



非饱水冻融作用下的古砖动弹性模量

汤永净¹, 邵振东²

(1. 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;

2. 上海仰韶古建筑保护科技发展有限公司, 上海 200092)

摘要:弹性模量是反映材料刚度的重要指标。自然界中雨淋和冻融导致古建筑砌体砖处于非饱水冻融状态。通过大气环境实验舱对古砖进行非饱水冻融作用下的饱和系数、饱水度、动弹性模量、相对动弹性模量等技术参数实验,分析了非饱水冻融作用下古砖弹性模量变化规律。实验结果表明,饱水度大于等于60%时,非饱水冻融导致古砖试件动弹性模量和相对动弹性模量数值均出现明显下降趋势;饱水度小于60%时,非饱水冻融对动弹性模量和相对动弹性模量数值影响较小。非饱水冻融作用下,古砖的初始抵抗风化能力大小是影响动弹性模量和相对动弹性模量数值的重要因素。同时,对非饱水冻融作用下反映古砖抵抗冻融损伤能力的极限饱水程度等关键参数进行了讨论。

关键词:非饱和水;冻融;饱水度;动弹性模量;饱和系数

中图分类号:TU522.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0001-06

Dynamic elastic modulus based on unsaturated water freeze-thaw action for ancient bricks

Tang Yongjing¹, Shao Zhendong²

(1. College of Civil Engineering; Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University),

Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. Shanghai YANHSHAO Protection of Ancient Building Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Elastic modulus is one of the most important indexes to reflect material stiffness. Raining and freeze-thaw lead brick masonry to be in the state of unsaturated water freeze-thaw. The experiment aims to obtain the elastic modulus of ancient bricks under various unsaturated water freeze-thaw. The brick samples were put in the environmental chamber to carry out raining and freeze-thaw action. The experiment including saturated coefficient, saturated degree, dynamic elastic modulus and relative elastic modulus were carried out for these samples. Results show that the dynamic elastic modulus of the samples obviously decreases when saturated degree is equal to or larger than 60%; the elastic modulus of the samples have no significant change when saturated degree is less than 60%, and the samples break when their saturated degree reached a certain value. This paper also discusses parameters like limit saturated degree, which

收稿日期:2015-07-30

基金项目:国家自然科学基金(52178359)

作者简介:汤永净(1965-),女,副教授,主要从事地下结构耐久性及历史建筑结构修复研究,(E-mail)ytang@tongji.edu.cn.

Received:2015-07-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52178359)

Author brief: Tang Yongjing (1965-), associate professor, research interests: underground structural durability and historical building rehabilitation, (E-mail) ytang@tongji.edu.cn.

reflect the freeze-thaw resistance for ancient bricks.

Key words: unsaturated water; freeze-thaw; saturated degree; dynamic elastic modulus; saturated coefficient

古砖孔隙自由水广泛存在于其各种毛细孔或大孔中,自由水在毛细孔中的存在数量由材料的毛细吸水能力大小确定,决定了材料的“潮湿”程度。随着材料毛细水的增加,毛细吸水能力逐渐减少。当材料毛细水达到饱和状态时,毛细吸水能力为零^[1]。材料的毛细吸水能力大小决定了材料饱水度大小,饱水度指材料孔隙中的充水程度。被冻固体材料在许多情况下的孔隙水是非饱和的^[2]。砖石文物建筑的基础长期处于潮湿或干湿交替环境中,导致基础古砖孔隙水始终处于饱水及非饱水的交替转换状态;古建筑主体结构(例如外墙砖砌体、砖柱、屋面砖等)均在地面以上,地下毛细水作用随建筑物高度而逐渐减弱,裸露于自然界中的古砖砌体材料和砌体结构长期被自然界中的雨水冲刷,毛细吸水能力使雨水会渗透到古砖孔隙,根据降雨量的大小和降雨时间的多少,古砖孔隙呈现不同的饱水度。一般情况下,“连续淋雨 13 h 以上有可能达到饱和”^[2],因此,非饱水作用为古砖孔隙水的饱水常态。本文中的饱水度表示不同非饱水冻融作用下对应的古砖含水量。

饱和与非饱和的孔隙水在受冻情况下形成的损伤是不一样的。Fagerland^[3]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,当实际含水量小于极限饱水程度,冻胀产生的破坏小;大于极限饱水程度时,冻胀产生的破坏大,极限饱水程度是材料抵抗冻融损伤的关键参数。非饱和孔隙中气态形成的空间可以容纳水变成冰后体积的改变,消除和减少了冻伤^[2]。非饱水冻融是指古砖孔隙充水程度小于极限饱水程度时的冻融。

