

骨料不规则程度对混凝土单轴受压性能影响的数值研究

周冠韬,徐志洪,刘聪

(南京理工大学理学院,210094 南京)

摘要:为了在细观层面上研究骨料不规则程度对混凝土力学性能及破坏形态的影响,采用 Python 程序二次开发了 ABAQUS 生成尖锐程度不同的随机分布骨料模型,分别建立零厚度 cohesive 单元与可变厚度的实体界面过渡区(interface transition zone, ITZ)。首先通过改变网格尺寸和加载垫块与混凝土间的摩擦系数确定合适的参数,并与实验对比验证模型的可靠性,随后分析 2 种 ITZ 建模方式的优劣,最后对三维细观混凝土模型进行单轴受压模拟,从应力-应变曲线、破坏形态、能量耗散方面进行分析。结果表明:零厚度 cohesive ITZ 与实体厚度 ITZ 模型都可预测混凝土抗压强度,具有实体厚度的 ITZ 模型的应力-应变曲线及破坏形态与实验更加贴合;混凝土破坏形态受骨料形状参数影响明显,球形骨料模型内部与表面均为贯穿式裂缝,多面体骨料模型应变能较大,混凝土内部微裂缝较多,容易受压破坏成更多的碎块;随着骨料不规则程度的增加,混凝土抗压强度略有提高但峰值应变不受影响。

关键词:三维细观混凝土;骨料;黏聚力单元;数值模拟;裂纹扩展

中图分类号:O34;TU528 文献标志码:A 文章编号:1000-4939(2025)06-1292-09

Mesoscale study on the influence of aggregate irregularity on uniaxial compressive properties of concrete

ZHOU Guantao, XU Zhihong, LIU Cong

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, China)

Abstract: In order to determine the influence of aggregate irregularity on the mechanical properties and failure morphology of concrete, Python programs were developed to generate randomly distributed aggregate models with different sharpness in ABAQUS, and the 0-thickness cohesive element and variable-thickness solid interface transition zone (ITZ) were established respectively. First, the reliability of model was determined by changing mesh size and friction coefficient between the loading pad and concrete compared with the experiment. Then, the quality of two ITZ modeling methods was analyzed. Finally, the uniaxial compression mechanical behavior of the three-dimensional meso-concrete model was analyzed from the aspects of stress-strain curve, fracture propagation, and energy dissipation. The simulation results show that the 0

收稿日期:2023-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.11802132)

通信作者:徐志洪,教授。E-mail: xuzh@njust.edu.cn

引用格式:周冠韬,徐志洪,刘聪. 骨料不规则程度对混凝土单轴受压性能影响的数值研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(6): 1292-1300.

ZHOU Guantao, XU Zhihong, LIU Cong. Mesoscale study on the influence of aggregate irregularity on uniaxial compressive properties of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(6): 1292-1300.

thickness cohesive ITZ and the solid thickness ITZ model can predict the compressive strength of concrete, and the stress-strain curve and failure morphology of the ITZ model with solid thickness are more consistent with the experiment. The fracture propagation of concrete is obviously affected by the shape parameters of aggregate. The interior and surface of the spherical aggregate model are penetrating cracks. The strain energy of polyhedral aggregate model is larger, and there are many micro-cracks in the concrete, the possibility being compressed and destroyed into more fragments is higher. With the increase of aggregate irregularity, the compressive strength of concrete increases slightly, but the peak strain is not affected.

Key words: 3D mesoscale concrete; aggregate; cohesive element; numerical simulation; crack propagation

混凝土本身是一种非均质材料,内部存在骨料、孔隙、砂浆和界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)等,所以在受力过程中的破坏形式具有很大的随机性,其中骨料的随机分布导致混凝土破坏机理难以通过常规实验进行分析。目前对于混凝土的数值模拟尺度主要分为宏观、细观和微观^[1-3]。细观模型通过对骨料、砂浆和界面过渡区分别建模,能够较好地模拟混凝土的力学性能和破坏机理^[4]。WITTMANN^[5]认为借助更低一层次尺度下的结构特征可以来解释某一尺度下材料的力学性能,对混凝土除了从宏观角度进行研究外,更关键的是从细观尺度出发以研究混凝土内部结构与宏观特性之间的联系。

骨料的建模方法主要有CT扫描与“生成-投放”两大类。REN等^[6]通过CT扫描混凝土断层对骨料与孔隙进行了二维细观分析。JIN等^[7]对沥青断层进行CT扫描建立三维骨料离散元模型。HUANG等^[8]通过X-CT扫描混凝土试块得到骨料三维信息后进行建模,并分析骨料弹性模量对混凝土抗拉性能的影响。NITKA等^[9]利用X-ray和CT扫描带缺口的混凝土梁,并建立颗粒离散元模型验证此三维模型可良好地预测混凝土断裂。田梦云等^[10]通过编程生成二维随机骨料模型以探究界面层与孔隙率对混凝土宏观力学响应的影响。黄灵芝等^[11]建立三维离散元模型对冻融循环下的混凝土单轴受压破坏模式进行分析。刘利宝等^[12]对生成的随机骨料表面插设cohesive单元并研究骨料弹性模型与体积率对混凝土力学性能的影响。在建模阶段,使用球形与多面体骨料进行建模较为常见,尽管多面体骨料更接近真实的碎石形状,但球形与多面体骨料在混凝土及细观分析中的具体区别需进一步研究。

