

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.018



酸雨环境下老旧砖砌体的抗压性能

王凤池, 赵晗宇, 刘昊宇, 任绍南

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要:为研究酸雨环境下老旧砌体抗压力学性能退化规律,实验室配置了 PH 值分别为 1.5、2.5 和 3.5 的 3 种硫酸和硝酸混合溶液来模拟酸雨环境,采用完全浸泡加速腐蚀的试验方法对砖、砂浆和砖柱进行不同程度的腐蚀,并测定其抗压强度。试验表明,随着腐蚀时间的增加,砂浆试块抗压强度先增大后降低;砖试块抗压强度随腐蚀时间的增加而降低;模拟酸雨溶液 PH 值越小,砂浆和砖试块抗压强度降低程度也愈大;砖柱极限承载力和弹性模量均随腐蚀时间的增加而降低,且模拟酸雨溶液 PH 值越小,降低程度愈大;随着腐蚀时间的增加,砖柱初始刚度逐渐减小,极限破坏位移增大;模拟酸雨溶液 PH 值越小,砖柱在达到峰值荷载时的变形值越小,脆性愈大;基于试验结果,建立了酸雨环境下砖柱应力-应变曲线上升段统一数学表达式及酸雨侵蚀后普通烧结粘土砖砌体剩余抗压强度回归公式。

关键词:酸雨;砂浆;砖柱;腐蚀;抗压强度;应力-应变曲线

中图分类号:TU362 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0140-08

Compression properties of old brick masonry in acid rain environment

Wang Fengchi, Zhao Hanyu, Liu Haoyu, Ren Shaonan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 100084, P. R. China)

Abstract: Three kinds of mixed solutions of sulfuric acid and nitric acid with the pH value of 1.5, 2.5 and 3.5 were prepared in the laboratory to simulate acid rain environment. The compression properties of brick masonry exposed to acid rain environment was studied. The brick samples, mortar samples and brick-columns were completely immersed in the simulated acid solutions. After being exposed to the solutions for a certain period, compression tests were performed on the three types of the samples. The results showed that with the increase of corrosion time the compressive strength of mortar samples increased firstly and then decreased, whilst the brick samples always decreased. And the lower the pH value of the solutions was, the more the compressive strength of mortar samples and brick samples decreased. With the increase of corrosion time, the ultimate bearing capacity and elastic modulus of brick-columns showed a trend of decrease, and the lower the pH value of the solutions was, the more obvious the trend was. With the

收稿日期:2016-08-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ11B02)

作者简介:王凤池(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事结构抗灾研究,(E-mail)cefcwang@sjzu.edu.cn.

Received:2016-08-25

Foundation item: The Project of National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (No. 2012BAJ11B02)

Author brief: WANG Fengchi (1970-) professor, doctoral supervisor, main research interest: structure of disaster resistance, (E-mail) cefcwang@sjzu.edu.cn.

increase of corrosion time, the initial stiffness of brick-columns decreased, ultimate failure displacement increased. With the pH value of the solutions declining, the deformation of brick-columns under ultimate load decreased but the brittleness increased. Based on the experimental results, regression formulas were put forward to describe the ascending part of the stress-strain curve and the remaining compressive strength of brick-columns exposed to acid rain environment.

Keywords: acid rain; mortar; brick-column; corrosion; compressive strength; stress-strain curve

酸雨已成为世界性环境问题,中国酸雨已覆盖国土面积的 40%,成为继欧洲、北美之后第三大酸雨区^[1-2]。酸雨中含有 H_2SO_4 、 HNO_3 等酸性物质,可以使服役于酸雨区的砖砌体结构受到不同程度的腐蚀,加速结构老化进程,不但降低结构的安全性,而且给国民经济带来巨大损失。

