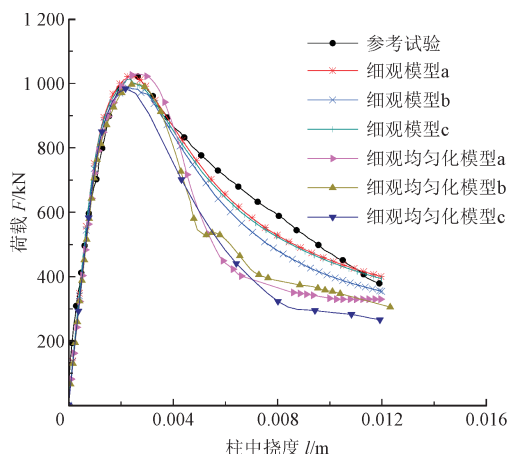


图 14 圆形骨料不同分布偏心柱模型的荷载-柱中挠度曲线

Fig. 14 Load-deflection curve of eccentric column model with different distribution of circular aggregate

3.3 骨料形状对偏心柱力学性能的影响

图 15 为由 3 组混凝土柱随机骨料模型所建立的圆形、椭圆形、多边形骨料钢筋混凝土柱细观模型和细观均匀化模型偏心压缩的塑性损伤分布对比。由偏心柱细观模型损伤分布可知, 圆形、椭圆形、多

边形骨料柱整体损伤分布形状大致相同, 基本排除骨料的不同分布带来的影响。因骨料的不同形状, 使应力的传递形式出现差异, 导致损伤分布存在细微的差别。相比圆形与椭圆形骨料, 多边形骨料在偏心力传递中容易在骨料边角点出现应力集中, 损伤的发展路径往往在多边形骨料的尖角处间展开, 使损伤分布基本呈直线延伸, 且容易贯通。相比圆形骨料, 椭圆形骨料则有 2 种传力方式: 一是偏心力向椭圆骨料长边作用, 长边承受作用力较大, 短边承受作用力较小, 主要呈现为椭圆骨料长边两侧的压缩损伤; 二是偏心力面向短边, 短边承受作用力较大, 长边作用力较小, 主要呈现为椭圆骨料短边两侧的压缩损伤。因此, 椭圆形骨料模型的损伤分布较圆形骨料模型更加零碎, 能在骨料周围形成交叉损伤。从细观模型上看, 骨料的形状对钢筋混凝土柱偏心压缩整体损伤分布形状并无明显的影响, 由于应力的传递方式的差异, 使损伤分布存在细微的差别。

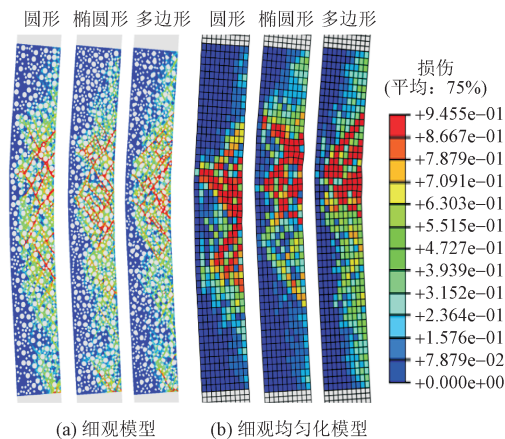


图 15 骨料不同形状偏心柱模型的压缩损伤分布

Fig. 15 Compression damage distribution of eccentric column models with different shapes of aggregate

单纯由细观均匀化模型的压缩损伤分布, 难以得出骨料形状对钢筋混凝土柱偏心受压的力学性能的影响。经分析, 主要存在 2 个原因: 一个是由于均匀化方法是以网格中骨料、砂浆的面积百分数为变量, 细观上不同的骨料形状对等效网格中骨料、砂浆所占面积百分数并无太大影响, 导致细观均匀化模型对骨料形状方面研究并不理想; 另一个是由于细观均匀化模型的网格形状为规整的正方形或长方形, 即使存在强度和弹性模型较大单元, 也无法表示骨料的形状, 只能考虑正方形或长方形骨料对钢筋混凝土柱偏心受压力学性能的影响。综合 2 个方面的原因, 可知通过细观均匀化模型研究骨料形状对

