

文章编号:1007-9629(2024)08-0764-09

基于 DIC 古建筑青砖受冻融循环作用的损伤演化

郝负洪^{1,2,3,4,*}, 高炯¹, 吴日根², 宣姣羽², 何晓雁^{1,3,4}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 4. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 以内蒙古隆盛庄古建筑青砖砌体为研究对象, 通过数字图像相关(DIC)技术, 研究古建筑青砖在冻融循环作用下的损伤破坏规律, 采用双因子——损伤程度因子和损伤局部化因子来表征古建筑青砖的单轴压缩损伤过程, 并根据双因子损伤演化曲线建立了不同冻融循环次数下的损伤演化模型. 结果表明: 古建筑青砖在单轴压缩下的破坏过程可分为初始损伤闭合阶段、线弹性损伤阶段、弹塑性损伤阶段和塑性损伤阶段 4 个阶段; 随着冻融循环次数的增加, 青砖表面应变集中程度增大, 使其承载能力降低; 冻融循环会缩短双因子曲线的线弹性阶段, 同时利用双因子建立的损伤演化模型能有效反映冻融循环作用下古建筑青砖材料的损伤演化过程.

关键词: 古建筑青砖; 冻融循环; 数字图像相关; 应变云图; 损伤演化

中图分类号: TU362; TU87

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.012

Damage Evolution of Ancient Building Blue Bricks under Freeze-Thaw Cycle Based on DIC

HAO Yunhong^{1,2,3,4,*}, GAO Jiong¹, WU Rigen², XUAN Jiaoyu², HE Xiaoyan^{1,3,4}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center of Structure Inspection, Appraisal and Safety Assessment, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 4. The Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Taking the ancient building wall of Longshengzhuang in Inner Mongolia as the research object, the damage and failure law of ancient building blue bricks under freeze-thaw cycles were investigated by digital image correlation (DIC) technology. Two-factor—damage degree factor and damage localization factor were used to characterize the uniaxial compression damage process of ancient building blue bricks. Based on the two-factor damage evolution curve, a damage evolution model was established under different freeze-thaw cycles. The results show that the failure process of ancient building blue bricks under uniaxial compression can be divided into four stages—initial damage closure stage, linear elastic damage stage, elastic-plastic damage stage and plastic damage stage. With the increase of freeze-thaw cycles, the strain concentration on the surface of blue brick increases, resulting in a decrease in bearing capacity. Freeze-thaw cycles will shorten the linear elastic stage in the two-factor curve. At the same time, the damage evolution model established by the two-factor can effectively reflect the damage evolution process of the ancient

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2023-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272190; 11862022); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220017, JY20230098); 内蒙古自治区草原英才项目

第一作者(通讯作者): 郝负洪(1977—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 内蒙古工业大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: 13947133205@163.com

building blue brick material under the action of freeze-thaw cycles.

Key words: ancient building blue brick; freeze-thaw cycle; digital image correlation(DIC); strain cloud diagram; damage evolution

内蒙古地区分布约1 500处古建筑,且大多为砌体结构,建筑材料多采用青砖材料.然而因内蒙古地处严寒地区,导致该地区的古建筑青砖墙体长期经受季节性冻融循环作用的影响,使青砖墙体表面出现粉化、剥落以及开裂等现象,严重影响其安全性和耐久性^[1-2].

目前,国内外学者主要通过室内模拟试验就冻融循环对古建筑青砖材料结构特征和变形性能的影响进行研究,从宏观和微观^[3-4]角度探究冻融循环对青砖材料的损伤劣化规律,并用青砖的质量损失率和抗压强度^[5-6]来评价其损伤程度.数字图像(DIC)技术具有非接触、全场测量及高精度等优点,目前在混凝土^[7-8]、岩石^[9-10]等领域中有一定的应用,但在古建筑青砖领域研究较少,特别是针对古建筑青砖砌体及其多种环境下性能的研究尚未见报道.

鉴于此,本文以内蒙古隆盛庄古建筑青砖砌体为研究对象,基于DIC技术,研究了古建筑青砖在冻融循环作用下的损伤破坏规律,提出用双因子——损伤程度因子和损伤局部化因子来表征不同冻融循环作用下古建筑青砖砌体的单轴压缩损伤过程,并

根据双因子损伤演化曲线建立了不同冻融循环次数下的损伤演化模型,以期为内蒙古中部地区古建筑砌体的防护和修缮提供一定的理论依据.

1 试验

1.1 原材料

隆盛庄位于内蒙古自治区乌兰察布市丰镇市东北部,庄内文物古迹众多,被列为第六批中国历史文化名镇.但由于内蒙中部地区的特殊环境,使得该地区古建筑青砖墙体出现不同程度的环境侵蚀问题,其中冻融是造成隆盛庄古建筑墙体产生病害的主要原因^[3].隆盛庄的古建筑青砖材料难以获取,在不损坏原有古建筑的前提下,选择与该地古建筑青砖材料相近的试验材料.古青砖是从隆盛庄古代住宅建筑中收集的烧制青砖,试验用砖采用内蒙古呼和浩特鸿宇古建出售的仿古青砖.古青砖和仿古青砖的矿物组成(质量分数)见表1,其性能见表2.由表1、2可见,二者的化学组成及性能具有相似性,故可采用该仿古青砖(后文简称青砖)代替古青砖进行研究.

