

基于体素化中尺度模型的混凝土压缩损伤机制研究

陆毅¹, 曲艳东^{2*}, 汪帅¹

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²大连民族大学土木工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年4月29日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

基于体素化多相中尺度建模框架, 构建了包含骨料、基体和界面过渡区(ITZ)三维中尺度的有限元模型。选取体积分数为17%~35%的理想化球形模型来模拟骨料。通过控制变量, 研究骨料致密化对于混凝土受压过程的影响。并引入损伤耗散能的表征方法, 对于能量演化过程及主导破坏机制进行定量分析。研究表明: 随着骨料体积分数的增加, 混凝土宏观抗压强度显著提高, 但裂纹萌生明显提前; 总损伤耗散能呈非线性增长, ITZ逐渐成为主要能量耗散区域。

关键词

混凝土, 体素化建模, 损伤演化, 能量耗散

Research on the Compressive Damage Mechanism of Concrete Based on Voxelized Mesoscale Model

Yi Lu¹, Yandong Qu^{2*}, Shuai Wang¹

¹School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²School of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian Liaoning

Received: April 29, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

A three-dimensional mesoscale finite element model encompassing aggregate, matrix and interfacial

*通讯作者。

文章引用: 陆毅, 曲艳东, 汪帅. 基于体素化中尺度模型的混凝土压缩损伤机制研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(5): 217-229. DOI: 10.12677/mos.2026.155085

transition zone (ITZ) was established on the basis of a voxelized multiphase mesoscale modeling framework. Idealized spherical models with a volume fraction ranging from 17% to 35% were adopted to simulate the aggregate. The effect of aggregate densification on the compressive process of concrete was investigated by means of the control variable method. Moreover, a characterization method of damage dissipation energy was introduced to conduct a quantitative analysis of the energy evolution process and the dominant failure mechanism. The results show that with the increase of aggregate volume fraction, the macroscopic compressive strength of concrete is significantly improved, while the crack initiation occurs obviously in advance; the total damage dissipation energy increases non-linearly, and the ITZ gradually becomes the main energy dissipation region.

Keywords

Concrete, Voxelized Modeling, Damage Evolution, Energy Dissipation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土是一种复杂的非均质复合材料，在中尺度水平上常常被视为有骨料、水泥浆体及界面过渡区 (ITZ) 组成的三项复合材料[1]。混凝土的力学性能和破坏方式往往与其中尺度材料和结构存在密切的关系，中尺度结构的特征性差异，往往能够直接决定混凝土材料的宏观力学响应多样性[2]。因此，需要一种能够显式表达混凝土实际细观结构的细观模型，分析混凝土细观结构与宏观力学行为之间的关系，这是目前混凝土数值模拟研究的热点问题。

一般来说混凝土的中尺度模型建模通常分为两个步骤：首先建立混凝土中尺度模型的几何模型，其次对每一个几何模型进行网格划分，从而得到完整的中尺度模型有限单元模型。但是根据目前近些年的已有文献，研究了中尺度的模型生成方法，混凝土的几何模型可以大致概括为三种：

(1) 随机骨料放置法[3] (2) Voronoi 图解法[4]和 CT 扫描法[5] [6]。随机骨料放置法虽然能够精确地控制级配与骨料的形态，但是其耗时的干涉检查极其难以跨越高体积分数的技术壁垒；Voronoi 图解法虽然能够轻易构建高体积分数的骨料模型，但是在物理上生成的模型无法贴合真实的级配要求；而 CT 扫描法虽然具备绝对的物理真实性，但是其昂贵的时间和经济成本，以及受限于分辨率的 ITZ 剥离难度，决定了其无法进行大规模分析的可能性。然而目前现有的混凝土中尺度几何建模方法普遍被“高体积分数、真实级配与计算成本”的技术所局限。

尽管上述的研究在中尺度模型建模方面取得了一定的进展，但现有的工作更多的侧重于几何重构及宏观响应预测，中尺度模型参数如何通过材料内部应力分布与裂纹演化过程，对于能量耗散层面影响宏观力学行为，还缺乏定量性的研究。尤其是在骨料体积分数的变化下，裂纹主导区域的演化规律和能量耗散路径的转移机制还尚不明确，这在一定程度上制约了中尺度模型在的能量耗散问题。

基于此，本文在已有的体素化的多相建模框架的基础上，建立了包含骨料、基体及 ITZ 的三维中尺度有限元模型，并结合断裂能正则化的混凝土损伤塑形(CDP)模型，来保证数值计算的稳定性与能量的一致性。该研究通过严格的微积分手段对于全周期的耗散能演化进行了全周期的追踪，界定了微裂纹的萌生时刻与扩张的延迟；对于“基体 - 界面”协同向“界面渗透联通的主导转移进行了定量的分析”。

2. 中尺度有限元模型的构建策略

2.1. 圆形骨料中尺度模型几何构建

2.1.1. 骨料级配

混凝土集料的粒径分布通常遵循基于 Fuller [7]提出的混凝土集料最大密度理想曲线所确定。在此基础上, Talbot 对该级配形式进行了推广, 引入级配指数 n , 从而形成更具一般性的 Talbot 级配模型[1]。

若直接采用标准 Talbot 公式, 会导致有效粒径范围内的骨料体积分数偏低[8]-[10]。因此, 本文采用修正的 Talbot 级配公式来确定各级粗骨料的概率密度分布。修正后的累积通过率定义如公式(1) [11]。

$$P(d) = \frac{d^n - D_{\min}^n}{D_{\max}^n - D_{\min}^n} \quad (1)$$

其中 d 为骨料粒径, D_{\max} 为骨料最大粒径(本研究中取 10 mm), D_{\min} 为模拟选取的最小截断粒径(本研究取 2.5 mm), n 为级配指数, 当 $n=0.5$ 时, 该级配曲线退化为经典 Fuller 最大密实度级配曲线。 $p(d)$ 为粒径小于 d 的骨料在区间 $\{D_{\min}, D_{\max}\}$ 内的累积体积分数。

