

纤维增强混凝土三维细观建模方法研究

牟时安, 刘德稳

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月20日

摘要

本研究针对纤维增强混凝土多相复合、细观结构复杂的特点, 为提高其力学性能预测与机理分析的准确性, 开展了三维细观建模方法研究。基于Python对Abaqus进行二次开发, 实现了混凝土骨料、纤维、砂浆及界面过渡区的参数化生成与空间随机投放, 建立了可反映材料真实三维细观结构的数值模型。开展了单轴压缩有限元模拟, 结果表明, 裂缝始于界面过渡区并逐渐向砂浆扩展, 最终形成“V”形破坏形态, 与试验现象一致; 纤维应力分布具有显著的空间非均匀性, 高应力纤维集中于裂缝路径, 有效发挥桥接与增强作用。所建模型克服了二维简化的局限性, 能够更真实模拟材料在三维空间中的损伤演化与破坏过程。

关键词

三维细观模型, 纤维混凝土, 有限元

Study on 3D Mesoscale Modeling Methods for Fiber-Reinforced Concrete

Shian Mu, Dewen Liu

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: February 18, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 20, 2026

Abstract

This study focuses on the development of a three-dimensional mesoscale modeling method for fiber-reinforced concrete, addressing its multi-phase composition and complex mesostructure to enhance the accuracy of mechanical performance prediction and mechanistic analysis. Through secondary development of Abaqus using Python, parametric generation and spatial random distribution of concrete aggregates, fibers, mortar, and the interfacial transition zone were achieved, establishing a numerical model that reflects the true three-dimensional mesostructure of the material.

Uniaxial compression finite element simulations were conducted, and the results indicate that cracks initiate in the interfacial transition zone and gradually propagate into the mortar, ultimately forming a “V”-shaped failure pattern consistent with experimental observations. The stress distribution in fibers exhibits significant spatial heterogeneity, with highly stressed fibers concentrated along the crack path, effectively contributing to bridging and reinforcement. The developed model overcomes the limitations of two-dimensional simplifications, enabling a more realistic simulation of damage evolution and failure processes in three-dimensional space.

Keywords

3D Mesoscale Model, Fiber-Reinforced Concrete, Finite Element

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

纤维增强混凝土(Fiber Reinforced Concrete, FRC)概念提出于上世纪中叶,其在改善混凝土脆性、提升韧性、控制裂缝和增强耐久性方面的卓越功效已得到全球工程界的广泛认可。近三十年来,伴随中国“一带一路”、“新基建”等国家战略的深入推进,基础设施建设迈向超大跨、超高、重载与极端环境服役的新阶段,对混凝土材料的综合性能提出了更严峻的考验。传统混凝土抗拉强度低、韧性差的固有缺陷,在复杂应力与恶劣环境耦合作用下,易诱发微裂纹并导致结构性能劣化甚至灾难性破坏,成为重大工程安全的潜在威胁[1]。纤维增强混凝土,特别是通过协同效应实现性能优势互补的混杂纤维混凝土(HFRC),被视为破解这一困境的关键材料创新,已成功应用于大跨桥梁、超高层建筑、防护工程及深海隧道等标志性工程。

然而,纤维增强混凝土性能的优越性源于其复杂的多相、多尺度复合材料协同作用[2]。从宏观尺度来说,它是均质的工程材料;但从细观乃至微观尺度剖析,它是由水泥砂浆(或混凝土)基体、不同粒径的骨料、随机分布的纤维、孔隙、界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)以及初始缺陷组成的复杂异质体系[3]。传统的宏观试验研究虽能表征材料的最终力学响应,却难以直接观测和量化这些内在的、动态的细观力学过程,导致对纤维作用机理的理解停留在半经验层面,制约了材料按性能需求进行精准设计与优化。

为深入揭示纤维增强混凝土的内在作用机理并实现其性能的可靠预测,数值模拟方法凭借其可重复、低成本、可观察内部变化过程具备独特优势[4]。通过建立能够反映材料真实细观组成与结构的数值模型,并赋予各相材料合适的本构关系与破坏准则,研究者得以在计算机中复现材料的受力、变形、开裂直至破坏的全过程,从而定量分析各组分的作用、裂纹的萌生与扩展路径、以及能量耗散机制。

