

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.009



古代砖砌体风化性能分析及风化程度评定

汤永净^{1a,1b}, 赵红^{1c}, 叶真华^{1a,1b}, 杨玉颖^{1c}, 邵振东²

(1. 同济大学 a. 土木学院 b. 岩土及地下工程教育部重点实验室; c. 材料学院, 上海 201804;

2. 上海仰韶古建筑保护科技发展有限公司, 上海 200434)

摘要:自然界中气温、降水的长期作用导致古代砖砌体风化, 风化损伤材料和砌体力学性能。实验采用大气环境实验舱实现自然风化作用人工模拟, 根据不同饱和度及冻融次数, 实验舱设定了 7 种非饱和水冻融工况, 对 7 种工况影响下的砖、灰浆、砌体抗压、砌体抗剪试件强度变化规律进行实验分析。实验表明, 饱和度是反映材料冻融性能的重要指标; 不同饱和度下的冻融试件强度呈现先升后降的趋势; 试件在饱和度为 53% 的冻融作用下, 砌体构件具有最佳抗力; 提出古代砖砌体构件风化程度评定标准。实验对古砖砌体结构保护工作具有指导和应用价值, 定期评定古塔砌体风化程度, 时刻掌握古塔构件结构安全性能的变化规律, 科学保护古塔。

关键词:风化; 风化系数; 风化程; 非饱和水冻融; 饱和度

中图分类号: TU522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)03-0067-08

Ancient brick masonry behavior and weathering degree evaluation

Tang Yongjing^{1a,b}, Zhao Hong^{1c}, Ye Zhenhua^{1a,b}, Yang Yuying^{1c}, Shao Zhendong²

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering(Tongji University), Ministry of Education; 1c. School of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, P. R. China; 2. Shanghai

Yangshao Protection of Ancient Building Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200434, P. R. China)

Abstract: During long action of temperature and precipitation, ancient brick masonries were weathered. The experiment employed an environmental chamber to simulate natural condition. seven unsaturated freeze-thaw cases were designed to treat various specimens which are brick units, mortar cube, triple masonry and prism masonry. We carried out saturation degree measurement, compressive test and shear test to the various specimens in laboratory. The results show that the saturation degree is one key factor to effect on material freeze-thaw resistance. The strength of specimens increased firstly with saturation degree and decreases after a certain saturation degree. The best compressive resistance of brick, mortar, and prism masonry was when the saturation degree is about 53%. Based on the weathering coefficient and specimen mechanical behavior, we suggested the

收稿日期: 2016-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51278359); 同济大学研究生教育改革项目(2014JYJG019)

作者简介: 汤永净(1965-), 女, 副教授, 博士, 主要从事地下结构耐久性及古建筑结构保护研究, (E-mail) ytang@tongji.edu.cn.

邵振东(通信作者), 高级工程师, (E-mail) szd8199@126.com.

Received: 2016-12-24

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278359); Teaching Reform of Postgraduate Students for Courses of Tongji University(No. 2014YJG019)

Author brief: Tang Yongjing (1965-), associate professor, PhD, main research interests: underground structure durability and ancient building structure preservation, (E-mail) ytang@tongji.edu.cn.

Shao Zhendong (corresponding author), senior engineer, (E-mail) szd8199@126.com.

evaluation standard of weathering degree for ancient brick masonry structures.

Keywords: weathering; weathering coefficient; weathering degree; unsaturated freeze-thaw, saturation degree

以砖塔为代表的古代砖砌体常年裸露于大自然中,因气温、降雨及季风等自然营力作用,许多古塔砌体由表及里呈现龟裂、疏松、粉化、表面剥落等不同风化症状。风化症状的出现反映了砌体材料性能劣化,严重劣化可导致砌体结构局部塌落。自然营力对古塔不同部位的作用是不均匀的:日照不同,塔身南部温度高于北部;风蚀不同,地理气候决定最大风向频率常常发生在塔身某固定侧面;干湿不同,塔基及下部塔体因地下孔隙水作用其含水率高于上部。当强度衰减低于材料的允许强度,风化严重的部位会产生屈服破坏、塔基不均匀沉降或塔身呈现倾斜。自然营力作用下的风化为“物理风化”,其作用力可以把块体岩石风化成碎石和土壤。地质学领域较早对自然界的风化现象进行关注和研究,用“风化系数”指标把岩石划分成不同风化程度^[1]。一些文献把地质学领域的风化系数、风化程度等研究方法应用到古代砖石建筑的研究^[2-4]。

