

石质文物风化程度的超声波 CT 检测

陈 祥, 孙进忠, 祁小博

(中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 我国是一个具有悠久历史的文明古国, 拥有大量的具有重要历史意义和价值的文化遗产, 然而, 由于长期的风化作用, 导致它们损伤严重, 亟须对其风化程度进行评价。超声波测试具有检测分辨率高, 对被测物无损伤等特点, 使其成为检测石质文物风化程度的有力手段。从理论和方法上, 对运用超声穿透波 CT 检测石质文物风化程度的方法进行了探讨, 提出了一套利用超声波 CT 法检测现场石质文物风化程度和文物材料主要力学参数分布状况的方法。利用这套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。

关键词: 岩石力学; 超声穿透波; 石质文物; 风化程度; 古月桥

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增1 - 4970 - 07

ULTRASONIC CT DETECTING FOR WEATHERING DEGREES OF LITHOID CULTURAL RELICS

CHEN Xiang, SUN Jin-zhong, QI Xiao-bo

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: There are a lot of cultural relics which are of important historic significance and value in China. But, because of long time weathering, these cultural relics are damaged seriously. It is very necessary to assess the weathering degrees of these relics. Ultrasonic detecting is a non-destructive testing method to get the inner information of an object with high resolution, so it is an effective means to detect weathering degrees of lithoid cultural relics. The ultrasonic CT detecting method for weathering degrees of lithoid cultural relics with ultrasonic penetrating waves is discussed theoretically and methodologically, and a set of methods to detect the weathering degrees and the main mechanical parameters distribution of lithoid relics are put forward. By this method, the weathering degrees of the stone bars of Guyue bridge, which was built in Nan Song Dynasty in Yiwu City, Zhejiang Province, are detected, and satisfactory results are obtained.

Key words: rock mechanics; ultrasonic CT; lithoid cultural relic; weathering degree; Guyue bridge

1 引言

我国是一个具有悠久历史的文明古国, 拥有大量的具有重要历史意义和价值的文化遗产, 然而, 它们中大多数, 尤其是露天文物建筑, 经受了数千年的物理、化学、生物风化作用, 其现状令人堪忧。

因此, 亟须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。

地震 CT 也称地震层析成像技术, 是一种重要的无损检测技术, 目前在国内, CT 在工程中主要应用于大坝地基的工程地质勘察, 岩溶的勘察, 大坝、桥梁等混凝土的无损检测, 隧道的工程地质勘察以及场地岩土体性质的勘察^[1]。

收稿日期: 2005 - 05 - 10; **修回日期:** 2005 - 06 - 02

作者简介: 陈 祥(1980 -), 男, 现为中国地质大学(北京)工程技术学院岩土工程专业博士研究生, 主要从事岩石力学与工程检测方面的研究工作。
E-mail: chx1120@126.com.

文[2]对黄河大柳树水利枢纽坝址岩体进行平洞透视层析测试,取得了较好的效果。文[3]对首都机场高速公路桥某桥台利用层析技术,利用 SIRT 方法反演得到的波速分布图中的低速区与施工事故位置相吻合。文[4]成功地应用层析成像技术检测到上海一水下深埋管道破损。文[5]在西安古城墙墙体缺陷及异常体探测中应用了地震层析技术,采用弯曲射线追踪法和趋势面分析法成像,成像结果与后来的开挖结果吻合得很好。文[6]对一严重松动的岩质边坡的勘察运用了地震层析技术,地震层析勘探所得的波速值与相应部位的勘探平洞中所测波速有很好的 consistency。文[7]利用超声波层析对桥梁钻孔灌注桩进行检测。文[8]利用地震波 CT 技术对煤层上覆岩层的破坏规律进行探测,研究表明 CT 技术具有经济、直观、高精度等特点。文[9]将 CT 技术应用到大坝的隐患检测中,取得良好的效果。文[10]讨论了地震波层析成像技术及现场观测方法,采用全方位观测地震波层析成像技术,获取了三峡工程永久船闸边坡大尺度岩体地质构造分布及整个区域以细小单元形式给出的波速分布参数,为地质概化模型分析、边坡稳定性分析及变形计算首次提供了完整的力学参数“体”数据。