许多研究表明,骨料与砂浆的界面过渡区是影响混凝土宏观力学性能的重要因素^[13-15]。ITZ位于骨料与砂浆交界处,由较多的孔隙和水泥组成,其厚

度约为0.01~0.05 mm,可以通过缩放或扩大骨料直径再进行布尔差集进行实际建模,但这么薄的实体在划分网格时具有很大的难度,所以通常将界面过渡区建模厚度增加到0.1~1 mm之间^[16-17]。目前主要通过2种方式来处理界面过渡区,即有厚度的实体建模并对其赋予劣化的砂浆材料属性^[18],或在骨料与砂浆之间插入0厚度的cohesive单元代替实体界面过渡区^[19-20]。作为对混凝土性能影响较大的因素,在细观模型中ITZ使用何种建模方式至关重要。

本研究通过Python编程对球形与不规则多面体骨料进行随机分布建模,并分别建立0厚度cohesive与实体可变厚度界面过渡区,对多组模型进行单轴受压模拟,随后通过测试得出合理的网格密度及加载垫块与混凝土间的摩擦系数,并与实验数据和混凝土压坏形态对比;最后从力学响应、破坏形态、能量耗散及裂缝体积分数等方面对ITZ厚度与骨料不规则程度对混凝土的影响进行分析。

1 模型的建立与材料参数

1.1 随机骨料生成与级配

WANG等^[21]通过利用X-ray批量扫描混凝土内部骨料的三维特征并建立数据库,从而实现异构骨料建模。但此方法由于不能建立较薄的ITZ,难以控制骨料的不规则程度且成本较高,所以本研究使用“生成-投放”法进行建模。不论是球形骨料还是多面体骨料,建模算法步骤是类似的。多面体骨料在建模过程中,需要在已经生成的球面上选取一定数量的顶点再进行平面干涉判断,将这些顶点连接生成平面即组成一个多面体骨料,多面体骨料建模流程如图1所示。

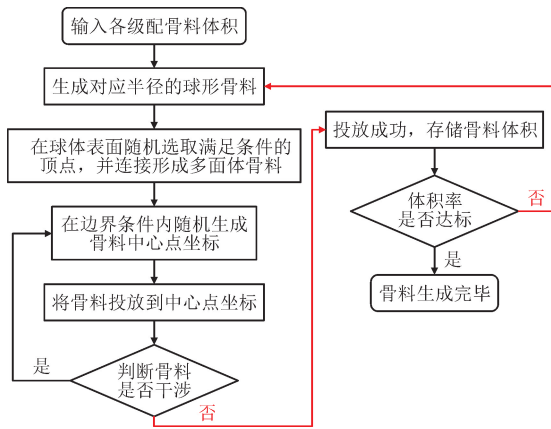


图1 骨料建模流程

Fig.1 Aggregate modeling process

判断各多面体骨料互不干涉的方式基本与球形相同,即令2个多面体外接球球心距离大于其半径之和,但此种算法生成的骨料分布不够均匀。本研究使用一种应用在判断纤维之间干涉的算法^[22],首先在生成多面体顶点时存储顶点坐标数据,其次判断2个骨料中心距离大于一定数值防止小粒径骨料出现在大骨料内部,最后将2个骨料上所有顶点进行距离计算。

$$d_a = \min(d(A'_p, A'_q)) > l_p, t \in [1, n], p, q \in [1, N] \quad (1)$$

式中: d_a 为两骨料上各顶点间最小距离; d 为两骨料上各顶点间距离; A'_p 为骨料 p 上的一个顶点坐标; A'_q 为骨料 q 上的一个顶点坐标; n 为多面体骨料上的顶点数量; N 为多面体骨料数量; l_p 为控制各骨料顶点间距的人为给定数值。如图2所示,理论上若多面体顶点数量足够多且 $l_p = 0$, 则各个顶点均不接触,但为了确定各骨料之间不干涉,可适当将 l_p 的数值增大。

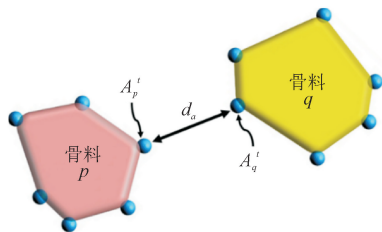


图2 多面体骨料干涉判断示意图

Fig.2 Schematic diagram of polyhedral aggregates interference judgment

表1给出标准级配,包括直径为2.36~4.75 mm的小粒径骨料,直径为4.75~9.5 mm的中粒径骨料,直径为9.5~12.7 mm的大粒径骨料。在建模时将三级配骨料进行数量等效化处理,在生成实体界面过渡区模型时需要比真正骨料粒径更大的空间,并考虑多个模型的计算成本,所以将所有模型的骨料体积率控制在25%,虽然略低于实际中的混凝土,

但满足本研究需要。

表1 混凝土标准级配^[23]

Tab.1 Standard grading of concrete^[23]

筛孔尺寸/mm	累计通过率/%	累计保留率/%
2.36	100	0
4.75	74	26
9.50	23	77
12.70	0	100

1.2 ITZ 的生成

界面过渡区主要有2种建模方式,在骨料与砂浆单元之间插入0厚度的 cohesive 单元或者通过布尔操作实现实体厚度 ITZ。插入 cohesive 单元示意图如图3所示,骨料和砂浆都使用 C3D4 单元类型进行划分,在其间形成 COH3D6 类型单元。需要说明的是,本研究中的基础单元都为 C3D4,并未使用 C3D8 等六面体单元,虽然六面体单元会大大减少总体单元数量,但在如此不规则的模型中使用六面体单元只能形成体素网格,不适宜模拟混凝土内部各个组分之间的力学性能及裂纹扩展。

