

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240805008

冻融循环下沙漠砂混凝土单轴受压细观模拟*

雍雯洁¹, 刘海峰¹, 徐文婧¹, 杨维武¹, 马菊荣², 李罗胤¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学新华学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为了分析冻融循环过程沙漠砂混凝土温度传导及其冻融后力学行为, 考虑非均质性, 将其视为由粗骨料、砂浆以及界面过渡区组成的复合材料。利用有限元软件 ABAQUS 建立二维细观模型, 采用热力耦合的方法进行冻融循环作用下圆形和多边形骨料沙漠砂混凝土温度场和温度应力模拟, 得到温度和应力变化规律; 对冻融后沙漠砂混凝土单轴压缩破坏过程进行模拟, 与试验结果进行对比验证后研究孔隙率和界面相强度对其抗冻性影响, 建立沙漠砂混凝土抗压强度与界面相强度比、冻融循环次数之间的内在联系。结果表明: 沙漠砂混凝土温度传递具有延迟效应, 试件表面温度变化快于试件中心, 圆形骨料混凝土模型内部温度变化快于多边形骨料混凝土模型; 在冻融循环过程中沙漠砂混凝土外层温度应力大于内层, 外层更容易受到冻融损伤, 温度应力随着冻融循环次数的增加呈先增加后减小趋势; 在相同冻融循环次数下, 沙漠砂替代率为 50% 混凝土抗冻性能和力学性能均优于沙漠砂替代率为 0% 混凝土, 界面相性能提高对沙漠砂混凝土抗冻性有积极影响, 孔隙率的增加对沙漠砂混凝土抗冻性有消极影响。

关键词: 沙漠砂混凝土; 冻融循环; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0441-13

Microscopic Simulation of Desert Sand Concrete under Uniaxial Compression under Freeze-thaw Cycles

YONG Wenjie¹, LIU Haifeng¹, XU Wenjing¹, YANG Weiwu¹, MA Jurong², LI Luoyin¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Xinhua College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To analyze the temperature conduction of desert sand concrete (DSC) during freeze-thaw cycles and its mechanical behavior after freeze-thaw, considering its heterogeneity, this study treated DSC as a composite material composed of coarse aggregate, mortar, and interfacial transition zone. A two-dimensional mesoscopic model was established using ABAQUS, and the temperature field and temperature stress of DSC with circular and polygonal aggregates under freeze-thaw cycles were simulated using a thermal-mechanical coupling method, and the variation patterns of temperature and stress were obtained. The uniaxial compressive failure process of DSC after freeze-thaw was simulated. After comparison and validation with experimental results, the effects of porosity and interfacial

* 收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(52168034)、宁夏自然科学基金(2023AAC03039)、宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)项目(NXYLXK2021A03)资助

作者简介: 雍雯洁(2000—), 女, 硕士研究生。主要从事材料和结构灾变行为等研究。E-mail: 957955928@qq.com

通信作者: 刘海峰(1975—), 男, 教授, 博士。主要从事材料和结构灾变行为等研究。E-mail: liuhai Feng1557@163.com

phase strength on its frost resistance were investigated, and the intrinsic relationship between the compressive strength of DSC, interfacial phase strength ratio, and the number of freeze-thaw cycles was established. The results showed that the temperature transfer in DSC exhibited a delayed effect. The temperature at the specimen surface changed faster than that at the center, and the internal temperature of circular aggregate concrete model changed faster than that of the polygonal aggregate concrete model. During freeze-thaw cycles, the temperature stress in the outer layer of DSC was higher than that in the inner layer, making the outer layer more susceptible to freeze-thaw damage. The temperature stress showed an initial increase followed by a decrease as the number of freeze-thaw cycles increased. Under the same number of freeze-thaw cycles, both the frost resistance and mechanical properties of concrete with a 50% desert sand replacement rate were superior to those with a 0% replacement rate. Enhanced interfacial phase properties had a positive effect on the frost resistance of DSC, while an increase in porosity had a negative effect.

Keywords: desert sand concrete; freeze-thaw cycles; temperature field; numerical simulation

0 引言

我国西北地区沙漠面积占全国沙漠面积的80%左右,具有丰富的沙漠砂资源。利用沙漠砂部分或者全部代替天然砂或机制砂作为细骨料制备沙漠砂混凝土(DSC),不仅可以避免天然砂资源过度开采导致的环境破坏,还能在一定程度上缓解西北地区荒漠化压力^[1]。西北地区冬季气温低,昼夜温差大,混凝土长期处于冻融环境作用下,严重影响了混凝土结构耐久性和使用寿命。因此,有必要对沙漠砂混凝土抗冻性进行深入研究。

国内外学者已经对沙漠砂混凝土抗冻性能影响因素进行了许多研究,对比分析了冻融条件下沙漠砂混凝土与普通混凝土性能差异。Y. G. Li等^[2]发现风积砂的掺入改变了混凝土孔隙率和孔结构,掺量为100%风积砂混凝土抗冻性能最好。申向东等^[3]研究了风积砂掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性影响,风积砂替代率40%时可以改善混凝土孔隙分布,提高其抗冻和抗碳化能力。J. W. Bai等^[4]将不可逆能量耗散转化为累积疲劳损伤,建立了风积砂混凝土冻融损伤退化模型。刘海峰等^[5]通过沙漠砂混凝土冻融后轴心抗压强度试验,发现沙漠砂混凝土超声波波速损失率、弹性模量损失率和峰值应变均小于普通混凝土。

冻融循环试验周期长、试验量大,许多学者采用数值模拟方法分析混凝土冻融循环过程和冻融后力学行为。段安等^[6]以热力学和孔隙弹性力学为

基础,应用数值模拟软件预测饱和砂浆冻融过程变形、孔隙压力和温度分布。H. B. Miao等^[7]利用ABAQUS软件对含气孔和骨料级配缺陷混凝土冻融循环下损伤过程进行了研究,气孔缺陷对混凝土力学特性有显著影响。M. J. Zhang等^[8]利用试验研究和数值模拟相结合,对冻融循环下混凝土单轴压缩性能和破坏机理进行研究,建立了考虑冻融损伤混凝土本构模型。

目前,针对冻融循环作用下沙漠砂混凝土性能研究主要集中在试验方面,对其抗冻性能数值模拟方面研究很少。本文利用有限元软件ABAQUS建立二维细观模型,探究冻融循环作用下圆形和多边形骨料沙漠砂混凝土温度场、应力场分布,对冻融循环作用后多边形骨料沙漠砂混凝土单轴压缩破坏过程进行模拟,分析初始孔隙率、界面相(ITZ)性能以及冻融循环次数等对沙漠砂混凝土力学性能影响规律。

1 细观分析方法及验证

1.1 热力学分析理论

假定热传导行为由Fourier定律控制,即:

$$f = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1)$$

式中, f 为热通量矩阵; k 为导热系数矩阵; x 为空间位置向量。

根据能量守恒定律,将瞬态热传导方程离散化为如下矩阵方程:

$$[C] \frac{\{dT\}}{\{dt\}} + [\lambda]\{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

式中, $[C]$ 为比热容矩阵, 表示物体各个节点热容量; $\{dT\}/\{dt\}$ 为温度变化率向量; $\{T\}$ 为各个节点温度向量; $[\lambda]$ 为热传导矩阵, 通过物体导热率和几何形状计算; $\{Q\}$ 是热源向量, 根据外部热源和边界条件得到。