CT 测试在许多领域都有着广泛的应用,然而,利用其对石质文物的风化程度进行检测鲜有报道。超声波 CT 测试具有检测分辨率高,对被测物无损伤等特点,使其可成为检测石质文物风化程度的有力手段。笔者曾应用超声面波方法对故宫汉白玉栏板的风化程度进行过测试评价,取得了较好的效果^[11, 12]。本文则从理论和方法上,对利用超声透射 CT 检测石质文物风化程度的方法进行探讨,以期对石质文物风化程度测试提供更多的手段。在现场,利用超声穿透波法测得被测文物材料的纵波速度;在室内,对与被测文物材质一样的新鲜岩样进行测试,也得到其纵波速度,将现场测得的风化材料的纵波速度与室内测得的新鲜岩样的纵波速度相比即可得到被测文物材料的风化程度。此外,还可以对现场采集的新鲜岩样和风化岩样进行力学试验,得到其主要的力学指标,并将这些力学指标分别与岩样的纵波波速进行拟合分析,得到被测文物材料的力学指标与纵波波速之间的经验关系,根据拟合出来的经验关系式和现场实测的文物材料的纵波波速即可得到被测文物材料的力学指标分布现状。利用这套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。

2 测试原理

CT 检测是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)^[1]。用于现场的观测系统为一发多收声系,即在一侧单点发射,另一侧作扇形排列接收,然后逐点同步沿剖面线移动进行扫描观测。

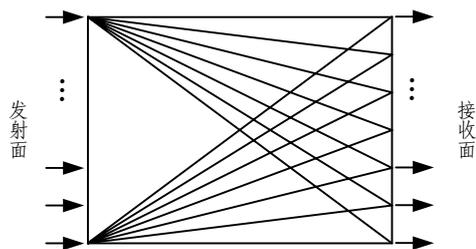


图 1 超声透射 CT 原理示意图

Fig.1 Theoretic diagram for ultrasonic penetrating CT method

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,可将每个单元中的纵波的速度 $v_i(x, y)$ 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。

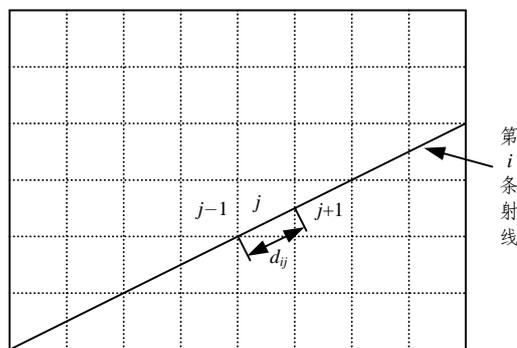


图 2 网格化模型示意图

Fig.2 Grid model of detected object

令 $s = 1/v$ ，称为慢度，则式(2)实际上是一个线性方程组：

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

求解方程组(式(3))就可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》(GB50021 - 2001)，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^[13]。

表 1 纵波速度比 K_v 与岩石风化程度的关系

Table 1 Relationship between longitudinal wave velocity ratio K_v and weathering degrees of rock block

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

介质波速是反映介质物理力学状态的一个综合性指标：波速高，说明介质弹性强、力学强度高；波速低，反映介质弹性差，力学强度低，从而通过测定物体纵波波速即可知道物体内部的强度状态。根据现场采集的与被测物材质相同的岩样，包括新鲜样和风化样，进行室内超声测试和力学试验，得到它们的纵波速度和主要力学参数，如：弹性模量、抗压强度。统计分析这些力学参数与纵波速度的关系，得到力学参数与纵波速度之间的经验关系式，然后根据这些经验关系式和现场测得的被测物材料的纵波波速分布即可得到材料的弹性模量、抗压强度等力学指标在被测物体内部的分布情况。

3 工程应用

利用上述方法对位于浙江省义乌市的一座南宋古桥——古月桥桥身条石的风化程度进行评价，取

得了较好的效果。

古月桥建造于南宋时期，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，每两条相互挤压的纵向条石之间放置一条横向条石承受两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，濒于失稳破坏。

3.1 现场测试

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两个侧面。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 $\Delta X = 10 \text{ cm}$ ，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，仪器以 $\Delta t = 0.5 \mu\text{s}$ 的时间间隔将波动信息转换为数字记录。

