

文章编号: 1001-4888(2023)05-0549-11

基于数字图像相关技术的轻骨料混凝土 早龄期细观收缩实验研究*

万钊航, 白鹏翔, 洪森, 朱飞鹏, 胡丰, 雷冬

(河海大学 力学与材料学院, 江苏南京 210000)

摘要: 利用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术,对早龄期轻骨料混凝土(Lightweight Aggregate Concrete, LWAC)在细观层面上的收缩现象开展实验研究,以探索其早龄期的收缩变形规律。具体实验方法为,在 3 种不同的水灰比条件下,分别比较骨料是否预湿对收缩变形的影响;使用 DIC 技术对 LWAC 的收缩变形进行观测,获得 LWAC 表面早龄期全场应变的演变过程。结果表明,预湿处理能够对轻骨料产生内养护的作用,从而减少混凝土早龄期的收缩变形;随着水灰比的增大,内养护的效果并不会随之增强,而是表现出先升后降的趋势,在水灰比为 0.40 时内养护效果最佳;在早龄期骨料与砂浆两部分的最小主应变没有表现出始终一致的变化趋势,而是在一定时间段内相互背离。

关键词: 轻骨料混凝土;数字图像相关;应变;早龄期;内养护

中图分类号: TU502+.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-249

0 引言

近年来,轻骨料混凝土(Lightweight Aggregate Concrete, LWAC)越来越广泛地被应用于各种工程结构中。LWAC 是指采用浮石、粉煤灰陶粒、页岩陶粒、黏土陶粒等质量较轻的骨料浇筑而成的混凝土,其表观密度不大于 $1950\text{kg}/\text{m}^3$ 。轻骨料混凝土具有轻质、保温、耐火、高吸水性、抗震性好、变形性能好等特点,但其弹性模量较低,导致成型后的强度低于一般混凝土,且在长期荷载作用下徐变较大,一般情况下骨料收缩也较大^[1-2]。Fujiwara^[3]对骨料的研究显示,尽管在一般混凝土构件中骨料的变形可以忽略,但在 LWAC 中,轻骨料的弹性模量较低,在早龄期骨料的应变较大,因此骨料对早龄期收缩的影响不可忽略。

早龄期是指混凝土构件性能(如强度、收缩、徐变等)受混凝土龄期影响较大的时期,是混凝土成型、强度发展时期。此时混凝土的抗应变能力最低,收缩对内部应力最敏感,一旦混凝土内部的应力超过了其强度,就会形成微裂缝,从而导致混凝土结构严重劣化^[4-5]。早龄期的砂浆收缩和骨料变形会导致混凝土成型后的性能下降,因而对早龄期的细观收缩研究至关重要,目前学者们对 LWAC 的收缩机理进行了一系列研究。现有研究表明^[6],轻骨料的使用能降低混凝土的早龄期收缩程度,且由于轻骨料高吸水性的特性,进行预湿处理后的轻骨料可以作为混凝土内部的“蓄水池”。如果轻骨料经过预湿处理,会在混凝土内部起到持续供水的作用,混凝土早龄期的收缩将会有明显的改善^[7-8],这种作用被称

* 收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2022-11-16

基金项目: 河海大学大型仪器设备共享基金项目(GX202206B); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B220370206, B210205019)

通信作者: 白鹏翔(1984-),男,博士,高级实验师。主要研究领域:光测力学与图像处理。Email: baipengxiang@hhu.edu.cn

胡丰(1980-),男,博士,讲师。主要研究领域:岩土力学与地基基础。Email: psyhf@163.com

为内养护,内养护已成为一种有望生产抗早期开裂且增强耐久性的混凝土的技术。Kohno 等^[9]通过实验发现,内养护的效果与水分含量有关,内部水分含量越高,轻骨料预湿后的内养护效果越好,收缩也会越小;Zha 等^[10]通过对不同轻骨料替代率的 LWAC 实验发现,混凝土不同龄期时的干燥收缩下降率几乎一致。目前对 LWAC 的研究也逐步转向细观层面,Zhang 等^[11]研究了轻骨料的加入对硫铝酸钙混凝土减缩的效果,以及预湿轻骨料的内养护效果,通过实验分析了单个预湿骨料与砂浆间的水分运动。早龄期轻骨料的变形同样重要^[3],但是由于传统测量方法有损、非全场的局限性,一直以来对它的研究并不充分,因此需要一种新的测试方法进行研究。

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术是一种非接触式光学测量技术,通过捕获试样变形前后的图像进行数学分析,计算试样的全场变形。该技术具有实验设置简单、环境敏感性低、易于自动化处理等优点,可以在不影响材料本身状态的情况下进行无损检测^[12-14]。由于混凝土内部各组分分布随机,骨料形状不规则,所以早龄期混凝土中产生的应变、应力和微裂缝不均匀^[15-16],DIC 技术可以在不影响混凝土早龄期发展的情况下完成变形测量。余泽昇等^[17]采用 DIC 技术研究了碳纤维增强复合材料加固混凝土破坏时的应变场以及其黏结性能;He 等^[18]采用 DIC 技术研究了混凝土界面过渡区上的力学性能和损伤特性;Aghlara 等^[19]采用 DIC 技术测量了混凝土表面钢与混凝土黏结处的黏结应变;Chen 等^[20]采用 DIC 技术测量混凝土中砂浆的应变,研究了骨料粒径和体积对混凝土中应变不均匀分布的影响;陈志娟等^[21]采用 DIC 技术得到了半绝热状态下混凝土早龄期的应变数据,并研究了早龄期混凝土的膨胀应变。DIC 技术发展至今已经逐渐成熟,在混凝土变形测量中有较为广泛的应用,并已经被成功应用于测量早龄期混凝土的细观变形,因此采用 DIC 技术能够有效测量 LWAC 早龄期表面的全场应变。

本研究通过实验方法测量 LWAC 早龄期不同水灰比下的应变,基于 DIC 技术,观察试件表面应变云图随时间的变化,得到各试件应变的变化趋势,通过局部与整体的应变数据计算,量化试件表面每一部分的应变;在细观层面研究 LWAC 早龄期的收缩规律,以及骨料预湿处理后对内养护的作用效果;并对不同水灰比的试件进行比较,获得改善 LWAC 早龄期收缩效果的最佳水灰比。