通过求解上述矩阵方程, 可以得到物体在不同时间点温度分布。

1.2 有限元模型建立

20 世纪初, 美国科学家富勒^[9]提出了最大密度曲线(富勒曲线), 为目前最理想的三维级配曲线:

$$P = 100 \sqrt{\frac{D_0}{D_{\max}}} \quad (3)$$

式中, D_0 为筛孔直径; D_{\max} 为最大骨料粒径; P 为通过筛孔大小为 D_0 的骨料质量百分比。

上述级配曲线适用于三维空间状态下骨料级配, 对计算能力要求较高。瓦拉文基于富勒公式将三维空间骨料级配曲线转化为二维平面状态下骨料级配曲线^[10], 用于计算满足级配要求的骨料投放数量。

$$P_{2A}(D) = 1.065 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{0.5} - 0.053 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{4.0} - 0.012 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{6.0} - 0.045 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{8.0} + 0.0025 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{10.0} \quad (4)$$

在细观尺度上, 沙漠砂混凝土被视为粗骨料、砂浆基体和界面过渡区组成的三相复合非均质材料。利用 python 软件, 借助蒙特卡罗法^[11]随机投放满足数量的粗骨料, 模型尺寸为 $100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。虽然界面过渡区厚度通常在 $50 \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$ 范围内^[12], 但在数值模拟中难以采用微米级尺度。当界面过渡区厚度介于 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 时, 模拟仅影响混凝土应力-应变曲线下降段^[13], 故本文界面过渡区厚度取为 0.5 mm , 利用背景网格法划分模型, 网格尺寸为 0.5 mm 。图 1 为粗骨料体积含量为 35% 多边形骨料细观模型, 由粒径 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 和 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 粗骨料组成。

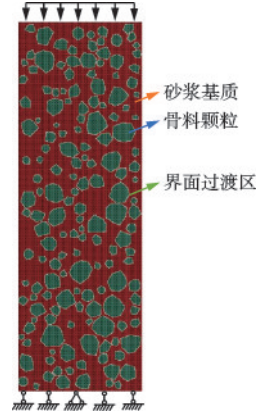


图 1 沙漠砂混凝土二维细观模型

Fig.1 Two-dimensional mesoscopic model of desert sand concrete

1.3 热学及力学边界条件

输入温度幅值模拟冻融循环过程温度变化, 设置每 4 h 为 1 次冻融循环, $0 \sim 2.5 \text{ h}$ 为降温过程, 最低温度为 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.5 \sim 4 \text{ h}$ 为升温过程, 最高温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 中间温度随时间的变化利用线性差值计算得出。加载模块中定义环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 分析步类型为热传递(瞬态), 网格类型选择 DC2D4 单元。

模拟温度应力时, 采用顺序热力耦合方式, 将温度场模拟结果作为预定义场导入, 设置材料线膨胀系数, 模型和网格划分与温度场一致, 边界条件和冻融循环试验一致, 底边固定, 分析步类型为静力-通用, 网格单元为 CPE4R 平面应变四边形单元。

冻融后单轴压缩破坏边界条件: 试件顶面采用位移加载控制, 底边施加垂直于底边的固定约束, 底边中点处施加水平和竖向约束, 两侧无约束力, 为自由边界。

1.4 材料参数

塑性损伤模型描述加载过程材料塑性变形和损伤破坏, 预测材料强度、刚度和断裂行为, 在混凝土数值模拟中应用广泛。由于砂浆基体和界面相细观尺度力学行为与混凝土表现出相似的特征和响应^[14], 砂浆基体和界面相本构模型均采用塑性损伤模型, 粗骨料抗压强度和弹性模量远大于砂浆, 视为弹性体。塑性损伤模型参数见表 1。

表 1 塑性损伤参数

Table 1 Plastic damage parameters

膨胀角 $\phi/(\text{ }^\circ)$	偏心率	f_{t0}/f_{c0}	K	粘性参数 μ
30	0.1	1.16	0.066 7	0.000 5

文献[15]对石灰岩物理力学性能进行研究,确定粗骨料弹性模量和泊松比。砂浆基体峰值应变远大于混凝土峰值应变,弹性模量小于混凝土^[16]。本文将砂浆峰值应变和弹性模量分别设置为混凝土的1.8倍和0.8倍^[17]。利用文献[5]试验结果,确定砂浆力学参数。界面过渡区(ITZ)是混凝土中砂浆和集料之间的薄弱环节,ITZ强度低于砂浆强度,通常采用恒定系数来描述ITZ与砂浆强度之比,本文将ITZ和砂浆之间力学性能之比定义为0.8,与现有研究^[13]取值相同。模型细观力学参数见表2,热力学参数见表3。

表2 细观力学参数

Table 2 Mesoscopic mechanical parameters

细观参数	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗压强度 f_c/MPa	抗拉强度 f_t/MPa
骨料	45*	0.25*	—	—
R0砂浆	23.3 [#]	0.2 [#]	37 [#]	3.7 [#]
R0界面相	18.64	0.2	29.6	2.9
R50砂浆	23.1 [#]	0.2 [#]	38 [#]	3.8 [#]
R50界面相	18.48	0.2	30	3

注:*取自文献[15],#取自文献[5],R0:沙漠砂替代率为0%,R50:沙漠砂替代率50%

表3 热力学参数^[7,18-19]

Table 3 Thermodynamic parameters^[7,18-19]

参数	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	比热 $C/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha/(\text{K}^{-1})$
骨料	2 700	2.77	710	7.08E-6
砂浆	2 630	1.2	1 175	1.6E-5
界面相	2 140	1.1	1 150	1.8E-5

1.5 模型验证

不同冻融循环次数下R50混凝土单轴受压试验应力—应变曲线^[5]与模拟曲线比较如图2所示。随着冻融循环次数增加,抗压强度减小,峰值应变增加,软化阶段应力下降趋势随着抗压强度的降低而逐渐减缓。模拟曲线和试验曲线上升段拟合良好,抗压强度误差在3%以内,验证了本文建立的细观模型可靠性。模拟曲线和试验曲线下降段存在一定差异,与文献[20]模拟结果相似。主要是由于模拟加载过程中没有删除开裂单元,该单元始终保持一定刚度,仍然可以传递应力和应变^[21]。在试验

