

基于随机骨料模型的混凝土界面过渡区研究分析

徐 智

格乐大学国际学院，工程系，泰国 曼谷

收稿日期：2025年4月28日；录用日期：2025年5月20日；发布日期：2025年5月31日

摘 要

由于宏观模型难以揭示混凝土内部结构、组成与宏观力学性能之间的关系，本研究建立随机骨料细观模型进行有限元单轴受压试验模拟。通过Python语言编写程序进行前处理，生成随机凸多边形骨料，并实现骨料的自动随机投放，建立随机骨料模型。在有限元软件Abaqus中，基于塑性损伤模型对随机骨料模型进行单轴压缩模拟，追踪试件压缩破坏的损伤发展过程。发现裂缝总是从界面过渡区开始发生，绕开骨料在砂浆基质中发展至试件贯通破坏。并定量地给出了同一投放率下，骨料粒径对界面过渡区含量的影响。

关键词

随机骨料模型，界面过渡区，裂缝

Research and Analysis of Concrete Interface Transition Zone Based on Random Aggregate Model

Zhi Xu

Department of Engineering, International College, Krirk University, Bangkok, Thailand

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Due to the difficulty of macroscopic models in revealing the relationship between the internal structure, composition, and macroscopic mechanical properties of concrete, this study establishes a

random aggregate microscopic model for finite element uniaxial compression test simulation. Write a program in Python language for preprocessing, generate random convex polygon aggregates, and implement automatic random feeding of aggregates to establish a random aggregate model. In the finite element software Abaqus, a uniaxial compression simulation was conducted on a random aggregate model based on a plastic damage model to track the damage development process of the compression failure of the specimen. Cracks are always found to occur from the interface transition zone, bypassing the aggregate and developing into the mortar matrix until the specimen penetrates and fails. And quantitatively provided the influence of aggregate particle size on the content of interface transition zone at the same feeding rate.

Keywords

Random Aggregate Model, Interfacial Transition Zone, Crack

Copyright © 2025 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

混凝土作为建筑业中使用最为广泛的材料之一，因其资源丰富、原料易得且成本低廉，已经成为当前全球用量最大的建筑材料。它凭借独特的物理和化学特性，在现代建筑中取得了难以替代的地位。据估计，世界范围内每年约 200 亿吨原材料被用于生产混凝土[1]。混凝土的主要原料包括水泥、砂石和水，这些材料来源广泛，加工工艺相对简单，使得混凝土在经济性和实用性上具备显著优势。正因如此，混凝土被广泛应用于各类工程结构，如超高层建筑、跨海大桥、水利大坝以及核电站等。

混凝土的广泛应用不仅得益于其经济性和易获取性，还与其卓越的性能密切相关。它具有良好的抗压强度、耐久性和可塑性，能够适应各种复杂的工程需求。然而，随着社会经济的不断发展，混凝土工程结构正朝着大体积和大跨度的方向迈进，这一趋势对混凝土的强度、变形性能以及耐久性等性能指标提出了更高的要求，也迫使研究人员对混凝土力学性能进行更深入探索。

混凝土是一种典型的非均质复合材料，主要由骨料、硬化水泥砂浆、界面过渡区、孔隙及裂纹等组成。由于混凝土内部结构的不均匀性，其宏观力学行为表现出显著的非线性力学行为。相关学者长期致力于研究混凝土从损伤鉴定到完全不稳定破坏的全过程，研究表明，细观结构中的非线性特征是导致工程材料复杂宏观行为的主要原因，且其内部结构与宏观力学行为及耐久性之间存在密切联系[2]。细观力学方法通过充分考虑混凝土材料及其力学性质的非均匀性，能够在细观尺度下利用数值方法模拟混凝土试件的裂缝扩展过程及破坏形态，从而直观地探究试件的损伤断裂破坏机理[3]。常见的细观模型有格构模型、M-H 模型、随机粒子模型、随机力学特性模型和随机骨料模型，由于随机骨料模型能够更真实地模拟混凝土细观组分的实际分布[4]，所以本研究将采用随机骨料模型对界面过渡区进行研究分析。

