

文章编号:1007-9629(2023)08-0845-08

大温差循环作用下混凝土温度响应及损伤模拟

郭献戌, 安明喆*, 王月, 余自若, 韩松

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:通过数值模拟和试验相结合的方法,建立了混凝土三维球体随机骨料模型,利用有限元软件分析了温度响应和损伤积累过程,并通过大温差循环试验验证了模拟结果.结果表明:随着温差循环次数的增加,混凝土导热性能变差,温度梯度呈增大趋势;骨料与砂浆界面处产生较大拉应力,损伤由界面开始产生;每次循环的升温过程拉应力增大,使得损伤逐渐积累并从界面向基体扩展,最终损伤区域连通;温度响应和静弹性模量损失率模拟结果与试验测定值吻合良好,数值模拟方法合理有效.

关键词:混凝土;大温差循环;随机骨料模型;温度响应;损伤

中图分类号:TU528.31

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.004

Simulation on Temperature Response and Damage of Concrete under Large Temperature Difference Cycling

GUO Xianxu, AN Mingzhe*, WANG Yue, YU Ziruo, HAN Song

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: By combination of numerical simulation and experiment, a three-dimensional spherical random aggregate model of concrete was established. The finite element software was used to analyse the temperature response and damage accumulation process. The simulation results were verified by the large temperature difference cycling test. The results show that with the increase of temperature difference cycling times, the thermal conductivity of concrete becomes worse and the temperature gradient increases. Large tensile stress is generated at the interface between aggregate and mortar, and the damage starts from the interface. The tensile stress increases in the heating process of each cycle, with the result that the damage gradually accumulate and expand from the interface to the matrix, and at last the damage area is connected. The simulation results of temperature response and static elastic modulus loss rate are in good agreement with the experimental values.

Key words: concrete; large temperature difference cycling; random aggregate model; temperature response; damage

高原地区具有日照辐射强、昼夜温差大和多风等气候特点.在强烈的日照辐射下,结构混凝土温度持续升高,最终比环境温度高 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],而夜晚在气温和风的作用下混凝土温度又会降低,从而使得混凝土表面昼夜温差达 $40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,该大温差循环作用导致混凝土材料性能劣化.

部分学者研究了大温差循环作用对混凝土性能

的影响.如赵亮^[2]开展混凝土响应试验,发现混凝土内外温度差呈周期性变化,且距表面越远内外温度差异越大;Shokrieh等^[3]研究表明,在 $25\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差下循环7d,混凝土抗压强度降低4.9%、抗弯强度降低21.0%;王树和等^[4]和Huang等^[5]研究认为温差循环过程中混凝土的微裂纹损伤从界面过渡区开始出现,且裂纹宽度随着温差循环次数的增加而增大.

收稿日期:2022-06-21; 修订日期:2022-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878033);北京市自然科学基金资助项目(8192032)

第一作者:郭献戌(1997—),男,河南郑州人,北京交通大学硕士生.E-mail:Guoxx6877@163.com

通讯作者:安明喆(1970—),男,吉林蛟河人,北京交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:mzhan@bjtu.edu.cn

考虑温差循环试验周期长、耗能高、受配合比影响大等缺点,已有学者开始建立数值模拟方法进行研究.如曾启^[6]采用多骨料模型模拟发现损伤主要集中在界面过渡区并不断向砂浆扩展,但模型中骨料位置由人为确定;Zheng等^[7]基于二维随机骨料模型,研究发现骨料的存在使得混凝土早期龄期温度分布不均;梁敏飞等^[8]则基于混凝土随机骨料模型对混凝土内部的水渗透规律进行了研究.上述研究均可为大温差循环作用下数值模拟研究提供思路.

本文建立了三维球体随机骨料模型,研究了大温差循环作用下混凝土的温度响应和损伤积累过程,通过模拟大温差循环试验对模拟结果进行了验证.

1 试验

1.1 原材料及配合比

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;掺合料为Ⅱ级粉煤灰,需水量比(质量比,文中涉及的比值、含固量等除特别说明外均为质量比或质量分数)为100%;粗骨料为5~20 mm连续级配碎石;细骨料为天然河砂,属Ⅱ区级配,细度模数为2.7;减水剂为聚羧酸高性能减水剂,含固量为18.74%,减水率为27%.以桥梁承台、墩身为代表性结构,所采用的混凝土配合比如表1所示,水胶比为0.36,砂率为38%,强度等级可达C45.

表1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

kg/m ³					
Cement	Fly ash	Sand	Gravel	Water	Superplasticizer
316.0	105.0	696.0	1 135.0	151.0	3.4

1.2 试验方法

1.2.1 温差循环试验

通过温差循环试验模拟混凝土遭受的长期大温差循环作用,具体步骤为:(1)将试件放入烘箱,温度设置为65℃,升温及恒温过程共持续2.5 h;(2)关闭干燥箱,利用工业风扇模拟7 m/s的风速,对试件进行约1.5 h的吹风降温,使其温度降至20℃左右.

