第 49 卷第 2 期
2021 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 2
February，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200310

干燥环境下混凝土内部损伤的量化

高 鹏[1]，陈 阳[1,2]，黄浩良[1,3]，韦江雄[1,3]，余其俊[1,3]

(1. 华南理工大学材料科学与工程学院，广州 510640；2. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司，广州 510500；
3. 广东省建筑材料低碳技术工程技术研究中心，广州 510640)

摘 要：采用数字图像相关法(DIC)测试了 C50 混凝土在 73%，55%和 40%相对湿度环境下干燥 1 d 至 60 d 的非均匀变形。结合混凝土材料细观损伤模型，计算了混凝土内部的等效拉应变($\tilde{\varepsilon}$)，用于获得混凝土内部损伤的分布特征，发现包裹粗骨料的砂浆拉应变较大，容易造成损伤，产生微裂缝。根据 $\tilde{\varepsilon}$ 的大小和分布计算了混凝土内部损伤因子($D_{\tilde{\varepsilon}}$)，用于量化混凝土内部损伤，发现混凝土在 55%和 40%相对湿度环境下干燥 60 d 的 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 分别增加至 101 μm/m 和 135 μm/m，相对较高，说明 55%及以下相对湿度环境容易对混凝土内部造成损伤，产生微裂缝。

关键词：干燥收缩；微裂缝；损伤；数字图像相关法；非均匀应变
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0312–11
网络出版时间：2021–01–06

Quantification of Damage in Concrete Under Drying Condition

GAO Peng[1], *CHEN Yang*[1,2], *HUANG Haoliang*[1,3], *WEI Jiangxiong*[1,3], *YU Qijun*[1,3]
(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China;
3. Guangdong Low Carbon Technologies Engineering Centre for Building Materials, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The non-uniform deformations of C50 concrete under drying at different relative humidities (*i.e.*,73%, 55% and 40%) from 1 d to 60 d were determined by a digital image correlation (DIC) technique. The equivalent tensile strains $\tilde{\varepsilon}$ in concrete were calculated based on the meso-scale damage model of concrete, which were used to identify the damage distribution in concrete. The results show that the mortar phase surrounding the coarse aggregates has great tensile strains, thus readily occurring damage and micro-cracks. The damage index ($D_{\tilde{\varepsilon}}$) calculated from the value and distribution of $\tilde{\varepsilon}$ was used to quantify the drying-induced damage in concrete. The $D_{\tilde{\varepsilon}}$ of the concretes under drying at 55% and 40% relative humidities increases to 101 μm/m and 135 μm/m, respectively, indicating that the drying conditions with ≤55% relative humidity could cause damage and micro-cracks.

Keywords: drying shrinkage; microcracks; damage; digital image correlation; non-uniform deformation

干燥环境下混凝土收缩较大，易产生微裂缝，极大影响其质量与耐久性[1–3]。混凝土中骨料的弹性模量相对较大，会约束硬化水泥浆体等的干缩变形。由于骨料形状、表面构造以及空间分布的非均匀性，骨料对收缩的约束作用会在混凝土内部产生非均匀的应力/应变，对混凝土干缩微裂缝的形成与扩展有重要的影响[1]。如何测试并通过混凝土内部非均匀应力/应变评价干缩微裂缝的分布特征和演化规律是近年来研究混凝土干缩开裂的热点[4–8]。

数字图像相关法(Digital Image Correlation，DIC)是一种非接触式的光学测量技术，主要采用高分辨率图像采集设备捕获试样变形前后的照片，通过相

收稿日期：2020–04–30。　修订日期：2020–05–31。
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0310001-02)；国家自然科学基金项目(51672084，51772103，51872097)；中国博士后科学基金项目(2019M650199)。
第一作者：高 鹏(1986—)，男，博士，助理研究员。
通信作者：韦江雄(1977—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–04–30.　**Revised date:** 2020–05–31.
First author: GAO Peng (1986–), male, Ph.D., Assistant Researcher.
E-mail: gaop@scut.edu.cn
Correspondent author: WEI Jiangxiong (1977–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: jxwei@scut.edu.cn

关匹配计算，获得试样表面变形位移场、应变场等。DIC 具有非接触、全场测量、高精度和高灵敏度等优点，已经成为一种有效的测试材料非均匀变形的方法[9–11]。近年来有研究者采用 DIC 测试了干燥环境下混凝土内部非均匀应变，并结合混凝土细观损伤模型研究了干缩微裂缝的分布特征。例如 Lagier 等[4]和 Mauroux 等[5]基于 Mazars 损伤模型[12]，计算了混凝土内部的等效应变，基于此获得了干缩微裂缝的分布特征，并初步探索了其演化规律。最近 Bertelsen 等[8]采用类似的方法计算了混凝土内部的平均应变，用于获得塑性收缩微裂缝的分布特征及演化规律。这些为研究混凝土干缩微裂缝的形成机理、扩展规律以及防治方法等提供了很好的思路。然而这些研究大多定性地评估微裂缝的分布特征，而通过混凝土内部非均匀应力/应变评价混凝土内部损伤程度的研究相对缺乏。

为获得混凝土干缩微裂缝的分布特征并量化混凝土内部损伤，采用 DIC 测试了 C50 混凝土在 40%，55%和 73%相对湿度环境下干燥 1 d 至 60 d 的非均匀变形。基于混凝土材料细观损伤模型，根据混凝土内部最大(ε_{max})和最小(ε_{min})主应变计算了混凝土内部等效拉应变，用于获得混凝土内部损伤的分布特征。提出并计算了混凝土内部损伤因子($D_{\tilde{\varepsilon}}$)，用于量化混凝土内部损伤，并考察不同环境相对湿度对混凝土内部损伤的影响。

1　实验

1.1　制备

制备了 C50 混凝土，其配合比如表 1 所示。胶凝材料为 P·II 硅酸盐水泥。细骨料为机制砂，细度模数为 2.8，含泥量为 2.0%；粗骨料为粒径 5~10 mm 和 16~20 mm 的花岗岩，含泥量为 0.4%，粗骨料所占体积比例约为 40%；混凝土的水灰比为 0.4。搅拌后，将混凝土浇筑成 10 cm×10 cm×10 cm 的试样。根据 Bissonnette 等[13]的实验步骤，在 23 ℃环境净置 1 d 后拆模，并将其放置于饱和氢氧化钙溶液养护 28 d (温度 23 ℃)。也采用类似的方法制备了水灰比为 0.4 的砂浆，其配合比如表 1 所示。