1 混凝土材料制备与测量技术

实验的研究对象为使用黏土陶粒作为轻骨料的混凝土,通过 DIC 技术分析不同水灰比下 LWAC 早龄期的收缩变形,并对不同预处理的试件进行对比,以分析内养护的作用以及不同水灰比下内养护的效果。采取实验室内实验的方式,应用 DIC 技术实现无接触式的全场应变测量,来模拟自然状态、无外部约束下的混凝土收缩情况。

1.1 材料和配合比

水泥采用 P·O 42.5 水泥,3 天时抗压强度为 21.6MPa、抗折强度为 4.2MPa,21 天时抗压强度为 47.4MPa、抗折强度为 7.0MPa;细骨料采用普通河砂,表观密度为 2680kg/m³,堆积密度为 1620kg/m³,符合《建设用砂》(GB/T 14684-2022)^[22]中的要求;粗骨料采用安徽淮南生产的黏土陶粒,粒径 5mm~25mm,连续级配,粗骨料的主要技术指标见表 1。本文实验没有使用外加剂。

表 1 粗骨料主要技术指标

Tab.1 Main technique indexes of coarse aggregates

类型	1 小时吸水率	表观密度	堆积密度	孔隙率	筒压强度	密度等级
黏土陶粒	20.2%	510kg/m ³	235kg/m ³	42%	1.2MPa	300

配合比设计参考《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51-2002)^[23],同时根据现有的配合比设计方法,设计 3 种不同的水灰比(0.35、0.40、0.45)情况下的配合比^[24-25]。在这 3 种情况下分别进行骨料是否预湿处理的对照实验,骨料吸水速率随着预湿时长的增长逐渐变慢,在开始预湿的第 1 小时内骨料吸水速度最快,同时预湿达到 1 小时时的吸水量可以满足实际工程的需要^[26],因此,设置预湿时长为 1 小时。参照骨料的性质,设计了 A、B 两组试件(每组各有 3 种水灰比),A 组试件代表骨料未预湿的情况,

B 组试件代表骨料预湿 1 小时后的情况。详细水灰比、材料用量以及预湿时长见表 2。表中的水灰比均为净水灰比，用水量为不包含内养护水的净用水量。

表 2 轻骨料混凝土配合比(单位:kg/m³)

Tab. 2 Mix ratio of lightweight aggregate concrete(unit: kg/m³)

试件/组名	水灰比	水	水泥	砂	轻骨料	预湿时长
A1	0.35	180	514.3	505.9	77.18	—
B1	0.35	180	514.3	505.9	77.18	1 小时
A2	0.40	180	450.0	522.6	79.73	—
B2	0.40	180	450.0	522.6	79.73	1 小时
A3	0.45	180	400.0	535.6	81.77	—
B3	0.45	180	400.0	535.6	81.77	1 小时

1.2 数字图像相关(DIC)技术

DIC 技术是一种非接触式无损测量技术。该技术的原理是：选择研究区域作为图像的子区域，并将子区域位置的变化与子区域的早期位置进行比较，通过对比分析试样表面在不同应力状态下的散斑特性，跟踪散斑不同时刻的变化，计算表面各点的变形。首先，将试样表面上的散斑图像转换为灰度图像，再将其划分为若干子区(一组像素)，变形前的子区称为参考子区。当发生变形时，在变形后灰度图像中搜索与参考子区的灰度特征具有最佳相关性的子区，该子区称为目标子区，如图 1 所示。通过跟踪像素点从参考子区到目标子区的运动，可以获得试样表面的横向位移场 $u(x, y)$ 和竖向位移场 $v(x, y)$ (式(1))，通过对位移场进行微分即可得到应变场。

$$\begin{cases} u(x, y) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} (\Delta x)^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} u_{yy} (\Delta y)^2 \\ v(x, y) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} (\Delta x)^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} v_{yy} (\Delta y)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： u 和 v 为变形后图像子区中心点的水平距离和垂直距离； u_x 、 u_{xx} 等为图像子区的一阶和二阶位移梯度； Δx 和 Δy 分别为点 (x, y) 到图像子区中心点的水平距离和垂直距离。采用归一化最小平方距离相关函数 C (式(2))来评价变形前后图像子区的相关程度，即

$$C = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x, y) - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y) - g_m]^2}} \right\} \quad (2)$$

相关函数 C 一般采用 Newton-Rapshon 非线性优化方法求解。式中： M 为图像子区半宽； $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为参考图像和目标图像的子区灰度值； f_m 和 g_m 分别为参考图像和目标图像子区灰度的平均值^[27]。

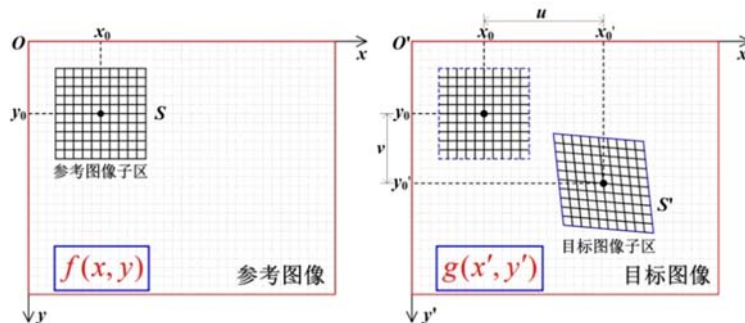


图 1 参考图像与目标图像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reference image and target image

