

大骨料混凝土应变局部化中不同 粒级粗骨料的作用效应

姜磊¹, 徐磊¹, 张菁倪¹, 徐兰玉², 任青文¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

摘要: 为探究不同粒级粗骨料在大骨料混凝土损伤开裂应变局部化过程中的作用效应, 在建立大骨料混凝土细观有限元模型的基础上, 通过开展不同细观结构下的损伤开裂模拟, 分析了大骨料混凝土应变局部化区域的演化过程和分布特征; 通过在原细观结构中单独改变某一粒级粗骨料分布, 分别探究了不同粒级粗骨料在应变局部化中的作用效应。研究表明: 应变局部化主要发生在大粒径粗骨料与砂浆间的界面过渡区处, 特大石粒级粗骨料在很大程度上控制着应变局部化区域的主要分布特征, 大石和中石粒级粗骨料均可直接或间接在应变局部化区域形成过程中发挥明显作用, 而小石粒级粗骨料在应变局部化中的作用效应微弱。研究成果可为在大骨料混凝土细观损伤断裂分析中通过简化细观结构来降低模拟难度和减小计算规模提供参考。

关键词: 大骨料混凝土; 应变局部化; 混凝土损伤; 细观结构; 粗骨料; 作用效应; 有限元

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0169-07

Effects of coarse aggregate of different size grades on the strain localization of mass concrete

JIANG Lei¹, XU Lei¹, ZHANG Jingni¹, XU Lanyu², REN Qingwen¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: In order to reveal the effects of coarse aggregate of different size grades on the strain localization of mass concrete, we established a mesoscopic finite element model to simulate the damage and fracture of fully-graded aggregate mass concrete under the conditions of different mesoscopic material structures, so as to analyze the evolution process and distribution characteristics of the region of strain localization. In the simulation, the effects of coarse aggregate of different size grades on the strain localization were respectively brought to light by changing the coarse aggregate distribution of one individual size grade while keeping that of the other size grades unchanged. Numerical results show that most of the strain localization appear in the interfacial transition zone between the large coarse aggregates and the mortar, and the main distribution characteristics of the strain localization region is mainly controlled by the extra-large coarse aggregate. Moreover, the large and medium aggregates play important roles in the evolution process of the strain localization region directly or indirectly, whereas the small coarse aggregate has little effect. The research findings can provide a preliminary basis for reducing the simulation difficulties and computational demand by simplifying the mesostructure of mass concrete.

Key words: mass concrete; strain localization; concrete damage; mesostructure; coarse aggregate; effect; finite element

收稿日期: 2021-08-08; 修回日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979092、51739006、U1765204); 江苏省水利科技项目(2020024)

作者简介: 姜磊(1998-), 男, 云南宣威人, 硕士研究生, 主要从事水工混凝土材料数值模拟研究。

通讯作者: 徐磊(1981-), 男, 江苏沭阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水工混凝土材料与结构多尺度分析理论与方法研究。

1 研究背景

混凝土是典型的准脆性材料,在损伤开裂阶段呈现出明显的软化特征^[1-2],在宏观应力应变曲线上表现为峰值点后,随着应变的增大,应力逐渐减小。在细观尺度上,一般将混凝土视为由粗骨料(粒径大于5 mm)、砂浆以及两者之间的界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)组成的三相复合材料^[3]。由于随机分布在砂浆基体中的粗骨料具有不同的粒径、形状、级配和含量,导致混凝土的真实细观(材料)结构极为复杂^[4]。混凝土开裂破坏本质上属于多尺度现象,是细观裂纹不断萌生、扩展、集聚和贯通的结果^[5-7]。在软化阶段,随着应力的减小,非弹性应变逐渐集中于局部区域,并导致宏观裂缝的产生,这一过程称为应变局部化^[8]。应变局部化区域的分布特征与混凝土的细观结构密切相关,并直接影响着混凝土的宏观破坏特性与开裂路径^[9]。因此,为在细观尺度上真实模拟混凝土损伤开裂过程,对混凝土细观结构的模拟需达到一定的精度^[10-11]。

