

文章编号: 1005-1538(2016)02-0016-08

古建筑烧结粘土砖性能检测的超声波方法研究

戴仕炳¹ 刘斐² 周月娥² 居发玲² 周菡露²

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 上海保文建筑工程咨询有限公司, 上海 201700)

摘要: 烧结粘土砖作为中国古建筑使用最广泛的材料之一, 现有的机械物理性能检测方法多为破坏性的, 采用超声波无损检测法则可以最大程度保证砖的完整性。因此, 本工作对比了试验台、砖表面平整度以及砖湿度等客观条件对超声波无损检测方法的影响, 确定了超声波法检测古代粘土砖性能的操作流程。在初步测定采自山西南部及香港某古建筑的砖性能后发现, 超声波无损技术可以标定砖的机械物理性能, 并能判断同类型砖的不同劣化程度。超声波无损检测过程可以很好地保证古代砖的完整性, 不会对古建筑造成破坏, 而且具有便携性。研究结果表明, 超声波无损检测是可以推广应用的古建筑勘察及质量监测技术。

关键词: 超声波速; 烧结粘土砖; 古建筑; 强度; 含水率

中图分类号: G305; K87 文献标识码: A

DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2016.02.004

0 引言

天然石材是欧美等国最重要的文物建筑材料, 而烧结粘土砖是中国古建筑使用最广泛的材料之

一, 如西安大雁塔、安阳修定寺塔、成都地区唐宋建筑遗址以及山西等地传统建筑(图1)的承重结构均为砖砌体。砖除了作为承重体外, 还是重要的雕刻原材料, 砖雕是中国传统建筑具有代表性的小品。



收稿日期: 2015-04-29; 修回日期: 2016-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(E080102), 国家文物局文物保护科技优秀青年研究计划资助(2014223)

作者简介: 戴仕炳(1963—), 1999年毕业于德国吉森利比西大学(Justus-Liebig University), 自然科学博士, 同济大学建筑与城市规划学院教授、博导, 主要从事历史建筑、文物材料、病害机理、修复技术等研究工作, E-mail: ds_build@163.com



(a) 唐代安阳修定寺塔及其模压烧结粘土砖砌体 (b) ; (c) 山西定林寺元代建筑及其砖砌体 (d) ;
(e) 山西定林寺明清年代建筑及其砖砌体 (f)

图 1 我国具有代表性的文物建筑砖砌体

Fig. 1 Some representative brick masonry

但是,目前缺乏可靠的检测方法去标定这些砖的机械物理性能。现有的国家标准及行业标准^[1-3]均是针对新的烧结粘土砖及其砌体。20世纪末、21世纪初的研究工作^[4]参照现代粘土砖检测标准抽取墙体砖,测定抗压强度、抗折强度等,并依靠砖的抗压强度来划分砖的类型或劣化程度,与现代砖进行对比,为修复提供依据。国家文物局2014年颁布的有关青砖的行业标准仍然采用的是破坏性方法^[5]。

实践证明,现有检测方式应用到古代烧结粘土砖的检测具有很大局限性。首先,检测古代砖的一个重要目的就是为了保护古代建筑,从古代建筑本体上抽取大量砖来测试强度的过程破坏了古建筑的完整性,违背了文物保护最小干预的原则。其次由于不同年代古砖规格不统一,数量上也不足以满足随机抽样。维修用砖在性能上应该参照古代砖的参数。此外,传统压碎法只能测定单块砖某一区域的抗压抗折强度,砖不同部位的性能不能得到反映。

近20年,无损检测方法在文物建筑保护中得到广泛应用,超声波检测方法在天然石材、混凝土等无机材料方面取得重要进展^[6-10]。2005年欧洲制定了相关的超声波检测岩石标准,超声波已经成为石质文化遗产保护监测的常规方法^[11]。

与超声波在天然石材、混凝土等方面取得的大量的研究成果相反,超声波在烧结粘土砖方面的研究却很少。日本为研究铁路用旧砖的特点,专门开展了不同地区旧砖及其砌体的超声波研究^[12]。研究发现超声波速和砖的抗压强度和抗折强度具有较好的相关性。我国古建筑用的烧结粘土砖的超声波