细观数值模拟的发展轨迹,深刻受限于计算科学与硬件技术的演进。早期受计算机计算能力的制约,研究多集中于二维模型。二维模型将复杂的三维空间问题简化为平面问题,极大地减少了单元数量,降低了建模与计算成本[5]。然而,二维模型无法真实反映纤维和骨料在三维空间中的随机分布与取向,简化的平面分布难以体现实际的空间几何与拓扑关系;在模拟损伤破坏时,二维模型仅能模拟一个假定平面内的裂缝发展,无法刻画裂纹在三维实体内的曲折延伸、分叉、贯通以及真正的断裂面形成过程;对于纤维的桥接作用,其贡献主要依赖于纤维在垂直于裂纹面方向上的投影长度和取向角,这在二维简化模型中难以得到体现。

随着高性能计算机、并行计算技术和先进算法的发展, 计算能力已不再是不可逾越的障碍, 三维细观数值模拟能够更真实地构建骨料的三维形态与空间堆积, 生成符合实际统计分布的骨料体系; 能够更准确地模拟纤维在三维空间中的随机位置与取向, 以及其与骨料、基体之间的空间几何关系; 最重要的是, 能够完整地模拟裂纹从三维空间内某一点萌生, 沿复杂路径扩展、交汇, 最终形成立体断裂网络的全过程[6]。这为深入研究纤维增强混凝土在复杂应力状态、动态冲击、疲劳荷载下的破坏机理提供了可能。

2. 模型的建立

2.1. 三维球体骨料的生成与投放

在混凝土三维细观数值模拟中, 骨料模型的生成与投放是建立可靠计算模型的基础与关键步骤。本研究使用 abaqus 结合 python 进行二次开发, 编写了可以进行参数化建模, 自行投放骨料, 最终在 abaqus 中生成包含砂浆、骨料、界面过渡区模型的 python 脚本。投放骨料时采用先大后小的策略, 优先投放粒径大的骨料。因为大骨料空间占位大, 可调整余地小, 先固定它们的位置有利于提高整体投放成功率和最终体积分数。在 abaqus 中生成的骨料模型如图 1 所示。

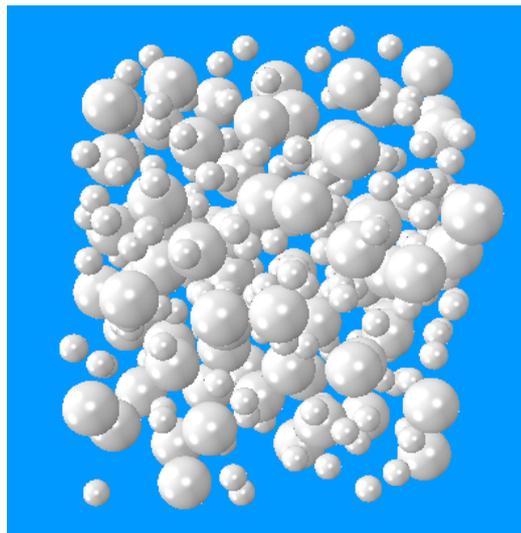


Figure 1. Aggregate model
图 1. 骨料模型

整体投放算法流程可概括如下:

- 1) 输入试件尺寸、骨料目标体积分数、界面过渡区厚度。
- 2) 按粒径从大到小的顺序, 依次投放每个粒径区间内骨料:
 - a) 生成一个随机中心坐标, 进行边界判定;
 - b) 与所有已放置骨料进行入侵判定;
 - c) 若未发生重叠, 则投放成功, 加入已放置骨料集合;
 - d) 若发生重叠, 则在重新生成坐标进行尝试。
- 3) 重复步骤 2, 直到骨料达到目标总体积分数。
- 4) 输出所有成功投放球体的中心坐标和半径, 并在 abaqus 中生成模型。