“饱和系数”为砖物理特征值,与砖抵御周期性冻融的能力具有合理的关系^[5],反映砖的抗风化性能^[6];不同区域环境的风化影响用“风化指数”表示^[6],其定义为“日气温从正温降至负温或负温升至正温的每年平均天数与每年从霜冻之日起至消失霜冻之日止这一期间降雨总量(以 mm 计)的平均值乘积”。可见,“风化指数”概念中水的影响为极限饱水度以下的不同饱水度变量,温度的影响为冻融次数。砖抵御周期性冻融能力采用冻融后的强度衰减指标“抗冻性”表示,砖的抗冻性指标是指试件浸泡水中 24 h 冻融循环后强度、质量损失结果^[6],该冻融为饱水冻融。自然界中古塔实体 24 小时浸泡水中的几率是极小的,多数冻融为非饱水冻融。抗冻性反映砖力学性能的变化。砖样品无法满足力学性能实验要求时,可采用“孔径分布”变化反映砖的风化性能^[7]“孔径分布”为砖的物理特征值,冻融状态下,砖孔径孔隙体积和“饱和系数”具有合理相关性。本实验购置了大量古砖,通过非饱水冻融作用下砖、灰浆及砌体试件抗冻性等力学性能实验及分析,研究古砖砌体力学性能变化。一些文献证明了被冻固体因饱水度不同其抗冻性能也不同:冻融状态下,当饱水度 $\geq 60\%$ 时,古砖的动弹性模量和相对动弹性模量数值呈现明显下降趋势;当饱水度 $< 60\%$ 时,古砖动弹性模量和相对动弹性模量数值呈现稍有起伏的平

稳状态;当饱水度为 77.2% 时,古砖呈现断裂^[8]。材料含水量和冻融次数是影响砌体材料耐久性的外界重要因素^[9]。Fagerlund^[10]通过对实验数据分析提出了临界饱和理论,认为材料都有一极限饱水程度,大于极限饱水度时,容易产生冻胀破坏。由此看出,研究非饱水冻融作用下砖、灰浆及砌体力学性能变化规律对提高古塔抗风化能力具有针对性。由于古砖样品难以采集,也由于非饱水冻融实验当前没有列入标准规范,非饱水冻融对古代砖砌体性能影响的研究文献很少见报道。

实验采用大气环境实验舱实现砖、灰浆及各类砌体试件非饱水冻融作用的人工模拟,依据不同冻融次数和不同饱水度设置 7 种工况,借鉴岩石“风化系数”和“风化程度”的实验评定方法^[1],用“风化系数”表示非饱水冻融作用对材料及砌体的影响,用“风化程度”评定材料和砌体承载力的变化。本实验有利于研究风化过程对古代砖塔寿命的缓慢影响及维修保养,几十年或上百年后,当代的砌体结构也同样面临风化性能影响。

1 实验方法

1.1 样品信息及试件制作

砖为公元 1823 年建造的古民居实体外墙烧砖,来自于中国山西,非文物建筑。古砖外观尺寸 280 mm \times 140 mm \times 70 mm,实测饱和系数数值为 0.89。

灰浆选用广泛用于古代建筑修复的水硬性石灰、砂、水搅拌而成。其中石灰:细砂=3:7。石灰主要成分为二钙硅石(2CaO \cdot SiO₂)、消石灰 Ca(OH)₂;砂为细河沙。

依据文献^[6]制作砖强度试件。把整砖切断均分为二,以断口相反方向叠放并用灰浆粘结(图 1(a));依据文献^[11]制作灰浆试件,石灰和砂按照 3:7 比例混合搅拌成型,试件尺寸为 70.7 mm \times 70.7 mm \times 70.7 mm(图 1(b));砌体抗压和抗剪试件依据文献^[12]要求成型,成型前古砖先在水中浸润 2 h,抗压砌体试件外形尺寸为 420 mm \times 280 mm \times 870 mm(图 1(c));抗剪砌体试件外形尺寸为 280 mm \times 420 mm \times 180 mm(图 1(d));所有砌体试件灰缝厚度 10 mm。砖饱水度试件为整块砖,尺寸 280 mm \times 140 mm \times 70 mm,把 1# 饱水度试件(表