学者们相继开展了酸雨对混凝土性能影响方面的研究工作,研究大多采用加速腐蚀的试验方法,在对不同腐蚀程度的混凝土、抗压强度、抗拉强度和重量变化^[3-8]以及不同类型水泥的抗酸雨侵蚀性能等方面^[9-11]取得不少成果,得到了初步定性的结论。随着黏土砖的限制使用,老旧砌体结构的保护逐渐升温。现代自然灾害酸雨对老旧砖砌体结构影响方面的研究也引起了中国的关注。有学者针对酸雨环境下砂浆的微观结构衍化及砌体的物理力学性能的退化规律进行了一些研究,如:谢绍东等^[12]研究了酸雨对砂浆的物相和孔隙结构的影响;肖佳等^[13-14]研究了不同类型水泥及掺和料对砂浆抗酸雨性能的影响;Macas 等^[15]通过极限应变试验评估了酸雨介质中水泥砂浆的耐久性;郑山锁等^[16]研究了酸雨环境下水平荷载对砌体结构的损伤特性。砖砌体结构的抗压性能是研究其破坏机理和强度理论的重要依据,因此,开展模拟酸雨环境下砖柱轴心抗压力学性能试验具有重要理论意义。

本文参考了学者们关于酸雨对混凝土及水泥砂浆性能影响方面的研究方法,采用完全浸泡加速腐蚀的方法^[3-16],对模拟酸雨环境下砖、砂浆和砖柱抗压力学性能退化规律进行试验研究,为酸雨环境下砖砌体结构的耐久性研究提供科学依据。

1 模拟酸雨试验过程

1.1 试件制作

试验用水泥砂浆试块采用标准的 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$ 立方体试块;砖试件参考《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)制作(图 1)。

试验所用砖为建筑拆除的 MU10 普通烧结粘土砖。砖柱尺寸为 $240\text{ mm} \times 370\text{ mm} \times 720\text{ mm}$ (顶

部有 10 mm 厚 1:3 水泥砂浆找平),高厚比为 3,如图 2 所示。

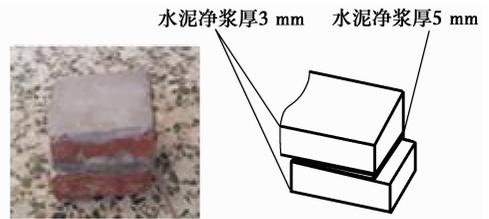


图 1 砖试块

Fig. 1 brick sample

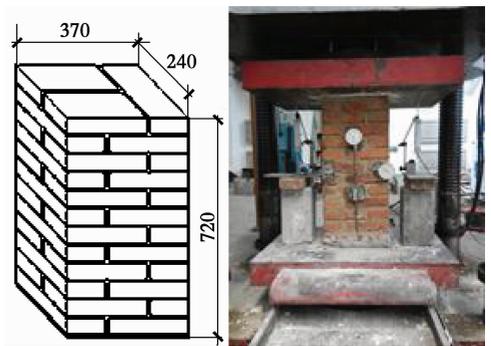


图 2 砖柱模型加载设备

Fig. 2 The brick-column sample and the loading device

1.2 试验过程

酸雨对建筑物的侵蚀是一个漫长的过程,试验采用完全浸泡加速腐蚀的方法近似模拟酸雨对砌体的侵蚀过程。中国属于硫酸型酸雨国家,酸雨中主要致酸物质为硫酸和硝酸,硫酸根浓度为硝酸根浓度的 5~10 倍,严重地区酸雨的最低 pH 值已达到 2.85,且 pH 值有逐渐降低的趋势^[11]。采用酸雨侵蚀烈度当量的方法^[4],实验室配置了 PH 值分别为 1.5、2.5 和 3.5 的 3 种硫酸和硝酸混合溶液来模拟酸雨环境。根据试验模拟酸雨溶液 H^+ 与 SO_4^{2-} 的侵蚀烈度总量,pH 值为 1.5 的模拟酸雨溶液浸泡 1 d 对应实际腐蚀的 4.1 年;pH 值为 2.5 的模拟酸雨溶液浸泡 1 d 对应实际腐蚀的 0.41 年;pH 值为 3.5 的模拟酸雨溶液浸泡 1 d 对应实际腐蚀的 0.041 年。同时,为考虑模拟酸雨溶液侵蚀条件下砖块及砂浆物理力学指标变化对砖柱的影响,试件分为砖