弹性模量是反应材料刚度的重要指标。弹性模量数值大小决定了古砖刚度,古砖刚度决定了砖砌体结构的截面刚度,直接影响文物建筑的变形及安全性。Powers 等^[4]认为冻融产生的静水压力是材料孔径及孔径分布的函数。冻融产生的静水压力改变了材料原有孔结构,扩大了材料内部裂纹,降低了材料致密性,削弱了古砖材料弹性模量和古砖砌体弹性模量。由于非饱水为自然界中古砖孔隙饱水常态,因此,非饱水冻融作用下古砖弹性模量变化规律的研究对砖石文物建筑的保护十分必要。

材料静弹性模量采用测试应力-应变的常规力

学方法获取,动态法获取弹性模量可以通过无损测试实现。采用频率、声波等动态特征进行动弹性模量的测试方法得到了广泛应用^[5-7]。针对文物建筑而言,因保护需要,无法提供满足常规力学法要求的样品,更适合采用动态法获取材料弹性模量,超声法属于动态法之一。一些国家相继出台了动态法获取材料弹性模量的实验标准,美国 ASTM C 1419 标准中对应用超声法测试弹性模量进行了规范要求^[8]。

1 实验方法与实验结果

1.1 实验样品信息

所有样品砖均来自中国山西一已拆迁重建的古民居,为古民居外墙砖,外观尺寸 290 mm×140 mm×70 mm,古民居建于道光三年(公元 1823 年),非文物建筑,见图 1。其所在地属于温带大陆性季风气候,年平均降水 580 mm,年平均气温 9.7 ℃,冬季历史最低温度 -30 ℃。样品砖数量共计 80 块(含自然状态下标准比对样品 10 块)。



图 1 古民居

Fig. 1 Ancient residence

1.2 大气环境实验舱

通过大气环境实验舱实现非饱水冻融作用的人工模拟,见图 2。大气环境实验舱可以实现温度、雨淋、二氧化碳气体、湿度、温湿耦合以及太阳光谱、红外、紫外辐射等自然气候特征模拟,实验模拟的气候特征为雨淋-降温冻结-升温融化-每 5 次冻融循环后再雨淋,如此循环,直到冻融结束。其中,每 5 次冻融循环后的再雨淋会在古砖孔隙中产生淋雨量累积,淋雨量累积形成古砖不同饱水度。

实验验证冻融状态下砖的吸水能力和时间的平方根成正比^[9]。随着冻融次数的增加,材料原有孔隙体积增大并可能出现冻融裂隙,提高了材料毛细

吸水能力。每5次冻融循环后的再雨淋可以起到补充砖孔隙水分的作用,淋雨量累积可以使古砖孔隙形成不同的充水程度,以达到非饱水冻融实验中不同饱水度之目的。



图2 大气环境实验舱

Fig. 2 Atmospheric environmental test chamber

大气环境舱中雨淋和冻融参数适用范围为:温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;最小雨滴直径 $>100\text{ }\mu\text{m}$,最大雨滴直径 $<6\text{ }400\text{ }\mu\text{m}$;雨淋强度为 $0\sim 1.7\text{ mm/min}$ 。舱净腔尺寸为 $4\text{ }000\text{ mm}\times 3\text{ }000\text{ mm}\times 3\text{ }000\text{ mm}$ 。所有实验参数人工设定后计算机程序自动控制记录。

1.3 冻融实验

参照中国砌墙砖试验方法标准^[10],结合大气环境实验舱适用范围及舱净腔尺寸,环境舱人工设定冻融程序为:从降温至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始计算冻融时间, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结过程的持续时间为 5 h ,然后升温到 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温时间 3 h ,一次冻融循环结束。共计 35 次循环。每 5 次循环代表一种环境状态,共 7 种环境状态,分别用D5、D10、D15、D20、D25、D30、D35表示。升降温度值采用试件表面温度传感器显示温度为准。

1.4 雨淋实验

古民居所在区域年降雨量 580 mm ,最大雨滴直径 4.7 mm ^[11],年平均气温 9.7 ^[12]。因此,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 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。7个不同环境状态样品均在对应该冻融开始之前进行淋雨,每次淋雨 2 h ,淋雨后立即测试其饱水度。

