

任意多边形骨料混凝土细观模型的建立与数值模拟

义扬,肖映雄*,余科

(湘潭大学机械工程与力学学院,湖南湘潭411105)

摘要:基于Python-ABAQUS二次开发平台,设计了建立任意多边形混凝土细观结构模型的算法,实现骨料分布、粒径、边数、凹凸性、直曲性的全随机生成;利用布尔运算,实现骨料界面过渡区的快速生成,提出一种适用于任何基体区域形状和骨料形态的算法,可以快速完成骨料投放过程中骨料与基体的位置关系判断以及骨料与骨料之间的侵入判断。在所建模型的基础上,采用CDP(concrete damaged plasticity)模型,研究混凝土静态下的应力-应变关系与细观破坏特征,进一步验证该模型在数值模拟混凝土力学性能方面的可靠性,对于分析不同荷载作用下混凝土的失效机理具有重要意义。

关键词:多边形骨料;细观随机模型;布尔运算;CDP模型;数值模拟

中图分类号:TU528;O39 **文献标志码:**A

引用格式:义扬,肖映雄,余科.任意多边形骨料混凝土细观模型的建立与数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):97-107.

YI Yang, XIAO Yingxiong, YU Ke. Establishment and numerical simulation of mesoscopic models of concrete with arbitrary polygonal aggregates[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):97-107.

Establishment and numerical simulation of mesoscopic models of concrete with arbitrary polygonal aggregates

YI Yang, XIAO Yingxiong*, YU Ke

(School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract: Based on the Python-ABAQUS framework, a modeling method that constructed a two-dimensional microstructural model for arbitrary polygonal aggregate concrete was developed. This resulting method enabled the full random generation of aggregate distributions, particle sizes, numbers of sides, convexity and curvature, and straight or curved edges. By utilizing Boolean operations, a fast generation of the interfacial transition zones (ITZs) was then achieved, and an algorithm suitable for any shape and morphology of the matrix region was proposed to quickly determine the positional relationship between aggregates and the matrix during the placement process as well as to quickly finish the intrusion judgment between aggregates. Based on the mesoscopic models, we numerically studied the stress-strain relationship and microscopic failure characteristics of concrete under static conditions by using the CDP (concrete damaged plasticity) model. The reliability of the resulting models in simulating the mechanical properties of concrete was further proved. This was of great significance for analyzing the failure mechanism of concrete under different loads.

Keywords: polygon aggregate; mesoscopic stochastic model; Boolean operation; CDP model; numerical simulation

0 引言

混凝土在细观上可看作是由骨料、砂浆及两者之间的界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)组合而成的复合材料,其中骨料的体积分数、形状、空间分布及界面层对其宏观性能影响很大。建立

能反映骨料实际形态及体积分数的细观随机模型是进行混凝土细观力学模拟的前提和基础。当前,细观结构建模方法主要有2种,一种是通过几何重构算法将捕获的数字图像转换为骨料模型^[1-3],能较真实地反映骨料形态,但其建模精度受到设备精度的限制,且单次只能产生一个模型,计算成本较高^[4];另一种是参数化建模方法,基于蒙特卡罗随

收稿日期:2023-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972191);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30569)

第一作者简介:义扬(1999—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为非均质材料数值模拟。E-mail: sylvanas4526@163.com

*通信作者简介:肖映雄(1970—),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为计算固体力学。E-mail: xyx610xyx@xtu.edu.cn

机抽样原理,控制算法生成几何模型^[5-9],由于实现成本较低,广泛应用于细观结构模型的建立。

受限于网格质量及计算规模,本研究仅考虑二维细观随机模型的建立。对二维问题,一般采用任意多边形模拟更真实的骨料形态。任意多边形的生成方法主要有2种:一是基于圆、椭圆的内接多边形^[10-12]或三角形、四边形骨料基^[13-14],向外延拓得到任意多边形,不足之处在于高度依赖其他图形,且仅能生成凸多边形;二是通过控制半径与方位角随机生成极坐标,连接顶点生成多边形^[15],比方法一更具灵活性与随机性,因此本研究选用方法二生成任意多边形。将骨料成功投放到基体区域需满足2个基本条件:一是骨料完全位于基体区域内,通常根据基体区域的几何特征增加坐标限制条件,直接生成内部的位置坐标,但当基体形状较不规则时,实现算法较复杂;二是骨料之间不得相交,针对不规则多边形的相交判别方法有基于外接图形的距离判断法^[16-17]、面积检测算法^[18-19]、夹角之和测试法^[20]等方法,但其算法的实现思路与过程较为复杂。此外,界面层也是混凝土的重要组成部分,针对此过渡区域,文献^[21]采用网格投影法,避免了网格划分的复杂性,但易导致界面边缘呈齿状,偏离实际;文献^[22-23]采用零厚度黏结单元表征界面层,但忽略了界面层存在一定的实体厚度,与实际情况不符。同时,已有方法大多建立在 Matlab^[24-26]、Fortran^[8-9]、C++^[6]等语言的开发上,这些语言不具备定义材料属性、划分网格等功能,仍需将模型导入有限元软件中进行分析,多软件的联动配合在实际研究中存在诸多不便。

建立混凝土细观模型,有助于建立其细观组成与宏观力学性能之间的跨尺度关联^[27]。文献^[28]通过数值模拟验证了基于余能原理的边界元法可以用于混凝土单轴受压力学性能的研究,并分析了砂浆、ITZ中孔隙率对混凝土抗压强度与破坏形态的影响;文献^[19]结合化学-热耦合效应,模拟了早龄期混凝土温度场和水化程度的分布特征,分析了骨料级配、边界条件、骨料形状和预冷措施对混凝土水化过程的影响;文献^[29]基于相场法对三点弯曲试验和四点弯曲试验进行了数值模拟,研究了骨料体积分数、尺寸和主轴方向等因素对混凝土峰值强度和破坏模式的影响。

本研究基于 Python-ABAQUS 二次开发平台,设计了基于随机凹凸多边形骨料的混凝土细观模

型算法,实现骨料分布、粒径、边数、凹凸性、直曲性的全随机生成,可更大程度地满足骨料的随机性要求;基于布尔运算,实现了具有一定厚度的骨料界面层的快速生成,并提出一种适用于任何基体区域形状和骨料形态的算法,快速完成投放过程中骨料与基体的位置关系判断以及骨料与骨料之间的侵入判断,避免了传统方法中的复杂数学运算,在保证逻辑思路简洁明了与程序所需代码量较少的基础上,大幅提高建模效率和骨料体积分数;基于上述方法所建立的细观模型,采用 CDP (concrete damaged plasticity) 模型,通过3个算例研究混凝土静态下的应力-应变关系与细观破坏特征,进一步验证该模型能够合理体现混凝土的破坏形态,在数值模拟混凝土力学性能方面具有可靠性与适应性。