在以混凝土坝为代表的大体积混凝土结构中,通常采用三级配(小石、中石、大石)或四级配(小石、中石、大石、特大石)等大骨料混凝土^[12]。与普通混凝土相比,其粗骨料粒径更大,体积含量更高。三级配、四级配混凝土最大骨料粒径分别为80、150 mm,粗骨料体积含量可达60%~70%,而普通混凝土最大骨料粒径不超过40 mm,粗骨料体积含量一般为40%~50%。此外,为满足统计均匀性的要求,大骨料混凝土细观数值试件所需达到的最小尺寸亦明显大于普通混凝土。上述因素共同导致了在应用以有限元为代表的数值方法开展大骨料混凝土细观分析时计算规模过大^[13],致使大骨料混凝土材料与结构多尺度分析受限于细观计算量过大这一瓶颈^[14-15]。由于在细观数值模型中模拟数量众多的小粒径粗骨料是导致大骨料混凝土细观计算规模过大的主要原因之一^[16],因此,一种缩减细观计算规模的可行方法是简化大骨料混凝土的细观结构,即将部分小粒径粗骨料等效至砂浆基体中。但为真实模拟大骨料混凝土的损伤开裂行为,基于简化细观结构模拟所得的应变局部化区域的主要分布特征应与模拟所有粗骨料的保持一致。为此,有必要揭示不同粒级粗骨料在大骨料混凝土应变局部化中的作用效应,为合理简化大骨料混凝土细观结构提供参考。

为分析某一粒级粗骨料在大骨料混凝土应变局

部化中的作用效应,需对比在该粒级粗骨料不同分布条件下(其他粒级粗骨料分布保持不变)应变局部化区域的分布特征。显然,这是采用物理试验手段难以实现的。另一方面,虽然“数值混凝土”已在混凝土计算材料学中得到较为广泛的应用^[17-20],但尚未见到将其应用于探究不同粒级粗骨料在大骨料混凝土应变局部化中作用效应的相关报道。本文以四级配大骨料混凝土为研究对象,首先通过建立具有不同细观结构的细观有限元模型并模拟其损伤开裂过程,分析从细观受损至宏观开裂过程中应变与损伤分布特征的演化规律;在此基础上,通过随机改变细观结构中某一粒级粗骨料分布但保持其他粒级粗骨料分布不变的方法,建立一系列用于探究不同粒级粗骨料在应变局部化过程中作用效应的细观有限元模型,并分别开展相应的损伤开裂过程模拟,以探究四级配大骨料混凝土应变局部化中不同粒级粗骨料的作用效应。

2 大骨料混凝土细观有限元模型

2.1 细观结构模拟

基于先生成随机骨料后进行骨料投放的随机取法^[21],研发了混凝土细观结构随机生成软件 AutoGMC。依据给定的混凝土细观结构控制参数(粗骨料的含量及其形状、粒径、级配等),该软件可自动在任意形状模拟区域内完成圆形或多边形骨料细观结构的随机生成。另外,由于混凝土细观结构本质上是三维的,故在生成混凝土试件截面细观结构的过程中,需将混凝土骨料体积含量与级配从三维转换为二维,本文采用 Walraven 公式^[22]实现这一转换,如下式所示:

$$P_c(D < D_0) = P_k [1.065 (D_0/D_{\max})^{0.5} - 0.053 (D_0/D_{\max})^4 - 0.012 (D_0/D_{\max})^6 - 0.0045 (D_0/D_{\max})^8 - 0.0025 (D_0/D_{\max})^{10}] \quad (1)$$

式中: $P_c(D < D_0)$ 为二维截面任意点骨料粒径 $D < D_0$ 的概率; D 为骨料粒径,mm; D_0 为筛孔直径,mm; D_{\max} 为最大骨料粒径,mm; P_k 为三维骨料(包括粗骨料与细骨料)的体积含量,%。

图1给出了三维骨料体积含量为75%的条件下不同级配和骨料形状的大骨料混凝土细观结构生成实例。

2.2 有限元网格剖分

为对细观结构进行网格剖分以建立细观有限元模型,利用 ABAQUS 前处理模块,通过 MATLAB 和 Python 混合编程编制了混凝土细观有限元网格自动

剖分程序。具体而言,首先基于模拟区域和各骨料的几何信息,依据 ABAQUS 约定的编写规则^[23],自动生成可被 ABAQUS 前处理模块执行的 Python 脚本;在此基础上,通过 MATLAB 调用 ABAQUS 前处理模块自动完成仅包含骨料与砂浆单元的两相网格剖分;进一步地,为模拟骨料与砂浆之间的界面过渡区,还需收缩前述网格中的骨料边界,以在骨料单元与砂浆单元之间嵌入具有一定厚度(取为 100 μm)^[24]的界面过渡区(ITZ)单元,从而形成最终的三相网格,如图 2 所示。采用上述程序完成了图 1 所示微观结构的有

