

# 微膨胀混凝土早期收缩试验与数值分析

李越, 阮欣, 霍宁宁

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 通过建立微膨胀混凝土水泥浆体早期收缩以及膨胀剂膨胀效应机理参数模型, 引入在混凝土材料细观模拟, 实现微膨胀混凝土早期收缩行为的细观场域仿真分析。基于材料试验监测结果进行模型参数修正, 校验模拟方法的准确性, 并探讨材料细观变异性以及骨料颗粒类型对于材料收缩应变分布的影响。研究表明, 微膨胀混凝土收缩细观模型能够精准便捷地描述材料应变随时间变化规律; 骨料颗粒空间随机分布对材料内部收缩应变场域分布影响显著, 受拉应力峰值出现于细长骨料棱角位置以及骨料间隙位置水泥浆体, 该膨胀剂效应能够降低材料内部受拉应力水平至普通混凝土 20% 左右, 有效缓解材料收缩微观开裂损伤的潜在风险, 保障工程结构应用中材料内部应力储备。基于研究模拟结果, 结合具体结构性能需求仍有必要对骨料颗粒种类、形状进行优化控制, 以实现材料内部较低且均匀的初始收缩应力场域分布。

**关键词:** 混凝土; 微膨胀混凝土; 混凝土收缩; 试验研究; 参数分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

## Early-age Shrinkage Experiment of Micro-expansive-concrete and Numerical Analysis

LI Yue, RUAN Xin, HUO Ningning

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** By establishing the mechanism parameter models of the early shrinkage of cement mortar and expansion effect of agent, the mesoscopic simulation analysis of micro-expansive concrete early expansion behavior was completed with mesoscopic modelling method. With parameter modification based on the measuring results of material test, the simulation accuracy was verified and the influence of material

mesoscopic variability and aggregate particle types on the distribution of material shrinkage strain was discussed. The investigation results show that the mesoscopic shrinkage model of micro-expansive concrete can describe the rule of material strain time-dependent distribution accurately and conveniently. The influence of aggregate random distribution on the material internal shrinkage strain distribution is remarkable. The peak tensile stress appears on in the angular position of slender aggregates and the cement mortar narrow gap between particles, and in the specified micro-expansive concrete material, the effect of expansion agent can reduce the tensile stress to about 20% of the normal concrete material, which can alleviate the potential risk of micro-scale shrinkage cracking damage and ensure the stress reserve in material for engineering structural applications. According to the discussion, it is necessary to control and optimize the aggregate types and shapes based on the detailed requirement on structural performance, and the low and uniformed initial shrinkage stress distribution in material can be realize.

**Key words:** concrete; micro-expansive concrete; concrete shrinkage; experiment investigation; parameter analysis

随着预制装配结构在基础设施建设中的普及, 连接构造的混凝土收缩问题逐渐引起工程师和研究者的关注, 严重的混凝土材料收缩引发的局部受拉应力状态甚至开裂问题, 会最终导致结构连接缺陷和长期服役病害问题的产生。微膨胀混凝土通过添加少量的膨胀剂, 使得材料在水化干燥收缩期间发生一定程度的膨胀, 从而补偿混凝土收缩变形, 达到

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600100); 国家自然科学基金(51678435, 52078367)

第一作者: 李越(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁混凝土多尺度建模与耐久性模拟。

E-mail: yueli@tongji.edu.cn

通信作者: 阮欣(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计理论与长期性能。

E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

防治混凝土收缩开裂的问题,实现提高混凝土结构性能的目的<sup>[1]</sup>。近年来,通过利用材料微膨胀特性提升结构压应力、改善混凝土内部孔隙、增强材料抗渗特性,微膨胀混凝土已经通过钢管、钢壳混凝土、衬砌结构在桥梁、沉管、桩基等基础设施结构中逐渐应用<sup>[2-6]</sup>。针对不同的结构应用场景,微膨胀混凝土材料在膨胀剂种类、加工工艺等方面发展迅速,其材料膨胀性能以及稳定性大幅提升<sup>[7-8]</sup>。而在具体工程中,微膨胀混凝土的目前主要依赖于补偿收缩混凝土相关技术规程以及厂商试验测试,相较于传统建筑材料的使用和性能控制仍有提升的空间。

随着工程应用的良好反馈和技术推广,近年来工程人员和学者开始关注微膨胀混凝土的性能以及材料参数规律,形成研究成果。孙磊等<sup>[9]</sup>基于针对膨胀剂掺量影响,研究表明在钢管混凝土结构中随着膨胀剂掺量的增加,混凝土收缩效应能够有显著降低,而过高的膨胀剂掺量则会导致混凝土抗压强度的下降。黄国栋等<sup>[10]</sup>以及彭艳周等<sup>[11]</sup>关注微膨胀混凝土的耐久性能特点,相较于普通混凝土其材料孔隙孔径下降且分布合理,使得材料抗环境离子渗透能力提升。张建峰等<sup>[12]</sup>针对养护温度对于材料膨胀特性的影响开展研究,养护温度越高,早期膨胀越大,膨胀曲线也越早达到稳定。黄思凝等<sup>[13]</sup>对微膨胀混凝土的早期应变状态发展进行监测,并通过对比普通混凝土楼板早期开裂,说明膨胀效应对抑制混凝土开裂的积极影响。

现有研究主要停留在微膨胀混凝土在工程结构应用尺度的测试试验,对于材料收缩膨胀机理以及自身力学状态缺乏试验探究和适用的预测数值模型。为了研究材料浇筑后早期收缩和膨胀行为机理,本文通过普通混凝土与微膨胀混凝土收缩数据对比分析的方法,建立水泥浆体收缩和膨胀剂膨胀效应参数模型。为探讨材料内部应力状态场域分布特征,研究结合混凝土细观建模方法,对微膨胀混凝土早期应变和变形进行仿真分析,并对比实测结果进行校验,针对骨料颗粒随机分布以及骨料形状类型的具体影响规律,开展相关参数调整的数值模拟规律研究。

