

石质文物风化程度超声波检测方法探讨

Test Methods for Detecting Weathering Degrees of Stone Cultural Relics

孙进忠/SUN Jin- zhong, 陈 祥/CHEN Xiang, 袁加贝/YUAN Jia- bei, 田小甫/TIAN Xiao- pu

中国地质大学工程技术学院, 北京 100083

School of Engineering Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

[摘要] 石质文物是文化遗产的一部分。由于年代久远,许多石质文物都遭受着严重的风化病害侵蚀。对石质文物的风化程度进行检测、评价,已经成为石质文物保护中一项紧迫的任务。从理论和方法上探讨了利用超声透射波和瑞雷波检测石质文物风化程度的可行性,并分别应用这两种方法对浙江义乌古月桥桥身条石、故宫汉白玉栏板以及北京西黄寺抱鼓石的风化程度进行了检测,取得了较好的效果。

[关键词] 超声透射波;瑞雷波;石质文物;风化程度

[中图分类号] P631.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2006)08- 0019- 06

Abstract: The stone relic is a kind of cultural heritage of mankind society. Many stone relics are suffering serious erosion of weathering that has been acting on for a long time. Inspection and assessment on the weathering degrees of stone relics has become an urgent task in the protection of stone relics. The feasibility and approach of the ultrasonic transmission wave and Rayleigh Wave to the inspection on the weathering degrees of stone relics are discussed theoretically and practically. What is also displayed in this paper is the application effect of the two methods in the inspection on the weathering degrees of an ancient stone bridge in Yiwu of Zhejiang Province, a marble fence in the Forbidden City in Beijing, and drum- holding stones beside a gate in the Xihuang Temple.

Key Words: ultrasonic transmission; Rayleigh wave; stone relic; weathering degree

CLC Number: P631.5

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2006)08- 0019- 06

1 引言

我国数千年的文明历史创造出了大量的具有重要历史意义和价值的石质文物。然而,它们中大多数经受了数千年的物理、化学、生物风化作用,风化病害严重,现状令人堪忧。因此,亟需对这些文物的风化现状进行测试、评价,并制定相应的维护措施。

对石质文物风化程度的检测手段应满足 2 个基本要求,一是无损,二是高分辨率。超声波测试属于无损检测方法,可以很好地适应无损的要求。另外,超声波频率高、波长短,对石材材质变化的空间分辨可以达到 cm 乃至 mm 的量级。更重要的是,超声波属于弹性波,超声波在介质中的传播速度与介质的弹性性状直接相关;另一方面,石质文物的风化就是石材本身弹性状态的退化,从而超声波波速与石质文物风化程度之间存在良好的相关性,这是应用超声波对石质文物风化程度进行检测的物理基础。这一点是其他物理方法无法比拟的。

地震 CT 也称地震层析成像技术,兴起于 20 世纪 80 年代,是利用应力波的走时对地球内部结构成像的技术^[1-2]。目前,CT 技术在一些大型工程上用来解决工程地质勘察,岩溶采空区的探测,水下管道的探测,大坝、桥梁和桩基的质量检测等问题^[2-10]。而在文物风化程度检测方面,CT 技术的应用却鲜有报道。我们利用超声 CT 的方法对浙江省义乌市南宋古桥——古月桥桥身条石的风化程度进行测试,取得了较好的效果^[11]。

瑞雷面波的利用始于 20 世纪 50 年代,在瑞雷波的频散特征

被发现之后,人们开始利用天然地震记录中的瑞雷波进行地球内部结构的研究^[12-14]。从 1970 年开始,人们就利用人工激发的瑞雷波来解决浅层工程地质问题^[15-18]了。现在,瑞雷波已广泛应用于工程场地地层的划分,地基处理的评价,地下空洞、岩溶的探测,公路的无损检测以及水库大坝中缺陷位置的探测和加固效果评价等^[19-22]。

与大尺度工程的探测相比,应用瑞雷波对小尺度的石质文物进行探测需要使用更高的工作频率,这要求在高频段能提取出稳定可靠的频散曲线。这一点在技术上是完全可以实现的。我们对故宫汉白玉栏板和西黄寺抱鼓石风化程度所进行的超声面波测试研究已经取得了不错的效果^[22-24]。

2 测试原理

2.1 CT 检测技术原理

对石质文物的 CT 检测方法借鉴了地震层析法,地震层析方法可分为体波层析和面波层析,而体波层析大致分为 3 种:反射层析、折射层析和透射层析。本文介绍和使用的是透射层析方法,即根据声波射线的几何运动学原理,利用声波发射、接收系统在被检测物体的一侧发射,在另一侧接收,用声波扫描被检测物体(如图 1 所示)^[4]。用于现场的观测系统为一发多收系统,即在一侧单点发射,另一侧作扇形排列接收,逐点同步沿剖面线移动进行扫描观测。

收稿日期: 2006- 06- 13

作者简介: 孙进忠,男,北京市学院路 29 号中国地质大学工程技术学院,教授,主要研究方向为岩土体动力学、岩土工程;