1.2.2 温度测试试验

试件采用边长100 mm的立方体试块.试件制备及试验步骤如下:(1)在PVC管管底约2 mm处开2

条不连通的孔洞,并将管底密封,管中塞入塑胶棒;(2)从试模顶面中心位置将PVC管管底向下固定在距混凝土表面27、42 mm处后浇筑试件;(3)试件养护完成后进行温差循环,达到一定次数后,取出塑胶棒并插入JWSK-6温度传感器,感应位置为不连通孔洞处即距混凝土表面25、40 mm处,在PVC管顶部进行密封处理;(4)采集温差循环过程中混凝土内部温度数据.温度测试装置示意图如图1所示.

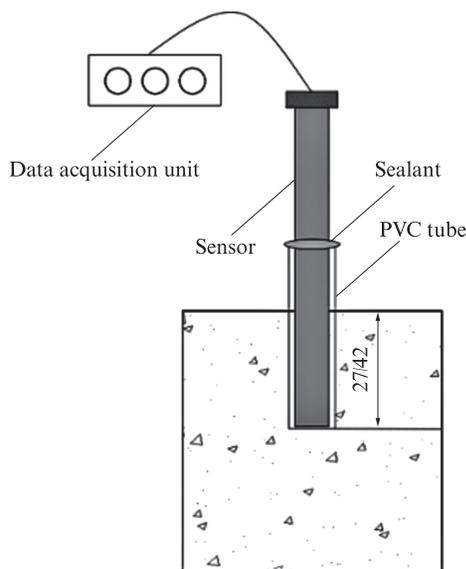


图1 温度测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature test device (size:mm)

1.2.3 静弹性模量试验

数值模拟中的损伤模型以静弹性模量变化表征,为验证模拟结果需要测定不同温差循环次数后混凝土的静弹性模量.试验参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行,棱柱形试件尺寸为100 mm×100 mm×300 mm.

2 基于随机骨料模型的温差循环模拟方法

2.1 随机骨料几何模型的建立

为了探究温差循环作用下混凝土温度响应及损伤演化规律,将混凝土视为水泥砂浆和粗骨料组成的两相材料,采用随机骨料几何模型进行数值模拟分析.

依据JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》中5~20 mm连续级配粗骨料的要求确定骨料级配,并对粒径跨度较大的范围进行细化.模拟用粗骨料的级配如表2所示.

表2 模拟用粗骨料的级配
Table 2 Gradation of coarse aggregate for simulation

Sieve size/mm	2.36	4.75	6	8	9.5	10	13	16	19	26.5
Residue rate(by mass)/%	100.00	96.00	90.00	78.00	66.75	63.00	41.00	22.00	6.00	0

为生成三维球体随机骨料模型,建立模型算法,其流程图如图2所示.骨料模型生成的具体步骤为:(1)由较大的粒径区间开始,调用 Matlab 软件中的 rand 函数返回(0,1)区间上均匀分布的随机数 x ,经过数学变换转化为骨料的半径和坐标;(2)检验新生成骨料是否超过混凝土边界,认为混凝土表面 0.5 mm 范围内是纯砂浆;(3)检验新生成骨料是否与已生成骨料重叠,考虑水泥砂浆对粗骨料的包裹,设置影响系数 1.05 来限制 2 个骨料的距离,即 2 个球体骨料球心之间的距离大于 2 个骨料半径之和的 1.05 倍;(4)检验骨料体积分数是否达到要求,直至完成所有骨料的生成.

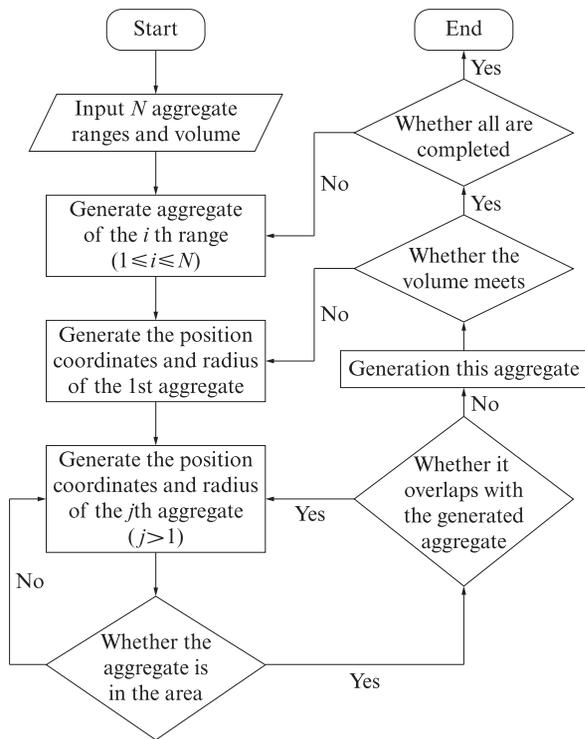


图2 随机骨料模型算法流程图

Fig. 2 Flow chart of random aggregate model

2.2 材料参数的确定

本研究所需的原材料参数参考文献[9-11]取值,其中粗骨料参数均设置为定值;水泥砂浆的密度和比热容按照原材料的比例加权平均,热膨胀系数、弹性模量、泊松比均根据复合材料理论中的 Mori-Tanaka 方法计算,导热系数根据 Hasselam-Johnson 模型^[12]计

算,最终得到的粗骨料和水泥砂浆参数如表3所示.