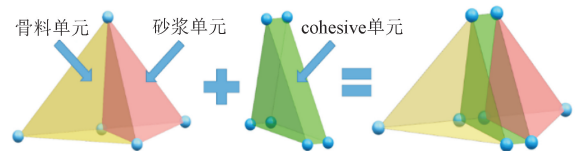


图3 四面体单元间插入 cohesive 单元示意图

Fig.3 Diagram of inserting cohesive element between tetrahedral elements

对于有厚度的实体 ITZ, 首先使用 python 算法生成满足条件的多面体形心坐标并存储各顶点坐标,接着使用数学方法将各顶点在原先基础上进行偏移,然后将新生成的顶点进行连接。为避免出现各面交叉和凹陷的现象,需要再次判断各面之间的关系,最后判断多面体形心、骨料顶点和对应新生成顶点是否在用一条直线上。若满足上述要求,则在 ABAQUS 中生成模型后使用布尔差集生成多面体实体界面过渡区。图4给出了0.5 mm厚度实体 ITZ 模型。

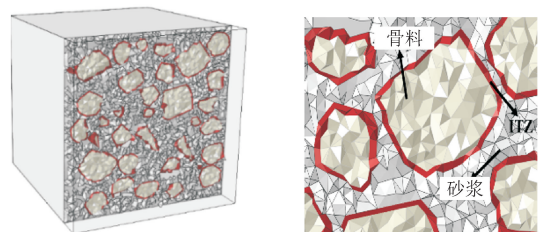


图4 多面体骨料0.5 mm 实体 ITZ 模型

Fig.4 Polyhedral aggregate 0.5 mm solid ITZ model

1.3 本构关系与材料参数

关于 cohesive 单元的各项法则和属性定义方式在 ABAQUS 手册^[24]中有详细说明,在 CTZ 模型中 cohesive 单元的密度设置与砂浆相同,黏聚力刚度如果取值很大将会出现畸变或者增加计算难度等问题,CABALLERO 等^[25]建议在混凝土细观分析中选取 $10^5 \sim 10^9$ MPa/mm 之间,经过测试后本研究选取 10^6 MPa/mm 作为黏聚力刚度。对于损伤演化中的法向、切向应力和断裂能则参考 NADERI 等^[26]的研究。

砂浆基体及实体 ITZ 均使用混凝土塑性损伤模

型(CDP),因为 ITZ 强度一般为砂浆的 30% ~ 70%^[27-28],所以 ITZ 的强度取为砂浆的一半。ABAQUS 手册中详细介绍了 CDP 模型的使用方法,此处不再赘述。CDP 模型用以模拟混凝土在受压和受拉过程中的塑性变形和损伤,本研究使用《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)^[29]中的压缩应变硬化和软化曲线公式进行模拟。混凝土其余参数如下:标准抗压强度 45 MPa,抗拉强度 4 MPa,断裂能 0.06 J,膨胀角 35° ,塑性偏心距 0.1,双轴与单轴抗压强度之比 1.16,混凝土屈服形态参数 0.667,黏性参数 0.0005 ^[30-31]。骨料属性定义为不受损伤的弹性体,所有材料属性见表 2。

表 2 材料参数

Tab.2 Material parameters

参数	骨料	ITZ(cohesive)	砂浆	ITZ(CDP)
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 800	2 000	2 000	2 000
弹性模量/GPa	70	—	25	22
泊松比	0.2	—	0.2	0.2
cohesive 黏聚力刚度/($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	—	10^6	—	—
名义主/切应力/MPa	—	2.6/10	—	—
法/切向断裂能/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	—	0.025/0.062 5	—	—

2 模型合理性分析

2.1 网格密度

如图 5 所示,三维细观混凝土模型为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的立方体试块,在 Y 轴设置 2 个垫块,下方垫块完全固定,对上方垫块施加向下的竖向位移。

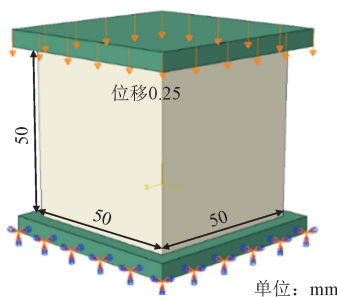


图 5 混凝土单轴受压模型

Fig.5 Uniaxial compression model of concrete

此外,为了得到足够的应力应变响应,设置位移加载达到 0.25 mm 时停止计算。考虑到准静态细观模拟的计算精度和时间成本,对网格密度、垫块与试

块之间的摩擦等参数进行分析,并将计算结果与实验值进行对比以验证数值模拟的可靠性。

不论是静力学还是动力学分析,单元尺寸都对计算精度和分析结果有着不可忽略的影响。过小的单元尺寸会产生巨大的单元数量,并且会增加不必要的计算时间;过大的单元尺寸可能会导致计算结果难以收敛,在混凝土细观分析中也难以精确表现出裂纹扩展状态。为了得到良好的宏观应力-应变曲线和混凝土细观破坏形态,需要经过测试得到一个可以同时满足计算精度与计算速度的网格密度。

以 20 顶点多面体骨料结合 0.25 mm 厚度 ITZ 模型为例,对其划分 2、1.5、1、0.8、0.7 mm 大小的单元,单元数量分别为 2.9×10^5 、 5.2×10^5 、 1.76×10^6 、 2.11×10^6 、 2.43×10^6 。图 6 给出了不同网格密度下的宏观应力-应变曲线,可以看出随着单元尺寸的减小,混凝土应力-应变曲线逐渐趋于稳定,单元尺寸小于 1 mm 后曲线基本不受网格密度的影响。随着网格密度的增加,计算时间从 8 h 增加到 39 h,同时考虑到此参数对混凝土破坏形态的影响,本研究将所有模型的砂浆单元尺寸划分为 1 mm,实体 ITZ 单元尺寸划分为 0.8 mm。