## 1 材料试验

### 1.1 材料准备与试验测试

研究探讨微膨胀混凝土中水泥浆体自身收缩和膨胀剂效应的分别影响差异,因此实验基于工程

C55微膨胀混凝土材料配合比方案,配制了微膨胀混凝土和去除膨胀剂的普通混凝土材料进行对比试验,两种材料的配比差异主要体现在膨胀剂粉煤灰掺量改变。混凝土材料配合比如表1所示,材料参数如下:水泥采用蚌埠海螺PII52.5硅酸盐水泥,3d抗压强度23MPa,28d抗压强度58MPa;碎石骨料包含粗粒径(10~20mm)碎石骨料占比70%,细粒径(5~10mm)碎石骨料占比30%;减水剂为DK-100聚羧酸高性能减水剂;混凝土塌落度140~180。

表1 混凝土配合比参数

Tab.1 Mixing proportion parameters of concrete

	kg·m <sup>-3</sup>						
编号	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	减水剂	W/B
微膨胀混凝土	495	55	625	1 110	165	7.15	0.3
无膨胀混凝土	500	0	698	1 092	160	6.00	0.32

试验使用两种材料浇筑300×100×100mm试块,浇筑前模具涂油处理以降低模具黏结影响,试块放置在试验室环境内自然养护,试验分组情况如表2所示。为了持续监测材料早期收缩状态发展变化,试验自材料浇筑后采用嵌入式混凝土收缩应变计进行持续监测,按照10min频次采集并记录浇筑后14d内数据。传感器布置方式如图1所示。

表2 试验分组与模型参数

Tab.2 Experiment group and model parameters

试件编号	试件尺寸	材料
E1	300×100×100mm <sup>3</sup>	微膨胀混凝土
E2		
C1		无膨胀混凝土
C2		

### 1.2 测试结果与分析

试验采集得到普通混凝土和微膨胀混凝土早期14d收缩应变结果如图2所示,普通混凝土材料在浇筑完成后18h内,经历了早期快速126μ $\epsilon$ 收缩,后续14d时间内混凝土材料持续收缩至210μ $\epsilon$ ;微膨胀混凝土在经历了8h早期22μ $\epsilon$ 收缩后,停止收缩开始发生膨胀至12μ $\epsilon$ ,后续维持膨胀状态直至7d后,逐渐缓慢收缩最终在收缩30μ $\epsilon$ 状态趋于稳定。

测试结果中普通混凝土和微膨胀混凝土材料收缩膨胀过程均较为一致稳定,将材料测试结果进行合并平均代表材料收缩曲线,通过曲线对比可以获取膨胀剂单独影响,如图3所示。微膨胀混凝土收缩膨胀效应可以拆解为水泥浆体常规水化收缩过程和膨胀剂膨胀过程,膨胀剂在浇筑完成后开始快速

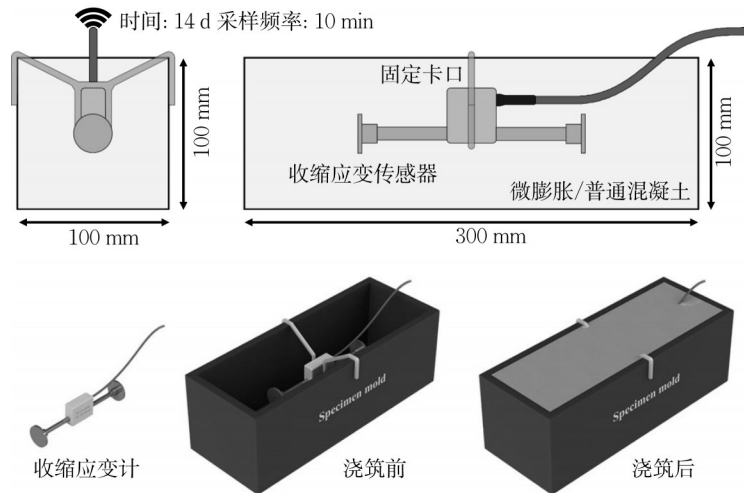


图1 混凝土收缩试验方案与示意图

Fig 1 Layout of concrete shrinkage test and illustration

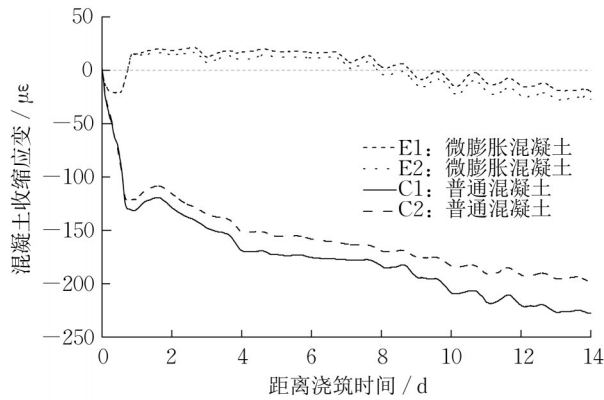


图2 微膨胀混凝土与普通混凝土实测收缩应变

Fig 2 Measured shrinkage strain of micro-expansive concrete and normal concrete

水化膨胀,24h后初期膨胀达到顶峰,后续膨胀逐渐增速逐渐放缓,并最终稳定在 $177.3\mu\epsilon$ 。

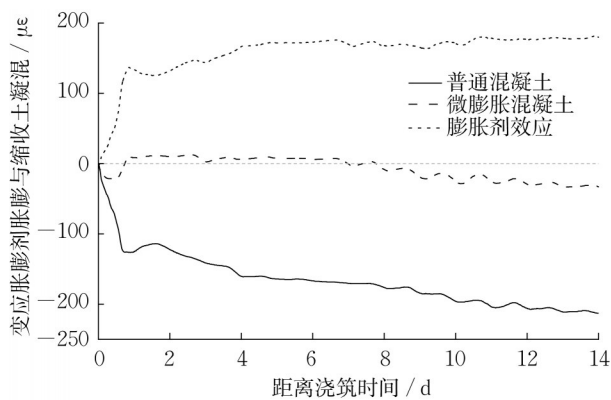


图3 混凝土收缩与膨胀剂膨胀效应应变曲线

Fig 3 Time-dependent strain curves of concrete shrinkage and expansion

## 2 基于B3的微膨胀混凝土收缩模型

### 2.1 材料早期收缩模型

通过膨胀剂水化过程体积膨胀,微膨胀混凝土材料实现对于水泥基体干燥缩减和矿物水化化学缩减的补偿,以实现工程应用中较低的材料初始变形和更为安全的应力状态。基于材料收缩补偿的原理,将微膨胀混凝土早期行为分解为普通混凝土收缩行为和膨胀剂膨胀行为,即

$$\epsilon_{EC}(t, t_0) = \epsilon_S(t, t_0) + \epsilon_E(t, t_0) \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{EC}(t, t_0)$ 为微膨胀混凝土在时间 $t$ 的收缩应变状态, $t_0$ 为材料浇筑时间; $\epsilon_S(t, t_0)$ 为混凝土收缩应变; $\epsilon_E(t, t_0)$ 为膨胀剂效应应变。现有研究中关于混凝土收缩行为的预测模型较为成熟,而膨胀剂效应的相关参数模型,考虑到化学膨胀与化学缩减相似的化学反应机理,因此可以基于收缩预测模型架构材料膨胀模型并结合材料试验进行参数校准。