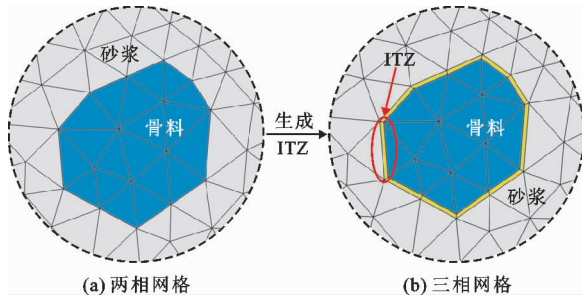


图 2 有限元模型界面过渡区单元生成

2.3 细观力学模型

由于混凝土损伤开裂一般是从 ITZ 中萌生并向砂浆中扩展,而骨料一般不会发生破坏^[25]。因此,本文将骨料视为线弹性材料;采用塑性损伤模型(concrete damaged plasticity, CDP 模型)^[26]作为砂浆与 ITZ 的本构模型,体现两者的非线性力学行为^[27]。CDP 模型应力-应变关系表达式如下:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d)\mathbf{D}_0^{el} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}) \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为 Cauchy 应力张量; d 为损伤变量; \mathbf{D}_0^{el} 为初始弹性张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量; $\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$ 为塑性应变张量,其增量($d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$)表达式如下:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl} = \lambda \frac{\partial G(\bar{\boldsymbol{\sigma}})}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}} \quad (3)$$

式中: λ 为塑性乘子; $G(\bar{\boldsymbol{\sigma}})$ 为以有效应力张量 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ ($\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1 - d}$)为变量的塑性势函数,如下式所示:

$$G(\bar{\boldsymbol{\sigma}}) = \sqrt{(\omega\sigma_{t0} \tan \psi)^2 + 3J_2} + \frac{I_1}{3} \tan \psi \quad (4)$$

式中: ω 为偏心率,用于描述塑性势函数向其渐近线逼近的速度,一般可取为 0.1; σ_{t0} 为单轴抗拉强度,MPa; ψ 为膨胀角,(°); J_2 为有效应力张量偏量的第 2 不变量; I_1 为有效应力张量的第 1 不变量。

CDP 模型采用如下形式的屈服函数:

$$F(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}) = \frac{1}{1 - \alpha} (\sqrt{3J_2} + \alpha I_1 + \beta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}) \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl}) \quad (5)$$

限元网格剖分,见图 3。

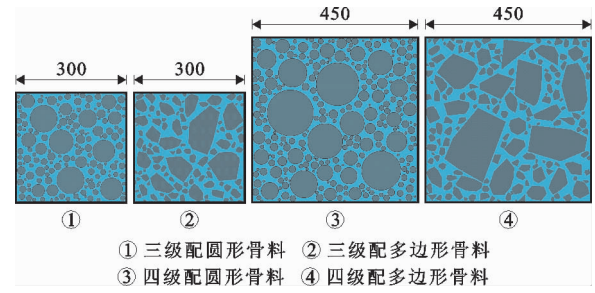


图 1 大骨料混凝土微观结构生成实例(单位:mm)

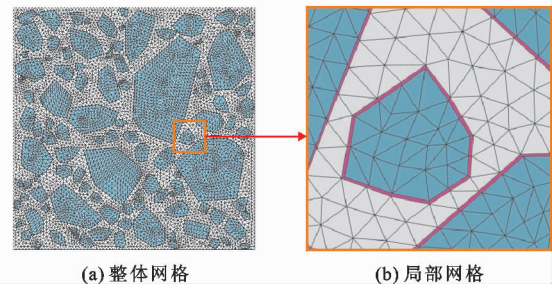


图 3 有限元模型细观网格剖分实例

式中: $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = [\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl} \ \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl}]^T$, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl}$ 、 $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl}$ 分别为拉伸、压缩等效塑性应变,上标“T”表示转置; $\hat{\sigma}_{max}$ 为最大有效主应力(以拉为正),MPa; $\bar{\sigma}_c(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl})$ 为单轴有效压应力,MPa,其量值随压缩等效塑性应变的变化而变化; α 和 γ 为无量纲材料参数,对于普通混凝土,分别可取 0.12 和 3.0; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macaulay 括号, $\langle x \rangle = \frac{1}{2}(|x| + x)$; $\beta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl})$ 的计算表达式如下:

$$\beta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_t(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl})$ 为单轴有效拉应力,MPa,其量值随拉伸等效塑性应变的变化而变化。

