

## 轴心受压古砖砌体裂缝发生发展规律

汤永净<sup>†</sup>, 逯兴邦

(同济大学 土木工程学院 教育部岩土与地下工程重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**裂缝是砌体结构损伤的直观表现. 为研究古砖砌体结构受压状态下裂缝发生发展规律, 对一批冻融循环后的古砖砌体试件进行抗压试验, 获取了古砖砌体的荷载-变形和裂缝数据. 提出砌体开裂荷载的确定方法, 通过荷载-变形曲线、单条裂缝长度和裂缝发展趋势综合评判开裂荷载. 建立了三折线模型, 该模型能反映裂缝长度与荷载之间的关系. 相比现代砌体试件, 古砖砌体开裂早, 裂缝发展快, 平均开裂荷载为  $0.52 f_m$  (抗压强度); 当应力达到约  $0.7 f_m$  时, 裂缝上下贯通; 当应力达到  $0.93 f_m$  时, 砌体进入破坏阶段. 提出用裂缝密度描述砌体损伤状态, 得到了典型的古砖砌体裂缝密度发展规律, 破坏时最终裂缝密度为  $8.7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . 国内外相关文献的试验数据表明, 裂缝密度是一种稳定性较好的指标, 具有深入研究和推广应用的价值.

**关键词:**古砖砌体; 抗压试验; 冻融损伤; 开裂荷载; 裂缝长度; 裂缝密度

**中图分类号:** TU362

**文献标志码:** A

## Crack Evolvement of Ancient Brick Masonry under Uniaxial Compression

TANG Yongjing<sup>†</sup>, LU Xingbang

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education,  
College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Crack occurrence is a visual representation for brick masonry damage. In this paper, crack evolvement law of ancient brick masonry under uniaxial compressive loading after freeze-thaw cycles was investigated. The loading-deformation curve and crack data of ancient brick masonry were recorded. For each masonry sample, its initial cracking load was determined synthetically by three reference values based on loading-deformation curve, length of single crack, and crack development. After the crack length at every loading level was obtained, the normalization processing was performed. The trilinear model was used to simulate the relationship between the crack length and loading level. Crack of the ancient brick masonry occurred earlier and faster than that of modern brick masonry: the value range of initial cracking load was from  $0.4 f_m$  (compressive strength) to  $0.6 f_m$ , which averaged about  $0.52 f_m$ ; when the stress reached  $0.7 f_m$ , critical crack was initiated; when the stress reached  $0.93 f_m$ , masonry entered into the ultimate state. The masonry damage was described by crack density, which was defined as the crack length per unit

\* 收稿日期: 2018-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278359), National Natural Science Foundation of China(51278359)

作者简介: 汤永净(1965—), 女, 安徽合肥人, 同济大学副教授, 博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: ytang@tongji.edu.cn

area. The development rule of crack density was proposed with a final value of  $8.7 \text{ m/m}^2$ . Compared with the results of similar tests in references, it was found that crack density was a relatively stable indicator, which has good potential for further study and application.

**Key words:** ancient brick masonry; compressive testing; freeze-thaw injury; initial cracking load; crack length; crack density

由于年代久远和自然环境的变迁,我国现存的大量古砖砌体结构受到了严重损伤. 结构开裂是损伤的一种常见表现形式,科学地评估裂缝与结构受力状态的关系,研究结构裂缝发展规律,能为结构保护和修复提供参考<sup>[1-2]</sup>. 冻融循环是导致结构损伤的环境影响因素之一,冻融循环会引起孔隙水的冻胀效应,使砌体产生微裂缝,裂缝不断发展导致整体承载力下降,继而影响结构安全性和使用性<sup>[3]</sup>.

砌体结构抗压强度理论体系已很成熟,大量学者对本构关系、破坏过程和影响因素等进行了详细的探究<sup>[4-6]</sup>. 砌体的抗冻性与孔隙率、砂浆种类、强度等有关<sup>[7-8]</sup>,而冻融循环又会影响砌体的弹性模量和强度<sup>[8-9]</sup>. 郑山锁和商效瑀<sup>[10-11]</sup>建立了冻融循环下轴心受压砖砌体损伤本构关系模型,发现随着冻融循环次数的增加砌体开裂时间提前、表面裂纹增加. 这些选用现代砌体进行的研究,对古砖砌体研究具有一定的借鉴意义. Binda 等<sup>[12-12]</sup>通过大量试验和工程案例,研究了古砖砌体长期受力下的性能退化规律,提出古砖砌体结构的保护和修复方法. 汤永净等<sup>[13-14]</sup>研究了古砖受到冻融循环作用后,动弹性模量、孔结构和饱和系数的变化规律. Carpinteri 等<sup>[15]</sup>在古砖砌体结构原位扁顶试验的同时利用声发射检测技术,结合有限元数值模拟得出砌体内部微裂缝密度随试件尺寸的增大而减小. 以上学者对裂缝的研究以定性描述为主,而基于模糊数学<sup>[16]</sup>和分形几何<sup>[17]</sup>的裂缝计算分析方法目前难以运用在砌体结构上,如能进行可操作且简易的定量分析,则有利于直观判断砌体结构所处的状态.

本文以古砖和新配置的石灰砂浆砌筑的砌体试件(以下简称古砖砌体试件)为研究对象,采用大气环境试验舱对试件进行不同工况的淋雨和冻融,实现环境变迁的人工模拟,通过砌体抗压强度试验,研究古砖砌体的开裂荷载、裂缝长度和裂缝密度发展规律.

## 1 试验样品及方法

### 1.1 样品来源及制备

古砖样品来自山西长治市平顺县一拆迁古民居. 该古民居非文物建筑,建造年代为道光三年. 古砖外观尺寸为  $280 \text{ mm} \times 135 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ .

本试验灰浆制备选用天然水硬性石灰和河砂,灰砂比为 3:7. 通过抗压试验得到古砖强度为  $10.23 \text{ MPa}$ ,砂浆强度为  $3.94 \text{ MPa}$ . 按照《砌体基本力学性能试验方法标准》<sup>[18]</sup>进行砌体抗压试验. 由于古砖数量有限,本试验共砌筑 16 个砌体试件. 试件由 33 块砖砌成,尺寸为  $425 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 870 \text{ mm}$ ,灰缝厚度为  $10 \text{ mm}$ ,高厚比约为 3,如图 1 所示.

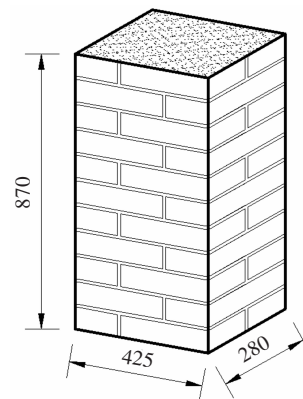


图 1 古砖砌体试件(单位:mm)

Fig.1 Ancient brick masonry specimen (unit:mm)

### 1.2 试验方法

根据该民居所处的气候环境确定了冻融试验程序<sup>[13]</sup>(如图 2 所示):首先砌体试件淋雨 24 h 模拟砌体初始的含水状态;然后进入冻融循环,一次循环以温度降低到  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  为起点,持续冻结 5 h,然后升温到  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  融化 3 h,再降温到  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  进入下一次循环;每 5 次冻融循环后,淋雨 2 h 补充水分. 根据累计冻融循环次数的不同,将砌体试件分为 8 种工况,分别为 D0、D5、D10、D15、D20、D25、D30 和 D35,每种工况 2 个试件,编号为 1 和 2.

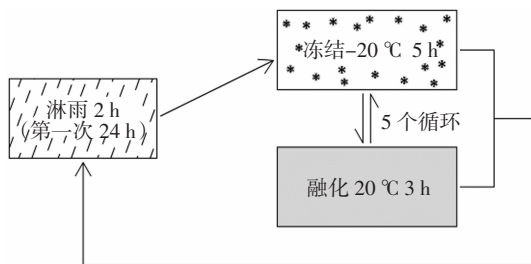
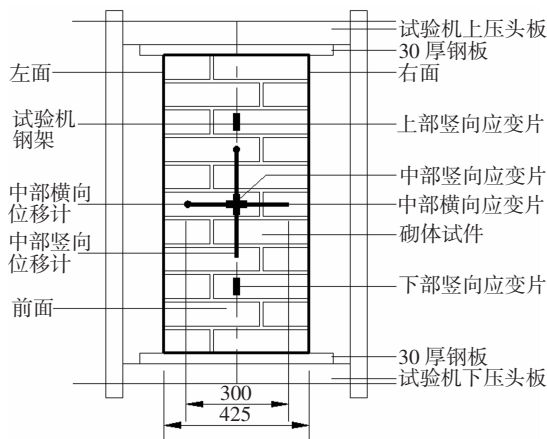
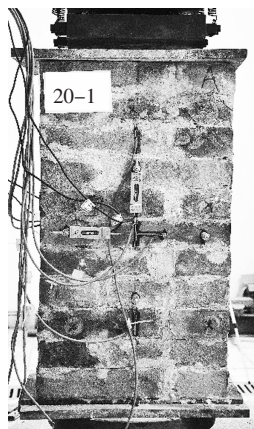


图 2 冻融循环示意图  
Fig.2 Diagram of freeze-thaw cycle

冻融循环后进行砌体抗压强度试验. 在砌体试件 2 个长边 (425 mm) 面上共安装 4 个位移计和 6 个应变片 (有 4 个应变片的面为前面, 其左右和背后分别为左面、右面和后面), 详细布置如图 3 所示. 为完整记录裂缝发展情况, 每级加载 10 kN, 加载时间 1 min, 持荷时间 2 min. 当试验机力不能继续增加, 裂缝急剧发展时, 视为试件破坏. 加载结束后, 将裂缝临摹在试件表面展开图上 (包括前后左右 4 个面) 并用相机对每一部分详细拍照. 最后用 CAD 绘制砌体裂缝图, 进行分析处理.



(a) 设计图 (单位:mm)



(b) 加载前的试件

图 3 试件加载及传感器布置

Fig.3 Layout of specimen loading and sensor

## 2 试验结果

考虑到每个工况只有 2 个试件, 在分析冻融循环对试验结果的影响时, 对工况进行适当合并, 合并后试件分为 3 组, 定义每组冻融循环次数的平均值为该组名义冻融循环次数 (MD). 第一组由 D0、D5 和 D10 组成, 名义冻融循环次数为 MD5; D15、D20 和 D25 组成第二组 MD20; D30 和 D35 组成第三组 MD32.5.

### 2.1 抗压强度

试件的抗压强度  $f_m$  按式(1)计算:

$$f_m = \frac{P_m}{A} \tag{1}$$

式中:  $A$  为试件截面面积,  $A = 425 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} = 119\,000 \text{ mm}^2$ ;  $P_m$  为极限荷载.

各试件抗压强度统计见表 1. 全部试件抗压强度  $f_m$  的平均值为 3.98 MPa, 变异系数 0.15. MD5 的抗压强度为 3.62 MPa, MD20 的抗压强度为 4.37 MPa, MD32.5 的抗压强度为 3.95 MPa.