2.1.2. 圆形骨料建模策略的合理性

在本文构建的三维中尺度混凝土模型中, 骨料采用球形几何进行显式建模, ITZ 围绕骨料进行数值表征。为了保证不同模型之间的可比性, 在骨料级配、空间分布方式及建模流程上保持一致, 仅通过调控骨料体积分数来构建不同的中尺度混凝土模型, 实现对不同体积分数下骨料的混凝土基体进行分析。

采用球形骨料进行建模, 这并非是对真实骨料形态的简单化处理, 而是一种基于控制变量思想的建模策略[12]-[14]。在混凝土中尺度模型中, 骨料的几何形态、级配特征与空间分布呈现出高度非线性的耦合, 这种复杂性共同驱动了损伤的演化拓扑与宏观性能[13] [15]。若是直接引入不规则多面体骨料[16], 其形态特征(如棱角角度、长宽比及表面粗糙度等)将引入额外变量, 使形态效应与体积分数效应难以分辨, 从而削弱对损伤机制的定量归因能力[13]。生成的骨料模型图 1 所示。

本文采用球形骨料以消除形状因素的干扰[16]-[18], 使体积分数成为唯一的控制变量, 构建混凝土模型。在这一条件下, 不同模型之间的损伤差异可主要归功于骨料体积分数变化, 而非几何形态差异所引入的偶然性影响[12] [17]。这种建模策略有助于揭示混凝土中尺度损伤机制对体积分数的依赖性。从数值模型可实现的角度来考虑, 球形骨料具有更高的几何稳定性与计算可控性[16]。

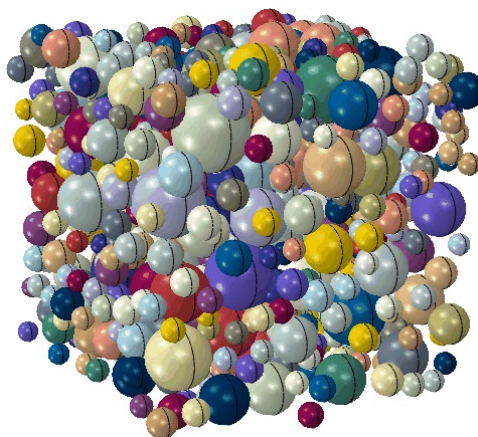


Figure 1. Aggregates generated by secondary development

图 1. 利用二次开发生成的骨料

2.2. 体素化几何生成与 ITZ 剥离算法

传统网格划分方法在处理复杂骨料边界时,无法划分六面体网格,常采用四面体网格,进而容易引发单元畸变严重和计算不收敛等问题。本研究摒弃了常规模型被迫采用四面体网格单元退化的妥协方案,采用了基于六面体背景网格的体素化映射技术,对混凝土的三维模型进行了几何重构。

2.2.1. 基于形心碰撞检测的骨料体素化映射

利用有限元的底层计算框架,在所建立的模型空间内生成均匀的六面体背景网格。算法通过读取前期骨料建模所生成的球体骨料空间坐标 (x, y, z) 及半径 r 的数据,对内部空间内设置六面体单元进行独立遍布与碰撞检测。对于任意空间单元,提取其全部节点坐标并计算其几何形心 (x_c, y_c, z_c) 。具体判别方法如公式(2)所示。

$$d = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2} \leq r_i \quad (2)$$

其中 d 为碰撞检测半径, x, y, z 为球体骨料空间的坐标, r 为球体骨料半径。

若是单元形心可以满足上述距离判定式,即该形心落入任意骨料球体物理边界内,落入边界内的则将该网格单元的空间属性赋予骨料相,否则初步归类为基体相。

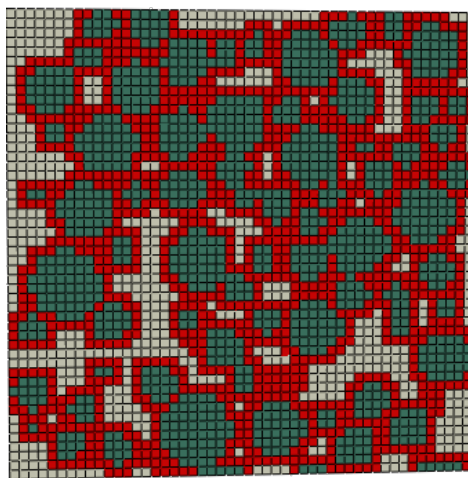
2.2.2. 基于节点连通的 ITZ 拓扑剥离算法

在实际的混凝土多尺度结构中,ITZ 表现为包裹骨料表面的薄层弱化带。为了避免几何偏置方法引发的网格畸变问题,本文采用了一种基于网格拓扑连通性的 ITZ 识别与剥离算法。

设置骨料单元节点集合为 S_{agg} 。对于任意初步归类为基体相的单元 e_{matrix} ,其节点集合记为 N_e 。通过布尔交集运算对基体单元进行二次拓扑判定,当满足下面公式的时候,即该单元与骨料相至少共享一个节点,则认定其在物理上紧邻骨料表面,并将其从基体相中剥离,重新进行划分为 ITZ 单元。具体划分情况如图 2 所示。

$$N_e \cap S_{agg} \neq \emptyset \quad (3)$$

其中 N_e 为基体相的单元节点集合, S_{agg} 为骨料单元节点集合。



注:灰色为基体,绿色为骨料,红色为 ITZ。

Figure 2. Voxelized mesh of concrete multiphase material

图 2. 混凝土多相材料的体素化网格

该算法在保持背景六面体网格结构不变的前提下，保证了 ITZ 层在三维空间中的连续性与封闭性，同时将其物理厚度控制在单个体素尺寸尺度内，为后续开展多尺度损伤热力学分析提供了稳定且一致的中尺度几何基础模型。