由于粗骨料的强度较高、性能较好,大温差循环作用下骨料不发生损伤,因此将骨料设置为线弹性模型.水泥砂浆设置为 Mazars 损伤模型^[13],等效应变 ϵ 定义为:

$$\epsilon = \sqrt{\langle \epsilon_1 \rangle^2 + \langle \epsilon_2 \rangle^2 + \langle \epsilon_3 \rangle^2} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_i (i=1, 2, 3)$ 为主应变; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macaulay 函数, $\langle x \rangle = (x + |x|) / 2$.

为区分拉和压的不同,将损伤 D 分为拉损伤变量 d_t 和压损伤变量 d_c 两部分,损伤演化方程为:

$$D = \alpha_t d_t + \alpha_c d_c \quad (2)$$

$$d_t = 1 - \frac{\kappa_0(1 - A_t)}{\epsilon} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\epsilon - \kappa_0)]} \quad (3)$$

$$d_c = 1 - \frac{\kappa_0(1 - A_c)}{\epsilon} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\epsilon - \kappa_0)]} \quad (4)$$

式中: α_t, α_c 为加权系数,由应力状态确定; A_t, A_c, B_t, B_c 为损伤参数; κ_0 为损伤开始的应变值.

2.3 大温差循环作用模拟

针对试验采用的 100 mm 立方体混凝土试件,选取试件的 1/8 进行模拟,如图3所示.初始及边界条件如下:(1)初始温度为 20 °C;(2)3 个断面为对称面约束,其余 3 个外表面作为非对称面且不设约束;(3)以温差循环试验烘箱内实测温度为基础,经平滑处理后得到模拟温差循环中环境温度 T 的变化,如图4所示.单次温差循环时长为 240 min,其中循环时间 t 为 150 min 前为升温阶段,150 min 后为降温阶段;(4)非对称面设置为第3类换热边界,表面换热系数模型^[14]为:

$$h = 15.417 + 3.2688v \quad (5)$$

式中: h 为混凝土的表面换热系数, $W / (m^2 \cdot K)$; v 为环境风速, m/s .

网格划分选择自由四面体网格,考虑计算时间和结果收敛性,设置最小网格单元大小为 0.5 mm,最大单元增长率为 1.45,网格划分结果如图5所示.在每次计算前,通过 Comsol with Matlab 建立 Comsol 和 Matlab 的接口,以上 1 次的损伤计算结果为依据,更新水泥砂浆的力学性能参数,并进行下 1 次温差循环作用的模拟.

表3 模拟用材料参数

Table 3 Material parameters for simulation

Material	Specific heat capacity/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Density/ ($kg \cdot m^{-3}$)	Thermal conductivity/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Coefficient of thermal expansion $\times 10^6 / K^{-1}$	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
Coarse aggregate	745	2 700	3.15	8.00	52.0	0.19
Cement mortar	1 121	2 239	1.51	12.05	29.2	0.21