表 1 砌体抗压试验结果

Tab.1 Results of uniaxial compression test

编号	抗压强度 $f_m$ /MPa	最终裂缝长度 $l_m$ /mm	最大裂缝宽度 $w_m$ /mm
D0.1	3.85	7 701	2.2
D0.2	2.86	11 762	3.6
D5.1	3.61	11 205	2.2
D5.2	3.87	10 590	2.6
D10.1	3.57	12 983	6.1
D10.2	3.98	11 577	3.6
D15.1	3.70	6 746	3.0
D15.2	4.96	8 772	2.8
D20.1	3.87	10 655	3.0
D20.2	5.46	10 774	2.5
D25.1	4.01	9 905	6.5
D25.2	4.20	11 872	2.6
D30.1	4.45	12 764	4.4
D30.2	3.70	9 757	3.3
D35.1	3.78	11 969	4.8
D35.2	3.87	11 902	3.8
平均值	3.98	10 683	3.6
变异系数	0.15	0.16	0.36
MD5	3.62	10 970	3.4
MD20	4.37	9 787	4.1
MD32.5	3.95	11 598	4.0

注: D0.1、D0.2 分别表示 D0 的 2 个试件; MD5 表示第一组试件的平均值. 裂缝长度和宽度的统计见 2.3 节.

### 2.2 荷载-变形曲线

通过试验数据绘制的荷载-变形曲线包括:试验机荷载-位移曲线( $P-\Delta$ 曲线)、砌体应力-应变曲线( $\sigma-\varepsilon_m$ 曲线)和砖块应力-应变曲线( $\sigma-\varepsilon_b$ 曲线).  $P-\Delta$ 曲线中 $\Delta$ 为千斤顶位移,包括砌体及其附件变形、千斤顶和钢板之间缝隙的压缩等; $\sigma-\varepsilon_m$ 曲线中位移测量的范围是砌体中部表面 300 mm 内的变形(如图 3 所示),竖向位移计跨越 4 条灰缝和 5 块砖,水平位移计跨越 1 条灰缝和 2 块砖;由不同位置处的应变片(如图 3 所示),可获取多条砖块应力-应变曲线( $\sigma-\varepsilon_b$ 曲线). 典型试件(D30.2)荷载-变形曲线如图 4 所示.

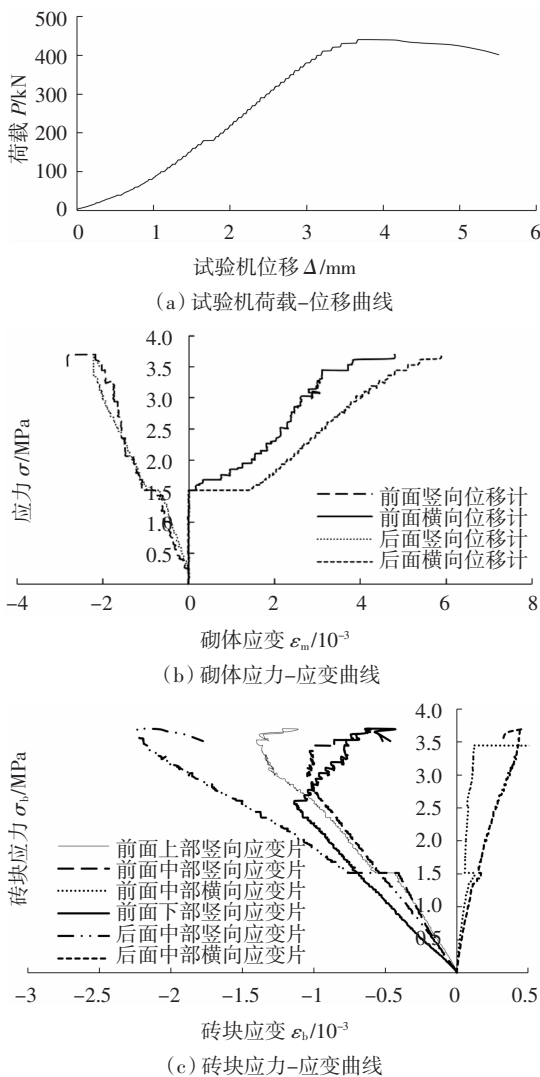


图 4 荷载-变形曲线  
Fig.4 Load-deformation curve

### 2.3 裂缝发展过程

根据试件实际开裂情况,利用 CAD 绘制裂缝图,在不同图层中绘制不同荷载下产生的裂缝;采

用 VB 编写代码录制裂缝发生发展动画,通过控制打开每个图层的时间,模拟匀速加载时裂缝的发展过程.绘图时忽略裂缝宽度,裂缝图中线宽无实际意义.图 5 所示为典型试件(D5.1 后面)在不同应力水平下的裂缝图.通过 CAD 中 LISP 语言编写代码,统计每一级荷载下的裂缝长度  $l$ ,通过高清数码照片统计裂缝宽度  $w$ .试件破坏时的最终裂缝长度  $l_m$  和最大裂缝宽度  $w_m$  见表 1.全部试件最终裂缝长度  $l_m$  的平均值为 10 683 mm,变异系数 0.16,最大裂缝宽度  $w_m$  的平均值为 3.6 mm,变异系数 0.36. MD5 的  $l_m$  为 10 970 mm,  $w_m$  为 3.4 mm; MD20 的  $l_m$  为 9 787 mm,  $w_m$  为 4.1 mm; MD32.5 的  $l_m$  为 11 598 mm,  $w_m$  为 4.0 mm.