2 基于 DIC 技术的混凝土表面应变测量

2.1 实验与测量方法

试件浇筑前,首先对 B 组中的轻骨料进行预湿处理,将轻骨料完全浸没水中,1 小时后用湿毛巾将轻骨料表面擦干。混凝土的拌和使用振捣和插捣的方式,将水泥砂浆与骨料的混合物装入 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的模具,正反方向各振捣数秒,振至均匀。在环境温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 下使用 PE 薄膜密封表面以防止水分散失,静置 24 小时后脱模。脱模后使用切割机沿试件中间位置处的横截面切开,即可得到试件的剖面。在试件剖面均匀布置散斑后,将试件置于 DIC 系统相机下,设置相机采样频率为每 3 分钟一张,采样时长为 21 天,总计采集图像 10080 张,按均等时间间隔抽取 1000 张图像进行分析。实验采用三维 DIC 系统,采用双目式相机进行图像采集(两相机间的夹角为 18.3°),通过标定后的双摄像头得到同步曝光图像,然后计算获取二维图像像素点的第三维深度信息。图像采集使用软件 Vic-snap,图像分析以及数据导出使用软件 Vic-3D。实验设备和 DIC 系统如图 2 所示,实验使用的计算机为联想 x201,相机为 POINT GREY GRAS-50SSM-C。实验环境为室内,控制温湿度均衡(温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $50\% \pm 10\%$),实验期间的温湿度使用环境温湿度计进行监测,变化如图 3 所示,其中光强不变,且无风、震动等外界因素干扰。

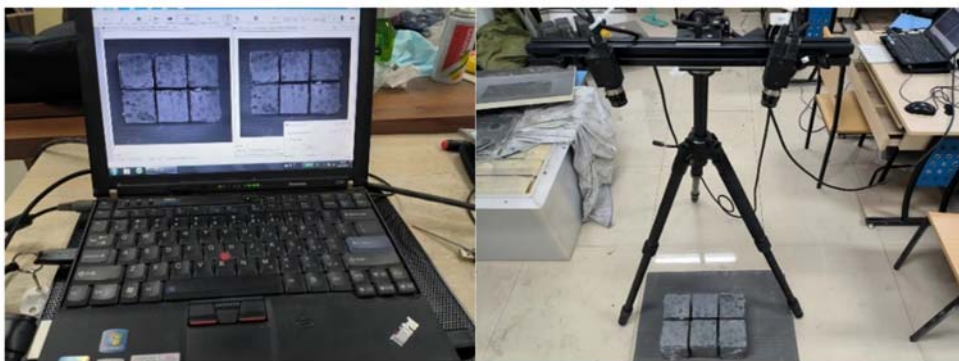


图 2 DIC 拍摄系统及相机机位

Fig. 2 DIC shooting system and camera position

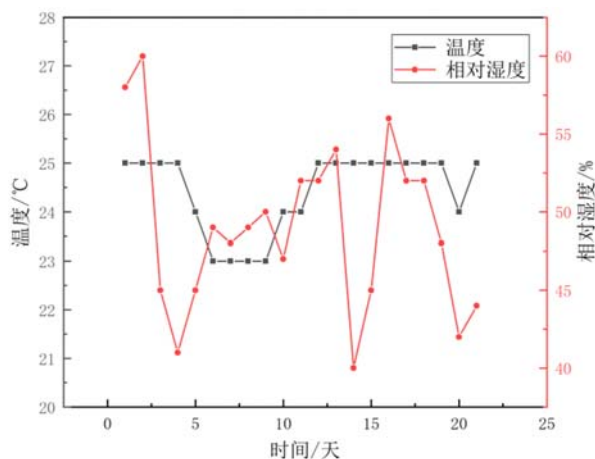


图 3 实验过程中的温湿度变化

Fig. 3 The variation of temperature and humidity in the course of experiment

2.2 最小主应变云图分析

通过 DIC 系统得到各试件表面早龄期应变云图,不同龄期的试件表面最小主应变云图如图 4 所示,其中试件 A1、A2、A3 中的骨料未经过预湿处理,水灰比分别为 0.35、0.40、0.45;试件 B1、B2、B3 中的骨料经过预湿处理,水灰比分别为 0.35、0.40、0.45。一方面,通过色彩变化能够直观地看出,不同水灰比且预湿情况不同的试件在早龄期的收缩均呈现出逐渐增大的趋势;另一方面,如图 4 所示,颜色较深处集中在骨料的中心位置,从骨料中心位置向砂浆处发展,颜色逐渐变浅,应变表现出梯度明显的变化趋势。随着龄期的增长,应变云图颜色逐渐向青色、蓝色方向发展,收缩逐渐增加,随着骨料中的水分消耗,骨料变形也逐渐呈收缩趋势。在前 10 天的应变云图中,预湿试件的骨料有正应变,并不会完全收缩,这是骨料吸水膨胀所致,其中的水分持续地起到内养护的作用,并未完全消耗,随着龄期

的增长,内养护的效果逐渐减弱,骨料也逐渐收缩。在第 14 天和第 21 天的应变云图中,整个试件的表面都处于收缩状态,通过观察颜色变化可以认为,轻骨料预湿后混凝土的整体收缩小于骨料未预湿的混凝土。