界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)是混凝土细观成分中的薄弱区域，低加载速率条件下界面的力学性能对混凝土损伤破坏模式和宏观力学性能有显著影响[5]。在混凝土浇筑过程中，由于骨料表面附近的限制，水泥颗粒在骨料周围的排列往往较为松散，导致该区域的孔隙率和水灰比显著高于远离骨料的水泥石基体。这种差异形成了所谓的界面过渡区。从本质上讲，ITZ 是一种区别于基体的特殊区域，其结构特征表现为孔隙率较高，可以视为一种具有显著孔隙特征的近场砂浆材料。研究表明，骨料

表面附近的水泥颗粒数量较基体内部显著减少,这使得 ITZ 区域的孔隙结构更为复杂。当界面厚度约为 20 微米时, ITZ 的孔隙率可高达 48%, 远高于基体中的孔隙含量。这一现象表明, ITZ 的结构特性对混凝土的整体性能具有重要影响[6]。

2. 模型的建立

2.1. 随机骨料模型

在混凝土结构中,骨料的形状和结构特性对材料的力学性能具有显著影响。进行细观有限元分析时,尽管圆形骨料模型在生成效率方面具有显著优势,并且能够避免编写复杂二次开发程序的需求,但实际工程中的骨料通常呈现为扁平的卵石状或具有多个棱角的碎石形态。因此,将骨料简化为凸多边形形状能够更贴近实际工程情况。所以,本研究采用凸多边形骨料模型作为主要研究对象。通过 Python 程序随机生成凸多边形骨料模型,能够有效模拟实际骨料的几何特征,从而为混凝土的力学性能分析提供更可靠的数值模型。

关于凸多边形骨料的生成,本研究基于极坐标法编写程序,先随机生成一个粒径范围内的圆,然后在圆边界上随机选取若干个点,作为骨料的顶点,顺时针连接这些点,生成凸多边形骨料,其中顶点的位置通过极角进行控制。图 1 为在 Python 中所生成的凸七边形骨料示意图。