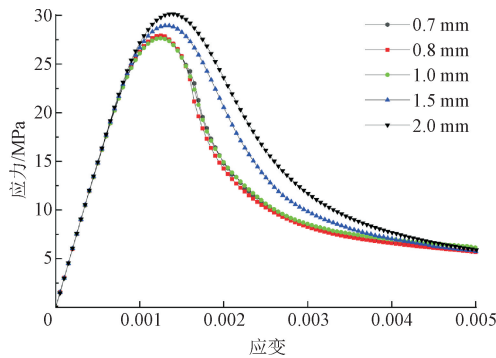


图6 不同单元尺寸计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation results of different element sizes

2.2 加载垫块与混凝土间摩擦系数

准静态数值模拟需要依靠能量来评估模型的计算是否合理,一般认为变形材料的总动能不能超过总内能的10%^[32]。在准静态分析中模型产生的总动能主要受到位移加载速率的影响,如果加载速率较大则会产生较大的动能。FENG等^[33]认为加载速率会影响混凝土应力-应变曲线。为了得到良好的计算结果,本研究参考章毅等^[34]的测试数据。

当垫块与混凝土之间摩擦较大时,混凝土横向变形受摩擦力约束形成三维应力状态,并使混凝土抗压强度提高。为确定混凝土单轴受压实验中钢板与混凝土试块间的摩擦系数大小,对20顶点多面体骨料结合0厚度cohesive ITZ模型展开库伦摩擦系数分别为0.01、0.1和0.3的模拟。由图7可以看出,随着摩擦系数的增加,混凝土抗压强度逐渐提高;当摩擦系数为0.1时,峰值应力与LOWES^[35]的实验值基本相同。图7同时给出了NADERI等^[26]的模拟数据。

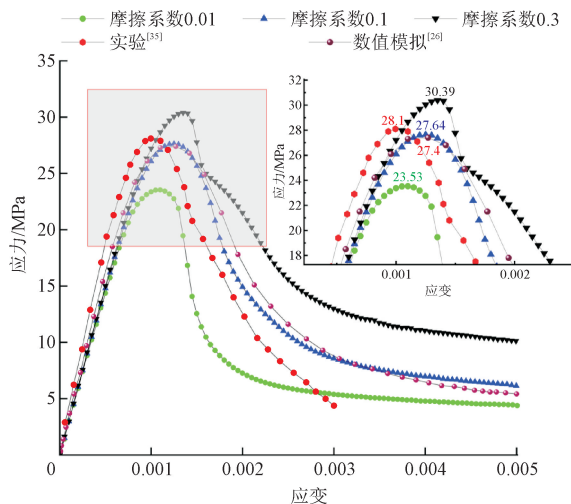


图7 不同摩擦系数与实验应力-应变曲线

Fig. 7 Different friction coefficients and experimental stress-strain curves

由图8可知,模拟的混凝土截面破坏形态与不同摩擦系数下的实验破坏形态^[36]类似,从力学响应与破坏形态角度证明本模拟的可靠性,因此所有模型中垫块与混凝土间库仑摩擦系数设置为0.1。

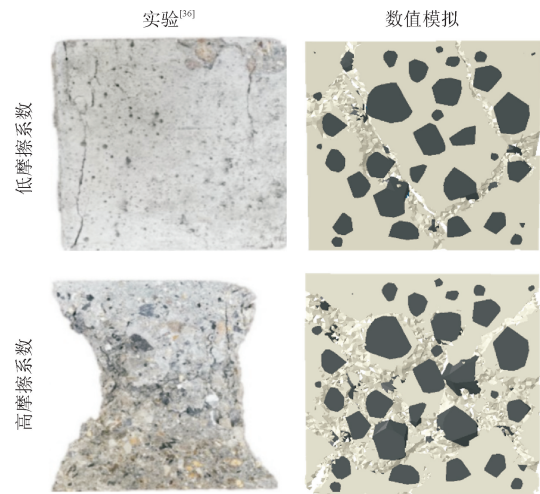


图8 混凝土截面破坏形态

Fig. 8 Fracture propagation of concrete section

3 ITZ 类型的影响

为确定ITZ类型对混凝土性能的影响,本节对0厚度cohesive单元组成的ITZ模型和0.5 mm厚度实体ITZ模型从破坏形态、力学响应方面进行对比分析。为减少骨料形状及空间分布随机性引起的误差,所有模型中的骨料形态参数及中心位置坐标完全相同,并对其赋予相同的砂浆属性(CDP),仅在ITZ的材料属性上有所差异。

图9给出ITZ厚度不同的20顶点多面体骨料模型在单轴受压情况下的应力-应变曲线。由图9可知,在弹性阶段二者几乎重合,峰值应力仅相差0.38 MPa,即混凝土弹性模量和抗压强度基本不受ITZ类型影响;但在峰值应力后的软化阶段有较大差别,0.5 mm厚度实体ITZ模型下降速率大于cohesive ITZ模型。这是由于cohesive单元在模型中的能量达到一定程度时便会失效,在基体破坏阶段不再参与工作;但有实体厚度的ITZ在峰值应变后才逐渐开始大面积损伤,其弱于砂浆的材料属性在混凝土裂缝快速发展阶段得到体现。