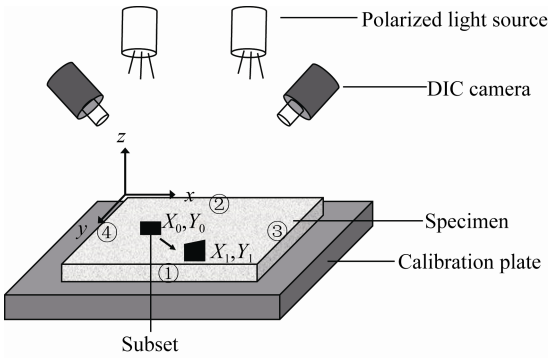
1.2　非均匀变形测试

养护 28 d 后，将砂浆和混凝土切割成 10 cm×10 cm×1 cm 的片状试样，按照 Chen 等所用方法[14]对片状试样喷制散斑，然后将其保存至恒温恒湿箱(温度为 20 ℃，相对湿度分别为 73%，55%和 40%，砂浆和混凝土试样分别记为 M-73%，M-55%，M-40%，和 C-73%，C-55%，C-40%)。在测试时间(0、1、3、7、11、14、28、60 d)将片状试样取出，放置于标定板上(点距为 6 mm 的 12×9 点阵)，用 DIC 相机进行观测。每个龄期测试完毕后将样品放置于恒温恒湿箱继续干燥，直至最终测试完成。如图 1 所示，该 DIC 装置具有双相机，夹角为 30°，工作距离为 600 mm，相机距离为 160 mm，已采用标定板对相机的位移分辨率进行标定，位移分辨率为 0.5 μm。该 DIC 系统可用于观测试样的三维非均匀变形，但本研究只关注试样在二维 *X*-*Y* 平面上的非均匀变形。在 DIC 的测试过程中，DIC 相机保持固定，用于捕获试样变形前后的图片。然后定义若干子区，通过比较试样变形前后的图片，采用相关匹配计算，确定子区中心的位移变化，例如图 1 中(X_0, Y_0)变化至(X_1, Y_1)。基于此，确定子区在 *X* 和 *Y* 轴方向的位移 *U* 和 *V*。对 *U* 和 *V* 进行微分即可得到子区在 *X*-*Y* 平面上的应变分量：$\varepsilon_{xx}=\partial U/\partial x$；$\varepsilon_{yy}=\partial V/\partial y$；$\varepsilon_{xy}=\partial U/\partial y+\partial V/\partial x$。分别采用式(1)和式(2)，计算子区在 *X*-*Y* 平面上的最大(ε_{max})和最小(ε_{min})主应变。为减小试样移动所产生的刚体位移对测试的影响，已采用定位装置(标定板，如图 1 所示)以及 DIC 软件进行校准，校准结果显示试样移动对位移测试的影响小于 5 μm。

表 1　砂浆和 C50 混凝土的配合比

Table 1　Mix proportions of mortar and C50 concrete

Specimen	Mix proportion/(kg·m^{-3})					Water to cement ratio
	Water	Cement	Coarse aggregate/mm		Fine aggregate	
			5–10	16–20		
Mortar	364	910			901	0.4
Concrete	222	554	433	649	541	0.4



① and ②, ③ and ④ represent the boundaries of specimen along *Y*- and *X*-axis, respectively.

图 1　DIC 装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram for the DIC set-up

$$\varepsilon_{\max}=\frac{\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}}{2}+\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}}{2}\right)^2+(\varepsilon_{xy})^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\min}=\frac{\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}}{2}-\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}}{2}\right)^2+(\varepsilon_{xy})^2} \quad (2)$$

其中：ε_{xx}，ε_{yy}和 ε_{xy}为子区在 *X*-*Y* 平面上的应变分量。

试样的整体干燥收缩可由 DIC 获得的位移数据进行计算。以图 1 中的试样为例，其在 *Y* 轴方向有 2 个边界①和②。这 2 个边界在 *Y* 轴方向的平均位移分别为：

$$d_{Y,1}=\sum\left(V_{X1,i}/n_{X1}\right) \quad (3)$$

$$d_{Y,2}=\sum\left(V_{X2,i}/n_{X2}\right) \quad (4)$$

其中：$d_{Y,1}$和 $d_{Y,2}$分别为边界①和②在 *Y* 轴方向的平均位移；n_{X1}和 n_{X2}分别为边界①和②的子区个数；$V_{X1,i}$和 $V_{X2,i}$分别为试样边界①和②子区 *i* 在 *Y* 轴方向的位移。

试样在 *Y* 轴方向的平均收缩可以计算为(ε_Y)：

$$\varepsilon_Y=\frac{d_{Y,1}-d_{Y,2}}{L} \quad (5)$$

其中：*L* 为试样的尺寸(10 cm)。

用类似的方法可以计算试样在 *X* 轴方向的平均收缩(ε_X)，而试样的整体干燥收缩(线性收缩)可以计算为 ε_X和 ε_Y的平均值。

1.3 干燥收缩测试

为考察 DIC 测试水泥基材料整体干燥收缩的适用性，采用传统测试方法进行比较研究。水泥基材料的干燥收缩通常可采用比长仪法[13]、电阻应变片[15–16]、应变计[17]等进行测试。其中，电阻应变片测试法是利用金属变形和电阻的关系，实现对试样变形的测试。在测试水泥基材料的干燥收缩时，可将电阻应变片粘贴在试样的表面，电阻应变片的变形即为试样的变形。本研究采用敏感栅尺寸为 10 mm×3 mm 的电阻应变片(BX120-10AA，台州市黄岩诚立工程传感器厂)对 10 cm×10 cm×1 cm 的片状试样进行测试。每个试样平行安置 2 个电阻应变片。

1.4 微裂缝测试

采用注入荧光树脂法[1]观测混凝土干缩微裂纹。具体步骤如下：待 DIC 测试完毕后，采用 250 μm 砂纸对试样表面进行打磨，移除散斑。然后采用真空装置排除试样内部孔隙的气体(真空度压力为 0.1 MPa，真空时间为 30 min)。之后采用与真空室连接的进液管注入荧光环氧树脂，将试样浸没在荧光环氧树脂中，并保持 30 min。待荧光环氧树脂硬化后，先后采用 250、38 μm 和 18 μm 砂纸对试样表面进行打磨。打磨完毕后，采用德国蔡司 SteREO Discovery. V12 荧光显微镜系统进行观测。

2 结果与讨论

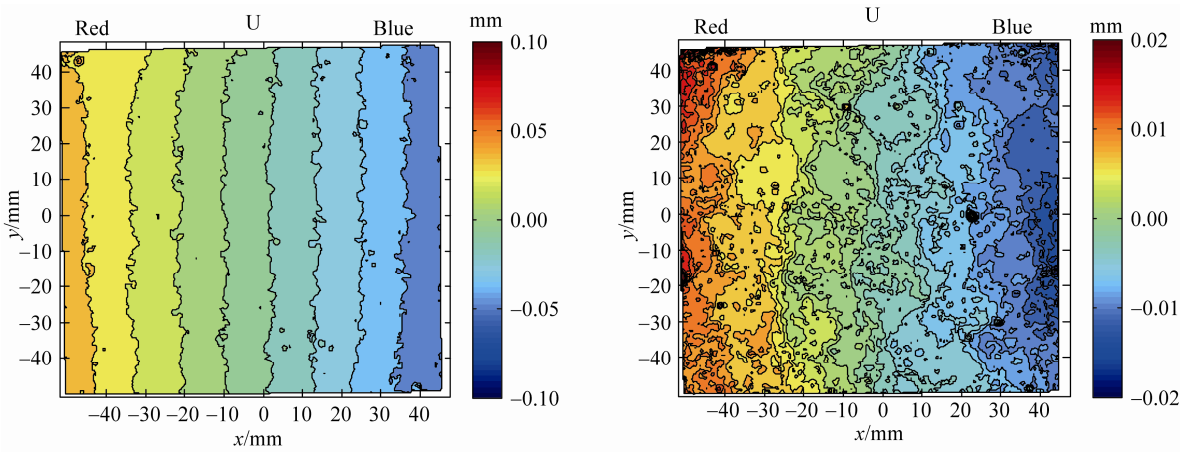
2.1 位移场

图 2 显示了砂浆和混凝土试样在 *X* 轴方向的位移场。其中红色为正值，代表向坐标轴正向的位移；蓝色为负值，代表向坐标轴负向的位移。可以看出砂浆和混凝土均向试样中心产生收缩。砂浆的收缩较大，且均匀；而混凝土的收缩是非均匀的，主要是混凝土中粗骨料的约束作用导致的。混凝土试样中某些区域的位移场相对接近，这些区域主要是粗骨料。随着环境相对湿度的降低，砂浆和混凝土试样的收缩均增加。