试件组、砂浆试件组和砖柱试件组,且每个组内均设有清水对照组,具体分组及腐蚀条件如表 1 所示。

将砖体、砂浆试块和达到标准养护期的砖柱按设计分组分别浸泡在模拟酸雨溶液中,试验过程中每天用 pH 值酸度计测量溶液的 pH 值,确保浸泡液 pH 值稳定。当溶液 pH 值高于设计值时,用 HNO_3 将溶液调整到初始 pH 值,并且每隔 10 d 更换一次溶液。一旦达到设计腐蚀时间,立刻将试件取出,自然放置 5 d。砖和砂浆试件采用压力机加载。砖柱试验采用分级施加荷载的方法^[17]。每级施加的荷载应为预估破坏荷载值的 10%,并应在 1~1.5 min 内均匀加完,持荷 1~2 min 后读取千分表读数并施加下一级荷载。当砖柱裂缝急剧扩展和增多且试验机的测力计指针明显回退时,应定为该砖柱丧失承载能力而达到破坏状态。其最大荷载读数应为该砖柱的破坏荷载值,加载设备如图 2 所示。

表 1 试件分组及腐蚀条件
Table 1 Experimental conditions

试验分组	腐蚀类型	溶液 pH 值	腐蚀时间/d	
砖试件	硫酸+硝酸	1.5	5,10,30,50	
	硫酸+硝酸	2.5	5,10,30,50	
	硫酸+硝酸	3.5	5,10,30,50	
	清水对照组	7.0	5,10,30,50	
砂浆试件	硫酸+硝酸	1.5	5,10,30,50	
	硫酸+硝酸	2.5	5,10,30,50	
	硫酸+硝酸	3.5	5,10,30,50	
	清水对照组	7.0	5,10,30,50	
砖柱	Y1-1	硫酸+硝酸	1.5	10
	Y1-2	硫酸+硝酸	1.5	30
	Y1-3	硫酸+硝酸	1.5	50
	Y2-1	硫酸+硝酸	2.5	10
	Y2-2	硫酸+硝酸	2.5	30
	Y2-3	硫酸+硝酸	2.5	50
	Y3-1	硫酸+硝酸	3.5	10
	Y3-2	硫酸+硝酸	3.5	30
	Y3-3	硫酸+硝酸	3.5	50
	Y4-1	不腐蚀试件		

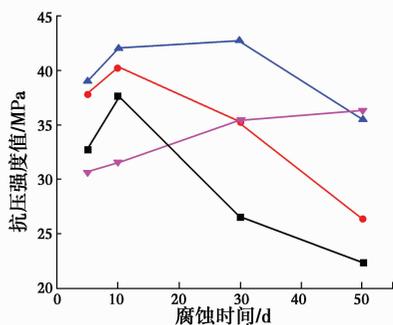
2 模拟酸雨对砖及砂浆抗压强度影响

图 3 给出了砂浆试块和砖体试块的抗压强度变化与腐蚀时间关系曲线。初始状态,由于砂浆及砖体试块未经侵蚀(即腐蚀时间为 0),其抗压强度值

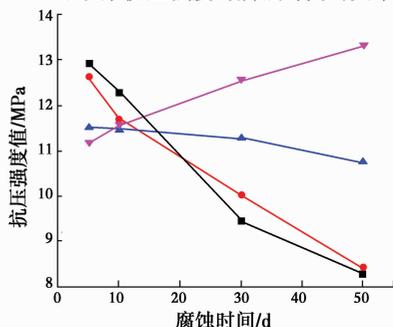
与清水对照组一致,可参考清水对照组浸泡 5 d 时的强度值。

由图 3(a)可知:1)在 50 d 的腐蚀时间内,水中浸泡组砂浆试块由于持续水化作用,抗压强度一直保持增长趋势,在第 50 d 抗压强度达到 36.3 MPa;2)腐蚀组砂浆试块抗压强度呈先增长后逐渐降低的趋势,增长阶段增长幅度甚至超过水中浸泡组;3)模拟酸雨溶液 PH 值越小,砂浆试块抗压强度降低程度也愈大。

酸雨环境下, SO_4^{2-} 侵入砂浆试块发生结晶固化作用,可以降低砂浆试块的孔隙率,使其内部更密实,抗压强度有所提高。另一方面,腐蚀液中的 H^+ 会和砂浆试块表层的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,造成凝胶体分解和浆体碱度降低,致使砂浆试块表层发生溶蚀破坏,抗压强度降低。随着腐蚀时间的增加, H^+ 对表层的溶蚀不断累积, SO_4^{2-} 生成的膨胀性腐蚀物也不断增多,使砂浆内部孔隙无法容纳更多的侵蚀生成物,致使内部产生膨胀性裂缝。这必然导致砂浆强度随腐蚀时间的增加而不断降低。