引入拉伸、压缩损伤因子 d_t 、 d_c 分别表征拉伸、压缩损伤导致的刚度退化,其量值分别随拉伸、压缩等效塑性应变的变化而变化。进一步考虑应力反向后的刚度恢复效应,即可给出复杂应力状态下 d 与 d_t 、 d_c 之间的关系式:

$$d = 1 - (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t) \quad (7)$$

式中: s_t 、 s_c 的取值与应力状态相关^[28]。单轴受拉时, $s_t = 0, s_c = 1$,故 $d = d_t$;单轴受压时, $s_c = 0, s_t = 1$,故 $d = d_c$ 。

3 大骨料混凝土应变局部化过程分析

为分析大骨料混凝土损伤开裂过程中应变与损伤分布特征的演化过程,基于前文第 2 节所述的混

混凝土细观结构随机生成软件 AutoGMC 和细观有限元网格自动剖分方法, 生成了 3 个具有不同细观结构的四级配大骨料混凝土细观有限元数值试件 A、B 和 C, 并分别开展了相同条件下的单轴拉伸断裂过程模拟。三维骨料体积含量取为 75.00%, 相应的二维骨料体积含量为 59.87%, 骨料级配为特大石: 大石: 中石: 小石 = 0.28:0.28:0.20:0.24, 细观材料参数见表 1。数值试件的细观结构(以试件 A 为例)、尺寸及加载条件见图 4; 基于数值试验结果所得的宏观均匀化应力-应变曲线见图 5。

图 6(a)~6(d) 给出了试件 A 中的砂浆和界面过渡区在不同应力状态下(分别对应于图 5 中的点 I~IV)

的拉伸应变分布, 图 6(e)~6(h) 为相应的拉伸损伤分布(为便于观察, 图中隐去了未受损伤的单元)。图 7 给出了加载完成后试件 B 和 C 中砂浆和界面过渡区的拉伸应变分布及相应的拉伸损伤分布。

表 1 大骨料混凝土细观材料参数

细观材料	膨胀角/(°)	泊松比	弹性模量/ GPa	峰值抗拉强度/ MPa	峰值抗压强度/ MPa	断裂能/(N·m ⁻¹)
骨料		0.20	50.00			
砂浆	35.00	0.20	25.00	3.00	30.00	340
ITZ	35.00	0.20	18.75	2.25	22.50	255

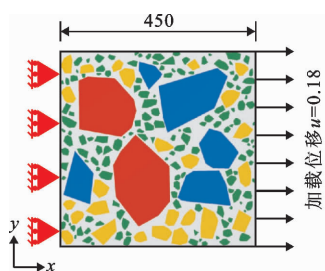


图 4 四级配大骨料混凝土细观计算模型(单位:mm)