针对混凝土早期收缩过程,吕志涛等<sup>[14-15]</sup>基于混凝土固化理论对收缩徐变B3模型进行归纳,建立计算方法如下:

$$\epsilon_S(t, t_0) = -\epsilon_{S,u} k_h \varphi_S(t, t_0) \quad (2)$$

$$k_h = 1 - h^3, \quad h \leq 0.98 \quad (3)$$

$$\varphi_S(t, t_0) = \tanh\left(\sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_S}}\right) \quad (4)$$

式中: $\epsilon_S$ 为混凝土收缩应变, $\epsilon_{S,u}$ 为混凝土最终收缩值,现有文献中已经提出了相关算法方法本研究中可以基于材料试验直接得到; $k_h$ 为环境湿度修正系数; $\varphi_S(t, t_0)$ 为收缩时间曲线函数,主要通过收缩时



间的 tanh 函数和修正系数  $\tau_s$  进行计算;  $t_0$  为收缩初始时间点。

针对水泥浆体膨胀过程,其机理主要依赖于膨胀剂水化过程中,水化产物体积远大于参与反应的膨胀剂矿物成分,进而引起水泥浆体的体积增大和膨胀应变效应。其材料具体膨胀水平主要受膨胀剂掺量、可供反应消耗的孔隙水分影响。而水泥浆体收缩机理包含自收缩和干燥收缩,其中自收缩是水泥水化产物体积较小造成的体积缩减,干燥收缩是由于水化反应和环境传输造成孔隙水分耗散形成内应力。由此可见膨胀剂效应和水泥浆体收缩均为矿物水化反应,本质是一致的,因此可以建立相似的膨胀应变数学模型如式(5)~式(6)所示。考虑到膨胀应变水平与参与反应的膨胀剂反应原料浓度紧密相关,与材料内部膨胀剂掺量基本成正比,因此模型中也引入膨胀剂掺量作为函数影响系数,以适用于不同材料配比方案。

$$\epsilon_E(t, t_0) = \epsilon_{E,u} c_E k_h \varphi_E(t, t_0) \quad (5)$$

$$\varphi_E(t, t_0) = \tanh\left(\sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_E}}\right) \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_E$  为膨胀剂效应应变;  $\epsilon_{E,u}$  为膨胀剂自身最终

膨胀应变水平;  $c_E$  为膨胀剂掺量以充分考虑不同掺量的影响;  $\varphi_E(t, t_0)$  为膨胀时间曲线函数,同样表征为时间的 tanh 函数,  $\tau_E$  为膨胀效应时间修正系数。

基于普通混凝土收缩效应以及膨胀剂效应进行组合,即将式(2)和式(5)代入式(1)进行组合,可以得到微膨胀混凝土材料收缩与膨胀参数模型如下:

$$\epsilon_{EC}(t, t_0) = -\epsilon_{S,u} k_h \varphi_S(t, t_0) + \epsilon_{E,u} k_h \varphi_E(t, t_0) \quad (7)$$

### 2.2 模型参数拟合回归

将测试结果中普通混凝土收缩曲线以及膨胀剂效应曲线代入式(3)和式(6)进行拟合和参数回归,得到参数模型中各参数拟合取值如表3所示,参数模型与实测曲线对比结果如图4所示。拟合结果表明,参数修正后模型曲线与实测水泥浆体收缩以及膨胀剂膨胀效应曲线吻合良好,模型对于材料的初始应变发展速率、变化趋势以及最终稳定水平均能够较为精准的模拟。

表3 基于实测曲线的模型参数取值

Tab.3 Values of mode parameters based on measured shrinkage curves

收缩与膨胀模型参数	$\epsilon_{S,u} / \mu\epsilon$	$\tau_S / d$	$\epsilon_{E,u} / \mu\epsilon$	$\tau_E / d$
参数取值	200	4.274	180	1.982

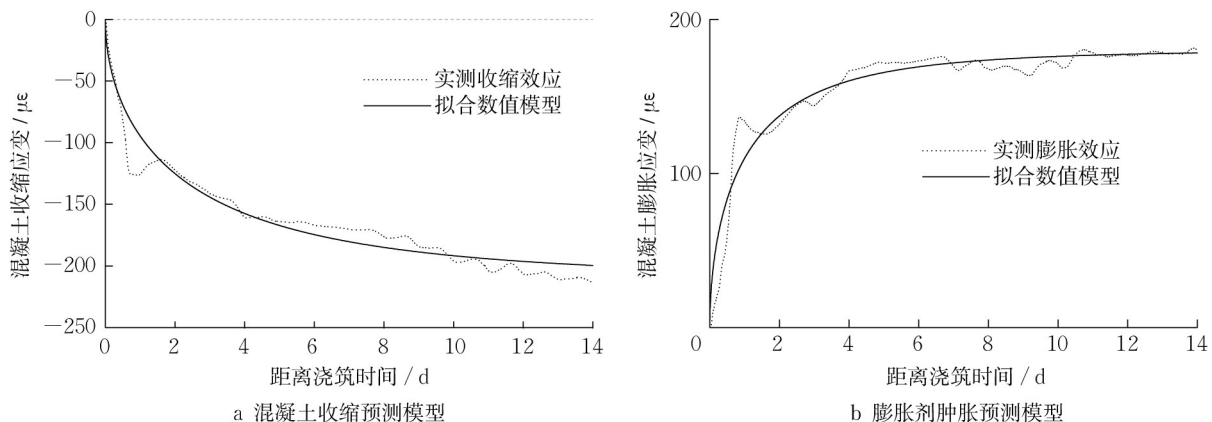


图4 混凝土收缩应变与膨胀剂膨胀应变预测模型

Fig 4 Prediction model of concrete shrinkage and expansion strain

基于上述收缩与膨胀效应参数模型的修正结果,将参数代入微膨胀混凝土收缩模型式(1),其时变曲线与实测曲线对比如图5所示。对比结果表明参数模型对于材料整体收缩时变趋势以及最终收缩水平较为精准,其模型与实际主要差异体现在材料早期  $20\mu\epsilon$  左右的收缩过程和后续快速膨胀恢复的过程,其原因可能存在于膨胀剂效应水化时机的延迟,可以通过建立膨胀剂效应的分段函数进行调整,考虑到统一简化模型对于有限元快速求解收