(a) 砂浆抗压强度与腐蚀时间的关系



(b) 砖体抗压强度与腐蚀时间的关系

注: ■ pH=1.5 ● pH=2.5 ▲ pH=3.5 ▼ 清水

图 3 砂浆和砖抗压强度变化与腐蚀时间的关系
Fig. 3 Relationships between compression strength and corrosion time of mortar and brick sample

由图 3(b)可以看出:1)腐蚀组砖体试块抗压强度均处于逐渐降低趋势,其中浸泡在 pH 值为 1.5 的模拟酸雨溶液中的砖试件组,其试块强度下降幅

度最大, pH 为 2.5 的试件组次之; 2) 水中浸泡组砖体试块由于抹面水泥的水化作用, 抗压强度在 50 d 内呈平稳增涨趋势。

烧结砖力学强度是由组成砖块的矿物成份及其颗粒之间彼此镶嵌组合的紧密程度共同决定^[18], 酸雨中的 H^+ 与粘土砖中的碱性组分发生化学反应, 生成易溶于水的盐类物质, 被腐蚀液带走后会使得砖体组份流失, 降低了砖体内部矿物彼此镶嵌的紧密度。因此酸雨侵蚀后粘土砖抗压强度有所降低。对于 pH 值较小的腐蚀液, 其拥有更多 H^+ , 与砖内部碱性组份反应速率更快, 强度下降幅度也更大。

3 模拟酸雨对砖柱的影响

3.1 酸雨对砖柱破坏形态的影响

如图 4, 不同浸泡时长的清水对照组 (pH 值 = 7) 砖柱破坏形态无明显差异, 且和规范条文说明^[19]中描述的无筋砌体轴心受压柱的破坏形态相似, 即约在 70% 破坏荷载时单个砖块内首先出现裂缝, 随着荷载的增大单个砖块裂缝增多, 且上下几条裂缝相互贯通, 继续加载裂缝加速开展并且将砌体切分成几个小立柱, 此时砌体向外鼓胀并因小立柱失稳而破坏。



图 4 砖柱轴压破坏图

Fig. 4 The brick-columns compressive failure diagram

如图 4, 腐蚀后砖柱出现砂浆浆体及砖砌块的溶蚀、酥松、内陷、脱落等现象。随着模拟酸雨溶液

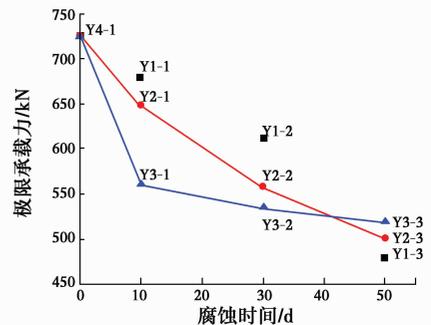
中侵蚀性离子 (H^+ 、 SO_4^{2-}) 浓度的增大或侵蚀时间的增加, 砂浆及砖砌块的病害程度进一步加深。如图 4(a), 随侵蚀时间的增加, 开裂荷载下降至 42% 至 58% 破坏荷载, 浸泡时间越长, 单砖裂缝出现越早。当试验砖柱经历高浓度、长时间侵蚀时, 柱体外周砖块在荷载作用下发生剥落, 且以砖块及砂浆受压酥松碎裂标志破坏, 而通缝的形成及开展并不明显, 如图 4(b)。

3.2 酸雨对砖柱承载能力的影响

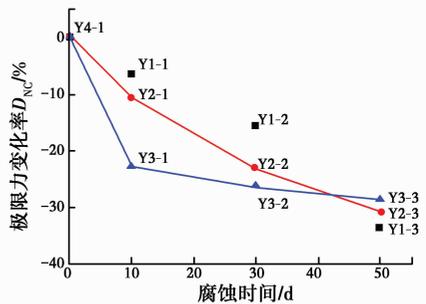
为了便于比较不同腐蚀程度砖柱较未腐蚀砖柱的承载力变化规律, 定义承载力变化率为

$$D_{NC} = \frac{N_C - N_0}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_{NC} 为承载力变化率, %; N_C 为腐蚀相应天数的砖柱极限承载力, kN; N_0 为未腐蚀砖柱的极限承载力, kN。