1)和对应的砌体抗压、抗剪试件放在舱内相同位置。

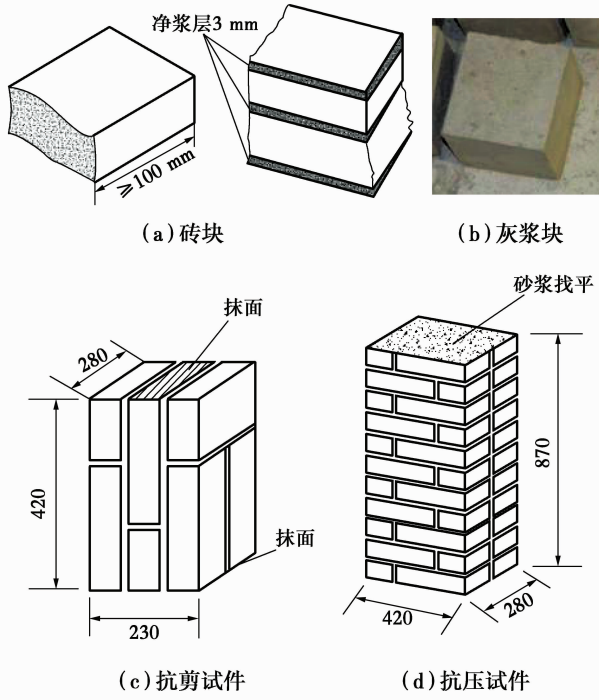


图 1 砖、灰浆、砌体抗压、抗剪试件成型示意图

Fig. 1 Material specimens and compressive and shear specimens

1.2 工况设定及非饱水冻融实验

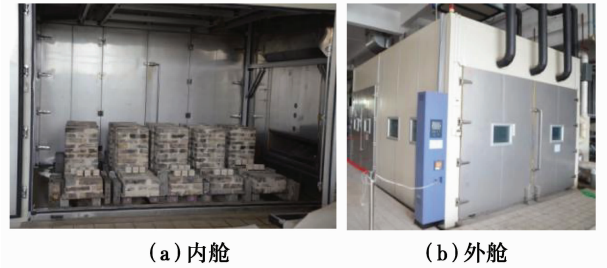
设置 7 种工况反映不同冻融次数和不同饱水度对试件力学性能影响。各个工况砌体试件饱水度用相同位置的 1# 试件砖饱水度表示,每工况 5 次冻融循环。每工况成型 1 组试件,7 种工况共 7 组,同时成型未冻融的标准对比试件 1 组,每组试件件数见表 1。

表 1 各类试件数量

Table 1 The number of various specimens

编号	试件名称	组数	每组件数	总件数
1#	砖饱水度	8	5	40
2#	砖抗压强度	8	5	40
3#	灰浆抗压强度	8	6	48
4#	砌体抗压强度	8	2	16
5#	砌体抗剪强度	8	3	24

采用大气环境实验舱实现各类试件非饱水冻融作用的人工模拟,见图 2。表 1 中各类试件均置放于实验舱中,实验舱淋雨参数依据古民居所在区域的气候条件选定,温度参数依据文献 6 中“冻融循环”条文要求。



(a)内舱 (b)外舱

图 2 大气环境实验舱

Fig. 2 Environmental simulation chamber

古民居区域年降雨量 580 mm,最大雨滴直径 4.7 mm^[13],年平均气温 9.7 °C^[14]。大气环境舱模拟雨淋参数选用雨滴最大粒径 4.7 mm,方向垂直向下,强度中挡 1 mm/min,水温 10 °C。

所有试件的饱水度数值采用对应的 1# 试件测试结果。每次淋雨后立即测试砖含水量。由于古砖样品已经风化(饱和系数 0.89),冻融 35 次后断裂,实验舱选定最大冻融次数 35。

每次冻融循环过程:舱内冻结从 -20 °C 计时,持续 -20 °C 时间 5 h,然后升温到 +20 °C,升温及持续时间 3 h,然后 1 h 降温至 10 °C 并持续淋雨 2 h,表示一次冻融循环结束。每工况冻融循环次数 5 次。

舱内实验流程采用计算机控制,每工况控制程序为:雨淋—连续 5 次冻融循环。每工况结束后从舱内取出对应试件,35 次冻融循环结束后舱内全部试件取出,所有舱内取出试件均置放于室内自然环境中。表 1 中的 1# 试件为砖饱水度测试试件,本实验中用砖饱水度测试值代表各类试件饱水度。