敛的优势,且参数模型与实测结果差异基本小于  $10\mu\epsilon$ ,因此本文采用式(7)的统一参数模型。

### 2.3 微观收缩模拟方法

为了实现材料内部应力场域分布精细化分析,建立能够反映微膨胀混凝土内部各组分空间分布以及收缩过程的仿真模拟方法十分必要。材料层面水泥浆体作为收缩和膨胀的来源,骨料本身不参与材料变形,但是其决定的水泥浆体空间分布导致了收缩膨胀的空间不均匀分布,因此需要建立能够精细

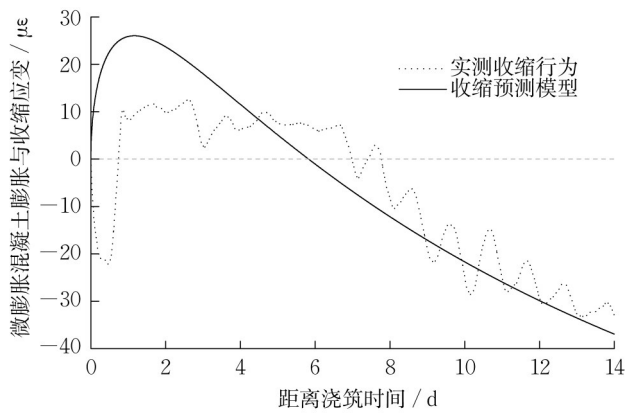


图5 微膨胀混凝土的膨胀与收缩预测模型

Fig 5 Prediction model for shrinkage and expansion of micro-expansive concrete

化模拟材料不同组分形态和特征的细观尺度模型,这对于材料收缩和精细化模拟方面的研究都是重要的推进。

基于Ruan等<sup>[16-17]</sup>提出的三参数混凝土细观建模方法,仿真分析能够精细考虑精细化颗粒夹杂混凝土材料内部情况。混凝土材料细观膨胀和收缩模拟包含以下步骤:输入混凝土材料参数,模型参数以及环境参数;混凝土细观模型建模;组分材料特性输入;膨胀收缩过程求解以及关键指标提取。针对混凝土不同细观组分的力学特性以及收缩膨胀行为,将材料收缩参数模型输入有限元模型。其中骨料作为混凝土材料较为稳定的相,弹性模量较高,且在收

缩膨胀中是被动介质;水泥基作为混凝土中膨胀和收缩的来源,弹性模量较低,针对该介质设置场域应变的时变函数过程,进行求解模拟。考虑到现有研究经验公式中主要针对混凝土材料开展较为成熟的参数模型研究,而细观模拟中针对细观水泥浆体对混凝土材料整体收缩的贡献需要按照材料体积占比进行换算,其具体计算方法如式(8)所示。求解中按照模型真实受力和边界状态进行模型约束,并对关注时间段内材料行为进行时变迭代求解。

在不考虑骨料颗粒骨架效应的影响下,混凝土体积变化水平与水泥浆体体积变化一致,体积增量数值关系如式(8)所示,由三维体积增量与一维应变水平的几何关系,可以得到水泥组分收缩应变 $\epsilon_{cm}$ 与混凝土材料收缩应变 $\epsilon_{EC}$ 的计算方法,如式(9)和式(10)所示。

$$\Delta v_{EC} = \Delta v_{cm} \quad (8)$$

$$(\epsilon_{EC})^3 v_{EC} = (\epsilon_{cm})^3 v_{cm} \quad (9)$$

$$\epsilon_{cm} = \epsilon_{EC} \sqrt[3]{\frac{v_{EC}}{v_{cm}}} \quad (10)$$

式中: $v_{EC}$ 和 $\Delta v_{EC}$ 为微膨胀混凝土的体积和体积增量; $v_{cm}$ 和 $\Delta v_{cm}$ 为水泥浆体得到体积和体积增量。

### 3 数值模拟与参数影响分析

#### 3.1 模型对比与校验分析

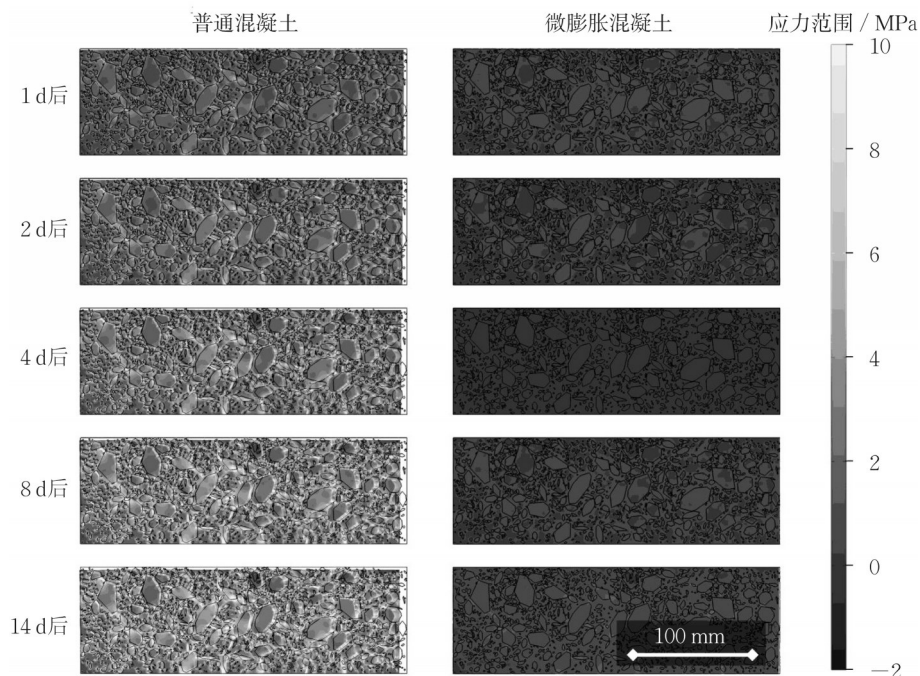


图6 普通混凝土与微膨胀混凝土收缩应变场域分布

Fig 6 Shrinkage strain distribution of normal concrete and micro-expansive concrete