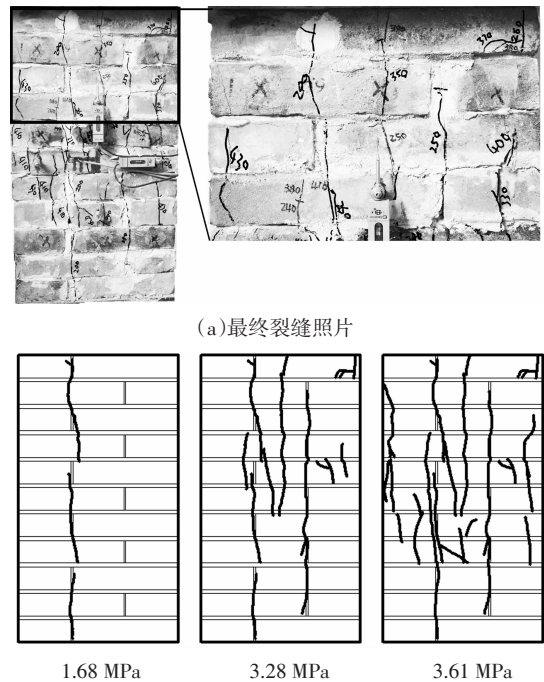


图 5 裂缝图  
Fig.5 Crack pattern

## 3 结果分析

### 3.1 开裂荷载

#### 3.1.1 判断标准

本试验采用的是经过 190 年风化的古砖,而且在砌筑后经过冻融循环,砌体试件的开裂早于现代砌体的  $0.5 f_m \sim 0.7 f_m$ <sup>[4]</sup>,当  $\sigma$  达到  $0.4 f_m \sim 0.6 f_m$  时表面出现肉眼可见裂缝.但某些试件在  $\sigma = 0.2 f_m$  时就出现可见裂缝,推测这是个别试件初始缺陷所致,其对应的荷载不能反映砌体整体的性质,不宜作为开裂荷载.



开裂荷载应采用相关指标综合评定. 为判断砌体真正的开裂荷载  $\sigma_{cr}$  ( $P_{cr}$  为开裂荷载,  $\sigma_{cr}$  为开裂应力, 在不产生混肴的情况下均称为开裂荷载), 考虑以下 3 个方面: 荷载-变形曲线突变点、单条裂缝长度和裂缝发展趋势. 在每个方面, 都可以得出一个开裂荷载的参考值, 综合 3 个参考值来确定真正的开裂荷载.

1) 在加载中期,  $P-\Delta$  曲线、 $\sigma-\varepsilon_m$  曲线和  $\sigma-\varepsilon_b$  曲线存在数值和斜率突变点, 3 个曲线突变点的荷载等级相同或相近.  $P-\Delta$  曲线会出现明显的位移台阶 (图 4(a) 中  $P=180$  kN, 即  $\sigma = 1.5$  MPa 处), 此时荷载保持恒定不变而试验机位移不断增加. 横向  $\sigma-\varepsilon_m$  曲线的突变非常明显, 加载前期横向  $\varepsilon_m$  数值很小, 砌体开裂后, 在横向位移计范围内的竖向裂缝会导致  $\varepsilon_m$  剧增 (图 4(b) 中  $\sigma = 1.5$  MPa 处), 砌体后面横向应变急剧增大, 而竖向应变略有增加. 同样砖块应力-应变曲线也在  $\sigma = 1.5$  MPa 处发生突变 (如图 4(c) 所示). 因此在曲线突变点方面, 我们将  $\sigma = 1.5$  MPa =  $0.41 f_m$  作为开裂荷载的参考值.

2) 单条裂缝长度是砌体开裂的重要参数, 我们统计单条裂缝贯穿一皮砖 (厚度 70 mm)、两皮砖、三皮砖和一整面时的荷载, 分别用  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_n$  表示. 通过这 4 种荷载能大致确定开裂荷载的范围.

3) 观察裂缝出现后发展的连续性. 由于初始缺陷引起试件过早开裂, 继续加载裂缝维持不变, 直到荷载加大到一定程度后, 裂缝才有明显扩展, 将此时的荷载视为开裂荷载的参考值.

### 3.1.2 开裂荷载

根据 3.1.1 节的判断标准, 古砖砌体试件的开裂荷载见表 2.

表 2 显示开裂荷载主要集中在  $0.4 f_m \sim 0.6 f_m$  之间, 平均值为  $0.52 f_m$  (2.05 MPa), 平均  $0.7 f_m$  时产生贯通裂缝. 而现代砌体试件试验中,  $0.5 f_m \sim 0.7 f_m$  时产生第一条裂缝,  $0.8 f_m$  之后逐渐产生贯通裂缝. 文献[19]描述了现代砌体在轴压作用下的裂缝状态, 其结果与本文试验相比 (表 3), 进一步说明古砖砌体裂缝发生发展早于现代砌体. 结合表 1 和表 2 可发现, MD20 强度最高、开裂最晚、裂缝最少, 与常规认识相悖. 尽管冻融前雨淋条件相同, 冻融后可能由于孔结构的变化<sup>[13-14]</sup>, 导致 MD5、MD20 和 M32.5 对应的饱水度不同, 这是否会影响其力学性能是值得研究的问题. 强度提高的机理需要进一步研究, 初步分析认为, 可能是材料的自愈作用或砂浆碳化作用的结果<sup>[9]</sup>.