研究鲜见报道。

为了探索出我国古建筑烧结粘土砖及砖雕等机械物理性能无损检测方法,选择新旧不同年代的材料,对比试验台、砖表面平整度以及砖本身湿度等客观条件对超声波检测的影响,确定超声波检测古代粘土砖性能的操作流程。在初步测定来自山西南部及香港某古建筑的超声波性能后发现,超声波无损技术可以标定砖的机械物理性能,并能判断同类型砖,特别是近现代建筑用同类型砖的不同劣化程度。无损超声波检测方法可以确保古代砖的完整性,不会对古建筑造成破坏,而且具有便携性,是可以推广应用的勘察及质量监测技术。

1 实验原理、仪器设备及实验样品

用于研究烧结粘土砖机械物理性能的超声波无损检测与应用到检测石材、混凝土的超声波方法在原理上是相同的,最简单的测量方式为对穿法,也叫直接测量法,即传感器一端为发射极,另一端为接收极。在已知砖长度的情况下,通过接收端测得的时间可以得出超声波在此砖中的传播速度。完整的砖超声波理论上可以按直线传播,所用时间为 t_1 ;有空洞、裂隙等缺陷的砖,超声波需要绕过这些部位发生折射从而延长传播路径或是因为在空气为介质的缝隙中传播,而延长到达时间 t_2 (图2) t_2 大于 t_1 ,所以在材料相同的前提下,带有孔隙砖的波速小于完整砖的波速。

本次试验采用的仪器为瑞士博势 Proceq 超声波检测仪(图3),采用此仪器一共测试了26块砖包括13块古砖和13块新砖(表1)。

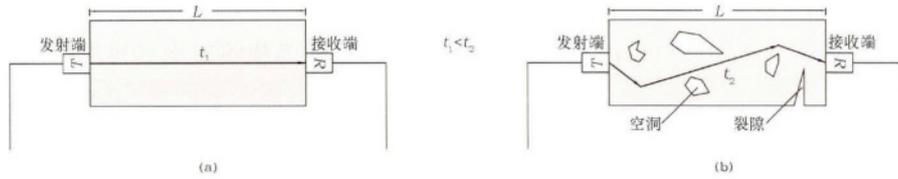


图 2 利用超声波速度测定砖石质量的原理^[13]

Fig. 2 Principle of ultrasonic velocity measurement



图 3 瑞士 Proceq 超声波检测仪(2.5W 500mh 5V)与采用直接测量法检测波速

Fig. 3 Direct measurement of ultrasonic velocity using Switzerland Proceq ultrasonic detector (2.5W ,500mh ,5V)

表 1 实验用砖及特点

Table 1 Testing bricks and their characteristics

建筑	代号	样品描述	年代	波速范围 $V_D / m \cdot s^{-1}$
垣曲县埵堆玉皇庙	JYYZ-03	2006 年修复所使用的水泥砖	2006 年修复用	2992 ~ 3039
	JYYZ-04	粘土砖,一面有拉丝痕迹	清	2108 ~ 2226
	JYYZ-06	新用粘土砖,一面有拉丝痕迹,另一面较平整	2013 年新修复	1694 ~ 1719
霍州市观音庙	JHGZ-02	一面平整,另一面粗糙,风化较轻	元	2484 ~ 2678
	JHGZ-04	砖表面风化较轻,一面平整,另一面粗糙	20 世纪 60 年代土窑烧制	1515 ~ 1632
	JHGZ-05	两侧面风化严重,一面平整,另一面粗糙	后唐	1882 ~ 1994
高平市定林寺	JGDZ-05	一面平整,另一面粗糙,有拉丝痕迹,侧面风化较严重	清	1994 ~ 2039
	JGDZ-06	半砖,一面平整,另一面粗糙,有拉丝痕迹,侧面风化较轻	清	1809 ~ 1852
	JGDZ-08	破损,表面风化较轻,砖内部掺有破碎的石子(粒径 1 ~ 4mm)	清	1663 ~ 1671
	JGDZ-11	后期维修使用的米色砖,一侧面有釉	2013 年修复用砖	1920 ~ 2015
香港某古建筑	南墙(S)	红色,夹杂较多砂粒,有部分朱红色饰面抹灰保留,整体保存完整	19 世纪	2034 ~ 2317
	东墙(E)	红砖侧表面轻微粉化,内抹灰与外饰层完全脱落		1225 ~ 1381
	西墙(W)	表面严重粉化,体积缺失明显,孔隙较大		1191 ~ 1226
新青砖	Q	新砖,未损坏	2013 年	1208 ~ 3091
新红砖	H	新砖,未损坏	2013 年	1907 ~ 3140