饱水度 S 为不同淋雨状态下的古砖含水量与浸水 24 h 古砖含水量比值,按公式(1)计算。

$$S_n = \frac{m_n - m_0}{m_{24} - m_0} \quad (1)$$

式中: m_n 为不同淋雨状态下的古砖湿质量; m_{24} 为浸水 24 h 古砖湿质量; m_0 为古砖烘至恒重的干质量; m_n 和 m_{24} 均为古砖自由状态下的吸水量,和自然界淋雨后的古砖吸水状态具有可比性。

1.3 各类试件强度实验

砖抗压强度和饱水度实验按照文献[6]要求进行;灰浆抗压强度按照文献[12]要求实验;砌体抗压强度、抗剪强度实验按照文献[12]要求进行。见图 3。

根据材料强度预估砌体抗压试件破坏荷载,试件就位时四个侧面的竖向中线对准试验机轴线,预估破坏荷载值的 20% 区间内反复预压 3~5 次,每

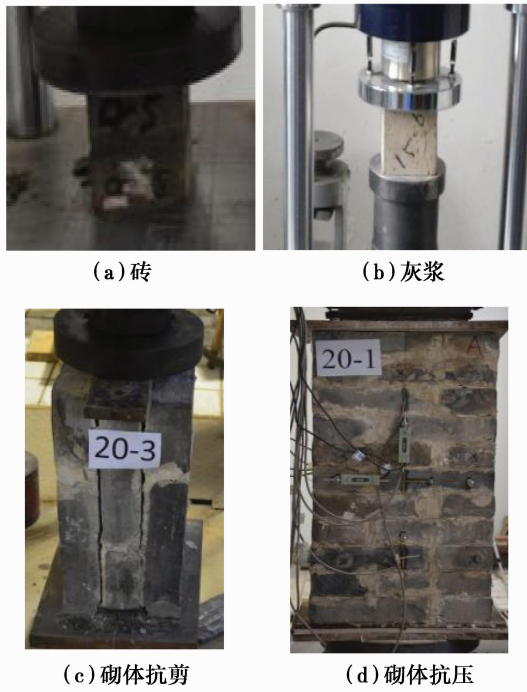


图 3 各类试件强度实验

Fig. 3 Strength tests

级加载时间 1 min, 恒载时间 1 min, 当裂缝急剧发展, 试验机指针开始回退, 试样破坏。

砌体抗剪强度试件为纯剪试件。试件和压力机上下压板接触的 3 个试件顶面均匀铺贴灰浆抹面, 灰浆抹面应平整, 灰浆平行面应保证垂直于抗剪灰浆通缝, 3 个灰浆抹面和压力机上下压板之间铺垫柔性垫片。

2 实验结果

砖饱水度、各类试件强度实验值见表 2。

本实验风化系数 K_f 由公式(2)确定。

$$K_f = \frac{f_i}{F_i} \quad (2)$$

式中: F_i 为表 2 中各类试件中工况 0 强度数值; f_i 为表 2 中各类试件 1~7 工况对应强度数值。依据公式(2), 风化系数数值见表 3。

表 2 砖饱水度及各类试件抗压、抗剪强度实验结果

Table 2 Brick saturation degree and compressive and shear strength

工况	1#试件 件饱水度/%	2#试件 件强度/ MPa	3#试件 件强度/ MPa	4#试件 件强度/ MPa	5#试件 件强度/ MPa
工况 0		9.37	3.94	3.36	0.256
工况 1	36	11.4	6.02	3.74	0.251
工况 2	53	9.17	5.7	3.78	0.285
工况 3	53	9.56	6.32	4.33	0.262

续表 2

工况	1#试件 件饱水度/%	2#试件 件强度/ MPa	3#试件 件强度/ MPa	4#试件 件强度/ MPa	5#试件 件强度/ MPa
工况 4	52	10.22	6.14	4.67	0.218
工况 5	69	8.96	5.36	4.11	0.193
工况 6	73.2	8.95	6.17	4.08	0.219
工况 7	77.2	8.4	4.57	3.83	0.102
均值	59.4	9.52	5.75	4.07	0.218
均方差	16.7	0.93	0.86	0.40	0.057
变异系数	0.281	0.097	0.155	0.10	0.256

注: 工况 0 为未风化的标准对比试件。

表 3 各类试件风化系数

Table 3 Weathering coefficient of various specimens

工况	2#试件	3#试件	4#试件	5#试件
工况 0	1.00	1.00	1.00	1.00
工况 1	1.22	1.516	1.113	0.98
工况 2	0.98	1.447	1.125	1.113
工况 3	1.02	1.60	1.289	1.023
工况 4	1.09	1.558	1.39	0.851
工况 5	0.96	1.36	1.223	0.754
工况 6	0.96	1.566	1.214	0.855
工况 7	0.90	1.16	1.14	0.398