图 3 显示了 DIC 测试的砂浆和混凝土试样的整体干燥收缩。其中 M-73%和 C-73%的干燥收缩相对较小，干燥 60 d 分别为 893 μm/m 和 273 μm/m。而 M-55%，M-40%和 C-55%，C-40%的干缩收缩相对较大，干燥 60 d 分别达到 1 517，1 627，419 μm/m，462 μm/m。作为比较研究，采用电阻应变片测试了砂浆(M-40%)和混凝土(C-40%)试样的整体干燥收缩。如图 3c 所示，DIC 与电阻应变片的测试结果基本一致。DIC 测试结果也与文献报道接近。例如，Bissonnette 等[13]采用比长仪测试了砂浆和混凝土的干燥收缩，其中相似材料组成的砂浆和混凝土试样(水灰比 0.35)在 48%相对湿度环境中干燥 60 d 的收缩分别达到 1 400 μm/m 和 550 μm/m 左右，与本研究相对接近。由此可见，DIC 测试的水泥基材料整体干燥收缩与传统比长仪、应变片等的测试结果有较好的相关性。

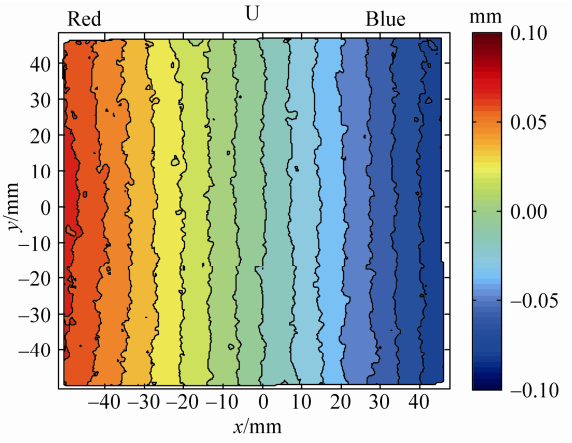
2.2 应变场

根据材料力学的定义，在一个平面单元中，主应变包括最大主应变($\varepsilon_{\max}$)和最小主应变($\varepsilon_{\min}$)，$\varepsilon_{\max}$和 $\varepsilon_{\min}$的方向相互垂直，且 $\varepsilon_{\max}$始终大于 $\varepsilon_{\min}$。图 4a~图 4c 分别显示了 C-73%，C-55%和 C-40%混凝土试样干燥 60 d 的 $\varepsilon_{\max}$场。可以看出混凝土试样 $\varepsilon_{\max}$场是非均匀的，包含了拉应变(红色)和压应变(蓝色)。C-73%试样的应变集中区域相对较少，而 C-55%和 C-40%试样有较多拉应变集中区域。这些试样内部 $\varepsilon_{\max}$的分布较宽，可达–1 500~1 500 μm/m。其极值显著大于混凝土的整体干燥收缩。

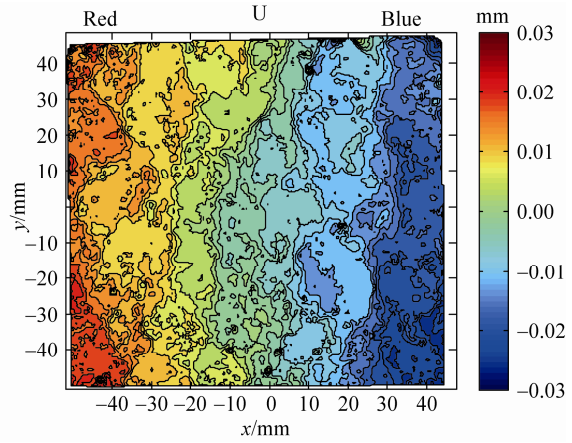


(a) M-73%

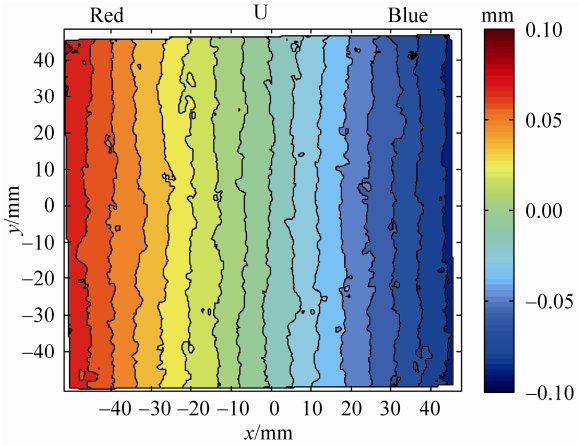
(b) C-73%



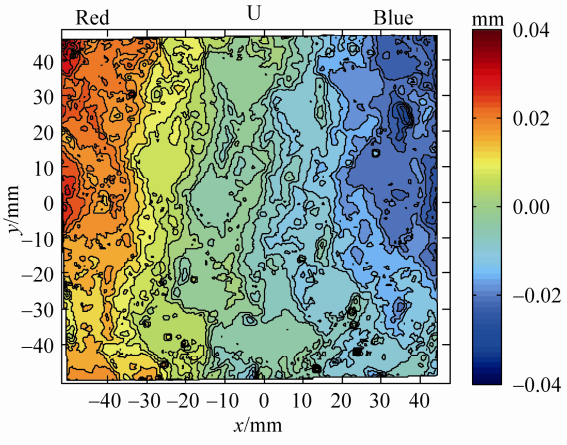
(c) M-55%



(d) C-55%



(e) M-40%



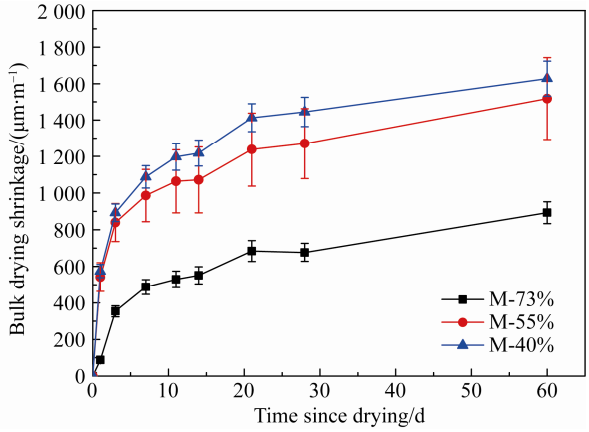
(f) C-40%

图 2　砂浆和混凝土试样在 X 轴方向的位移场(干燥 60 d)

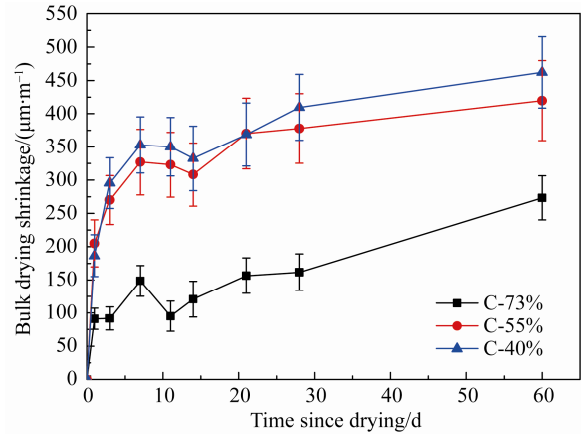
Fig. 2　Displacement fields of mortar and concrete specimens in the direction of X-axis (under drying for 60 d)