表1 古青砖和仿古青砖的矿物组成

Table 1 Mineral compositions(by mass) of ancient blue brick and antique blue brick

Brick	Si	Ca	Al	Fe	K	Mg	Na	Ti	Miscellaneous
Ancient blue brick	45.58	19.36	13.13	9.84	3.96	3.01	2.37	1.26	1.49
Antique blue brick	47.51	16.95	14.00	9.69	4.15	3.56	2.07	1.10	0.97

表2 古青砖和仿古青砖的性能

Table 2 Performance of ancient blue brick and antique blue brick

Performance	Ancient blue brick		Antique blue brick		Quantity
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation	
Density/(g·cm ⁻³)	1.90	0.24	2.10	0.35	30
Water absorption(by mass)/%	1.68	0.09	1.72	0.12	30
Apparent hardness/MPa	121.12	0.17	130.76	0.34	30
Compressive strength/MPa	8.81	2.35	10.26	2.17	30

1.2 试验方法

冻融循环试验依据 WW/T 0049—2014《文物建筑维修基本材料 青砖》,设置冻融循环次数 n 为 0~70 次,每 10 次循环后的青砖试件进行单轴压缩试验和扫描电镜(SEM)测试.单轴压缩试验采用 2 000 kN 微机控制万能试验机,且在加载过程中通过 DIC 技术对试件的变形情况进行记录,从而得到试件表面的位移场及应变场.

2 结果与分析

2.1 冻融损伤微观形貌特征

不同冻融循环次数下青砖的微观形貌图见图 1.由图 1 可见:冻融循环前青砖内部颗粒排列较为紧密,细孔较小且无明显裂纹;随着冻融循环次数的增加,青砖内部的胶凝材料不断分解、流失,内部颗粒之间的致密性降低,且在反复冷冻和融化作用下,材

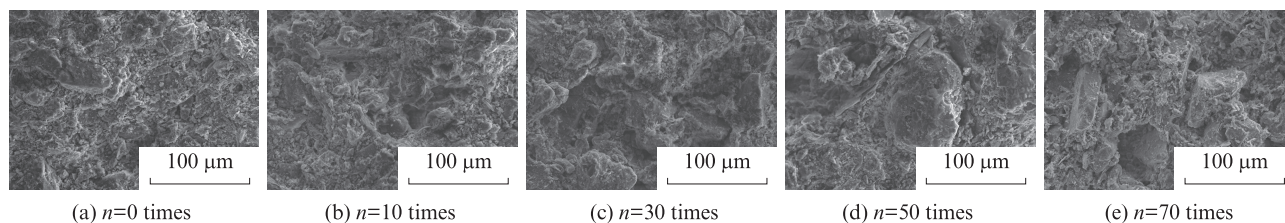


图1 不同冻融循环次数下青砖的微观形貌图

Fig. 1 Microscopic morphologies of blue bricks under different freeze-thaw cycles

料内部孔隙结构逐渐变得疏松,孔隙直径和数量有所增加.冻融循环作用使青砖的微观形貌发生了明显的变化,最直观表现在胶凝材料的流失导致内部孔隙不断增大,降低了青砖内部结构的密实程度.

2.2 单轴压缩破坏分析

青砖单轴压缩荷载-位移($P-d$)曲线及其破坏过程见图2.由图2可见:青砖的荷载-位移曲线在上升阶段呈凹型;加载初期试件内部一些软弱介质和细小空洞被挤密,导致试件内部的微裂缝没有得到延伸和发展,因此荷载-位移曲线接近平行;达到A点以后,荷载随着位移的增加呈线性增长,此时试件在荷载作用下被压实,从而引起荷载快速增长;达到D点以后,荷载-位移曲线出现明显的非线性特征,曲线斜率降低,此时试件开始由弹性变形转变为塑性变形;当荷载增大到E点时,试件承载力达到峰值 P_{max} ,随后产生破坏;青砖在单轴压缩时的破坏形式为纵向劈裂破坏,表现为试件表面出现1条纵向主裂缝,且随着荷载的增加,裂缝宽度变宽,并形成破裂带,从而使试件逐渐压溃至彻底破坏.

