

冻融循环作用下含缺陷混凝土三维数值模拟

郭超,杜思宏,徐晨

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 基于细观尺度理论,对冻融循环作用下不同孔隙缺陷的混凝土抗压强度进行参数化研究。方法 制作不同孔隙缺陷的混凝土立方体试件,并进行冻融循环加载试验;运用 Python 驱动 ABAQUS 内核,建立三维球形和椭球形随机骨料模型;通过模拟与试验对比分析两种骨料模型对混凝土抗压强度的影响,进而选取效果更优的骨料模型进行含缺陷混凝土的热-力学数值模拟分析。结果 椭球形随机骨料模型的模拟结果与试验数据更吻合;相同冻融循环次数下,含 5% 孔隙缺陷相比于不含孔隙缺陷混凝土的抗压强度、初始弹性模量明显下降。结论 骨料几何形状对混凝土抗压强度影响较小,孔隙缺陷对冻融环境下混凝土的力学特性具有不可忽视的影响。

关键词 混凝土;冻融循环;孔隙缺陷;随机骨料;热力耦合

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Three Dimensional Mesoscopic Numerical Simulation of Concrete with Defects under Freeze-thaw Cycles

GUO Chao, DU Sihong, XU Chen

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Based on meso-scale theory, the compressive strength of concrete with different pore defects under freeze-thaw cycles was studied by parameterization. Concrete cube specimens with different pore defects were made and freeze-thaw cyclic loading tests were carried out. The ABAQUS kernel was driven by Python to establish 3D spherical and ellipsoidal random aggregate models. The influence of the two aggregate models on the compressive strength of concrete was analyzed through the comparison of simulation and experiment, and then the aggregate model with better effect was selected for the thermo-mechanical numerical simulation analysis of the concrete with defects. The simulation results of ellipsoidal random aggregate model are more consistent with the experimental data. Under the same freeze-thaw cycles, the compressive strength and initial elastic modulus of concrete with 5% pore defects decreased significantly compared with that without pore defects. The aggregate geometry has little influence on the compressive strength of concrete, and the pore defects have significant influence on the mechanical properties of concrete in

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51978375);辽宁省教育厅基础研究项目(lnjc202019)

作者简介:郭超(1980—),男,教授,博士,主要从事工程结构跨尺度力学、结构可靠度等方面研究。

freeze-thaw environment.

Key words: concrete; freeze-thaw cycle; pore defects; random aggregate; thermal coupling

在寒冷气候条件下,多孔建筑材料特别是混凝土的冻害是危及结构耐久性的一个重要问题^[1],而这与混凝土中存在的各种微孔隙和微裂纹等缺陷有着重要关系^[2-4]。因此,了解孔隙缺陷对混凝土结构冻融特性的影响具有重要意义。

自美国学者 Powers 提出静水压假说以来,许多学者建立了不同的模型来预测混凝土冻融损伤:M. Sun 等^[5]建立混凝土冻融损伤本构模型,并利用该模型对冻融循环后混凝土材料的应力应变关系进行了模拟,研究了混凝土材料在冻融循环过程中的损伤演化和塑性发展机理;B. Li 等^[6]提出了一种新的冻融模型,并通过试验发现混凝土裂缝是由不同冻融循环下的非均匀应变产生的,冻融循环会对水泥基材料造成损坏,引发细观裂缝的发展,从而导致材料断裂并产生宏观裂缝;W. Tian 等^[7]运用 X 射线计算机断层扫描(CT)技术,将 CT 识别的孔隙结构重建为数字模型,分析了混凝土在冻融作用下的劣化机理,发现混凝土内部孔隙结构的演化和空间分布是影响混凝土损伤机理和力学性能的关键因素;上述研究大都是基于宏观力学角度来,观察混凝土在冻融循环后的性能退化。

近年来,随着数值模拟技术的发展,一些学者通过建立细观数值模拟模型来模拟混凝土的冻融破坏。细观数值模拟方法可以在一定程度上反映材料的损伤演化规律,这为研究材料冻融后的特性提供了一种新的方法。R. Peng 等^[8]考虑了混凝土的非均匀性,建立了冻融条件下混凝土的三维细观数值计算模型,描述了冻融混凝土的应力应变演化行为。W. Zhou 等^[9]提出了综合的热-水-力学耦合模型,通过建立二维多边形混凝土随机骨料模型来模拟混凝土的冻融过程。F. Gong