图 5a~图 5c 分别显示了 C-73%，C-55%和 C-40%混凝土试样干燥 60 d 的 ε_{min} 场。可以看出混凝土试样 ε_{min} 的分布也是非均匀的，包含了拉应变(红色)和压应变(蓝色)。随着环境相对湿度的降低，拉应变和压应变的区分愈发明显。混凝土内部 ε_{min} 的分布也较宽，可达–4 000~1 000 μm/m。其极值也显著大于混凝土的整体干燥收缩。

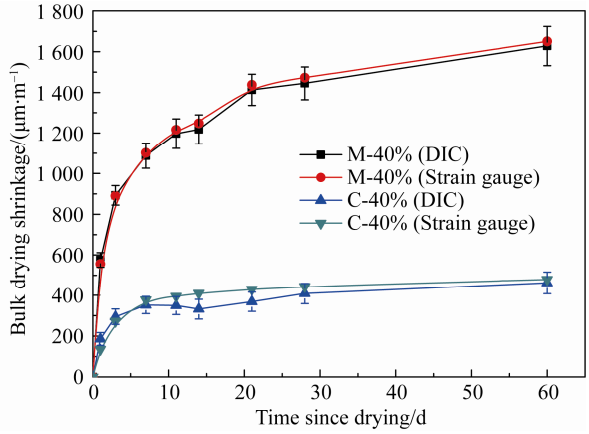
通常可以认为混凝土主要由砂浆和粗骨料组成。为分析干燥环境下混凝土内部应变的分布特征，需要确定砂浆和粗骨料的分布状态。Chen 等[14]的研



(a) Mortar specimens (DIC)



(b) Concrete specimens (DIC)

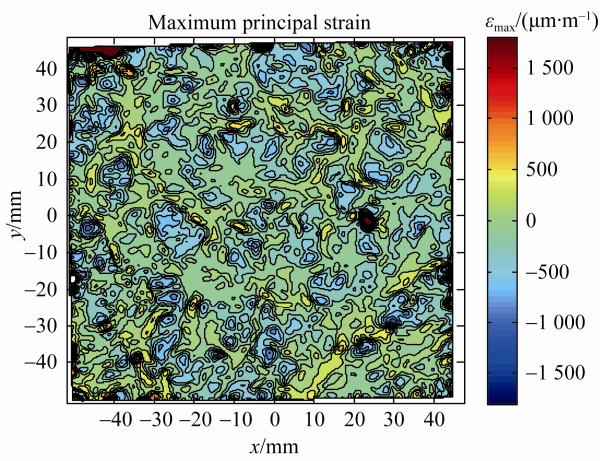


(c) Comparison between the results of DIC and strain gauge

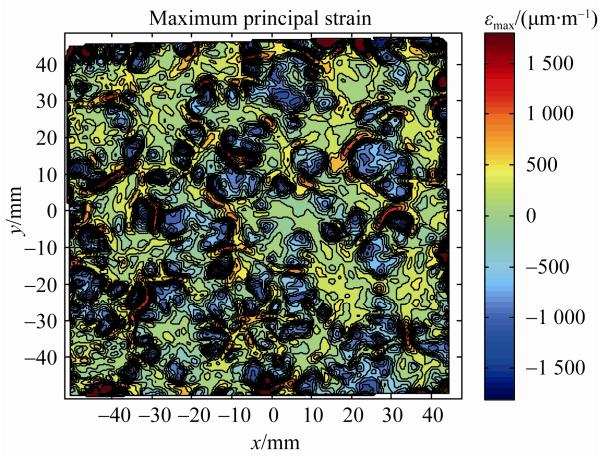
图 3 砂浆和混凝土试样的整体干燥收缩

Fig. 3 Bulk drying shrinkage of mortar and concrete specimens

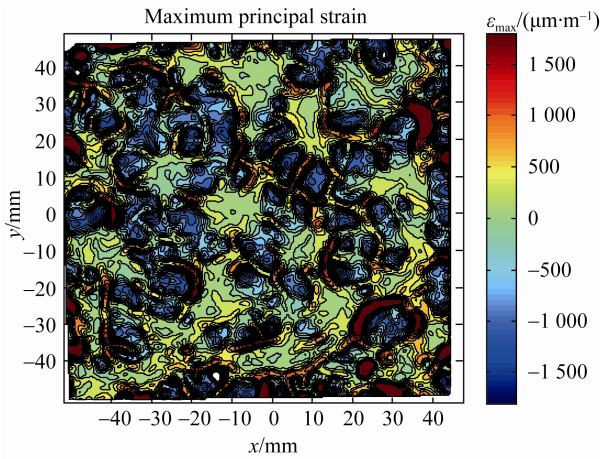
究表明，干燥环境下混凝土 ε_{min} 场中拉应变和压应变的分布特征可以用于区分粗骨料和砂浆。基于此，本研究选取一个 C-40%样品干燥 60 d 的 ε_{min} 场与其干燥前的截面照片进行比较，如图 6 所示。可以看出，ε_{min} 场拉应变区域(红色)以及较小压应变区域(浅红色)与混凝土截面照片中粗骨料的分布有较好的对应。ε_{min} 场中拉应变主要出现在粗骨料中，且粗骨料 ε_{min} 压应变的值相对较小，而砂浆中 ε_{min} 主要是压应变，且值相对较大，因此可以通过 ε_{min} 场将粗骨料和砂浆区分。



(a) C-73%



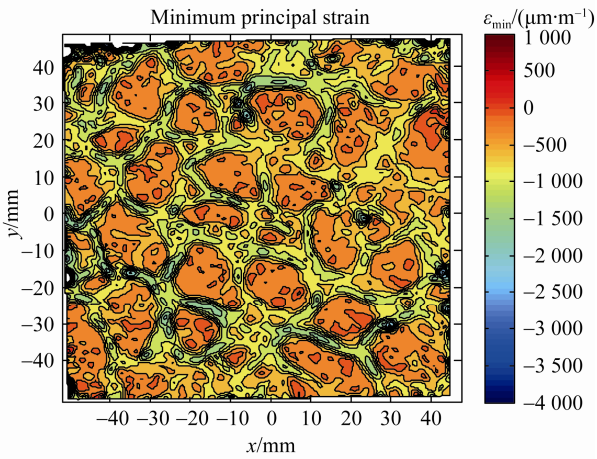
(b) C-55%



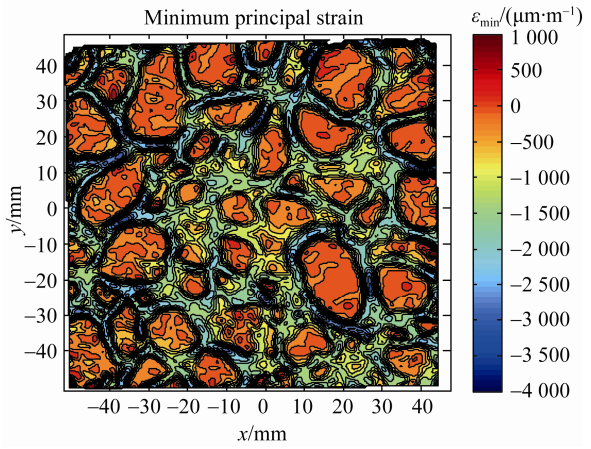
(c) C-40%

图 4 混凝土试样干燥 60 d 的 ε_{max} 场

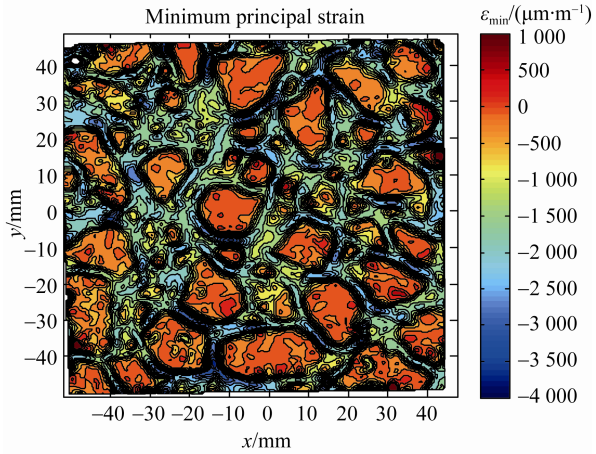
Fig. 4 ε_{max} fields of the concrete specimens under drying for 60 d