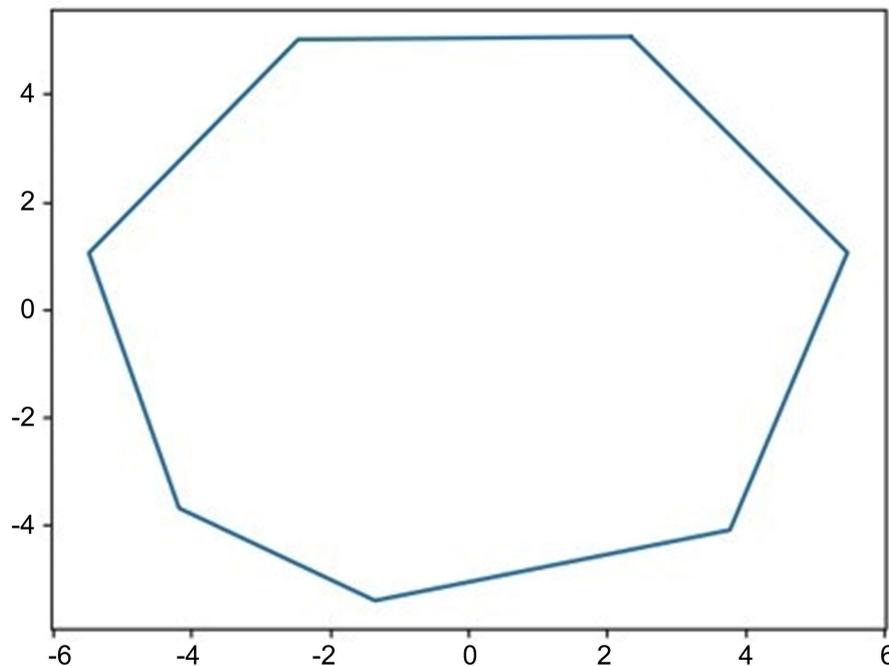


Figure 1. Convex heptagonal aggregate
图 1. 凸七边形骨料

混凝土骨料随机位置的确定需满足各骨料不相互接触,且有一定的最小距离,本研究中限制骨料之间的最小距离为一个界面过渡区单元厚度。骨料投放过程中,记录每一个骨料的顶点坐标,判断新投放的骨料是否与已投放的骨料重叠,若发生重叠则重新投放,直至该骨料落在试件内未被占据的空白区域,即可进行下一个骨料的投放。完成投放率要求的所有骨料投放后,沿着骨料边界生成一圈界面过渡区。所生成的随机骨料模型如图 2 所示。

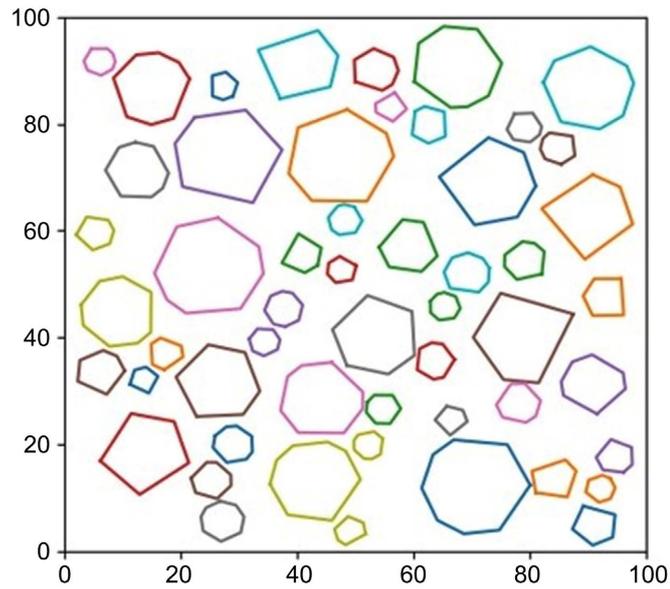


Figure 2. Random aggregate model
图 2. 随机骨料模型

2.2. 有限元模型

本研究采用 Abaqus 对随机骨料模型进行有限元模拟。首先在 Abaqus 中建立一个 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的二维试件，然后对该试件进行网格划分，保存 inp 文件。编写 Python 程序读取 inp 文件信息，将随机骨料模型坐标信息映射到单元网格节点上。根据随机骨料模型中骨料、砂浆、界面过渡区的空间坐标信息，定义对应单元为各相材料，完成有限元模型的建立。