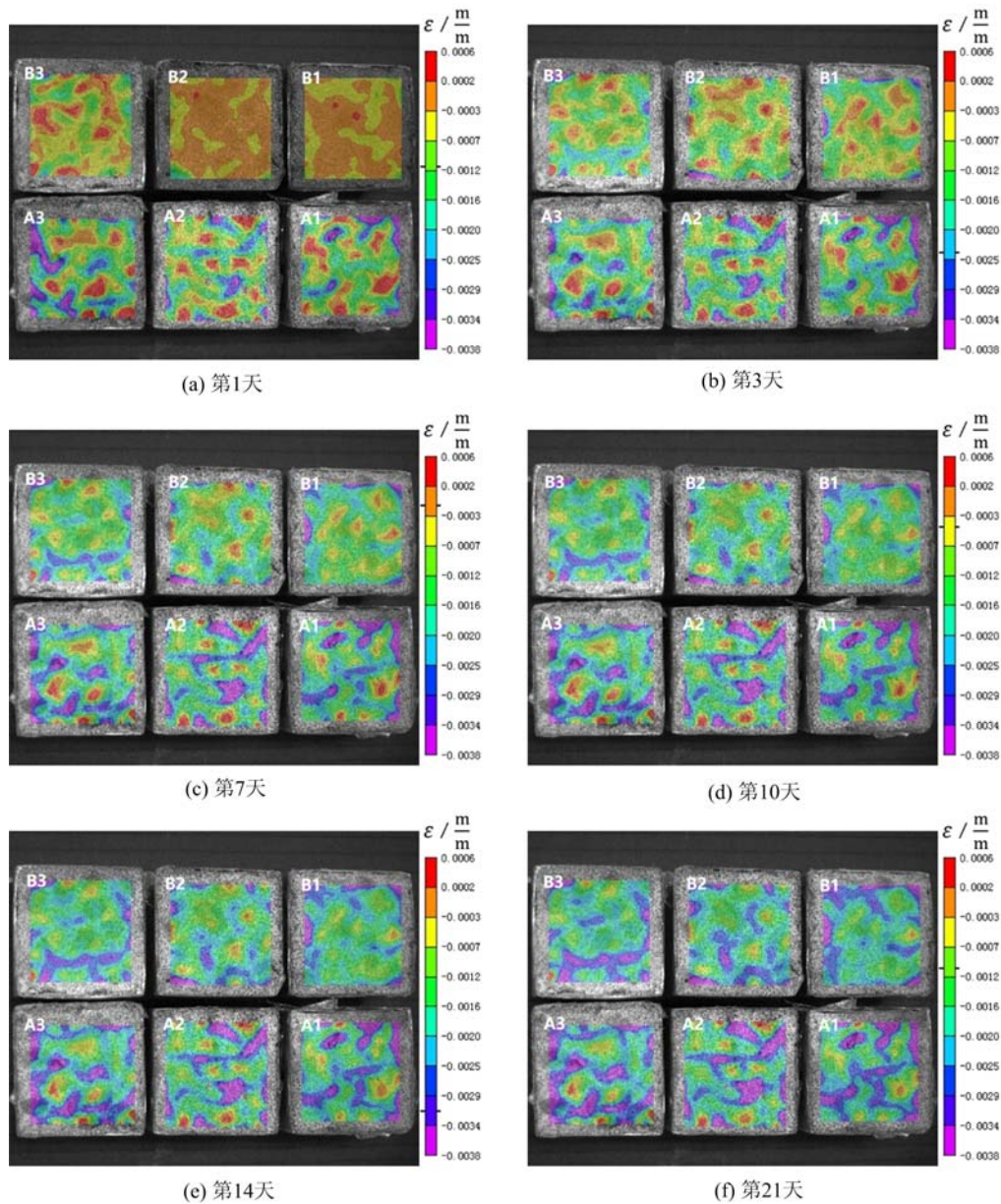


图 4 前 21 天各试件表面最小主应变云图

Fig. 4 Minimum principal strain cloud map of each specimen section in the first 21 days

3 实验结果分析与讨论

通过 DIC 系统对 LWAC 表面各部分进行分析,选取的部分区域如图 5 所示,其中选取区域的依据是:选取区域内骨料和砂浆的位置清晰,且在這些位置处应变的规律性明显,能够直观地反映出各组成部分早龄期的应变变化规律。图中,圆形区域为砂浆,方形区域为骨料。在 3.1 节中,骨料与砂浆部分的应变数据分别为选取区域内应变的均值,在 3.2 节中,整体应变为试件整个表面应变的均值。其中应变数据分析软件 Vic-3D 中计算使用的子区域大小为 59,分析步长为 7。

3.1 骨料与砂浆的应变分析

为了分析整体的应变情况以评估不同水灰比下的内养护作用以及内养护对于混凝土抵抗收缩变形

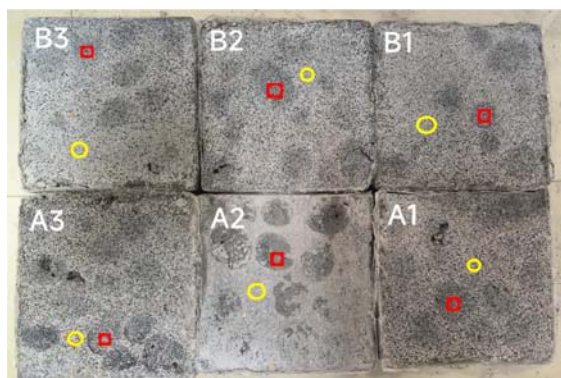


图5 各试件骨料和砂浆计算位置示例

Fig. 5 Example of calculation position of aggregate and mortar for each specimen

的影响,现将不同水灰比及预湿情况的试件应变数据变化情况展示如下。由于骨料的应变变化在前3天较为明显,因此骨料部分的应变变化规律取前3天进行分析。图6所示为选取的示例区域在云图中的位置。

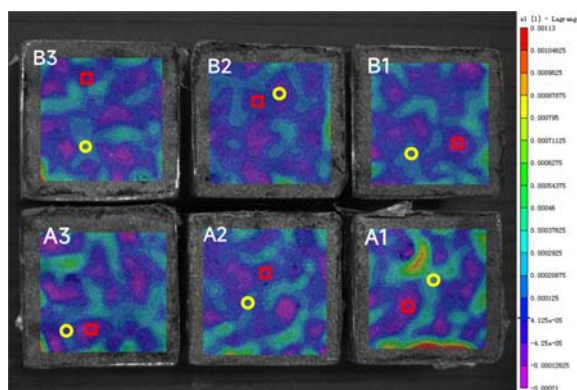


图6 示例区域在云图中的位置

Fig. 6 The position of the sample area in the cloud map

前3天,骨料最大与最小主应变的变化如图7所示,试件A1、A2、A3中骨料的 ϵ_1 最大主应变大于0,且应变变化趋势在第1天时均短暂上升,可以认为未经过预湿处理时,早龄期在混凝土内部,由于轻骨料的孔隙结构,含水量的梯度变化会使得轻骨料吸水膨胀。而试件B1、B2、B3中骨料的 ϵ_1 最大主应变都趋向于0,其应变变化起伏较小,当骨料经过预湿处理后,内部的孔隙被充足的水分补充,因此应变几乎没有改变。通过分析试件B1和B2的 ϵ_1 最大主应变趋势可得,经过预湿处理,试件的骨料应变趋于稳定,整体来看有略微的收缩,经过预湿后的轻骨料会起到内养护的作用,并在早龄期向砂浆部分输送水分,以弥补早龄期水化反应引起的砂浆部分的水分散失,起到填充毛细孔隙的作用,从而减少LWAC早龄期的收缩。通过分析试件B3的应变变化过程能够得到,试件B3骨料的应变变化较大,当水灰比为0.45且骨料经预湿处理后,由于混凝土内部水分含量过多,且骨料中的水分充足,内部水分分布梯度不再明显,削弱了轻骨料吸水返水进而抵抗收缩的效果。由此可得,过量的水分会导致轻骨料的内养护作用下降。