(a) C-73%



(b) C-55%

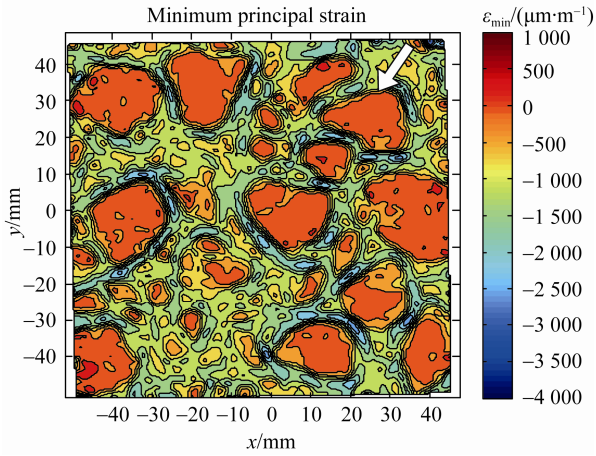


(c) C-40%

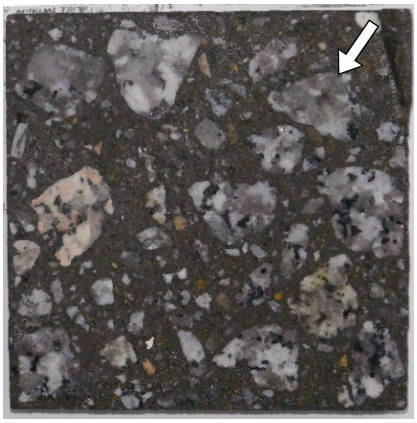
图 5　混凝土试样干燥 60 d 的 ε_{min} 场

Fig. 5　ε_{min} fields of the concrete specimens under drying for 60 d

根据 ε_{min} 的分布规律，将图 5 进行处理，得到粗骨料和砂浆的分布信息。其中，C-73%，C-55%和 C-40%试样中粗骨料所占比例分别为 40%，35%，39%，与根据混凝土配合比计算得到的粗骨料比例一致(40%)。然后根据粗骨料的分布特征，分别将混凝土试样中粗骨料和砂浆中的主应变场进行分离。图 7a 和图 7b 分别显示了混凝土中砂浆的 ε_{max} 和 ε_{min} 的局部分布。可以看出，干燥环境下混凝土中砂浆的主应变场可以分为 2 种：(1)包裹粗骨料的砂浆具有较大的 ε_{max} 拉应变分布(如图 7a 红色区域所示)，且以粗骨料为中心向相邻骨料发散。Goltermann[18]采用经典弹性理论计算了单个球形骨料对收缩约束引起的应力分布，发现骨料周围会形成平行于骨料表面的拉应力以及垂直于骨料表面的压应力，且应力的大小和与骨料中心的距离有关。因此，这些区域 ε_{max} 为拉应变，而 ε_{min} 为压应变(如图 7b 所示)。(2)粗骨料间的填充砂浆具有较大的 ε_{max} 压应变(如图 7a 蓝色区域所示)。而如图 7b 所示，相应区域的 ε_{min} 为压应变，但值相对较小。Maruyama 等[6]认为，粗骨料间的填充区域会由于砂浆的干燥收缩产生压应力，导致该区域形成压应变。



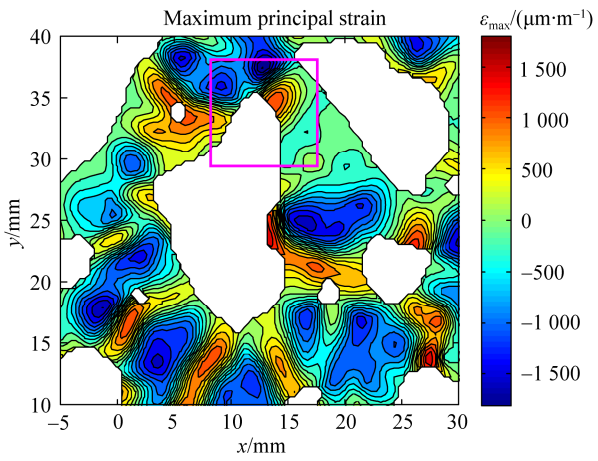
(a) ε_{min} of C-40%under drying for 60 d



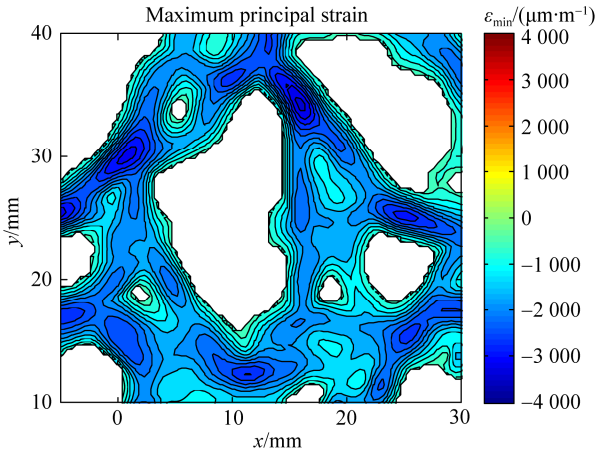
(b) Cross section of C-40%before drying

图 6　混凝土试样 ε_{min} 场与截面照片的对比

Fig. 6　Comparison between the distribution of ε_{min} and cross section of the concrete specimen



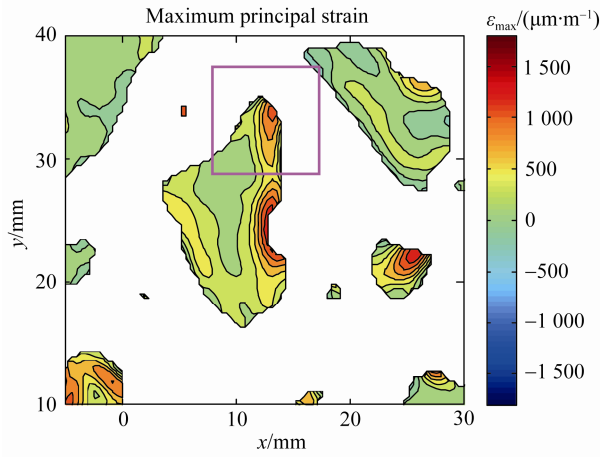
(a) Local distribution of ε_{max}



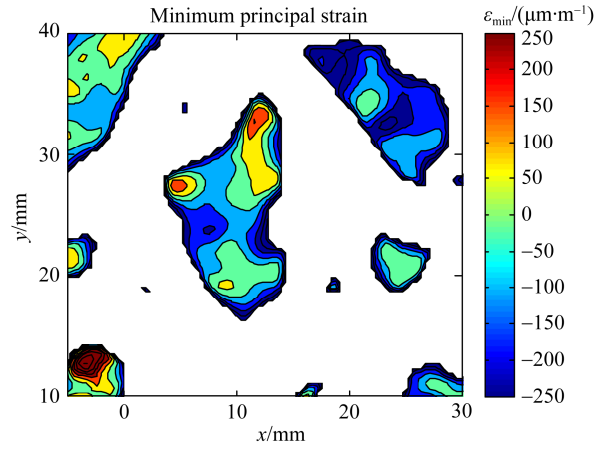
(b) Local distribution of ε_{min}

图 7　C-40%试样干燥 60 d 的砂浆 ε_{max} 和 ε_{min} 的局部分布: 白色为粗骨料

Fig. 7　Local distributions of ε_{max} and ε_{min} in the mortar of the C-40% specimen under drying for 60 d: the white represents coarse aggregates



(a) Local distribution of ε_{max}



(b) Local distribution of ε_{min}

The white represents mortar.