表 2 开裂荷载判断

**Tab.2 Judgement of the initial cracking load  $f_m$**

编号	曲线突变点	单条裂缝长度				裂缝发展趋势	开裂荷载 $\sigma_{cr}$
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_n$		
D0.1	0.30	0.30	0.46	0.46	0.76	0.46	0.46
D0.2	0.65	0.53	0.62	0.65	0.88	0.53	0.53
D5.1	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
D5.2	0.38	0.38	0.47	0.47	0.85	0.47	0.47
D10.1	0.42	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
D10.2	0.58	0.53	0.53	0.53	0.58	0.58	0.53
D15.1	0.59	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
D15.2	0.46	0.46	0.46	0.46	0.53	0.46	0.46
D20.1	-	0.65	0.78	0.87	0.93	0.65	0.65
D20.2	0.74	0.31	0.31	0.80	0.91	0.75	0.75
D25.1	0.67	0.61	0.71	0.71	0.98	0.71	0.71
D25.2	0.36	0.36	0.43	0.43	0.68	0.43	0.36
D30.1	0.43	0.36	0.49	0.55	0.77	0.47	0.47
D30.2	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
D35.1	0.58	0.40	0.62	0.62	0.76	0.62	0.58
D35.2	0.41	0.41	0.48	0.48	0.54	0.48	0.41
总体	0.50	0.46	0.52	0.56	0.70	0.53	0.52
平均值	0.26	0.24	0.23	0.24	0.26	0.19	0.21
MD5	0.47	0.45	0.51	0.51	0.67	0.50	0.49
MD20	0.56	0.50	0.55	0.65	0.77	0.60	0.59
MD32.5	0.46	0.40	0.50	0.52	0.62	0.50	0.47

表 3 裂缝状态对比

**Tab.3 Comparison of crack state  $f_m$**

裂缝等级	裂缝描述	$\sigma$ (文献[19])	$\sigma$
轻微	细小的单砖裂缝	0.5	0.45
中等	裂缝增加, 变长	0.5~0.8	0.45~0.6
严重	裂缝贯通 4~5 皮砖	>0.8	>0.6

开裂荷载所对应的砌体初始裂缝长度、数量和位置各异. 16 个试件中 7 个是产生通过竖向灰缝线的多皮砖长裂缝, 6 个是在多处产生较短裂缝, 3 个是产生单砖细小裂缝. 按开裂面划分, 12 个是正面 (前后面) 先开裂, 4 个是侧面 (左右面) 先开裂, 多数试件正面开裂早于侧面.

## 3.2 裂缝长度发展规律

### 3.2.1 初步拟合

对每个试件计算应力比  $F = \sigma/f_m$  和裂缝长度比  $L = l/l_m$ , 用归一化的数据绘制总体和每个试件的  $F-L$  散点图, 并利用二次函数、三次函数和指数函数进行拟合 (如图 6(a) 所示). 曲线拟合的优劣用拟合度  $R^2$  衡量,  $R^2$  由式(2)计算:

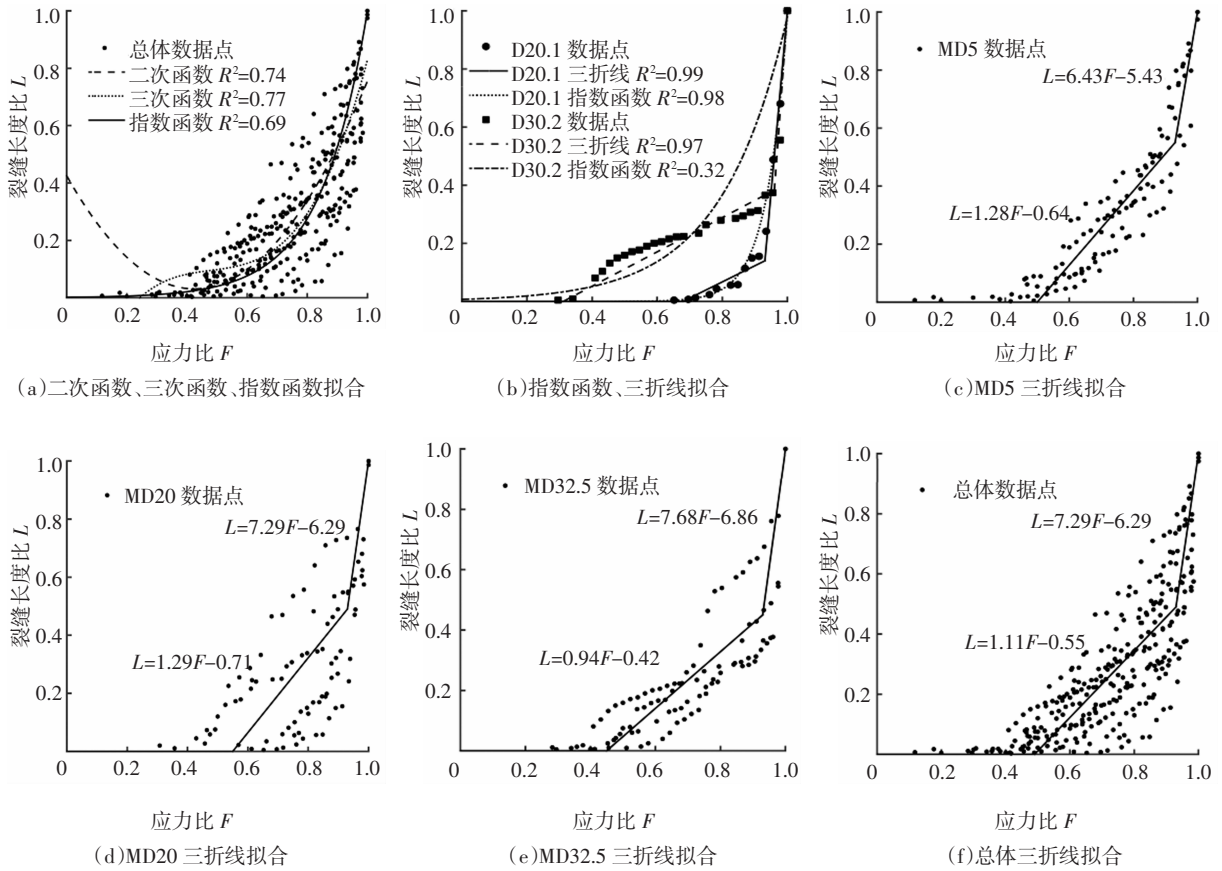


图6 应力比  $F$ -裂缝长度  $L$  散点图及拟合

Fig.6 Scatter and fitting diagrams of stress ratio  $F$ -crack length ratio  $L$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (L - \hat{L})^2}{\sum (L - \bar{L})^2} \quad (2)$$

式中: $L$ 为实际值; $\bar{L}$ 为平均值; $\hat{L}$ 为拟合曲线预测值. 拟合优度  $R^2$  的取值范围为 $[0, 1]$ ,越接近 1,拟合效果越好.