2 实验方法

2.1 超声波频率选择

对于一般的超声波速测试,频率选用 54kHz 的探测器。超声波测量的距离应满足大于等于一个波长 $\nu = \lambda f$ 以 3km/s 的速度计算,54kHz 的一个波长大约为 60mm,而普通烧结砖的厚度一般在 45mm 左右,所以需要通过提升超声波的频率来减小最短可测距离。在检测砖厚度方向波速时首先采用了频率

高达 500kHz 的探测器进行测量,结果发现接收端的信号强度为 0,也就是超声波未能穿透砖到达接收端。原因是高频率的波能量损失过大,在砖的内部经过多次折射与反射的过程后,波的机械能转化成了砖的内能。经过多次测试发现 500kHz 可测的最小砖的厚度为 40mm。此后,采用频率为 150kHz 的探头进行测试。对厚度为 45mm 也就是小于 54kHz 探头最小量程(60mm)的砖,分别采用 150kHz 和 54kHz 的传感器测试,经过对比发现,两

种频率超声波速有明显差异,波速相差 200m/s 左右。因此可以看出频率的选用对于超声波检测的准确性而言是一个重要因素^[14]。

表 2 砖尺寸与超声波频率的选择

Table 2 Brick size and ultrasonic frequency selection

超声波频率/kHz	适合的测量距离 d /mm
54	$d > 60$
150	$30 < d < 60$
500	$d < 40$

2.2 检测方向及波速取值

首先把超声波的两个传感器分别与砖的两端贴合并在中间涂抹耦合剂以增大传感器与砖之间的接触面积。同一块砖的同一个面多点采样,然后计算出平均值。

根据测量方向的不同,波速也会有所差异,沿着砖长度方向 L 传播的波速记为 V_L ,沿着宽度方向 W 传播的波速为 V_W ,厚度方向 D 的波速为 V_D 。在检测过程中,需要同时保留波速的最大值和最小值。其中,最大值代表完整砖的应有特性,最小值代表砖的内部可能存在缺陷或裂隙,在进行砖的强度分析中,为了反应出砖的整体强度性能,需要综合所有测

试点波速从而得到波速范围及平均值。

2.3 缺陷与检测方向的选择

采用直接测量的方法如图 4(a) 所示,利用这个方法主要可以检测出砖的裂纹与内部缺陷。

如果裂纹顺着 L 的方向,在传感器发射端与接收端之间就会出现一个新的传播介质—空气,而声波在空气中的传播速度为 340m/s 远低于在砖中的波速(2000 ~ 3000m/s),这就降低了最终显示在屏幕上的超声波数值。另一方面,在到达砖与空气之间的边缘时部分超声波会被折射或是反射,这会增加传播路径的距离因而同样会降低仪器测得的超声波速度。所以可以通过测量方向上的变化判断出裂纹出现的大致位置。波速低的位置可能有裂痕或缝隙,波速高的代表本区域砖相对完整未受损。

另一种情况是裂痕出现在其他轴线上,比如图 4(b) 中沿着 W 的方向。因为裂纹的方向与超声脉冲的传播方向一致,这样声波便不需要经过这些缝隙传播到达接收端,外加上声波为纵波的原因,平行的裂痕不会对声速造成影响。所以需要采用多个方向去测砖的各个面的超声波速,这样才会较为全面的描述其内部结构及裂纹或缺陷情况。