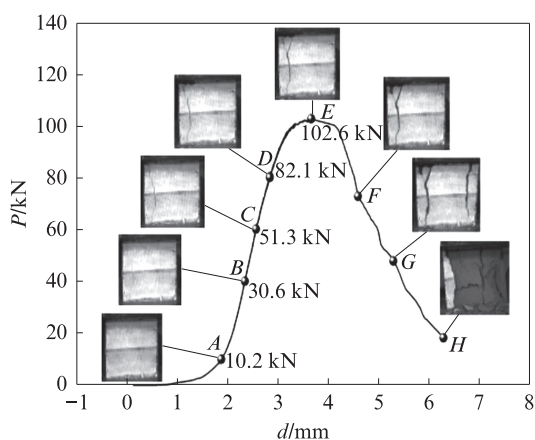


图2 青砖单轴压缩荷载-位移曲线及其破坏过程

Fig. 2 Uniaxial compression load-displacement curve and failure process of blue brick

2.3 应力-应变曲线分析

青砖单轴压缩应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线见图3.由图3可见:按照青砖应力-应变曲线的变化趋势可将其破坏过程分为4个阶段——初始损伤闭合阶段(I)、

线弹性损伤阶段(II)、弹塑性损伤阶段(III)以及塑性损伤阶段(IV);在初始损伤闭合阶段,试件内部微小孔隙以及微小裂缝在应力作用下逐渐被压实,曲线变化趋势较平缓;随着应力的增加,试件内部开始出现损伤,此时试件处于线弹性损伤阶段;继续增大应力,试件内部的孔隙以及微裂缝相互贯通,此时试件处于弹塑性损伤阶段;随着应力的进一步增加,试件中部出现明显的主裂缝,且主裂缝开始上下贯穿,此时试件处于塑性损伤阶段.

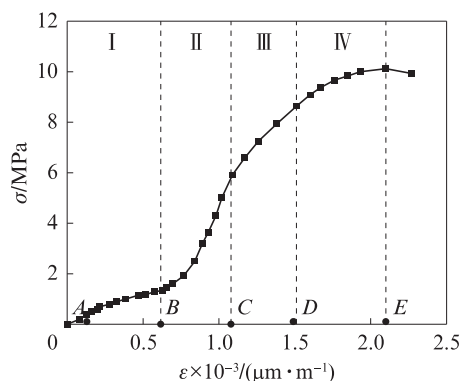


图3 青砖单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Uniaxial compression stress-strain curve of blue brick

2.4 冻融循环前后青砖横向应变云图分析

2.4.1 冻融循环前青砖横向应变云图分析

冻融循环前青砖在不同加载水平下单轴压缩横向应变 ϵ_x 场分布云图见图4.由图4可见:在加载初期(见图4(a)),此时荷载为10.2 kN,试件应变较小,应变场呈弥散分布,这是因为当荷载较低时,加载过程中存储的能量不足以使试件形成缺陷和微裂纹;当荷载增加至30.6 kN(见图4(b))时,试件会发生轻微的塑性变形,在应变图上方中呈“火焰”状,并在拉应力最大处出现红色“焰心”,说明试件顶部有轻微变形;当荷载增加至51.3 kN(见图4(c))时,横向应变云图两端的红色区域扩大,这是由于在垂直荷载作用下青砖表面宏观裂缝宽度逐渐增大;当荷载增加至82.1 kN(见图4(d))时,云图中红色“焰心”区域延伸至试件中部;当荷载达到最大值102.6 kN(见图4(e))时,试件表面裂缝在应

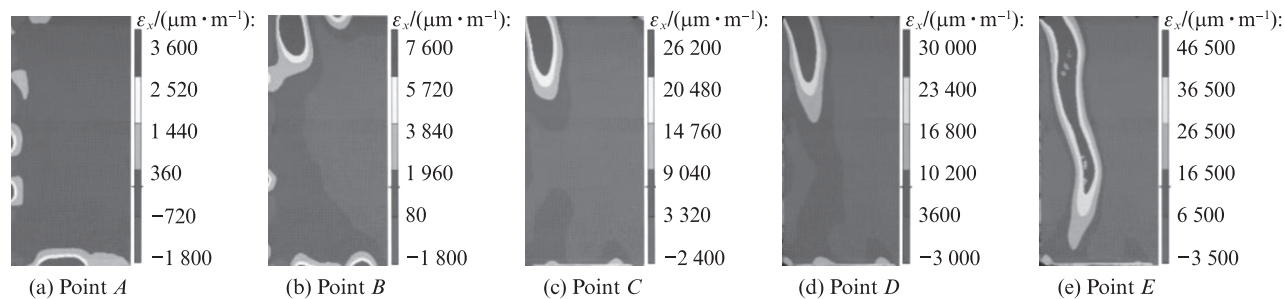


图4 冻融循环前青砖在不同加载水平下单轴压缩横向应变场分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of ϵ_x field distribution of blue brick under different loading levels before freeze-thaw cycle

力的作用下向试件底部扩展,最终导致试件被压坏.由此可见,随着荷载的增加,应变集中区域与裂缝发展趋势一致,故可用横向应变来反映青砖的损伤破坏过程.

2.4.2 冻融循环后青砖横向应变云图分析

冻融循环后青砖的单轴压缩横向应变云图见表3.由表3可见:当 $n < 40$ 次时,试件横向应变变化趋势与冻融循环前类似;当 $n > 50$ 次时,试件的横向应变

表3 冻融循环后青砖的单轴压缩横向应变云图
Table 3 Cloud diagram of ϵ_{xx} of blue brick after freeze-thaw cycles

n / times	Initial loading stage	$0.3P_{max}$	$0.5P_{max}$	$0.8P_{max}$	P_{max}
10					
20					
30					
40					
50					
60					

云图有所不同,表现为试件在横向应变集中带贯穿前就发生了破坏,同时试件边缘出现了应变集中区域.这是由于经过50、60次冻融循环后,试件内部变得更疏松,结构整体性遭到破坏,受力时其边缘的微裂缝快速汇集扩展,进而产生脱落现象,同时内部结构不能协同工作,导致应力不能及时传递,因此横向应变集中带未贯穿前试件就产生了破坏.由此可见,随着冻融循环次数的增加,青砖表面应变集中程度增大,承载能力降低.