图10展示了2种模型在峰值应变和极限应变时刻的ITZ损伤和砂浆损伤带(保留SDEG > 0.9),并统计损伤前后的ITZ单元数量比率来对比2种模型的区别。

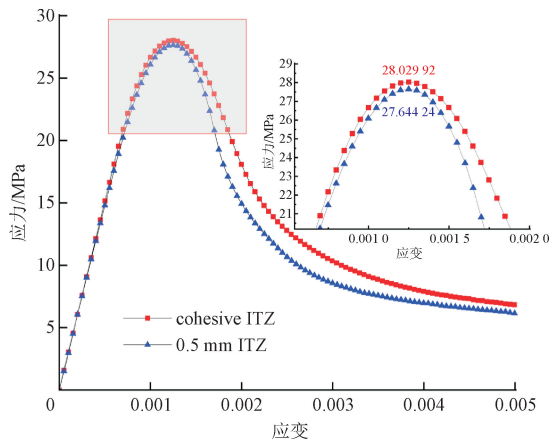


图 9 不同 ITZ 模型单轴受压应力-应变曲线
Fig. 9 Uniaxial compression stress-strain curves of different ITZ models

由图 10 可知,应变达到 0.001 3 时,cohesive ITZ 基本完全损伤,受损单元占 98.2%,实际中混凝土达到极限应变时 ITZ 并未大面积损伤;此时实体 ITZ 仅在大粒径骨料附近出现损伤,小粒径骨料基本还未参与工作,有 1.7% 单元受损。应变达到 0.005 时,大骨料附近 ITZ 基本全部失效,主要裂纹扩展区

域的小骨料 ITZ 失效,受损单元占 42.3%,与实际情况类似。从细观角度来看,混凝土受压时薄弱界面过渡区先损伤,随后裂纹扩展至砂浆,其中裂纹蔓延方向主要受大粒径骨料的空间位置分布影响。

表 3 给出 2 种 ITZ 模型的单元数量与计算时长,可以看到 cohesive ITZ 模型网格数量较少且计算速度略快。但考虑到在砂浆和骨料之间插入 0 厚度 cohesive 单元也需要一定的时间,二者在计算成本上无明显优劣。除此之外,实体 ITZ 模型在细观破坏的模拟中表现较好,更加贴合实验结果,并且 cohesive 单元的材料参数难以测定,难以保证模拟的精确性。

表 3 2 种 ITZ 模型计算成本对比

Tab. 3 Comparison of the calculation costs between two ITZ models

参数	cohesive ITZ 模型	0.5 mm ITZ 模型
ITZ 单元数量/万	6.5	27.4
总单元数量/万	119.8	159.6
计算时长/h	21	27

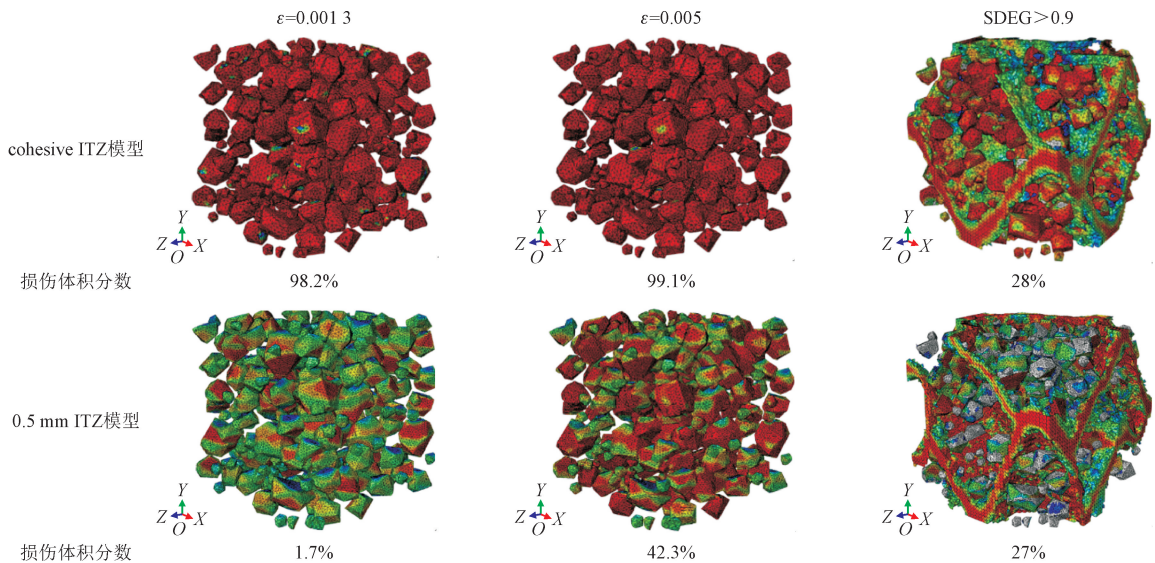


图 10 不同 ITZ 模型单轴受压下各应变时刻的 ITZ 损伤与整体模型损伤带

Fig. 10 The ITZ and overall model damage zone of different ITZ models under uniaxial compression at each strain moment

4 骨料不规则程度的影响

本节从混凝土单轴受压下的宏观应力-应变响应、破坏形态和相应能量耗散方面来分析骨料形状参数的影响。如图 11 所示,多面体顶点的减少会使其形状更加尖锐,所以分别建立球形、25 顶点多面体、20 顶点多面体模型进行数值模拟,界面过渡区

均为 0.5 mm 的实体 ITZ。为降低骨料分布随机性引起的误差,分别建立计算 5 组模型并取其均值进行力学分析。

如图 12 所示,20 顶点多面体骨料模型应力峰值大于 25 顶点多面体和球形骨料模型,最大相差 0.71 MPa,从宏观应力-应变角度来看,骨料形状对混凝土抗压强度影响较小,在相同体积率下混凝土弹性模量受骨料形状影响不大。