图 3 为建立的有限元模型，图 4 展示了有限元模型中各相细观组分分布情况，从左至右分别为骨料相、界面过渡区相、砂浆相。

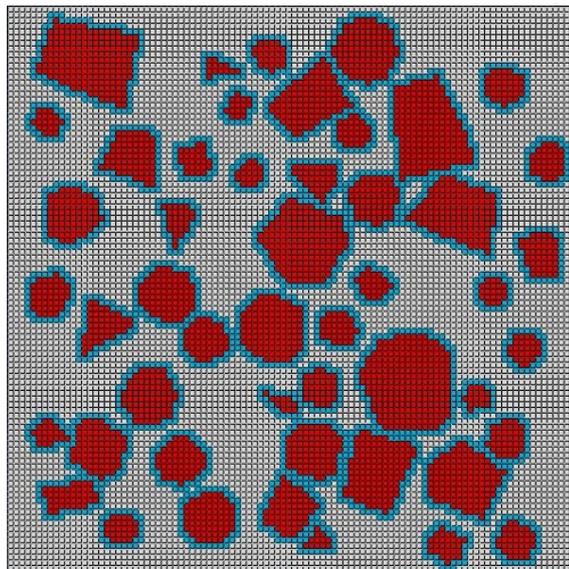


Figure 3. Finite element model
图 3. 有限元模型

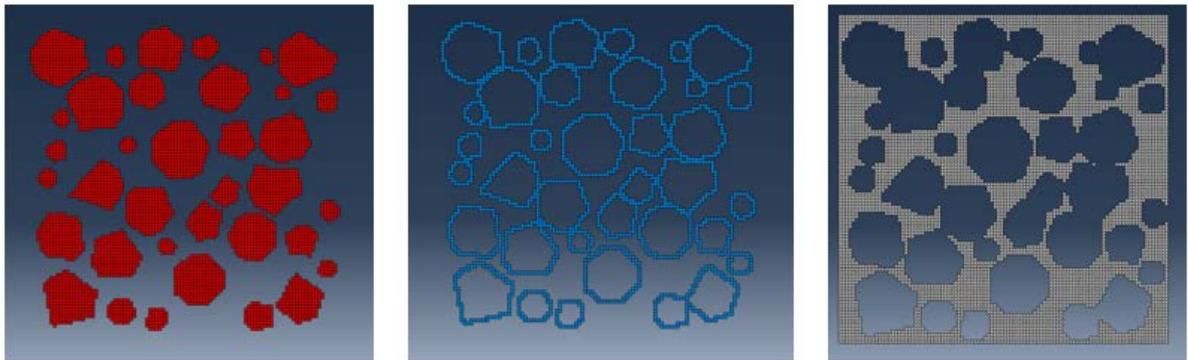


Figure 4. Microscopic components of finite element model

图 4. 有限元模型微观组分

3. 材料参数与算例分析

3.1. 材料参数

在普通混凝土的细观力学模型中，天然粗骨料相较于砂浆基体及界面过渡区表现出显著更高的强度特性，因此通常不会因贯穿裂缝引发断裂破坏。基于这一特性，本研究将粗骨料简化为线弹性材料单元，其弹性模量设定为 70 GPa，泊松比取 0.16。对于水泥砂浆体系的建模，考虑到其细观结构的复杂非均匀性所导致的宏观应力 - 应变曲线在峰值应力后呈现软化特征，本研究采用 ABAQUS 平台中的混凝土塑性损伤模型(Concrete Damaged Plasticity Model)来表征砂浆在单轴拉压荷载作用下的非线性力学响应与损伤演化规律。

混凝土塑性损伤模型专为模拟准脆性材料的复杂力学行为而设计，该模型通过引入损伤因子这一关键参数，可有效表征材料在外部荷载作用下因累积损伤造成的刚度退化现象，同时捕捉不可逆塑性变形特征。这一双重机制使得模型能够精确模拟包括应力强化段和应变软化段在内的完整非线性应力 - 应变关系。该模型具有广泛的荷载适应性，能够准确反映单调加载、动态冲击以及循环往复荷载等多种复杂工况下的材料响应特性。

混凝土塑性损伤模型基于介质连续性假设，通过引入各向同性的损伤因子来表征混凝土在外部荷载下的刚度退化，如式(1)所示。

$$\sigma = (1-d) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (1)$$

在循环荷载作用机制方面，混凝土塑性损伤模型特别考虑了裂缝动态演化对材料刚度的影响：当荷载由拉伸转为压缩时，受压刚度随裂缝闭合过程实现完全恢复(刚度恢复因子取 1)；相反地，受拉刚度的恢复受到拉伸荷载历程中微裂纹发展的制约，即使荷载转为压缩状态仍保持不可逆特性(刚度恢复因子设为 0)。这种差异化的刚度恢复机制为准确模拟混凝土类材料在复杂荷载路径下的滞回行为提供了理论基础。混凝土塑性损伤模型中，材料的力学行为受塑性变形和损伤因子控制，其单轴应力 - 应变曲线可以转化为应力 - 塑性应变曲线，如式(2)、式(3)所示。

$$\sigma_t = \sigma_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl}, \bar{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_t) \quad (2)$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl}, \bar{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_c) \quad (3)$$