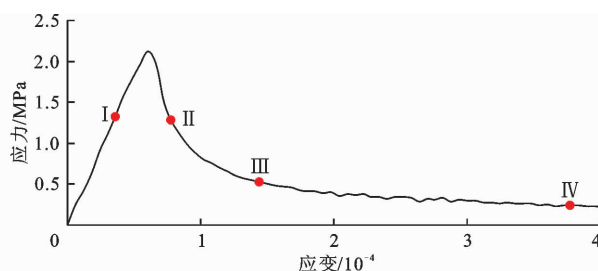


图 5 基于数值试验的大骨料混凝土宏观均匀化应力-应变曲线

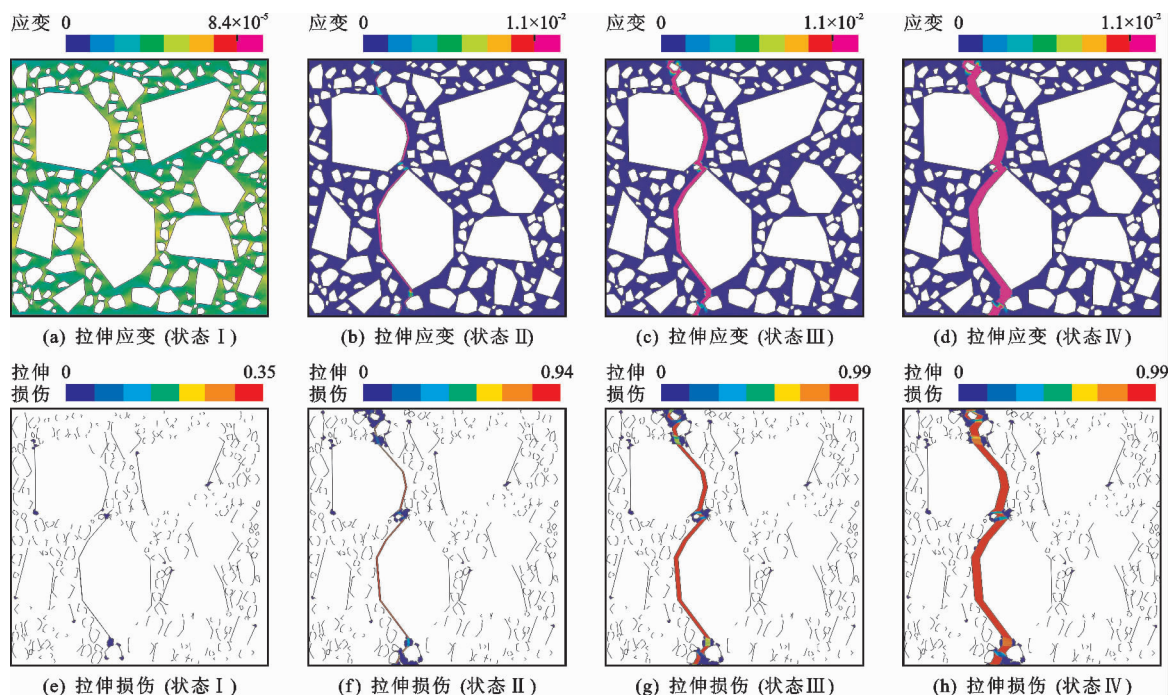


图 6 不同应力状态下拉伸应变与拉伸损伤分布(试件 A)

分析图 6 可知, 在峰前段, 虽然在细观尺度上, 应变表现出了一定程度的非均匀性, 但在宏观尺度上, 其分布仍是视为均匀的(图 6(a)); 在峰后软化段, 首先在特大石粒级粗骨料与砂浆之间的 ITZ 处出现了较为明显的应变局部化现象(图 6(b)), 随

着加载位移的增大, 应变局部化区域逐渐趋于连通并形成贯穿试件的应变局部化区域(图 6(c)), 加载位移的进一步增大使得应变局部化区域内的应变集中程度进一步增加(图 6(d))。从拉伸损伤方面来看, 如图 6(e)~6(h) 所示, 在峰前段, 在试件内

已出现呈“弥散”分布特征的受损单元(主要为 ITZ 单元),这与该阶段的应变分布特征一致;在峰后软化段,应变局部化区域的损伤程度不断提高,而试件其他区域损伤状态则保持不变,体现出了损伤演化与应变局部化的直接相关性。

由图 6,7 可以看出,由于试件 A、B、C 具有不同的细观结构,故其在受拉过程中,损伤开裂沿不同路径发展,致使应变局部化区域分布存在明显差异;但另一方面,对于不同的细观结构,应变局部化均主要发生在大粒径粗骨料尤其是特大石粒级粗骨料与砂浆间的界面过渡区处,表明大骨料混凝土应变局部化区域的分布主要受到以特大石为代表的大粒径粗骨料在试件内的形状和位置的影响,特大石粒级粗骨料在很大程度上控制着应变局部化区域的主要分布特征。

4 不同粒级粗骨料的作用效应

在上述研究基础上,为进一步分别分析小石、中

石和大石粒级粗骨料在应变局部化中的作用效应,以试件 A 为例,在其细观结构(下称原结构)的基础上,通过随机改变上述某一粒级粗骨料分布(形状和位置)但保持其他 3 个粒级粗骨料分布不变的方法,形成 3 种不同的新细观结构并开展与原结构相同条件下的单轴拉伸断裂过程模拟。

图 8 给出了具有不同小石粒级粗骨料分布的 3 种新结构条件下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比。对比图 8(a)与图 6(d)可以发现,在不同的小石粒级粗骨料分布下,应变局部化区域在试件内的位置基本相同,即小石粒级粗骨料分布的变化并未改变应变局部化区域分布的主要特征,这说明小石粒级粗骨料在应变局部化中的作用很小。由图 8(b)可以看出,无论是峰前段还是软化段,包括原结构在内的不同小石粒级粗骨料分布条件下的宏观应力-应变曲线均非常接近,这与上述应变局部化区域分布基本相同的现象吻合。