从拟合优度和曲线形状看,指数函数拟合效果较好,如试件 D20.1(如图 6(b)所示). 然而并非每个试件的拟合效果都好,如试件 D30.2(如图 6(b)所示),其前段预测值偏低,后段预测值偏高.

### 3.2.2 三折线模型拟合

从裂缝发生发展的工程意义出发,开裂前裂缝长度视为 0,各试件的差异主要表现在开裂荷载大小、开裂后裂缝发展速度、破坏时开裂长度 3 个方面. 借鉴抗压试验的 3 个受力阶段<sup>[4]</sup>,将  $F-L$  曲线分为 3 个阶段:弹性阶段(试件开裂前)、裂缝发展阶段和破坏阶段,每个阶段分别用直线模拟,即三折线模型,详细参数见表 4. 三折线模型能反映裂缝发展的实际情况,砌体开裂前直线斜率为 0;砌体开裂后为第二阶段,裂缝匀速增长,斜率保持不变;第三阶段为破坏阶段,短时间产生大量裂缝.

表 4 三折线模型参数

Tab.4 Parameters of trilinear model

阶段	起点	终点	斜率	截距
一	(0,0)	( $F_1$ ,0)	0	0
二	( $F_1$ ,0)	( $F_2$ , $L_2$ )	$k_2$	$b_2$
三	( $F_2$ , $L_2$ )	(1,1)	$k_3$	$b_3=1-k_3$

利用三折线模型拟合时,第一阶段均为水平直线,其末端为开裂应力水平,第二阶段以开裂应力水平为起点,根据数据点分布情况进行直线拟合,其末端作为破坏阶段起点,最后根据实际情况进行调整,由此得到每个试件的  $F-L$  三折线拟合. 多数试件拟合优度  $R^2$  超过 0.95, $F_1$ (见表 4)平均值为 0.50,略低于开裂荷载比平均值 0.52(见表 2), $F_2$  集中于 0.93 附近,对应进入破坏阶段的荷载. 试件 D20.1 和 D30.2 的三折线拟合如图 6(b)所示,其拟合效果优于指数函数.

为了分析冻融循环对裂缝长度发展的影响,取  $F_2=0.93$ ,对合并后的 MD5、MD20、MD32.5 三组试件和总体数据的三折线拟合结果见图 6(c)~(f),各参

数取值见表 5. 除 MD20 数据过于离散外,其他组拟合效果均较好. 3 组的  $k_3$  值递增, 说明随冻融循环次数的增加,破坏阶段裂缝发展速度加快,但  $F_1$  和  $k_2$  没有明显的规律. 总体拟合的 2 个分段点(应力比,裂缝长度比)为(0.49,0)和(0.93,0.49),为砌体不同受力阶段的分界点.

表 5 三折线拟合结果  
Tab.5 Results of trilinear model

编号	$F_1$	$F_2$	$L_2$	$k_2$	$b_2$	$k_3$	$b_3$	$R^2$
MD5	0.50	0.93	0.55	1.28	-0.64	6.43	-5.43	0.91
MD20	0.55	0.93	0.49	1.29	-0.71	7.29	-6.29	0.27
MD32.5	0.45	0.93	0.45	0.94	-0.42	7.86	-6.86	0.79
总体	0.49	0.93	0.49	1.11	-0.55	7.29	-6.29	0.78

试验结果仅在破坏阶段能反映冻融循环次数的影响,而在裂缝发生发展阶段没有得出与冻融循环次数的相关性,推测原因可能以下几点:古砖在长期服役过程中,已受到不同程度的损伤,试验前就存在较大差异. 由于缺乏可参考的古砖试验研究,本试验的冻融循环方案略有不足,以 5 次循环为一个工况,以 35 次为最大次数的冻融试验对试件产生的影响不够显著,导致冻融循环对试件性质的影响相比古砖本身的差异并不明显. 砌筑试件的砂浆是新制的,试验时砂浆硬化仍在进行. 冻融循环可能对砂浆硬化有促进作用,弱化了冻融循环对砌体强度的影响,使结果离散性增大<sup>[8]</sup>.

三折线模型明显优于指数函数模型. 三折线模型平均拟合优度 0.98,能反映加载时砌体所处的不同阶段;指数函数平均拟合优度 0.83,部分试件拟合效果较差. 通过对比总体实际裂缝长度平均值和指数函数、三折线模型拟合结果(如图 7 所示),发现三折线模型与实际  $F-L$  曲线非常接近.

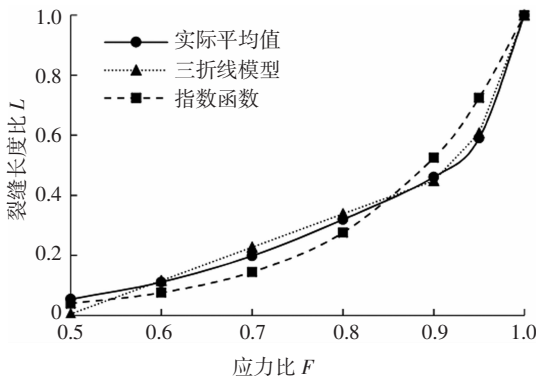


图 7  $F-L$  拟合效果对比图

Fig. 7 Comparison diagram of  $F-L$  fitting chart

### 3.3 裂缝密度

裂缝长度  $l$  除以试件面积可得到裂缝密度  $\rho$ ,裂缝密度是砌体开裂情况的直接描述,能反映砌体受压时的损伤程度.