本次测试利用透射 CT 法，对古月桥上 4 根具有代表性的条石进行了测试。由于篇幅的限制，本文仅介绍 2 - 3x# 条石的测试情况。

2 - 3x# 条石是位于 2 - 4y# 和 3 - 4y# 两条纵向条石之间的横向条石，其相对位置图和受力示意图如图 3 所示。在 2 - 3x# 条石上布置了 2 条测线，每条测线 4 个测点，测点沿垂直于条石水平延伸方向布置，测点布置如图 4 所示。图 4 中给出的是接收点

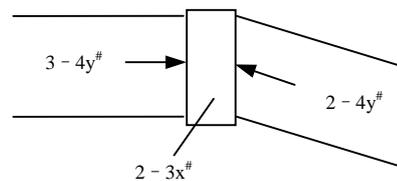


图 3 2 - 3x# 条石相对位置及受力示意图

Fig.3 Relative position of 2 - 3x# rock bar and the forces applied on it

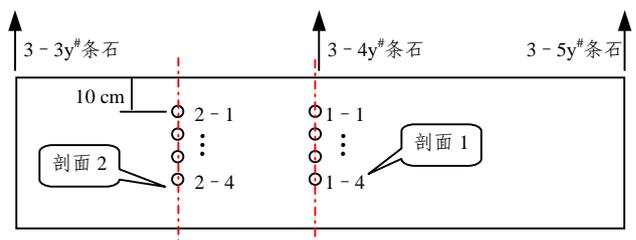


图 4 2 - 3x# 条石测点布置图

Fig.4 Distribution of measuring points on 2 - 3x# rock bar

的位置, 激发点在条石的另一侧与接收点一一对应, 布置方式与接收点相同。

3.2 室内试验

在现场采集与桥身条石相同岩样, 包括新鲜样和风化样, 进行了室内超声波速测试和力学试验。表 2 为岩样波速测试结果, 表中 X1~X6 为新鲜岩样, F1~F15 为风化岩样。现场未能采集到强风化和全风化的岩样, 实际采集回来的风化样都是微风化的岩样, 所以, 表 3 中风化岩样的波速与新鲜岩样的波速相比没有降低多少。

表 3 为岩样室内力学试验结果, 通过试验得到了岩样的弹性模量和单轴抗压强度。分别统计所测岩样的纵波速度与弹性模量、单轴抗压强度的关系, 据此关系即可将现场测得的条石纵波速度分布转换为条石弹性模量和抗压强度的分布。

图 5 是岩样的纵波速度与弹性模量的散点图, 由测试数据拟合得到的波速 V_p 与弹性模量 E 之间的关系式为

表 2 岩样室内超声测试波速结果

Table 2 Ultrasonic velocity test results of rock specimens

岩样编号	质量/g	体积/cm ³	密度 (g · cm ⁻³)	V_p (m · s ⁻¹)	V_s (m · s ⁻¹)	V_p/V_s
X1	452.1	196.25	2.30	3 846	2 273	1.692
X2	455.9	196.25	2.32	4 000	2 326	1.720
X3	459.8	196.25	2.34	3 846	2 326	1.653
X4	458.4	196.25	2.34	3 846	2 273	1.692
X5	454.5	196.25	2.32	3 704	2 174	1.704
X6	455.3	196.25	2.32	3 846	2 128	1.807
F1	469.1	198.21	2.37	3 483	1 980	1.759
F2	470.4	198.21	2.37	3 483	1 942	1.794
F3	476.7	198.21	2.41	3 607	2 061	1.750
F4	468.8	198.21	2.37	3 741	2 104	1.778
F5	459.7	194.29	2.37	3 667	2 152	1.704
F6	464.3	194.29	2.39	3 667	2 152	1.704
F7	472.3	198.21	2.38	3 741	2 149	1.741
F8	464.8	194.29	2.39	3 536	2 063	1.714
F9	474.8	198.21	2.40	3 483	2 020	1.724
F10	476.8	198.21	2.41	3 607	2 061	1.750
F11	470.9	198.21	2.38	3 607	2 104	1.714
F12	476.4	198.21	2.40	3 607	2 061	1.750
F13	440.6	186.44	2.36	3 654	2 065	1.769
F14	479.2	200.18	2.39	3 643	2 082	1.750
F15	475.2	198.21	2.40	3 740	2 149	1.740