2.3. 基于能量正则化的 CDP 本构修正

在中尺度混凝土损伤模拟中，经典的弥散裂缝模型通常是因为应变局部化而产生的严重网格尺寸依赖性。为消除这一数值病态，本研究在定义基体与 ITZ 的受拉软化行为时，引入了基于 Hillerborg 断裂能的正则化方案。

2.3.1. 受拉软化的断裂能正则化

本构模型摒弃了传统的应力 - 应变 $\sigma - \epsilon$ 软化输入方式，转而采用应力 - 开裂位移 ($\sigma - w$) 关系。通过将单元特征长度 L_c 提取出本构方程，断裂能 G_f 被重新定义为软化曲线下的绝对面积积分[19]。

$$G_f = \int \sigma_t dw \quad (4)$$

其中 G_f 为断裂能， $\int \sigma_t dw$ 为应力 - 开裂危机积分。

基体的抗拉峰值应力设置为 3.5 MPa，极限开裂位移设定为 0.057 mm；而 ITZ 作为结构的初始薄弱区，其抗拉峰值被减少到了 2.5 MPa，极限开裂位移压缩至 0.04 mm [20]。这种基于纯位移驱动的正则化策略，保证在 34.3% 较高骨料体积分数、网格极度密集的状态下，裂缝带的能量耗散依然能够保持客观，不会随着网格密度的增加而发生病态的能量收敛丧失。

2.3.2. 损伤演化法则与塑性应变防倒退机制

在显式损伤动力学的计算中，如果损伤因子 d 的演化速率过快，将会违背热力学第二定律的耗散性非负原则，导致等效塑性应变 ϵ^{pl} 出现非物理的“返回(Snap-back)”现象，从而将会引起计算程序的强行终止。根据连续介质损伤力学，损伤状态下的等效塑性应变如公式(5)所示。

$$\epsilon^{pl} = \epsilon^{in} - \frac{d\sigma}{(1-d)E_0} \quad (5)$$

其中 ϵ^{pl} 等效塑形应变， ϵ^{in} 等效非弹性应变， d 为损伤因子， σ 为名义应力， E_0 初始弹性模量。

为保证 $\epsilon^{pl} > 0$ 的绝对单调递增，本文采用工程中常用的线性损伤演化模型，损伤因子定义如公式(6)所示。该模型形式简单，计算稳定性好，适用于定性分析损伤演化规律。

$$d = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{peak}} \quad (6)$$

其中 d 为损伤因子， σ 为名义应力， σ_{peak} 峰值应力。

修正后的 ITZ 损伤因子 d_c 在非弹性应变从 0.0004 演化至 0.008 的全周期内，实现了 0~0.85 的平滑映射。该修正方案彻底切断了高围压、高畸变状态下因刚度退化溢出而导致的隐性报错，为实现大位移下的损伤拓扑追踪提供了绝对的数值稳定性底座。

2.4. 显式动力学准静态加载与接触边界条件

由于高骨料体积分数下的 ITZ 的大规模损伤，很容易导致隐式求解器(Abaqus/Standard)在软化阶段发生迭代不收敛，本研究采用了 Abaqus/Explicit 显式动力学模块对混凝土的多相材料进行了模拟。然而，单轴压缩实验在本质上属于准静态过程，为了消除由显式积分引入的非物理惯性效应与瞬态干扰，本模

型在加载机制与能量上实施了严格的控制。

试件顶部与底部设置为刚体作为荷载加载板。模型底板完全固支($U_x = U_y = U_z = UR_x = UR_y = UR_z = 0$)，顶板仅保留轴向加载自由度($U_x \neq 0$)。刚性垫板与混凝土上下端面之间定义为“硬接触”，切向采用罚函数(Penalty)摩擦公式，摩擦系数设定为 0.1 [21]，以限制端部单元的非物理滑移[22]。

3. 宏观力学响应与模型有效性检验

3.1. 准静态响应的能量校验准则

使用显式动力学求解准静态问题的绝对先决条件是：系统内产生的动能必须微乎其微。本研究对全过程的能量守恒方程进行了严密的后台监控。依据准静态力学评判标准，强行约束模型在计算全周期的绝大部分时间内，其整体动能($ALLKE$)不得超过内能($ALLIE$)的 5% [23]。曲线图 3 所示。

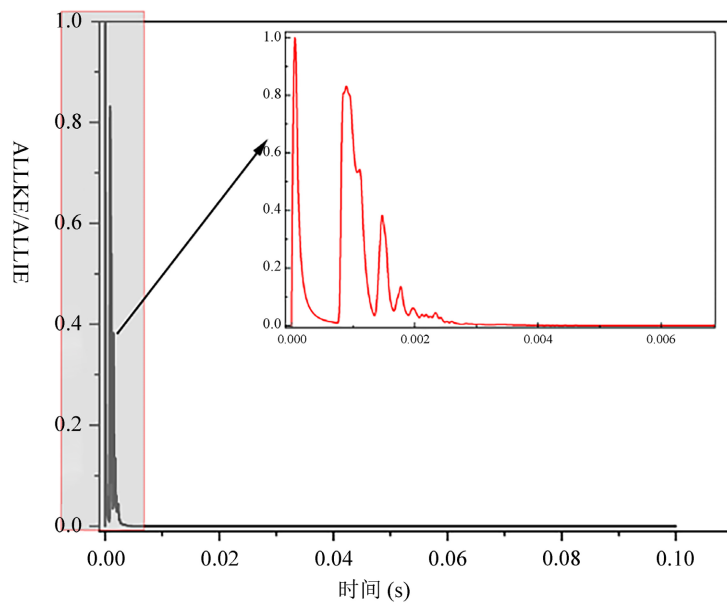


Figure 3. Energy curves of $(ALLKE)/(ALLIE)$
图 3. $(ALLKE)/(ALLIE)$ 能量曲线图

3.2. 宏观应力 - 应变响应

为了验证所建立的体素化混凝土多相有限元模型的真实度，对体积分数为 $V_f = 26.0\%$ 的模型作为代表性分析的案例，在不同随机种子下提取的单轴压缩后提取其宏观应力应变曲线，如图 4 所示。