E- mail: sunjinz@126.com

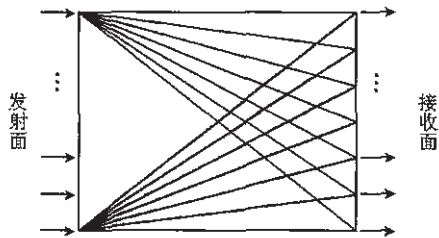


图1 超声透射 CT 原理示意图

Fig. 1 Theoretic diagram for the ultrasonic penetrating CT method

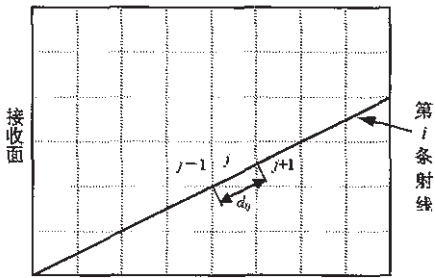


图2 网格化模型示意图

Fig. 2 Grid model of the detected object

声波在被检测的物体中传播时,纵波的走时是速度 $v(x, y)$ 和几何路径的函数,对于第 i 条射线,若射线的走时为 t_i ,则有下列积分式:

$$t_i = \int_{R_i} \frac{1}{v(x, y)} ds, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 为射线的总条数; R_i 为第 i 条射线的路径。

如图2所示,将被检测区域离散成一系列规则的网格单元。由于划分的单元较小,可以将通过每个单元的射线看成直线,也可以将每个单元中纵波的速度 $v_i(x, y)$ 看作常数,这样就可以将积分式(1)离散成线性方程组:

$$t_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}/v_i(x, y), \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: t_i 为第 i 条射线的走时; d_{ij} 为第 i 条射线穿过第 j 个网格的长度; n 为射线条数; m 为网格数。

令 $s=1/v$, 称为慢度,则式(2)实际上是一个线性方程组:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解方程组(3)就可以得到每个小方格内的声波慢度值,分别取其倒数即得到被测物体的纵波速度值分布。求解方法有多种,主要有联合迭代法 SIRT、代数重建法 ART、共轭梯度法、阻尼最小二乘法^[4]。本文使用的是 SIRT 法。

求出每个单元的纵波速度后,在现场采集与被测物材质相同的新鲜岩样,测定其纵波速度。根据国家标准《岩土工程勘察规范》,风化岩石与新鲜岩石的纵波速度之比值可以表征岩石的风化程度,从而得到被测物的风化现状。波速比与风化程度的关系如表1所示^[5]。

2.2 瑞雷波探测原理

根据瑞雷波的传播理论,沿被测介质表层传播的瑞雷波对被测介质的有效穿透深度 H 在一个波长之内,即某一波长的瑞雷波只能反映深度在一个波长之内的介质信息,有效穿透深度

表1 纵波速度比 K_v 与岩石风化程度的关系Tbl. 1 Relationship between longitudinal wave velocity ratio K_v and weathering degrees of the rock block

纵波速度比 K_v	小于 0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
风化程度	残积土	全风化	强风化	中等风化	微风化	未风化

H 与瑞雷波波长 λ_R 的关系可以表示为:

$$H = \beta \cdot \lambda_R \quad (4)$$

所以不同波长的瑞雷波传播速度可以反映测试表面以下不同深度范围内的介质性质^[6]。

在不均匀介质中传播的瑞雷波是含有多种频率成分的复杂波动,不同频率的瑞雷波有不同的传播速度,这就是瑞雷波的频散现象。根据不同频率成分,瑞雷波的传播速度与频率的对应关系即可得到瑞雷波的频散 $(V_R - f)$ 曲线。再根据波长、波速与频率之间的关系 $\lambda_R = V_R / f$ 将频散曲线转化为速度-波长 $(V_R - \lambda_R)$ 曲线,然后根据波长与深度的对应关系式(4)将速度-波长曲线转化为速度-深度 $(V_R - H)$ 曲线^[7]。根据速度-深度曲线即可对石质文物表层某一深度范围内的风化情况做出判断。

按照产生瑞雷波的震源激发方式,瑞雷波测试方法可分为稳态法和瞬态法2种。稳态法工作原理如图3所示,利用特制的激震装置输出一定单频成分的简谐振动,从而在介质中激发出单频简谐瑞雷波。不断改变输出频率,即可得到不同频率所对应的瑞雷波相速度。瞬态法工作原理如图4所示^[7],利用重锤或超声换能器在介质表面施加一个脉冲荷载,从而在介质中激发出具有特定频率带宽的波动。利用频谱分析技术提取各个单频成分的瑞雷波相速度,即可得到瑞雷波的频散曲线。稳态法的优点是可以降至 2~3 Hz 的较低频率,从而达到较大的勘探深度,并且提取瑞雷波相速度的方法简单明了,其主要缺点是仪器较笨重、现场测试比较费时。瞬态法仪器轻便、测试速度快,但是瞬态法提取瑞雷波