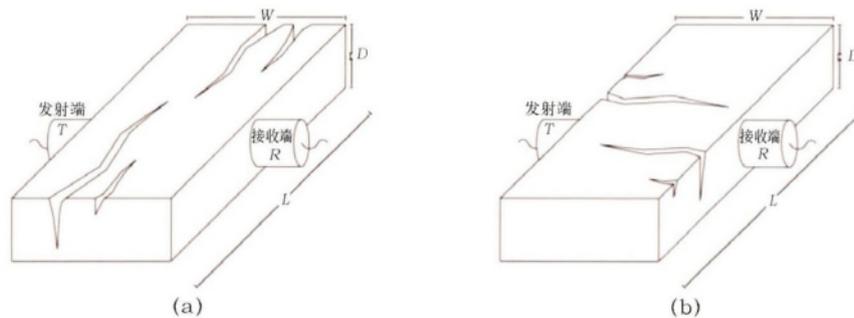


图 4 超声波对穿测试方向及其标记方法示意图

Fig. 4 Measurement direction and marking methods to anisotropic bricks

2.4 抗压、抗折强度试验

为对比砖的超声波速度与抗压强度、抗折强度

的关系,在进行完超声波测试的砖(部分新砖及某香港古建筑砖)参照文献[1]进行强度测试(图 5)。



图 5 参照文献[1]测定香港某古建筑砖的抗折(a)与抗压(b)强度

Fig. 5 Test of comprehensive and flexural/tensile strength of historical bricks

3 研究结果

3.1 影响波速的外在因素

为评估影响砖超声波速的外在因素,如不同材质试验台、砖表面平整度及砖含水率对波速造成的影响,对比了同一块砖不同条件下的波速。

3.1.1 试验台材质的影响 试验过程中,分别采用木制桌面和钢制桌面两种不同试验台支撑砖和超声波检测仪。其中 1~4 点为波速 V_W , 5~6 点为 V_L 。经过对比发现,无论是选用何种超声仪器或是哪一种砖,整体上来看支撑界面的材料并不会对其结果造成明显的影响(图 6)。

原因一方面可能是因为不锈钢比较薄,并且在不锈钢的下面为木质材料为载体。根据实际测得结果,一般在钢板中的传播速度为 5200m/s 左右,超声波频率为 54kHz。根据波的速度公式 $v = \lambda f$ 可以计算出波长约为 9.4cm,这个长度明显大于不锈钢的厚度(小于 0.5cm)。

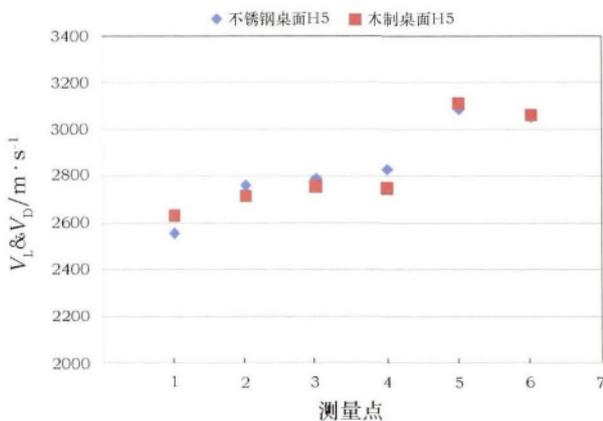


图 6 同一块砖(红砖 5#)在不同试验台超声波速比较

Fig. 6 Ultrasonic velocity of the same brick measured on two laboratory tables

另一个原因和超声波的传播方向有关。由于采用的是直接测量法,即使有一部分波在经过砖的内部时发生折射改变方向,到达桌面的波也是极少的一部分,不会对测试结果造成明显的影响。但是避免探头接触到钢表面而影响测定的波速,实际测量时宜尽量选择超声波速小于砖的介质,例如木桌作为支撑桌面。

3.1.2 平整度对砖的超声波速影响 如果砖的表面粗糙不平,超声波探测器与砖表面接触面积过小,接收端得到的信号减弱甚至接收不到信号,这样超声波速与砖的实际性能有较大误差。为比较表面平整度对超声波速的影响,在同一块砖同一测定位置上分别测未打磨及打磨后(图 7) 砖的超声波速,结