三种随机种子(66, 101, 304)的上升段曲线几乎重合，计算得到的弹性模量偏差小于 2%，说明随机种子对材料弹性响应无显著影响。三种随机种子的峰值应力分别为 33.4 MPa、33.6 MPa 和 33.7 MPa，最大偏差仅为 0.9%；峰值位移均在 0.10 mm 附近，偏差小于 3%，表明随机种子对强度和峰值位移的影响可以忽略。随着随机种子的变化，曲线略有差异，但残余强度的最大偏差也仅为 4.2%，且整体软化趋势保持一致，未出现明显的“随机种子依赖性”伪软化现象。上述结果说明，随机种子对结果的偏差非常有限。本文后续均采用随机种子 101 进行分析。

在荷载刚开始加载的时候，试件的宏观力学曲线表现为近似线弹性的应力 - 应变关系，该行为表明了该多相材料体系内部没有发生明显的损伤演化现象；随着荷载的持续增加，基体及界面区域中的微裂纹开始出现并逐步增加，使得宏观曲线进入了非线性发展的非线性阶段，最终达到破坏[24]。

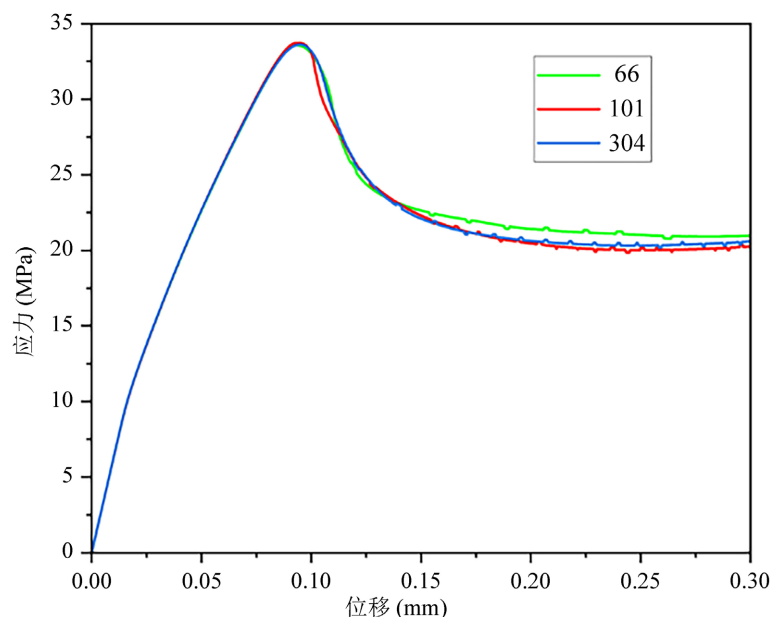


Figure 4. Macroscopic stress-strain responses of concrete specimens with a volume fraction $V_f = 26.0\%$ under different random seeds

图 4. 体积分数 $V_f = 26.0\%$ 的混凝土试件在不同随机种子下的宏观应力 - 应变响应

3.3. 宏观损伤程度的热力学能量表征

在非均质中尺度混凝土体系的演化损伤解析中, 传统的验证方法一般采用刚度退化标量(SDEG)来判断宏观损伤程度。然而, 对于体素化的混凝土中尺度模型, 模型内部包括了大量的绝对弹性且不会发生损伤的骨料, 并且高 SDEG 区域往往会呈现出极度空间局部化的特征。若是强行对整个模型的 SDEG 进行体积平均, 从而会导致严重的“稀释效应”, 同样会对真实的断裂程度进行了掩盖, 从而会对连续力学的网格客观性会产生违背[25]。

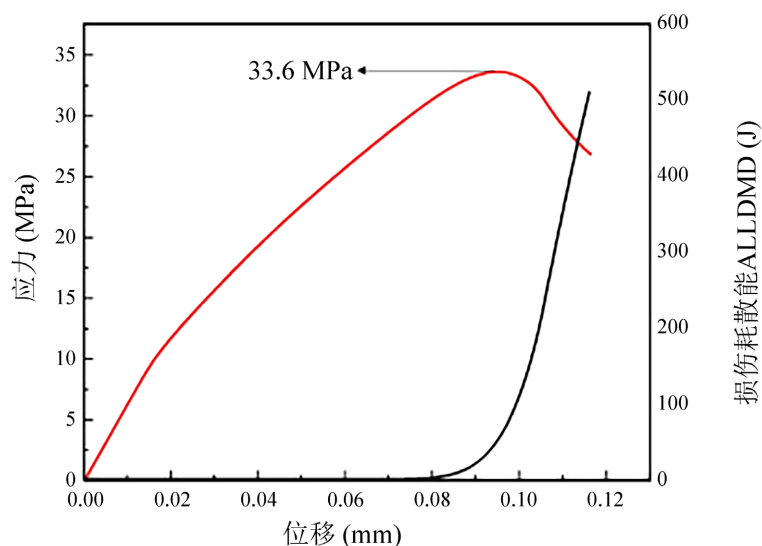


Figure 5. Comparison of macroscopic thermodynamic energy

图 5. 宏观热力学能量比照

为了避免由于局部变量平均化带来的数值误差,本研究摒弃了传统的单元状态变量的统计,进而引入了严格遵循热力学第一及第二定律的“损伤耗散能(ALLDMD)”作为评价宏观损伤演化的表征结果。采用 ALLDMD 不仅可以客观地反映该模型在不同加载时刻的真实物理破坏状态,更是展现除了多相介质的几何结构异性,这为后续的区别 ITZ 与基体之间的破坏机制提供了更为准确的结构基础。宏观损伤程度和热力学表征如图 5 所示。