选用的各组分材料参数如表 1 所示。

Table 1. Microscopic material parameters
表 1. 细观材料参数

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	-	-
砂浆	25	0.2	35	3.5
ITZ	18	0.2	20	3.0

3.2. 算例分析

为验证本文中随机生成的骨料模型算法的有效性，以截面尺寸为 100 mm 的混凝土模型为例，生成骨料含量为 40% 二维随机骨料模型进行有限元单轴压缩试验模拟。在 Abaqus 中设置下部底座，将试件置于底座之上，创建上部压头，采用罚接触，赋予压头位移荷载进行加载，模拟真实的单轴压缩实验工况。使用 Abaqus/Standard 模块进行隐式静力学计算求解。所得混凝土试件轴压破坏情况如图 5 所示。

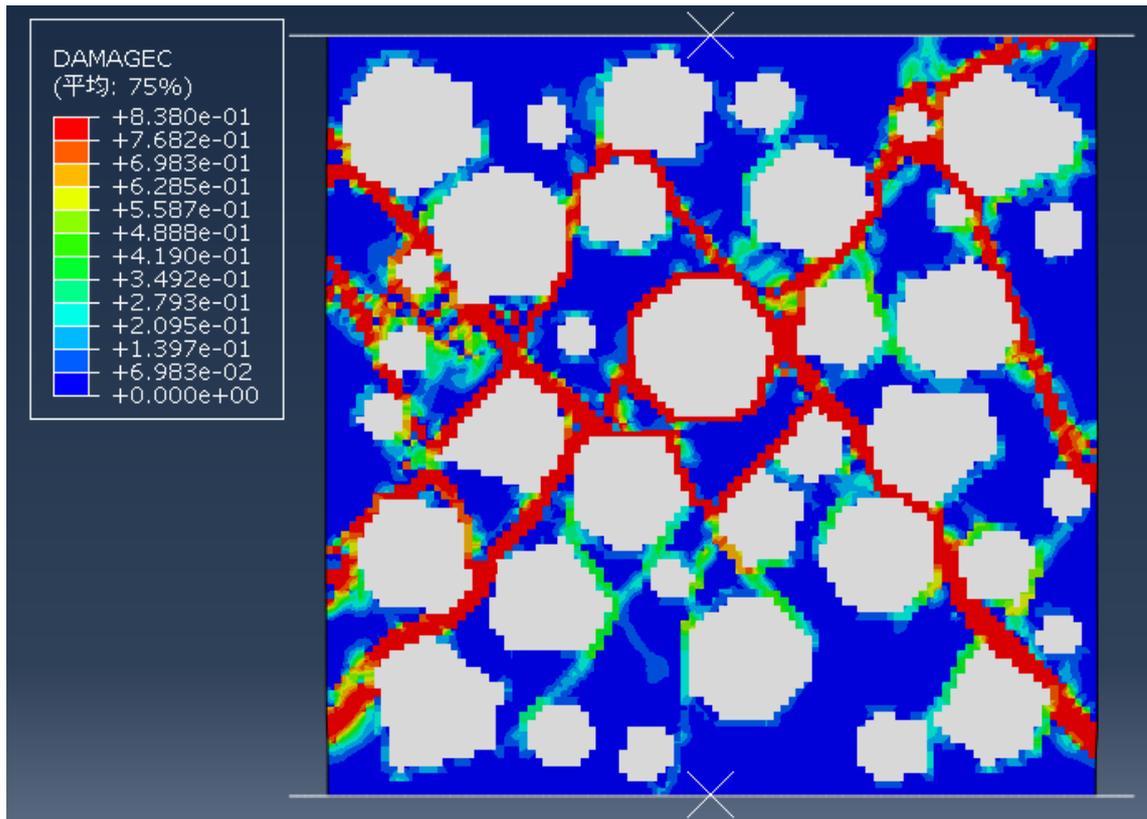


Figure 5. Axial compression failure diagram