加载过程中,达到峰值应力后,裂缝发展贯通,形成主裂缝^[22],混凝土内部受开裂影响,刚度迅速降低,试验曲线下降段斜率更陡峭。

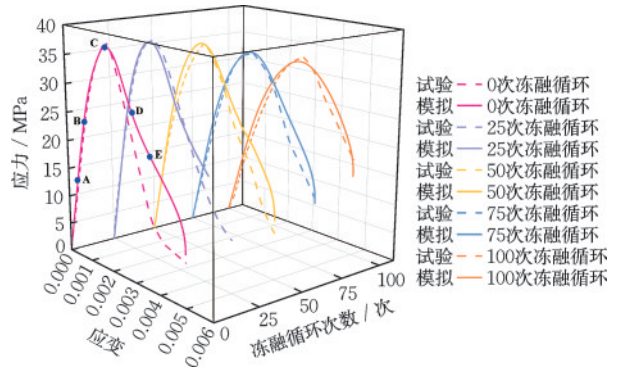


图2 单轴压缩模型验证

Fig.2 Validation of uniaxial compression model

2 沙漠砂混凝土冻融循环过程模拟结果分析

2.1 温度场分析

为了分析骨料形状对混凝土冻融传热过程影响,建立了尺寸为100 mm×300 mm多边形和圆形骨料二维细观模型,粗骨料体积含量为35%。图3为不同骨料形状混凝土单次冻融循环温度场变化。在冻结过程,试件表面温度逐渐向内部传递。由于混凝土导热性能较差,热传导速度慢,试件中心温度变化滞后于表面温度。冻结2.5 h后,多边形骨料和圆形骨料模型表层温度分别降至-17.08 °C, -16.91 °C,中心温度为-9.57 °C和-10.76 °C;在融化过程,随着外部温度升高,温度从外向内逐渐升高,1.5 h后,多边形骨料和圆形骨料模型表层温度升高到8.66 °C和8.40 °C,中心温度为-0.67 °C和0.41 °C。温度云图等温层呈环形分布,试件中心到表面距离相等,各方向热传导相同。由于砂浆和骨料之间导热性能差异,不同温度层之间过渡是不平滑的,说明热学参数具有温度相关性。不同骨料形状温度场变化过程基本相近,多边形骨料温度分布不均匀性比圆形骨料更加明显。因为骨料传热性能优于砂浆基质,圆形骨料边缘光滑连续,温度传递均匀,多边形骨料的不规则使传热方向多次变化,传热路径更加曲折,温度波动显著。

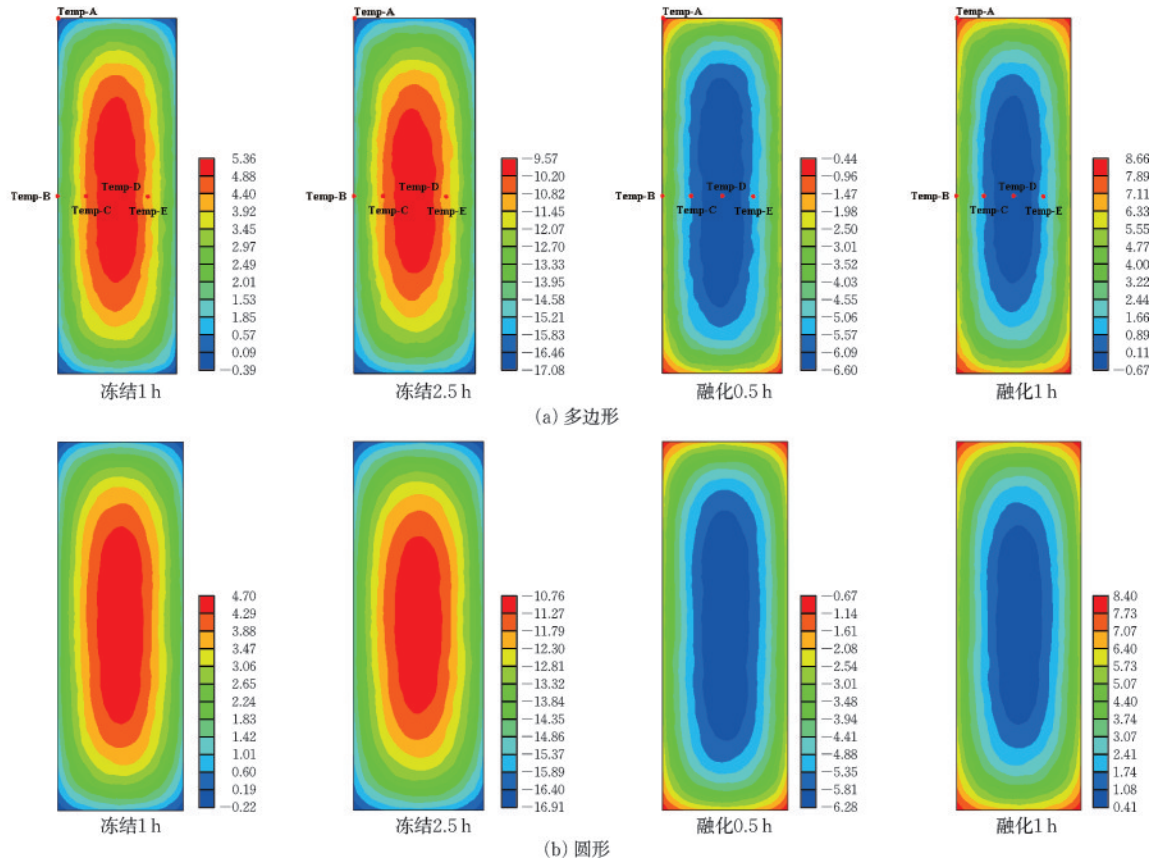


图3 不同骨料形状混凝土冻融循环温度场变化

Fig.3 Variation of temperature field of concrete with different aggregate shapes during freeze-thaw cycles

温度场数值模拟结果和文献[23]试验值比较如图4所示。由于介质传热性能差异,冻融液温度高于试件温度,提取图3(a)中Temp-A点温度变化与实验中温度控制曲线对比,两者变化基本一致,验证了冻融过程温度场模拟的合理性。

图5为冻融循环过程温度—时间变化关系。图5(a)表示图3中Temp-A、Temp-B、Temp-C、Temp-D、Temp-E单次冻融循环温度变化。不同位

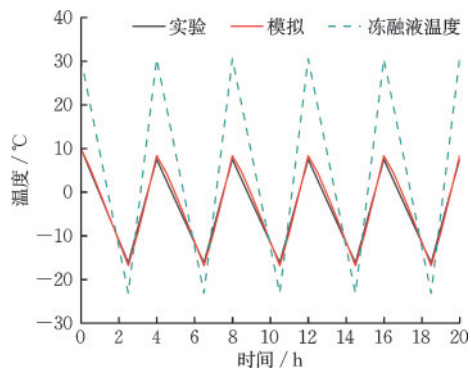
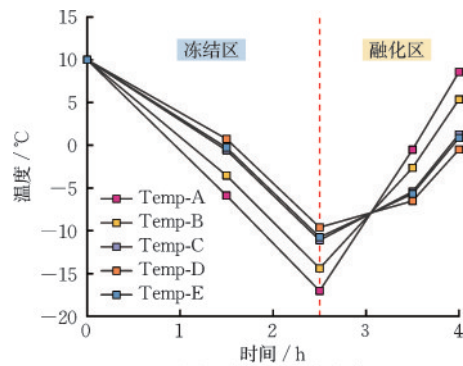
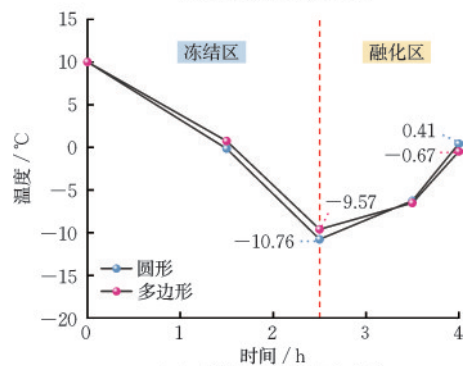


图4 温度模拟结果和试验结果对比

Fig.4 Comparison between simulation and experimental results of temperature



(a) 不同位置温度变化



(b) 不同骨料形状温度变化

图5 冻融循环温度—时间关系

Fig.5 Temperature-time relationship during freeze-thaw cycles

置温度变化速率不同,Temp-A点温度变化速率最快,Temp-D点温度变化速率最慢,故混凝土内部温度表现出延迟效应。在传热过程中能量不断消耗,混凝土导热能力从外向内逐渐降低,传热不均匀导致外层和内层温度差,Temp-C点和Temp-E点温度变化基本相同,说明冻融循环温度传递从外向内呈环状分布。图5(b)为圆形和多边形骨料模型中心温度变化,冻结2.5 h后,圆形骨料模型温度变化速率为8.3 °C/h,多边形骨料模型温度变化速率为7.82 °C/h;融化1.5 h后,圆形骨料模型温度变化速率为7.45 °C/h,多边形骨料模型温度变化速率为5.93 °C/h。圆形骨料模型温度变化速率快于多边形骨料模型,这是由于多边形骨料的棱角使传热过程受到阻碍,传热路径延长,需要更多时间传递温度,温度变化慢。