3.4. 竞争破裂机制

在中尺度混凝土受压破坏的过程中,基体与界面过渡区 ITZ 之间始终存在着一条关于微裂纹扩展的竞争机制。为了可以定量地表明骨料的体积分数 V_f 对于这种竞争机制的直接影响,本研究采用了“界面损伤主导比”,这一热力学的评价方式。

R_{ITZ} 定义为该模型在任何时刻的演化下,由 ITZ 单元耗散的断裂能 $ALLDMD_{ITZ}$ 占系统总的损伤 $ALLDMD_{Total}$ 的绝对比例[26],具体如下所示。

$$R_{ITZ} = \frac{ALLDMD_{ITZ}}{ALLDMD_{Total}} \times 100\% \quad (7)$$

需要强调的是,本模型为了保证能量不被污染,并没有引入网格删除,当曲线进入峰值后的深度软化阶段时,使得高度损伤的基体单元($d_c \rightarrow 1$)会受到周围骨料的强烈的几何约束,从而会使得模型产生显著的侧向约束,以及体积锁死效应。该现象会导致宏观应力-应变曲线诱发非物理的残余承载。为了避免此类数值效应对于后续研究造成的干扰,本研究在所有宏观响应分析的损伤中,均仅考虑从加载点到宏观承载力(P_{max})的峰前阶段。通过该截断的方法,可以保证后续提取的损伤与能量耗散数据保持良好的一致性。

4. 结果与讨论

4.1. 宏观受压响应及骨料体积分数效应

在 3.1 模型真实度的基础上,本小节更进一步地对于不同体积分数的骨料进行了宏观单轴压缩分析。图 1~7 展示了不同的骨料体积分数($V_f = 17.43\% \sim 34.36\%$)下混凝土模型进行单轴压缩的宏观应力-应变曲线。整体来看,各组混凝土模型表现出了与混凝土宏观抗压相符的演化特征,由初始化近似弹性阶段到微裂纹稳定扩展所引起的非线性阶段。数值模拟的结果表明,不同的体积分数下的宏观抗压强度整体位于 31.8 MPa 至 41.6 MPa 区间内,该结果表明了该中尺度模型在合理范围内对于混凝土强度变化趋势的反应[27]。

更进一步地对于曲线的特征分析可以得出,随着骨料体积分数的增加,对于该模型的抗压承载能力具有显著的提升作用。当 V_f 从 17.43% 增加至 34.36% 时,该混凝土模型的极限抗压强度,表现出了阶梯式的增长趋势。这一结果表明,随着骨料体积分数的增加,该混凝土的内部体系逐渐形成了更加连续且稳定的承载框架,进一步的使整体的抗压强度进行了提高[28] [29]。

除了单一的强度提升以外,随着骨料体积分数的增加还对峰值的变形能力产生了一定的影响。该现象表明了,随着 V_f 的增加,试件在达到极限承载状态的位移从大约 0.095 mm 延长到了约为 0.105 mm。这个现象表明了高密度骨料的对于裂纹扩展有一定的阻碍作用。在骨料逐渐致密的情况下,微裂纹在扩展过程中需要不断地发生偏移和转折,从而形成了更加曲折蜿蜒的裂纹路径。这种由于骨料致密而形成的复杂的裂纹扩展,在一定程度上对于宏观裂纹的贯通进行了缓解,使该混凝土结构能够在达到极限荷载前能够承受更大的整体变形[30]。不同体积分数的抗压曲线入图 6 所示。

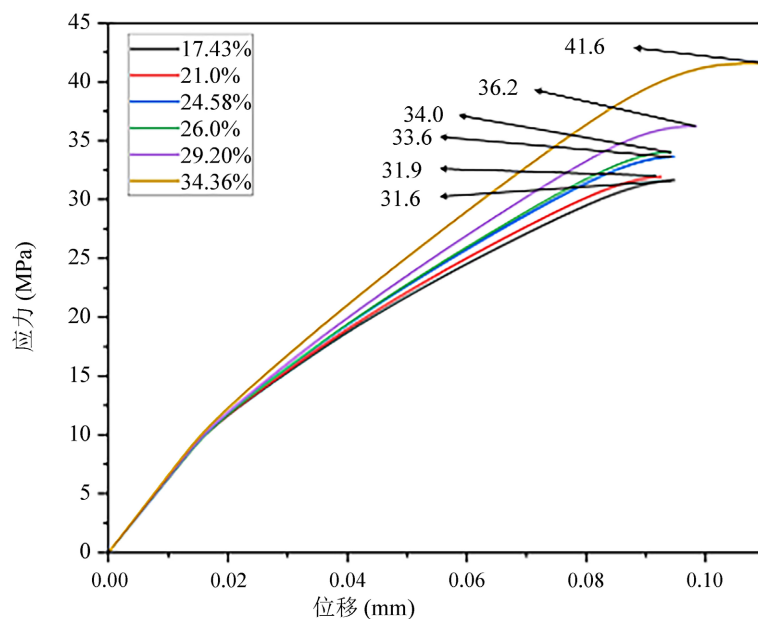


Figure 6. Macroscopic stress-strain responses of mesoscale concrete specimens with different aggregate volume fractions under uniaxial compression