2.5 试件失效过程的双因子表征

2.5.1 应变场数据点选取

由于DIC获取的应变数据量较大,故在计算区域内均匀选取10 000个测点,其前2.5%、5.0%、7.5%、10.0%、100.0%测点数 N 分别为250、500、750、1 000、10 000,对不同测点进行统计分析,结果见图5.由图5可见, N 为250、500、750、1 000的平均应变变化趋势相同.为方便计算并保证数据量,本文取 $N=250$,用其横向应变数据来表征青砖的单轴压缩变形过程^[11].

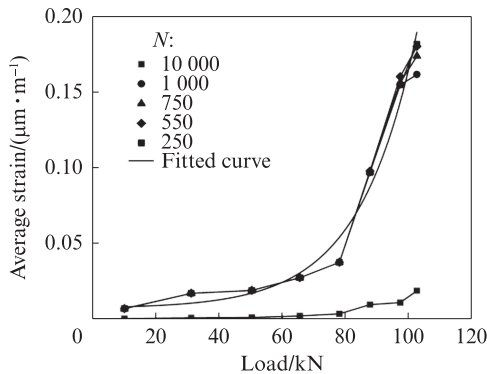


图5 不同测点平均应变随载荷的变化

Fig.5 Variation of average strain at different measuring points with load

2.5.2 损伤程度因子和损伤局部化因子

为定量描述损伤演化程度,定义损伤程度因子 D_f ^[12]为:

$$D_f = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_{\max}} \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} (\epsilon_x)_i - \frac{1}{10\,000} \sum_{i=1}^{10\,000} (\epsilon_x)_i \quad (2)$$

式中: $\bar{\epsilon}$ 为试件250与10 000测点横向应变平均值之差; ϵ_{\max} 为临界破坏时 $\bar{\epsilon}$ 的值; $(\epsilon_x)_i$ 为第*i*个测点的横向应变.

$N=250$,单轴压缩过程中不同加载点横向应变的空间分布图见图6(图中 x 表示水平位置; y 表示纵向位置).由图6可见:测点在荷载作用下逐渐沿直线

分布,对测点的空间坐标 (x_i, y_i) 进行线性拟合 $y_i = \beta_0 - \beta_1 x_i$ (β_0, β_1 为拟合参数),利用残差来表征这些测点的聚集程度即局部化程度.定义损伤局部化因子 L_f ^[13]为:

$$L_f = \frac{l_f}{l_{f,\max}} \quad (3)$$

$$l_f = \sum_{i=1}^{250} (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 \quad (4)$$

式中: l_f 为 $y_i = \beta_0 - \beta_1 x_i$ 的残差; $l_{f,\max}$ 为残差的最大值;

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}; \hat{\beta}_1 = \frac{\left| \sum_{i=1}^{250} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right|}{\sum_{i=1}^{250} (x_i - \bar{x})^2}; \bar{x}, \bar{y} \text{ 分别}$$

为 $N=250$ 横向应变横坐标 x_i 和纵坐标 y_i 的平均值,

$$\bar{x} = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} x_i, \bar{y} = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} y_i.$$

2.5.3 损伤演化及变形局部化分析

单轴压缩作用下青砖的损伤程度因子及损伤局部化因子见图7.结合图3、4和图7可见:(1)在初始损伤闭合阶段(I),试件的双因子曲线变化较小,这是由于在加载初期试件内部的微裂缝和微孔隙在压力作用下逐渐被压实.此时A点的横向应变云图分布较稀疏,部区域出现应变集中现象.(2)随着荷载的增加,试件进入线弹性损伤阶段(II),此时试件内部的微裂缝、孔隙已被完全填充,试件的损伤由内部向表面扩展,损伤程度因子 D_f 呈非线性增长,同时损伤局部化因子 L_f 下降趋势较明显,此时B、C两点的横向应变云图中应变较大的点开始汇聚并呈带状分布.(3)在弹塑性损伤阶段(III),试件中宏观裂缝已经形成,并随着荷载的增加不断扩展延伸,此时C、D点的横向应变云图中也能看出试件表面已形成明显的裂缝,损伤程度因子 D_f 随着荷载的增大而增大,损伤局部化因子 L_f 下降.(4)当荷载达到D点之后,试件开始由弹塑性损伤阶段(III)转变为塑性损伤阶段(IV),此时损伤程度因子 D_f 和损伤局部化因子 L_f 变化趋势更明显,结合D点的横向应变云图可知,加载至D点时裂缝已扩展至试件中部,且在荷载的作用下进一步扩展,当荷载达到E点时,主裂缝已经贯通,此时损伤程度因子达到了1,损伤局部化因子也趋于0.