1 建立混凝土全参数细观随机模型

在对混凝土材料进行相关力学性能分析时,首先需要建立细观几何模型,包括骨料、砂浆基体及界面层的生成。为了更加真实地反映混凝土的细观结构,在建立模型时需实现骨料分布、粒径、边数、凹凸性、直曲性的随机生成,其中,骨料形态控制以及侵入判断准则是研究的重点。

1.1 骨料生成

实际工程中,混凝土骨料分为较圆润的卵石骨料和多棱角的碎石骨料^[30],在进行数值模型建立时,需对其形状作适当的简化处理,本研究选用不规则多边形近似代替骨料。通过以下步骤可生成一个任意多边形骨料。

(1) 确定骨料粒径。利用 $\text{Random}()$ 函数生成 $(0, 1)$ 内的随机数,确定相应范围内的骨料粒径。例如,在生成位于 (D_{\min}, D_{\max}) 内的骨料粒径时,计算公式为

$$D = D_{\min} + (D_{\max} - D_{\min}) \times \text{Random}(0, 1) \quad (1)$$

(2) 确定方位角。利用 $\text{Random}()$ 函数生成 $(0, 2\pi)$ 内的随机数,从而确定骨料每个顶点的方位角角度。

(3) 确定畸形度。为避免生成过于畸形的多边形骨料,引入畸形度参数 η 。经过测试可知, η 越大,生成图形越趋近于规则图形; η 越小,则图形畸形度越大;当 η 取值 $0.5 \sim 0.7$ 时,能获得更接近于实际骨料形状的多边形。 η 取不同值时相应多边形的形状如图1所示。

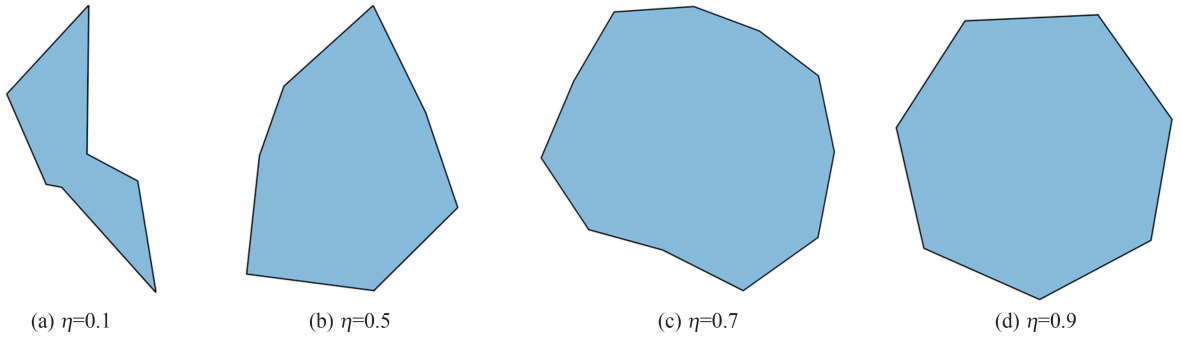


图 1 不同畸形度参数下的直边多边形

Fig.1 Straight sided polygons under different deformity parameters

(4) 确定顶点。根据骨料粒径与方位角,可得到多边形各顶点坐标 $P_i(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, L$, 其分量可表示为

$$\begin{cases} x_i = \eta r_i \cos(\theta_i + \frac{i}{L} 2\pi) \\ y_i = \eta r_i \sin(\theta_i + \frac{i}{L} 2\pi) \end{cases}, \quad \eta \in (0, 1), \quad (2)$$

式中: r_i 为粒径; θ_i 为顶点方位角; L 为顶点个数, 即多边形边数; η 为畸形度参数, 通过调整各顶点坐标实现对骨料形态的改变, 是经过试算得到的经验取值。不同畸形度参数下的直边六边形如图 2 所示, 图 2 体现了不同取值对图形形态的影响。

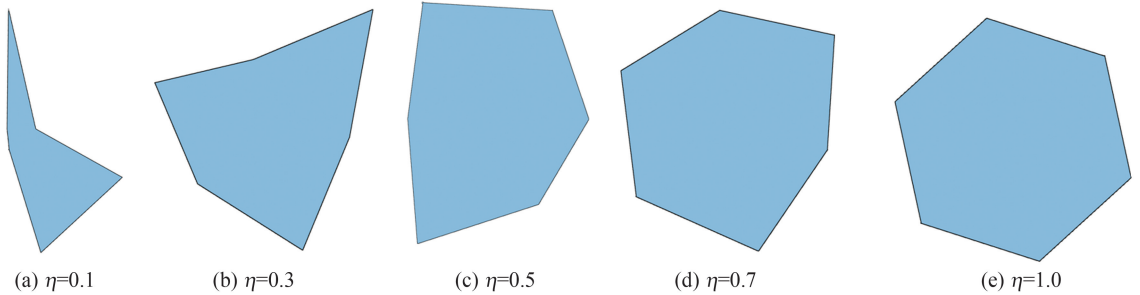


图 2 不同畸形度参数下的六边形

Fig.2 Hexagons under different deformity parameters

(5) 生成骨料。ABAQUS 中, 对一组给定点, Line() 函数可实现点与点之间直线的创建, Spline() 函数可创建 1 条经过给定点的光滑样条曲线, 因此, 通过调用 Line() 函数与 Spline() 函数, 以第 1 个顶点 P_1 为起点, 依次连接已生成的各个顶点, 即可实现对骨料直边与曲边的控制。由于骨料的各顶点坐标是随机生成, 因此连接顶点后相邻两边的位置关系也具有随机性, 可自然实

现骨料形态的凹凸。

骨料生成完毕后, 调用 Getsize() 函数计算该图形面积, 将其计入当前已生成骨料的体分(面积)比, 并判断是否已达到该粒径范围内所对应的体分比。满足要求后, 进入下一循环生成其他粒径范围内的骨料模型, 直到全部生成完毕, 相应的流程如图 3 所示。

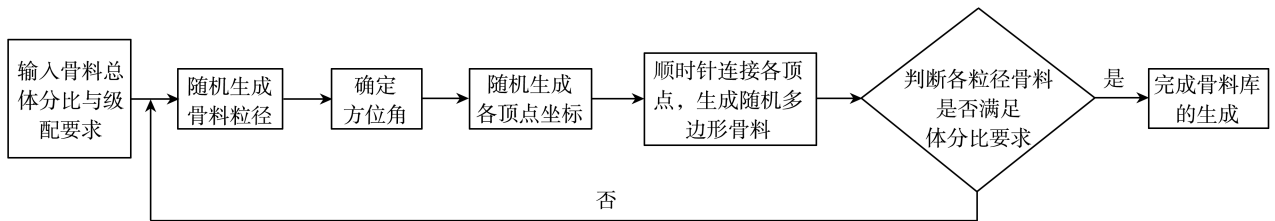


图 3 骨料库建立流程图

Fig.3 Flow chart of aggregate library establishment

1.2 界面层的生成

利用 ABAQUS 的部件复制功能, 对已生成的骨

料进行等比缩放, 令缩放体与原骨料模型进行布尔差运算, 得到独立的界面层实体模型, 如图 4 所示。

试验表明,界面层的厚度一般为 $15 \sim 50 \mu\text{m}$ ^[31]。文献[32]的研究表明,当界面层厚度在 $100 \sim 800 \mu\text{m}$ 时,对于混凝土宏观力学响应的影响轻微。因此,本研究选取 $100 \sim 500 \mu\text{m}$ 界面层厚度,当骨料粒径为 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 时,其对应的缩放系数为 $[1 - 0.5/R_{\max}, 1 - 0.1/R_{\min}]$,据此,给出不同粒径范围内部件缩放系数的建议取值区间,如表1所示。