图 6. 不同骨料体积分数中尺度混凝土试件在单轴压缩条件下的宏观应力 - 应变响应

4.2. 损伤耗散速率与裂纹萌生

如之前的描述, 累积的总耗散能($ALLDMD$)在接近极限状态时, 呈现出高度的非线性。然而, 为了能够精准地确定系统裂纹的初始萌生时刻, 传统的累积能量或者宏观应力曲线往往都不够敏感。因此, 本文对各个模型的总损伤耗散能随着位移进行变化的曲线进行了求导($d(ALLDMD)/du$), 从而获取系统总的损伤耗散曲线, 对起裂的物理特征就行放大。

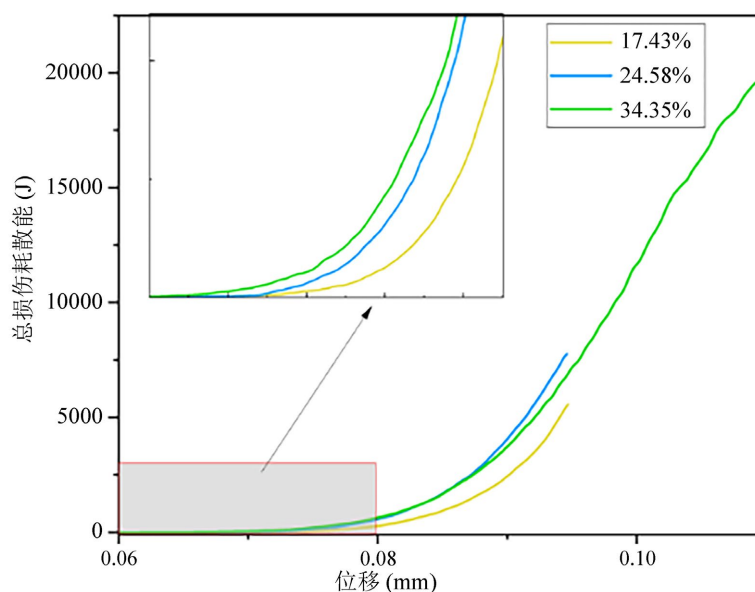


Figure 7. Evolution law of total damage dissipation energy under different aggregate volume fractions

图 7. 不同骨料体积分数下总损伤耗散能的演化规律

如图 7 所示, 曲线脱离 X 轴的起条点为宏观损伤的正式萌生。选择了低密度(17.43%), 中密度(24.58%) 以及高密度(34.35%) 骨料体积分数为代表, 进行了系统的研究分析, 通过对比不同体积分数的导数演化情况, 可以发现, 随着骨料密度的增加, 对于裂纹的萌生具有明显的加速效应。

对于骨料体积分数为 $V_f = 17.43\%$ 时, 由于混凝土内部存在广阔的缓冲空间, 使得他的损伤耗散速率在很长的一段位移内始终毫无波澜, 在位移达到 0.072 mm 时, 才开始出现了实质性的能量爆发。然而, 当体积分数达到 34.36% 时, 基体内部被骨料大量填充, 其能量起跳点进行了显著的左移, 在位移达到 0.067 mm 处就开始进入了损伤耗散的能量爆发期。相比于低密度组骨料混凝土模型, 随着骨料密度的逐渐提高, 使得混凝土模型的宏观起裂阶段被进行了提前。

这一基于微分提取的热力学证据表明: 随着骨料密度的不断提高, 刚性骨料网络提高了混凝土的最终承载力, 但是使 ITZ 的间距变得狭窄从而引发了更为苛刻的局部集中应力。这种强烈的细观拓扑导致了材料在加载早期过早地结束了混凝土的弹性蓄能时期, 迫使了微观界面的损伤提前萌生。

4.3. 骨料致密化驱动的主导机制转移

宏观承载力的增加与裂纹萌生的提前, 仅仅是骨料体积分数增加导致致密化带来的宏观影响。为了从热力学的底层揭示该模型崩溃瞬间的损伤分配规律, 本小节在基于极限承载力 (P_{max}) 状态下, 对于绝对耗散能数据的提取, 对于骨料空间的拓扑驱动竞争裂缝转移机制。

如图 8 所示, 在绝对能量维度, 随着骨料体积分数 (V_f) 从 17.43% 增长到 34.35%, 混凝土模型在接近 P_{max} 状态时累计的系统总损伤耗散能 ($ALLDMD$) 与界面耗散能 ($ALLDMD_{ITZ}$) 均表现出了极其显著的非线性增长情况。这也同样印证了前文 4.1 节所述, 在极其密集的刚性骨料网络使得微裂纹与扩展过程中产生了强烈的连接, 模型内部必须要消耗更为庞大的断裂表面能, 才能使得这张高密度的阻带网进行撕裂。

然而, 真正的破裂机制的发生是“相变”的, 在系统内部能量耗散的比例是极具倾斜的。通过观察图 8 中的界面损伤主导比例的演化曲线可以发现, 在低骨料密度下 ($V_f = 17.43\%$), R_{ITZ} 仅仅维持在约为 45% 的水平。此时, 骨料间距存在着较大的间距, 从而使得薄弱的 ITZ 区域被广阔的砂浆基体所隔开, 微裂纹的扩展呈现出的是“基体 - ITZ 的随机穿插”的混合竞争模式, 基体单元对于损伤耗散承担超过了一半。