2.5.4 冻融循环对损伤程度因子的影响

冻融循环下青砖的损伤程度因子见图8.由图8(a)可见,冻融循环次数对损伤程度因子曲线的影响较大.在荷载加载初期,未冻融试件的损伤程度因子曲线较平缓,表明未冻融试件具有较长的线弹性变

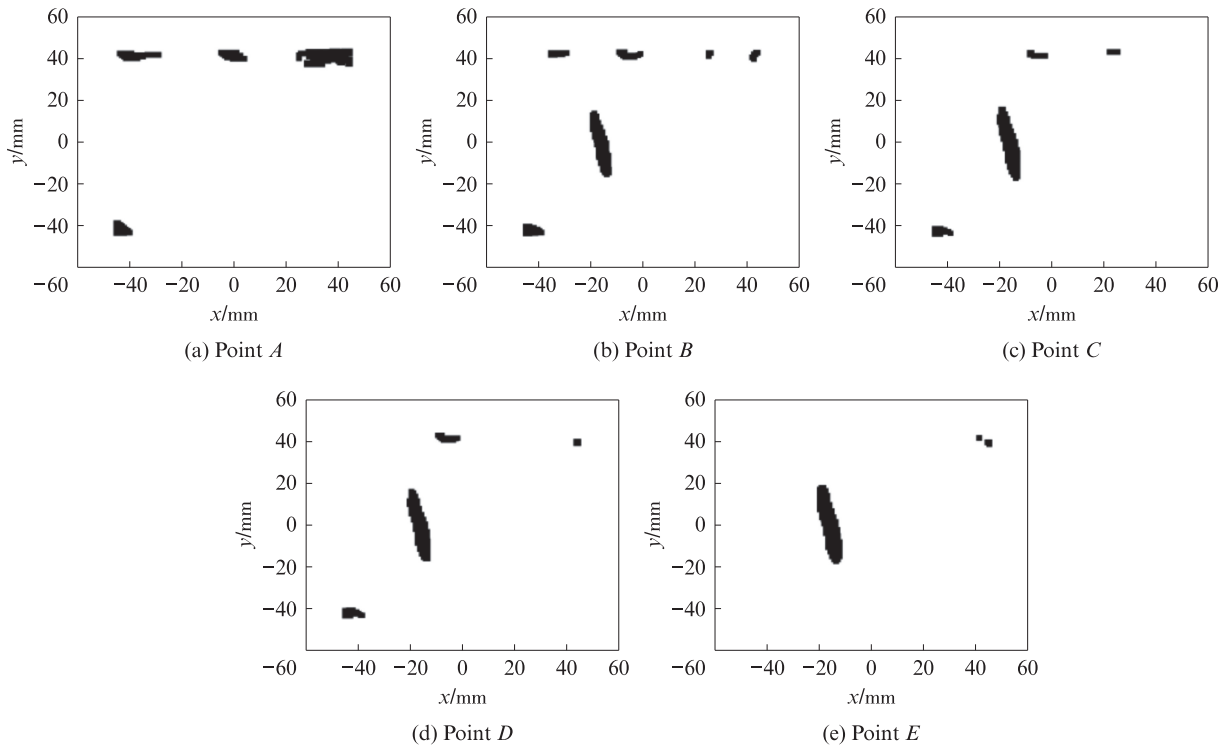


图6 单轴压缩过程中不同加载点横向应变的空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of of transverse strain at different loading points during uniaxial compression process ($N=250$)

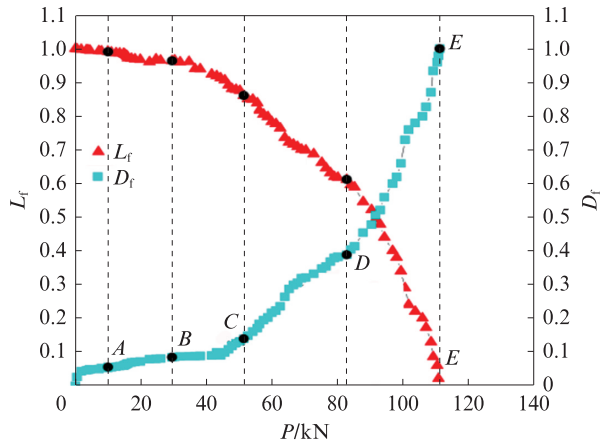


图7 单轴压缩作用下青砖的损伤程度因子及损伤局部化因子
Fig. 7 Damage degree factors and localization factors of blue brick under uniaxial compression

形阶段,且加载后期也存在比较缓慢的上升段;当冻融循环次数为10~40次时,冻融循环导致试件内部空洞增加,在外力作用下产生更大的变形,线弹性阶段明显缩短,因此损伤程度因子曲线变得更加陡峭;当冻融循环次数达到60次时,由于试件内部的孔隙明显增多,试件内部出现较大的裂缝,进而造成试件在加载初期损伤程度因子迅速增大.由图8(b)荷载归一化结果可见,随着冻融循环次数的增大,损伤程度因子曲线变得更加陡峭,说明冻融循环会加快裂纹的扩展,进而在外力作用下更易产生破坏.