风化系数反映风化影响下砌体强度衰减程度, 砌体强度衰减导致砌体构件抗力削弱, 承载能力随之下降, 本文用“风化程度”表示风化影响下的砌体构件抗力不同削弱程度。

依据风化系数的大小, 参照“民用建筑可靠性鉴定标准中砌体结构构件安全性评级办法”^[15], 把砌体构件的风化程度划分为未风化、基本未风化、风化、严重风化 4 种, 分别用 a、b、c、d 表示。其中, a 为“未风化”, 表示安全度满足, 砌体具有足够的承载力; b 为“基本未风化”, 表示安全度略低, 尚不显著影响砌体承载力; c 表示“已经风化”, 表示安全度不满足要求, 显著影响砌体承载力; d 为“严重风化”, 表示安全度严重不足, 砌体结构承载力严重削弱, 见表 4。依据表 4 对本实验中 7 种工况试件实验结果进行评定, 见表 5。

表 4 砌体结构风化程度评定标准

Table 4 Evaluation of weathering degrees for masonry

风化程度级别	古代砖砌体风化系数	风化程度级别	古代砖砌体风化系数
a	≥ 1.0	c	≥ 0.85
b	≥ 0.90	d	< 0.85

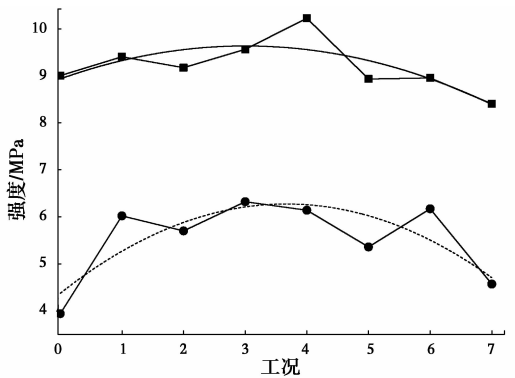
表 5 7 种不同风化工况试件风化程度评定
Table 5 Weathering degrees for seven cases

工况	2# 试件	3# 试件	4# 试件	5# 试件
工况 1	a	a	a	b
工况 2	b	a	a	a
工况 3	a	a	a	a
工况 4	a	a	a	c
工况 5	b	a	a	d
工况 6	b	a	a	c
工况 7	b	a	a	d

3 实验结果分析

3.1 孔隙水和温度变化对材料风化性能影响

依据表 2 实验结果数值作图 4。



注: ■—砖 ●—灰浆 $y = -0.0025x^2 + 0.0655x + 9.1933$
 $y = -0.0056x^2 + 0.2071x + 4.3742$

图 4 不同工况下灰、砖抗压强度

Fig. 4 Material compressive strengths versus different experimental cases

由图 4 可以看出,灰浆和砖的抗压强度数值随着非饱水冻融作用呈现先增大后减少的趋势:工况 1 到工况 2,饱水度由 36% 增加到 53%,冻融下试件强度随之提高,风化系数也随之提高;工况 3 到工况 4,饱水度数值稳定在 52%~53% 区间,冻融状态下的试件强度数值达到最大值区域,砖和灰浆的抗风化能力达到最佳状态;工况 5 到工况 7,饱水度数值依次增大为 69%、73.2%、77.2%,强度曲线呈现陡然降低趋势,达到工况 7 时,灰浆和砖强度为最小值,部分砖试件因冻胀呈现断裂。

Uranjek 等^[16]证明了潮湿状态下的现代砖、灰浆及砌体试件在 50 次冻融循环后初始抗压强度提高,和本实验结果具有相似性。遗憾的是,强度提高的机理需要进一步研究,文献很少有类似报道。笔者初步分析可能是材料的自愈作用或非饱水冻融导

致硅酸盐材料的成分重新组合的结果,但这需要新的实验验证。

饱水冻融对砖耐久性影响的研究成果显著^[17-20],非饱水冻融对砖耐久性影响的研究成果匮乏。非饱水冻融真实表征了自然界中温度和水对砖塔的实际影响。由于饱水冻融只是非饱水冻融的极限状态,本实验采用非饱水冻融作用研究风化对古代砖砌体力学性能变化影响十分必要。

