

基于环境激励的砖砌体弹性模量识别

付想平, 彭斌, 黄煜辉, 张啸, 刘晓雪

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 弹性模量是砌体结构安全性的重要指标。通过对6个砖砌体试件分别进行500组环境激励与35组人工激励的动力测试, 获得砌体试件的基本频率, 并将其计算值进行对比, 验证环境激励识别砌体试件基本频率的可行性。根据砌体试件弹性模量与基本频率的关系, 计算了环境激励下砌体试件的弹性模量, 计算结果与试验结果和我国现行规范取值吻合较好, 为进一步研究砌体结构损伤识别及进行有限元分析提供了基础资料。

关键词: 砖砌体; 环境激励; 基本频率; 弹性模量

中图分类号: TU361

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0134-04

Identification of elastic modulus for brick masonry based on ambient excitation

FU Xiangping, PENG Bin, HUANG Yuhui, ZHANG Xiao, LIU Xiaoxue

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Elastic modulus is an important indicator of safety of masonry structure. Through the dynamic measurement of 500 groups of ambient excitation and 35 groups artificial excitation on six brick masonry specimens, the paper obtained the basic frequency of brick masonry specimens. It identified the feasibility of basic frequency of brick masonry specimens distinguished by ambient excitation. According to the relationship between elastic modulus and basic frequency, the elastic modulus of masonry specimens can be calculated under ambient excitation. The results agree well with the values of experiment and the current specifications. The results can provide basis data for the further study of damage identification of masonry structure and finite element analysis.

Key words: brick masonry; ambient excitation; basic frequency; elastic modulus

砌体结构是一种历史悠久的建筑结构, 关于砌体结构力学性能的试验研究、耐久性与数值模拟的研究成果相对较多^[1]。砌体的弹性模量是砌体结构基本力学性能指标, 是砌体结构进行动力分析、强度、刚度、可靠性以及有限元分析的基础资料。GB50003-2012《砌体结构设计规范》^[2]列出了根据不同强度等级块体和砂浆的砌体试件弹性模量, 以及根据砌体的抗压强度设计值计算砌体弹性模量的公式。根据试验回归分析, 文献[3-4]提出了不同类型砖砌体抗压强度与砌体弹性模量的关系式。考虑了块体和砂浆的抗压强度、块体和砂浆的弹性模量和泊松比等因素, 倪玉双等^[5]提出了基于微观力学的匀质化方法确定砌体弹性模量。

分析了砌体弹性模量的影响因素, 闫欢欢等^[6]

提出了砖强度、砂浆强度与砌体弹性模量的三维图形。然而在砂浆强度和块体强度等级相同的情况下, 不同尺寸砌体试件的弹性模量都是相等的, 这与实际工程不符。基于结构动力特性的方法, 通过环境激励与人工激励获取砌体试件基本频率, 并不对砌体试件造成损伤^[7], 同时, 目前结构动力测试中, 固有频率的测试精度很高, 低阻尼结构基本频率的测试分辨率可以达到0.1%^[8-9]。

人工激励是最常用的激励方式, 但是对于许多大型工程结构(如高层建筑及桥梁结构等), 人工激励不易实现或施加激励的成本非常昂贵, 只能利用自然环境的风、气动载荷等环境激励下的响应来识别结构的模态参数。

本文通过对6个砖砌体试件分别进行500组环

收稿日期: 2014-03-06; 修回日期: 2014-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208300); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302); 上海理工大学环境与建筑学院大学生创新基金(201302)

作者简介: 付想平(1989-), 男, 甘肃人, 硕士研究生, 主要从事砌体结构的损伤识别研究。

通讯作者: 彭斌(1977-), 男, 广东人, 博士, 副研究员, 从事结构工程仿真和历史建筑检测与保护的研究。

境激励与 35 组人工激励的动力测试,获得砌体试件的基本频率,并将计算值进行对比分析,验证环境激励识别砌体试件基本频率的可行性。

结合有限元模拟计算砌体试件的弹性模量,并与砌体试件的静力试验弹性模量、现行规范及已有试验结果进行对比分析,为进一步研究砌体结构损伤识别及进行有限元分析提供了基础资料。