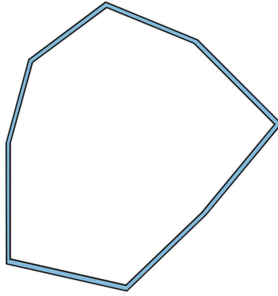


图4 ITZ 实体模型
Fig.4 The entity model of ITZ

表1 不同粒径骨料缩放系数

Table 1 Scaling coefficients of aggregates with different sizes

骨料粒径/mm	缩放系数
5~10	0.950 0~0.980 0
10~20	0.975 0~0.990 0
20~40	0.987 5~0.995 0
40~60	0.991 5~0.997 5
60~80	0.993 7~0.998 3
80~120	0.995 8~0.998 7
120~150	0.996 6~0.999 1

1.3 骨料的相交判别及投放

利用循环程序投放已生成的骨料,具体思路如下。

(1)骨料排序。为提高骨料投放的成功率,根

据粒径大小,将库中模型由大至小重新排序编号。

(2)确定骨料位置。随机生成骨料初始位置坐标的公式为

$$\begin{cases} x_{i0} = x_{\min} + D/2 \times (x_{\max} - x_{\min} - 2 \times D/2) \times \text{Random}(0, 1) \\ y_{i0} = y_{\min} + D/2 \times (y_{\max} - y_{\min} - 2 \times D/2) \times \text{Random}(0, 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_{\min} 、 x_{\max} 和 y_{\min} 、 y_{\max} 分别为混凝土试件区域的最小、最大边界坐标值。

(3)判别骨料是否在基体内部。由于 ABAQUS 软件中内置布尔操作,直接调用 BooleanMerge 命令,合并基体与被投放至指定位置的新骨料,基体与骨料的几种位置关系与合并结果如图5所示。

合并完成后,调用 Getsize() 函数计算基体初始面积 S_0 与合并后新图形的面积 S_{new} ,若 $S_0 = S_{\text{new}}$,则骨料位于基体内部;否则,骨料位置不满足投放要求,重复前置步骤,按照新坐标与角度重新进行投放。

(4)判别骨料是否相交。调用 BooleanCut 命令,以被投放至指定位置的新骨料为剪切体,域中已成功投放的骨料集合为被剪切对象,骨料投放如图6所示,执行剪切操作。

由图6可知,若剪切指令运行成功,则证明新骨料与域中已有骨料存在相交情况,投放失败,如图6(a)所示,重复前置步骤,按照新坐标与角度重新进行投放;若剪切指令运行失败,则证明新投放骨料与域中已有骨料不存在相交情况,投放成功,存储其位置坐标、旋转角度与粒径信息,并与骨料集合进行布尔合并,作为下一次判断的被剪切对象,如图6(b)所示。