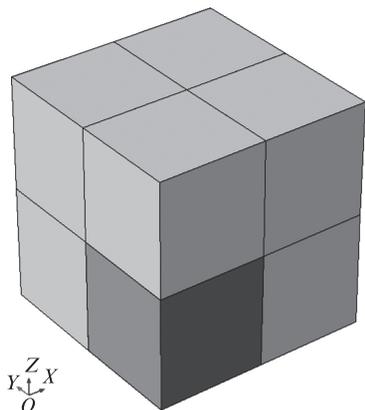


图3 模拟尺寸示意图

Fig. 3 Dimension schematic diagram for simulation

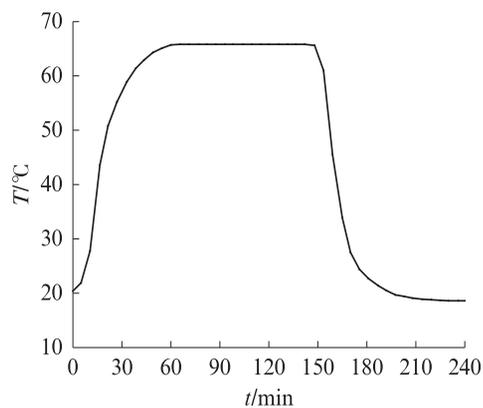
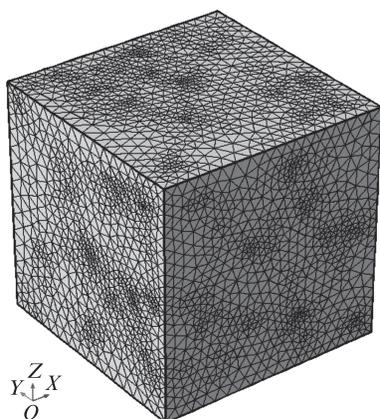
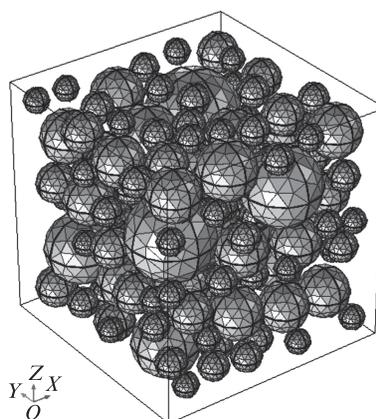


图4 模拟环境温度

Fig. 4 Ambient temperature for simulation



(a) Cement mortar



(b) Aggregate

图5 网格划分结果图

Fig. 5 Diagram of meshing

3 数值模拟分析

3.1 温度响应

选取特征点和特征面进行分析.其中(50,50,50)为体心点,(50,50,0)为面心点,(50,50,25)为体心点和面心点连线的中点;特征截面为距YOZ平面10、40 mm的截面.

图6为混凝土内部特征点在单次温差循环过程中的温度和温度梯度变化曲线.由图6(a)可见:混凝土不同位置的温度变化与环境温度变化趋势一致,均呈先增大后减小的趋势,但具有明显的滞后性;两者的温度差值也呈先迅速增大后逐渐减小的趋势,升温 and 降温阶段最大差值分别出现在升温第30 min和降温第20 min.由图6(b)可见:随着深度的增加,温度梯度迅速减小;各位置温度梯度均呈先增大后减小的趋势,且降温阶段的温度梯度值较升温阶段更大,这是因为降温阶段风的作用使得混凝土与外界热交换更为频繁.

图7分别为不同温差循环次数 n 下第30 min时混凝土内部特征点的温度和温度梯度变化曲线.由

图7可知,随着温差循环次数的增加,不同循环过程同一时刻的混凝土温度呈减小趋势,温度梯度则呈增大趋势.说明随着温差循环次数的增加,混凝土导热性能下降,热量传递变缓.

3.2 应力及损伤

图8为混凝土特征截面在单次温差循环过程中的温度应力云图.由图8可见:混凝土内部温度应力在升温过程逐渐增大,150 min时部分水泥砂浆位置的拉应力达3.90 MPa,降温过程温度应力逐渐减小;温度拉应力多出现于骨料和水泥砂浆的界面位置,仅有极少部分出现于水泥砂浆深部.

图9为混凝土特征截面在不同温差循环次数下第150 min(应力最大值)时的温度应力云图.其中图9(d)为第30次与第120次的应力差云图.由图9可见,随着循环次数的增加,拉应力较大位置处的应力逐渐减小,周围区域的拉应力逐渐增大.这可能是因为混凝土内部拉应力值较大处发生损伤,静弹性模量降低;而在随后的温差循环中,损伤处拉应力减小,并导致其周围区域拉应力增大,使得原有损伤不

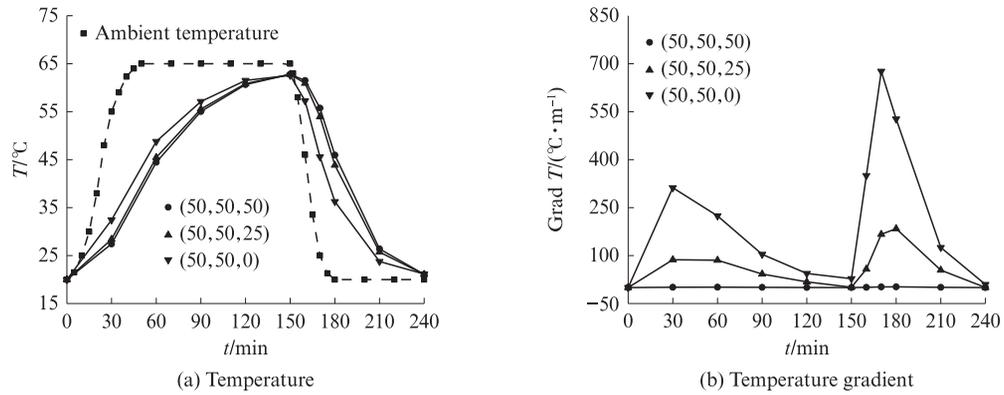


图6 混凝土内部特征点在单次温差循环过程中的温度和温度梯度变化曲线

Fig. 6 Temperature and temperature gradient variation curves of internal characteristic points in concrete during single temperature difference cycle