2.2 温度应力场分析

随着温度循环变化,混凝土发生热胀冷缩。由于各组分热膨胀系数不同和混凝土自身温度不均匀分布,使砂浆基质和骨料之间变形不同步,产生了温度应力。图6为多边形骨料混凝土R50冻融循环过程温度应力云图。不同冻融循环次数下混凝土温度应力变化趋势相似,表层温度应力均明显高于内层,使表面层自由移动受到更多阻碍,导致表面层在温度变化时产生拉伸。由于表面层抗裂性相对较低,随着拉应力增多,容易产生裂缝。受到表面层保护,内部层受温度应力影响较小,抗裂性相对较高。随着冻融循环次数增加,混凝土内部温度应力减小,损伤增加,弹性模量和强度劣化,冻融循环产生的应力逐渐减弱。

图7为冻融循环过程温度应力变化。在冻结阶段,初期由于温度降低,热收缩应力占据主导地位,温度应力为负值。随着冻结过程深入,水的状态逐渐从液态转变为固态,体积增加,在混凝土内部产生膨胀应力。当膨胀应力超过热收缩应力时,温度应力由负值转为正值,并随着冻结过程的继续而不断增大。进入融化阶段后,随着温度升高,水由固态逐渐转化为液态,混凝土内部温度应力相应降低。

模型中心点温度应力与冻融循环次数关系如图8所示。随着冻融循环次数增加,混凝土内部温度应力先增大后减小。冻融循环25次前,混凝土内部损伤较小,产生裂纹较少,具有良好承载力,温度

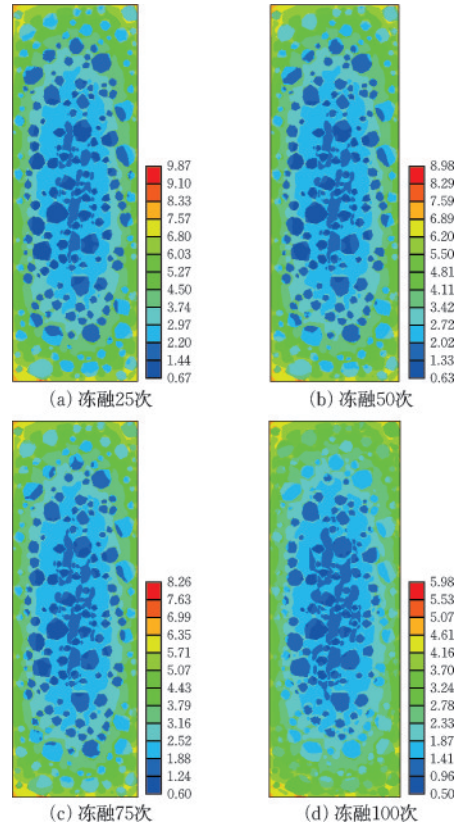


图6 不同冻融循环次数下R50沙漠砂混凝土温度应力云图
Fig.6 Temperature stress contour maps of R50 desert sand concrete under different numbers of freeze-thaw cycles

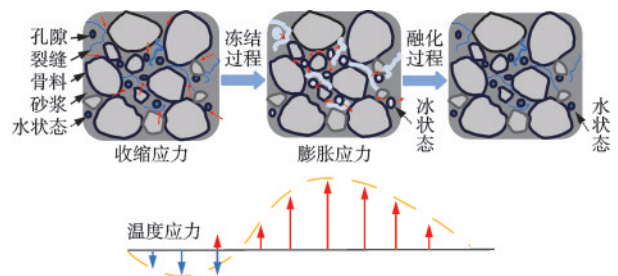


图7 冻融循环过程中温度应力变化
Fig.7 Temperature stress variations during freeze-thaw cycles

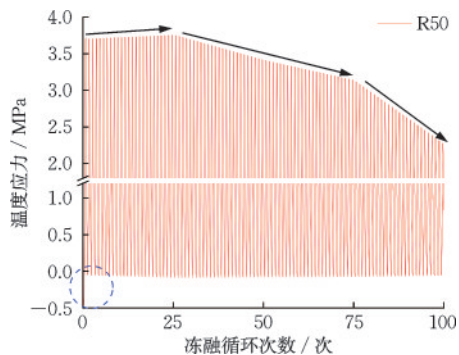


图8 冻融循环次数与温度应力关系
Fig.8 Relationship between number of freeze-thaw cycles and temperature stress

应力不断增加;冻融循环 25 次后,温度应力的下降先慢后快,随着循环次数增加,膨胀收缩现象在混凝土内部反复发生,混凝土强度降低,所承受的温度应力逐渐减弱^[24]。

不同形状骨料混凝土温度应力变化如图 9 所示。骨料形状对温度应力影响较小,虽然多边形骨料存在更多的棱角和边缘,相较于圆形骨料更易发生应力集中现象,产生更大温度应力,但温度变化速率也会影响混凝土温度应力,圆形骨料温度变化速率快于多边形骨料,过大的温差导致冻融过程产生的主应力更大,应力梯度更明显^[25],因此,冻结 2.5 h 后,圆形骨料混凝土温度应力略大于多边形骨料。由于多边形骨料更接近真实骨料形态,本文以下研究采用多边形骨料进行模拟分析。

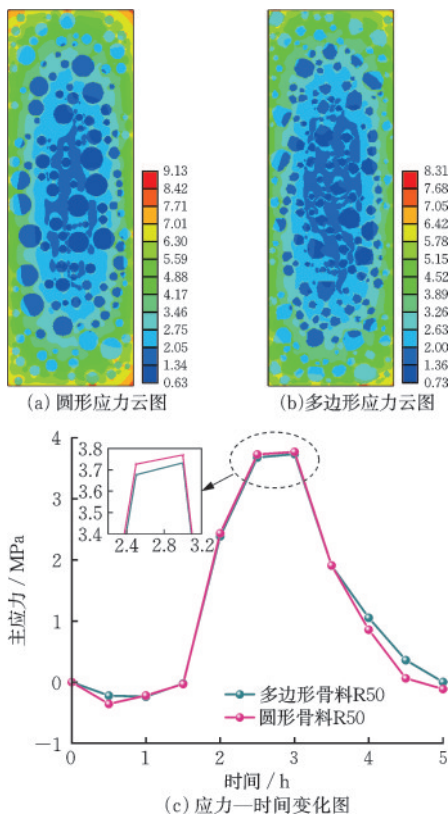


Fig.9 Temperature stress variations of different aggregate shapes

3 冻融后单轴压缩模拟结果

3.1 冻融后单轴压缩荷载下混凝土破坏过程

图 10 为单轴压缩模拟破坏过程,对应图 2 中 0 次冻融循环 R50 混凝土应力—应变曲线中 A、B、C、

D、E 点。A 点之前,混凝土处于弹性阶段,损伤几乎可以忽略不计。A-C 阶段,混凝土产生塑性变形,损伤沿着界面过渡区出现,延伸到周围砂浆基体中,但没有形成占主导地位的宏观裂纹。达到峰值应力 C 点时,砂浆基体中微裂纹逐渐增多并形成连续宏观裂纹;在 D 点和 E 点,混凝土内部损伤裂纹迅速发展,导致混凝土脆性破坏,与试验^[5]中对角剪切破坏结果一致。