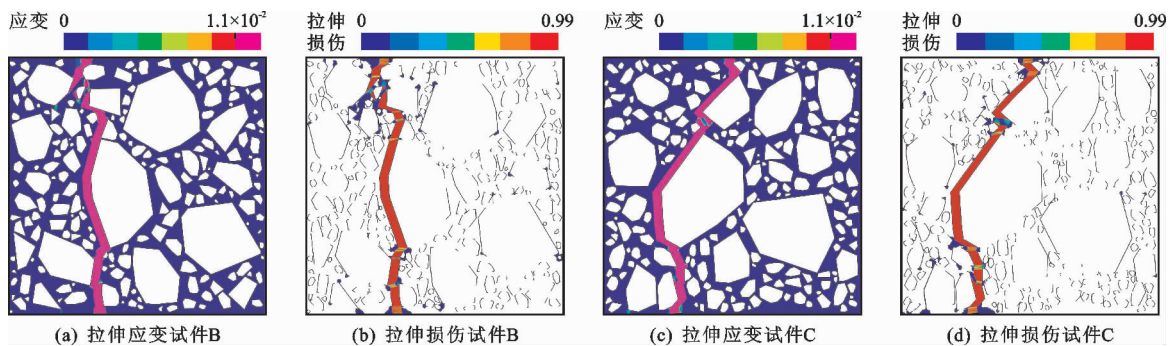


图 7 拉伸应变与拉伸损伤分布(试件 B、C)

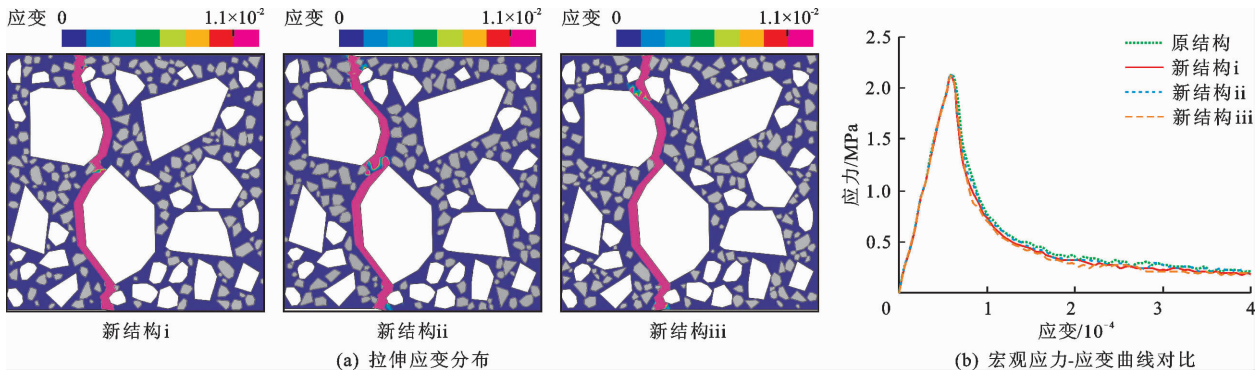


图 8 3 种不同小石粒级粗骨料分布下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比

图 9 为具有不同中石粒级粗骨料分布的 3 种新结构条件下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比。由图 9(a)可以看出,中石粒级粗骨料分布改变后,与原结构条件下相比其应变局部化区域分布发生了不同程度的变化,原因不仅在于部分中石粒级粗骨料与砂浆间的界面过渡区直接参与形成贯通的

应变局部化区域(图 9(a)新结构 i),还在于中石粒级粗骨料分布的变化可间接通过对细观应力应变状态的影响改变大粒径粗骨料边界处的应变局部化区域分布(图 9(a)新结构 ii),表明中石粒级粗骨料在应变局部化区域形成过程中有着较为明显的作用效应。此外,应变局部化区域分布的变化越大,宏观开裂破

坏行为的差异就越明显(图9(b)),说明了真实模拟应变局部化区域主要分布特征的重要性。

图10为具有不同大石粒级粗骨料分布的3种新结构条件下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比。将图10(a)与图6(d)对比可以看出,大石粒级粗骨料分布的变化不仅可通过对细观应力应变状态的影响间接改变应变局部化区域的分布(图