等^[4]考虑冰的形成、碱硅反应凝胶侵入毛细管孔隙以及夹带空气的影响,探究了混凝土材料在冻融循环和碱硅反应耦合作用下宏观力学变形与微观化学-物理之间的联系。然而,这些学者关注的都是混凝土的冻解过程,很少有人研究混凝土冻解时的热-力学行为,也没有考虑孔隙缺陷对冻融特性的影响。

基于此,笔者建立不同孔隙率的三维细观模型,研究冻融循环作用下含初始孔隙缺陷混凝土的热力耦合行为,并讨论不同骨料形状对混凝土力学性能的影响;通过与试验数据对比,验证细观数值模拟方法的有效性,为含缺陷混凝土的冻融性能预测提供依据。

1 随机骨料模型

1.1 随机骨料模型生成

在细观尺度上,将混凝土看作由骨料、砂浆、界面过渡区(Interface Transition Zone, ITZ)、缺陷(孔隙)组成的四相复合材料。采用 Monte Carlo 法编写 Python 脚本,首先确定骨料生成的边界,在边界内随机确定骨料的位置、半径大小,判断是否重叠,以此生成球形和椭球形骨料。为了保证骨料粒径分布的合理性,采用经典的富勒曲线来描述混凝土中骨料的粒径分布,相应的计算公式^[10]:

$$P(d) = \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P(d)$ 为粒径小于 d 的骨料质量分数; d_{\max} 为骨料的粒径。

在三维模型中,各粒径范围的粗骨料体积计算公式:

$$V_p[d_s, d_{s+1}] = \frac{P(d_s) - P(d_{s+1})}{P(d) - P(d_{\min})} \times V_p \times V \quad (2)$$

$$V_p = W_p / (\rho_p V) \quad (3)$$

式中: $V_p[d_s, d_{s+1}]$ 为粒径在 $[d_s, d_{s+1}]$ 的粗骨

料体积; d_{\min} 为粗骨料最小粒径; V_p 为正在生成的粗骨料的体积分数; V 为混凝土试件总体积; W_p 为粗骨料总质量; ρ_p 为骨料的表观密度。

根据参考文献[11]得到混凝土配合比,如表 1 所示,骨料体积约为混凝土体积的 40%。依据混凝土 Fuller 富勒级配理论,将

骨料粒径分为大骨料(15 ~ 20 mm)、中骨料(10 ~ 15 mm)、小骨料(5 ~ 10 mm)三种级配,分别占骨料总体积的 25%、25%、50%,骨料投放的区域为边长 100 mm 的立方体。根据实际测量统计,取椭球形骨料长短轴比 1.42。利用上述骨料生成程序,建立球形和椭球形随机骨料模型。

表 1 混凝土配合比

Table 1 The mixing proportions of concrete

kg/m³

ρ (水泥)	ρ (砂)	ρ (粗骨料)	ρ (水)	ρ (早强剂)	ρ (膨胀剂)
473	1 203	566	189	0.47	2.37

根据混凝土的孔隙分布情况^[12],凝胶孔直径通常小于 110 nm,毛细孔直径通常小于 50 μm ,水泥颗粒压实不充分或夹带空气产生的大孔隙,其直径通常大于 50 μm 。由于凝胶孔和毛细孔实际尺寸较小,很难模拟其真实几何形状,忽略其影响。对于大孔隙,采用在砂浆内部随机投放的方式生成,根据文献[2],初始孔隙率设置为 5%,模型网格的大小为

2.5 mm,即孔隙单元的边长为 2.5 mm。
骨料 - 砂浆界面通常是裂缝产生和扩展的最薄弱区域,一些学者^[13-14]采用粘结单元模拟混凝土不同材料间的粘结行为,有效地模拟了裂缝的扩展行为。因此,笔者采用在骨料和砂浆单元之间插入零厚度 Cohesive 单元的方式对其进行建模。模型及其网格划分如图 1 所示。