果见图 8。



图 7 砂纸打磨砖表面

Fig. 7 Sanding of brick surface

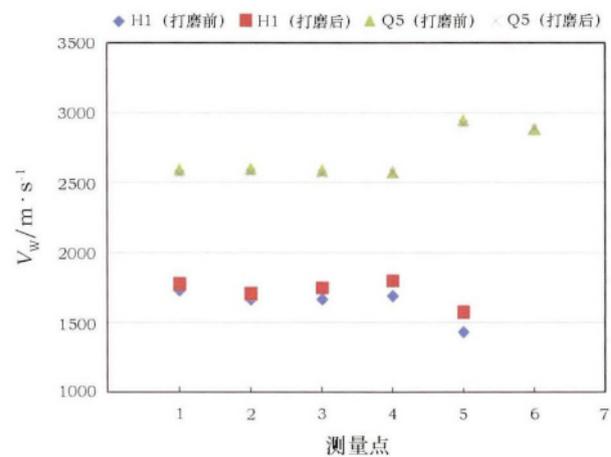


图 8 新砖(红砖代号 H 与青砖代号 Q)打磨前后的波速对比(54kHz, V_W)

Fig. 8 Comparison of ultrasonic velocity of the same brick before and after sanding (H represents red brick, Q represents grey/green brick)

从图 8 对比可以看出打磨前后波速的变化情况,其中红砖波速变化更为明显一些,打磨后波速有所增加。因此,实际实验室检测前,对于无重大历史价值且表面不平整的砖需要进行打磨处理,从而使测得的数据更加接近真实值。

3.1.3 砖含水率与波速的关系 同一块砖在同一个测量点上(同一块砖分别取 3 个测量点)测定不同含水率的砖波速,可以看出,随着含水率的增加波速整体上有下降的趋势(图 9)。含水率越高,波速越低。这与含水率高会导致强度降低的常识一致^[15]。

3.2 超声波特点及与其他机械物理性能的关系

3.2.1 超声波速与砖强度的相关性 对比新砖长度方向的超声波速与抗折强度对比,同一点采集两

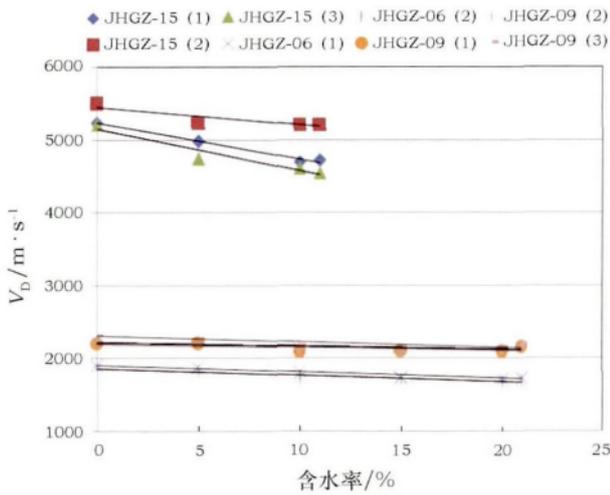


图 9 山西古代同一块砖在不同含水率下的超声波速(150kHz, V_D)

Fig. 9 Ultrasonic velocity of the same ancient brick with different moisture content from Shanxi province

次数据,测量误差控制在 100m/s 以内,可以看出,随着 L 方向波速的增加,砖的抗折性能有增强的趋

势(图 10)。砖厚度 D 方向的超声波速与抗折强度之间没有线性关系,对应点比较分散并且上下反复波动。

有限的测量数据显示,同一类型的砖的抗压强度与抗折强度随着固定方向上波速的增大而增大,劣化明显的砖强度低,对应的超声波速度也低(图 11)。

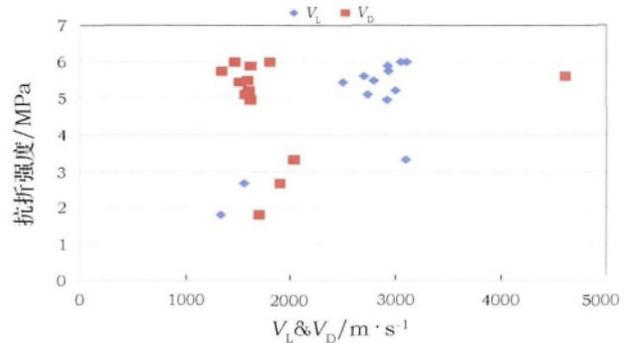


图 10 特定方向波速 V_L 及 V_D 与抗折强度关系

Fig. 10 Relationship of the particular direction ultrasonic velocity V_L or V_D and flexural/tensile strength