1.5 饱和系数实验

根据中国砌墙砖试验方法标准^[10],把样品置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 鼓风干燥箱烘至恒质,称量干质量 m_0 ,然后浸泡于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淡水中 24 h ,称量湿质量 m_{24} ,再放入蒸煮箱中淡水煮沸 5 h ,称量湿质量 m_5 ,按照式(1)计算其饱和系数值 K_n 。

$$K_n = (m_{24} - m_0) / (m_5 - m_0) \quad (1)$$

饱和系数实验结果见表1。

表1 饱和系数与饱水度实验结果

Table 1 Elastic modulus and degree of saturation results

冻融次数	饱和系数	饱水度
0	0.890	0.000
5	0.870	0.360
10	0.860	0.530
15	0.900	0.530
20	0.900	0.520
25	0.920	0.690
30	0.927	0.732
35	0.939	0.772

1.6 饱水度实验

饱水度 S 为不同淋雨状态下的古砖饱水量与浸水 24 h 古砖饱水量比值,按式(2)计算。

$$S_n = (m_n - m_0) / (m_{24} - m_0) \quad (2)$$

式中: m_n 为不同淋雨状态下的古砖质量; m_{24} 为浸水 24 h 古砖质量, 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,与自然界淋雨后的古砖吸水状态具有可比性。

1.7 超声法测定动弹性模量实验

实验采用NM-4B非金属超声检测分析仪。声波的传播速度和测试材料的密度、刚度相关。所有试件进舱前首先烘干至恒重,分别测试其密度和初始声时值 t_0 ,每 5 次冻融循环结束后,分别超声测试该试件声时值 t_n ,每块砖样测试 3 点对测,见图3。根据声波的传播速度 v 和试件密度 ρ ,按式(3)计算样品的动弹性模量 E_d 。



图3 动弹性模量实验样品

Fig. 3 Elastic modulus test samples

$$E_d = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \rho v^2 = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \rho \left(\frac{l}{t}\right)^2 \quad (3)$$

式中： μ 为泊松比，取 0.2； ρ 为砖密度； v 为传播速度； l 为试样的对测长度； t 为超声波在 l 长度上的传播时间。计算相对动弹性模量 E_{dl} 按式(4)计算。

$$E_{dl} = (t_0/t_n)^2 \tag{4}$$

弹性模量计算结果见表 2。

表 2 动弹性模量实验结果

Table 2 Dynamic elastic modulus results

冻融次数	E_d /MPa	E_{dl}
0	4 761.67	
5	4 037.33	0.88
10	4 437.91	1.00
15	4 477.76	1.03
20	3 978.64	1.05
25	3 846.65	0.83
30	3 761.8	0.92
35	3 540.42	0.83

2 实验结果分析

2.1 非饱和和冻融状态的弹性模量

图 4 和图 5 依据表 2 实验结果绘制。由图 4 看出，动弹性模量随冻融次数增加呈现缓慢降低趋势：冻融开始到 20~25 次冻融的初始阶段，动弹性模量数值在 4 000~4 500 MPa 区间波动；20~25 次冻融循环后，动弹性模量降低趋势呈现规律性。相对动弹性模量的变化规律和动弹性模量变化规律基本相似：初始阶段相对动弹性模量增加，20~25 次冻融循环后，相对动弹性模量数值逐渐下降。宦文娟等^[13]在对粘土红砖饱和冻融实验中也证明“相对动弹性模量随着冻融次数的增加呈现先增加后减小的规律”，可见， E_d 和 E_{dl} 数值先增后减是砖的材性引起而非不同冻融形式所致。由表 1 可知，20~25 次冻融循环对应的饱水度大约为 60%。由于古砖动弹性模量和相对动弹性模量在 20~25 次冻融循环阶段发生明显变化。由此可知，60% 饱水度是反映古砖抵抗非饱水冻融损伤能力的重要参数之一。

古砖试件在 34、35 次非饱水冻融循环后呈现断裂和塌陷。有文献明确指出：冻伤的损害包括冻胀和局部开裂^[1]，因此，断裂也是冻伤损害的结果。试验在 35 次非饱水冻融对应的饱水度为 77.2%。笔者建议用饱水度作为反映古砖抵抗非饱水冻融损伤能力的重要参数之一，而且该饱水度符合极限饱水度的定义。