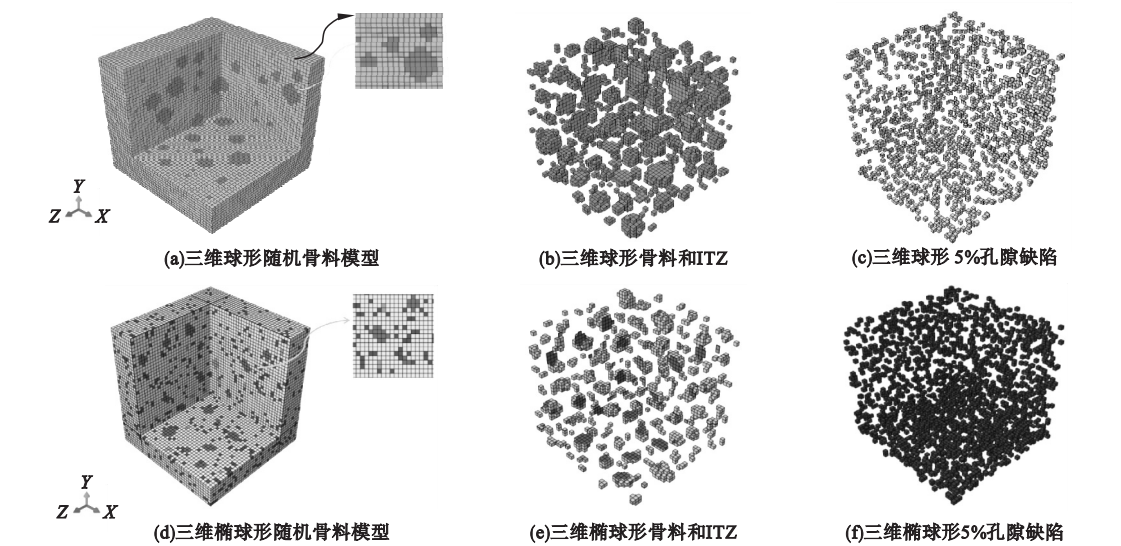


图 1 混凝土三维细观数值计算模型

Fig. 1 The 3D meso-numerical calculation model of concrete

1.2 本构关系

1.2.1 砂浆本构

考虑到计算效率,在热应力分析中,砂浆只考虑弹性。在静力学分析中,砂浆考虑损伤塑性。砂浆和混凝土具有相同的性质,可

采用混凝土的本构模型。塑性损伤(CDP)本构考虑了混凝土损伤过程中的塑性变形以及刚度折减,适用于描述受到损伤的混凝土应力 - 应变关系^[15]。因此,笔者采用 CDP 本构定义砂浆。

1.2.2 黏聚力单元本构

黏聚力单元 COH3D8(三维8节点单元)用损伤起始准则和损伤演化规律来描述其本构行为。本研究使用图2所示的双线性黏聚力模型。当满足以下条件时,假定损伤开始:

$$\left\{ \frac{< t_n >}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1. \quad (4)$$

式中: t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 分别为变形完全垂直于界面, s 剪切方向和 t 剪切方向时的峰值应力值。

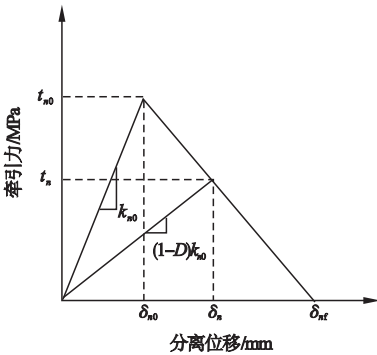


图2 双线性本构模型

Fig.2 The bilinear constitutive model

损伤演化的特征是一个标量参数 D , 表示由所有物理机制引起的裂纹的整体损伤, 损伤指标 D 是有效相对位移 δ_m 的函数。

$$\delta_m = \sqrt{< \delta_n >^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}. \quad (5)$$

式中: $< >$ 为麦考利括号。

$$< \delta_n > = \begin{cases} \delta_n, & \delta_n \geq 0 (\text{受拉}); \\ 0, & \delta_n < 0 (\text{受压}). \end{cases} \quad (6)$$

损伤参数 D 的定义为

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{m,\max} - \delta_{m0})}{\delta_{m,\max}(\delta_{mf} - \delta_{m0})}. \quad (7)$$

式中: $\delta_{m,\max}$ 为加载过程中获得的最大有效相对位移; δ_{m0} 和 δ_{mf} 分别为损伤启动和完全失效时的有效相对位移。损伤指数 D 在损伤开始后随着进一步加载而从0单调地发展到1。 D 已知后,刚度 k_n 、 k_s 和 k_t 可计算为

$$\begin{cases} k_n = (1 - D) k_{n0}; \\ k_s = (1 - D) k_{s0}; \\ k_t = (1 - D) k_{t0}. \end{cases} \quad (8)$$

根据文献[13,16],取法向刚度为 1.4×10^6 MPa/mm,切向刚度为 1.0×10^6 MPa/mm,断裂能取 0.03 MPa。

1.3 边界条件

该模拟将分为两个部分:①采用温度位移耦合进行热力分析,下端施加固定约束,表面施加温度荷载。模型初始温度为 20 ℃,最低温度设为 -20 ℃,采用折线降温方式,传热边界设置为模型表面。②进行冻融损伤后的静力学分析,考虑混凝土冻融损伤和塑性损伤,施加竖向 -1 mm 的位移。