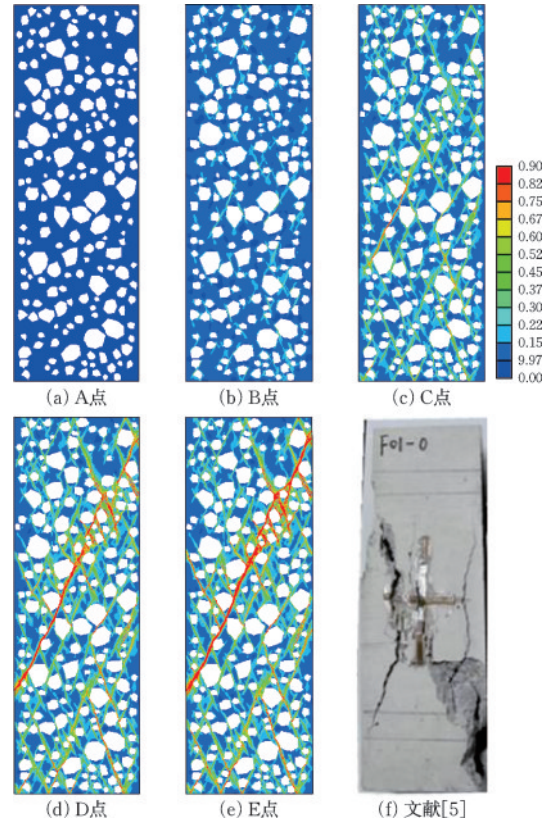


图 10 单轴压缩荷载下破坏过程模拟

Fig.10 Simulation of failure process under uniaxial compressive load

3.2 初始孔隙率对冻融后沙漠砂混凝土力学性能影响

混凝土作为非均质多孔材料,受水化不完全和环境温湿度等因素影响,存在初始孔隙和裂缝等缺陷,有必要研究初始孔隙率对混凝土耐久性影响。预设目标孔隙率 P ,定义孔隙尺寸为 2 mm,采用蒙特卡罗方法在砂浆基体中随机投放,最后删除单元以形成初始孔隙,不同初始孔隙率细观模型见图 11。

3.2.1 初始孔隙率对应力—应变曲线影响

不同初始孔隙率沙漠砂混凝土应力—应变曲线如图 12(a)所示。保持冻融循环次数不变,随着

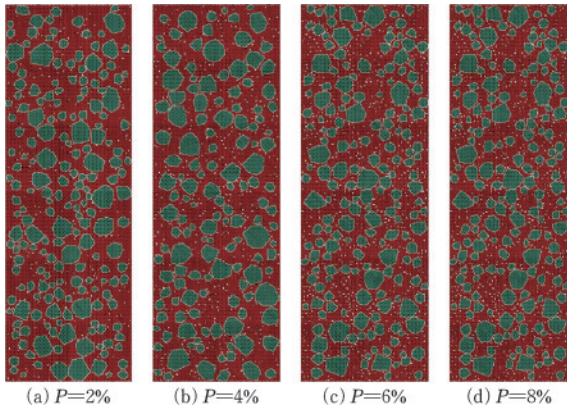


图 11 不同初始孔隙率微观模型

Fig.11 Mesoscopic models with different initial porosities

初始孔隙率从2%增加到8%,上升段曲线斜率逐渐减小,弹性模量不断降低,混凝土延性增加。在相同应力下,孔隙率和应变值呈正相关。

图 12(b)对比了0%和8%初始孔隙率下R0和R50冻融前后应力—应变曲线。未冻融时,两者弹性阶段曲线基本一致,没有冻融损伤,弹性阶段裂缝还未发展。进入弹塑性阶段后,R50应力增长大于R0。冻融循环75次后,R50上升段斜率和峰值应

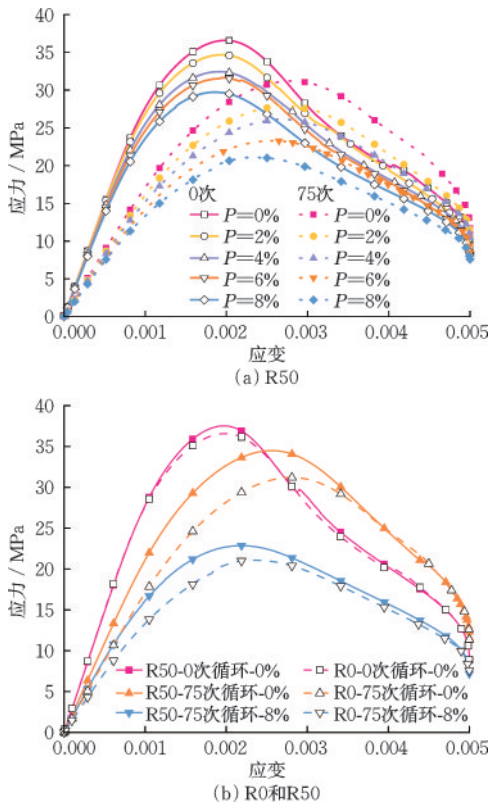


图 12 不同初始孔隙率DSC应力—应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of DSC with different initial porosities

力下降程度远小于R0,这是因为沙漠砂的掺入在一定程度上增加了小于10 nm孔隙含量,减少了大于100 nm孔隙含量^[26],延缓了混凝土内部孔隙水结冰所产生的冻胀破坏,提高其抗冻性能。

图 13 为不同冻融循环次数下R0和R50初始孔隙率与抗压强度关系。沙漠砂混凝土抗压强度随着初始孔隙率和冻融循环次数增加呈较大幅度降低。当初始孔隙率从0%增加到8%时,未冻融R0抗压强度由36.58 MPa下降到29.72 MPa,下降了18.75%;R50抗压强度从37.81 MPa降低到30.12 MPa,降低了20.33%。冻融循环75次后,R0抗压强度由31.19 MPa下降到21.08 MPa,损失了32.41%,R50抗压强度从34.8 MPa降低到22.85 MPa,损失了34.3%。初始孔隙率的增加和冻融循环相互作用,对混凝土损伤产生叠加作用。在冻结过程,孔隙中水结冰膨胀,受到膨胀力作用后孔壁扩张,超过极限值时,在孔周围形成微裂纹,为融化过程混凝土内部传输水分提供新通道。孔隙率越大,微观结构损伤产生的微裂纹越多^[27],反复冻融循环导致沙漠砂混凝土内部结构逐渐破坏,抗压强度大幅下降。

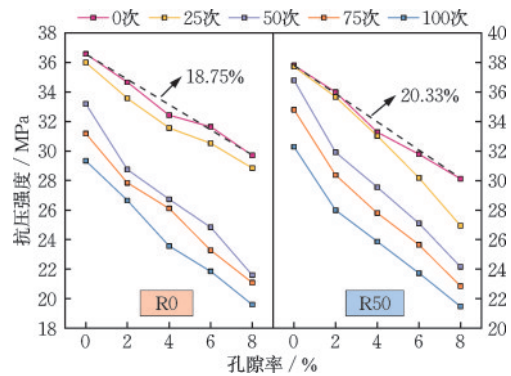


图 13 不同初始孔隙率DSC抗压强度

Fig.13 Compressive strength of DSC with different initial porosities

3.2.2 初始孔隙率对弹性模量影响

弹性模量取应力—应变曲线上上升段40%峰值应力处割线模量,图 14 为不同孔隙率下R0和R50弹性模量。随着初始孔隙率从0%增加到8%,两种替代率下混凝土弹性模量降低范围在8%~22%,说明弹性模量对孔隙率有显著敏感性。保持初始孔隙率不变,R0弹性模量随着冻融循环次数的增加而减小;冻融循环小于25次时,R50弹性模量随冻融循环次数的增加而增加,当冻融循环大于25次时,