根据上述流程所生成的混凝土三维细观模型如图 2 所示。

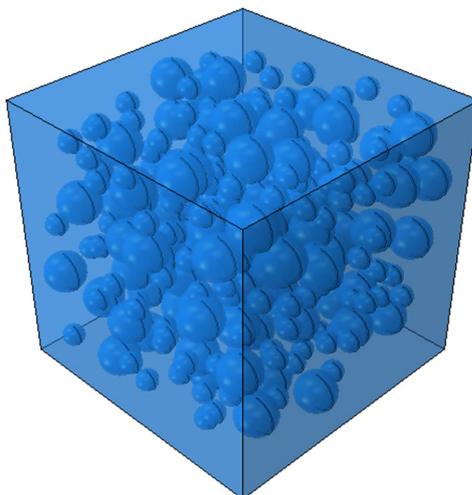


Figure 2. Three-dimensional microscopic model of concrete
图 2. 混凝土三维细观模型

2.2. 纤维生成与投放

生成纤维时, 调用 python 中的随机函数, 生成一个随机点和两个随机角度, 然后根据球坐标系公式可计算出另一个端点, 于是我们就得到了一根空间位置随机的纤维。在建立三维纤维混凝土模型的过程中, 主要难点在于判断纤维与骨料的干涉情况。若简单的计算骨料球心到纤维所在直线的距离, 只要这个距离大于骨料半径, 就认为纤维与骨料未发生干涉, 反之则发生干涉, 那么实际上纤维可投放的区域将大大缩减。原因在于当纤维恰好指向骨料时, 哪怕纤维没有与骨料接触, 但球心到此纤维所在直线距离小于骨料半径, 仍会被认为发生了接触。

为了提高纤维的投放效率, 我们将纤维向量单位化, 通过向量点积计算球心到纤维线段所在直线的投影, 判断垂足位置; 利用向量叉积计算球心到纤维直线的垂直距离, 如此以来, 结合垂足位置、纤维端点坐标以及球心到纤维直线的距离, 就可以得出球心到纤维的最短距离, 提高纤维的投放效率。将纤维的生成与投放算法加入三维细观模型脚本中, 所生成的纤维混凝土三维模型如图 3、图 4 所示。

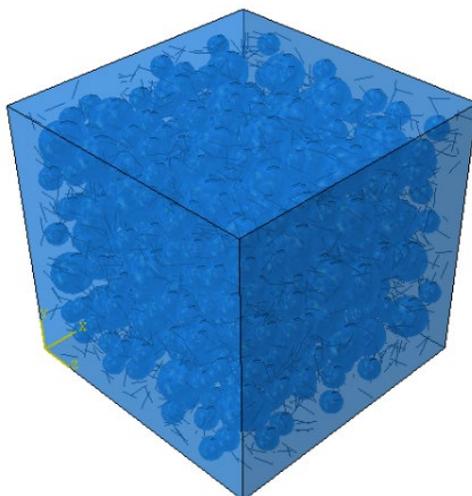


Figure 3. Three-dimensional model of fiber-reinforced concrete
图 3. 纤维混凝土三维模型

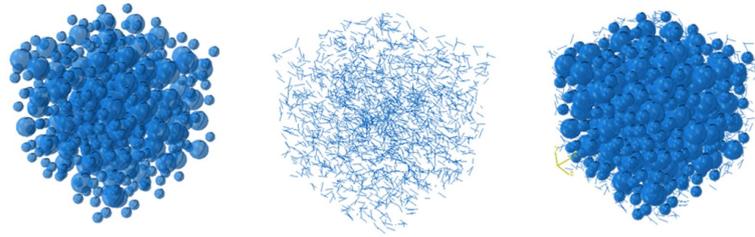


Figure 4. Components of fiber reinforced concrete 3D model
图 4. 纤维混凝土三维模型各组分

3. 材料参数

由于混凝土细观模型中, 骨料强度显著高于其他组分, 于是可以假设骨料为线弹性体, 将弹性模量设定为 70 GPa, 泊松比取 0.16。考虑到砂浆组分和界面过渡区在细观结构上的复杂异质性, 本研究采用 abaqus 中的混凝土塑性损伤模型来表征砂浆和界面过渡区在单轴荷载作用下的非线性力学响应与损伤演化规律。