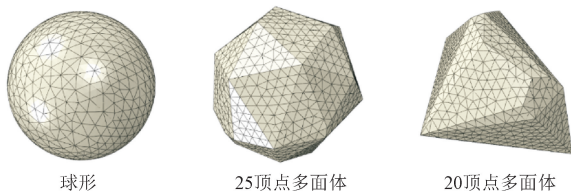


图 11 各形状骨料

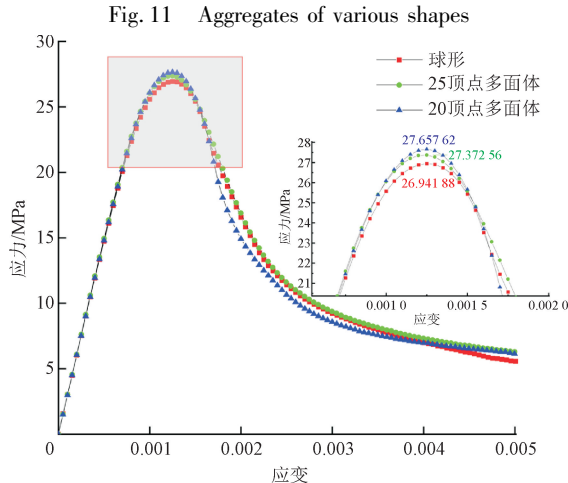


图 12 不同形状骨料模型单轴受压应力-应变曲线
Fig. 12 Uniaxial compression stress-strain curves of aggregate with different shapes

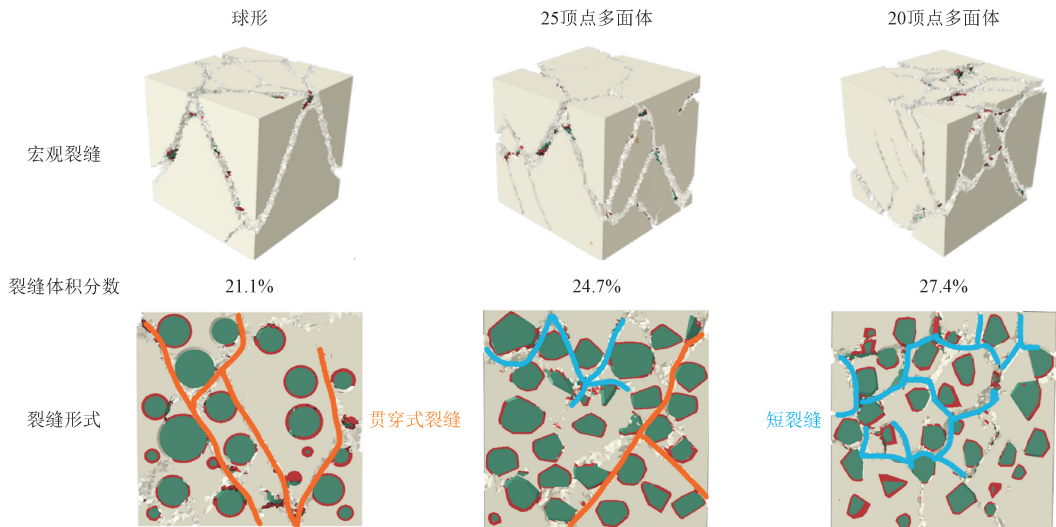


图 13 不同形状骨料模型表面与截面破坏状态

Fig. 13 The failure morphology of surface and section of aggregate models with different shapes

在外荷载作用下混凝土中的界面过渡区最先失效出现微裂缝,进而裂缝蔓延进入砂浆基质;当遇到强度偏高的骨料后选择避让,所以裂纹扩展路径表现出一定的曲折性。相比多面体骨料,球形骨料在混凝土受到荷载时将力较稳定地传递到砂浆或其余骨料中,而多面体骨料上存在很多棱角,力在其中传递较为分散,这就导致在受压过程中更尖锐的骨料模型会破坏成更多碎块。

为体现破坏后各模型中的裂纹数量和能量消

耗,提取出模型损伤后的裂缝体积与初始模型的比值,并输出所有模型中的 ALLMD(损伤耗散能)和 ALLPD(塑性应变耗散能)之和作为总能量损失进行比较,因为能量曲线均随应变递增,所以取应变最终时刻的能量最大值作为参考(图 14a)。如图 14(b)所示,随骨料尖锐程度的增加,混凝土在单轴受压下产生的裂缝体积分数增大,能量耗散也更高,这表明骨料形状不规则程度的增加会使得混凝土的损伤体积更大。

较尖锐的多面体骨料可能增加混凝土的抗压强度,裂缝快速发展至临界点后,多面体骨料模型曲线斜率增大,由于其存在较多不规则棱角,在砂浆中传递力更加分散,并且不规则形状骨料之间的咬合力更强,混凝土破坏时需要更高的能量即应变能更大。与球形骨料相比,不规则形状骨料之间更容易出现连锁效应,从而提高混凝土抗压强度和断裂韧性。

图 13 给出不同形状骨料的宏观破坏形态和微观裂纹走向,并体现各模型的裂缝体积率。从宏观角度来看大多是由贯穿混凝土的剪切斜裂缝或受拉裂缝引起,各骨料模型均出现明显的三角压裂区。球形骨料混凝土破坏多为贯穿裂缝,多面体骨料混凝土呈现出较短但多数量的裂纹,不同形状骨料对宏观破坏形态有一定的影响。由于随着骨料顶点的减少,骨料整体变得愈加尖锐,在棱角处越容易出现应力集中现象。从细观角度来看,随着骨料形状尖锐程度的增加,砂浆中的裂纹走向更多,较球形骨料模型的沙漏状压溃区更加明显。