2.5.5 冻融循环对损伤局部化因子的影响

冻融循环下青砖的损伤局部化因子见图9.由图9(a)可见,不同冻融循环次数下损伤局部化曲线有着明显的变化.未冻融试件的损伤局部化因子曲线下降较平缓,存在一段平缓的线性阶段,随着荷载的增加,损伤局部化因子逐渐趋于0;随着冻融循环次数的增加,损伤局部化因子曲线下降的趋势逐渐加快,加载初期平缓阶段逐渐缩短;当冻融循环次数达到50、60次时,损伤局部化因子曲线随着荷载的增加趋于直线下降,表明随着冻融循环次数的增加,试件内部结构趋于疏松脆软,进而导致试件弹性变形能力降低,因此在荷载作用下宏观裂缝会迅速扩展延伸,进而导致曲线直线下降.由图9(b)荷载归一化结果可见,随着冻融循环次数的增加,损伤局部化因子曲线下降的趋势不断加快,当冻融循环50、60次时,主裂缝未贯穿前试件就发生了破坏,因此损伤局部化因子呈直线下降.

2.6 损伤演化模型的建立

2.6.1 基于损伤程度因子的损伤演化模型

对图8(b)中的曲线进行拟合,可得损伤程度因子的拟合式为:

$$D_f = z_1 + A_1 e^{\left(\frac{-P/P_{max}}{t_1}\right)} \quad (5)$$

式中: z_1 、 A_1 、 t_1 均为拟合参数.

损伤程度因子拟合式中的参数见表4.