10(a)新结构ii),亦可直接与特大石粒级粗骨料共同控制应变局部化区域的主要分布特征(图10(a)新结构iii),表明大石粒级粗骨料在应变局部化中的作用效应明显。此外,不同大石粒级粗骨料分布条件下的宏观应力-应变曲线对比(图10(b))再次体现了应变局部化区域主要分布特征与混凝土宏观开裂破坏行为间的直接相关性。

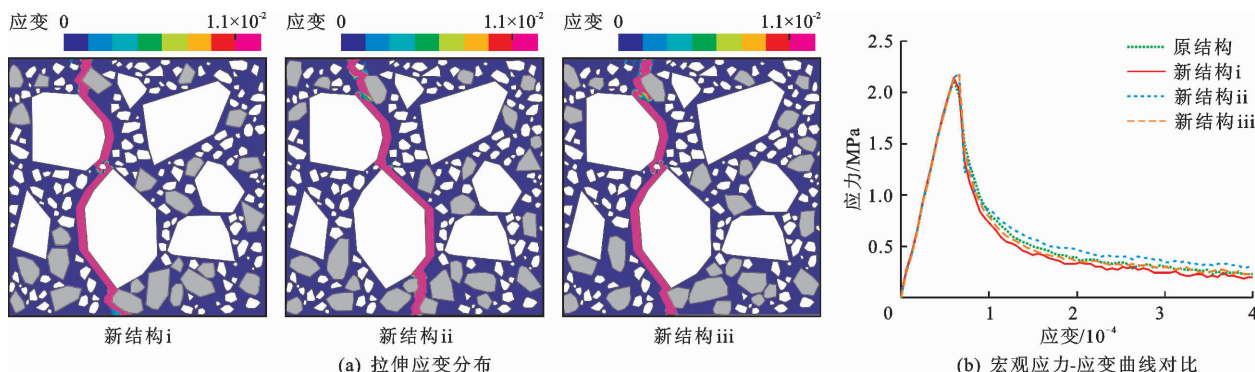


图9 3种不同中石粒级粗骨料分布下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比

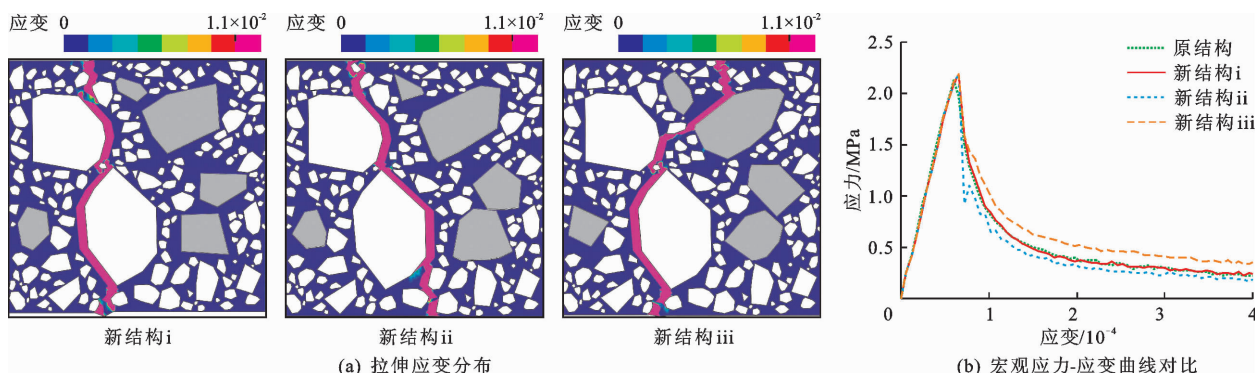


图10 3种不同大石粒级粗骨料分布下的拉伸应变分布及其宏观应力-应变曲线对比

5 结论

应变局部化区域分布直接影响着混凝土的宏观破坏特性与开裂路径,并与混凝土细观材料结构密切相关。本文以四级配大骨料混凝土为研究对象,探究了不同粒级粗骨料在其损伤开裂应变局部化过程中的作用效应。主要研究结论如下:

(1)虽然大骨料混凝土局部化区域分布具有随机性,但主要发生在大粒径粗骨料尤其是特大石粒级粗骨料与砂浆间的界面过渡区处,表明特大石粒级粗骨料在很大程度上控制着应变局部化区域的主要分布特征。