图 8　C-40%试样干燥 60 d 的粗骨料ε_{max}和ε_{min}的局部分布

Fig. 8　Local distributions of ε_{max} and ε_{min} in the coarse aggregates of the C-40% specimen under drying for 60 d

如图 8b 所示，粗骨料的 ε_{min} 包括了拉应变(红色)和压应变(蓝色)。压应变主要集中在粗骨料外围。这主要是因为混凝土在干燥过程中，砂浆的收缩会受到粗骨料的约束，在砂浆中产生垂直于粗骨料表面的压应力。相应地，砂浆会对粗骨料产生朝向粗骨料中心的压应力[18]。但是混凝土在干燥过程中，微裂纹的形成会使得砂浆对粗骨料的“包裹”作用减小，砂浆的收缩会使得粗骨料局部受拉，如图 7a 和图 8a 紫色框线区域所示。

2.3　损伤场

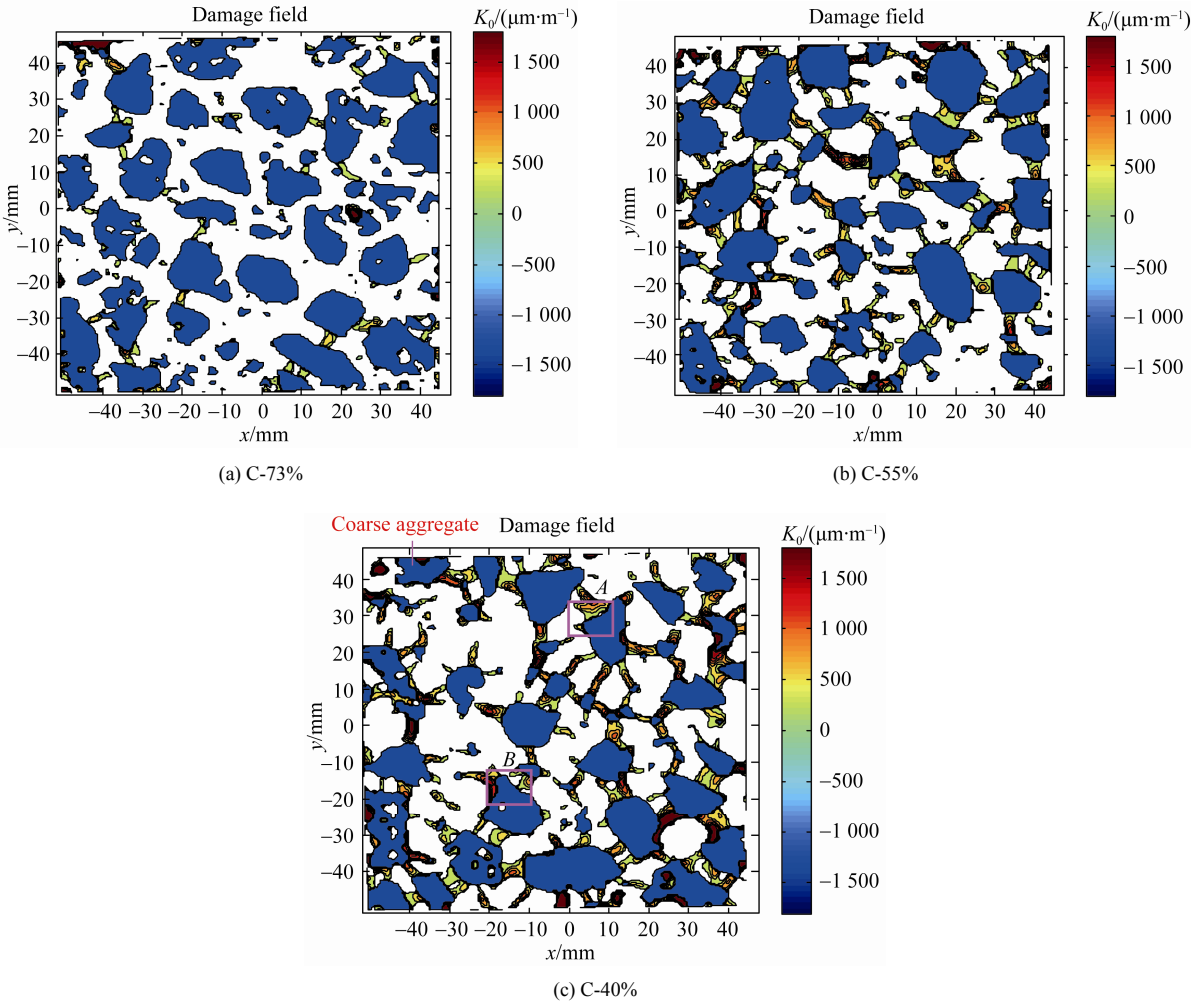
本研究中粗骨料为花岗岩，其强度通常大于砂浆的强度，因此主要考虑混凝土试样中砂浆的损伤。一般认为水泥基材料内部应力/应变集中的区域容易造成损伤，产生微裂缝。混凝土材料细观损伤模型有较好的发展与应用，可以用于分析混凝土的内部损伤。以 Mazars 损伤模型为例[12]，其提出了一个等效拉应变的概念($\tilde{\varepsilon}$)，并认为当 $\tilde{\varepsilon}$ 大于水泥基材料拉应变阈值(K_0)时，微裂缝就会产生。$\tilde{\varepsilon}$ 可由 ε_{max} 和 ε_{min} 计算得到(如式(6)所示)。

$$\tilde{\varepsilon}=\sqrt{\varepsilon_{max+}^2+\varepsilon_{min+}^2} \tag{6}$$

其中：$\tilde{\varepsilon}$ 为等效应变，当 ε_{max} 或 ε_{min} 小于零时，$\langle\varepsilon_+\rangle$ 等于 0。

Lagier 等[4]和 Mauroux 等[5]采用 DIC 测试了干燥环境下混凝土内部形成的非均匀应变，并结合 Mazars 损伤模型获得了混凝土干缩微裂缝的分布特征。其中，Lagier 等[4]由硬化水泥浆体的弹性模量(E)

和抗拉强度(f_t)计算了硬化水泥浆体的 K_0：$K_0=f_t/E$，E 和 f_t 分别为 9 GPa 和 3.3 MPa，K_0 计算为 366 μm/m。采用类似 Lagier 等[4]的方法，由砂浆的 E 和 f_t 计算砂浆的 K_0，并通过砂浆相中 $\tilde{\varepsilon}>K_0$ 判断了混凝土内部损伤的分布特征。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准 GB T50081—2002》中混凝土的静力受压弹性模量试验方法测试得到砂浆(养护 28 d)的弹性模量为 20.5 GPa，砂浆的抗压强度为 42.0 MPa。根据 Luković 等[19]的研究将砂浆的抗拉强度设为抗压强度的 1/10，即 4.2 MPa。假定养护 28 d 后砂浆的弹性模量和抗拉强度变化不大，因此 K_0 可以计算为 204 μm/m。图 9a~图 9c 分别显示了 C-73%，C-55%和 C-40%混凝土试样干燥 60 d 的内部损伤的分布特征。可以看出，混凝土的内部损伤以粗骨料为中心向相邻粗骨料发散，且 C-55%和 C-40%中的内部损伤相对较多。