1 试验方案与动力测试

1.1 试验方案设计和试件制作

试验试件采用普通烧结砖,尺寸为 240 mm × 115 mm × 53 mm,经随机抽样后进行砖的抗压强度测试,设计强度采用 MU10 (MU9.25, $C_v = 0.058$)。砌筑砂浆为混合砂浆,设计强度采用 M7.5 (M7.44, $C_v = 0.086$)。根据 GB/T 50129 - 2011

《砌体基本力学性能试验方法标准》^[10],制作砌体试件尺寸为 240 mm × 365 mm × 766 mm,设计灰缝厚度为 10 mm,试件编号 $S_1 \sim S_6$ 。按规范要求将试件砌筑在试验场地地面之上,如图 1(a)所示。

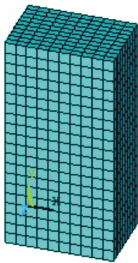
1.2 有限元模型

砌体试件采用 SOLID 65 单元离散建模,有限元模型如图 1(b)所示。

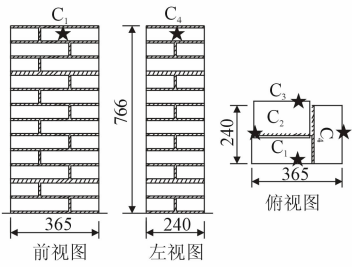
密度根据砌体试件尺寸与称取的砌体试件重量计算,6 个砌体试件密度均值为 $1\,813\text{ kg/m}^3$ ($C_v = 0.02$),弹性模量根据 GB 50003 - 2012《砌体结构设计规范》,由砖和砂浆的强度确定砌体强度后,查规范取为 $2\,704\text{ N/mm}^2$,泊松比根据中国科学院工程力学研究所 6 个砖砌体泊松比的实验值取为 0.147,模型底部为固定约束。



(a) 试件砌筑于试验场地



(b) 有限元模型



(c) 试件尺寸与测点布置 (单位: mm)

图 1 砌体试件与有限元模型及传感器布置

1.3 传感器布置

在进行结构动力测试时,为了保证能够得到砌体试件整体的动力特性,一般将加速度传感器布置在试件动力响应最大处,以提高信噪比。根据有限元模拟得到的基本振型,将加速度传感器($C_1 \sim C_4$)用胶水粘于砌体试件顶部,试件尺寸及测点布置如图 1(c)所示,测试现场是在不完全封闭的环境中进行,无外界干扰。

1.4 测试方案

动力测试时,砌体试件下端固定于地面。试验所用压电加速度传感器频率采集范围 1 ~ 10 000 Hz,灵敏度 10.49 mV/g。根据有限元模型模态分析结果,采样频率取为 350Hz,环境激励时,每个砌体

试件采集 500 次数据,每次同时获得 4 条加速度时程,采集时间为 300 s;人工激励时,每个试件采集 35 次数据,每次同时获得 4 条时程记录,每条记录长度为 3 072 个加速度数据。

2 试验数据分析

对测试得到的加速度时程进行傅里叶变换,得到功率谱曲线,曲线上横坐标频率所对应纵坐标的峰值就是砌体试件的基本频率,图 2 是环境激励下砌体试件 500 组基本频率实测值的分布,图 3 是人工激励下砌体试件 35 组基本频率实测值的分布。