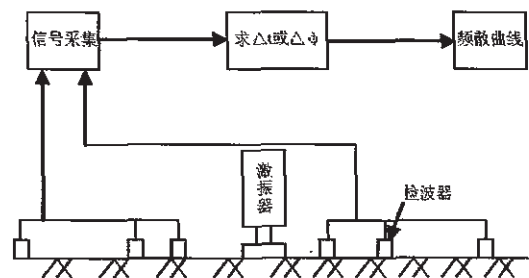


图3 稳态法示意图

Fig. 3 Sketch map of the steady-stimulating method

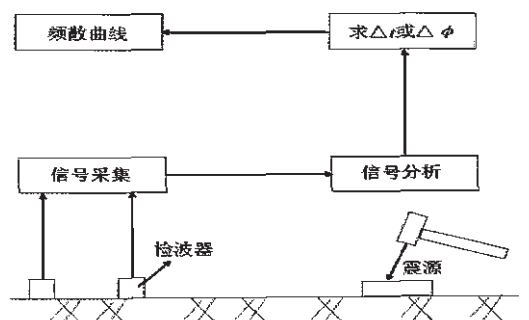


图4 瞬态法示意图

Fig. 4 Sketch map of the transient-stimulating method

相速度的分析方法比较复杂,而且探测深度较浅。

实际进行瞬态法测试时,可以根据以下方法求得瑞雷波速度-深度曲线:

- 1) 对相邻的道记录数据进行互相关:

$$\gamma_{21}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_2(t+\tau)u_1(t)dt \quad (5)$$

- 2) 对互相关函数作傅立叶变换:

$$R_{21}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma_{21}(\tau) e^{i2\pi f\tau} d\tau = |R_{21}(f)| e^{i\Delta\varphi(f)} \quad (6)$$

- 3) 相位差展开:

2个测点间波动的相位差 $D\varphi$ 分解为2个部分: 相对于2个测点上瑞雷波初至的初相位之差 $D\varphi_l$ ($0 \leq D\varphi_l \leq 2\pi$) 即互相关谱 $R_{21}(f)$ 的相位; 2个测点上瑞雷波到时差 τ 导致的相位延迟 $2\pi f\tau$ ^[23], 则2道的相位差为:

$$D\varphi = D\varphi_l + 2\pi f\tau \quad (7)$$

- 4) 计算相速度 V_R :

由下式求出不同频率 f 所对应的相速度 V_R , 获得实测频散曲线 V_R-f 。

$$V_R = \frac{2\pi f \cdot \Delta x}{\Delta\varphi} \quad (8)$$

其中 Δx 为相邻2道之间的距离。

- 5) 利用波长和深度的对应关系式(4), 将频散曲线转化为速度-深度曲线 V_R-H 。

3 工程应用

3.1 古月桥桥身条石风化程度超声 CT 检测

古月桥位于浙江省义乌市, 建造于南宋时期, 距今已有 800 多年, 属于国家重点文物保护单位, 具有重要的历史价值。古月桥为单跨拱桥, 由 5 组纵向长条石相互挤压构成五边形拱, 每 2 条相互挤压的纵向条石之间放置 1 条横向条石, 承受 2 条纵向条石间的压力。由于年代久远和环境因素的影响, 条石正受到严重的风化病害侵蚀, 结构已经发生了较严重的变形, 濒于失稳状态。

测试中使用湘潭天鸿电子研究所研制的 DB4 型 4 道工程多波参数分析仪进行波动的观测与采集, 发射面和接收面分别布置在同一条石相对的 2 个侧面。发射或接收点沿条石轴线或垂直于条石轴线方向布设, 收、发点的间距 $\Delta x=10$ cm, 收发点相对, 以便形成扫描剖面。精确测量各发射点和接收点的坐标, 以便保证 CT 剖面准确反映条石风化程度的空间分布。利用压电陶瓷发射换能器在各个发射点上依次激发超声波, 用接收换能器在对面各个测点接收各次激发所产生的超声波, 即一发多收, 仪器以 $\Delta t=0.5$ ms 的时间间隔, 将波动信息转换为数字记录。由于篇幅所限, 本文主要介绍 2-3x# 条石的测试情况。

2-3x# 条石是位于 2-4y# 和 3-4y# 2 条纵向条石之间的横向条石。如图 5 所示, 在 2-3x# 条石上布置了 2 个透射观测剖面(剖面 1 和剖面 2), 剖面垂直于 2-3x# 条石的水平延伸方向。剖面 1 位于 3-4y# 条石近旁右侧, 在纵向条石 3-4y# 和 2-4y# 相对挤压的影响区内; 剖面 2 位于 3-3y# 与 3-4y# 2 块纵向条石之间, 为非受压部位。每个剖面设 4 个测点, 接收点均设在 3-4y# 条石一侧, 激发点位于 2-4y# 条石一侧, 激发点与接收点一一对应, 布置方式与接收点相同。观测剖面的空间坐标原点设在最上部的观测点上, 横坐标 y 沿条石厚度方向右接收点指向激发点, 纵坐标 z 沿条石表面由上指向下。现场测试时, 用石膏将 4 个一致性良好的接收换能器分别耦合在同一条测线的 4 个测点上, 用超声激发换能器在条石对面的对应的 4 个激发点上依次激发, 4 个接收换能器接收并由仪器记录由激发点传播过来的透射波。根据现场实测各个激发和接收点对应的透射波走时, 应用 CT 法分析可得出