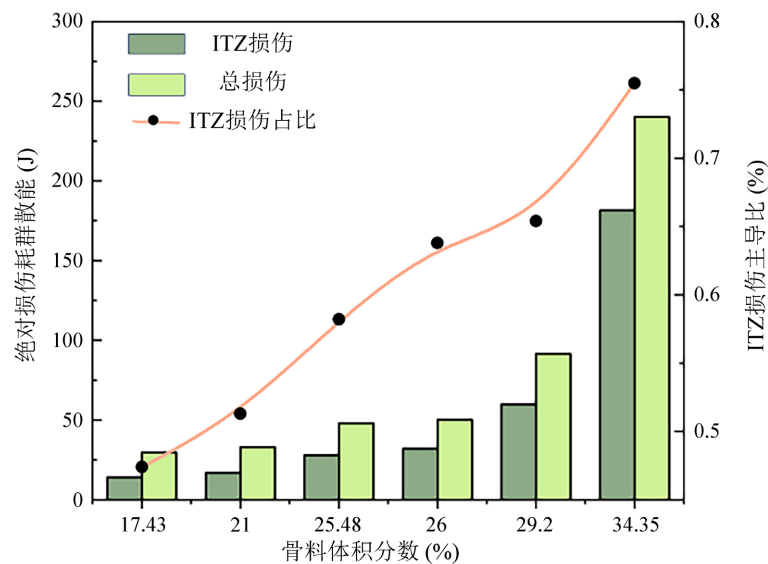


Figure 8. Damage dissipation energy and interface damage domination of mesoscale concrete at ultimate bearing capacity

图 8. 极限承载力中尺度混凝土损伤耗散能与界面损伤主导

随着 V_f 的不断增大, R_{ITZ} 的曲线发生了非常惊人的非线性跃升。然而当 V_f 达到 34.35% 的时候, R_{ITZ} 已经突破了 75% 的绝对主导值。这一数据的急剧提升, 提供了强有力的热力学证据: 在高密度的骨料条件下, 极其狭窄的骨料间距引发了 ITZ 的网格空间连通。该模型在寻找“最小阻力”的断裂路径时, 不在需要穿透强硬的砂浆基体, 而是直接沿着首尾相连, 且极度薄弱的 ITZ 区域发生了大规模的崩塌。

结果表明, 随着骨料体积分数的不断增加, 骨料致密化在微观拓扑层面的破坏机制引发了裂缝的根本性转移 - 将低密度的“基体 - 界面协同损伤”这一情况改变了高密度下的“界面连通主导机制”。这也是高体积骨料分数在宏观表现出较高的极限承载能力, 但在微观层面却更早地开始起裂, 并且呈现出了高界面脆性的根本原因[31]。

5. 结论

(1) 随着骨料体积分数 V_f 从 17.43% 增加至 34.35%, 使得骨料逐渐形成更加致密的刚性承载骨架, 从而导致宏观峰值应力由 31.8 MPa 提升至 41.6 MPa。这一结果表明骨料网络的结构强化效应能够有效提高材料整体承载能力。

(2) 基于损伤耗散能演化速率 $d(ALLDMD)/du$ 的识别结果表明, 骨料密度增加会强化骨料 - 基体界面附近的局部应力集中。当 $V_f = 17.43\%$ 时, 宏观损伤萌生位移约为 0.072 mm; 当 $V_f = 34.35\%$ 时, 该值提前至约 0.067 mm, 说明高密度骨料分布会缩小骨料间距并促进微裂纹的早期激活。

(3) 通过提取峰值状态下的绝对损伤耗散能并计算界面损伤占比 R_{ITZ} , 发现随着骨料体积分数增加, 系统损伤逐渐向界面区域集中。当 $V_f = 17.43\%$ 时, 界面损伤占比约为 45%, 破坏表现为基体与界面共同参与的随机损伤扩展; 而当 $V_f = 34.35\%$ 时, 界面损伤占比提高至约 75%, 界面成为主要能量耗散区域。

(4) 随着骨料体积分数增加, 骨料间距显著减小, 大量 ITZ 区域在空间上逐渐接近并形成潜在的连通路径, 使裂纹更容易沿界面区域扩展。这种界面连通结构会改变裂纹扩展路径, 并导致破坏模式由基体参与型破坏逐渐转变为界面主导型破坏。

基金项目

课题由中辽宁省教育厅科技创新团队专项基金(编号: LJ222512026001)、辽宁省自然科学基金(编号: 2022-MS-165)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 20250037)共同资助。

参考文献

- [1] 王叹, 余敏, 徐礼华. 粗骨料超高性能混凝土高温热工参数细观模拟与离散性分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(9): 54-65.
- [2] 赵卫平. 早龄期三维随机骨料混凝土劈裂抗拉数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(5): 114-126.
- [3] Ouyang, H. and Chen, X. (2020) 3D Meso-Scale Modeling of Concrete with a Local Background Grid Method. *Construction and Building Materials*, **257**, Article ID: 119382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119382>
- [4] Caballero, A., López, C.M. and Carol, I. (2006) 3D Meso-Structural Analysis of Concrete Specimens under Uniaxial Tension. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **195**, 7182-7195. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.05.052>
- [5] Huang, Y., Yang, Z., Ren, W., Liu, G. and Zhang, C. (2015) 3D Meso-Scale Fracture Modelling and Validation of Concrete Based on In-Situ X-Ray Computed Tomography Images Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Solids and Structures*, **67**, 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.ijsoistr.2015.05.002>
- [6] 杨彝, 章子华, 周春恒, 等. 基于三维扫描的带肋钢筋-混凝土界面黏结失效精细有限元分析[J]. 工程力学, 2024, 41(z1): 215-221.
- [7] The Laws of Proportioning Concrete | Transactions of the American Society of Civil Engineers. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TACEAT.0001979>
- [8] Xu, L., Jiang, L., Shen, L., Dong, Y. and Ren, Q. (2022) 3D Mesostructure Generation of Fully-Graded Concrete Based