abaqus 中的混凝土损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity)是用于模拟混凝土、纤维混凝土等准脆性材料在复杂荷载下力学行为的主流本构模型。它通过耦合损伤力学与塑性理论, 能够描述材料刚度退化与不可恢复变形两大关键特征。混凝土损伤塑性模型的核心原理是将总应变分解为弹性应变与塑性应变, 并引入拉伸损伤因子与压缩损伤因子来量化刚度衰减。模型采用等效塑性拉应变与压应变来表征损伤演化, 并定义了拉压强度比、双轴受压与单轴受压极限强度比等参数以控制屈服面形状。

该模型能较好地模拟混凝土在单调、循环及动力荷载下的典型行为, 包括拉压强度差异、刚度退化、循环卸载时的刚度恢复。因其在 abaqus 中易于定义与计算稳定, CDP 模型被广泛应用于建筑、桥梁等混凝土结构的非线性分析中, 是研究纤维混凝土宏观力学性能的常用数值工具。

纤维的弹性模量往往高于砂浆和界面过渡区, 所以将纤维视为理想弹性体, 以线纤维的方式插入模型中。

骨料和纤维材料参数如表 1 所示。

Table 1. Material parameters
表 1. 材料参数

细观组分	弹性模量/GPa	泊松比	压缩强度 f_c /MPa	拉伸强度 f_t /MPa
骨料	70	0.16	-	-
纤维	69.7	0.3	-	1226

砂浆与界面过渡区的部分本构关系如表 2、表 3 所示。

Table 2. Mortar constitutive relationship
表 2. 砂浆本构关系

压缩应力/MPa	非弹性应变	压缩损伤因子	拉伸应力/MPa	开裂应变	拉伸损伤因子
20.9	0	0	3.5	0	0
35.1	0.0003	0.0912	2.22	0.00011	0.32656
35.1	0.00031	0.096	1.75	0.00015	0.44131
34.5	0.00051	0.1444	1.43	0.00019	0.5241

续表

33.2	0.00073	0.1964	1.2	0.00023	0.58556
31.5	0.00097	0.2487	1.04	0.00027	0.63266
29.5	0.00122	0.299	0.92	0.0003	0.6698
27.5	0.00147	0.3461	0.82	0.00033	0.69982
25.6	0.00172	0.3894	0.74	0.00036	0.72456
23.8	0.00196	0.4289	0.68	0.00039	0.74532
22.1	0.0022	0.4647	0.49	0.00054	0.81347
20.6	0.00243	0.4972	0.39	0.00068	0.8515
19.2	0.00266	0.5264	0.32	0.00083	0.87592
18	0.00288	0.553	0.28	0.00097	0.89302
16.9	0.0031	0.577	0.25	0.00111	0.9057
15.9	0.00331	0.5988	0.22	0.00125	0.91551
15	0.00352	0.6187	0.21	0.00139	0.92334
14.1	0.00372	0.6368	0.19	0.00153	0.92974