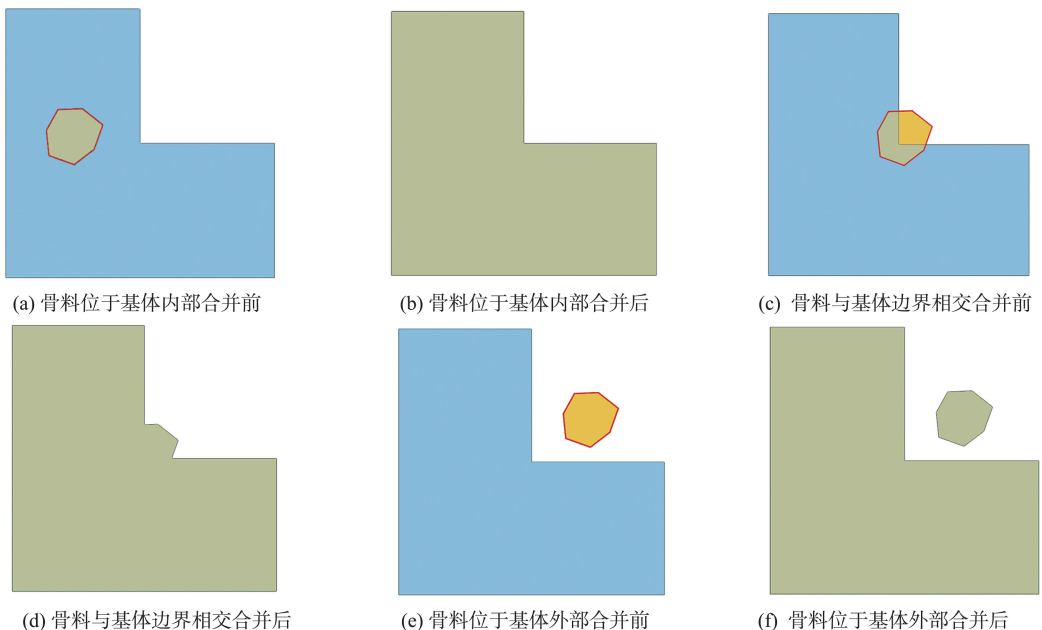


图5 基体与骨料的位置关系与合并结果

Fig.5 The position of specimen and aggregate and the Boolean merging results

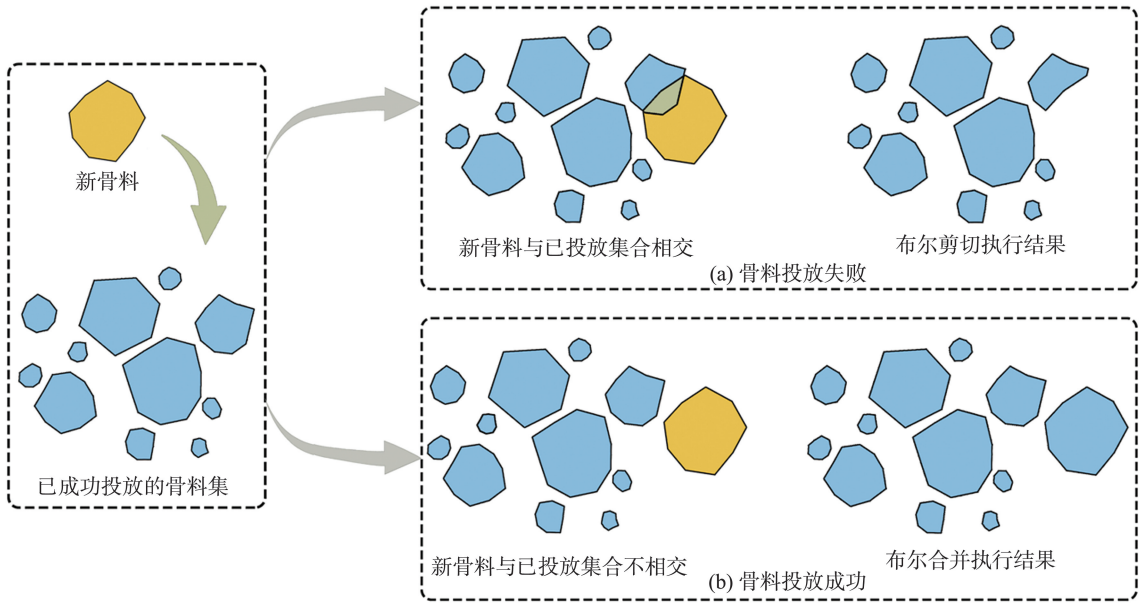


图 6 骨料投放

Fig.6 Aggregate particle placing

重复执行上述 4 个步骤,直到将骨料库中的全部骨料成功投放至基体区域中,骨料随机投放的流程图如图 7 所示。

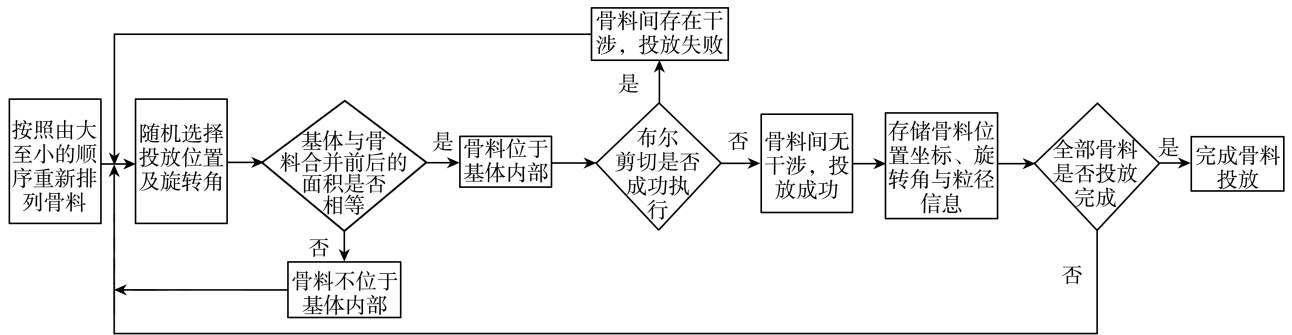


图 7 骨料投放流程图

Fig.7 Flow chart of aggregate placing

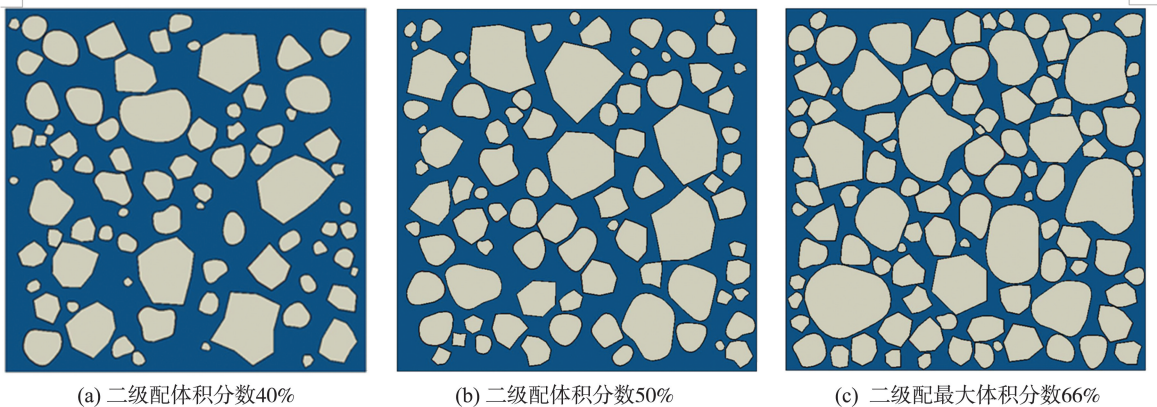
1.4 微观随机模型实例

利用上述方法,可以生成给定混凝土试件的微观结构模型。

1.4.1 正方形试件

对正方形试件,基于上述方法,可生成二级配、

三级配和四级配下不同多边形骨料体积分数的混凝土微观结构模型,如图 8 所示,其中,各级配对应的试件尺寸分别为 150 mm×150 mm、250 mm×250 mm和 450 mm×450 mm。