- on Hierarchical Point Cloud and Aggregate Coarsening. *Construction and Building Materials*, **350**, Article ID: 128790. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128790>
- [9] Qiu, W., Fu, S. and Ye, J. (2019) Auto-Generation Methodology of Complex-Shaped Coarse Aggregate Set of 3D Concrete Numerical Test Specimen. *Construction and Building Materials*, **217**, 612-625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.109>
- [10] 朱天宇, 陈忠辉, 张令非, 等. 粒径计算方法对细观混凝土数值建模的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2): 106-113, 145.
- [11] Wu, Z., She, W., Zhang, J., Tang, J., Cao, Y. and Da, B. (2023) 3D Mesoscale Modelling of Steel Fiber-Reinforced Aggregate Concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*, **257**, Article ID: 108550. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108550>
- [12] Qiu, W., Ueda, T., Fu, S., Han, Y., Wang, J. and Ye, J. (2023) Meso-Scale Computational Modeling of the Fracture of Concrete with Complex Shaped Aggregates under the Self-Restraint Stress. *Composite Structures*, **303**, Article ID: 116267. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116267>
- [13] Yang, L., Li, K., Hu, X., Peng, Z., Liu, Q. and Shi, C. (2024) Mesoscopic Discrete Modeling of Compression and Fracture Behavior of Concrete: Effects of Aggregate Size Distribution and Interface Transition Zone. *Cement and Concrete Composites*, **147**, Article ID: 105411. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105411>
- [14] 管家伟. 基于 Python 算法的混凝土球形骨料三维细观数值模拟方法[J]. 山西建筑, 2024, 50(13): 78-82.
- [15] Dong, Z., Quan, W., Ma, X., Li, X. and Zhou, J. (2023) Asymptotic Homogenization of Effective Thermal-Elastic Properties of Concrete Considering Its Three-Dimensional Mesostructure. *Computers & Structures*, **279**, Article ID: 106970. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2022.106970>
- [16] Ahmadi, A., Wersäll, C. and Larsson, S. (2024) Impact of Particle Arrangement and Model Dimensions on DEM Modeling of High-Speed Railway Ballasted Tracks in 2D and 3D. *Transportation Geotechnics*, **47**, Article ID: 101272. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101272>
- [17] Tan, Z., Guo, F., Leng, Z., Yang, Z. and Cao, P. (2024) A Novel Strategy for Generating Mesoscale Asphalt Concrete Model with Controllable Aggregate Morphology and Packing Structure. *Computers & Structures*, **296**, Article ID: 107315. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107315>
- [18] 贾昆仑. 不同骨料混凝土抗侵蚀性能试验及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2024.
- [19] Park, J., Kweon, S. and Park, K. (2024) Gurson-Cohesive Modeling (GCM) for 3D Ductile Fracture Simulation. *International Journal of Plasticity*, **175**, Article ID: 103914. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.103914>
- [20] 张田. 基于 Zhang-Hou 损伤计算模型的不同强度混凝土裂缝贯通与损伤演化规律[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(3): 124-136.
- [21] Zhou, G. and Xu, Z. (2023) 3D Mesoscale Investigation on the Compressive Fracture of Concrete with Different Aggregate Shapes and Interface Transition Zones. *Construction and Building Materials*, **393**, Article ID: 132111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132111>
- [22] Elkady, A. (2022) Response Characteristics of Flush End-Plate Connections. *Engineering Structures*, **269**, Article ID: 114856. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114856>
- [23] Lin, Q., Zhao, Y., Pan, W. and Liu, Y. (2023) An Improved 3D Model of Composite Bolted Joints with Detailed Thread Structure and Progressive Damage Analysis of Realistic Tightening Process. *Composite Structures*, **315**, Article ID: 117016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117016>
- [24] Bombarde, D.S., Silla, L.N., Gautam, S.S. and Nandy, A. (2024) A Comprehensive Comparative Review of Various Advanced Finite Elements to Alleviate Shear, Membrane and Volumetric Locking. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **31**, 1979-2013. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10050-x>
- [25] Hou, W., Gai, Y., Zhu, X., Wang, X., Zhao, C., Xu, L., et al. (2017) Explicit Isogeometric Topology Optimization Using Moving Morphable Components. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **326**, 694-712. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.021>
- [26] Sadrinouch, M., Atzema, E.H., Perdahcioglu, E.S. and van den Boogaard, A.H. (2017) Numerical and Experimental Validation of a New Damage Initiation Criterion. *Journal of Physics: Conference Series*, **896**, Article ID: 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/896/1/012080>
- [27] Jin, L., Li, J., Yu, W. and Du, X. (2021) Size Effect Modelling for Dynamic Biaxial Compressive Strength of Concrete: Influence of Lateral Stress Ratio and Strain Rate. *International Journal of Impact Engineering*, **156**, Article ID: 103942. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103942>
- [28] Zhao, H., Zhang, L., Wu, Z., Liu, A. and Imran, M. (2023) Aggregate Effect on the Mechanical and Fracture Behaviours of Concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*, **243**, Article ID: 108067. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.108067>

-
- [29] Ren, Z. and Li, D. (2024) Uniaxial Compressive Behavior Study of Normal-Strength Concrete Using Waste Steel Slag Aggregate through Laboratory Tests and Numerical Simulation. *Journal of Building Engineering*, **85**, Article ID: 108720. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108720>
- [30] Yao, X., Lu, M., Guan, J., Han, A., Wang, H., Li, L., *et al.* (2022) Development of a Design Method for the Fracture Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete by Considering Steel Fiber Characteristics and Aggregate Gradation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **121**, Article ID: 103486. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103486>
- [31] Hong, S., Ren, H., Hou, D., Dong, B. and Fan, S. (2023) Investigating Mechanism for Mortar-Porous Aggregate Interfacial Bond Improvement Based on Coupled XCT-DVC Analysis. *Journal of Building Engineering*, **80**, Article ID: 107952. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107952>