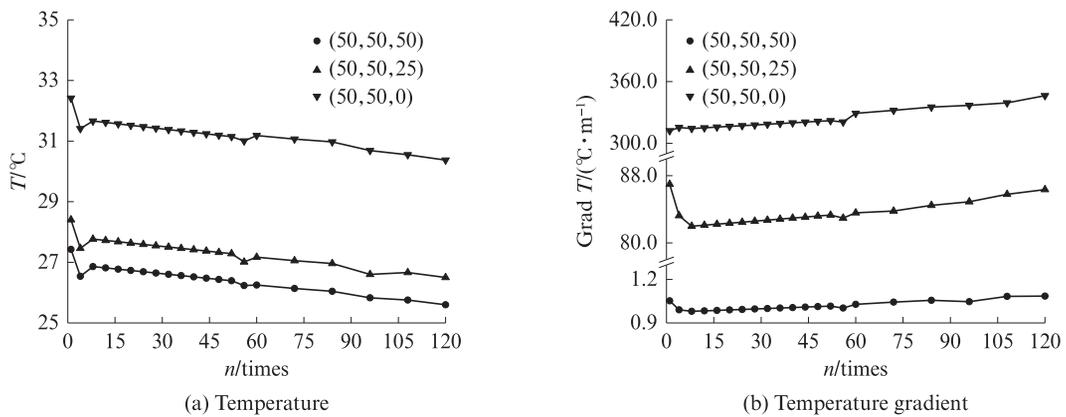


图7 不同温差循环次数下第30 min时混凝土内部特征点的温度和温度梯度变化曲线

Fig. 7 Temperature and temperature gradient variation curves of internal characteristic points in concrete at 30 min in temperature different cycling times

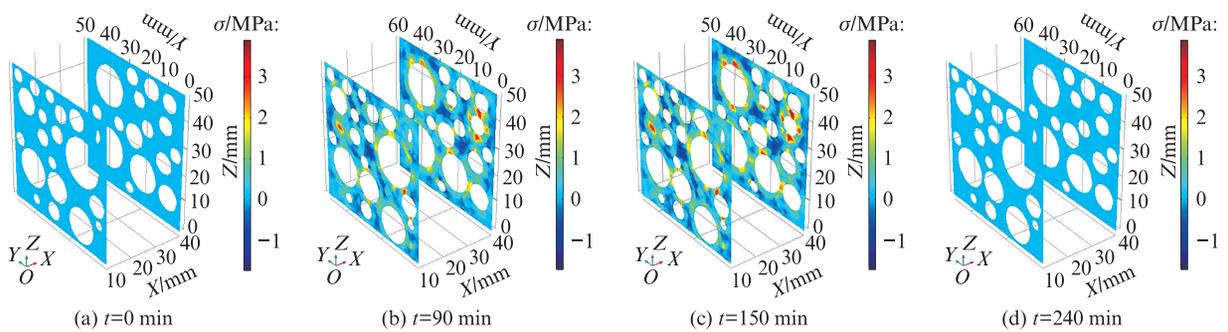


图8 混凝土特征截面在单次温差循环过程中的温度应力云图

Fig. 8 Temperature stress cloud diagram of concrete characteristic cross-section during single temperature difference cycle

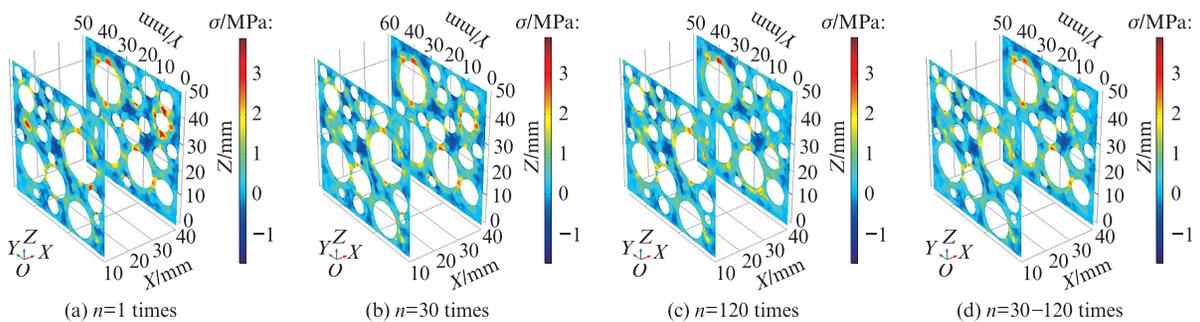


图9 混凝土特征截面在不同温差循环次数下150 min时的温度应力云图

Fig. 9 Temperature stress cloud diagram of concrete characteristic cross-section at 150 min in temperature different cycling times

断扩展、新损伤不断产生。

单次温差循环过程和不同循环次数后混凝土的损伤云图分别如图10、11所示。由图10可见：单次循环前30 min混凝土内无损伤产生；随着温差循环的进行，损伤出现在骨料和砂浆交界处，这是因为砂浆和骨料的热膨胀系数存在较大差异，温差循环作用