基于微膨胀混凝土收缩试验中材料与模型参数,建立一致的材料模型进行膨胀和收缩过程细观数值模拟。二维细观模型尺寸为 $100\text{mm}\times 300\text{mm}$ ,混凝土骨料含量44.9%,粒径范围从 $1.0\text{mm}$ 到 $25.0\text{mm}$ 符合 Fuller 级配。模型水泥浆体代入收缩和膨胀参数模型,得到浇筑后不同时间点普通混凝土和微膨胀混凝土材料应力状态如图6所示,场域应力云图灰度区间为 $-2\sim 10\text{MPa}$ ,浅色表征较高的受拉应变,深色表征较低的应变水平;为了可视化模型变形状态,结果呈现的变形比例为实际变形的100倍;基于相同的灰度区间和变形比例,混凝土局部收缩应变分布结果如图7所示。模拟结果表明受模型坐下交点约束,普通混凝土模型右侧的收缩位移较为显著,而微膨胀混凝土收缩位移在放大100的条

件下也基本没有整体变形;骨料颗粒的细观空间分布对于材料应力的空间变异分布影响显著,较高的受拉应变主要发生在细长骨料颗粒棱角以及骨料间隙中水泥浆体位置,而常规水泥浆体场域尽管应变变形较大,但由于浆体弹性模型相对较低,因此应力水平相较于骨料并不高。相较于普通混凝土中局部受拉持续增长,微膨胀混凝土在浇筑后经历了初期较短的膨胀变形和骨料受压应力,随着水泥浆体收缩发展,模型整体产生收缩变形,场域内部出现局部受拉应变,峰值应变约为 $2\text{MPa}$ ,为普通混凝土20%左右。通过材料局部收缩结果可以发现,本研究中采用的微膨胀混凝土骨料含量相对较低,其水泥浆体的膨胀与收缩过程受骨料颗粒影响较小,与混凝土整体变形成正比。

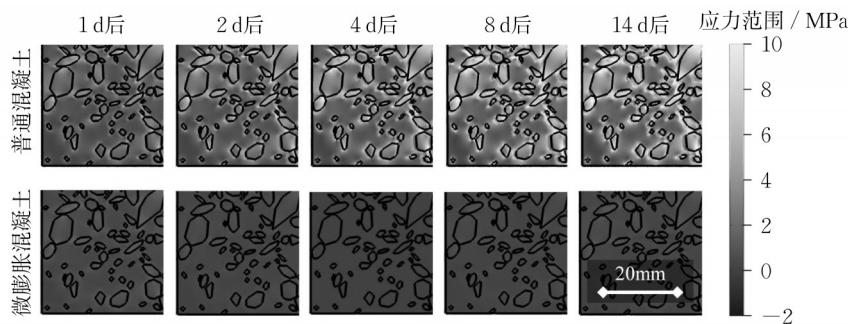


图7 混凝土材料收缩应变场域局部分布

Fig 7 Shrinkage strain local distribution of concrete material

为了能够与传感器测试结果进行对比分析,基于收缩应变传感器的测试逻辑,在模型内部采集同样位置的两点距离变化,并计算两点范围内的等效应变变化情况。不同混凝土材料应变曲线预测结果如图8所示。模拟结果表明:通过定义不同的水泥浆体收缩和膨胀行为,混凝土材料应变发展情况能够在细观数值模型中精准模拟。

### 3.2 材料细观变异性影响

为探究细观模型中骨料颗粒空间随机分布对于材料性能的影响,研究基于相同材料建模参数建立了5组不同的细观颗粒分布的混凝土材料模型,输入水泥浆体的收缩和膨胀行为进行求解,得到14d后普通混凝土和微膨胀混凝土内部应变场域分布如图9所示,场域应力云图灰度区间为 $0\sim 10\text{MPa}$ ,结果呈现的变形比例为实际变形的100倍;基于相同的灰度曲线和变形比例,材料局部收缩应变分布如图10所示。通过同一列模型结果对比可以发现,混凝土骨料颗粒空间随机分布对于应变分布影响显著,不同的骨料分布导致材料收缩过程内部应变场

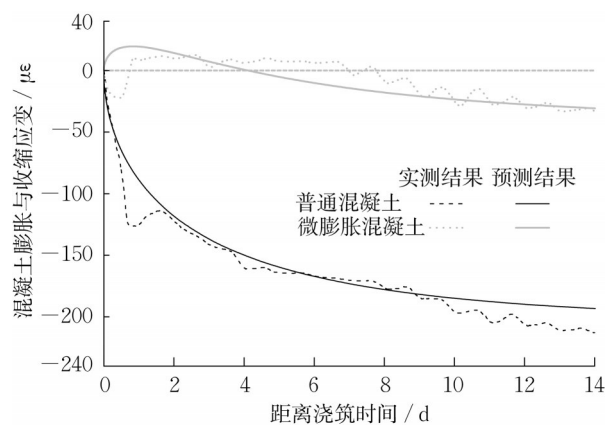


图8 普通混凝土与微膨胀混凝土收缩应变曲线对比

Fig 8 Validation of shrinkage strain for normal concrete and micro-expansive concrete

域分布的差异,但其中骨料与水泥降低内部水平分布规律也基本一致,骨料颗粒内部基本受压,而材料内部较高水平的拉应变主要存在于细长骨料棱角以及骨料狭窄间隙中的水泥浆体中,局部应力峰值存在导致材料内部微观开裂的风险。