(a) 极限承载力与腐蚀时间关系



(b) 承载力变化率与腐蚀时间关系

注: —■— pH=1.5 —●— pH=2.5 —▲— pH=3.5

图 5 砖柱承载力变化与腐蚀时间关系

Fig. 5 Relationships between the change of brick-column bearing capacity and corrosion time

由图 5 砖柱承载力变化与腐蚀时间关系曲线可以看出: 1) 随着腐蚀时间的增加, Y1、Y2、Y3 组砖柱极限承载力均呈逐渐降低趋势, 在腐蚀达到 50 d 时, Y1 组砖柱 D_{NC} 为 -33.64%, 极限承载力下降幅度最大; Y2 组次之, D_{NC} 为 -30.82%; Y3 组 D_{NC} 为 -28.55%, 极限承载力降低幅度最小。可见模拟酸雨溶液的 PH 值越小, 腐蚀时间越长, 其浸泡砖柱的

极限承载力降低程度愈大;2)在腐蚀过程中,30 d以前,砖柱极限承载力下降幅度关系为 Y1 组 < Y2 组 < Y3 组,浸泡液 pH 值小的砖柱极限承载力下降幅度反而小;当腐蚀时间达到 50 d 时,砖柱极限承载力下降幅度关系发生转变,变为 Y1 组 > Y2 组 > Y3 组,pH 值小的腐蚀液的侵蚀作用逐渐变得明显,而 pH 值大的腐蚀液的侵蚀作用逐渐变得平缓。

3.3 不同腐蚀条件下砖柱轴向应力-应变-曲线

由图 6 试验砖柱荷载-位移曲线可以看出:1)随着腐蚀时间的增加,Y1、Y3 组砖柱在达到峰值荷载时荷载-位移曲线逐渐右移,可认为随着腐蚀时间的增加,砖柱初始刚度逐渐减小,砖柱的极限破坏位移逐渐增加;2)Y1 组各砖柱在达到峰值荷载时位移分别为 3.11、3.12、3.13 mm,Y2 组分别为 5.35 mm、4.10 mm、2.79 mm,Y3 组分别为 4.68 mm、6.25 mm、7.80 mm,可见模拟酸雨溶液 pH 值越小,砖柱在达到峰值荷载时的变形值越小,脆性愈大。

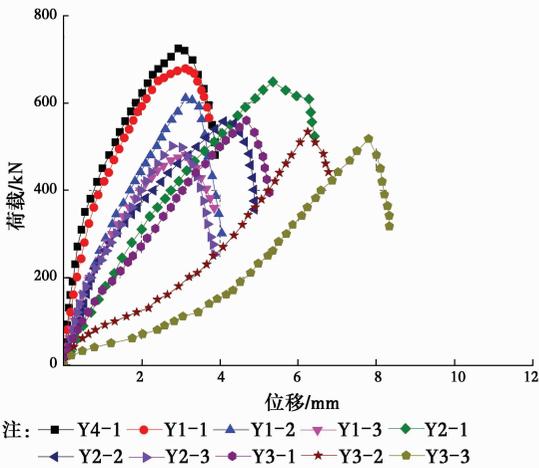


图 6 试验砖柱荷载-位移曲线

Fig. 6 The load-displacement curves of brick-column

图 7 为砖柱轴向应力-应变曲线。在试验过程中,承载力上升段砖柱变形值较小,千分表读数稳定,数据较好。但在承载力下降段砖柱变形值增加过快,无法读出千分表读数,因此试验得到的应力-应变曲线不完整,仅有上升段。各柱的应力-应变曲线在上升段形状相似,均经历弹性、弹塑性阶段。腐蚀后砖柱轴向应力-应变曲线较未腐蚀砖柱均有不同程度右移,峰值应力也有不同程度的降低,可见酸雨的侵蚀作用降低了砖柱的抗压强度和弹性模量。