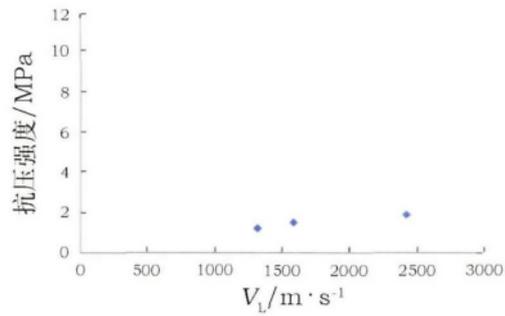
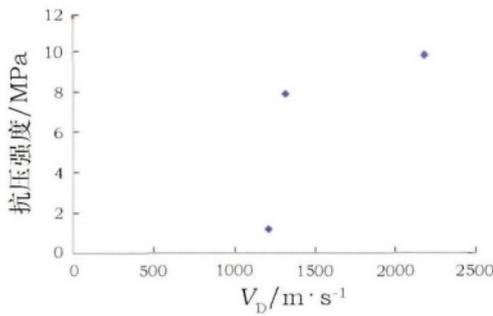


图 11 香港某古建筑砖抗压强度、抗折强度与超声波速关系

Fig. 11 Relationship of compressive (left) tensile / flexural strength (right) and ultrasonic velocity of Hong Kong some ancient architecture brick

3.2.2 超声波速与饱和吸水率关系 山西南部不同砖的超声波速随着重量饱和吸水率的增加有降低的趋势(图 12)。水泥砖饱和吸水率只有 5%,其超声波速度达到 3000m/s,与普通烧结粘土砖存在明显区别。古代烧结粘土砖的吸水率在 17% 左右时,超声波速度为 2587m/s;吸水率在 24% 左右时,其波速降低至 1700m/s。吸水率大说明砖内部的孔隙裂缝较多,这也直接导致了其强度低,超声波速减小。

4 讨论

初步试验研究说明,试验台的类型对烧结粘土砖超声波速度的测定没有明显影响,而砖的含水率会影响超声波速,随着含水率的增加,砖的超声波速

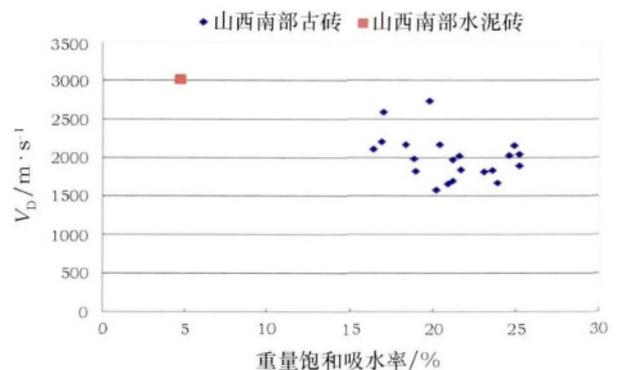


图 12 山西南部不同古砖的重量饱和吸水率与其超声波速(150kHz, V_D) 的关系

Fig. 12 Relationship of saturated water absorption in weight and Ultrasonic velocity(150kHz, V_D) of different old bricks form southern Shanxi province

度(V_D)降低。砖表面的平整度对超声波速度的读取也有影响,表面平整或经过打磨的砖波速会大一些。此外,超声波频率的选用也需要参考所测砖的两端距离,高频率的波适用于距离较短,例如砖厚度方向的测试,反之低频率的波可用于较大尺寸砖的测量。

古建筑烧结粘土砖的超声波速度与古建筑砖的质量之间存在着联系。超声波无损检测通过测试波在砖中的传播速度来判断其受损的情况,例如内部的裂痕及破损等,这些因素会改变波的传播路线,使其折射绕过其中的空隙,从而延长了波传播的所需时间,导致波速降低。利用这种波速的变化特点,可以把内部有裂痕受损的砖的波速与完好砖的波速进行对比,以此来了解砖的质量品质。超声波在较完整的砖中的传播速度较快,抗压抗折强度较高,而波速较慢的砖可以被认定为内部受损,或不够致密,其强度较低。