前21天,砂浆的最大与最小主应变的变化如图8所示,相较于骨料的应变,砂浆部分的应变变化更加具有规律性,发展趋势接近。通过分析最小主应变的变化过程能够得到,骨料经过预湿处理后的试件,砂浆部分早龄期的收缩得到了改善。当水灰比为0.35时,且轻骨料经过预湿处理后,与其他试件相比,试件B1早龄期的砂浆收缩最小,这是因为经过预湿处理的轻骨料吸收的水分补充到了混凝土内部水化反应形成的毛细孔隙中,使得砂浆早龄期的收缩减小。但是,整体来看,该种情况下骨料部分的应变较大,且由于轻骨料低强度的特性,LWAC早龄期骨料部分的应变不可忽视,因此,不能仅通过砂浆部分的应变作为评估LWAC早龄期收缩情况的标准。当水灰比为0.45时,LWAC早龄期内部水分含

量过高,试件 A3、B3 砂浆部分的收缩相较于其他试件较大,这是由于过量的水分不能完全进行反应,由于水分的填充,砂浆内部的毛细孔隙充水,导致整体的应变增大,从而影响了混凝土的工作性能。

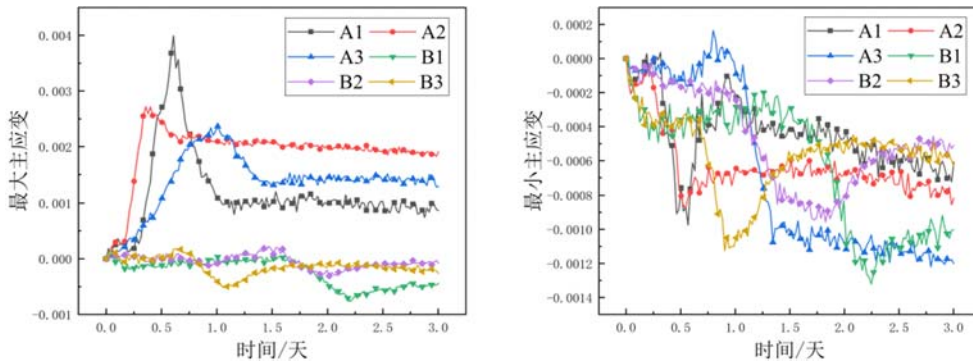


图 7 前 3 天骨料的应变变化

Fig. 7 Strain change of aggregate in the first three days

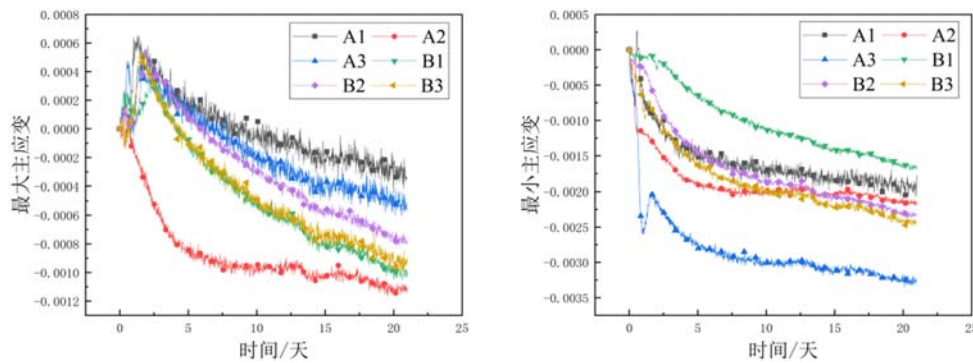


图 8 早龄期砂浆的应变变化

Fig. 8 Strain change of mortar in the early age

通过对比骨料和砂浆部分的应变变化,能够观察到较早龄期骨料与砂浆水分交互的动态平衡,如图 9 所示。前 3 天,砂浆与骨料的最小主应变并没有呈现出始终一致的变化趋势,在一定时间段内,一部分应变的变化会随着另一部分的改变而向相反的趋势发展,但整体都呈现出收缩的趋势。不管骨料是否预湿处理,都会表现出这样的效果,说明轻骨料本身作为多孔材料具备吸水返水的功能以及一定的内养护效果,预湿处理后,内养护的效果会更加明显。这意味着,在早龄期骨料与砂浆存在着水分转移的动态平衡,在水分含量充足且未超过一定界限的情况下,这种水分交互的情况会影响早龄期混凝土构件的整体收缩,由此可以认为,两部分的变形在相互作用、相互影响,这也是 LWAC 的特性之一。