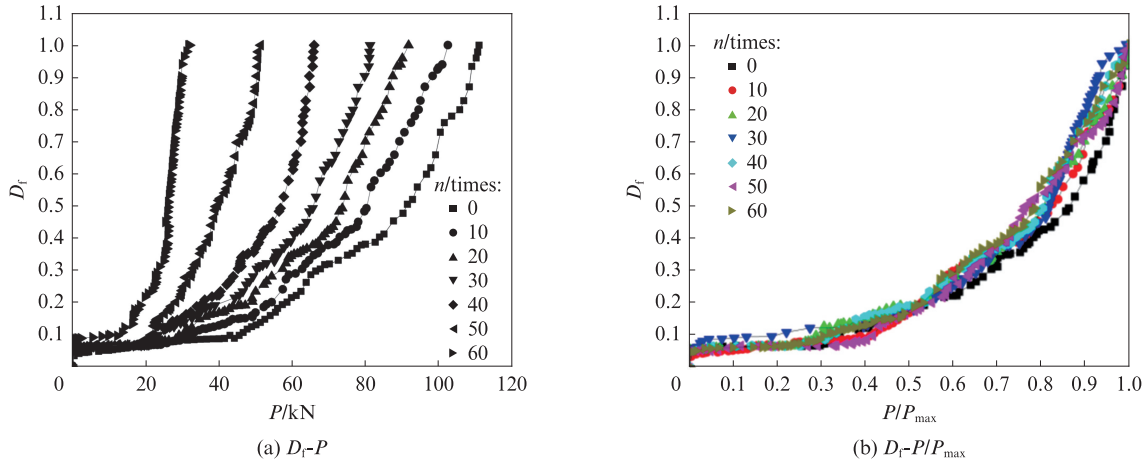


图8 冻融循环下青砖的损伤程度因子

Fig. 8 Damage degree factor of blue brick under freeze-thaw cycles

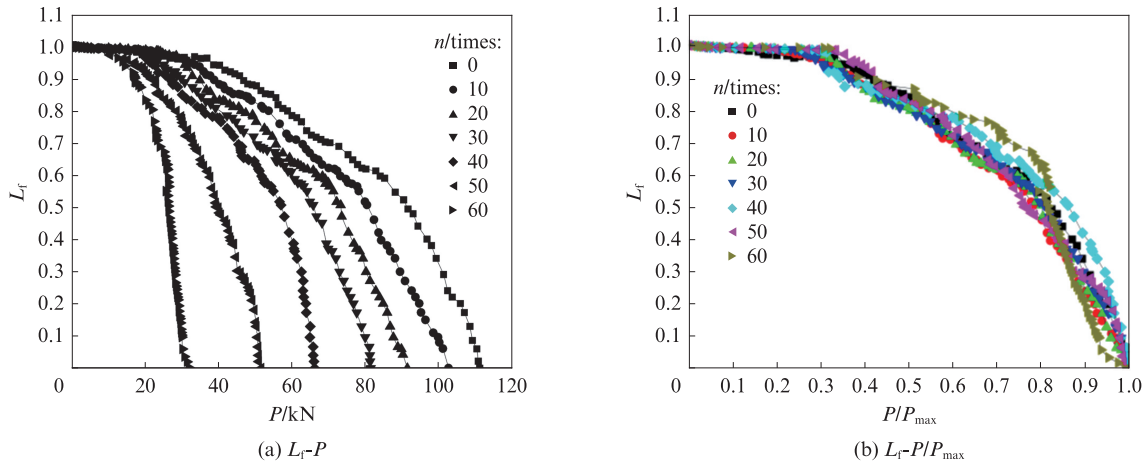


图9 冻融循环下青砖的损伤局部化因子

Fig. 9 Damage localization factor of blue brick under freeze-thaw cycles

表4 损伤程度因子拟合式中的参数

Table 4 Parameters of fitted equation of damage degree factor

Parameter	n/times						
	0	10	20	30	40	50	60
z_1	0.046	0.057	0.053	0.051	0.007	-0.029	-0.028
A_1	0.014	0.031	0.034	0.034	0.034	0.046	0.047
t_1	-0.241	-0.291	-0.298	-0.297	-0.295	-0.313	-0.323
P_{max}/kN	111 200	102 677	91 900	81 400	66 100	51 502	32 039

由表4可得各参数的拟合式分别为:

$$P_{max} = 117.2745 - 1.3762n \quad (6)$$

$$A_1 = 0.0603 \sin(0.04176n - 0.15) + 0.02359 \sin(0.0811n + 1.689) \quad (7)$$

$$z_1 = 0.05878 \sin(0.07315n + 0.6379) + 0.04689 \sin(0.001284n + 0.002703) \quad (8)$$

$$t_1 = 0.6465 \sin(0.03656n + 3.232) + 0.35 \sin(0.05337n - 0.5495) \quad (9)$$

将式(6)代入式(5),得到损伤程度因子的损伤

演变方程为:

$$D_f = z_1 + A_1 e^{\frac{-P}{(117.2745 - 1.3762n)t_1}} \quad (10)$$

2.6.2 基于损伤局部化因子的损伤演化模型

对图9(b)中的曲线进行拟合,得到冻融循环作用下损伤局部化因子拟合式为:

$$L_f = z_2 + A_2 e^{\left(\frac{-P/P_{max}}{t_2}\right)} \quad (11)$$

式中: z_2 、 A_2 、 t_2 均为拟合参数.

损伤局部化因子拟合式中的参数见表5.

由此可得各参数的拟合式分别为:

表 5 损伤局部化因子拟合式中的参数
Table 5 Parameters of fitted equation of damage localization factor

Parameter	n/times						
	0	10	20	30	40	50	60
z_2	-0.329	-0.373	-0.354	-0.352	-0.339	-0.267	-0.223
A_2	-0.048	-0.075	-0.064	-0.060	-0.026	-0.016	-0.013
t_2	1.057	1.102	1.084	1.077	1.014	1.013	1.014

$$A_2 = -0.03929 + 0.03097 \sin[\pi n - 37.91]/44.58 \quad (12)$$

$$z_2 = 1.05032 + 0.04695 \sin[\pi(n + 2.8758)/36.59] \quad (13)$$

$$t_2 = -0.4757 + 0.00382n + 0.1463 \times 0.9266^n \quad (14)$$

将式(6)代入式(11),得到冻融循环作用下损伤局部化因子的损伤演变方程为:

$$L_f = z_2 + A_2 e^{\frac{-P}{(117.2745 - 1.3762n)t_2}} \quad (15)$$

当 $n=70$ 次,冻融循环下试件双因子试验曲线与模拟曲线比较见图 10. 由图 10 可见,模拟曲线与 $n=70$ 次冻融循环试验曲线吻合较好. 综上,基于双因子——损伤程度因子和损伤局部化因子建立的损伤演化模型能较好地反映冻融循环作用下古建筑青砖裂缝萌发、扩展以及贯通的损伤演化过程.

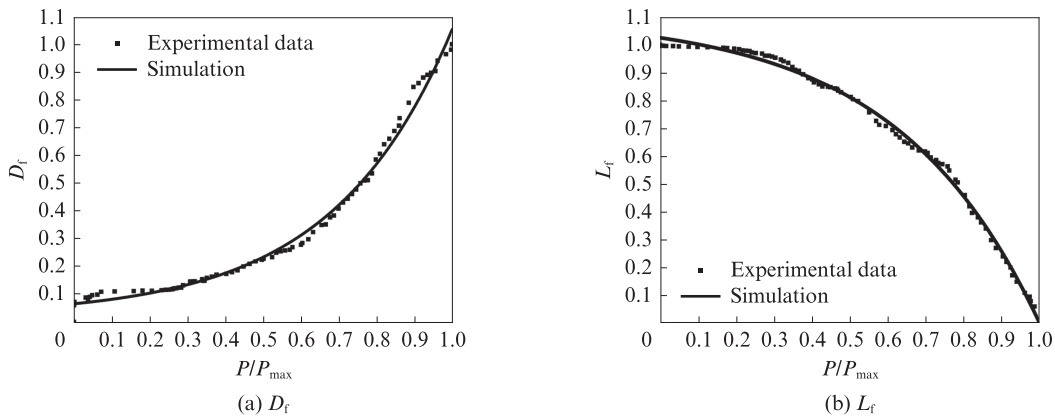


图 10 冻融循环下试件双因子试验曲线与模拟曲线比较
Fig. 10 Comparison between experimental and simulated curves of specimens with two-factor under freeze-thaw cycles($n=70$ times)

3 结论

(1) 基于青砖单轴压缩过程中应力-应变曲线的变化特点将其损伤过程分为初始损伤阶段、线弹性损伤阶段、弹塑性损伤阶段以及塑性损伤阶段 4 个阶段.