为统一描述不同腐蚀程度砖柱的应力-应变关系,在 Powell 和 Hodgkinson 提出的砌体本构曲线

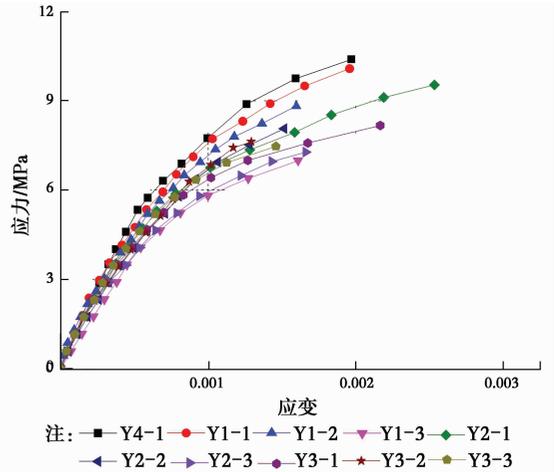


图 7 砖柱轴向应力-应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curves of brick-column

上升段公式基础上,根据试验结果对其进行修正,建立了酸雨环境下砖柱应力-应变曲线上升段的统一数学表达式。

首先对应力、应变数据进行无量纲化处理,令

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中: σ_0 为不同侵蚀时间和不同侵蚀性离子浓度情况下砖柱的抗压强度,MPa; ϵ_0 为对应于 σ_0 的应变。此时,应力-应变曲线上升段($x \leq 1$)可以表示为

$$y = ax - bx^2 \quad (3)$$

式中: a, b 为多项式系数,可通过对试验数据拟合确定。对不同腐蚀程度的砖柱应力-应变曲线进行拟合,得到了该曲线上升段表达式(4),相关系数为 0.991,拟合曲线及不同工况下实测应力应变无量纲化后各散点如图 8 所示。

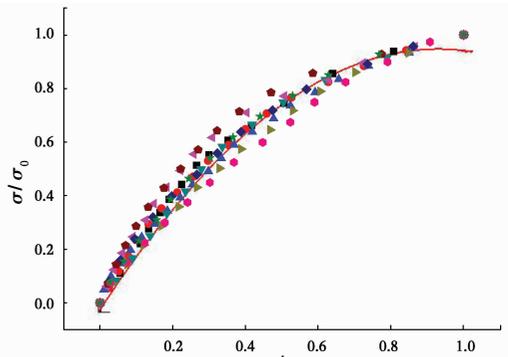


图 8 酸雨环境下砖柱应力-应变上升段拟合曲线

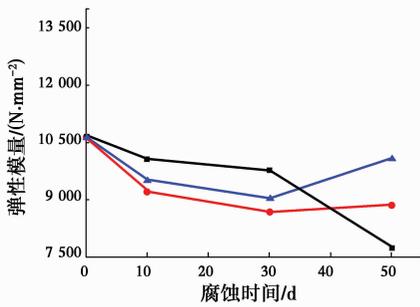
Fig. 8 The stress-strain ascent fitting curve of brick-column in the acid rain environment

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 2.12 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - 1.16 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \quad (4)$$

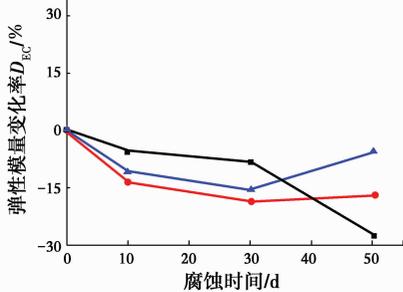
由图 8 可以看出,应力-应变曲线上段方程能较好反映不同侵蚀时间和不同侵蚀性离子浓度情况下砖柱应力-应变曲线上段的变化规律。

3.4 模拟酸雨对砖柱弹性模量的影响

参考《砌体基本力学性能试验方法》(GB/T 50129—2011)^[17],取应力 σ 为 $0.4 f_{c,i}$ (砖柱抗压强度)时的割线模量作为该试件的弹性模量。



(a) 弹性模量与腐蚀时间关系



(b) 弹性模量变化率与腐蚀时间关系

注: — pH=1.5 — pH=2.5 — pH=3.5

图 9 砖柱弹性模量变化与腐蚀时间关系

Fig. 9 Relation between the change of brick-column modulus of elasticity and corrosion time

为了便于比较不同腐蚀程度砖柱较未腐蚀砖柱的弹性模量变化规律,在此定义弹性模量化率为

$$D_{Ec} = \frac{E_c - E_0}{E_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: D_{Ec} 为弹性模量变化率,%; E_c 为腐蚀相应天数的砖柱弹性模量, N/mm^2 ; E_0 为未腐蚀砖柱的弹性模量, N/mm^2 。