不同于按照现代工艺流程生产的水泥及其制品混凝土等,古砖内部结构相对均匀。而鉴于古砖的大多数为手工制备,近现代才出现机制砖,其内部结构有一定方向性,也就是组成砖的颗粒,特别是粘土矿物颗粒是有序排列的,这样就使得不同方向上的超声波速度存在差异。因此,在进行超声波检测时要明确波的传播方向。厚度方向波速(V_D)能够反映砖的抗压强度,二者存在线性关系,砖延长方向波速 V_L 与抗折强度的联系则更为紧密。这可能是古代烧结粘土砖在手工制作的过程中厚度方向受压造成的。

除此之外砖的饱和吸水率也和波速有一定联系,当砖的吸水率较高时其波速偏低。

本次初步研究还发现,同类型的砖,特别是近现代机制砖,波速倾向于分布在一个较小的范围内,当其内部出现裂痕时波速会明显降低,波速越低,抗压强度与抗折强度就越低。所以通过砖波速的大小可以划分砖的种类以及判定砖是否内部受损。根据此种现象,可以将砖归类,并确定其质量。

利用超声波检测混凝土的技术已经在国内被广泛采用,然而对于粘土砖的检测因为种种原因受到限制。首先混凝土的现代制造工艺相对统一,骨料选取的材料是可知的,而古代粘土砖种类繁多,制造工艺与原材料的选取存在差异。因为材料与制备工艺的不同使得通过波速反应出的强度在准确度上受到了限制。事实上,即使是混凝土的超声波检测也存在同样的问题,两者的根本原因是非常相似的。例如,为了增大混凝土的强度,工业上会加入粗骨料或者硅灰,硅灰颗粒小并且有高度分散性,所以可以很明显地在原有混凝土基础上增大波速,而粗骨料

对波速的影响不大甚至可以忽略不计。加入硅灰和粗骨料的混凝土在强度上是接近的,但是其波速却差异很大^[16]。古代粘土砖也因为类似的原因导致不能使超声波与抗折抗压强度单纯地建立联系,而建议对砖进行鉴定归类,这样的波速才具有实际意义。

5 结 论

基于现有研究成果,提出了检测古建筑烧结粘土砖的超声波方法测试流程,以评估其机械物理性能:

- 1) 取样,数量按照建筑重要性确定。
- 2) 对于表面粗糙不平的砖需要用砂纸打磨从而降低测量误差。
- 3) 在探测器与砖接触的地方涂抹耦合剂以使其贴合的更紧密。
- 4) 厚度 D 方向的波速 V 与砖的抗压强度联系密切,而长度 L 方向的波速 V 可以反映出其抗折强度。
- 5) 根据测量距离需要选用合适的频率,选取原则是测量距离需要大于一个波长。一般来说,40mm以下的可以用500kHz频率的探测器,40~60mm的选用150kHz的频率,60mm以上的用54kHz的探测器。
- 6) 采用探测器对穿砖的方式(直接测量法)测量在105℃烘干并冷却至室温(23 ± 2)℃后的砖的波速。

维修时替换采用的烧结粘土砖的波速应该与古代砖的波速接近。

未来的研究工作需完成中国代表性古建筑烧结粘土砖的超声波速度及相同原材料、相同烧制工艺的砖不同劣化程度超声波的特点,总结其规律,为古建筑保护及其质量监测提供科学依据。