图 5. 轴压破坏图

普通混凝土的骨料抗压强度及弹性模量显著高于砂浆和界面过渡区，破坏主要发生在砂浆及界面过渡区中，试件整体呈现锥形破坏，与实际混凝土立方体抗压破坏特征相符。图 6 为有限元模拟所得轴压的应力 - 应变关系，与试验所得应力 - 应变关系趋势一致[7]。验证了模型破坏模式的可靠性，表明模拟结果能够真实反映混凝土在受压过程中的力学行为。

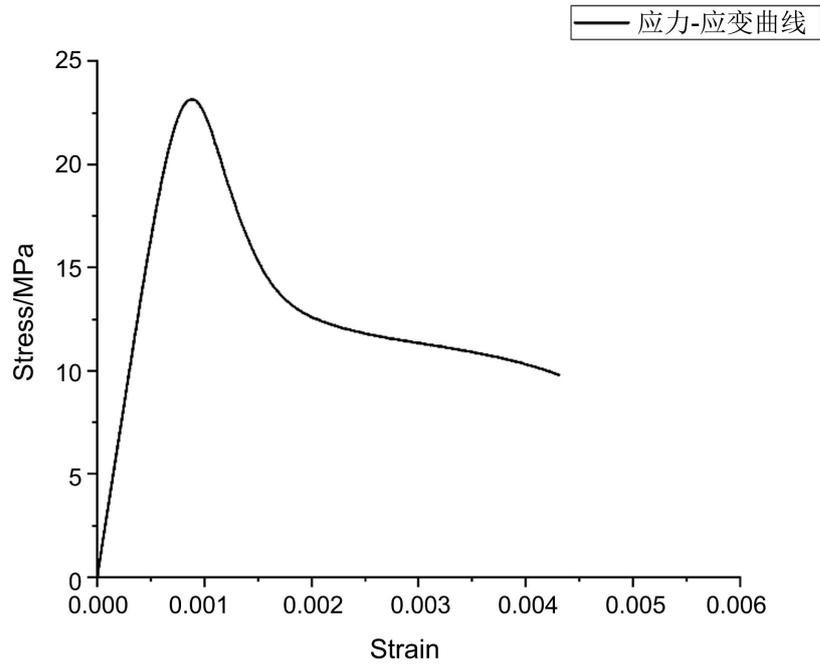


Figure 6. Stress-strain relationship
图 6. 应力 - 应变关系

从图 7 轴压破坏时程图可以看出，在加载过程中，模型中心处最早开始出现裂缝，裂缝起始于界面过渡区，并在骨料密集的应力集中区域最初出现。随后，裂缝绕过骨料，沿截面以约 45°斜向扩展并向两侧延伸，最终在对角线处形成贯通破坏。裂缝的萌生与破坏与界面过渡区密切相关，可以认为界面过渡区是混凝土各相细观组分中的强度控制相，极大地影响着结构的宏观力学响应。