3.2 材料风化对砌体结构力学性能影响

非饱水冻融作用下,作为单一材料,砖和灰浆强度产生了如图 4 所示变化。在砌体结构中,砖和灰浆为组分材料,其各自组分强度 $F_{(b,j)}$ 决定砌体结构强度,按公式(3)和(4)计算。

$$\begin{cases} F_{(b,j)} = \frac{f_m}{f_b + f_j} \times f_{(b,j)} \\ F_b = \frac{f_m}{f_b + f_j} \times f_b \\ F_j = \frac{f_m}{f_b + f_j} \times f_j \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \eta_{(b,j)} = \frac{F_{(b,j)}}{F_b + F_j} \\ \eta_b = \frac{F_b}{F_b + F_j} \\ \eta_j = \frac{F_j}{F_b + F_j} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_b 为古砖材料强度; f_j 为灰浆材料强度; f_m 为砌体强度; F_b 为砖组分强度; F_j 为灰浆组分强度; $\eta_{(b,j)}$ 、 η_b 、 η_j 分别为砌体、砖和灰浆的强度贡献系数。

采用表 2 实验结果,依据公式(3)、(4)计算,组分强度及贡献系数见表 6。由表 6 可以看出,工况 1 到工况 3,砖和灰浆的组分强度均呈现上升趋势;工况 3 和工况 4 区间, F_b 和 F_j 数值达到最大值区域;工况 5 到工况 7, F_b 和 F_j 数值呈现下降。砖和灰浆的组分强度同样呈现先升后降的趋势。

表 6 中砖组分强度 F_b 的平均强度为 2.536 MPa,比工况 0 提高了 7.2%,灰浆组分强度 F_j 的平均强度为 1.538 MPa,比对应工况 0 提高了 54.6%。

砖是多孔材料,体量大,受非饱水冻融影响也大,客观上凸显了灰浆组分强度的作用。另外,石灰的水硬性也是导致灰浆组分强度显著提高的主要原因。

由于灰浆组分强度的显著提高其风化程度评定值也随之提高。表 6 中,所有工况的灰浆试件,其风化程度均为 a;而砖的风化程度由 a 逐渐降到 b。

虽然灰浆组分强度提高显著,由于砖在砌体结

构中的体量远大于灰浆,砖强度对砌体结构强度贡献远大于灰浆,砖强度贡献率为 63.1%,灰浆强度贡献率为 36.9%。

表 5 中,4#试件风化程度评定等级为 a,而 2#试件由 a 到 b。笔者认为,由于砌体抗压试件体量大,和 2#试件相比,试件内部砖受冻融影响小,砌体抗压试件轴压力学性能受冻融影响也小。

表 6 不同工况下的古砖、灰浆组分强度

F_b, F_j (MPa) 和贡献系数 η_b, η_j

Table 6 Strength fraction and contribution coefficient of ancient brick units and mortar

工况	F_b	F_j	η_b	η_j
工况 0	2.365	0.995	0.70	0.296
工况 1	2.44	1.292	0.654	0.346
工况 2	2.33	1.449	0.617	0.383
工况 3	2.606	1.723	0.602	0.398
工况 4	2.917	1.752	0.625	0.375
工况 5	2.57	1.538	0.626	0.374
工况 6	2.407	1.665	0.591	0.409
工况 7	2.48	1.35	0.648	0.352
1~7 平均	2.536	1.538	0.631	0.369

3.3 砌体构件风化程度的评定标准

由表 3 看出,本实验采用的非饱水冻融已经对试件形成不同程度损伤:工况 7 中,2#试件和 5#试件的风化系数分别为 0.90 和 0.398。工况 7 的 5#试件其承载力已经严重削弱。

依据砌体构件抗力 R 、作用效应 S 和结构重要性系数 γ_0 ,可对砌体结构构件承载能力进行分级评定^[15],分级可依据 $R/\gamma_0 S$ 数值大小划分。抗力按公式(5)确定。

$$R = \varphi \times A \times f \quad (5)$$

式中: φ 为影响系数; A 为受压面积; f 为砌体强度。

风化系数反映风化导致砌体强度的衰减,也反映了砌体抗力 R 数值的削弱,反映砌体构件承载能力下降。依据风化系数数值大小评定材料和砌体构件风化程度,不同风化程度表示砌体材料和构件承载能力下降的不同状态。由此看出,“风化程度”指标表示风化对砌体材料、构件承载能力的影响,依据风化系数评定砖砌体的风化程度具有可行性。