(a) C-73%　　(b) C-55%

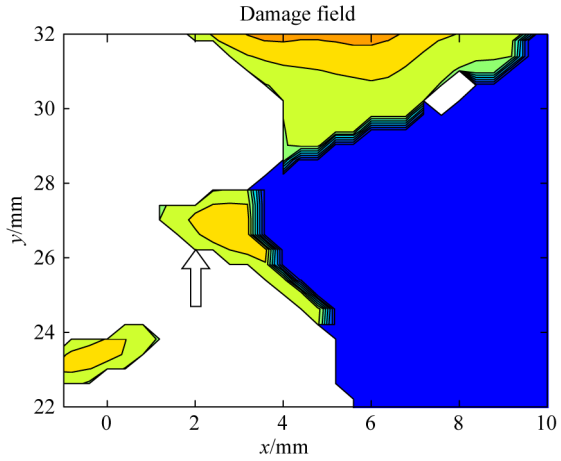
(c) C-40%

The blue represents coarse aggregates; $K_0=f_t/E$.

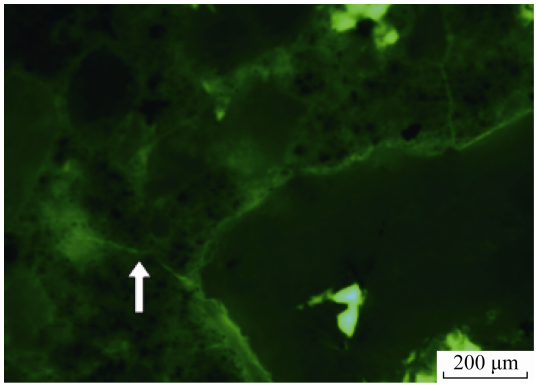
图 9　混凝土试样干燥 60 d 损伤区域的分布特征

Fig. 9　Distribution of damage zones in the concrete specimens under drying for 60 d

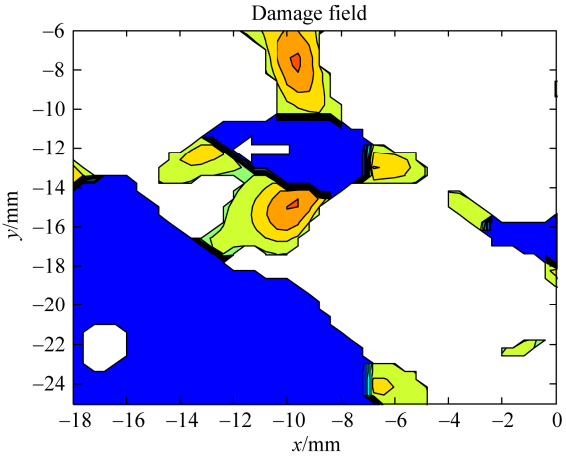
选取图 9c (C-40%试样)中区域 A 和 B 的损伤分布特征分别与注入荧光树脂法观测的微裂缝进行比较。如图 10 中箭头标示，DIC 测试结果与注入荧光树脂法观测结果有较好的相关性。值得注意的是，注入荧光树脂法可以直观表征混凝土干缩微裂缝[1]，但需要对样品进行真空、打磨等处理，不易于进行连续观测。而且，在真空、打磨等处理过程中可能引起试样产生新的微裂缝。因此，注入荧光树脂法不易测试较高相对湿度环境下混凝土内部干缩微裂缝的分布特征。而 DIC 具有非接触、全场测量、高精度和高灵敏度等优点，易于进行连续观测，可以通过选择不同的养护条件，研究相对湿度对混凝土内部损伤和微裂缝的影响规律。



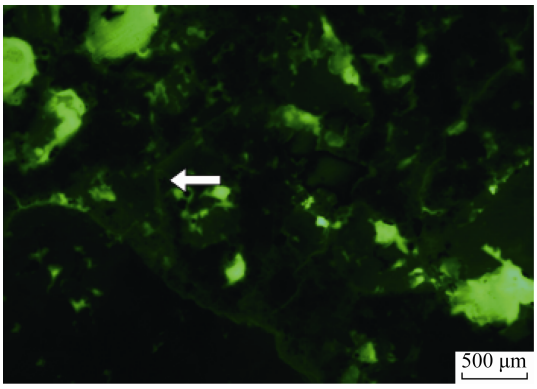
(a) Damage distribution in zone *A* in Fig. 9(c)



(b) Microcracks distribution in zone *A* in Fig. 9(c)



(c) Damage distribution in zone *B* in Fig. 9(c)



(d) Microcracks distribution in zone *B* in Fig. 9(c)

A and *B* zones are from Fig. 9(c).

图 10 DIC 测试的内部损伤与荧光树脂测试的微裂缝的比较

Fig. 10 Comparison between the damage and micro-cracks in the concrete specimens under drying for 60 d

为评估混凝土干燥收缩引起的损伤，Maruyama 等[6]计算了 $\varepsilon_{\max}$ 场中的拉应变面积[见式(7)]，并将其定义为损伤因子，D_ε。Maruyama 等[6]发现 D_ε 与混凝土整体干燥收缩有较好的相关性。但是由于计算了所有拉应变区域，D_ε 过高地评估了混凝土干燥收缩引起的损伤。

$$D_{\tilde{\varepsilon}} = \frac{\sum_i \left(\varepsilon_{\max,i} \cdot A_i \mid \varepsilon_{\max,i} \geqslant 0\right)}{\sum_i A_i} \tag{7}$$

为相对准确量化干燥环境下混凝土内部的损伤程度，本研究采用式(8)计算了混凝土中砂浆 $\tilde{\varepsilon} > K_0$ 区域的面积，并将其定义为损伤因子，$D_{\tilde{\varepsilon}}$。

$$D_{\tilde{\varepsilon}} = \frac{\sum_i \left(\tilde{\varepsilon}_i \cdot A_i \mid \tilde{\varepsilon}_i > K_0\right)}{\sum_i A_i} \tag{8}$$

其中：A_i 为混凝土截面 i 子区面积。

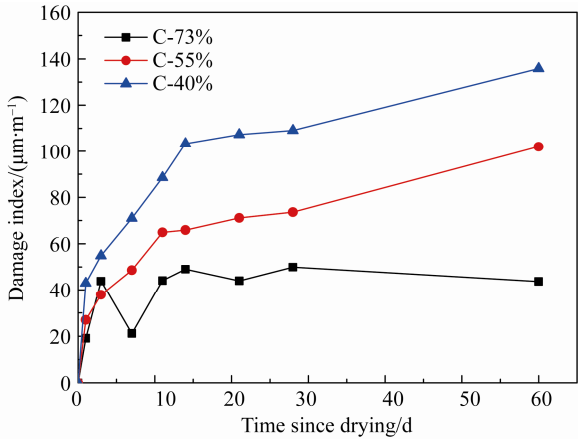
此外，为考察 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 与干燥收缩驱动力的关系，本研究计算了砂浆的等效收缩应力。干燥环境下，混凝土中砂浆为主要的收缩相，其对混凝土的作用可以等效为一种收缩应力，可以根据砂浆的收缩和弹性模量进行计算[19]：

$$P = \varepsilon_{\text{sh}} E_{\text{m}} \tag{9}$$

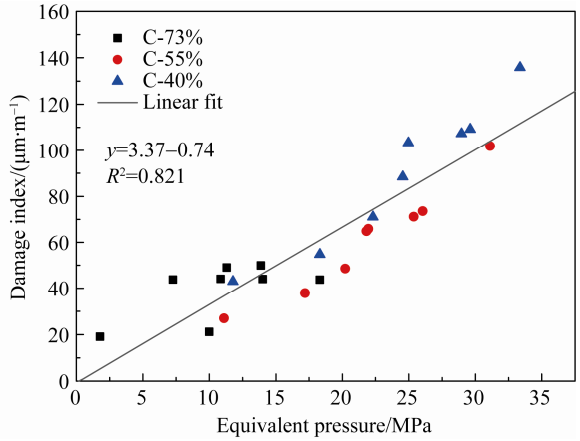
其中：P 为等效收缩应力；ε_{sh} 为砂浆的收缩；E_{m} 为砂浆的弹性模量。