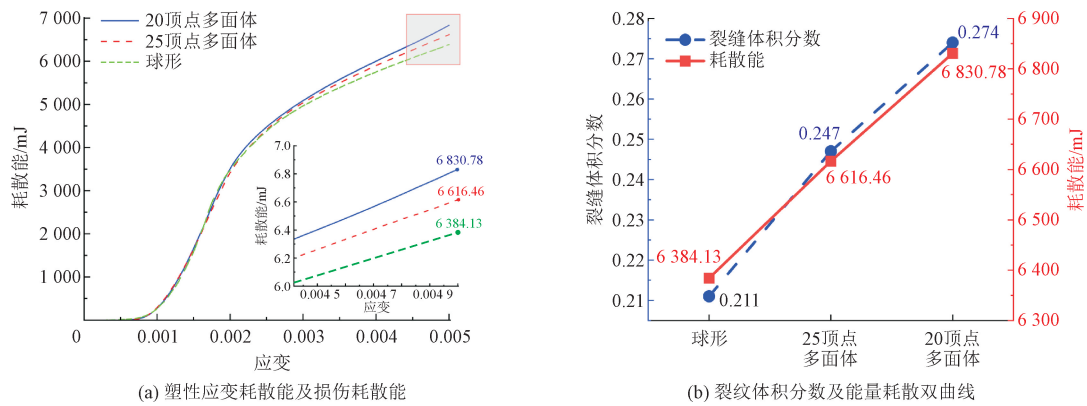


图14 不同形状骨料模型的耗散能及裂纹体积分数

Fig. 14 Energy dissipation and crack volume fraction of aggregate models with different shapes

5 结论

本研究通过编写 Python 程序在 ABAQUS 中实现球形及多面体骨料的随机分布,并分别在骨料与砂浆中插设 0 厚度 cohesive 单元与可变厚度实体单元模拟薄弱界面过渡区,通过控制多面体骨料的顶点数与 ITZ 厚度,分析骨料不规则程度与 ITZ 类型对混凝土力学性能及破坏形式的影响,主要结论如下。

1) 实体厚度 ITZ 模型在软化阶段应力下降速度与细观破坏形态更贴合实际情况,适合进行细观破坏与裂纹扩展分析;0 厚度 cohesive ITZ 模型在受压过程中难以真实地模拟薄弱界面过渡区的损伤状态,但单元数量及计算时长较少,两者在预测混凝土受压弹性阶段与峰值应力前皆可应用。

2) 混凝土破坏形态受骨料形状参数影响明显,由于多面体骨料棱角处容易出现应力集中现象,裂纹在此处萌生,随着其形状尖锐程度的增加,受力传递更加分散,破坏过程中能量耗散较大,混凝土容易受压破坏成更多的碎块。球形骨料模型破坏主要形成贯穿式裂缝,不适合针对混凝土内部的裂纹萌生与扩展进行分析,而且平滑的骨料形状也与实际工程情况不符。

3) 混凝土抗压强度受骨料形状参数影响较小,相同体积率情况下,多面体骨料不规则程度越高,相互之间咬合力更强,模拟混凝土受压峰值应力略高于球形骨料模型,但球形骨料模型网格数量较低,更节省计算成本。

参考文献:

[1] NGUYEN V P, STROEVEN M, SLUYS L J. Multiscale failure mod-

eling of concrete: micromechanical modeling, discontinuous homogenization and parallel computations[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2012, 201-204; 139-156.

[2] UNGER J F, ECKARDT S. Multiscale modeling of concrete: from mesoscale to macroscale[J]. Archives of computational methods in engineering, 2011, 18(3): 341-393.

[3] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: microstructure, properties, and materials[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013.

[4] ZHOU R X, SONG Z H, LU Y. 3D mesoscale finite element modeling of concrete[J]. Computers & structures, 2017, 192: 96-113.

[5] WITTMANN F H. Structure of concrete with respect to crack formation[J]. Fracture mechanics of concrete. 1983; 43(5): 6.

[6] REN W Y, YANG Z J, SHARMA R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete[J]. Engineering fracture mechanics, 2015, 133: 24-39.

[7] JIN C, YANG X, YOU Z P, et al. Aggregate shape characterization using virtual measurement of three-dimensional solid models constructed from X-ray CT images of aggregates[J]. Journal of materials in civil engineering, 2018, 30(3): 04018026.

[8] HUANG Y J, YAN D M, YANG Z J, et al. 2D and 3D homogenization and fracture analysis of concrete based on in-situ X-ray computed tomography images and Monte Carlo simulations[J]. Engineering fracture mechanics, 2016, 163: 37-54.

[9] NITKA M, TEJCHMAN J. A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with X-ray μ CT images[J]. Cement and concrete research, 2018, 107: 11-29.

[10] 田梦云, 张恩, 曹瑞东, 等. 基于细观尺度的混凝土单轴力学性能仿真计算分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(3): 975-981.

TIAN Mengyun, ZHANG En, CAO Ruidong, et al. Meso-scale simulation analysis of uniaxial mechanical behavior of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(3): 975-981 (in Chinese).

[11] 黄灵芝, 柯梅尉, 司政, 等. 冻融损伤混凝土单轴压缩细观破坏研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1400-1407.

HUANG Lingzhi, KE Meiwei, SI Zheng, et al. Research on meso failure of concrete subjected to freeze-thaw damage under uniaxial compression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4): 1400-1407 (in Chinese).