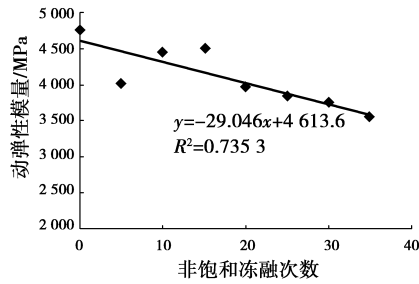


图 4 不同非饱和冻融次数的动弹性模量

Fig. 4 Dynamic elastic modulus under unsaturated cyclic freeze-thaw

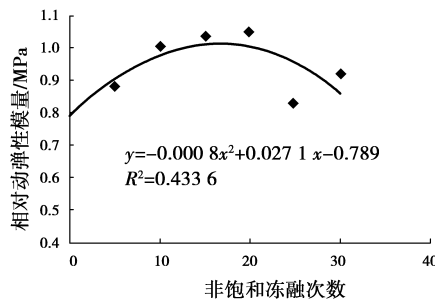


图 5 不同非饱和冻融次数的相对动弹性模量

Fig. 5 Relative dynamic elastic modulus under unsaturated cyclic freeze-thaw

实验中古砖呈现开裂破坏状态的饱水度 77.2%，小于 Fagerland^[3]提出的极限饱水程度 S_{cr} 数值 91.7%。 S_{cr} 数值是 Fagerland 通过大量混凝土实验后提出的。因历史气候以及古代烧制工艺等因素影响，冻融对古砖的损伤机理是一个复杂的演变过程。如何合理确定古砖的极限饱水程度对古建筑保护有重要价值。

2.2 饱和系数与动弹性模量

依据表 1 和表 2 实验结果绘制图 6 和图 7。从图 6 和图 7 可以看出，古砖的动弹性模量 E_d 和相对动弹性模量 E_{dl} 随饱和系数大小的变化规律与图 4 和图 5 的结果具有相似之处：饱和系数小于 0.9， E_d 和 E_{dl} 数值时有增加时有减少，饱和系数大于 0.9 以后， E_d 和 E_{dl} 数值呈现下降趋势。饱和系数 0.9 对应的饱水度大约在 50%~60%，见表 2。

实验中，35 次非饱水冻融后古砖样品即呈现断裂和塌陷，一些粘土红砖在 65 次饱水冻融后砖才呈现“片状脱落”破坏^[13]。根据静水压理论，65 次饱水冻融对试件的损伤远大于 35 次非饱水冻融。两个实验结果差异的原因在于采用的试件样品砖初始状态的抗风化能力不同。文献^[13]中粘土红砖饱和系数冻融前为 0.81、冻融后为 0.86；本实验中古砖饱

和系数为冻融前 0.89,冻融后 0.939。根据中国砌墙砖试验方法标准^[10]中的抗风化性能评定标准,粘土红砖在经历了 65 次饱水冻融后其抵抗风化能力(0.86)仍旧好于本实验未冻融前的古砖初始状态(0.89)。因此,砖样初始状态抗风化能力的差异是实验结果差异的原因所在。古砖因经受了 200 a 的自然界冻融循环影响,其抗风化能力极大削弱。在对砖进行冻融实验研究时,其初始状态抵抗风化的能力是非饱水冻融状态下影响动弹性模量和相对动弹性模量的重要因素。

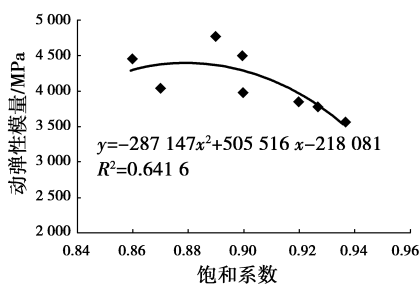


图 6 饱和系数与动弹性模量

Fig. 6 Saturation coefficient versus dynamic elastic modulus

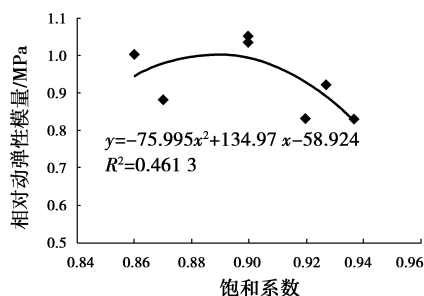


图 7 饱和系数和相对动弹性模量

Fig. 7 Saturation coefficient versus relative dynamic elastic modulus

3 讨论

孔隙水对古砖特性影响的物理机理是一个复杂的过程,湿度梯度、表面张力和孔隙水压力都会对古砖性能产生一定影响。从实验结果看,当饱水度为 60% 时,古砖抵抗冻融损伤能力出现显著变化,能否因此把 60% 饱水度确定为反映古砖抵抗冻融损伤能力的关键参数? 当饱水度为 77.2% 时,古砖试件连续多次呈现断裂。断裂是破坏的典型特征,根据静水压理论,材料的冻融破坏是极限饱和状态下的孔隙水体积膨胀的结果,能否因此判断 77.2% 是实验古砖的极限饱水程度? 如何确定古砖抵抗冻融损