(2) 未冻融青砖横向应变云图出现了应变集中区域,且在横向应变集中区域贯穿后发生压碎破坏. 冻融循环 40 次之前,青砖的横向应变变化趋势与未冻融青砖相同. 冻融循环 50 次后,青砖在横向应变集中带贯穿前就发生了破坏,表明随着冻融循环次数的增加,青砖表面应变集中程度增大,承载能力降低.

(3) 冻融循环对双因子曲线的影响较大,主要表现为双因子曲线的线弹性阶段明显缩短,即冻融循环导致青砖内部结构变得疏松软脆,使得青砖的弹

性变形能力降低,进而加速了其在单轴压缩过程中的破坏.

(4) 通过双因子——损伤程度因子和损伤局部化因子建立了冻融循环作用下青砖的损伤演化模型,并通过试验和模拟曲线的对比,确定该模型能有效反映古建筑青砖的损伤演化规律.

参考文献:

[1] 韩淑芳. 冻融损伤混凝土再生砖砌体的抗震性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(1):117-119, 124.
HAN Shufang. Experimental study on seismic behavior of recycled concrete brick masonry with freeze-thaw damage[J]. Concrete, 2017(1):117-119, 124. (in Chinese)
[2] 曹峰, 吴玉清, 王菊琳. 北京明长城青砖毛细吸水性测定及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(22):286-292.
CAO Feng, WU Yuqing, WANG Julin. Capillary water

- absorption of grey bricks of Ming Dynasty Great Wall in Beijing and its influencing factors [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(22):286-292. (in Chinese)
- [3] 郝负洪, 何丹丹, 吴日根, 等. 内蒙古中部隆盛庄古建筑青砖墙体冻害损伤研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(7):2438-2446, 2473.
HAO Yunhong, HE Dandan, WU Rigen, et al. Research on frost damage of ancient building blue brick wall of Longshengzhuang in Inner Mongolia[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(7):2438-2446, 2473. (in Chinese)
- [4] 张道明, 王丽, 郭国梁, 等. 冻融作用对古青砖宏观性能及微观结构劣化的影响[J]. *文物保护与考古科学*, 2021, 33(4):9-15.
ZHANG Daoming, WANG Li, GUO Guoliang, et al. Effect of the freeze-thaw on macroscopic properties and microstructural degradation of ancient grey bricks[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2021, 33(4):9-15. (in Chinese)
- [5] 郭国梁, 张道明, 吕春, 等. 冻融循环对卜奎清真寺古青砖力学性能影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(20):8638-8643.
GUO Guoliang, ZHANG Daoming, LÜ Chun, et al. Experimental study on effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of ancient grey bricks in Pukui Muslim Temple[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(20):8638-8643. (in Chinese)
- [6] 别治明. 冻融循环下青砖砌体结构性损伤的演化规律[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(4):668-672.
BIE Zhiming. The evolution law of structural damage of blue brick masonry under a freeze-thaw cycle [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 51(4):668-672. (in Chinese)
- [7] 孙亚楠, 金祖权, 逢博, 等. 基于DIC的混凝土嵌入式BFRP筋拔出行为及黏结性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(1):45-52, 70.
SUN Yanan, JIN Zuquan, FENG Bo, et al. Pulling-out process and interfacial bonding performance of BFRP bar in concrete based on DIC[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1):45-52, 70. (in Chinese)
- [8] 陈徐东, 石振祥, 郭玉柱, 等. 基于DIC的花岗岩-混凝土梁抗弯性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(10):1040-1046.
CHEN Xudong, SHI Zhenxiang, GUO Yuzhu, et al. Flexural performance of granite-concrete beams based on DIC technology [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(10):1040-1046. (in Chinese)
- [9] 马少鹏, 周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8):1667-1673.
MA Shaopeng, ZHOU Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8):1667-1673. (in Chinese)
- [10] ZHANG H, HUANG G Y, SONG H P, et al. Experimental characterization of strain localization in rock [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 194(3):1554-1558.
- [11] 时金娜, 赵燕茹, 郝松, 等. 基于DIC技术的高温后混凝土变形性能[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(4):584-591.
SHI Jinna, ZHAO Yanru, HAO Song, et al. Deformation behavior of concrete under uniaxial compression after high temperature by DIC technology[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(4):584-591. (in Chinese)
- [12] 张皓. 准脆性材料损伤演化的实验力学研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
ZHANG Hao. Experimental study on damage evolution of quasi-brittle materials[D]. Tianjin:Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [13] 宋海鹏. 数字图像相关方法及其在材料损伤破坏实验中的应用[D]. 天津:天津大学, 2013.
SONG Haipeng. Digital image correlation method and experimental investigation on damage and failure of material[D]. Tianjin:Tianjin University, 2013. (in Chinese)