(a) 二级配体积分数40%

(b) 二级配体积分数50%

(c) 二级配最大体积分数66%

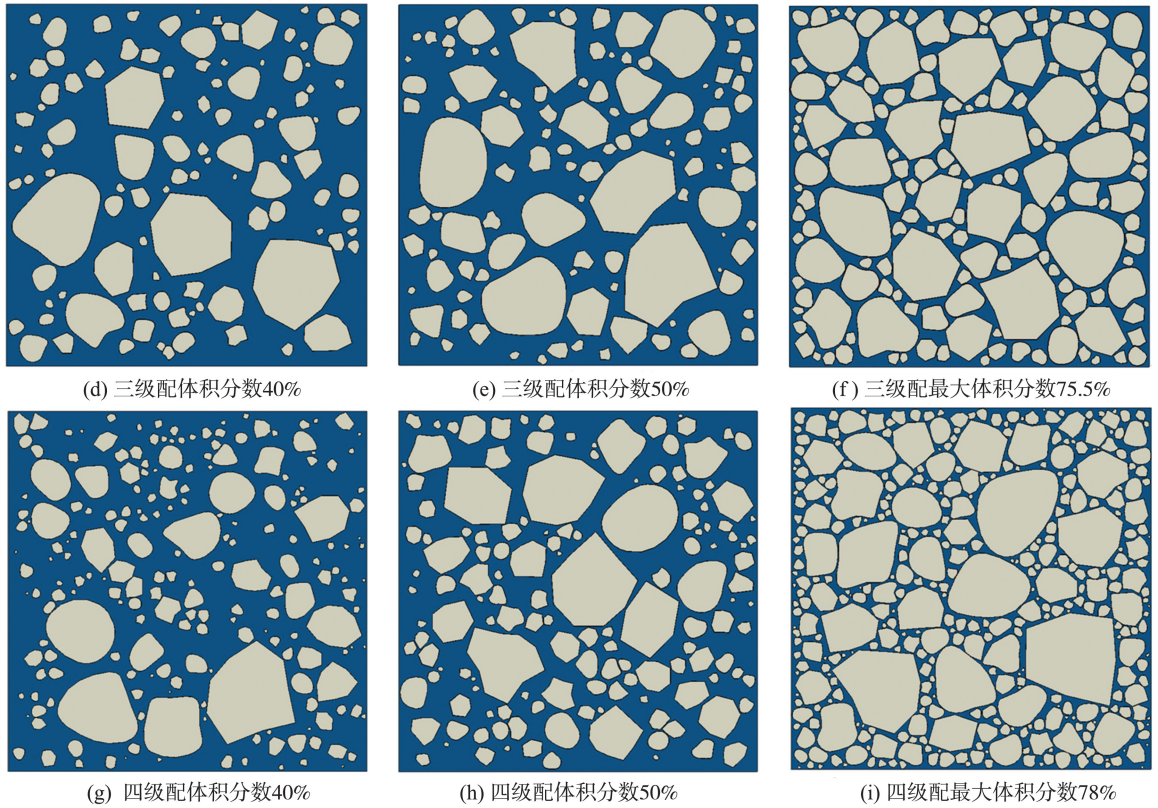


图8 各级配下不同多边形骨料体积分数的混凝土细观模型

Fig.8 Mesoscopic model of concrete with different polygonal aggregate contents under several gradations

1.4.2 其他试件

基于上述方法可以生成其他类型试件(如L形试件、凸形线框等)的细观结构模型。几种典型试件的混凝土细观结构模型如图9所示。骨料体积分数为50%,均采用二级配。

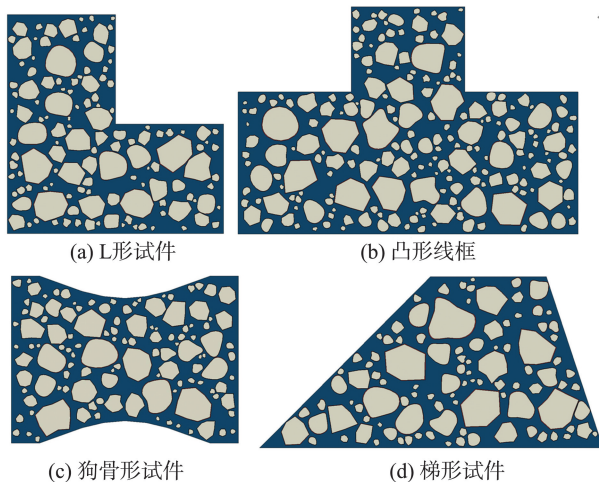


图9 不同试件形状的混凝土细观模型

Fig.9 Mesoscopic model of concrete with different specimen shapes

由此可见,利用本研究方法生成的混凝土细观随机模型,其骨料大小、形状、方位和空间分布均满足随机性要求,所提出的骨料相交判别算法逻辑简洁明了,易于实现,且适用于任意形状的试件。同

时,基于此种方法获得的细观结构模型,其骨料、界面层及基体已自动分离开来,便于后续材料属性的赋予及有限元网格剖分。

运用 Python 语言编制混凝土细观结构模型随机生成程序,可绕过繁琐的 GUI 操作,直接操纵 ABAQUS 内核,实现混凝土细观建模的自动化处理,充分发挥了 Python 脚本可多次重复、局部修改试算的优越性,提高了混凝土细观结构模型的通用性,也为后续有限元网格剖分及数值计算与模拟打下了良好基础。

2 数值模拟及结果分析

为了验证本研究建立的混凝土细观结构模型的可靠性与适应性,基于 ABAQUS 中的 CDP 模型对混凝土试件进行数值模拟,试件中未考虑各相组成界面结合处的初始缺陷,将其视为理想界面。通过单轴拉伸数值模拟验证模型的可靠性,通过梁的三点弯曲以及 L 形试件的受拉开裂数值模拟验证模型的适应性。CDP 模型是一个连续的、基于塑性理论的混凝土材料损伤模型,能够解释在拉伸和压缩荷载作用下混凝土强度的不同演变过程^[33],具有较好的收敛性。

2.1 算例 1(单轴拉伸)

参考文献[32],采用几何尺寸为 150 mm × 150 mm 的二维模型,控制骨料形态为随机直边多边形,边数为 6~10,骨料体积分数为 51%,采用二级配。模拟中,由于细骨料(粒径小于 5 mm)的尺寸过小,若不经处理将导致计算规模过大,因此将其视作砂浆^[25]。由于粗骨料的强度远高于砂浆基体,当混凝土达到极限强度时,粗骨料仍处于弹性状态,因此可将粗骨料视为理想弹性体。对砂浆基体与 ITZ,采用 CDP 模型模拟其力学性能。各相材料参数取值^[32]如表 2 所示。

表 2 各相材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
粗骨料	55.5	0.16	
砂浆	26.0	0.22	3.0
界面层	25.0	0.16	2.0

单轴拉伸试件的有限元计算模型与相应的网格剖分示意图如图 10 所示。在模型底部施加位移约束,模型顶端施加竖直向上、大小为 0.01 mm 的位移载荷,如图 10(a)所示;采用三角形单元对微观结构模型进行网格划分,其中一个随机骨料模型的网格剖分示意图如图 10(b)所示,总单元为 19 652 个,其中骨料单元 5 728 个,砂浆单元 9 501 个,界面层单元 4 423 个。

由于骨料的生成与投放皆为随机过程,为消除随机性对结果的影响,保持各参数不变,生成 100 组随机骨料模型,在相同的加载及边界条件下进行数值模拟,并与文献[32]结果进行对比,100 组随机骨