本次试验最终裂缝长度  $l_m$  的平均值为 10 683 mm,前后左右 4 个面的面积和为 122 670 mm<sup>2</sup>,可得最终裂缝密度  $\rho_m$  的平均值为 8.71 m/m<sup>2</sup>. 变异系数为 0.16 说明各试件破坏时的裂缝密度  $\rho_m$  比较接近,该指标具有较好的稳定性.

本次试验的古砖砌体试件,对应三折线模型的裂缝密度发展规律为:当应力达到  $0.52 f_m$ (见表 2)左右时,砌体开裂;应力达到  $0.6 f_m$ (见图 7)时,砌体裂缝比约为 0.12,裂缝密度  $\rho=1.05$  m/m<sup>2</sup>;应力达到  $0.93 f_m$  时,进入破坏阶段,裂缝比约为 0.49,密度为 4.27 m/m<sup>2</sup>;最终裂缝长度约为 10 683 mm,密度为 8.71 m/m<sup>2</sup>(见表 1).

我们整理了其他学者<sup>[9,20-25]</sup>砌体抗压试验中试件破坏时的开裂情况,利用各自的裂缝图(如图 8 所示)求出其裂缝密度,统计结果见表 6. 虽然能求得破坏时裂缝密度的文献很少,且文献中砌体尺寸、砖块与砂浆成分、砌筑方法、试验条件等与本文不尽相同,但从统计结果来看裂缝密度的波动范围并不大,平均为 6.73 m/m<sup>2</sup>,本文结果较为接近,具有一定的参考借鉴意义.

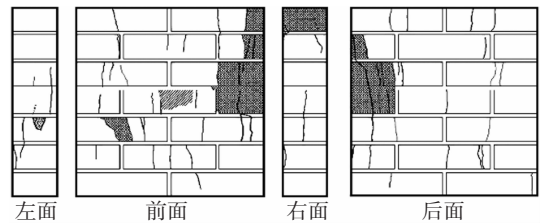


图 8 文献[9]裂缝图

Fig.8 Crack pattern of reference [9]

本文研究方法可用于今后的砌体构件抗压、抗剪、抗弯和抗震等试验中,探究裂缝发生发展规律,寻求具有普遍性的结论. 实际砌体结构尺寸较大,且破坏通常是由局部受力、变形不均匀引起的,因此要将裂缝密度  $\rho$  应用到实际结构安全评估中,还需进行更多的试验和理论研究,深入分析砌体结构开裂的机理和裂缝对结构性能的影响.



表6 各文献裂缝密度统计

Tab.6 Statistics of crack density in each referenc

文献	图片序号	裂缝密度 ( $\text{m}^{-2}$ )	砖块类型	试件尺寸/ $\text{mm}^3$
[9]	14	7.90	黏土砖	510×120×510
[20]	3	7.02	黏土砖	490×370×1300
[21]	2右	8.01	黏土砖	370×240×720
	2左	8.19	粉煤灰砖	370×240×720
[22]	2.8((e)(f))	7.36	黏土砖	365×240×746
	2.8((a)(b))	5.65	粉煤灰砖	365×240×746
[23]	10(a)	8.73	土坯砖	500×110×500
[24]	3	9.28	土坯砖	500×250×600
[25]	9(a)	5.83	古土坯砖	1260×360×1260
	9(b)	5.55	古土坯砖	1260×360×1260
	9(c)	5.10	古土坯砖	1260×360×1260
	9(d)	3.96	古土坯砖	1260×360×1260
	9(e)	4.91	古土坯砖	1260×360×1260
平均值		6.73		
本文		8.71	古黏土砖	425×280×870

## 4 结论

本文研究了砌体抗压试验中古砖砌体裂缝发生发展规律,利用CAD统计每级荷载下的裂缝长度,制作裂缝发生发展动画,根据归一化后的试验数据,评判开裂荷载,得到了裂缝长度及密度的发展规律.本文试验数据和研究方法对古砖砌体结构的研究和保护具有一定参考价值.主要得到以下结论:

1)提出了开裂荷载的评判方法,利用荷载-变形曲线突变点、单条裂缝长度和裂缝发展趋势综合评判开裂荷载.

2)建立了模拟裂缝长度发展规律的三折线模型.模型的2个分段点坐标(应力比、裂缝长度比)为(0.49,0)和(0.93,0.49),能反映加载过程中的不同受力阶段.

3)相比现代砌体,古砖砌体开裂早,裂缝发展快.  $0.4f_m \sim 0.6f_m$  时开裂,平均值为  $0.52f_m, 0.7f_m$  左右裂缝上下贯通,  $0.93f_m$  时进入破坏阶段.而对现代砌体,  $0.5f_m \sim 0.7f_m$  时开裂,  $0.8f_m$  后逐渐形成贯通裂缝.

4)使用裂缝密度  $\rho$  描述砌体开裂情况,得到了典型的古砖砌体试件裂缝密度发展规律.本试验砌体试件最终裂缝密度约为  $8.71 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .通过与相关文献结果对比,发现裂缝密度在砌体抗压试验中具有良好的稳定性,具有深入研究和推广应用价值.

5)冻融循环影响砌体抗压的破坏阶段.随冻融循环次数的增加,破坏阶段裂缝发展速度加快.