2 试验方案及结果分析

2.1 试验方案

制作了4组边长为100 mm的混凝土立方体试件,1组边长为70.7 mm的立方体砂浆试件,每组6个试件。其中,2组混凝土的孔隙率为0%,2组混凝土的孔隙率为5%。

冻融循环试验采用慢冻法进行,根据规范要求^[17]的混凝土试件需要在标准养护室内或同等条件下养护24 d,试件需要在水中浸泡4 d。冻融方式为气冻水融,即温度为 -20 ~ -18 ℃的环境下进行冷冻,在水温为 18 ~ 20 ℃的条件下进行融化,每次冷冻和融化不少于4 h。本试验取冻结时间为8 h,融化时间为4 h,即每次冻融周期为12 h。

试件如图3所示。冻融完成后,擦干试件表面的水分,测量其质量损失,并在其表面贴应变片,进行位移加载,试验加载速率为1.5 mm/min。



图3 混凝土试件

Fig.3 The concrete specimens

2.2 结果分析

图 4(a) ~ (b) 为不同孔隙缺陷 (0% , 5%) 混凝土的单轴压缩应力应变曲线, 图 4(c) 为砂浆的单轴压缩应力应变曲线。从图中可以看出, 当时孔隙率为 5% 时, 混凝土

的抗压强度为 0% 孔隙率混凝土强度的 80% 左右, 弹性模量为 0% 孔隙率混凝土的 70% 左右, 这说明孔隙缺陷对混凝土的强度影响很大, 不可忽略。

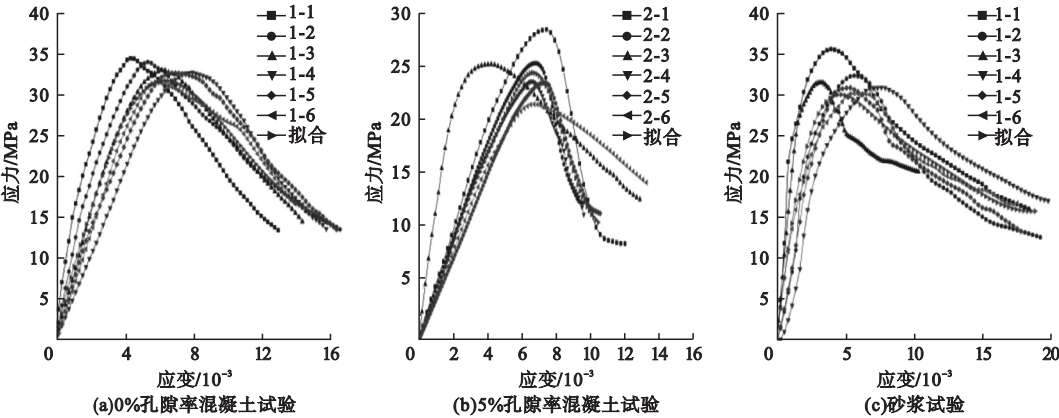


图 4 未冻融试件单轴压缩应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of unfreeze-thaw specimen under uniaxial compression

由试验可以得出混凝土中各相材料的力学参数, 如表 2 所示。但对于材料的热学参数测量难度较大, 因此, 选用文献 [17 - 18] 中的参数, 如表 3 所示。

表 2 各相材料力学参数

Table 2 The mechanical parameters of each phase material			
细观组分	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
骨料	—	80	0. 2
砂浆	30. 23	15. 1	0. 13

表 3 各相材料热学参数

Table 3 The thermal parameters of each phase material

细观组分	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数 K / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容 c / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数 α / $10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
骨料	2 740	2. 66	920	0. 5
砂浆	2 200	0. 93	1 050	1. 293
ITZ	1 800	0. 93	1 050	1. 293

3 混凝土单轴压缩数值模拟

以往的文献 [15, 20] 都将骨料形状表示成随机分布的二维圆、椭圆、多边形, 而这与真实的骨料形状有明显差异。因此, 笔者运用 python 脚本生成与混凝土真实结构相似的三维球形和椭球形骨料模型, 进行单轴压缩数值模拟, 应力 - 应变曲线如图 5 所示。在此基础上, 研究不同孔隙缺陷对混凝土冻融循环特性的影响。

图 5(a) 中含 0% 孔隙缺陷的球形和椭球形

骨料得到的单轴抗压强度分别为 30. 58 MPa、33. 49 MPa, 与试验结果相比, 相对误差分别为 4. 9% 和 4. 1%。图 5(b) 中含 5% 孔隙缺陷的球形和椭球形骨料得到的单轴抗压强度分别为 23. 16 MPa、23. 44 MPa, 与试验相对误差分别为 8. 28% 和 7. 17%, 差别较小。