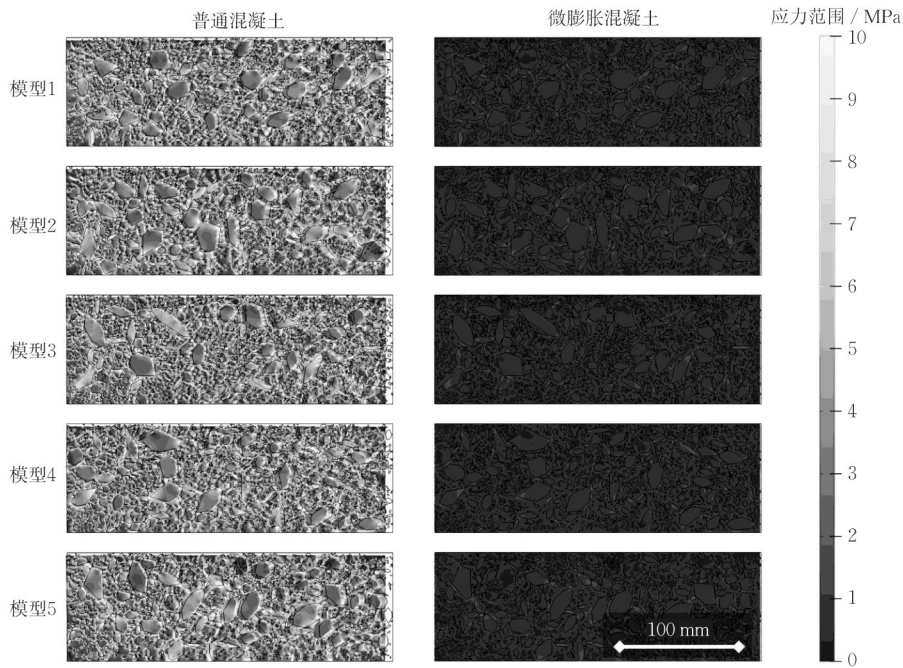


图9 考虑不同细观骨料分布的混凝土和微膨胀混凝土材料收缩应变场域分布

Fig 9 Shrinkage strain distribution of concrete and micro-expansive concrete considering different mesoscopic aggregate distributions

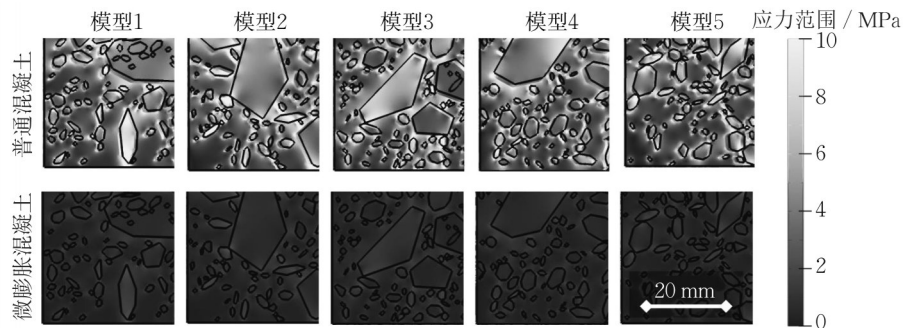


图10 带有不同细观骨料分布的混凝土材料和微膨胀混凝土收缩应变场域局部分布

Fig 10 Shrinkage strain local distribution of concrete and micro-expansive concrete considering different mesoscopic aggregate distributions

同样基于模型内部关键位置相对位移计算结果,可以得到材料等效的应变发展曲线如图11所示。模型中普通混凝土在浇筑后快速收缩,应变下降并逐渐稳定,而微膨胀混凝土浇筑后1d内短暂膨胀,后续缓慢收缩并逐渐稳定在收缩 $30\mu\epsilon$ 左右。对比不同模型的应变曲线可以发现,不同细观模型对于材料等效收缩应变曲线影响总体并不显著,其中普通混凝土不同模型的收缩应变略有差异,差异水平在10%左右。

### 3.3 骨料颗粒类型影响

为探究细观模型中骨料颗粒形态对于材料性能的影响,研究对细观建模方法中颗粒长宽比控制参数曲线进行调整,将现有骨料形状参数概率分布按

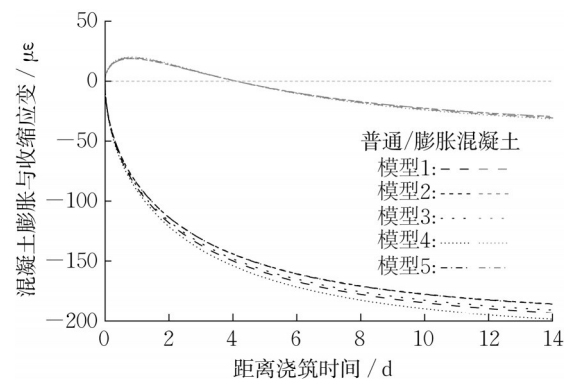


图11 考虑不同细观骨料分布的材料收缩应变曲线

Fig 11 Time-dependent shrinkage strain curves considering different mesoscopic aggregate distributions

照进行缩减和放大,以实现卵砾石骨料(长宽比缩减 50%)以及针片石骨料(长宽比放大 100%)混凝土材料收缩过程的模拟分析,最终建模采用的长宽比概率分布特征如图 12 所示。其中,直方图和实曲线为 Ruan 等<sup>[14]</sup>通过图像识别得到真实骨料颗粒长宽比分布数据,本文对长宽比概率分布进行缩放得到较小长宽比的卵砾石骨料参数曲线(点线)以及较大长宽比的针片石骨料参数曲线(虚线)。求解得到 14d 后材料内部应变场域分布如图 13 所示,而材料局部收缩应力场域分布如图 14 所示。其中为了能够清晰展示微膨胀混凝土应力状态,模型场域应力云图灰度区间为 0MPa 至 2MPa,结果呈现的变形比例为实际变形的 100 倍。

模拟结果表明:不同骨料颗粒形状对于材料内部应力场域分布特征影响显著,在相同骨料含量、粒径、级配条件下,卵砾石骨料能够有效降低材料内部局部应力峰值,标准模型中骨料棱角以及间隙位置