料模型单轴抗拉数值模拟的应力-应变关系曲线带及其平均值曲线如图 11 所示,其中 3 组随机骨料模型的单轴受拉破坏结果如图 12 所示。

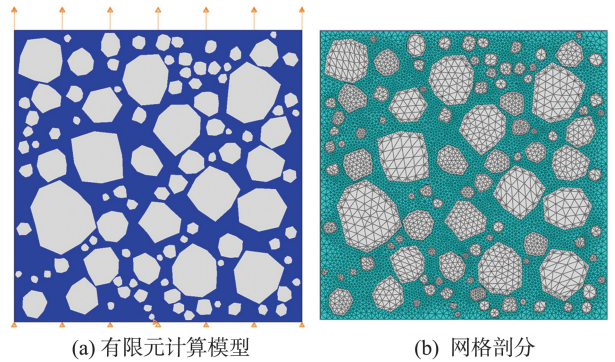


图 10 单轴拉伸试件的有限元计算模型与相应的网格剖分示意图

Fig.10 FEM model and mesh of uniaxial tensile specimen

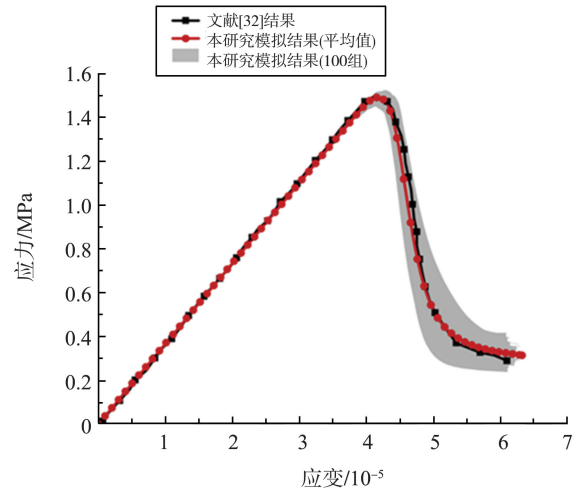


图 11 单轴拉伸应力-应变曲线

Fig.11 Uniaxial tensile stress-strain curves

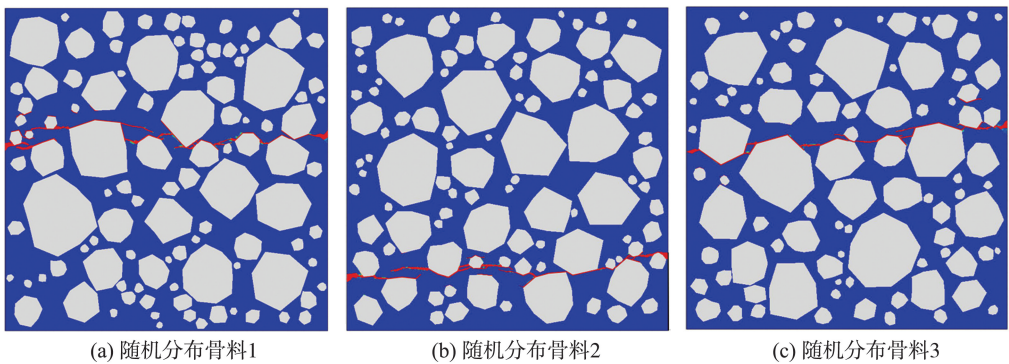


图 12 不同骨料分布的单轴受拉破坏结果

Fig.12 Failure patterns of specimens with different aggregate distribution

由图 11 中灰色曲线带可见,在弹性变形阶段,曲线分布较为集中,说明骨料的形态和分布差异对混凝土的弹性段影响不大,这与骨料体积分数一定时,复合材料有效弹性模量相对固定的均匀化理论相一致;而在达到极限强度之后,曲线分布较为分散,体现了混凝土损伤状态下对骨料微观特征的强

烈依赖性。图 11 中,均值曲线的应力峰值为 1.491 MPa,对应的应变峰值为 4.167×10^{-5} ;文献中应力峰值为 1.499 MPa,对应的应变峰值为 4.146×10^{-5} ,两者数值非常接近。总体来看,模拟结果与试验结果曲线趋势一致。

由图 12 可见,由于骨料分布不同,试件的开裂

部位与裂纹扩展路径也有所不同,但最终均形成了一条垂直于加载方向的、贯穿整个试件的横向裂纹。

2.2 算例 2(梁的三点弯曲)

参考文献[34],建立尺寸为 400 mm×100 mm

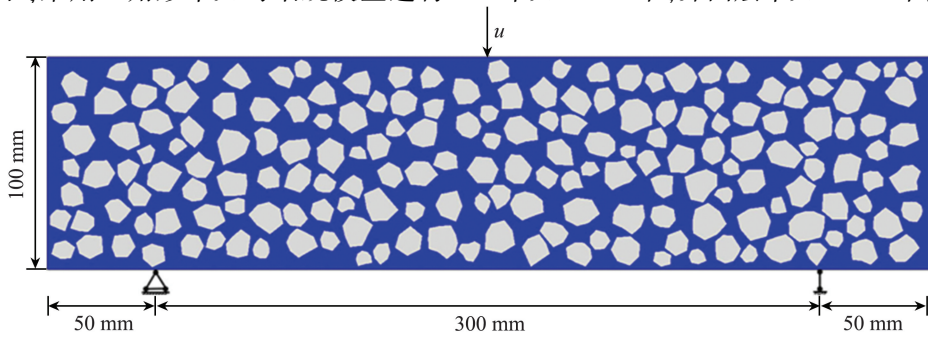
的模型,控制骨料形态为随机直边多边形,边数为 6~10,骨料粒径为 5~20 mm,骨料体积分数为 50%。粗骨料采用线弹性模型,砂浆基体与 ITZ 采用 CDP 模型,各相材料参数取值如表 3 所示^[34]。

表 3 各相材料参数
Table 3 Material parameters of ingredients on concrete

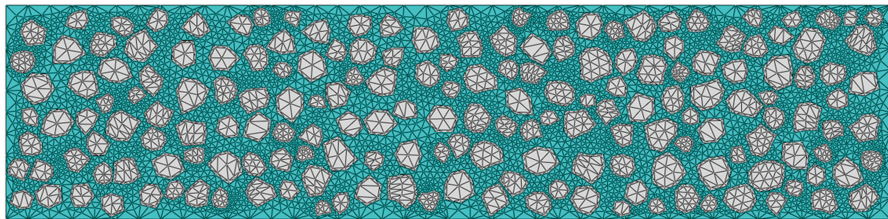
材料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	断裂能/(N·m ⁻¹)
粗骨料	50.00	0.2			
砂浆	25.00	0.2	2.00	26.0	120.0
界面层	18.75	0.2	1.68	19.5	80.4

梁的有限元计算模型与相应的网格剖分示意图如图 13 所示。为模型施加 0.2 mm 的位移载荷,如图 13(a)所示;采用三角形单元对细观模型进行

网格划分,模型的网格剖分示意图如图 13(b)所示,其单元总数为 18 024,其中骨料单元 6 102 个,砂浆单元 6 309 个,界面层单元 5 613 个。



(a) 有限元计算模型



(b) 网格剖分

图 13 梁的有限元计算模型与相应的网格剖分示意图

Fig.13 FEM model and mesh of beam

20 组模型的加载边界反力与加载位移关系曲线如图 14 所示,其中一组的三点弯曲破坏形态如图 15 所示。

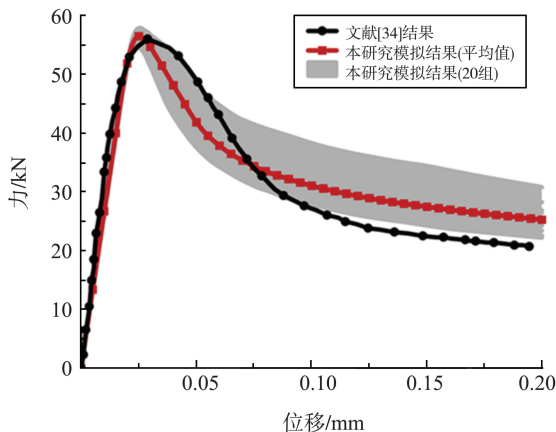


图 14 梁的加载边界反力-位移曲线

Fig.14 Reaction force-displacement curves of beams

由图 14 可见,在弹性阶段,曲线分布较为集中,均值曲线与文献[34]结果吻合良好;在达到峰值后,曲线则较为分散,这是混凝土损伤状态下对骨料细观特征强烈依赖性的体现,同时,骨料的形态与分布亦影响着裂纹走向,最终路径相对于加载点的偏离导致了模拟曲线与文献[34]的结果在软化段下降速率的差异。