从图 5 曲线可以看出, 三维球形和椭球形骨料模型的压缩曲线较为接近, 刚开始加载时, 混凝土的应力应变都呈线性关系, 而随着应力的不断增大, 混凝土出现塑性变形, 开始产生损伤进入应变软化阶段, 曲线呈下降

趋势。在下降阶段,二者与试验曲线开始产生较大差异。

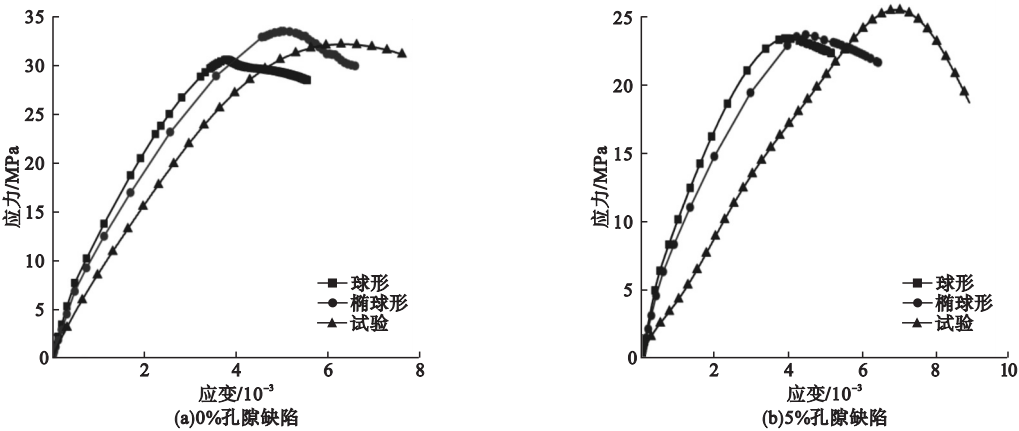


图5 混凝土单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of concrete under uniaxial compression

混凝土塑性损伤如图6所示。由图可以看出,混凝土损伤裂纹主要集中在孔隙缺陷和骨料周围强度较薄弱的界面过渡区,并逐渐形成贯通的主裂纹。此外,在裂纹数量和产生的位置上球形和椭球形骨料模型也有一定差别。

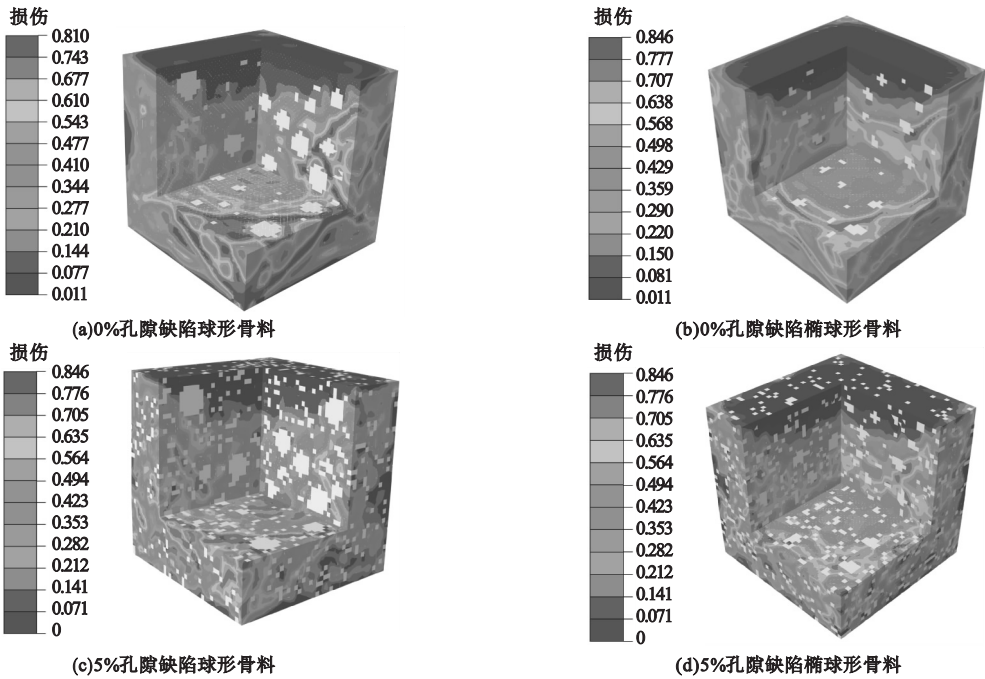


图6 混凝土单轴压缩损伤图

Fig. 6 The damage diagrams of concrete under uniaxial compression

综上所述,骨料形状对混凝土抗压强度影响较小,但会对其裂纹扩展和破坏形式产生较大影响。通过整体对比分析可知,椭球形骨料模型与真实混凝土吻合度更高。因此,将在下文中选用椭球形骨料模型进行混凝土冻融循环的热力耦合数值模拟。