表 3 岩样力学试验测试结果

Table 3 Mechanical test results of rock specimens

岩样编号	直径 /mm	高度 /mm	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
X1	50.0	100.1	87.07	23.34	0.117
X2	49.8	100.1	76.71	16.62	0.157
X3	49.8	101.2	94.20	20.41	0.223
X4	49.8	101.1	105.97	18.80	0.169
X5	49.8	100.6	108.83	17.43	0.185
X6	49.8	100.4	110.25	20.85	0.170
F1	49.8	101.6	64.40	17.26	0.137
F2	49.8	101.5	72.25	18.41	0.124
F3	49.9	102.2	76.94	29.18	0.152
F4	49.8	101.4	75.29	14.56	0.098
F5	49.5	99.6	66.81	16.87	0.075
F6	49.3	101.8	66.26	14.26	0.137
F7	49.9	101.0	76.05	18.87	0.119
F8	49.6	99.5	80.75	9.92	0.103
F9	49.8	101.8	67.44	16.72	0.096
F10	49.9	102.1	69.83	13.74	0.102
F11	49.6	101.0	64.21	16.59	0.162
F12	49.8	101.9	76.54	12.64	0.118
F13	49.8	99.9	71.01	16.32	0.213
F14	49.8	102.1	61.19	13.89	0.174
F15	49.8	101.4	58.70	13.28	0.125

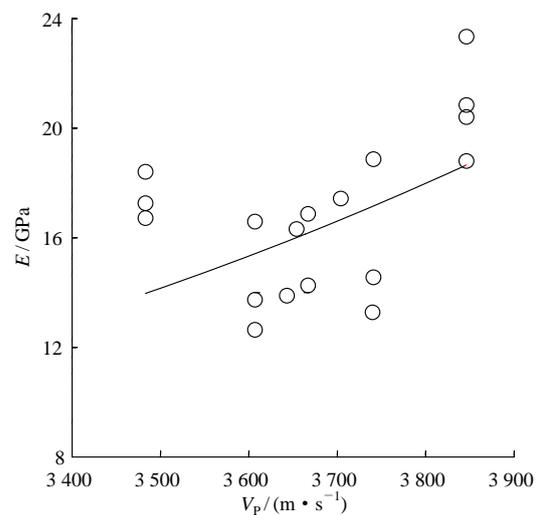


图 5 岩样纵波速度与弹性模量的关系

Fig.5 Relationship between the elastic module and wave velocity of rock specimens

$$E = 0.865 \ 6 \exp(0.000 \ 8 V_p) \tag{4}$$

图 6 是岩样纵波速度 V_p 与单轴抗压强度 σ_c 的

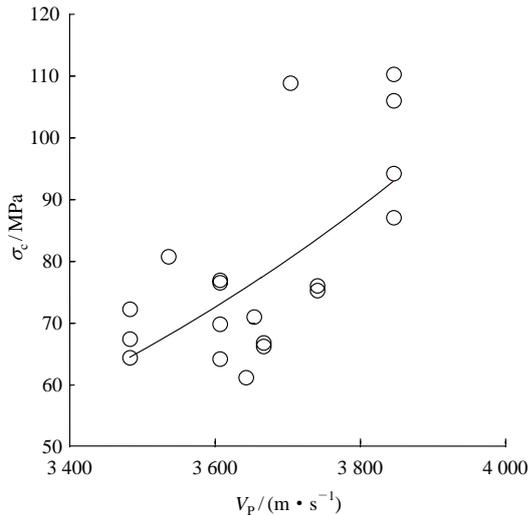


图 6 岩样纵波速度与抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between the compression strength and wave velocity of rock specimens

散点图, 根据图中所示数据拟合出的波速 V_p 与单轴抗压强度 σ_c 之间的关系式为

$$\sigma_c = 1.922 \ 6 \exp(0.001 V_p) \quad (5)$$

3.3 分析结果

根据现场实测的纵波速度值, 可以做出条石被测区域的纵波速度分布图; 根据新鲜岩样的室内测试结果, 可知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。