下发生不协调变形，进而产生较大的温度应力，导致损伤；150 min后的降温过程中，几乎无新损伤产生，且已有损伤也不再增大，这与温度应力结果相符。由图11可见，随着温差循环次数的增加，原有损伤不断累积，其周围又不断产生新的损伤，最终连通并贯穿骨料间的水泥砂浆。

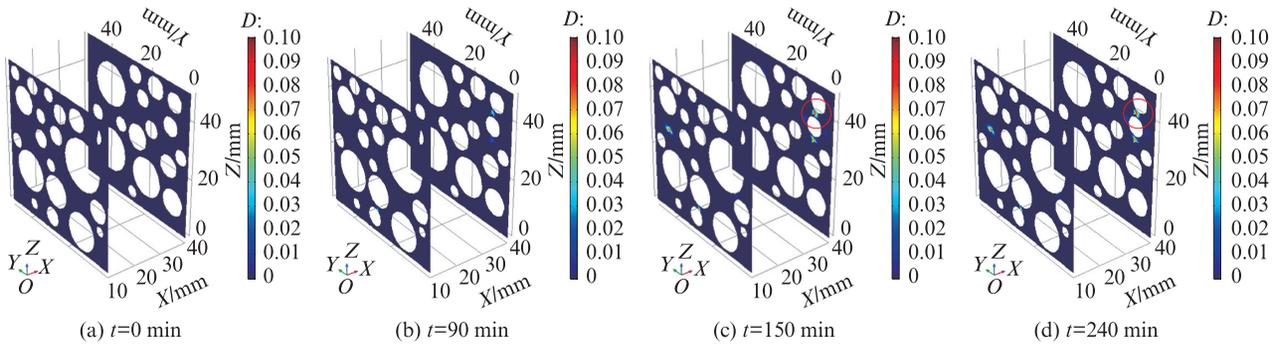


图10 混凝土特征截面在单次温差循环过程中的损伤云图

Fig. 10 Damage cloud diagram of concrete characteristic cross-section during single temperature difference cycle

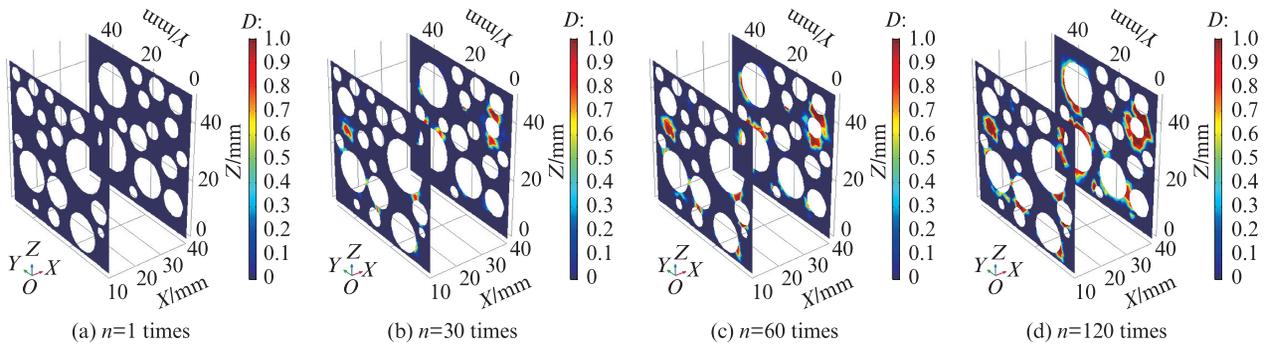


图11 混凝土特征截面在不同温差循环次数后的损伤云图

Fig. 11 Damage cloud diagram of concrete characteristic cross-section in temperature different cycling times

单次循环过程中水泥砂浆的损伤曲线如图12所示。由图12可见，升温过程前30 min无损伤产生，30~120 min的损伤近似呈线性增长，120~150 min的损伤增长速率减缓；在降温阶段，损伤仅在150~170 min有极少的增长。

水泥砂浆平均损伤和混凝土静弹性模量损失率随温差循环次数的变化曲线如图13所示。由图13可见，随着温差循环次数的增加，砂浆平均损伤和混凝土静弹性模量损失均逐渐增大，30、60、90、120次温差循环作用后水泥砂浆的平均损伤分别为0.05、

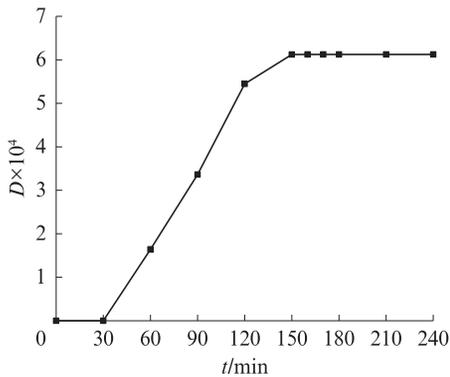


图12 单次温差循环过程中水泥砂浆的损伤曲线
Fig. 12 Damage curve of cement mortar during single temperature difference cycling