4 混凝土冻融循环数值模拟

4.1 温度场分析

运用 ABAQUS 对模型进行热学分析,冻融循环次数设定为 15 和 75 次,得到模型中心部位温度的变化曲线如图 7 所示。

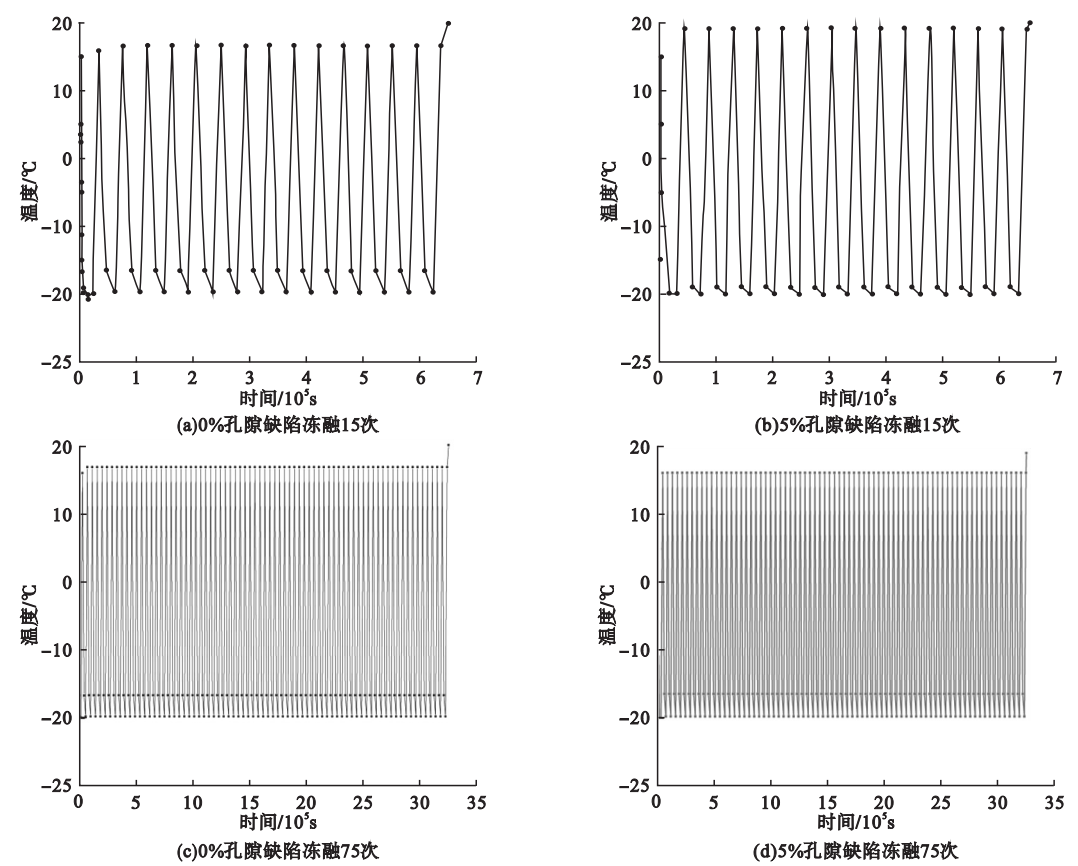


图 7 混凝土中心部位温度曲线

Fig. 7 The temperature curves at concrete center

由图 7 可知,模型中心部位温度接近 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于材料的热力学属性和相变时间影响,试件中心温度并不是每次都能达到 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,但该模型仍能较好地反映试件内部真实的温度变化情况。所以,采用 ABAQUS 进行热学分析仍具有较好的适用性。

4.2 抗压强度分析

为研究冻融循环荷载作用下孔隙缺陷对混凝土强度的影响及破坏过程,根据砂浆冻融试验,得到冻融 15 次和 75 次混凝土中砂浆的材料参数,以此对不同初始孔隙缺陷(0%和5%)的混凝土进行数值模拟。