Table 3. Constitutive relationship of interface transition zone
表 3. 界面过渡区本构关系

压缩应力/MPa	非弹性应变	压缩损伤因子	拉伸应力/MPa	开裂应变	拉伸损伤因子
11.9	0	0	3	0	0
17.3	0.00007	0.0353	2.6	0.00006	0.14937
20	0.00029	0.1101	2.11	0.00012	0.29137
20	0.00036	0.1294	1.73	0.00017	0.40006
19.9	0.00051	0.1726	1.45	0.00022	0.48163
19.6	0.00068	0.2148	1.25	0.00026	0.54394
19.1	0.00085	0.2551	1.09	0.00031	0.59271
18.5	0.00103	0.2933	0.98	0.00035	0.63178
17.8	0.00121	0.3291	0.88	0.00038	0.66372
17.2	0.00139	0.3626	0.81	0.00042	0.69032
16.5	0.00158	0.3936	0.74	0.00046	0.7128
15.9	0.00176	0.4224	0.54	0.00064	0.78765
15.2	0.00194	0.4491	0.43	0.00081	0.8301
14.6	0.00212	0.4739	0.36	0.00098	0.8576
14	0.0023	0.4968	0.32	0.00115	0.87696
13.5	0.00248	0.518	0.28	0.00132	0.89137
13	0.00265	0.5377	0.26	0.00149	0.90255
12.5	0.00283	0.5561	0.24	0.00165	0.91149
12	0.003	0.5732	0.22	0.00182	0.91882

4. 有限元分析

对建立的纤维混凝土三维细观模型进行单轴压缩有限元分析, 所得结果如图 5 所示。

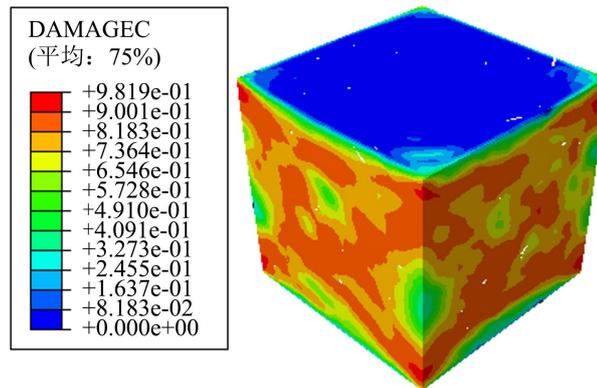


Figure 5. Compression damage diagram
图 5. 压缩破坏损伤图

对压缩损伤云图进行剖求, 并追踪时程变化, 如图 6 所示。

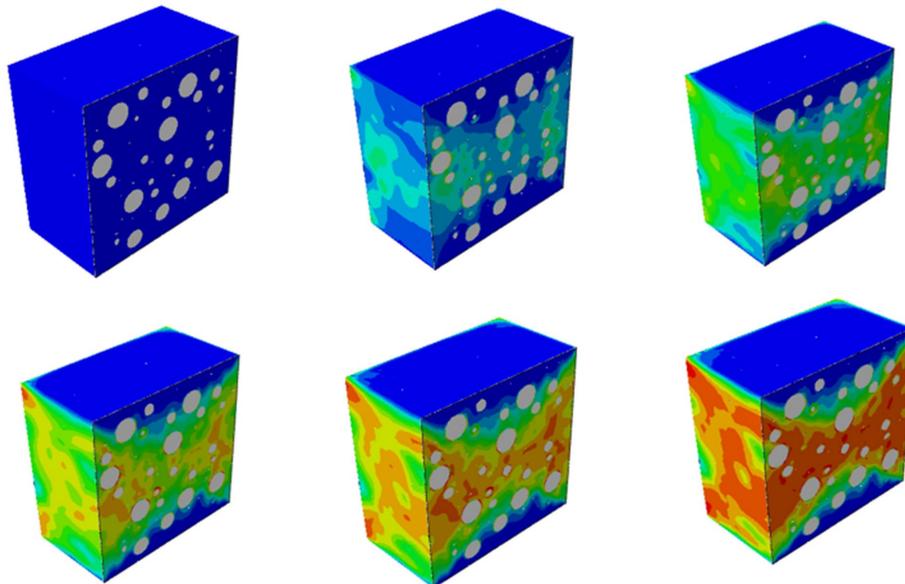


Figure 6. Time history variation of compression failure
图 6. 压缩破坏时程变化图

从图 6 可以看出, 裂缝从界面过渡区开始萌生, 随着压缩试验的进行, 逐渐在砂浆中发展, 直至贯通破坏, 最终破坏呈现“V”形, 与实际试验中混凝土压缩破坏形态一致, 验证了模型的可靠性。图 7 为纤维的 *mises* 应力云图从图中可以看出, 纤维颜色从深蓝到红色分布不均, 表明不同位置、不同取向的纤维所承担的荷载差异极大。这符合细观尺度下应力传递的随机性特征。高应力(红、黄色)纤维主要位于潜在的宏观裂缝或剪切带路径上, 是抵抗破坏、提供残余强度的关键; 而低应力(蓝色)纤维所处区域基体损伤较小, 贡献有限。结果与压缩破坏时程图响应一致, 较为合理地反映了在单轴压缩荷载下, 纤维作为增强相在混凝土基体中的非均匀、不连续的受力状态。