由图 15 可见,细观损伤发生于梁底部的跨中部位,随着加载,沿竖直方向向试件内部延伸,最终形成了一条竖向宏观裂纹。受骨料形态与分布差异的影响,裂纹扩展路径与文献[34]有所不同,但总体来看,二者破坏模式基本一致。

2.3 算例 3(L 形试件受拉开裂)

建立 L 形试件,控制骨料形态为随机直边多边形,骨料边数、粒径、体分比及各相材料参数与算例 2 完全一致。L 形试件的有限元计算模型与相

应的网格剖分示意图如图 16 所示。施加 0.8 mm 的位移载荷,如图 16(a)所示;采用三角形单元对细观模型进行网格划分,模型的网格剖分示意图如

图 16(b)所示,其单元总数为 22 733 个,其中骨料单元 7 518 个,砂浆单元 8 281 个,界面层单元 6 934 个。

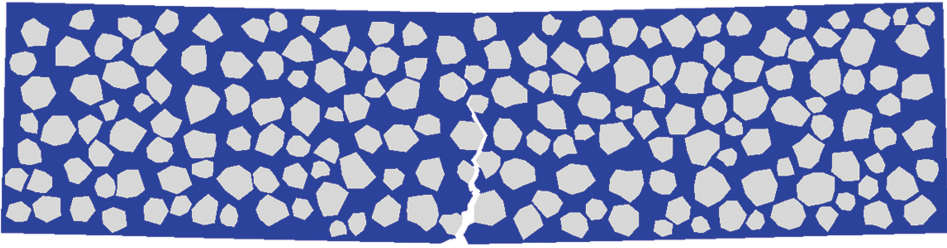


图 15 本方法得到的梁的破坏形态

Fig.15 Failure pattern of beam obtained in this paper

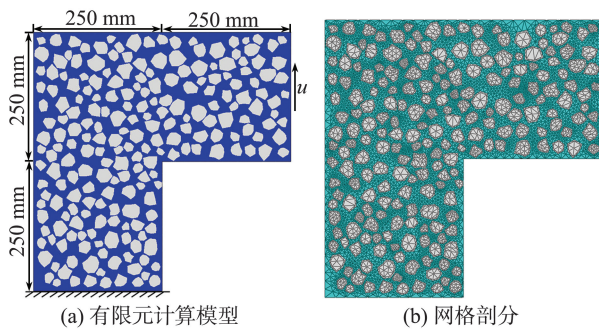


图 16 L 形试件的有限元计算模型与相应的网格剖分示意图
Fig.16 FEM model and mesh of L-shaped specimen

L 形试件的受拉破坏形态如图 17 所示,由于骨料形态与分布的差异,裂纹扩展路径与文献[34]有所不同,但总体来看,细观损伤均发生于 L 形试件的转角处,并沿水平偏上方向向试件内部扩展,最终形成了一条斜向宏观裂纹,二者具有一致的破坏模式。

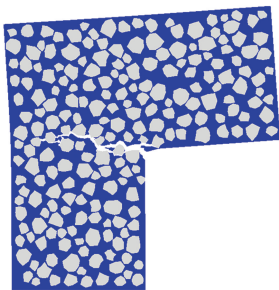


图 17 本方法得到的 L 形试件破坏形态
Fig.17 Failure pattern of L-shaped specimen obtained in this paper

综合以上算例,其结果验证了本研究建模算法得到的混凝土细观模型的可靠性与适应性。利用 Python 语言编写 ABAQUS 脚本,不仅快速建立了混凝土细观结构几何模型,而且快捷方便地实现了有限元网格剖分、材料属性定义、边界条件设置及相应非线性有限元求解的自动化处理,充分发挥了 Python 脚本多次重复、局部修改试算等优势,显著提高了工作效率。

3 结论

本研究基于 Python-ABAQUS 二次开发平台,对混凝土二维细观结构的参数化建模与数值模拟进行了研究,内容总结如下。

(1)利用 Python 语言编写脚本程序,实现了多边形骨料边数、凹凸性、直曲性 3 种形态要素的全随机生成;基于布尔运算,实现了骨料界面过渡区的快速生成,并提出一种适用于任何试件区域形状和骨料形态的算法,完成投放过程中骨料与基体的位置关系判断及骨料之间的侵入判断。最终得到的细观模型,其骨料大小、形状、方位和空间分布均满足随机性要求,骨料体积分数满足细观分析要求,且能满足任意试件区域的需要。

(2)对混凝土细观模型进行了单轴拉伸静态数值模拟,为消除随机性对结果的影响,提取 100 组模型的应力-应变曲线均值与文献[32]结果进行对比,验证了细观模型的可靠性。

(3)分别进行了混凝土 L 形试件受拉开裂与梁的三点弯曲数值模拟,通过与文献[34]结果对比分析,验证了细观模型的适应性。

本研究设计了任意多边形骨料混凝土的细观模型建立算法,并通过数值模拟验证了其可靠性与适应性。算法虽然是针对二维骨料细观随机模型,但推广到三维情形没有本质性的困难。另外,为适应实际应用中更为复杂的情况,如混凝土制备过程中产生于各相组成界面结合处的初始缺陷对骨料结石体力学性能的影响,仍需进行更广泛的数值模拟,这些将是今后进一步研究的内容。

参考文献:

[1] XU Wenjie, YUE Zhongqi, HU Ruilin. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-