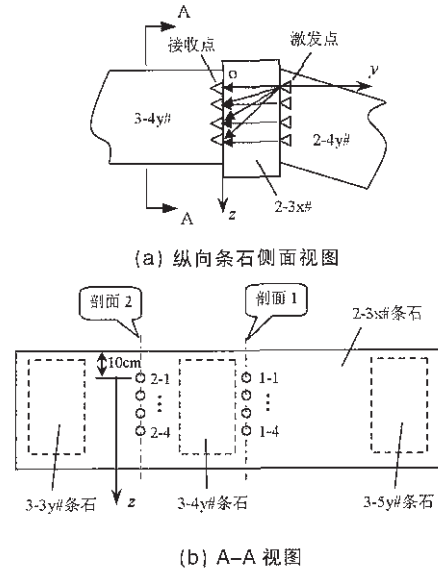


图 5 2-3x# 条石测点布置图

Fig. 5 Distribution of measuring points on the 2-3# rock bar

条石测试区的纵波速度分布。实测得到同岩性新鲜岩石的纵波速度为 4 000 m/s。将条石的纵波速度分布除以新鲜岩石的纵波速度转换成条石的波速比分布, 按表 1 即可得到条石被测区域的风化程度分布。

图 6 是由 CT 法处理得到的 2-3x# 条石测试剖面的纵波速度 (VP) 分布图。图 7 是取新鲜石材波速为 4 000 m/s 换算得到的条石波速比 (Kv) 分布图。由剖面 1 纵波速度分布(图 6(a))可知 2-3x# 条石的受压部位的绝大部分区域纵波波速位于 2 500~3 500 m/s, 在顶面中部存在小块低速区。通过其风化程度图(图 7(a))可以看出, 条石受压部位在顶面中部为局部强风化, 其他大部分区

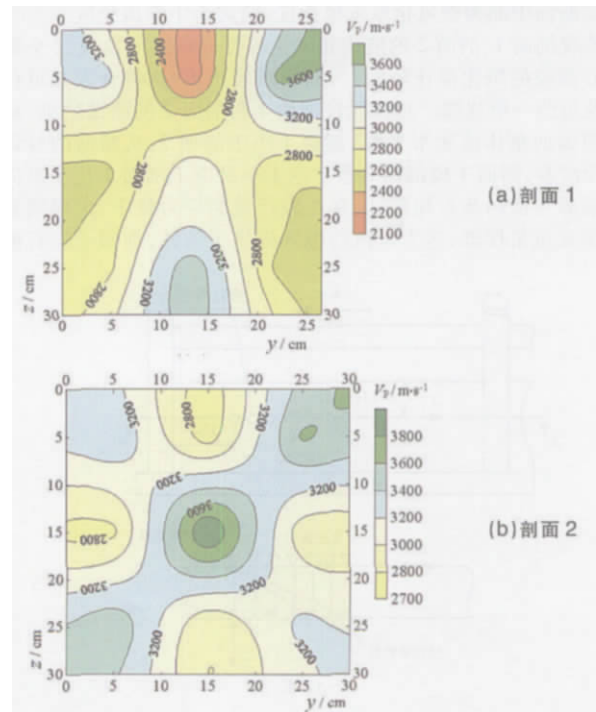


图 6 2-3x# 条石纵波速度剖面图

Fig. 6 Wave velocity distribution in the detected across section of the 2-3# rock bar

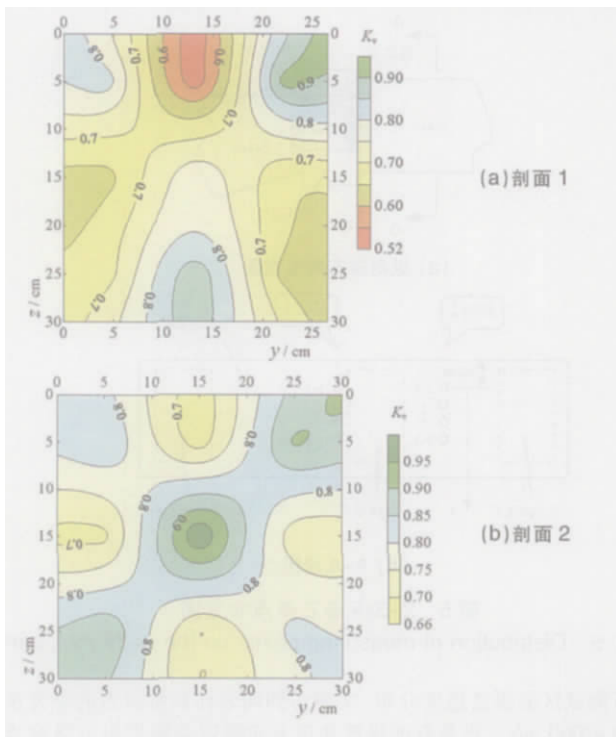


图 7 2-3# 条石风化程度剖面图

Fig. 7 Variation of weathering degrees in the detected across section of the 2-3# rock bar