(2)改变大石或中石粒级粗骨料分布均可能导致应变局部化区域主要分布特征的变化,原因在于大石和中石粒级粗骨料可直接或间接在应变局部化区域形成过程中发挥明显作用。

(3)不同小石粒级粗骨料分布条件下的应变局部化区域基本一致,表明小石粒级粗骨料在应变局部化中的作用效应微弱。

(4)应变局部化区域的主要分布特征与混凝土宏观开裂破坏行为直接相关,研究成果可为在建立大骨料混凝土的细观计算模型中合理简化其细观结构提供参考。

参考文献:

- [1] 金永苗,徐磊,陈在铁,等.界面过渡区力学特性对水工混凝土断裂性能的影响[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(3):1-5.
- [2] CEN Weijun, WEN Langsheng, ZHANG Ziqi, et al. Numerical simulation of seismic damage and cracking of concrete slabs of high concrete face rockfill dams[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 205-211.

- [3] 任青文,殷亚娟,沈雷. 混凝土骨料随机分布的分形研究及其对破坏特性的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1267-1277+1288.
- [4] XU Yi, CHEN Shenghong. A method for modeling the damage behavior of concrete with a three-phase mesostructure[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102(Part 1): 26-38.
- [5] SUN Bin, LI Zhaoxia. Multi-scale modeling and trans-level simulation from material meso-damage to structural failure of reinforced concrete frame structures under seismic loading[J]. Journal of Computational Science, 2016, 12: 38-50.
- [6] 吴贞杰,夏晓舟,章青. 黏聚单元嵌入技术及其在混凝土细观分析模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 535-542.
- [7] 胡江,苏怀智,马福恒,等. 基于三维微-细观尺度模型的混凝土力学性能研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 321-326.
- [8] 陶慕轩,赵继之. 采用通用有限元程序的弥散裂缝模型和分层壳单元模拟钢筋混凝土构件裂缝宽度[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 165-177.
- [9] 王靖荣,陈有亮,傅喻. 冻融环境下不同预制裂缝混凝土断裂性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 178-185.
- [10] SKARZYŃSKI Ł, NITKA M, TEJCHMAN J. Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on X-ray μ CT images of internal structure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 147: 13-35.
- [11] 李强,任青文. 基于开裂区平均化方法的混凝土开裂特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 226-232.
- [12] MA Huaifa, XU Wenxiang, LI Yuncheng. Random aggregate model for mesoscopic structures and mechanical analysis of fully-graded concrete[J]. Computers & Structures, 2016, 177: 103-113.
- [13] 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: 119184.
- [14] REZAKHANI R, ZHOU Xinwei, CUSATIS G. Adaptive multiscale homogenization of the lattice discrete particle model for the analysis of damage and fracture in concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 125: 50-67.
- [15] 刘东海,赵梦麒. 心墙沥青混凝土压实 PFC 模拟细观参数反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 53-59.
- [16] 丁建新,陈胜宏. 全级配混凝土细观力学网格划分的单元切割法与等效弹模的计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(5): 641-647.
- [17] CAGGIANO A, SCHICCHI D S, MANKEL C, et al. A mesoscale approach for modeling capillary water absorption and transport phenomena in cementitious materials[J]. Computers & Structures, 2018, 200: 1-10.
- [18] DU Xiuli, JIN Liu, MA Guowei. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 66(4): 5-17.
- [19] JIN Liu, YU Wenxuan, DU Xiuli, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 1-12.
- [20] YANG He, XIE Shouyi, SECQ J, et al. Experimental study and modeling of hydromechanical behavior of concrete fracture[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(2): 97-106.
- [21] WANG Zongmin, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: Generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers & Structures, 1999, 70(5): 533-544.
- [22] WALRAVEN J, REINHARDT H. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. Heron, 1981, 26(1A): 26-33.
- [23] 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.
- [24] XU Lei, HUANG Yefei. Effects of voids on concrete tensile fracturing: A mesoscale study[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-14.
- [25] HUANG Yujie, YANG Zhenjun, RER Wenyan, et al. 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 67: 340-352.
- [26] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [27] WANG Xiaofeng, ZHANG Mingzhong, JIVKOV A P. Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 80: 310-333.
- [28] CHEN Hongbing, XU Bin, MO Y L, et al. Behavior of meso-scale heterogeneous concrete under uniaxial tensile and compressive loadings[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 418-431.