钢筋混凝土柱偏心受压力学性能的影响存在一定的局限性。

图16为其对应的荷载-柱中挠度曲线,细观均匀化模型峰值荷载略大于细观模型。从细观模拟结果可知,圆形与多边形骨料模型的荷载与柱中挠度关系曲线相近,椭圆形骨料模型模拟得出的荷载与柱中挠度关系曲线荷载峰值稍大。由于不同的骨料形状影响了应力的作用与传递方式,从宏观力学性能的角度印证了上述的压缩损伤分析。

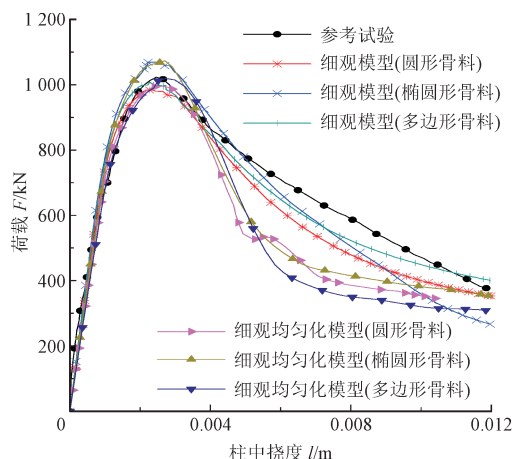


图16 骨料不同形状偏心柱模型的荷载-柱中挠度曲线

Fig. 16 Load-deflection curve of eccentric column model with different aggregate shapes

3.4 计算量对比

表5为混凝土柱细观模型和细观均匀化模型计算量对比,两者网格、节点和自由度个数比值约为1:110。偏心柱细观模型在通过均匀化处理后,大幅减少了模型网格单元、节点和自由度个数,使细观均匀化模型节省计算空间、提高计算效率。

表5 偏心柱有限元计算量

Tab. 5 Finite element calculation of eccentric column

模型类型	模型尺寸	网格尺寸	网格 个数	节点 个数	自由度 个数
细观模型	960 mm × 150 mm	2 mm	61 265	55 073	165 219
细观均匀 化模型	960 mm × 150 mm	20 mm × 15 mm	480	484	1 452

4 结 论

本研究通过细观数值模拟和细观均匀化数值模拟,主要得出结论如下。

1) 细观模型和细观均匀化模型均能有效反映偏心柱的宏观力学性能与细观损伤分布。

2) 细观模型和细观均匀化模型均能较好地反映骨料的随机分布对偏心柱力学行为的影响。骨料的随机分布通过改变骨料间距,影响偏心柱的宏观力学性能和细观损伤的分布。

3) 相比细观模型,偏心柱细观均匀化模型因网格较大,且均为弹塑性本构,对骨料形状敏感性较差。骨料形状通过改变应力作用路线和方式,影响偏心柱的宏观力学性能和细观损伤的分布。其中,椭圆形骨料模型承载能力较大,圆形、多边形骨料模型承载能力较小。

4) 二维细观模型网格单元、节点和自由度个数约为细观均匀化模型的110倍,细观均匀化模型极大的节省了计算空间、提高了计算效率。

参考文献:

- [1] SCHLANGEN E, GARBOCZI E J. Fracture simulations of concrete using lattice models: computational aspects [J]. Engineering fracture mechanics, 1997, 57(2/3): 319-332.
- [2] BAŽANT Z P, TABBARA M R, KAZEMI M T, et al. Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites [J]. Journal of engineering mechanics, 1990, 116(8): 1686-1705.
- [3] 彭一江, 黎保琨, 刘斌. 碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J]. 水利学报, 2001, 32(6): 19-22.
PENG Yijiang, LI Baokun, LIU Bin. Numerical simulation of meso-level mechanical properties of roller compacted concrete [J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 32(6): 19-22 (in Chinese).
- [4] 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): 84-89.
LIU Guangting, WANG Zongmin. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model [J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 1996, 36(1): 84-89 (in Chinese).
- [5] 高政国, 刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 710-714.
GAO Zhengguo, LIU Guangting. Two-dimensional random aggregate structure for concrete [J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2003, 43(5): 710-714 (in Chinese).
- [6] 马怀发, 聿书贞, 陈厚群. 一种混凝土随机凸多边形骨料模型生成方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 196-201.
MA Huaifa, MI Shuzhen, CHEN Houqun. A generating approach of random convex polygon aggregate model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(3): 196-201 (in Chinese).
- [7] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 662-667.