- [12] 刘利宝,李效民,程昱,等. 基于摩擦脱粘法三维细观混凝土受压模型[J]. 应用力学学报,2025,42(5):1129-1138.
LIU Libao, LI Xiaomin, CHENG Yu, et al. Compression simulation of three-dimensional meso-scale concrete based on friction debonding method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5):1129-1138 (in Chinese).
- [13] 杜修力,金浏. 细观分析方法在混凝土物理/力学性质研究方面的应用[J]. 水利学报,2016,47(3):355-371.
DU Xiuli, JIN Liu. Applications of meso-scale analysis methods on the study of the physical/mechanical properties of concrete[J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 47(3):355-371 (in Chinese).
- [14] GARBOCZI E J, BENTZ D P. Analytical formulas for interfacial transition zone properties[J]. Advanced cement based materials, 1997, 6(3/4):99-108.
- [15] TASONG W A, LYNSDALE C J, CRIPPS J C. Aggregate-cement paste interface; part I. Influence of aggregate geochemistry[J]. Cement and concrete research, 1999, 29(7):1019-1025.
- [16] WANG J M, LI X, JIVKOV A P, et al. Interfacial transition zones in concrete meso-scale models-balancing physical realism and computational efficiency[J]. Construction and building materials, 2021, 293:123332.
- [17] 金浏,杨旺贤,余文轩,等. 基于细观模拟的轻骨料混凝土破坏行为及尺寸效应研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(1):91-99.
JIN Liu, YANG Wangxian, YU Wenxuan, et al. Study on failure behavior and size effect of lightweight aggregate concrete based on meso-simulation[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2021, 41(1):91-99 (in Chinese).
- [18] MALEKI M, RASOOLAN I, KHAJEHDEZFULY A, et al. On the effect of ITZ thickness in meso-scale models of concrete[J]. Construction and building materials, 2020, 258:119639.
- [19] 杨贞军,黄宇劼,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 (in Chinese).
- [20] TRAWINSKI W, BOBINSKI J, TEJCHMAN J. Two-dimensional simulations of concrete fracture at aggregate level with cohesive elements based on X-ray μ CT images[J]. Engineering fracture mechanics, 2016, 168:204-226.
- [21] WANG M Z, YANG X, WANG W. Establishing a 3D aggregates database from X-ray CT scans of bulk concrete[J]. Construction and building materials, 2022, 315:125740.
- [22] NADERI S, ZHANG M Z. A novel framework for modelling the 3D mesostructure of steel fibre reinforced concrete[J]. Computers & structures, 2020, 234:106251.
- [23] HIRSCH T J. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate[J]. Journal proceedings, 1962, 59(3):427-452.
- [24] Abaqus Inc. Abaqus analysis user's manual [EB/OL]. [2012; 89(2080); v6.]. <http://orpheus.nchc.org.tw/2080/v6.12/books/usb/default.htm>.
- [25] CABALLERO A, CAROL I, LÓPEZ C M. A meso-level approach to the 3D numerical analysis of cracking and fracture of concrete materials[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2006, 29(12):979-991.
- [26] NADERI S, TU W L, ZHANG M Z. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates[J]. Cement and concrete research, 2021, 140:106317.
- [27] 陈惠苏,孙伟,STROEVEN P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二):界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. 硅酸盐学报,2004,32(1):70-79.
CHEN Huisu, SUN Wei, STROEVEN P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (II): mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1):70-79 (in Chinese).
- [28] 何锦涛,雷冬,高子淇,等. 混凝土界面过渡区力学性能测试方法研究进展[J]. 实验力学,2022,37(6):805-820.
HE Jintao, LEI Dong, GAO Ziqi, et al. Research progress on mechanical properties testing methods of interfacial transition zone in concrete[J]. Journal of experimental mechanics, 2022, 37(6):805-820 (in Chinese).
- [29] 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.
- [30] YILMAZ O, MOLINARI J F. A mesoscale fracture model for concrete[J]. Cement and concrete research, 2017, 97:84-94.
- [31] 汪奔,王弘,张志强,等. 三维随机凹凸型混凝土骨料细观建模方法研究[J]. 应用力学学报,2018,35(5):1072-1076.
WANG Ben, WANG Hong, ZHANG Zhiqiang, et al. Study on mesoscopic modeling method for three-dimensional random concave-convex concrete aggregate[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018, 35(5):1072-1076 (in Chinese).
- [32] 吴庆欣,肖毅,薛元德. 双悬臂梁试件裂纹动态扩展的准静态数值分析[J]. 复合材料学报,2019,36(5):1179-1188.
WU Qingxin, XIAO Yi, XUE Yuande. A quasi-static numerical analysis of crack dynamic propagation in double cantilever beam specimens[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2019, 36(5):1179-1188 (in Chinese).
- [33] FENG Z M, CHEN X D, FENG L, et al. Uniaxial compression failure characteristics of 60-year-old bridge concrete under different loading rates[J]. Case studies in construction materials, 2022, 17:e01276.
- [34] 章毅,张湘茹,吴昊,等. 混凝土3D细观模型及准静态力学行为分析[J]. 工程力学,2024,41(8):80-92.
ZHANG Yi, ZHANG Xiangru, WU Hao, et al. 3D mesoscale model and quasi-static mechanical analysis of concrete behavior[J]. Engineering mechanics, 2024, 41(8):80-92 (in Chinese).
- [35] LOWES L N. Finite element modeling of reinforced concrete beam-column bridge connections[C]//Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [36] ZHENG Z S, TIAN C, WEI X S, et al. Numerical investigation and ANN-based prediction on compressive strength and size effect using the concrete mesoscale concretization model[J]. Case studies in construction materials, 2022, 16:e01056.

(编辑 李坤璐)