域都属中等风化, 中等风化区约占整个测试断面的 3/4。对剖面 2 的测试(图 6(b))表明, 条石非受压部位的大部分纵波波速均在 3 000 m/s 以上, 测试断面四周有小块相对低速区。由断面风化程度图(图 7(b))可以看出, 该测试断面内不存在强风区, 整体上来看测试断面中部为微风化或未风化区, 四周为中等风化区。

比较剖面 1、剖面 2 的波速和风化程度分布图可发现, 2 个断面中心部位的风化都比较弱, 四周相对较严重, 这符合岩石风化由表及里的一般规律。总体比较剖面 1 与剖面 2 的测试结果, 从测试断面的整体波速水平看, 剖面 1 小于剖面 2; 从断面的整体风化程度看, 剖面 1 较剖面 2 重。这主要是由于剖面 1 位于纵向条石端部与横向条石相接处, 存在较严重的应力集中, 出现明显的压溃及压张现象, 这为水汽的进入提供了条件, 加剧了岩石的

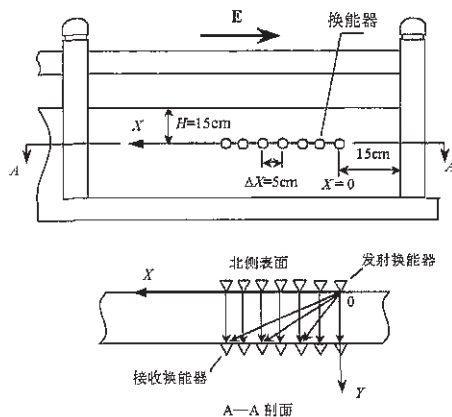


图 8 汉白玉栏侧面 CT 探测观测系统示意图

Fig. 8 Sketch map for the observing system of CT on the marble plate

风化。这些现象也说明了测试结果的合理性。

3.2 故宫汉白玉栏板风化程度超声 CT 与瑞雷面波检测

故宫属于世界级文化遗产, 具有重要的历史和文物保护价值, 其中大量的汉白玉桥栏碑刻更是稀世珍品。由于年代久远和环境因素的影响, 这些石质文物正受到严重的风化病害侵蚀, 严重者已达到粉化残损的程度, 生存堪忧。

汉白玉栏板尺度有限, 风化程度空间变化复杂, 因此, 对检测空间分辨率的要求很高。针对这一情况, 我们尝试应用超声波测试, 采用超声 CT 和瑞雷波 2 种方法对故宫武英殿前西侧的第一块汉白玉栏板的风化程度进行了检测, 取得了较好的效果。测试中使用了湘潭天鸿电子研究所研制的 DB16 型工程多波参数分析仪, 进行波动的观测与采集。超声 CT 观测系统如图 8 所示。在栏板朝南的一面距离板顶 15 cm 的水平方向, 以 5 cm 的间隔等间距布置了 7 个压电陶瓷接收传感器, 总的覆盖长度为 30 cm。测试时采用对穿的激发方式, 在栏板朝北一面的对应点上用发射换能器逐点激发超声波, 在右侧接收点上的 7 个接收换能器拾取各次激发所到达的超声波动, 从而对应取得各次激发的记录波形排列。应用 CT 波速重建方法, 根据上述透射波记录的直达波走时可以得到透射剖面范围内的弹性波速的分布情况。

如图 9 所示, 波速在剖面的东北侧以 (5, 5) 为中心有一个低速区, 在剖面的西北区域以 (27.5, 2.5) 为中心和南侧的中央较大区域也有一个低速区; 在剖面北侧中央和东西两侧的边缘向内都有高速区分布。弹性波速在剖面上的分布反映了汉白玉栏板风化程度在剖面上不同位置的变化: 高速区风化程度相对较弱, 低速

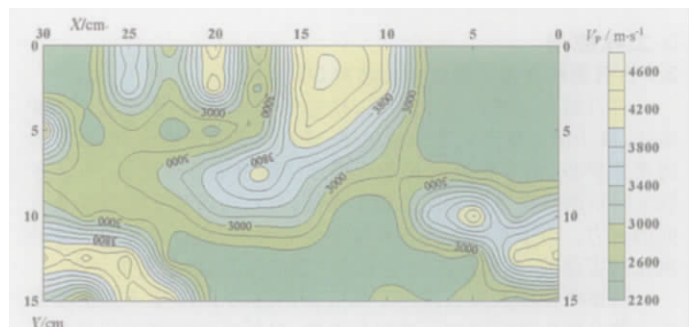


图 9 故宫武英殿前西侧第一块汉白玉栏板 CT 水平剖面

Fig. 9 Horizontal CT section of the first marble fence plate on the west side in front of the Wuying Hall of the Forbidden City in Beijing