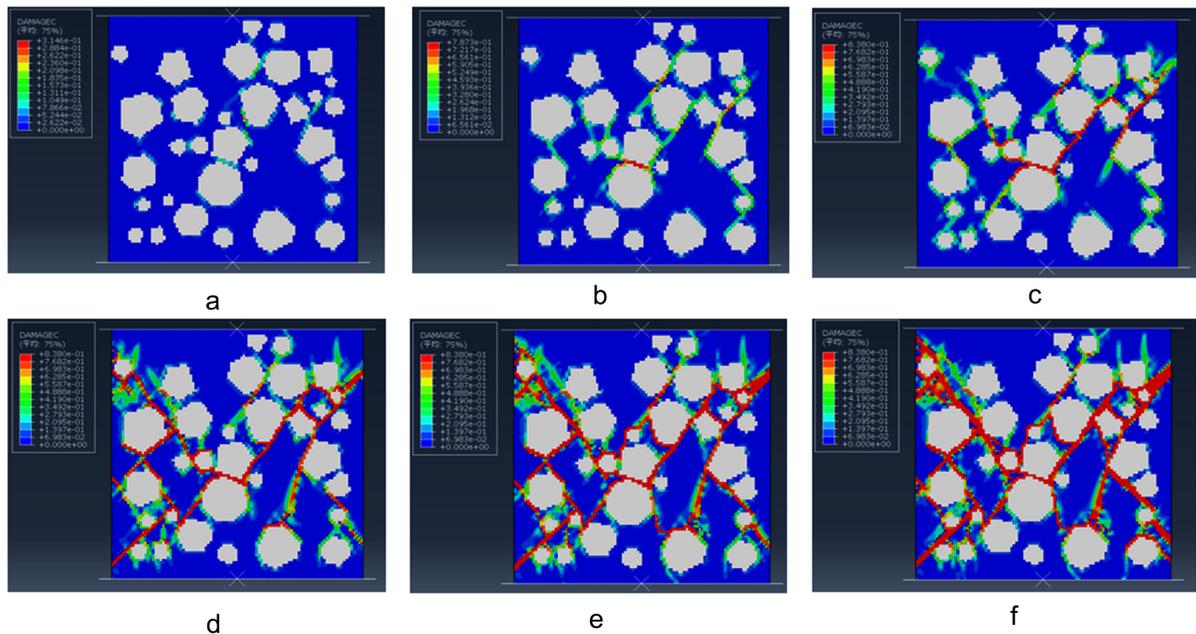


Figure 7. Axial compression time history chart
图 7. 轴压时程图

4. 骨料粒径对 ITZ 生成的影响

ITZ 的形成是由于水泥颗粒在骨料周围的排列较为松散,难以紧密堆积,从而形成了孔隙率高、强度低的薄弱区域。ITZ 的含量对结构的力学性能有着明显的影响,骨料的 ITZ 的形成起到关键作用。接下来将通过随机骨料模型分析骨料粒径对 ITZ 生成的影响。

建立投放率为 30% 的随机骨料模型,分别投放不同粒径的骨料,每种粒径投放三组,统计每一组 ITZ 的含量。各粒径 ITZ 分布情况如图 8 所示,统计结果记录至表 2。

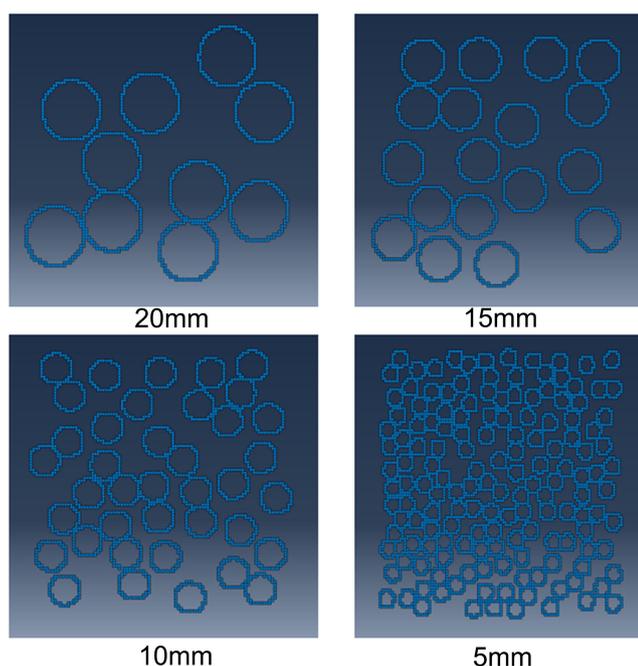


Figure 8. ITZ distribution of different particle sizes
图 8. 各粒径 ITZ 分布

Table 2. Statistical table of interface transition zone content

表 2. 界面过渡区含量统计表

试件编号	界面过渡区单元	平均值
20-1	838	832
20-1	830	
20-3	828	
15-1	1128	1131
15-2	1129	
15-3	1136	
10-1	1669	1672
10-2	1680	
10-3	1668	
5-1	3363	3350
5-2	3355	
5-3	3332	