表 5 为各工况风化程度评定值,反映不同工况不同程度的风化影响。例如:工况 3 风化程度为 a,表示试件在饱水度为 53%、冻融循环次数为 15 次时的风化影响结果;工况 7 风化程度为 d,表示饱水

度为 77.2%、冻融循环次数为 35 次时的风化影响结果。评定值依据该工况中各类试件评定最小值作为该工况评定值^[15]。

表 5 看出,非饱水冻融对砌体抗剪强度的影响是显著的,工况 4~7 的砌体抗剪试件风化程度评定等级依次为 c、d、c、d,更为严重的是,工况 7 的风化系数为 0.398,反映了当区域环境和工况 7 相同时,砌体抗剪强度降低约 60%。

本实验中砌体抗剪强度试件为纯剪试件,试件破型时沿通缝方向的两灰浆面基本同时开裂(图 3(c)),保证了剪力传递效果,减少了实验误差。实验人员在和压力机上下压板接触的 3 个试件顶面均匀铺贴灰浆,灰浆平行面垂直于抗剪灰缝,灰浆面上又铺垫了柔性垫片。钱义良证明了采用铺设柔性垫片可以提高砌体抗剪试件实验精度^[21]。

笔者认为:导致砌体抗剪强度显著降低的主要原因是试件砌筑灰浆冻胀。表 2 中灰浆强度为立方体试件强度(图 3(b)),成型工艺要求灰浆拌合物在实验模具中螺旋形插捣 25 次^[11]。抗剪试件中的灰浆不可能进行插捣,其密实性小于立方体灰浆试件。抗剪试件灰浆的密实度也不如砖砌体实体灰浆,砖砌体实体施工中因砌体不断受到自重及上部荷载的压缩作用,砌体内砖与水平灰缝灰浆的接触越来越均匀,密实度越来越好^[22];抗剪试件(图 3(c))中灰浆既不能插捣,也无更多的自重对灰浆压缩,其密实性相对疏松。实验舱雨水顺着疏松的灰缝缝隙进入试件内部集聚,随着淋雨次数的增加,集聚水逐渐增多,集水区域局部冻胀,削弱了砖和灰浆的粘结性能;弹性模量不同也影响砖和灰浆的粘结。和砌体轴压相比,灰浆与砖粘结性能在砌体剪切受力形式中更具重要性,所以,非饱水冻融下,砌体抗剪强度下降速率远大于砌体抗压强度的下降速率。

2008 年 5 月 12 日,中国四川汶川发生里氏 8.0 级特大地震,地震造成 28 座古塔毁损或倒塌,这些古塔的建造年代分布为公元十世纪到公元十九世纪^[23]。地震前,轴压是古塔砌体主要受力形式,经历几百年风雨侵蚀未倒塌,反映古塔结构轴压性能尚能满足;地震后,除了地震能量波大,塔砌体自身水平荷载抗力极大消弱也是倒塌主要原因。一些倒塌古塔的塔砖上已无灰浆的痕迹,长期的风化导致许多古塔砌体中砌筑灰浆一点点的消失。可见,对于古代塔等高耸结构,风化长期影响下,砖砌体水平荷载抗力的削弱是影响古塔承载力的主要原因。抗剪强度是砌体结构抗震设计中的重要内容。

4 结论

不同饱水度、不同冻融次数的实验舱环境对自然界风化进行人工模拟的不同状态砖、灰浆、砌体抗压和砌体抗剪等力学性能的实验结果显示:饱水度是反映材料冻融性能的重要指标;把古塔实体饱水度控制在53%,冻融下的古砖砌体就能保持最佳状态的抗风化能力。

非饱水冻融作用导致试件强度呈现先升后降的趋势,与文献[16]具有相似性。

在非饱水冻融作用下,抗剪试件强度被严重削弱。古代砖砌体材料和砌体试件力学性能的变化规律,借鉴地质科学领域的“风化系数”概念,依据风化系数和衰减强度的对应关系,提出了古代砖砌体构件风化程度评定方法,用风化程度反映古塔砌体抗力的变化和砌体承载能力的变化。

参考文献:

- [1] 工程岩体分级标准:GB50218—94[S]. 北京:计划出版社,1994.
Standard for engineering classification of rock masses; GB 50218-94 [S]. Beijing: China Plan Press, 1994. (in Chinese)
- [2] 孙满利,王菲,王旭东,等. 敦煌寿昌城遗址墙体表面风化特征研究[J]. 敦煌研究, 2009(6):81-86.
SUN M L, WANG F, WANG X D, et al. Study on wall surface weathering behavior for heritage site in Cang city of Dunhuang[J]. Dunghang Research, 2009(6):81-86. (in Chinese)
- [3] 张中俭,杨志法,卞丙磊,等. 平遥古城墙基外侧砂岩的风化速度研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10):1628-1632.
ZHANG Z J, YANG Z F, BIAN B L, et al. Weathering rates of sandstone in lower of walls of Ancient City of Pingyao [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10):1628-1632. (in Chinese)
- [4] 谈晓青,刘卫东,杨伟波,等. 利用风洞加速砖风化的实验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(Sup6):90-93.
TAN X Q, LIU W D, YANG W B, et al. Experimental study on accelerating weather exposure of artificial bricks using wind tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Sup6):90-93. (in Chinese)
- [5] 李庆繁. “饱和系数”在烧结砖中的应用及其机理探讨. 新型墙材, 2013(3):26-29.
LI Q F. The application and mechanism of “saturation coefficient” in sintering brick[J]. New Wall Material 2013, 3:26-29. (in Chinese)
- [6] 烧结普通砖:GB 5101—2003 [S]. 北京:中国标准出版社,2003.
Fired common bricks:GB 5101-2003 [S]. Beijing:China Standards Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 汤永净,邵振东. 非饱水冻融作用下的古砖动弹性模量[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 & Engineering, 2015, 37(6):1-6. (in Chinese)
- [9] RITCHIE T, DAVISON J I. Moisture content and freeze-thaw cycles of masonry materials [J]. Journal of Materials. 1968, 3(3):658-671.
- [10] FAGERLUND G. The significance of atfreezing of pore and brittle materials [C]// Proceedings of the scholar CF, Durability of Concrete, Detroit: American Concrete Institute, 1975, 13-65.
- [11] 建筑砂浆基本性能实验方法标准:JGJ/T70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
Standard for test method of performance on building mortar: JGJ/T70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Chinese national standard. Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 封秋娟,李义宇,李培仁,等. 山西云微物理特征的地面观测[J]. 气候与环境研究. 2012, 17(6):727-739.
FENG Q J, LI Y Y, LI P R, et al. Ground observation of microphysical properties in shanxi province [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6):727-739. (in Chinese)
- [14] 张卉,李春华,陈永明,等. 长治市近50年降水量变化特征及趋势分析[C]//第31届中国气象学年会S8第16届全国云与人工影响天气科学会议-大气水资源开发利用与气象防灾减灾,北京,2014:1-12.
ZHANG H, LI C H, CHEN Y M, et al. 2014. Feature

- and trend analysis of precipitation change during 50 years in Changzhi County [C]// 31st China Meteorological Annual Meeting, Beijing, 2014: 1-12. (in Chinese)
- [15] 民用建筑可靠性鉴定标准:GB 50292—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,1999.
Standards for appraiser of reliability of civil engineering: GB 50292-1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,1999. (in Chinese)
- [16] URANJEK M, BOKAN-BOSILJLOV V. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of historical brick masonry [J]. Construction and Building Materials. 2015, 84:416-428.
- [17] WARDEH G, PERRIN B. Freezing-thawing phenomena in fired clay materials and consequences on their durability [J]. Construction and Building Materials, 2008,22: 820-828.
- [18] HANSEN W, KUNG J H. Pore structure and frost durability of clay bricks [J]. Materials and Structures, 1988, 21:443.
- [19] MAAGE M. Frost resistance and pore size distribution in bricks [J]. Material and Constructions, 1984, 17 (101):345.
- [20] 商效瑀,郑山锁,徐强,等. 冻融循环下轴心受压砖砌体损伤本构关系模型[J]. 建筑材料学报, 2015,18(6): 1045-1054.
- SHANG X Y, ZHENG S S, XU Q, et al. Damage constitute model of brick masonry under freeze-thaw cycles and axial compression [J]. Journal of Building Materials, 2015,18(6):1045-1054. (in Chinese)
- [21] 钱义良,施楚贤. 砌体结构研究论文集[M]. 长沙:湖南大学出版社. 1988.
- QIAN Y L, SHI C X. The proceedings of masonry structures[M]. Changsha: Hunan University Press. 1988. (in Chinese)
- [22] 施楚贤. 砌体结构理论和设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- SHI C X. Theory and design of masonry structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [23] 谌壮丽,王祯. 古塔纠偏加固技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- SHEN Z L, WANG Z. Un-inclination and Reinforcement techniques for ancient pagoda [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese)

(编辑 胡玲)