由图 9 砖柱弹性模量变化与腐蚀时间关系曲线可以看出:1)浸泡液 pH 值小的 Y1 组砖柱弹性模量变化趋势较明显,随着腐蚀时间的增加,弹性模量处于降低趋势,受腐蚀 50 d 后, D_{Ec} 为 -27.51% ,弹性模量损失最严重,然而浸泡液 pH 值较高的 Y2、Y3 组砖柱弹性模量变化趋势不明显;2)在受腐蚀 30 d 之前,砖柱弹性模量随腐蚀时间的增加而逐渐降低, pH 值越小,降低程度愈大,当腐蚀达到 50 d 时,由

于受侵蚀严重,弹性模量缺乏规律性。

3.5 模拟酸雨侵蚀后普通烧结粘土砖砌体剩余抗压强度回归分析

基于砌体结构规范公式^[19],保留规范公式原有形式,因本文试验砂浆强度大于 1,取 k_2 为 1,因此以 k_1 、 α 为回归分析未知参数。设酸雨侵蚀后普通烧结粘土砖砌体剩余抗压强度为 y ,砖体抗压强度平均值为 x_1 (见图 3b),砂浆抗压强度平均值为 x_2 (见图 3a),建立回归分析方程为

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (6)$$

表 2 砖柱剩余抗压强度回归公式计算值与试验实测值比较

Table 2 Comparison of the calculated values and test values of residual compressive strength of brick-columns

试件编号	砌体强度/MPa	砂浆强度/MPa	计算值/MPa	试验值/MPa	计算值/试验值
Y1-1	12.29	37.58	8.16	10.09	0.81
Y1-2	9.44	26.54	7.16	8.83	0.81
Y1-3	8.26	22.25	6.77	7	0.97
Y2-1	11.69	40.21	8.76	9.54	0.92
Y2-2	10.01	35.18	8.47	8.07	1.05
Y2-3	8.42	26.3	7.46	7.28	1.02
Y3-1	11.46	41.98	9.11	8.18	1.11
Y3-2	11.28	42.75	9.30	7.63	1.22
Y3-3	10.75	35.5	8.28	7.47	1.11

注:侵蚀后砖柱剩余抗压强度测量值=砖柱的极限荷载值/截面面积。

对试验数据进行非线性回归分析,得到式(7)

$$y = 6.29x_1^{-0.41} (1 + 0.07x_2) \quad (7)$$

将各砖柱抗压强度试验值及回归公式计算值列于表 2 中。

由表 2 可知:各砖柱剩余抗压强度回归公式计算值与实测值比值为 0.81~1.22,平均值为 1.00,标准差为 0.140,计算值与实测值吻合较好。

4 结论

1)砂浆试块酸雨腐蚀后抗压强度呈先增长后逐渐降低的趋势,砖体试块抗压强度呈降低趋势。模拟酸雨溶液 PH 值越小,砂浆和砖试块抗压强度降低程度也愈大。

2)随着腐蚀时间的增加,砖柱极限承载力和弹性模量均呈逐渐降低的趋势,且腐蚀液 PH 值越小,降低程度愈大。

3)随着腐蚀时间的增加,砖柱初始刚度逐渐减

小,极限破坏位移增加。且腐蚀液 PH 值越小,砖柱在达到峰值荷载时的变形值越小,脆性愈大。

4)在 Powell 和 Hodgkinson 提出的砌体本构曲线上升段公式的基础上,根据试验结果对其修正,建立了酸雨环境下砖柱应力-应变曲线上升段统一数学表达式。该式能较好反映不同腐蚀程度砖柱应力-应变曲线上升段的变化规律。

5)基于砌体规范公式,建立了酸雨侵蚀后普通烧结粘土砖砌体剩余抗压强度回归公式,公式计算值与实测值吻合较好,能有效评估老旧砌体的材料强度变异程度,为酸雨地区在役阶段砌体结构的目标可靠指标及残余寿命的评估提供理论依据。

参考文献:

- [1] 吴丹,王式功,尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 70-77.
WU D, WANG S G, SHANG K Z. Summary of research on acid rain in China [J]. Drought Meteorology, 2006, 24(2): 70-77. (in Chinese)
- [2] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
ZHANG X M, CHAI F H, WANG S L, et al. Research progress of acid precipitation in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(5): 527-532. (in Chinese)
- [3] 张倩,赵洁,成华. 酸雨对水泥砼强度影响的模拟及其腐蚀的化学机理分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(3): 49-62.
ZHANG Q, ZHAO J, CHENG H. Simulated acid rain on strength of concrete and chemical analysis of the mechanism of corrosion [J]. Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(3): 49-62. (in Chinese)
- [4] 胡晓波. 酸雨侵蚀混凝土的试验模拟分析[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(Sup1): 147-152.
HU X B. Experimental simulation analysis of acid rain attacking concrete [J]. Journal of Ceramic Society, 2008, 36(Sup1): 147-152. (in Chinese)
- [5] 张英姿,范颖芳,李宏男,等. 模拟酸雨环境下混凝土抗拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 857-862.
ZHANG Y Z, FAN Y F, LI H N, et al. Experimental research on the tensile properties of concrete in simulated acid rain environment [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 857-862. (in Chinese)
- [6] 张英姿,范颖芳,刘江林,等. 模拟酸雨环境下 C40 混凝土抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 105-110.

- ZHANG Y Z, FAN Y F, LIU J L, et al. Experimental research on the compressive properties of concrete C40 in simulated acid rain environment [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 105-110. (in Chinese)
- [7] KONG L H, JAMES G. Concrete deterioration due to acid precipitation [J]. ACI Materials, 1987, 84(2): 110-116.
- [8] FATTUHI N I, HUGHES B P. The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack [J]. Cement and Concrete Research, 1988, 18(4): 545-553.
- [9] XIE S, QI L, ZHOU D. Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(27): 4457-4466.
- [10] 陈烽,肖佳,唐咸燕. 模拟酸雨环境下粉煤灰对水泥砂浆抗蚀性能影响的试验研究[J]. 粉煤灰, 2006, 18(6): 11-13.
CHEN F, XIAO J, TANG X Y. Experimental study of effect of fly ash on corrosion resistance of cement mortar under simulated acid rain environment [J]. Fly Ash, 2006, 18(6): 11-13. (in Chinese)
- [11] 刘江林. 酸雨环境下混凝土宏细观受压性能试验研究 [D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2009.
LIU J L. Experimental study on macro-meso compressive properties of concrete in acid rain environment [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [12] 谢绍东,周定,岳奇贤,等. 模拟酸雨对砂浆的强度、物相和孔结构影响的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 25-31.
XIE S D, ZHOU D, YUE Q X, et al. Influence of simulated acid rain on strength, crystal and pore structures of sand-lime slurry [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 25-31. (in Chinese)
- [13] 肖佳,周士琼. 酸雨条件下低钙粉煤灰对水泥砂浆强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4): 440-445.
XIAO J, ZHOU S Q. Effect of low-calcium fly ash on cement mortar strength in acid rain condition [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(4): 440-445. (in Chinese)
- [14] 韦有波. 不同类型水泥砂浆的抗酸腐蚀性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 12: 62-65.
WEI Y B. The acid corrosion resistance of different types of cement mortar [J]. China Concrete and Cement Products, 2012, 12: 62-65. (in Chinese)
- [15] MACAS A, GOI S, MADRI J. Limitations of K ch-Steinegger test to evaluate the durability of cement

- pastes in acid medium [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 29: 2005-2009.
- [16] 郑山锁,程明超,马德龙,等. 酸雨环境下砌体结构地震易损性研究[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(1): 79-88.
ZHENG S S, CHENG M C, MA D, et al. Seismic vulnerability of masonry structures subjected to acid rain[J]. *China earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(1): 79-88. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体基本力学性能试验方法标准:GBT 50129—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Test method standards of masonry basic mechanical properties: GBT 50129-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 洪汗烈,牟善彬. 粘土砖强度机制的矿物学表征[J]. *武汉工业大学学报*, 2000, 22(5): 26-28.
HONG H L, MU S B. Mineral characters of the mechanic strength of common fired brick [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2000, 22(5): 26-28. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范:GB 50003-2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Masonry structure design specifications:GB 50003-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

(编辑 胡玲)