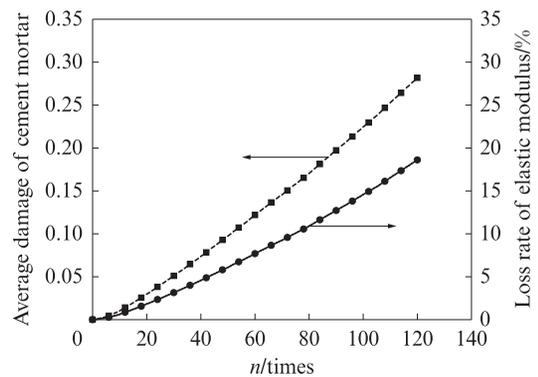


图13 水泥砂浆损伤和混凝土静弹性模量变化曲线
Fig. 13 Variation curve damage of cement mortar and static elastic modulus of concrete

0.12、0.20 和 0.28,混凝土静弹性模量分别降低 3.15%、7.69%、12.72% 和 18.61%。随着温差循环次数的增加,混凝土静弹性模量损失速率加快。

4 模拟结果验证

4.1 温度响应

在混凝土温度测试前,将试件置于 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的室内 2 d,使混凝土试件内外温度基本趋于一致。

温差循环作用下混凝土深度 d 为 25、40 mm 的温度实测值和模拟值对比如图 14 所示。由图 14 可见,与模拟温度值相比,试验温度变化在温差循环前后的总体规律一致,升温阶段温度值随温差循环的进行而降低,降温阶段温度值则升高,试验结果和模拟结果的平均差值在 1.5°C 以内,最大差值在 4°C 以内。总体来说,模拟温度结果和试验温度结果较为相符。

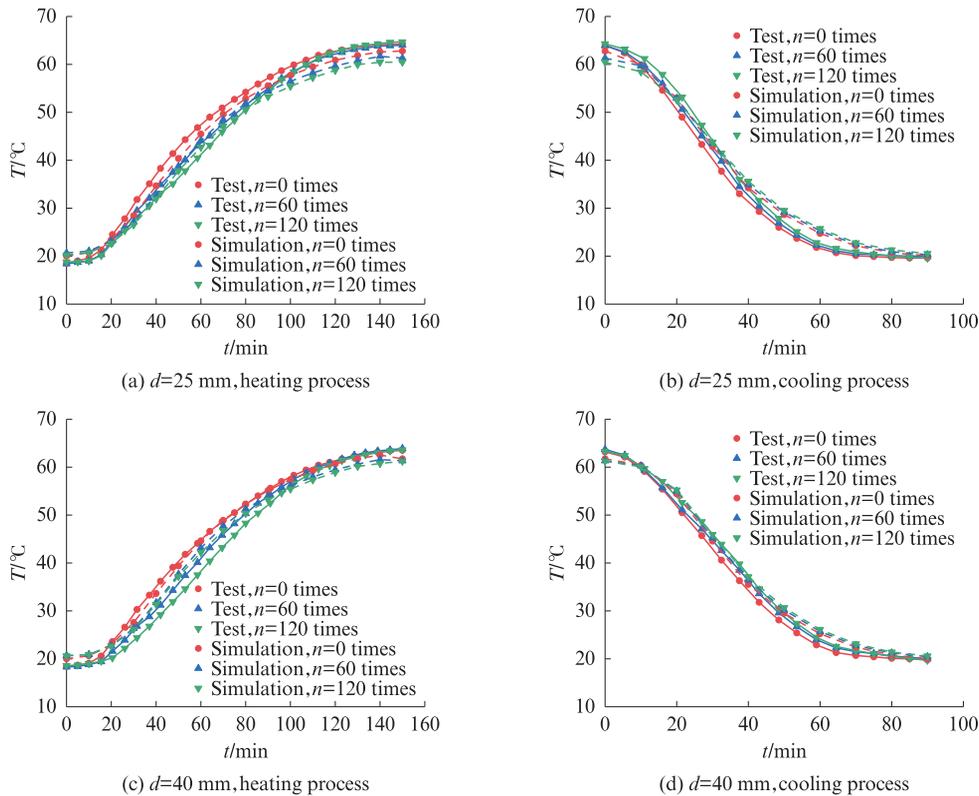


图 14 混凝土温度响应实测值与模拟值对比

Fig. 14 Comparison between measured and simulated temperature response of concrete