- rock mixture using digital image processing based finite element method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 749-762.
- [2] YU Qinglei, LIU Hongyuan, YANG Tianhong, et al. 3D numerical study on fracture process of concrete with different ITZ properties using X-ray computerized tomography[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 145: 204-222.
- [3] 匡广平. 基于三维细观模型混凝土应变率效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
KUANG Guangping. Research on strain rate of concrete based on 3D meso-scale model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] 张煜航. 基于三维细观模型的混凝土损伤力学行为研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
ZHANG Yuhang. Investigation on the damage behavior of concrete based on 3D meso-scale modeling[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [5] XU Wenjie, ZHANG Haiyang, JIE Yuxin, et al. Generation of 3D random meso-structure of soil-rock mixture and its meso-structural mechanics based on numerical tests [J]. *Journal of Central South University*, 2015 (2): 619-630.
- [6] 王海礼, 石崇, 王盛年, 等. 多元混合介质骨料的随机构形生成方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊1): 2827-2834.
WANG Haili, SHI Chong, WANG Shengnian, et al. Method of random configuration generation for polybasic mixed medium and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Suppl.1): 2827-2834.
- [7] 喻江武, 苟志龙, 雷瑜, 等. 基于傅里叶逆变换的土石混合体模型生成研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(4): 7-15.
YU Jiangwu, GOU Zhilong, LEI Yu, et al. Inverse fourier transform-based study on generating model of soil-rock mixture[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(4): 7-15.
- [8] ZHANG Qiang, XU Weiya, LIU Qinya, et al. Numerical investigations on mechanical characteristics and failure mechanism of outwash deposits based on random eso-structures using discrete element method[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(12): 2894-2905.
- [9] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 土石混合体三维细观结构随机重构及其力学特性颗粒流数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(1): 60-69.
ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. 3D random reconstruction of meso-structure for soil-rock mixture and numerical simulation of its mechanical characteristics by particle flow code[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(1): 60-69.
- [10] 马怀发, 毕书贞, 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(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(3): 196-201.
- [11] 钟根全, 李丽娟, 刘锋, 等. 混凝土二维随机骨料的数值模拟[J]. *混凝土*, 2008(9): 70-73.
ZHONG Genquan, LI Lijuan, LIU Feng, et al. Numerical simulation of two-dimensional random aggregate in concrete[J]. *Concrete*, 2008(9): 70-73.
- [12] YAO Ling, REN Lixia, GONG Guoli, et al. Simulation of chloride diffusion in concrete based on a new mesoscopic numerical method[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1): 1-10.
- [13] 孙立国, 杜成斌, 戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005(3): 291-295.
SUN Ligu, DU Chengbin, DAI Chunxia. Numerical-simulation of random aggregate model for mass concrete [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005(3): 291-295.
- [14] 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(5): 710-714.
GAO Zhengguo, LIU Guangting. Two-dimensional random aggregate structure for concrete[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003(5): 710-714.
- [15] 胡大琳, 张立兴, 陈定市. 二维细观随机混凝土模型的建立和应用[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 53-63.
HU Dalin, ZHANG Lixing, CHEN Dingshi. Establishment and application of 2D mesoscopic stochastic concrete model [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(3): 53-63.
- [16] 芦焱. 基于细观力学的混凝土有限元分析与实验模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LU Yan. Finite element analysis and simulation of concrete experiment based on meso-mechanics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] 陈青青, 张煜航, 张杰, 等. 含孔隙混凝土二维细观建模方法研究[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(2): 182-194.
CHEN Qingqing, ZHANG Yuhang, ZHANG Jie, et al. Study on a 2D mesoscopic modeling method for concrete with voids [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41(2): 182-194.
- [18] WANG Shufang, ZHAI Xiaoliang, GAO Yangyang, et

- al. Establishment and application of stochastic mesoscopic concrete model [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022; 1-17.
- [19] ZHENG Zhishan, WEI Xiaosheng. Mesoscopic models and numerical simulations of the temperature field and hydration degree in early-age concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 266: 1-13.
- [20] 孙立国. 三级配(全级配)混凝土骨料形状数值模拟及其应用[D]. 南京:河海大学, 2005.
SUN Ligu. Numerical simulation of shape of aggregates of three-graded concrete (full-graded concrete) and application[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [21] 吴彰钰, 张锦华, 余红发, 等. 基于三维随机细观模型的珊瑚混凝土力学性能模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2518-2528.
WU Zhangyu, ZHANG Jinhua, YU Hongfa, et al. Numerical analysis on mechanical properties of coral aggregate concrete using 3D random mesoscale model [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2518-2528.
- [22] 杨贞军, 黄宇劫, 尧锋, 等. 基于粘结单元的三维随机细观混凝土离散断裂模拟[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 158-166.
YANG Zhenjun, HUANG Yujie, YAO Feng, et al. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a Python script in ABAQUS [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8): 158-166.
- [23] 张小飞, 田羽, 覃培, 等. 基于内聚力模型的含畸形骨料混凝土单轴受拉细观模拟研究[J]. *水力发电*, 2022, 48(5): 73-77.
ZHANG Xiaofei, TIAN Yu, QIN Pei, et al. Mesosimulation of uniaxial tension of concrete with deformed aggregate based on cohesive zone model [J]. *Water Power*, 2022, 48(5): 73-77.
- [24] WU Hao, LI Yongchang, QIN Fang, et al. Scaling effect of rigid projectile penetration into concrete target: 3D mesoscopic analyses [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 208: 506-524.
- [25] 张维伦. 混凝土失效破坏的三维细观力学模拟及分析[D]. 南京:东南大学, 2021.
ZHANG Weilun. Three-dimensional meso-mechanical simulation and analysis of concrete failure[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [26] 武亮, 王菁, 何修伟, 等. 多面体骨料大体积混凝土三维细观模型生成[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(4): 657-663.
- WU Liang, WANG Jing, HE Xiuwei, et al. Generation of 3-D mesoscale models for massive concrete with polyhedral aggregates [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(4): 657-663.
- [27] ZAITSEV Y B, WITTMANN F H. Simulation of crack propagation and failure of concrete [J]. *Materials and Structures*, 1981, 14(5): 357-365.
- [28] PENG Yijiang, SU Lanqing, ZHANG Lijuan, et al. Analysis of the effect of porosity in concrete under compression based on DIP technology [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(1): 1-13.
- [29] XIA Yang, WU Wenan, YANG Yongtao, et al. Mesoscopic study of concrete with random aggregate model using phase field method [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 310: 1-20.
- [30] 王兵. 基于声发射信息的混凝土损伤演化表征研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
WANG Bing. Study on damage evolution characterization of concrete based on acoustic emission information [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [31] KIM S M, AL-RUB R K A. Meso-Scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites [J]. *Cement & Concrete Research*, 2011, 41(3): 339-358.
- [32] 郑金城, 祝磊, 彭刚, 等. 基于细观力学的混凝土轴向抗拉性能数值模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2013, 46(2): 188-193.
ZHENG Jincheng, ZHU Lei, PENG Gang, et al. Numerical simulation of concrete axial tensile performance based on mesomechanics [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(2): 188-193.
- [33] QIN Xiangnan, GU Chongshi, SHAO Chenfei, et al. Numerical analysis of fracturing behavior in fully-graded concrete with oversized aggregates from mesoscopic perspective [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 253: 1-17.
- [34] 徐磊, 崔姗姗, 姜磊, 等. 基于双重网格的混凝土自适应宏细观协同有限元分析方法[J]. *工程力学*, 2022, 39(4): 197-208.
XU Lei, CUI Shanshan, JIANG Lei, et al. Adaptive macro-meso-scale concurrent finite element analysis approach of concrete using dual mesh [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(4): 197-208.

(编辑:郭少华)