致谢:本研究过程得到了高密度人居环境生态与节能(同济大学)教育部重点实验室(历史建筑保护实验中心)、山西省古建筑保护研究所、山西省古建筑维修质量监督站、上海德赛堡建筑材料有限公司、上海保文建筑工程咨询有限公司、上海文保建筑工程有限公司、香港新高建材工程有限公司等单位及美国耶鲁大学 Prof. Dr. Stefan Simon 的大量支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 砌墙砖试验方法: GB/T 2542-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 2542-2012, Testing method of wall bricks [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 普通烧结砖: GB 5101-2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 5101-2003, Sintered common bricks [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [3] 国家建筑材料工业局. 砌墙砖检验规则: JC 466-92 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
State Bureau of Building Materials Industry. JC 466-92, Inspection rule of wall bricks [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [4] Baer N S, Fitz S, Livingstone R A. Conservation of historic brick structure [M]. England: Donhead Publishing Ltd, 2009: 45.
- [5] 全国文物保护标准化技术委员会. 文物建筑维修基本材料——青砖: WW/T 0049-2014 [S]. 北京: 文物出版社, 2014.
National Heritage Conservation Standardization Technical Committee. WW/T 0049-2014, Basic materials for repairing heritage buildings—bricks [S]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2014.
- [6] Glenn W, Paul F, Benjamin A G, *et al.* Ultrasonic testing of reactive powder concrete [J]. IEEE Trans ultrasonics, ferroelectr freq contr, 2004, 51(2): 193-201.
- [7] Rio L M, Jimenez A, Lopez F, *et al.* Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing [J]. Ultrasonics, 2004, 42: 527-530.
- [8] 陈祥, 孙进忠, 祁小博. 石质文物风化程度的超声波 CT 检测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 4970-4976.
CHEN Xiang, SUN Jin-zhong, QI Xiao-bo. Ultrasonic CT detecting for weathering degrees of lithoid cultural relics [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2005, 24(10): 4970-4976.
- [9] Simon K, Marisa P, Kiraz G A, *et al.* Detection of structural layers of a cored marble column from the market gate of Miletus with traditional ultrasonic tomography and innovative phased array sonography [J]. Proc Int Conf Conserv Stone Earthen Architect Herit, 2014, (1): 11-17.
- [10] MA Hong-jin, MA Tao, QI Yang, *et al.* Research on ultrasonic detection stone sculptures of Qian Mausoleum, Tang dynasty [J]. Proc Int Conf Conserv Stone Earthen Architect Herit, 2014, (1): 25-30.
- [11] DIN EN 14579, Natural stone test methods Determination of sound velocity propagation, October 2004 [S].
- [12] Tadashi Kojima. Ultrasonic velocity measurement for analysis of brick structure [J]. IEEE Int Ultrasonics Symp Proc, 2008, 2-5: 398-401.
- [13] Michael A, Jeannine M, Rolf S L. Naturstein-monitoring: nachkontrolle und wartung als zukunftsweisende erhaltungsstrategien [M]. Fraunhofer IRB Verlag, 2011: 47-54.
- [14] Daponte P, Maceri F, Olivito R S. Frequency domain analysis of ultrasonic pulses for the measure of damage growth in structural materials [J]. IEEE Ultrasonic Symp, 1990, 2: 1113-1118.
- [15] 汤永净, 邵振东. 气候对中国古代塔砖材料性能劣化影响的研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(3): 33-40.
TANG Yong-jing, SHAO Zhen-dong. The effect of climate on the deterioration of ancient tower bricks [J]. Sci Conserv Archaeol, 2012, 24(3): 33-40.
- [16] 王威. 超声波检测混凝土强度分析 [J]. 科技创新与应用, 2014, (8): 187.
WANG Wei. Analysis of ultrasonic testing concrete strength [J]. Technol Innovat Appl, 2014, (8): 187.

Preliminary research on using ultrasonics to determine the physical properties of sintered clay bricks used in ancient Chinese architecture

DAI Shi-bing¹, LIU Fei², ZHOU Yue-e², JU Fa-ling², ZHOU Han-ju²

(1. College of Architecture and Urban Planning TONGJI University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai BauWin Construction Engineering Consulting Co., Ltd. Shanghai 201700, China)

Abstract: Sintered clay bricks are among the most important masonry materials used in ancient Chinese architecture. However there are still no nondestructive test methods to characterize bricks' mechanical and physical properties. Nondestructive ultrasonic test might be suitable since the old bricks will not be damaged during testing. Factors such as test bed, surface status and moisture content of the brick are considered in the test. It was found that ultrasonic velocity of a brick is associated with its mechanical strength by testing bricks from southern Shanxi and from an ancient building in Hong Kong. The ultrasonic testing results can determine the level of deterioration of similar types of bricks. This method also preserves the integrity of ancient brick, does not damage the ancient building materials. The test instrument is portable and thus can be widely used for the investigation of building defects and quality monitoring.

Key words: Ultrasonic velocity; Sintered clay brick; Ancient architecture; Mechanical strength; Water-content

(责任编辑 马江丽)