R50弹性模量随冻融循环次数的增加而降低。产生这种现象的原因是在冻融初期,混凝土水化作用仍在继续,水中长时间浸泡为胶凝材料二次水化提供了有利条件^[28]。由于火山灰效应,沙漠砂中极细活性颗粒与Ca(OH)₂水化后生成硅酸钙等产物,填充了混凝土内部孔隙,优化了孔隙结构,提高混凝土密实度和均匀性,弹性模量增加。冻融循环25次后,尽管火山灰效应对混凝土性能有积极影响,但长期冻融循环作用使混凝土内部微裂纹和孔隙变多,水结冰时体积膨胀循环发生,导致孔隙进一步扩大和微裂缝的连接贯通,加速混凝土劣化,弹性模量降低。

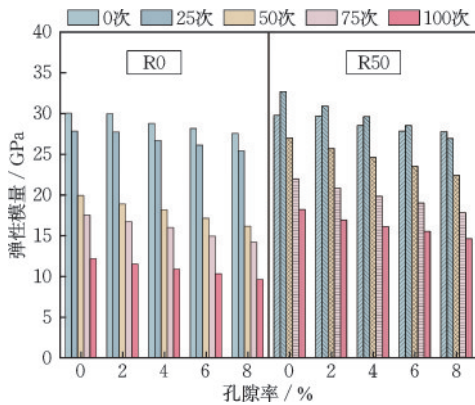


图14 不同孔隙率下DSC弹性模量

Fig.14 Elastic modulus of DSC with different initial porosities

3.2.3 可靠性分析

将本文模拟结果与文献[29-33]中抗压强度和弹性模量研究结果进行了对比,如图15所示。混凝土抗压强度和弹性模量均随着孔隙率的增加而降低,模拟预测结果和文献[29-33]中试验和数值结果相近,说明采用本文模拟方法研究单轴压缩下沙漠砂混凝土初始孔隙率对混凝土宏观性能影响是可靠的。

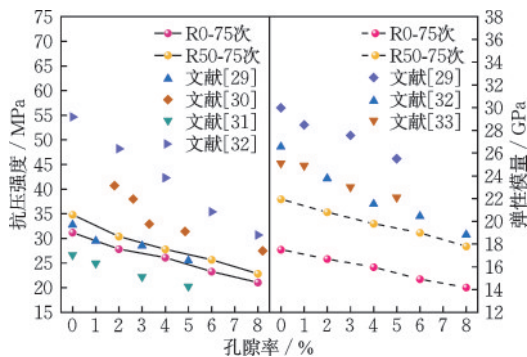


图15 模型对比

Fig.15 Model comparison

3.3 界面相强度对冻融后沙漠砂混凝土力学性能影响

3.3.1 界面相强度对应力—应变曲线影响

界面相是粗骨料与砂浆连接薄弱区,具有低强度、高水灰比和高氢氧化钙含量等特点,对混凝土力学性能和耐久性影响较大。本节讨论界面相强度为砂浆强度的0.6、0.7、0.8、0.9、1.0倍(界面相强度比)时沙漠砂混凝土力学性能变化。不同界面相强度下冻融前后R0和R50应力—应变曲线如图16所示。在相同冻融循环次数下,应力—应变曲线弹性阶段基本相似,软化段曲线相互平行。界面相性能提高对压缩荷载作用下混凝土抗压强度影响明显,对峰值应变影响较小。沙漠砂的掺入改善了混凝土颗粒级配,降低了孔隙度,减弱了混凝土“微区泌水”效应,ITZ结构得到改善,因此R50混凝土冻融后强度下降较缓慢。

图17为界面相强度比和抗压强度关系。随着界面相强度比提升,沙漠砂混凝土承载能力增大。未冻融时,界面相强度比从0.6变化到1.0,R50抗压强度增加9.3%,R0抗压强度增加10.1%;冻融75次

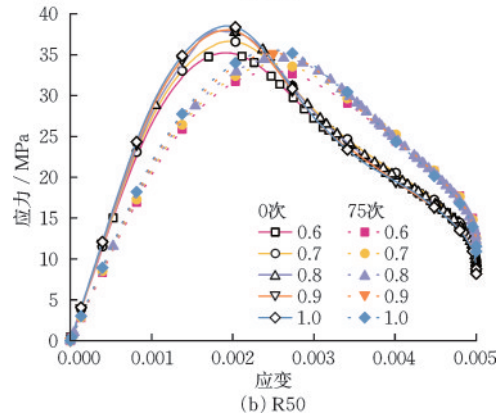
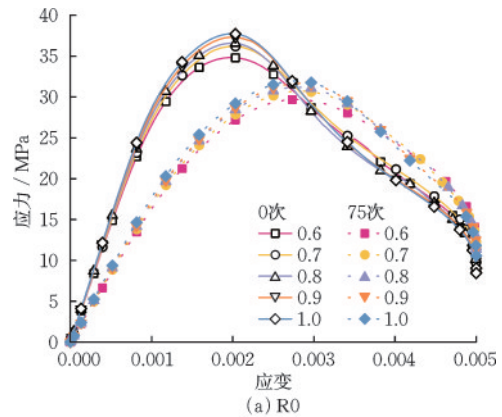


图16 不同界面相强度下应力—应变曲线

Fig.16 Stress-strain curves with different interfacial phase strengths

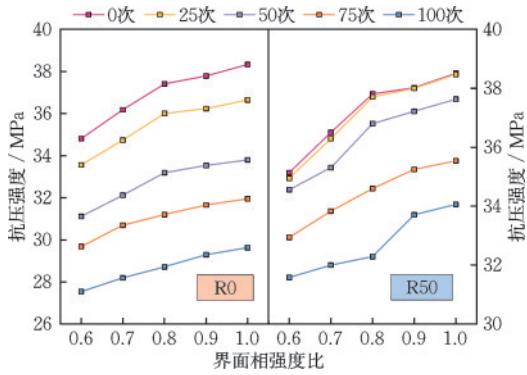


图17 界面相强度比和DSC抗压强度关系

Fig.17 Relationship between interfacial phase strength ratio and compressive strength of DSC

后,R50强度增加7.8%,R0抗压强度增加7.6%。界面过渡区中水泥颗粒的粒径范围在0.5~11.5 μm,砂浆基体中水泥颗粒的粒径范围在2.5~62.5 μm^[34],二者粒径差异使骨料附近存在大量无法堆积的颗粒空缺区,导致骨料周围区域多孔松散,形成边壁效应,增加了界面过渡区孔隙率和连通性,为介质传输提供了通道。界面相性能的提高可以减缓自由水在孔隙内移动速率,减少溶液相变对混凝土结构破坏作用,提高混凝土抗冻耐久性。