图 8 为冻融 15 次混凝土单轴压缩应力应变曲线,通过计算得出 0% 孔隙缺陷和 5% 孔隙缺陷混凝土的单轴抗压强度分别为 30.96 MPa、23.61 MPa,与试验相对误差为 2.5% 和 9.3%,峰值压应变分别为 0.005 93、0.004 2,与试验相对误差为 3.6% 和 1.94%,

弹性模量分别为 9 395 MPa、7 339 MPa,与试验相对误差为 1.1% 和 30.74%。可以看出,随着孔隙缺陷的增大,混凝土的极限抗压强度、弹性模量和残余强度都随之减小。

冻融 75 次混凝土单轴压缩应力应变曲线如图 9 所示。通过计算得到 0% 隙缺陷和 5% 孔隙缺陷混凝土的单轴抗压强度分别为 21.13 MPa、15.15 MPa,与试验相对误差为 10.99% 和 9.92%,峰值压应变分别为 0.007 35、0.006 86,与试验相对误差为 43.89% 和 34%,弹性模量分别为 3 209 MPa、2 857 MPa,与试验相对误差为 52.08% 和 33.65%,偏差较大。这主要是由于忽略了混凝土初始微裂纹和冻融循环过程中孔隙膨胀导致的裂纹扩展,另外由于网格尺寸较大,采用像素化网格的方式使得小骨料的含量不足,使得混凝土的弹性模量偏大和强度偏低。

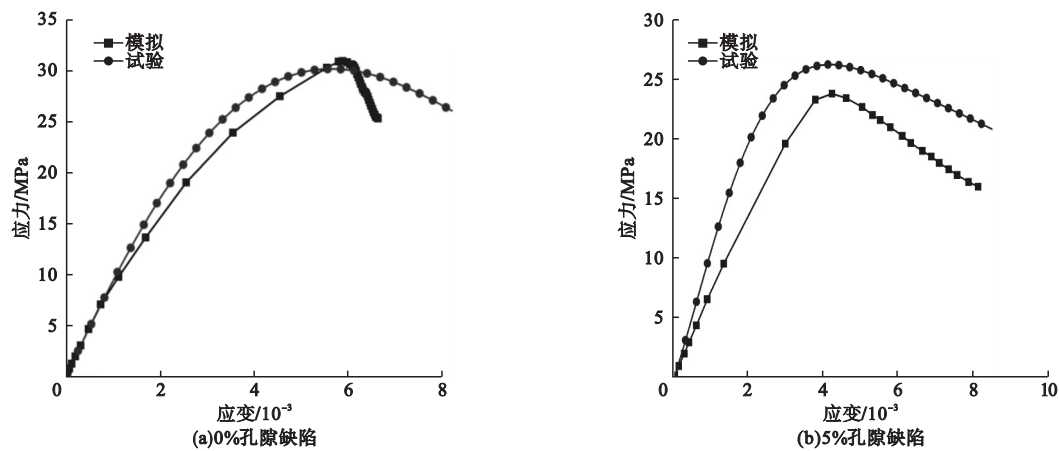


图 8 冻融 15 次混凝土单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig. 8 The stress-strain curves of concrete under uniaxial compression with 15 freeze-thaw cycles

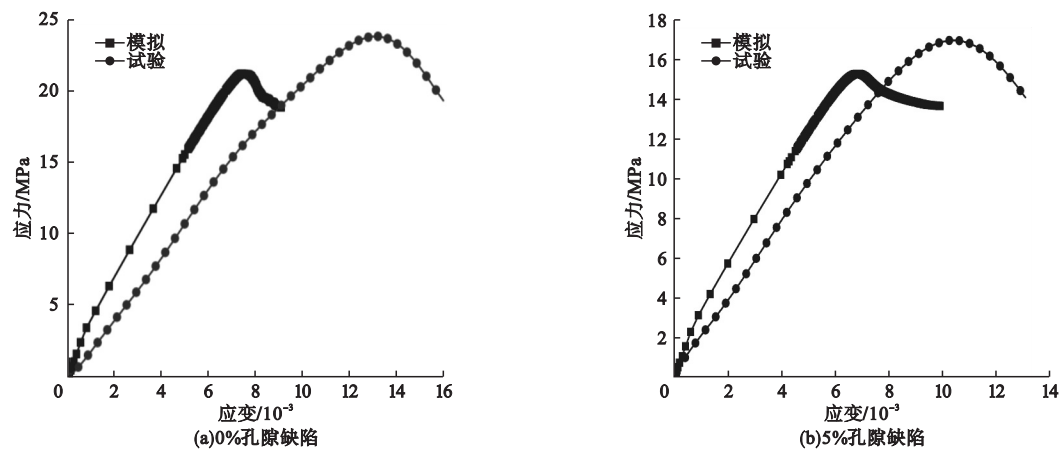


图 9 冻融 75 次混凝土压缩应力 - 应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curves of concrete under uniaxial compression with 75 freeze-thaw cycles