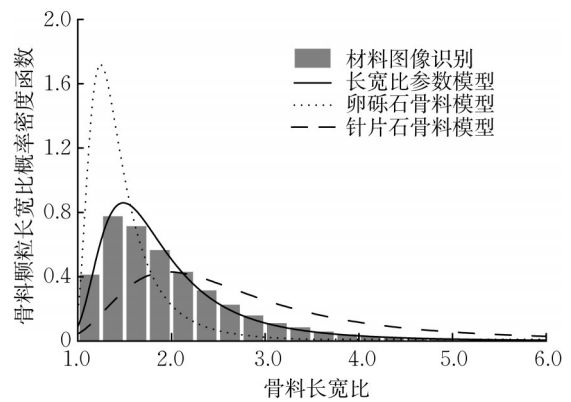


图 12 考虑不同细观骨料类型的长宽比参数分布调整  
Fig 12 Modification of aspect ratio parameter distribution considering different mesoscopic aggregate shapes

浆体局部应力峰值现象显著缓解。而放大骨料颗粒长宽比后,模型中出现较多的针片形状骨料颗粒,细长骨料内部局部受拉现象出现较多。

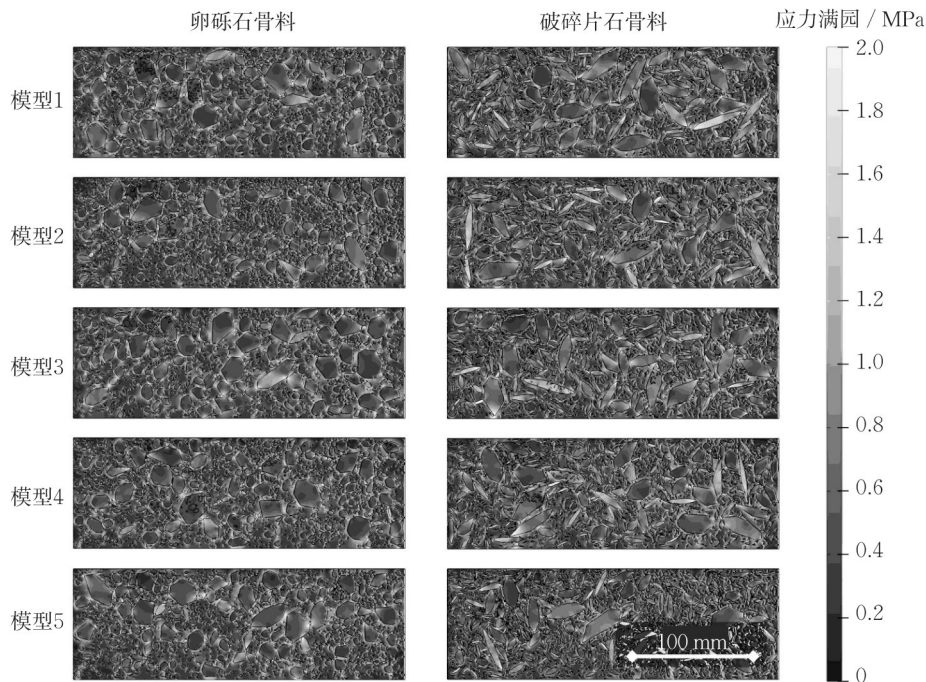


图 13 考虑不同骨料形状的微膨胀混凝土收缩应变场域分布

Fig 13 Shrinkage strain distribution of concrete considering different mesoscopic aggregate shapes

对模型内部关键点相对位移进行计算得到材料等效收缩应变发展情况如图 15,模拟结果表明颗粒形态对于材料整体收缩情况影响并不显著,卵砾石骨料和片石骨料形成的微膨胀混凝土在经历浇筑早期的短暂膨胀后,均缓慢收缩并逐渐稳定,最终不同骨料颗粒形态模型之间的等效收缩应变差异不大,差异范围在  $5\mu\epsilon$  以内。

#### 4 结论

通过普通混凝土与微膨胀混凝土的收缩行为的对比拆解,本文实现了水泥浆体收缩和膨胀剂膨胀效应的拆解;利用混凝土材料细观模拟技术,分析了混凝土骨料、水泥浆体在内部应变场域分布的时变过程,得到了水泥浆体性能以及骨料颗粒形态对于



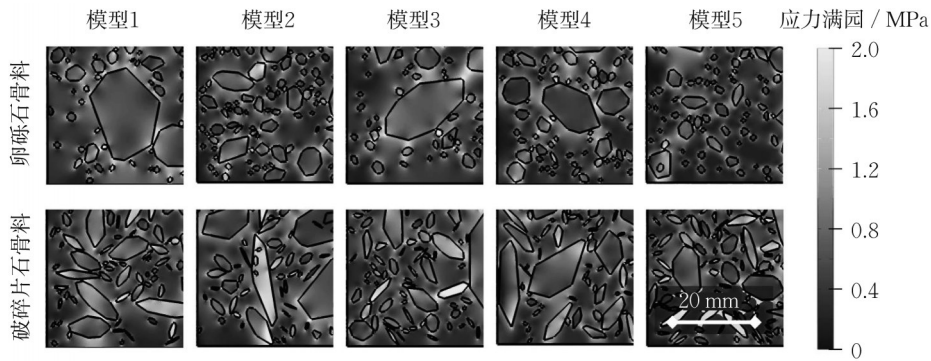


图 14 考虑不同骨料形状的微膨胀混凝土收缩应变场域局部分布

Fig 14 Shrinkage strain local distribution of micro-expansive concrete considering different mesoscopic aggregate shapes

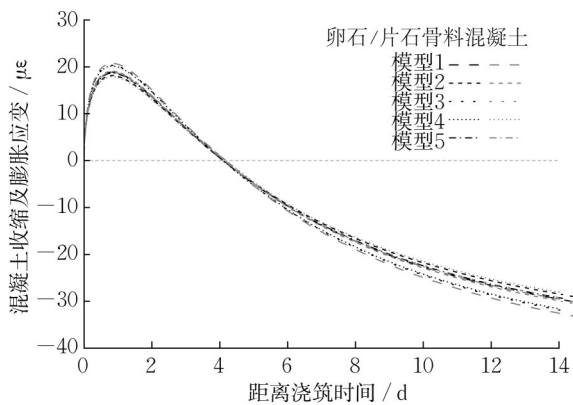


图 15 考虑不同骨料形状的微膨胀混凝土收缩应变曲线

Fig 15 Time-dependent shrinkage strain curves considering different mesoscopic aggregate shapes