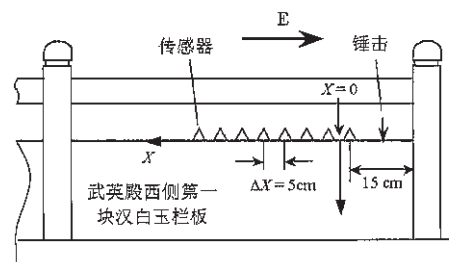


图 10 汉白玉栏板瑞雷波观测系统示意图

Fig. 10 Sketch map for the observing system of Rayleigh waves on the marble plate

区风化程度相对较强。

瑞雷波观测系统如图 10 所示。采用脉冲荷载在栏板上表面激发瑞雷波, 用 8 个压电陶瓷换能器分别在 8 个测点上拾取超声波动, 测点间距为 $\Delta X=5$ cm, 仪器以 $\Delta t=2$ ms 的时间间隔将波动

信息转换为数字记录。对 8 个测点上的记录波形两两进行分析,每 2 道波形可以得到 1 条速度-深度(V_R-H)曲线,这条曲线通过瑞雷波速度在深度上的分布反映了对应 2 个测点之间一定深度范围内介质的物理力学状态。

如图 11 所示,被检测的汉白玉栏板中存在 3 个较强的风化中心,1 个位于剖面中下部,另外 2 个则位于栏板顶部测线的东端附近。顶部 2 个强风化中心的影响深度在 5~8 cm 左右。在上部和中下部风化区之间分布着一个向东倾伏的高速区,反映出栏板的中部风化程度轻微。高速区在测试断面上呈由左上到右下的对角线分布,在栏板顶部对应的分布范围为 $X>15$ cm 的区段。高速区与低速区之间存在波速等值线密集现象,因此,被称为波速变化梯度带。

现场对栏板的观察对比表明,上述波速等值线密集部位正好对应着大理石天然纹理发育的位置,而且天然纹理的延伸方向与波速等值线的延伸方向一致。这一方面印证了瑞雷波测试结果的合理性,也说明了汉白玉栏板的风化与其自身的天然结构有着密切的关系。另外,瑞雷波测试得到的铅垂剖面与透射波 CT 测试得到的水平切面所揭示的汉白玉栏板内部的弹性波速分布规律是一致的,两种方法相互印证,说明了超声波测试方法对石质文物风化程度检测的有效性。检测结果可以作为汉白玉栏板风化病

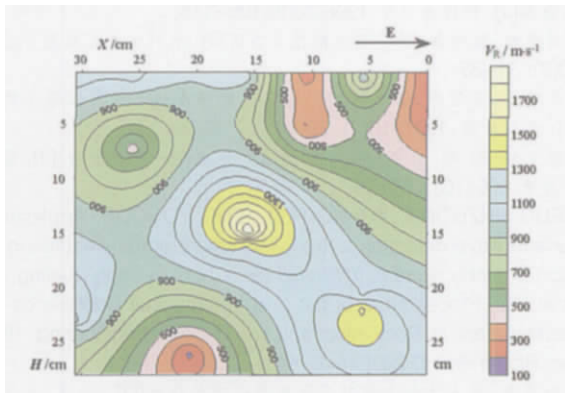


图 11 故宫武英殿前西侧第一块汉白玉栏板瑞雷波检测竖向速度剖面

Fig. 11 Vertical VR section of the first marble fence plate on the west side in front of the Wuying Hall of the Forbidden City in Beijing

害治理的依据。

3.3 西黄寺抱鼓石风化程度瑞雷面波检测

西黄寺位于北京安定门外黄寺大街,该寺建于雍正元年(1723),乾隆三十六年(1771)重修,是清王朝为西藏宗教领袖达赖五世修建的。1983 年被国务院列为汉族地区佛教全国重点寺院。如图 12 所示,检测对象为垂花门前 2 对抱鼓石,抱鼓石座北朝

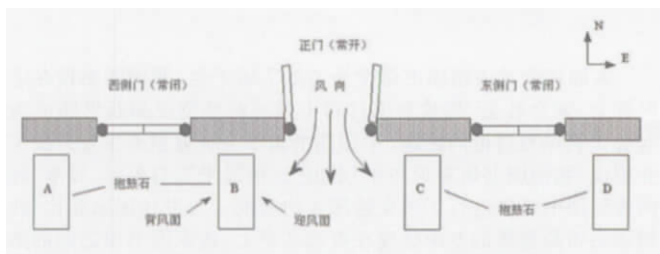


图 12 西黄寺垂花门抱鼓石位置示意图

Fig. 12 Sketch map for the position of drum-holding stones in front of the Chuihua Gate of the Xihuang Temple