由图 2 与图 3 基本频率实测值的分布可以看出,环境激励下砌体试件基本频率的实测值与人工

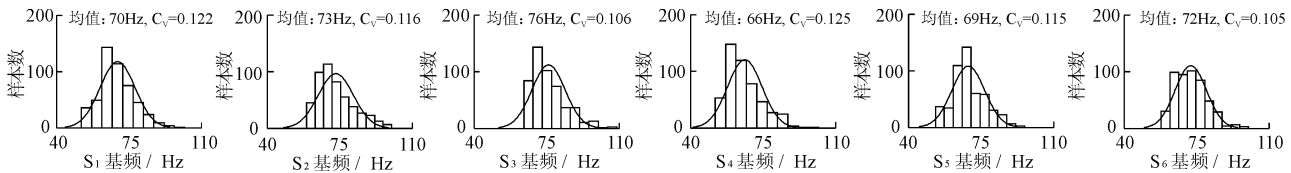


图 2 环境激励下砌体试件基本频率实测值的分布

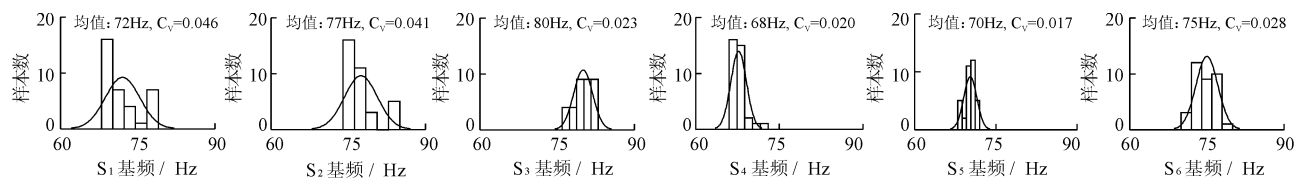


图3 人工激励下砌体试件基本频率实测值的分布

激励下基本频率的实测值吻合较好,人工激励基频均值/环境激励基频均值=(1.03,1.05,1.05,1.03,1.01,1.04),平均值为1.04,变异系数0.015,说明采用环境激励识别砌体试件基本频率能够达到预期的要求。

3 砌体试件弹性模量识别

3.1 静力试验

砌体试件弹性模量试验在上海理工大学结构实验室 1000kN 压力机上进行。根据 GB/T 50129 – 2011《砌体基本力学性能试验方法标准》计算砌体试件弹性模量时,首先预估砌体试件的破坏荷载,在预估破坏荷载的 5% ~ 20% 区间内反复预压 3 ~ 5 次,使安装在砌体两个宽侧面的轴向应变值的相对差小于 10%,然后按预估破坏荷载的 5%,约每级 10 kN 进行加载,直至试件破坏,停止试验,记录试件的破坏荷载值。

砌体试件变形是通过粘贴在试件宽侧面中部和窄侧面中部的位移计测量得到,试验结果列于表 1,弹性模量根据 GBT 50129 – 2011《砌体基本力学性能试验方法标准》中应力应变关系曲线取值。

表 1 砌体试件静力试验					mm, kN, MPa
编号	截面尺寸	破坏荷载	抗压强度	弹性模量 E_4	
S ₁	242 × 367	316.235	3.56	2335	
S ₂	239 × 365	327.385	3.75	2642	
S ₃	241 × 358	406.486	4.71	3062	
S ₄	241 × 366	295.168	3.35	2231	
S ₅	238 × 363	302.060	3.50	2316	
S ₆	239 × 361	318.010	3.69	2450	

3.2 砌体试件弹性模量计算

(1) 规范法公式。根据 GB 50003 – 2012《砌体结构设计规范》,当砖的强度为 MU10,砂浆强度为 M7.5 时,可按(1)式计算砌体的弹性模量:

$$E_1 = 1600 f \tag{1}$$

式中: f 为砌体抗压强度设计值。

(2) 施楚贤^[3]根据砖砌体的弹性模量试验结果,提出了(2)式来计算弹性模量:

$$E_2 = 370 f_m \sqrt{f_m} \tag{2}$$

式中: f_m 为砌体抗压强度平均值。

(3) 刘桂秋等^[11]根据砖和砂浆弹性模量计算砖砌体试件的弹性模量:

$$E_3 = \frac{4020 f_1^{0.22} f_2^{0.84}}{3.17 f_1^{0.22} + f_2^{0.84}} \tag{3}$$

式中: f_1 、 f_2 为砖和砂浆的抗压强度平均值。

4 基于环境激励的砌体弹性模量计算

根据以上文献公式计算砖砌体的弹性模量,实际上只考虑了砖和砂浆的抗压强度对砌体弹性模量的影响,并没有考虑砌体试件尺寸对弹性模量的影响。

基于环境激励的砌体试件弹性模量计算,实际上是对环境激励得到的砌体试件基本频率,按一定间隔取频率点,在有限元 ANSYS 中计算砌体试件的弹性模量,通过二次曲线拟合,得到砌体试件基本频率与弹性模量之间的关系曲线,如图 4 所示。通过线性插值,得到 6 个砌体试件环境激励 500 组弹性模量的实测值,其均值与变异系数列于表 2。

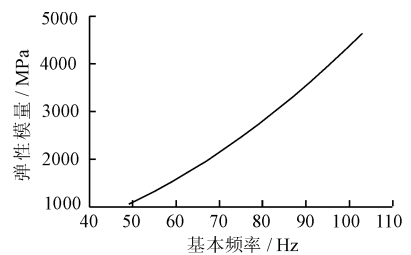


图4 砌体基本频率与弹性模量关系曲线

表 2 有限元计算砌体试件弹性模量 E_0						MPa
试件编号	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
弹性模量	2147	2371	2552	1951	2103	2311
变异系数	0.249	0.240	0.218	0.260	0.234	0.215