为评估界面相强度比和冻融循环次数对沙漠砂混凝土抗压强度的影响,绘制了三维响应云图,如图18所示。

通过曲面拟合分析,得到沙漠砂混凝土R0(式5)和R50(式6)抗压强度相对值与冻融循环次数、界面相强度比关系:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_0} = 1.07 - 0.15\lambda - 0.002N + 0.079\lambda^2 - 0.0000025N^2 \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_0} = 1.14 - 0.37\lambda + 0.000068N + 0.23\lambda^2 - 0.000013N^2 \quad (6)$$

式中,λ为界面相强度比;N为冻融循环次数;σ_N为冻融循环N次后抗压强度;σ₀为未冻融时抗压强度。

利用式(5)、式(6)计算得到R0、R50抗压强度预测值与模拟值、试验值^[35]比较,如图19所示。抗压强度预测值与模拟值误差范围为±10%,R0和R50预测值与模拟结果之比的平均值分别为1.018和0.994,方差为0.001和0.000074,说明了预测公式的准确性和可靠性,可以有效地进行沙漠砂混凝土力学性能预测。目前对于R50数值模拟研究相对较少,故仅将预测值和模拟值进行比较。

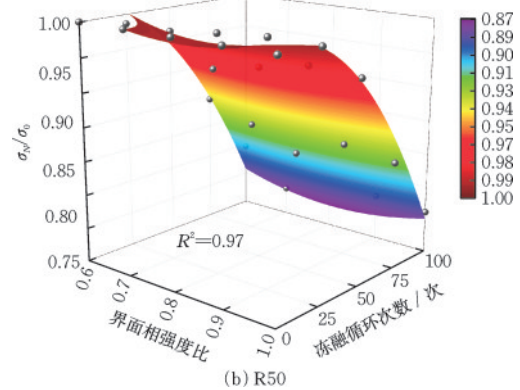
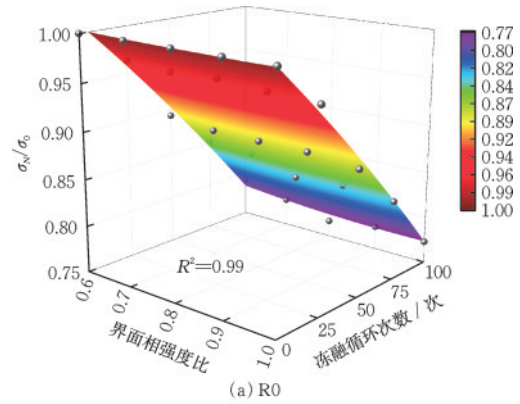


图18 界面相强度比、冻融循环次数与相对抗压强度三维云图

Fig.18 Three-dimensional contour maps of interfacial phase strength ratio, number of freeze-thaw cycles, and relative compressive strength

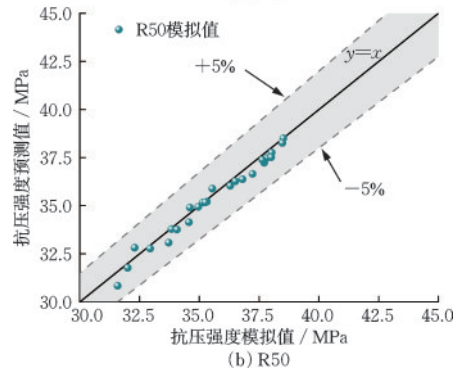
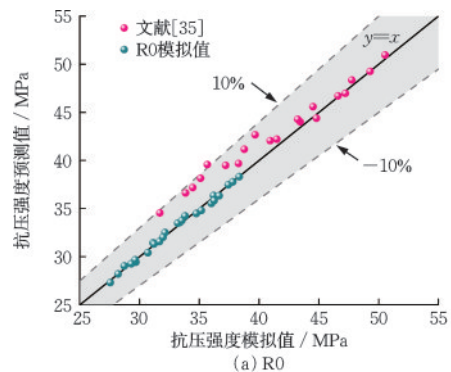


图19 抗压强度预测值与模拟值比较

Fig.19 Comparison between predicted and simulated compressive strengths

3.3.2 界面相强度对弹性模量影响

图 20 为不同界面相强度下沙漠砂混凝土弹性模量。弹性模量随着界面相强度的增加而变大。界面相性能的提高,使骨料和砂浆之间结合更加牢固,粘结力增强,增加了整体刚度,提高了混凝土弹性模量。

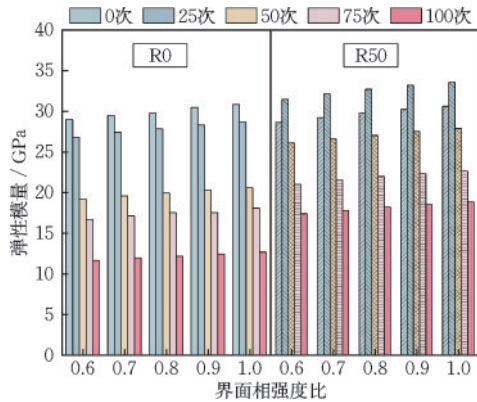


图 20 不同界面相强度 DSC 弹性模量

Fig.20 Elastic modulus of DSC with different interfacial phase strengths

4 结 论

基于二维细观模型,本文模拟了冻融循环过程中两种形状骨料沙漠砂混凝土温度场、温度应力变化,研究了初始孔隙率、界面相强度和冻融循环次数对冻融循环后 R0 和 R50 沙漠砂混凝土力学性能影响。主要结论如下:

(1)冻融循环过程中混凝土内部温度场呈不均匀环状分布,温度由外向内传递,表面温度变化速率快于内部。热学参数具有温度相关性,圆形骨料温度变化快于多边形骨料。

(2)随着冻融循环次数增加,混凝土内部温度应力先增后减,表面温度应力大于内部;R0 和 R50 抗压强度逐渐减小,弹性模量先增大后减小,R50 抗冻性好于 R0;骨料形状对温度应力影响较小。

(3)R0 和 R50 抗压强度和弹性模量随着初始孔隙率增加而降低;随着界面相性能提升,R0 和 R50 抗压强度和弹性模量提高。

参考文献:

[1] 那扎尔·努尔旦,牛景行,李志强.沙漠砂混凝土研究进

展[J].混凝土,2022,(11):27-31.

Na Zhaer·N, Niu J H, Li Z Q. Research progress of desert sand concrete[J]. Concrete, 2022, (11):27-31. (in Chinese)

[2] Li Y G, Zhang H M, Chen S J, et al. Multi-scale study on the durability degradation mechanism of aeolian sand concrete under freeze-thaw conditions[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340:127433.

[3] 申向东,邹欲晓,薛慧君,等.风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J].农业工程学报, 2019, 35(2): 161-167.

Shen X D, Zou Y X, Xue H J, et al. Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing-thawing-carbonization coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (2): 161-167. (in Chinese)

[4] Bai J W, Zhao Y R, Shi J N, et al. Damage degradation model of aeolian sand concrete under freeze-thaw cycles based on macro-microscopic perspective[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327:126885.

[5] 刘海峰,马映昌,张润奇,等.冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3):101-109, 117.

Liu H F, Ma Y C, Zhang R Q, et al. Influence of desert sand on axial compression behavior of concrete under freezing and thawing environment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53 (3) : 101-109, 117. (in Chinese)

[6] 段安,钱稼茹.混凝土冻融过程数值模拟与分析[J].清华大学学报(自然科学版),2009, 49(9): 1441-1445.

Duan A, Qian J R. Mathematical modeling and analysis of concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(9): 1441-1445.(in Chinese)

[7] Miao H B, Guo C, Lu Z R, et al. 3D mesoscale analysis of concrete containing defect damages during different freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2022, 358:129449.