微膨胀混凝土收缩影响的基本规律。最后,可以得出以下结论。

(1)微膨胀混凝土浇筑早期的收缩膨胀机理可以拆解为水泥浆体收缩和膨胀剂膨胀两部分,基于实测数据处理回归得到的膨胀效应可以定义为包含最终收缩水平、环境湿度以及时间  $\tanh$  函数的参数模型。在有限元仿真分析中能够精准便捷地描述微膨胀混凝土材料行为,且与实测结果基本一致。

(2)考虑混凝土材料内部组分空间随机分布的影响下,混凝土细观模型与微膨胀机理参数模型结合能够实现微膨胀混凝土早期场域膨胀收缩的时变仿真模拟。骨料颗粒对于材料内部应变场域分布影响显著,受拉应力峰值出现于细长骨料棱角位置以及骨料间隙位置水泥浆体;膨胀剂能够一定程度上缓解材料内部受拉应力水平,保障工程结构应用中材料内部应力储备。

(3)通过调整细观模型参数,探讨骨料颗粒形状

对于微膨胀混凝土收缩膨胀行为的影响。偏圆形的卵砾石骨料能够显著降低材料内部应力不均匀分布,仅有少量骨料棱角位置出现应力峰值;而细长的针片石骨料受拉应力显著提升,在实际结构服役中存在骨料以及浆体局部碎裂损伤的风险。

#### 作者贡献声明:

李越:试验设计,程序设计,数据分析,撰写初稿;

阮欣:项目构思,课题指导,提出论文框架,论文修改与审定;

霍宁宁:参与试验设计与试验结果分析。

#### 参考文献:

- [1] 刘洋. 微膨胀高性能混凝土的工程应用研究[J]. 混凝土, 2017, 154(3): 160.  
LIU Yang. Study on engineering application of micro expansive and high performance concrete [J]. Concrete, 2017, 154(3): 160.
- [2] 赵朋辉,邓春林. 沉管后浇带膨胀混凝土施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(S1): 136.  
ZHAO Penghui, DENG Chunlin. Construction technology of expansive concrete of late poured band for immersed tube [J]. Construction Technology, 2014, 43(S1): 136.
- [3] 邓玮婷,丁选明,彭宇. 珊瑚砂地基中膨胀混凝土桩竖向受压承载性能研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2814.  
DENG Weiting, DING Xuanming, PENG Yu. A study of vertical bearing capacity of expansive concrete pile in coral sand foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2814.
- [4] 徐文冰,叶仙松,张思,等. 南京五桥钢壳微膨胀混凝土配制技术及变形性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(10): 141.  
XU Wenbing, YE Xiansong, ZHANG Si, et al. Study on preparation technology and deformation properties of concrete filled steel tube of the fifth bridge of Nanjing [J]. New Building Materials, 2019, 46(10): 141.
- [5] 任志刚,胡曙光,丁庆军,等. 钢管膨胀混凝土墩柱日照温度场

- 分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(11): 99.
- REN Zhigang, HU Shuguang, DING Qingjun, *et al.* Analysis on temperature field of expansive concrete filled-steel tube pier under solar radiation [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(11): 99.
- [6] XIONG Rui, LU Zhean, REN Zhigang, *et al.* Experimental research on the performance of micro-expansion and self-compacting concrete-filled steel tubular short column under axial compression [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 3(5): 19.
- [7] 混凝土世界. 2016年度膨胀混凝土行业发展报告[J]. 混凝土世界, 2017, 8(1): 36.
- China Concrete. 2016 Annual development report of expanded concrete industry [J]. China Concrete, 2017, 8(1): 36.
- [8] 混凝土世界. 2019年度膨胀混凝土行业发展报告[J]. 混凝土世界, 2020, 11(8): 38.
- China Concrete. 2019 Annual development report of expanded concrete industry [J]. China Concrete, 2020, 11(8): 38.
- [9] 孙磊, 白英. 基于HCSA的膨胀混凝土制备及其在微膨胀自密实钢管柱混凝土中的应用研究[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 202.
- SUN Lei, BAI Ying. Preparation of expansive concrete based on HCSA and its application in micro-expansive self-compacting steel tube column concrete [J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 202.
- [10] 黄国栋, 张戎令, 李华, 等. 基于正交试验设计的内养护剂SAP在钢管微膨胀混凝土中的应用[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 68.
- HUANG Guodong, ZHANG Rongling, LI Hua, *et al.* Application of internal curing agent sap in steel tube micro-expanded concrete based on orthogonal test design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(6): 68.
- [11] 彭艳周, 刘俊, 徐港, 等. 粉煤灰掺量对膨胀混凝土抗冻性和抗氯离子渗透性的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 60.
- PENG Yanzhou, LIU Jun, XU Gang, *et al.* Influence of fly ash content on frost resistance and chloride ion permeability of expansive concrete [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(1): 60.
- [12] 张建峰, 董芸, 陈霞, 等. 养护温度对MgO微膨胀混凝土变形性能的影响[J]. 混凝土, 2019, 3(1): 49.
- ZHANG Jianfeng, DONG Yun, CHEN Xia, Influence of curing temperature on the deformation properties of MgO micro-expansive concrete [J]. Concrete, 2019, 3(1): 49.
- [13] 黄思凝, 战永亮, 张艳美, 等. 膨胀混凝土早期应变现场监测及结果分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(4): 39.
- HUANG Sining, ZHAN Yongliang, ZHANG Yanmei, *et al.* Site monitoring and result analysis of early strain of expansive concrete [J]. Building Structure, 2017, 47(4): 39.
- [14] 丁文胜, 吕志涛, 孟少平, 等. 混凝土收缩徐变预测模型的分析比较[J]. 桥梁建设, 2004, 6(1): 13.
- DING Wensheng, LV Zhitao, MENG Shaoping, *et al.* Analysis and comparison of prediction models for concrete shrinkage and creep [J]. Bridge Construction, 2004, 6(1): 13.
- [15] BAZANT Z P, MURPHY W P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3[J]. Materials & Structures, 1995, 28(6): 357.
- [16] RUAN X, LI Y, JIN Z, *et al.* Modeling method of concrete material at mesoscale with refined aggregate shapes based on image recognition [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204(1): 562.
- [17] 阮欣, 李越, 金泽人, 等. 混凝土二维微观骨料建模方法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 604.
- RUAN Xin, LI Yue, JIN Zeren, *et al.* Review of two-dimension meso-modeling methods of concrete aggregate [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(5): 604.