可以发现,随着骨料粒径的不断减小,ITZ的数量随之增加。对于这个现象,现以圆形骨料为例给出定量解释。

由于界面过渡区是沿着骨料边界所生成,则可以在数学模型中将界面过渡区含量表示为骨料的周长。设大圆面积为 S ,半径为 R ,周长为 C ;小圆面积为 s ,半径为 r ,周长为 c 。 $S = ns$,表示一个大圆的面积为 n 个小圆面积之和, $n > 1$ 。

$$\pi R^2 = n\pi r^2 \quad (4)$$

即

$$R = r\sqrt{n} \quad (5)$$

且

$$r = \frac{c}{2\pi} \quad (6)$$

则有

$$C = 2\pi R = c\sqrt{n} \quad (7)$$

可知,一个大圆边长与 n 个小圆总边长之间的关系是:

$$c_{\text{总}} = nc = C\sqrt{n} \quad (8)$$

式8不仅定性地指明同一投放率下,粒径越小ITZ含量越多,还定量地给出:投放率不变的前提下,试件中一个大骨料的面积是一个小骨料的 n 倍时,小骨料试件中ITZ的数量为大骨料试件的 \sqrt{n} 倍。与表2中试验数据相符,以骨料粒径分别为15 mm和10 mm的试件数据为例进行验证:

粒径为15 mm的圆形骨料面积为56.25 m²,粒径为10 mm的圆形骨料面积为25 m², $56.25 \div 25 = 2.25$,即 $n = 2.25$, $\sqrt{n} = 1.5$ 。粒径15 mm试件中ITZ单元平均含量为1131,粒径10 mm试件中ITZ单元平均含量为1672, $1672 \div 1131 = 1.48$,较 $\sqrt{n} = 1.5$ 误差仅1.33%,理论推导与试验结果相符。

5. 结论

本研究使用Python编程语言进行前处理,建立了考虑界面过渡区的随机骨料模型,在Abaqus中模拟了单轴压缩试验,追踪混凝土试件压缩破坏发展的过程。结论如下:

(1) 本研究所建立的随机骨料模型破坏特征与真实试验一致,模拟得到的应力-应变曲线试验结果趋势相同,可以有效地模拟混凝土材料的非线性力学表现。

(2) 混凝土材料在细观层面的破坏总是从界面过渡区开始发生,在砂浆基质中发展延伸,直至最终破坏。界面过渡区相可以认为是混凝土细观组分中的强度控制相。

(3) 在同一投放率下,骨料粒径越小,界面过渡区含量越多,并且定量地给出试件中一个大骨料的面积是小骨料的 n 倍时,小骨料试件中界面过渡区含量为大骨料试件的 \sqrt{n} 倍。

参考文献

- [1] Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S.K., Nayak, S. and Dutta, S.C. (2017) A Critical Review and Assessment for Usage of Recycled Aggregate as Sustainable Construction Material. *Construction and Building Materials*, **131**, 721-740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- [2] 裴建中, 樊泽鹏, 薛斌, 等. 沥青工程材料的颗粒物视域: 理论、方法与进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 121-136.

-
- [3] 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.
 - [4] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2014.
 - [5] 杜修力, 金浏. 界面过渡区对混凝土动态力学行为影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 11-19.
 - [6] Du, X.L. and Jin, L. (2012) Research on the Influence of Interfacial Transition Zone on the Macro-Mechanical Properties of Concrete. *Engineering Mechanics*, **29**, 72-79.
 - [7] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 王如琦. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982(1): 1-12.