- DU Chengbin, SUN Ligu. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 37(6): 662-667 (in Chinese).
- [8] 彭一江, 黎保琨, 屈彦玲. 碾压混凝土层面抗剪强度的细观数值研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(3): 84-87.
- PENG Yijiang, LI Baokun, QU Yanling. Numerical study of the shear strength of matrix layer in rolled compact concrete on meso-level[J]. China safety science journal, 2004, 14(3): 84-87 (in Chinese).
- [9] 任朝军, 杜成斌, 戴春霞. 三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 177-180.
- REN Zhaojun, DU Chengbin, DAI Chunxia. Meso-structure numerical simulation of uniaxial failure of three-graded concrete[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2005, 33(2): 177-180 (in Chinese).
- [10] 马怀发, 陈厚群, 吴建平, 等. 大坝混凝土三维细观力学数值模型研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25(2): 241-247.
- MA Huaifa, CHEN Houqun, WU Jianping, et al. Study on numerical algorithm of 3D meso-mechanics model of dam concrete[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2008, 25(2): 241-247 (in Chinese).
- [11] 党发宁, 韩文涛, 郑娅娜, 等. 混凝土破裂过程的三维数值模型[J]. 计算力学学报, 2007, 24(6): 829-833.
- DANG Faning, HAN Wentao, ZHENG Yana, et al. 3D numerical simulation of failure process of concrete[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2007, 24(6): 829-833 (in Chinese).
- [12] 李冬, 金浏, 杜修力. 钢筋混凝土柱轴心受压性能及尺寸效应的细观数值研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 209-218.
- LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli. Mesoscopic simulation of the mechanical properties and the size effect of reinforced concrete column subjected to axial compressive loading[J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 47(2): 209-218 (in Chinese).
- [13] 金浏, 杜修力. 钢筋混凝土构件细观数值模拟分析[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1230-1236.
- JIN Liu, DU Xiuli. Meso numerical simulation of reinforced concrete members[J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 43(10): 1230-1236 (in Chinese).
- [14] 杜修力, 卢爱贞, 赵均. 小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 1-7.
- DU Xiuli, LU Aizhen, ZHAO Jun. Experiment on size effect of small eccentric reinforced concrete columns under compressive loads[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2015, 32(1): 1-7 (in Chinese).
- [15] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 钢筋混凝土柱偏心受压力学性能的细观数值研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 65-72.
- LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli, et al. Mesoscopic simulation of the global mechanical properties of reinforced concrete column subjected to eccentric compressive loading[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(7): 65-72 (in Chinese).
- [16] CHEN H B, MASUD M, SAWAB J, et al. Multiscale analysis of non-contact splices at drilled shaft to bridge column interface[J]. Engineering structures, 2018, 176: 28-40.
- [17] CHEN H B, MASUD M, SAWAB J, et al. Parametric study on the non-contact splices at drilled shaft to bridge column interface based on multiscale modeling approach[J]. Engineering structures, 2019, 180: 400-418.
- [18] 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.
- [19] 王江, 许斌, 陈洪兵. 混凝土受拉性能多尺度均匀化数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 538-546.
- WANG Jiang, XU Bin, CHEN Hongbing. Numerical simulation of the tensile behavior of concrete using multi-scale homogenization approach[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(3): 538-546 (in Chinese).
- [20] NĚMEČEK J, PADEVĚT P, PATZÁK B, et al. Effect of transversal reinforcement in normal and high strength concrete columns[J]. Materials and structures, 2005, 38(7): 665-671.
- [21] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elastoplasticity[C]//Physical Non-Linearities in Structural Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981: 237-244.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 59(2): 67-143.
- [24] WALRAVEN J C, REINHARDT H W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. Heron, 1981, 26(1A): 1-68.

(编辑 李坤璐)