图 7 是 2 - 3x#条石测试断面的纵波速度值分布图, 图中 H 轴为条石高度方向自上而下, H 轴原点

距条石顶面 10 cm; B 轴为条石厚度方向自发射面指向接收面, 发射面位于离开拱顶较远的一侧。如图 4 所示, 剖面 1 位于 2 - 4y#条石、3 - 4y#条石与 2 - 3x#条石相互挤压的部位; 剖面 2 位于 3 - 3y#与 3 - 4y#两个条石之间, 与两个条石距离相等, 处于非受压部位。由剖面 1 纵波速度分布(图 7(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 8(a))可以看出条石受压部位在顶面中部为局部强风, 其他大部分区域都属中等风化, 中等风化区约占整个测试断面的 3/4。对剖面 2 的测试(图 7(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 8(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, 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, 这与符合岩石风化由表及里的一般规律。总体比较剖面 1 与 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, 加剧了岩石的风化。这些现象也说明了测试结果的合理性。

将实测条石的纵波速度分布值分别代入关系式(式(4)和(5))即可得到条石的单轴抗压强度和弹性模量的分布情况, 图 9 和 10 即为 2 - 3x#条石的弹性模量和单轴抗压强度的分布图。与纵波速度分布

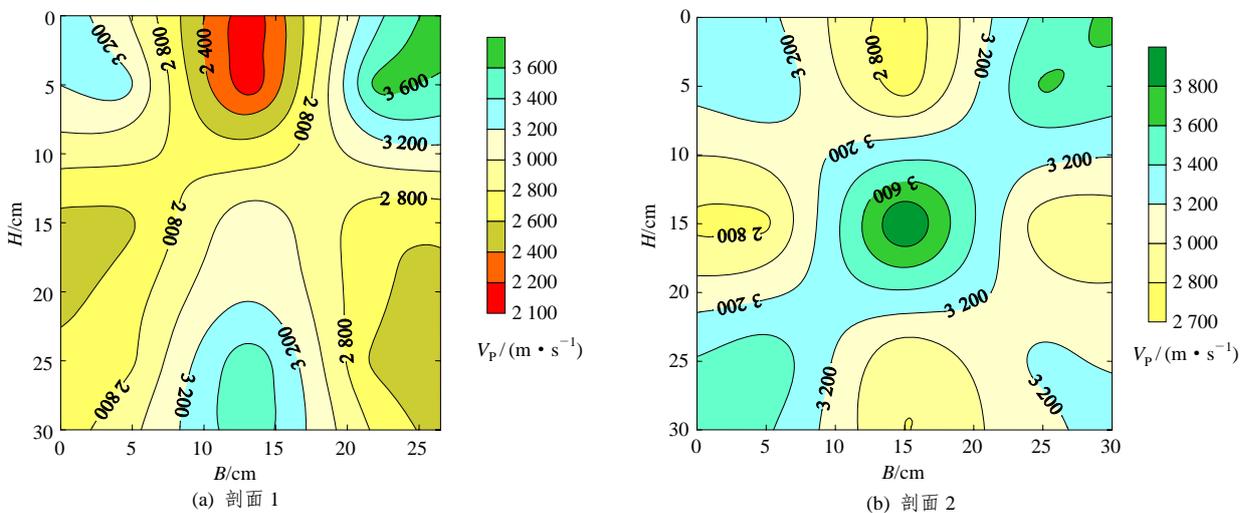


图 7 2 - 3x#条石纵波速度剖面图

Fig.7 Wave velocity distribution in the detected across section of 2 - 3x# rock bar