3.2 内养护的作用分析

为了比较 LWAC 早龄期的应变变化趋势和内养护对其抵抗早龄期收缩的作用效果,将各试件前 21 天的整体应变变化展示如下。由图 10 可以看出,在各种水灰比情况下,含预湿轻骨料的试件早龄期的收缩都有明显的改善,从图中观察可知,水灰比为 0.35 和 0.40 时,预湿处理后早龄期的抗收缩能力更加明显。观察整个变化过程可得,骨料预湿处理后试件的最小主应变曲线更加平滑,说明在内养护的作用下, LWAC 早龄期水化反应的进程更加稳定。试件浇筑初期, A 组试件相较于 B 组试件的最小主应变发生了剧烈下降,由于刚开始时水化反应进行较快,大量的水分被消耗,骨料未预湿处理时,内部几乎没有水分填充,混凝土内部由于水化反应引起水分消耗,造成了混凝土的整体收缩。而骨料预湿处理后,在 0~3 天,内部水分饱和度较高,此时,由水化反应消耗的水分能够及时得到补充,所以收缩的速度相对较慢。在第 13 天时,通过应变数据变化可以观察到,各试件的最小主应变均有一个微小的突变,这是由于早龄期导致混凝土收缩的原因有很多种,其中包括了干燥收缩、自收缩、化学收缩等,在 0~13 天,混凝土的内部由于轻骨料的存在,其吸水返水的作用使得水分不断地填充到毛细孔隙中从而减小了干缩带来的影响。而在 13 天后,骨料预湿处理与不预湿处理的试件应变曲线的斜率大致相同, LWAC