南,从西向东依次编号为 A、B、C、D,每个长约 0.9 m,宽约 0.5 m,高约 1.1 m。这些石质文物常年受到风化、雨水的侵蚀作用,目前亟待修整。

对抱鼓石瑞雷波测试使用的仪器为湘潭天鸿电子研究所研制的 DB4 型 4 道工程多波参数分析仪。

如图 13 所示,在抱鼓石的 2 个侧面各布置 5 条测线,在顶部布置 1 条,测线离地面的高程依次为 18 cm、37 cm、60 cm、76 cm、96 cm。震源距为 10 cm,测点间距为 5 cm,测点个数以覆盖整条测线为准。由于接收器数量有限,故每 4 个测点激发 1 次,1 次排列可以覆盖 20 cm,将不同次排列首尾相接,即上一次排列的最后一个测点与下一次排列的第一个测点重合,从而保证所采集的面波数据能连续覆盖整条测线。

对各条测线进行瑞雷波测试可以得到测线表面一定深度范围的瑞雷波波速分布,从而可以了解抱鼓石表层一定深度范围内

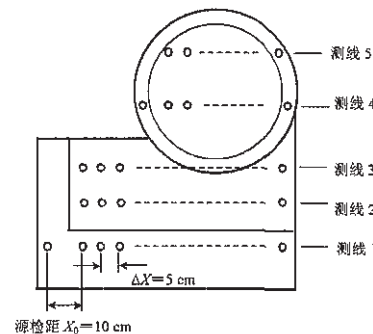


图 13 抱鼓石瑞雷波测线布置示意图

Fig. 13 Siting of Rayleigh wave measuring lines on the surface of the drum-holding stone

的风化程度空间变化。现以抱鼓石 B 为例来说明测试结果。

图 14 为抱鼓石 B 迎风面最底部测线 1 的瑞雷波波速-深度剖面图。H 轴为自抱鼓石表面向深部延伸的深度,X 轴为沿抱鼓石表面测线方向的长度,H 和 X 的单位均为 cm。如图 14 所示,抱鼓石外表面波速较低,大概在 800~1 200 m/s 左右,风化比较严重;其内部的波速比较高,大概在 2 000~3 000 m/s 左右,说明其

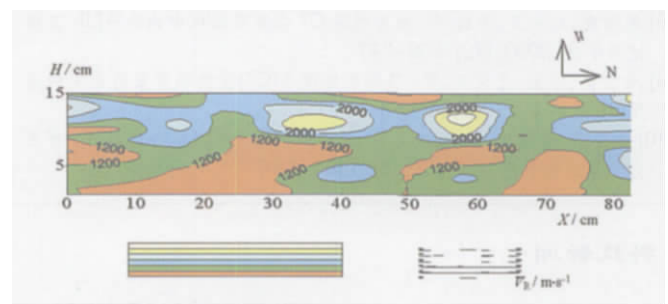


图 14 抱鼓石 B 迎风面测线 1 波速-深度分布图

Fig. 14 Wave velocity distribution of Measuring Line 1 on the side facing wind of drum-holding stone B

内部结构比较完整,风化较轻微。

图 15 为抱鼓石 2 个侧面浅表层(5 cm 深度范围内)在深度方向取平均后的瑞雷波波速分布图,Y 轴垂直向上,X 轴水平向右,原点在抱鼓石侧面的左下角。比较图 15(a)和 15(b)可以明显看出,抱鼓石的迎风面的波速比其在背风面的波速要低许多,这表明抱鼓石迎风面的风化程度较背风面要严重。观察迎风面瑞雷波的分布情况可见,在 40 cm 高度以下的瑞雷波波速较高,这反映出门槛对北面来风的挡风作用减缓了抱鼓石较低部位的风化

速度;抱鼓石中部偏北的部位为波速最低分布区域,这说明通过正门的北风对抱鼓石中部的风化作用最为明显。

综合分析 4 个抱鼓石的检测结果发现,正门两侧的 2 个抱鼓石 B、C 的波速比侧门的 2 个抱鼓石 A、D 的波速低,这也反映了空气流动对加速石材风化的作用。

4 结论

由于长时间的风化作用,一些重要的历史文物建筑的状态已经岌岌可危,对这些文物的现状进行详细调查、评价已刻不容缓。本文介绍了超声 CT 和瑞雷波测试的原理,论证了超声波方法在文物检测方面的可行性,并以浙江义乌古月桥、北京故宫汉白玉栏板、北京西黄寺抱鼓石的风化程度检测工程的实例,证明了超声波测试在石质文物风化程度检测中应用的有效性。

超声波方法在小尺度高分辨率的探测问题中仍然有以下问题有待解决: 超声 CT 测试中由于测线边缘和测试表面的射线稀疏导致的波速失真; 由于介质的不均匀导致的射线弯曲、绕射和迴折等现象,给波速重建带来了较大的困难; 在高频瑞雷波实测频散曲线的提取方面存在排除干扰波和准确提取相邻测点相速度的问题; 如何进一步研究高频瑞雷波的反演技术,以便充分利用面波信息,更准确地了解面波有效探测深度范围内石质文物风化程度的空间变化,等等。

参考文献 (References)