如图 11a 所示，C-73%混凝土试样在干燥 11 d 后的 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 趋于稳定，在干燥 60 d 时约为 43 μm/m。而 C-55%和 C-40%混凝土试样的 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 相对较大，在干燥 60 d 时分别增至 101 μm/m 和 135 μm/m。这说明在环境相对湿度在 55%及以下时，干燥收缩对混凝土内部造成的损伤相对严重。这与有关研究相对一致，例如 Samouh 等[20]采用圆环实验研究了环境相对湿度对混凝土开裂时间的影响，发现 50%和 30%相对

湿度环境下混凝土的开裂时间显著小于 70%相对湿度环境下混凝土的开裂时间，其认为在 50%相对湿度毛细管力和拆开应力等干燥收缩驱动力有一个峰值。图 11b 显示了干燥环境下混凝土中砂浆等效收缩应力 P 与混凝土试样 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 的关系，可以看出 C-73%，C-55%和 C-40%混凝土试样中 P 与 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 大致是线性相关的。



(a) Damage index *versus* drying time



(b) Damage index *versus* equivalent pressure

图 11　混凝土试样的损伤因子和等效收缩应力

Fig. 11　Damage index and equivalent pressure in the concrete specimens

3　结论

1) 水灰比 0.4 的 C50 混凝土在 73%，55%和 40%相对湿度环境下干燥 60 d 的整体收缩 DIC 测试结果分别为 273，419 μm/m 和 462 μm/m，与传统应变片和比长仪测试结果较为吻合。由于骨料对收缩的约束作用，干燥环境下混凝土内部会形成较大的拉应变和压应变，且分布较宽，干燥 60 d 的最大主应变(ε_{max})分布可达–1 500~1 500 μm/m，最小主应变(ε_{min})分布可达–4 000~1 000 μm/m，拉应变和压应变的极值均显著大于混凝土的整体收缩。

2) 干燥环境下混凝土内部 ε_{min} 场可用于区分粗骨料和砂浆相。结合混凝土材料细观损伤模型，通过 ε_{max} 和 ε_{min} 可计算混凝土等效拉应变($\tilde{\varepsilon}$)，用于获得混凝土内部损伤的分布特征。结果显示，包裹粗骨料的砂浆区域具有较大拉应变，容易造成损伤，产生微裂缝。

3) 根据 $\tilde{\varepsilon}$ 的大小和分布计算了混凝土内部损伤因子($D_{\tilde{\varepsilon}}$)，用于量化混凝土内部损伤并考察不同环境相对湿度对混凝土内部损伤程度的影响。混凝土在 73%相对湿度环境下干燥 60 d 的 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 趋于稳定，约为 43 μm/m，而混凝土在 55%和 40%相对湿度环境下干燥 60 d 的 $D_{\tilde{\varepsilon}}$ 分别增加至 101 μm/m 和 135 μm/m，相对较高，说明 55%及以下相对湿度环境容易对混凝土内部造成损伤，产生微裂缝。

参考文献:

[1] BISSCHOP J, VAN MIER J G M. Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites[J]. Mater Struct, 2002, 35(8): 453–461.

[2] 高小建, 阐雪峰, 杨英姿. 单面干燥条件下混凝土的收缩变形分布特征[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 87–91.
GAO Xiaojian, KAN Xuefeng, YANG Yingzi. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(1): 87–91.

[3] 李曙光, 郝伟男, 陈改新, 等. 干燥引起的初始缺陷对混凝土宏观性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6): 892–899.
LI Shuguang, HAO Weinan, CHEN Gaixin, et al. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(6): 892–899.

[4] LAGIER F, JOURDAIN X, SA C D, et al. Numerical strategies for prediction of drying cracks in heterogeneous materials: Comparison upon experimental results[J]. Eng Struct, 2011, 33: 920–931.

[5] MAUROUX T, BENBOUDJEMA F, TURCRY P, et al. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation[J]. Cem Concr Res, 2012, 42: 1014–1023.

[6] MARUYAMA I, SASANO H. Strain and crack distribution in concrete during drying[J]. Mater Struct, 2014, 47: 517–532.

[7] WAN K, LI G, WANG S, et al. 3D full field study of drying shrinkage of foam concrete[J]. Cem Concr Compos, 2017, 82: 217–226.

[8] BERTELSEN I M G, KRAGH C, CARDINAUD G, et al. Quantification of plastic shrinkage cracking in mortars using digital image correlation[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105761.

[9] PETERS W H, RANSON W F, SUTTON M A, et al. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. Opt Eng, 1983, 22: 38–42.

[10] HELFRICK M N, NIEZRECKI C, AVITABILE P, et al. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement[J]. Mech Syst Signal P R, 2011, 25: 917–927.

[11] PAN B, XIE H M, YANG L, et al. Accurate measurement of satellite antenna surface using 3D digital image correlation technique[J]. Strain,

2009, 45: 194–200.

[12] MAZARS J. A description of micro- and macroscale damage of concrete structures[J]. Eng Fract Mech, 1986, 25: 729–737.

[13] BISSONNETTE B, PIERRE P, PIGEON M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials[J]. Cem Concr Res, 1999, 29: 1655–1662.

[14] 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]. Cem Concr Compos, 2018, 86: 178–189.

[15] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土裂缝的稳定扩展过程与临界裂缝尖端张开位移[J]. 水利学报, 1989(4): 33–44.
XU Shilang, ZHAO Guofan. J Hydraul Eng (in Chinese), 1989(4): 33–44.

[16] 胡时胜, 张磊, 武海军, 等. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 128–132.
HU Shisheng, ZHANG Lei, WU Haijun, et al. Eng Mech(in Chinese), 2004, 21(4): 128- 132.

[17] 祝昌暾, 陈敏, 杨杨, 等. 高强混凝土的收缩和早期徐变特性[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(2): 1–4.
ZHU Changtun, CHEN Ming, YANG Yang, et al. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2005(2): 1–4.

[18] GOLTERMANN P. Mechanical predictions of concrete deterioration. Part 2: classification of crack patterns[J]. ACI Mater J, 1995, 92: 58–63.

[19] LUKOVIĆ M, ŠAVIJA B, SCHLANGEN E, et al. A 3D lattice modelling study of drying shrinkage damage in concrete repair systems[J]. Materials, 2016, 9: 575.

[20] SAMOUH H, ROZIÈRE E, LOUKILI A. Experimental and numerical study of the relative humidity effect on drying shrinkage and cracking of self-consolidating concrete[J]. Cem Concr Res, 2019, 102: 519–529.