由表 2 可以看出,6 个砌体试件弹性模量的变异系数足够的小,说明环境激励识别砌体试件的弹性模量,能够满足工程实际要求,表中 E_0 为基于环境激励的弹性模量, E_4 为根据应力应变关系曲线得

到的弹性模量。

3.3 计算结果比较分析

表 3 列出了文献已有公式、根据应力应变关系曲线及基于环境激励的方法确定砖砌体的弹性模量。

由表 3 数据可知,基于环境激励计算砖砌体弹性模量的方法与根据应力应变关系曲线得到的弹性模量吻合较好,其 6 个砌体试件比值均值为 0.90,同时该方法与规范公式、其它文献公式计算得到的数值接近,能够满足试验要求。

表 3 砖砌体弹性模量计算值比较												MPa
编号	f_1	f_2	f	E_1	E_2	E_3	E_4	E_0	E_0/E_1	E_0/E_2	E_0/E_3	E_0/E_4
S ₁	9.25	7.44	3.56	2704	2485	3349	2335	2147	0.79	0.86	0.64	0.92
S ₂	9.25	7.44	3.75	2704	2687	3349	2642	2371	0.88	0.88	0.71	0.90
S ₃	9.25	7.44	4.71	2704	3782	3349	3062	2552	0.94	0.67	0.76	0.83
S ₄	9.25	7.44	3.35	2704	2269	3349	2231	1951	0.72	0.86	0.58	0.87
S ₅	9.25	7.44	3.50	2704	2423	3349	2316	2103	0.78	0.87	0.63	0.91
S ₆	9.25	7.44	3.69	2704	2623	3349	2450	2311	0.85	0.88	0.69	0.94

试验结果表明,本文所采用的环境激励识别砌体试件弹性模量的方法,能够准确的获得砌体试件的弹性模量,且测试方法快捷方便、识别结果准确可靠,能够用于工程实践,实现对建筑结构的实时监测。

5 结 语

根据试验结果,可得到如下结论:

(1) 通过环境激励与人工激励识别砌体试件基本频率的对比分析,验证了环境激励识别砌体试件基本频率的可行性,为进一步研究砖砌体结构损伤及砌体结构监测奠定基础。

(2)通过比较不同方法计算砖砌体弹性模量的结果可知,基于环境激励识别弹性模量的方法考虑了砌体试件尺寸的影响,用此方法确定的砖砌体弹性模量与试验结果、规范方法、文献公式吻合较好,可以用于工程实践。

(3) 本文方法获得的砖砌体弹性模量为进一步研究砖砌体结构损伤及进行有限元分析提供了基础资料。

参考文献:

[1] 顾祥林,彭 斌,钱义良,等.从第 13 届国际砌体大会看砌体结构的研究现状[C]//. 2005 年全国砌体结构基本理论与工程应用学术会议论文集,2005:388-395.

[2] 中华人民共和国建设部. GB 50003-2012 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[3] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[4] 吴 体,侯汝欣. 烧结多孔砖砌体弹性模量及泊松比的试验研究[J]. 建筑结构,2012,42(12):117-119+138.

[5] 倪玉双,杨伟军,蒋耀华,等. 砌体弹性模量取值的研究[J]. 四川建筑科学研究,2013,39(1):23-26.

[6] 闫欢欢,赵成文. 砌体弹性模量影响因素的分析及其计算式的拟合[J]. 砖瓦,2013(12):49-53.

[7] Brownjohn J M W. Ambient vibration studies for system identification of tall buildings[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics,2003,32(1):71-95.

[8] Friswell M I, Penny J E T. The practical limits of damage detection and location using vibration data[C]//. Proceedings of the 11th VPI& SU Symposium on Structural Dynamics and Control,1997:31-40.

[9] 谢 峻,韩大建. 一种改进的基于频率测量的结构损伤识别方法[J]. 工程力学, 2004,21(1):21-25.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.

[11] 刘桂秋,施楚贤,刘一彪. 砌体及砌体材料弹性模量取值的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):29-32.