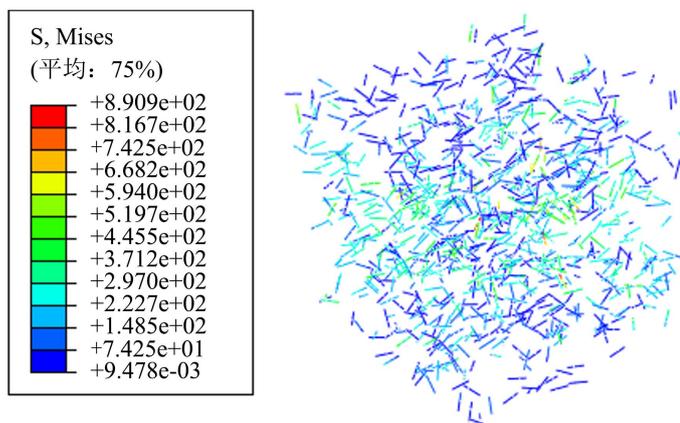


Figure 7. Fiber mises stress cloud map
图 7. 纤维 mises 应力云图

5. 结论

本研究使用 Python 编程语言对 abaqus 进行二次开发, 建立了纤维混凝土三维细观模型, 并进行单轴压缩有限元模拟。结论如下:

1) 本研究所编写的 python 脚本可以很好地实现参数化自动骨料投放, 界面过渡区生成, 砂浆剖切直至在 abaqus 中建立混凝土三维细观模型; 编写纤维 - 骨料位置判断函数, 在纤维投放过程中准确判断骨料与纤维是否发生干涉, 提高了纤维投放效率。

2) 通过对模型进行单轴压缩有限元分析, 模拟结果显示裂缝从界面过渡区萌生, 逐步向砂浆中扩展并最终形成“V”形破坏模式, 与实际混凝土压缩试验的破坏形态吻合。同时, 纤维应力云图表明纤维受力具有显著的空间非均匀性, 高应力纤维主要分布于裂缝路径, 说明纤维在抑制裂缝扩展、提供残余强度方面发挥作用, 验证了模型在揭示细观破坏机制方面的可靠性。

3) 建立了可靠的纤维混凝土三维细观模型, 能够更真实地反映骨料与纤维的空间分布、取向及相互作用, 克服了二维模型在几何与破坏模式简化方面的不足。为系统研究纤维混凝土在复杂应力、动态荷载下的损伤演化、裂缝扩展及纤维增强机理提供了数值途径。

参考文献

- [1] 马莹, 袁群, 冯凌云, 等. 圆柱体径向劈拉法检测橡胶混凝土抗拉强度试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(10): 139-144.
- [2] 徐国平. 聚丙烯纤维橡胶混凝土力学特性及其冻融性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [3] Wriggers, P. and Moftah, S.O. (2006) Mesoscale Models for Concrete: Homogenisation and Damage Behaviour. *Finite Elements in Analysis and Design*, 42, 623-636 <https://doi.org/10.1016/j.finel.2005.11.008>
- [4] 霍彦霖. 混杂纤维应变硬化水泥基复合材料的细观数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [5] 程想, 曹俊鑫, 王玲玲, 等. 基于细观模型的混凝土力学性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(1): 27-32+37.
- [6] 都思哲, 张淼, 张玉等. 基于 CT 图像三维重建的高温下再生混凝土孔隙特征研究[J]. 材料导报, 2024, 38(5): 218-228.