## 参考文献

- [1] CALDERINI C, CATTARI S, LAGOMARSINO S. In-plane strength of unreinforced masonry piers [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(2):243—267.
- [2] ANZANI A, GARAVAGLIA E, BINDA L. Long-term damage of historic masonry: a probabilistic model [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):713—724.
- [3] 汤永净, 邵振东. 基于环境变迁影响的古砖孔结构及饱和系数 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11):1662—1669. TANG Y J, SHAO Z D. Ancient brick pore structure and saturation coefficient based on environmental variation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11):1662—1669. (In Chinese)
- [4] 施楚贤, 刘桂秋, 黄靛. 砌体结构 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:10—13. SHI C X, LIU G Q, HUANG L. Masonry structure [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:10—13. (In Chinese)
- [5] 刘桂秋, 颜友清, 施楚贤. 砌体受压本构关系统一模型的研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(11):6—9. LIU G Q, YAN Y Q, SHI C X. Research on the unified model of the compressive constitutive relations of masonry [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(11):6—9. (In Chinese)
- [6] 陈大川, 陈庭柱, 施楚贤, 等. 回弹法推定砌体中烧结普通砖强度等级的研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(3):23—27. CHEN D C, CHEN T Z, SHI C X, et al. Research on the evaluation of strength for fired common brick in existing masonry structures in rebound method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(3):23—27. (In Chinese)
- [7] NETINGER I, VRAČEVIĆ M, RANOGAJEĆ J, et al. Evaluation of brick resistance to freeze/thaw cycles according to indirect procedures [J]. Gradevinar, 2014, 66(3):197—209.
- [8] PERRIN B, VU N A, MULTON S, et al. Mechanical behaviour of fired clay materials subjected to freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2):1056—1064.
- [9] URANJEK M, BOKAN-BOSILJKOV V. Influence of freeze-thaw



- cycles on mechanical properties of historical brick masonry [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84:416—428.
- [10] 郑山锁, 宋哲盟, 赵鹏. 冻融循环对再生混凝土砖砌体抗压性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1):131—136.  
ZHENG S S, SONG Z M, ZHAO P. The influence of freeze-thaw cycle on the compressive behaviors of recycled concrete brick masonry [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1):131—136. (In Chinese)
- [11] 商效瑀. 冻融循环作用下再生混凝土砖砌体力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2014:63—80.  
SHANG X Y. Research on the mechanical property of recycled concrete brick structure under freeze-thaw cycles [D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2014:63—80. (In Chinese)
- [12] SAISI A, CANTINI L, BINDA L. Investigation strategies for the diagnosis of historic structures [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing. Ioannina: CRC Press, 2012:43—49.
- [13] 汤永净, 邵振东. 非饱水冻融作用下的古砖弹性模量[J]. *土木建筑与环境工程*. 2015, 37(6):1—6.  
TANG Y J, SHAO Z D. Dynamic elastic modulus based on unsaturated water freeze-thaw action for ancient bricks [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2015, 37(6): 1—6. (In Chinese)
- [14] 汤永净, 赵红, 叶真华, 等. 古代砖砌体风化性能分析及风化程度评定[J]. *土木建筑与环境工程*. 2017, 39(3):67—74.  
TANG Y J, ZHAO H, YE Z H, *et al.* Ancient brick masonry behavior and weathering degree evaluation [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2017, 39(3):67—74. (In Chinese)
- [15] CARPINTERI A, INVERNIZZI S, LACIDOGNA G. Historical brick-masonry subjected to double flat-jack test: acoustic emissions and scale effects on cracking density [J]. *Construction & Building Materials*, 2009, 23(8):2813—2820.
- [16] 杨勇新, 陈满圈. 砌体结构中裂缝损伤的模糊综合评价[J]. *港工技术*, 1998(3):29—32.  
YANG Y X, CHEN M Q. Fuzzy comprehensive judge of cracking damage on masonry structure [J]. *Port Engineering Technology*, 1998(3):29—32. (In Chinese)
- [17] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, NICCOLINI G. Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, 42(4):2047—2056.
- [18] GB/T 50129—2011 砌体基本力学性能试验方法标准 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011:7—14.  
GB/T 50129—2011 Standard for test method of basic mechanics properties of masonry [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:7—14. (In Chinese)
- [19] 刘冀, 唐岱新. 砌体结构损伤状态的评估[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 11(4):25—31.  
LIU Z, TANG D X. The assessment of damage state in masonry structures [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1996, 11(4):25—31. (In Chinese)
- [20] 杨翌, 杨智, 田水. 碳纤维布加固黏土砖柱的试验研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2009, 32(2):209—212.  
YANG Z, YANG Z, TIAN S. Experimental study on brick columns strengthened by CFRP [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2009, 32(2):209—212. (In Chinese)
- [21] 赵斐, 何晓雁, 乔建新. 蒸压粉煤灰砖砌体轴心受压性能试验研究[J]. *内蒙古工业大学学报*, 2011, 30(1):63—68.  
ZHAO F, HE X Y, QIAO J X. An experimental study on the axial compressive properties of autoclaved fly ash brick masonry [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology*, 2011, 30(1): 63—68. (In Chinese)
- [22] 徐春一. 蒸压粉煤灰砖砌体受力性能试验与理论研究 [D]. 大连:大连理工大学土木工程学院, 2011:23—25.  
XU C Y. Experimental and theoretical research on the mechanics behavior of autoclaved fly ash brick masonry [D]. Dalian: School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2011:23—25. (In Chinese)
- [23] MICCOLI L, MÜLLER U, FONTANA P. Mechanical behaviour of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 61:327—339.
- [24] LOURENCO P B, PINA-HENRIQUES J. Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry [J]. *Computers and Structures*, 2006, 84: 1977—1989.
- [25] SILVEIRA D, VARUM H, COSTA A, *et al.* Mechanical properties and behavior of traditional adobe wall panels of the aveiro district [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 27(9): 4014253.