冻融 15 和 75 次时,含 5% 孔隙缺陷相比于 0% 孔隙缺陷混凝土抗压强度分别下降 23.74% 和 28.3%,初始弹性模量分别下降 21.88% 和 10.97%。通过对比分析可知,相同冻融循环次数作用下,孔隙缺陷的增加使得混凝土试件抗压强度明显降低。因此,在对冻融混凝土进行力学特性分析时,不应忽略孔隙缺陷的影响。

5 结 论

(1)在三维细观数值模拟中,骨料几何形状对混凝土抗压强度影响较小,但对混凝土的裂纹扩展和破坏形式具有重要影响。

(2)孔隙缺陷对冻融循环作用下混凝土抗压强度有较大影响;冻融 15 次时,含 5% 孔隙缺陷相比于无缺陷混凝土抗压强度下降 23.74%,初始弹性模量下降 21.88%;冻融 75 次时,含 5% 孔隙缺陷相比于无缺陷混凝土抗压强度下降 28.3%,初始弹性模量下降 10.97%。

(3)通过编写 Python 脚本驱动 ABAQUS 内核,建立三维混凝土随机骨料模型的方法,较为方便、快捷;通过与试验曲线对比,也验证了此模型的可行性。

参考文献

[1] DUAN A, CHEN J, JIN W. Numerical

- simulation of the freezing process of concrete [J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 25(9): 1317–1325.
- [2] HOU D, LI D, HUA P, et al. Statistical modelling of compressive strength controlled by porosity and pore size distribution for cementitious materials [J]. Cement and concrete composites, 2019, 96: 11–20.
- [3] TANG S W, LI Z J, CHEN E, et al. Impedance measurement to characterize the pore structure in Portland cement paste [J]. Construction and building materials, 2014, 51: 106–112.
- [4] GONG F, TAKAHASHI Y, MAEKAWA K. Multi-scale computational modeling for concrete damage by mixed pore pressures case of coupled alkali silica reaction and cyclic freeze/thaw [J]. Engineering computations, 2018, 35(6): 2367–2385.
- [5] SUN M, XIN D, ZOU C. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process [J]. Mechanics of materials, 2019, 139: 103192.
- [6] LI B, MAO J, SHEN W, et al. Mesoscopic cracking model of cement-based materials subjected to freeze-thaw cycles [J]. Construction and building materials, 2019, 211: 1050–1064.
- [7] TIAN W, HAN N. Pore characteristics (> 0.1 mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing [J]. Cold regions science and technology, 2018, 151: 314–322.
- [8] PENG R, QIU W, TENG F. Three-dimensional meso-numerical simulation of heterogeneous concrete under freeze-thaw [J]. Construction and building materials, 2020, 250: 118573.
- [9] ZHOU W, ZHAO C, LIU X, et al. Mesoscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in concrete under frost action [J]. Construction and building materials, 2017, 157: 117–131.
- [10] GUO C, LU Z, LI G. Multi-scale numerical analysis of the eccentricity on the instability of RCFST long columns [J]. Thin-walled structures, 2021, 167: 108228.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Code for design of common concrete mix; JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.)
- [12] 彭容新, 邱文亮, 滕飞. 寒区近海混凝土桥梁性能衰退机理与损伤行为评估方法 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 129–146.
(PENG Rongxin, QIU Wenliang, TENG Fei. Performance degradation mechanism and damage behavior evaluation method of concrete bridge in cold region marine environment [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(12): 129–146.)
- [13] 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.
(WU Zhenjie, XIA Xiaozhou, ZHANG Qing. Embedding technique of cohesive element and its application in concrete micro-level analysis model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 535–542.)
- [14] WANG X F, YANG Z J, YATES J R, et al. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores [J]. Construction and building materials, 2015, 75: 35–45.
- [15] DU X, JIN L, MA G. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale [J]. International journal of impact engineering, 2014, 66: 5–17.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能及耐久性试验方法: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete; GB/T 50082—2009 [S], Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.)
- [17] 周禹辛. 冻融环境下混凝土的动态数值模拟分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
(ZHOU Yuxin. Dynamic numerical simulation analysis of concrete under freeze-thaw environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.)
- [18] KHAN M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models [J]. Building and environment, 2002, 37(6): 607–614.
- [19] WANG X, YANG Z, JIVKOV A P. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: a size effect study [J]. Construction and building materials, 2015, 80: 262–272.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)