伤能力的关键参数,是研究非饱水冻融作用下古砖弹性模量等材料性能的关键所在。然而,这些问题的正确答案并非一次实验就能确定,而是需要大量更具代表性的专项实验进一步验证。笔者实验的价值在于通过实验发现和提出了这些问题。

需要指出的是,在饱水和非饱水冻融作用下,不同材料的动弹性模量和相对动弹性模量的变化是不一样的。混凝土在饱水冻融后“随着冻融次数的增加,相对动弹性模量逐渐降低”^[14]。究其原因,初步认为是不同材性所致。烧结砖“粘土颗粒之间较小的孔因烧结温度而消失,并形成较大孔隙”^[15],而“大的孔隙对材料性能是有利的”^[9]。可能这也正是 一些砖砌体古建筑在千年风雨中能保存至今的原因所在。对于混凝土等其他材料在饱水和非饱水冻融作用下动弹性模量和相对动弹性模量的变化需另行研究。

4 结论

1) 在非饱水冻融状态下,古砖的动弹性模量和相对动弹性模量呈现随着冻融次数增加而降低的总体趋势,削弱了古砖刚度。

2) 饱水度 $\geq 60\%$ 时,动弹性模量和相对动弹性模量数值均出现明显下降趋势,反映出古砖刚度明显削弱;饱水度 $< 60\%$ 时,动弹性模量和相对动弹性模量数值均呈现稍有起伏但整体平稳阶段,反映出古砖刚度基本稳定;当饱水度为 77.2% 时,古砖出现断裂。

3) 古砖初始状态抵抗风化的能力是非饱水冻融状态下影响古砖动弹性模量和相对动弹性模量的重要因素。

4) 建议将古砖动弹性模量、相对动弹性模量以及饱水度作为古砖抗风化能力变化的评价指标。

参考文献:

- [1] Hall C, Hoff W D. Water transport in brick, stone and concrete [M]. 2nd ed. London: Spon Press, 2012: 45-46.
- [2] Hall C, Hoff W D. Water transport in brick, stone and concrete [M]. 2nd ed. London: Spon Press, 2012: 270-280.
- [3] Fagerland G. The significance of critical degree of saturation at freezing of pore and brittle materials [C]//Proceedings of the Scholar CF, Durability of Concrete, Detroit: American Concrete Institute, 1975:

13-65.

[4] Powers T C, Willis T F. The air requirement of frost resistant concrete [C]// Highway Research Board Proceedings, 1950, 29: 184-211.

[5] Krautkramer J H. Ultrasonic Testing of Materials [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977:26.

[6] Nagy P B. Introduction to ultra sonics, 20-251-728 [R]. Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, Ohio, USA: University of Cincinnati, 2001.

[7] Markham M F. Measurement of elastic constants by the ultrasonic pulse method [J]. British Journal of Applied Physics, 1957, 8(S6):56-63.

[8] Test method for sonic velocity in refractory materials at room temperature and its use in obtaining an approximate Young's Modulus [S]. ASTM C 1419 Standard 1999.

[9] Hansen W, Kung J H. Pore structure and frost durability of clay bricks [J]. Materials and Structures, 1988,21: 443- 447.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2542—2012 砌墙砖试验方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2012.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 2542—2012 Test methods for wall bricks [S]. Beijing: China Standards Press, 2012. (in Chinese)

[11] 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 climatic and environmental research [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17 (6): 727-739. (in Chinese)

[12] 张卉,李春华,陈永明. 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. The characteristics and tendency of precipitation change [C]//31th China Meteorological Annual Symposium S8, 16th China cloud and Weather Science Symposium- Development and Utilization of Atmospheric Water Resources and Meteorological disaster Prevention, Beijing, 2014: 1-12. (in Chinese)

[13] 宦文娟,张云升,刘国建,等. 冻融环境下黏土红砖的性能劣化规律与微结构演化[J]. 东南大学学报:自然科学版,2014,44(2):401-405.

Huan W J, Zhang Y S, Liu G J, et al. Performance deterioration and microstructure evolution of clay brick submitted to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44 (2): 401-405. (in Chinese)

[14] 曹大富,富立志,杨忠伟,等. 冻融循环下混凝土力学性能与相对动弹性模量[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012,34(6):721-724.

Cao D F, Fu L Z, Yang Z W, et al. Relationship between mechanical properties and relative dynamic elasticity modulus of concrete after freeze-thaw cycles [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 34(6): 721-724. (in Chinese)

[15] Elert K, Cultrone G, Navarro C R, et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure [J]. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4(2): 91-99.

(编辑 胡英奎)