4.2 静弹性模量

温差循环作用下混凝土静弹性模量实测值和模拟值的对比如图 15 所示。由图 15 可见,混凝土静弹

性模量实测值随温差循环次数的增加而不断降低,60、120 次温差循环后分别降低 6.8%、16.1%。同时,实测值和模拟值吻合良好,120 次温差循环后混凝土静弹性模量模拟值降低 18.6%。由于 Mazars 损伤模型为各向同性弹性损伤模型,只考虑了损伤对刚度的影响,由于还存在试验条件无法严格控制等客观因素,因此认为误差是合理可接受的。

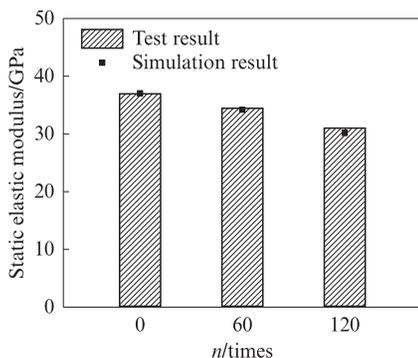


图 15 混凝土静弹性模量实测值和模拟值的对比

Fig. 15 Comparison between measured and simulated static elastic modulus of concrete

5 结论

(1)大温差循环作用下,混凝土内部温度变化较环境温度变化具有明显的滞后性;随着深度的增加,混凝土温度梯度迅速减小。随着温差循环作用次数的增加,混凝土内部热传导速度减缓,导热性能变差,温度梯度总体呈增大趋势。

(2)温差循环过程中,混凝土内骨料与砂浆交界处的拉应力值较大,损伤由此产生;在每次循环的升温过程中,已损伤区域周围的拉应力逐渐增大,不断产生新的损伤,最终损伤区域连通并贯穿水泥砂浆。

(3)温差循环作用下,混凝土静弹性模量逐渐降低,120次温差循环作用后模拟值和实测值分别降低18.6%和16.1%。混凝土温度响应和静弹性模量损失率的模拟结果与试验结果总体较为接近,吻合良好,本文的数值模拟研究方法合理有效。

参考文献:

- [1] BAIRAGI N K, DUBAL N S. Effect of thermal cycles on the compressive strength, modulus of rupture and dynamic modulus of concrete[J]. Indian Concrete Journal, 1996, 70(8):423-426.
- [2] 赵亮. 周期性温-湿度作用下混凝土类疲劳效应研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2018.
ZHAO Liang. Study on the pseudo fatigue effect of concrete when suffering periodic temperature and humidity [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.(in Chinese)
- [3] SHOKRIEH M M, HEIDARI-RARANI M, SHAKOURI M, et al. Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8):3540-3549.
- [4] 王树和, 水中和, 玄东兴. 大温差环境条件下混凝土表面裂缝损伤[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(S2):122-125.
WANG Shuhe, SHUI Zhonghe, XUAN Dongxing. Investigation on surface cracking damage of concrete under big temperature difference[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2006, 36(S2):122-125.(in Chinese)
- [5] HUANG H F, AN M Z, WANG Y, et al. Effect of environmental thermal fatigue on concrete performance based on mesostructural and microstructural analyses[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207:450-462.
- [6] 曾启. 温度循环作用后混凝土力学性能试验研究及破坏机理分析[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
ZENG Qi. Experiment and analysis of concrete after thermal cycles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
(in Chinese)
- [7] ZHENG Z S, WEI X S. Mesoscopic models and numerical simulations of the temperature field and hydration degree in early-age concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266:121001.
- [8] 梁敏飞, 封坤, 肖明清, 等. 基于材料试验和细观模型的混凝土渗透性研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):801-809.
LIANG Minfei, FENG Kun, XIAO Mingqing, et al. Water permeability of concrete based on materials experiment and mesoscale model[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):801-809.(in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 陈德鹏, 钱春香, 王辉, 等. 水泥基材料比热容测定及计算方法的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2):127-131.
CHEN Depeng, QIAN Chunxiang, WANG Hui, et al. Research on determination and calculation method of specific heat capacity of cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2):127-131.(in Chinese)
- [11] WANG H, MANG H, YUAN Y, et al. Multiscale thermoelastic analysis of the thermal expansion coefficient and of microscopic thermal stresses of mature concrete[J]. Materials, 2019, 12(17):2689.
- [12] 杨正宏, 李婷婷, 于龙. 低密度泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):322-327.
YANG Zhenghong, LI Tingting, YU Long. Investigations on thermal conductivity models of low density foamed concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):322-327.(in Chinese)
- [13] 程志诚, 徐青, 徐轶. 水泥砂浆立方体试件劈拉强度尺寸效应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(9):772-777.
CHENG Zhicheng, XU Qing, XU Yi. Size effect study of splitting tensile strength of cement mortar cubic specimen[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(9):772-777.
(in Chinese)
- [14] 鲁彩凤, 袁迎曙. 人工气候环境下粉煤灰混凝土微环境温度响应预计[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4):571-577, 612.
LU Caifeng, YUAN Yingshu. Micro-environment temperature response prediction for fly ash concrete in artificial climate environment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(4):571-577, 612.(in Chinese)