[8] Zhang M J, Yu H F, Zhang J H, et al. Finite element analysis of stress-strain relationship and failure pattern of concrete under uniaxial compression considering freeze-thaw action [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 290: 109520.

[9] Fuller W B, Thompson S E. The laws of proportioning concrete [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907,59(2):67-143.

- [10] 曹静, 刘海峰. 混凝土动态力学性能数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 866-871, 884.
Cao J, Liu H F. Numerical simulation of dynamic mechanical properties of concrete [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 866-871, 884. (in Chinese)
- [11] Wriggers P, Moftah S O. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behaviour [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42 (7) : 623-636.
- [12] Scrivener L K, Crumbie K A, Laugesen P. The interfacial Transition Zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete [J]. Interface Science, 2004, 12 (4): 411-421.
- [13] Jin L, Liu K X, Zhang R B, et al. Effects of content and size of aggregate on the mechanical responses of concrete at cryogenic temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108737.
- [14] 金浏, 杨旺贤, 余文轩, 等. 基于细观模拟的轻骨料混凝土破坏行为及尺寸效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 91-99.
Jin L, Yang W X, Yu W X, et al. Study on failure behavior and size effect of lightweight aggregate concrete based on meso-simulation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 91-99. (in Chinese)
- [15] 吴刚, 滕念管, 王宇. 高温后石灰岩的物理力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 259-264.
Wu G, Teng N G, Wang Y. Physical and mechanical characteristics of limestone after high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (2): 259-264. (in Chinese)
- [16] 苏捷. 混凝土受压与受拉性能的尺寸效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
Su J. The research on the size effect of concrete behavior in compression and tension [D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [17] Chen C, Liu J X, Gui X M, et al. Mesoscale analysis of concrete under axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2022, 337: 127580.
- [18] 金浏, 张仁波, 杜修力. 力学损伤混凝土热传导行为细观研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 84-91, 159.
Jin L, Zhang R B, Du X L. Meso-scale investigation on thermal conduction behavior in concrete with mechanical damage [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 84-91, 159. (in Chinese)
- [19] Zhang W P, Min H, Gu X L, et al. Mesoscale model for thermal conductivity of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 8-16.
- [20] Zhen Y X, Zhang Y, Zhuo J B, et al. Mesoscale synergistic effect mechanism of aggregate grading and specimen size on compressive strength of concrete with large aggregate size [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130346.
- [21] Peng R X, Qiu W L, Teng F. Three-dimensional meso-numerical simulation of heterogeneous concrete under freeze-thaw [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118573.
- [22] 胡强, 李佳成, 陈宇良, 等. 高温后珊瑚海水海砂混凝土力学性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44 (3): 544-550, 567.
Hu Q, Li J C, Chen Y L, et al. Experimental study on mechanical properties of coral seawater sea sand concrete after high temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 544-550, 567. (in Chinese)
- [23] 刘一江. 冻融循环作用下 C30 沙漠砂混凝土抗折与轴心抗压强度试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
Liu Y J. Experimental study on flexural and axial compressive strength of C30 desert sand concrete under freeze-thaw cycles [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. (in Chinese)
- [24] Ji Y C, Pei Z Y, Xu W Y, et al. Deterioration performance analysis of recycled brick concrete subjected to freezing and thawing effect [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02722.
- [25] Lin Y J, Feng X, Zhang Z P. Microscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in recycled concrete under freeze-thaw action [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133892.
- [26] 薛慧君, 申向东, 邹春霞, 等. 基于 NMR 风积沙混凝土冻融孔隙演变研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 199-205.
Xue H J, Shen X D, Zou C X, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 199-205. (in Chinese)
- [27] Wei Y M, Chen X Z, Chai J R, et al. Correlation between mechanical properties and pore structure deterioration of recycled concrete under sulfate freeze-thaw cycles: an experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134794.
- [28] 于本田, 陈延飞, 李双洋, 等. 正十四烷/石墨低温相变

- 水泥基材料的制备及冻融损伤演化[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6):2864-2874.
- Yu B T, Chen Y F, Li S Y, et al. Preparation and freeze-thaw damage evolution of n-tetradecane/graphite low temperature phase change cement-based materials [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2864-2874. (in Chinese)
- [29] 邓朝莉, 李宗利. 孔隙率对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2016(7):41-44.
- Deng C L, Li Z L. Experimental study on mechanical properties of concrete with porosity[J]. Concrete, 2016 (7):41-44. (in Chinese)
- [30] 高辉, 张雄, 张永娟. 混凝土气孔结构对其强度及界面过渡区的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 751-756.
- Gao H, Zhang X, Zhang Y J. Effect of air void structure on strength and interfacial transition zone of concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5):751-756. (in Chinese)
- [31] 张晓飞, 盛瑶, 施润, 等. 不同孔隙率的碾压混凝土力学性能试验研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(4): 840-847.
- Zhang X F, Sheng Y, Shi R, et al. Experimental study on mechanical properties of RCC with different porosity [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40 (4): 840-847. (in Chinese)
- [32] Zhang L F, Xie H, Feng J L. Mesoscale modeling and failure mechanism of concrete considering pore structures and actual aggregate shapes [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353:129133.
- [33] Zhang G H, Yang Z D, Yan Y Z, et al. Experimental and theoretical prediction model research on concrete elastic modulus influenced by aggregate gradation and porosity[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1811-1811.
- [34] 黄燕, 胡翔, 史才军, 等. 混凝土中水泥浆体与骨料界面过渡区的形成和改进综述[J]. 材料导报, 2023, 37 (1): 106-117.
- Huang Y, Hu X, Shi C J, et al. Review on the formation and improvement of interfacial transition zone between cement paste and aggregate in concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(1): 106-117. (in Chinese)
- [35] Gan L, Feng X W, Zhang H W, et al. Three-dimensional meso-numerical model of freeze-thaw concrete based on the porosity swelling theory[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(10): 05023005.
- (本文编辑: 苏泽云)



(上接第 389 页)

- [22] 韩军, 李英民, 唐格林, 等. 坡地掉层结构上接地支座形式对框架结构抗震性能的影响分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增2): 93-100.
- Han J, Li Y M, Tang G L, et al. Influence of ground-support types on the seismic performance of structures-supported by foundations at different ground levels [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup2): 93-100. (in Chinese)
- [23] 唐格林. 掉层结构上接地方式对结构抗震性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Tang G L. Study on the impact of the seismic performance on the grounding mode for structures supported by foundations with different locations [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [24] Surana M, Singh Y, Lang D H. Seismic characterization and vulnerability of building stock in hilly regions [J]. Natural Hazards Review, 2018, 19: 04017024.
- [25] Surana M, Singh Y, Lang D H. Fragility analysis of hillside buildings designed for modern seismic design codes [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2018, 27(14): e1500.
- [26] Xu G, Zhang R J, Li A Q. Seismic performance and improvements of split-foundation buildings in across-slope direction [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(4): 749-763.
- [27] Jiang B, Li Y, Tang Y, et al. Shaking table test of a split-foundation RC frame structure with one lower story compared with a conventional RC frame structure [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(16-18): 2340025.
- [28] 徐军. 掉层钢筋混凝土框架结构地震破坏机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- Xu J. Seismic failure mechanism of split-foundation reinforced concrete frame structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [29] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [30] 建筑隔震橡胶支座: JG/T 118—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.