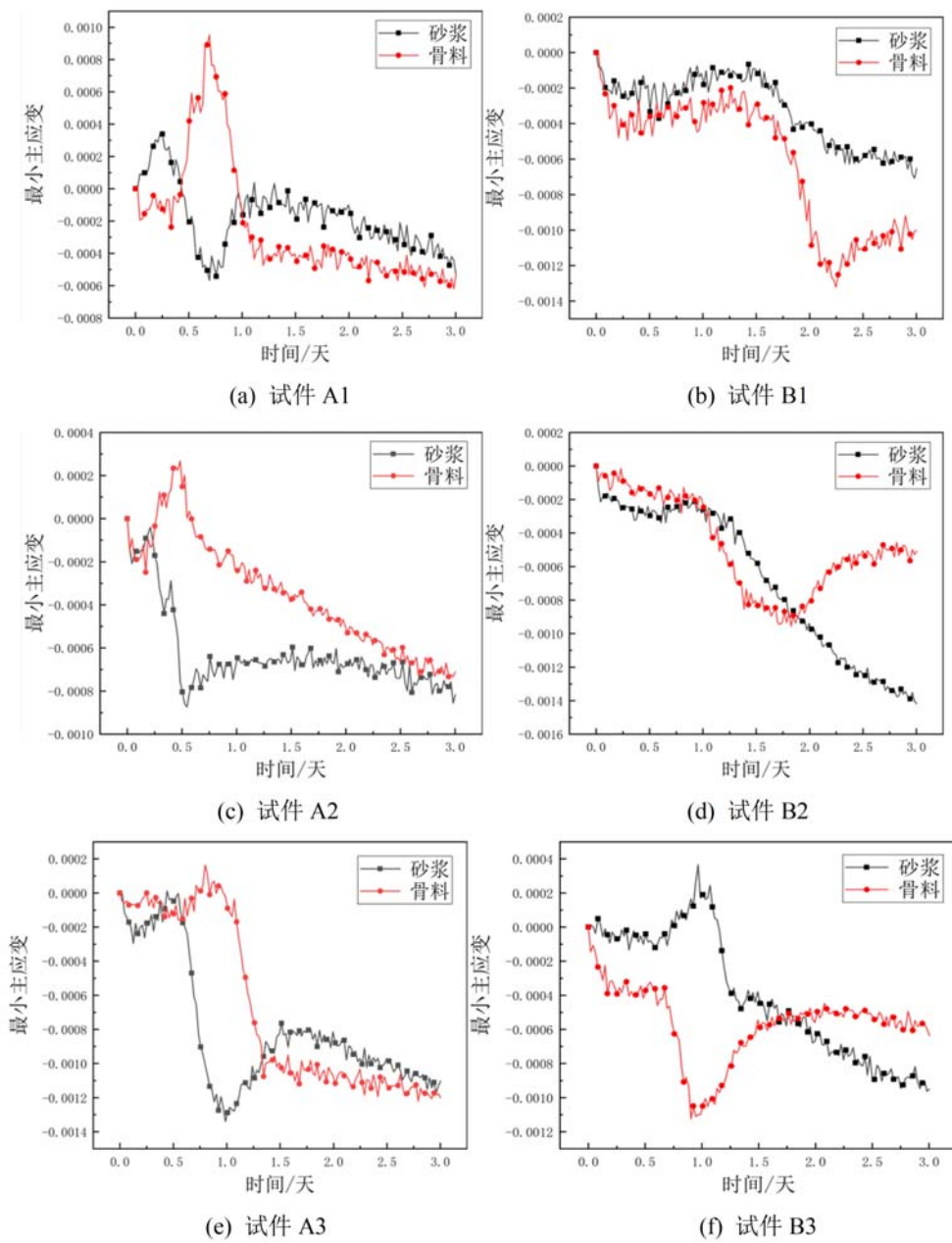


图9 前3天骨料砂浆应变对比

Fig. 9 Strain comparison of aggregate and mortar in the first three days

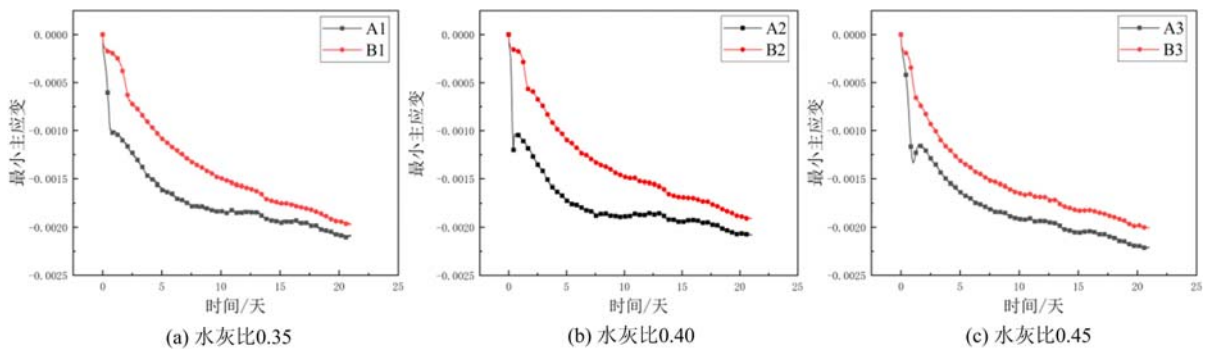


图10 前21天最小主应变对比

Fig. 10 Comparison of minimum principal strain in the first 21 days

的收缩速度逐渐接近,此时水分逐渐消耗,其内部干缩带来的影响逐渐明显,说明在后期混凝土内部水分消耗后,两组试件内部收缩的机理相同。

通过最小主应变的数据可得到各时段内预湿处理后 LWAC 早龄期抵抗收缩能力提升的百分比如图 11 所示。前 3 天,最小主应变变化最为明显的时段内,不同水灰比下(0.35、0.40、0.45)骨料预湿处理后的试件收缩量分别为未预湿试件收缩的 40.05%、37.66%、59.14%,由此可得,轻骨料进行预湿处理后,水灰比为 0.4 的试件在较早的龄期抵抗收缩的能力是最好的,而当水灰比更高时,抵抗收缩的能力有所下降。在 3~21 天,随着时间的变化,混凝土内部水分逐渐消耗,轻骨料的吸水返水效果逐渐消失,这时,不同水灰比下骨料预湿处理后的试件收缩量分别为未预湿试件收缩的 82.63%、79.39%、86.02%,全龄期内的收缩量之比见表 3(各时段效果最佳的水灰比用 * 标注)。由表 3 可见,水灰比为 0.40 时,预湿处理的作用效果最好,另外两组试件在 3~21 天预湿处理后的效果接近,这表明了内养护的作用效果不会随着水分含量的变化而朝着一个趋势发展,在水灰比为 0.40 时,内养护的效果最好。总体来看,在整个实验过程中(0~21 天),不同水灰比下,骨料预湿处理后的试件在早龄期抵抗收缩变形的能力分别提升了 23.47%、26.60%、17.83%,由此可得,随着水灰比的增大,内养护对于 LWAC 抵抗早龄期收缩变形的能力是先升高后降低的,在水灰比为 0.40 时达到最佳效果。

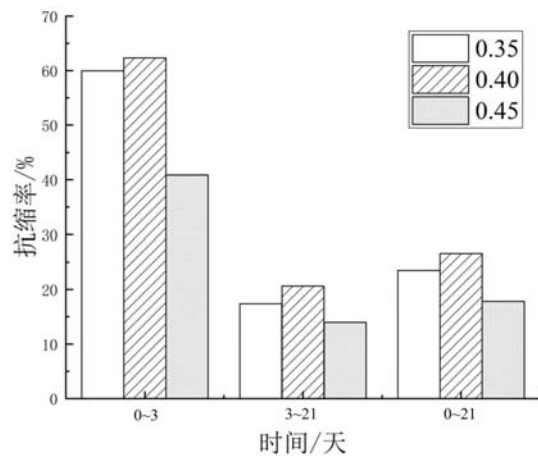


图 11 各时段不同试件预湿后的抗缩率
Fig. 11 Anti-shrinkage rate of pre-wetted specimens in different periods

表 3 预湿与未预湿试件收缩量之比

Tab. 3 The ratio of shrinkage of pre-wetting to no pre-wetting specimens

时间	水灰比		
	0.35	0.40	0.45
0~3 天	40.05%	37.66% *	59.14%
3~21 天	82.63%	79.39% *	86.02%
0~21 天	76.53%	73.41% *	82.17%

4 结论

基于 DIC 技术,通过实验研究了不同水灰比和骨料预湿情况下 LWAC 早龄期表面的应变变化过程,以及内养护对于混凝土抵抗早龄期收缩变形的作用,并通过分析试件的应变数据得到了以下结论:

(1) 经过预湿处理后的轻骨料可以起到内养护的作用,并在早龄期向砂浆部分输送水分,以弥补早龄期水化反应引起的砂浆部分的水分散失,起到填充毛细孔隙的作用,从而减少早龄期混凝土的收缩。

(2) 当 LWAC 中水分含量过多时,早龄期内部反应不完全,内养护的效果削弱,试件整体的最小主应变并不会随着水灰比的增大而减小,而是随着水灰比的增大,在水灰比为 0.40 时达到最佳的内养护效果。因此,对于多孔材料,水灰比不易过高,在工程中应当选取最适宜的水灰比。

(3) 在早龄期,砂浆与骨料的最小主应变没有呈现出始终一致的变化趋势,在一定时段内,任一部分应变的变化会随着另一部分的变化向相反的趋势发展。骨料与砂浆间存在着水分转移的动态平衡,在水分含量充足且未超过一定界限的情况下,两部分的最小主应变在相互影响,这种水分交互的作用效果会影响早龄期混凝土构件的整体收缩。

参考文献:

- [1] 陈茜, 贾青, 王正君, 等. 不同轻骨料混凝土的力学性能和耐久性研究进展[J]. 建材技术与应用, 2021(4):32—35 (CHEN Xi, JIA Qing, WANG Zhengjun, et al. Research progress on mechanical properties and durability of different lightweight aggregate concrete[J]. Research & Application of Building Materials, 2021(4):32—35 (in Chinese))
- [2] 孙海林, 叶列平, 丁建彤, 等. 高强轻骨料混凝土收缩和徐变试验[C]//全国高强与高性能混凝土学术交流会, 2007 (SUN Hailin, YE Lieping, DING Jiantong, et al. Shrinkage and creep test of high-strength lightweight aggregate concrete [C]//National Academic Exchange Conference on High Strength and High Performance Concrete, 2007 (in Chinese))
- [3] Fujiwara T. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(1):31—44.
- [4] Dushimimana A, Niyonsenga A A, Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307:124865.
- [5] Zhuang Y Z, Zheng D D, Ng Z, et al. Effect of lightweight aggregate type on early-age autogenous shrinkage of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120:373—381.
- [6] Xu F, Lin X, Zhou A. Performance of internal curing materials in high-performance concrete; a review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 311:125250.
- [7] 陈瑜, 邓怡帆, 唐旗, 等. 预湿轻骨料内养护功能及其对混凝土的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(3):1—6 (CHEN Yu, DENG Yifan, TANG Qi, et al. Internal curing function of pre-wetted lightweight aggregates and its influences on concrete[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2015, 12(3):1—6 (in Chinese))
- [8] Bentur A, Igarashi S I, Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11):1587—1591.
- [9] Kohno K, Okamoto T, Isikawa Y, et al. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4):611—614.
- [10] Zha J, Li B X, Li J H, et al. Internal curing of saturated lightweight aggregate in high performance combined concrete[J]. Key Engineering Materials, 2009, 405-406:212—218.
- [11] Zhang J, Ke G, Liu Y. Experimental study on shrinkage reduction of calcium sulphoaluminate cement concrete with addition of pre-wetted lightweight aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253:119149.
- [12] Choi S. Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregates; a comparative experimental study and modeling[J]. Construction & Building Materials, 2017, 148:288—296.
- [13] 田文煜, 杜伟, 左宏, 等. 基于数字图像相关的金属材料低温裂尖张开位移试验测量方法[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1014—1022 (TIAN Wenyu, DU Wei, ZUO Hong, et al. Experimental measurement method of low temperature crack tip opening displacement of metallic materials based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1014—1022 (in Chinese))
- [14] 郝元灏, 李艳杰, 张昊, 等. 基于 DIC 的退火 NiTi 合金断裂力学行为研究[J]. 实验力学, 2022, 37(2):243—252 (HAO Yuanhao, LI Yanjie, ZHANG Hao, et al. Study on the fracture behavior of annealed NiTi alloy based on DIC[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(2):243—252 (in Chinese))
- [15] 李悦, 李敏, 李战国, 等. 关于早龄期混凝土抗裂评价指标的综述[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 4):265—269 (LI Yue, LI Min, LI Zhanguo, et al. Summarization on evaluating indicator for crack resistance of early age concrete[J]. Construction Technology, 2018, 47(S4):265—269 (in Chinese))
- [16] Gao P, Chen Y, Huang H L, et al. Effect of relative humidity on drying-induced damage in concrete; a comparative study of digital image correlation and lattice modelling[J]. Materials and Design, 2020, 196:109128.
- [17] 余泽昇, 雷冬, 何锦涛, 等. 碳纤维增强复合材料加固混凝土粘结性能试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6):2428—2436 (SHE Zesheng, LEI Dong, HE Jintao, et al. Tests on bonding properties of carbon fiber reinforced polymer reinforced concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6):2428—2436 (in Chinese))

- [18] He J, Lei D, Luzio G D, et al. Mechanical properties measurement and micro-damage characterization of ITZ in concrete by SEM-DIC method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 155:107064.
- [19] Aghlara R, Tahir M M. Measurement of strain on concrete using an ordinary digital camera[J]. *Measurement*, 2018, 126:398–404.
- [20] Chen Y, Wei J, Huang H, et al. Application of 3D-DIC to characterize the effect of aggregate size and volume on non-uniform shrinkage strain distribution in concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2018, 86:178–189.
- [21] 陈志娟, 雷冬, 洪淼. 早龄期混凝土半绝热状态温度分布与开裂研究[J]. *河南科学*, 2022, 40(3):390–395 (CHEN Zhijuan, LEI Dong, HONG Miao. Study on temperature distribution and cracking of early-age concrete in semi-adiabatic state[J]. *Henan Science*, 2022, 40(3):390–395 (in Chinese))
- [22] GB/T 14684–2022, 建设用砂[S]. 北京:中国标准出版社, 2022 (GB/T 14684–2022, Sand for construction [S]. Beijing:Standards Press of China, 2022 (in Chinese))
- [23] JGJ 51–2002, 轻骨料混凝土技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002 (JGJ 51–2002, Technical specification for lightweight aggregate concrete [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2002 (in Chinese))
- [24] 曾三海, 王光辉, 笔杆旭光. 轻骨料混凝土配合比设计的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2013, 40(10):55–57, 76 (ZENG Sanhai, WANG Guanghui, BIGAN Xuguang. Experimental study on the light aggregate concrete mix ratio[J]. *New Building Materials*, 2013, 40(10):55–57, 76 (in Chinese))
- [25] 刘新义, 沈赣新, 何明胜. 轻骨料混凝土配合比设计的试验研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(2):232–235 (LIU Xinyi, SHEN Ganxin, HE Mingsheng. Experimental on mechanical properties of lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Sceience)*, 2007, 25(2):232–235 (in Chinese))
- [26] Lo T Y, Cui H Z, Li Z G. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete[J]. *Waste Management*, 2004, 24(4):333–338.
- [27] 刘聪, 陈振宁, 何小元. 3D-DIC在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2):339–344 (LIU Cong, CHEN Zhenning, HE Xiaoyuan. Application on 3D-DIC in the experimental study on mechanical properties of civil structures[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2014, 44(2):339–344 (in Chinese))

Experimental study on early-age meso-shrinkage of lightweight aggregate concrete based on digital image correlation technology

WAN Zhaohang, BAI Pengxiang, HONG Miao, ZHU Feipeng, HU Feng, LEI Dong

(School of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: In order to explore the shrinkage deformation law of early-age lightweight aggregate concrete(LWAC), the shrinkage phenomenon of early-age LWAC was studied experimentally by using digital image correlation (DIC) technology. The specific experimental method was to compare the effect of aggregate pre-wetting on shrinkage deformation under three different water-cement ratio conditions. The shrinkage deformation of LWAC was observed by DIC technique, and the evolution process of full-field strain at the early age on the surface of LWAC was obtained. The results show that the pre-wetting treatment can have the effect of internal curing on lightweight aggregate, thus reducing the shrinkage deformation of concrete at the early age; with the increase of water-cement ratio, the effect of internal curing will not increase, but shows the trend of rising first and then decreasing. The curing effect is the best when the water-cement ratio is 0.40; in the early age, the minimum principal strain of aggregate and mortar does not always show a consistent change trend, but deviates from each other in a certain period of time.

Keywords: lightweight aggregate concrete; digital image correlation; strain; early age; internal maintenance