- [1] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社,1988.
- [2] 刘金光. 层析技术在工程检测中的应用[J]. 工程勘察, 1994(5): 65-68.
- [3] 高燕和, 魏树满. 地震波层析成像技术的实现及其工程应用[J]. 工程勘察, 1994(1): 64-66.
- [4] 崔占荣, 杨文采, 马文亮, 等. 应用层析成像检测水下深埋管道破损[J]. 勘察科学技术, 1995(2): 60-64.
- [5] 王文德. 地震 CT 技术及其在工程地质勘探中的应用 [J]. 工程勘察, 1997(4): 65-68.
- [6] 王超凡, 赵永贵, 靳洪晓, 等. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 367-375.
- [7] 南金生, 马建军. 超声波 CT 成像技术在桩基检测中的应用[J]. 地质量学刊, 1999(4): 43-46.
- [8] 靳洪晓, 赵永贵, 李勤, 等. 地面地震 CT 在浅层勘探中的应用[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 239-243.
- [9] 梁国前, 苏全, 王文双, 等. 层析成像技术(CT)在拱坝质量检测中的应用[J]. 水利发电, 2002(5): 20-21.
- [10] 余志雄, 薛桂玉, 周洪波, 等. 大坝 CT 技术研究概况与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (8): 1394-1397.
- [11] 陈祥, 孙进忠, 祁小博. 石质文物风化程度超声波 CT 检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (增 1): 4760-4766.
- [12] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multilayered media [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43 (1): 17-34.
- [13] EWING M, PRESS F. An investigation of mantle Rayleigh waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1954, 44 (1): 127-147.
- [14] KOVACH R L, ANDERSON D L. Higher mode surface waves and their bearing on the structure of the earth's mantle[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54 (1): 161-182.
- [15] NAZARIAN S, STOKOE II K H, HUDSON W R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems[J]. Transport Research Record, 1983, 930: 38-45.
- [16] 吴世明, 曾国熙, 陈云敏, 等. 利用表面波谱分析测定土层波速[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(9): 27-32.
- [17] 杨成林. 瑞雷波勘探原理及其应用 [J]. 物探与化探, 1989, 13(6): 465-468.
- [18] 刘云桢, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. 物探与化探, 1996, 20 (1): 28-34.
- [19] 杨成林, 时福荣, 李从信, 等. 应用瑞雷波等方法对公路质量进行无损检测[J]. 物探与化探, 1996, 20(2): 105-115.
- [20] 刘康和, 魏树满. 瞬态面波勘探及应用[J]. 水利水电工程设计, 2001, 20(2): 31-33.
- [21] 牛建军, 苏亚志, 郑作栋, 等. 瑞雷波勘探在地下洞穴探测中的应用 [J]. 世界地质, 1997, 16(2): 79-82.
- [22] 耿光旭, 赵刚. 强夯地基检测的有效方法——瑞雷波法 [J]. 勘察科学技术 2001(5): 57-59.
- [23] SUN JINZHONG, ZHANG HUI, FENG YONGGE. Application of surface wave detection to the assessment of the weathering situation of stone relics [C]//Yunmei Lin, Chun'an Tang, Xiating Feng, et al. The Proceedings of the 2nd International Conference- New Development in Rock Mechanics and Rock Engineering. Princeton: Rinton Press, 2002: 542-545.
- [24] 孙进忠. 岩土体动力学若干问题的研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2001.
- [25] GB 50021-2001, 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑出版社, 2002.
- [26] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [27] 祁生文, 孙进忠, 万志清. 瞬态瑞雷波勘探方法的一点改进[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 466-468.

(责任编辑 肖庆山)

· 科技新闻 ·

中国图书馆学会 2006 年年会在滇召开

7 月 23-27 日, 中国图书馆学会 2006 年年会在春城昆明召开, 来自全国各地及海外的 800 余名图书馆界同仁, 围绕“图书馆发展与和谐社会构建”主题进行了深入的探讨和交流。

会议期间, 大会发言者分别代表政府、新成立的图书馆联盟和大学图书馆, 从社会科学的视角观察了图书馆的发展方向。“面向大众的图书馆关怀”、“中国图书馆法制环境构建: 法律保障与行业自律”、“图书馆数字资源的建设、共享与服务”、“大众阅读指导与和谐社会”4 场专题学术报告, 则从不同方面解读了年会主题。会议还通过展览等形式为图书馆界与相关企业的交流与合作提供了平台。

本届年会是中国图书馆学会的第 7 届年会。我国图书馆在走向社会、融合社会、构建和谐过程中遇到的新情况和新思路成为与会代表热烈讨论的话题。中国图书馆学会行业服务主管尹岚宁介绍说, 我国图书馆界近些年“走出去、请进来”, 与美国、日本、韩国等国图书馆界进行了越来越深入的交流。与发达国家相比, 我国图书馆最显著的差距体现在资源共享上, 各家图书馆之间的图书能够交叉查询、跨馆借阅才是一种理想的状态; 此外, 在相较人口基数而言, 我国图书馆的数量还显得过少, 面对已经到来的数字化图书馆的冲击, 我国图书馆界同仁也仍有许多工作要做。

(本刊记者 黄永明)