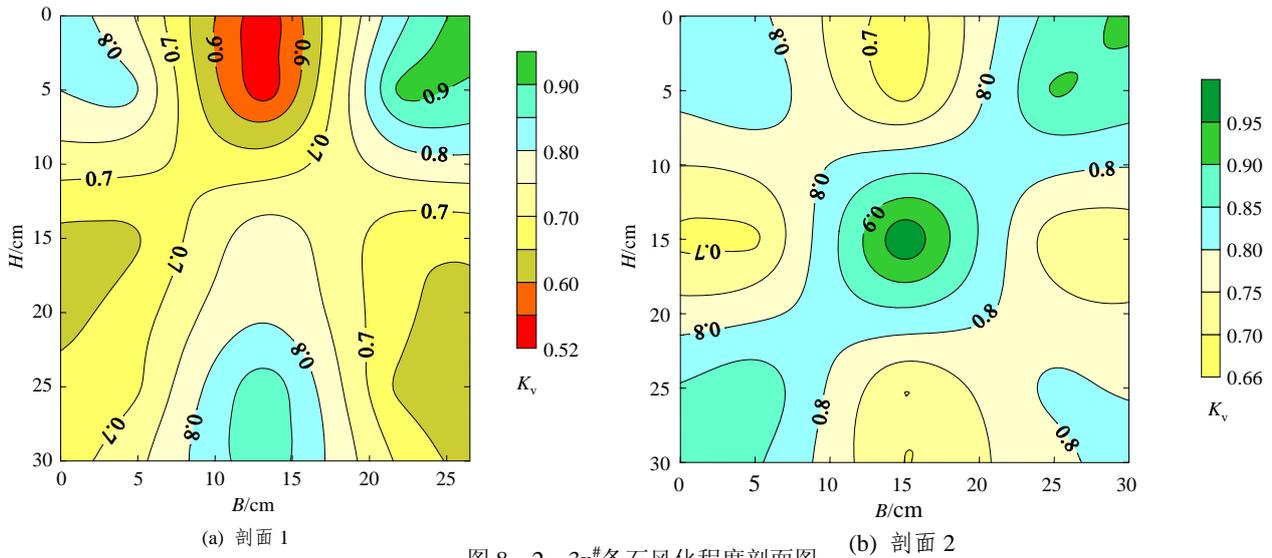


图 8 2-3x#条石风化程度剖面图

Fig.8 Variation of weathering degrees in the detected across section of 2-3x# rock bar

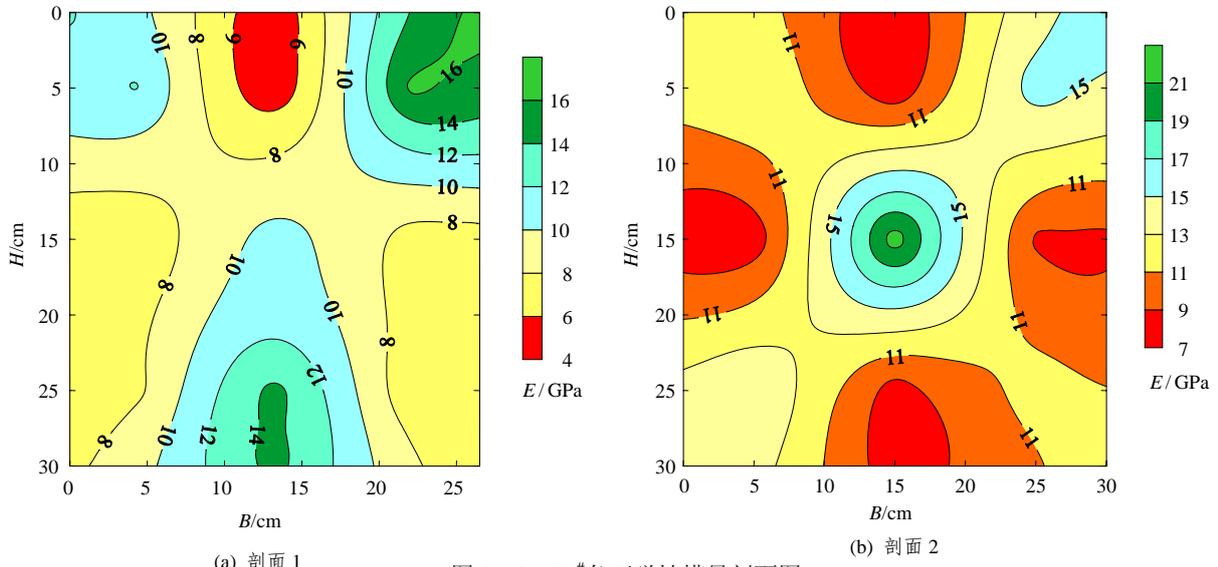


图 9 2-3x#条石弹性模量剖面图

Fig.9 Elastic module distribution in the detected across section of 2-3x# rock bar

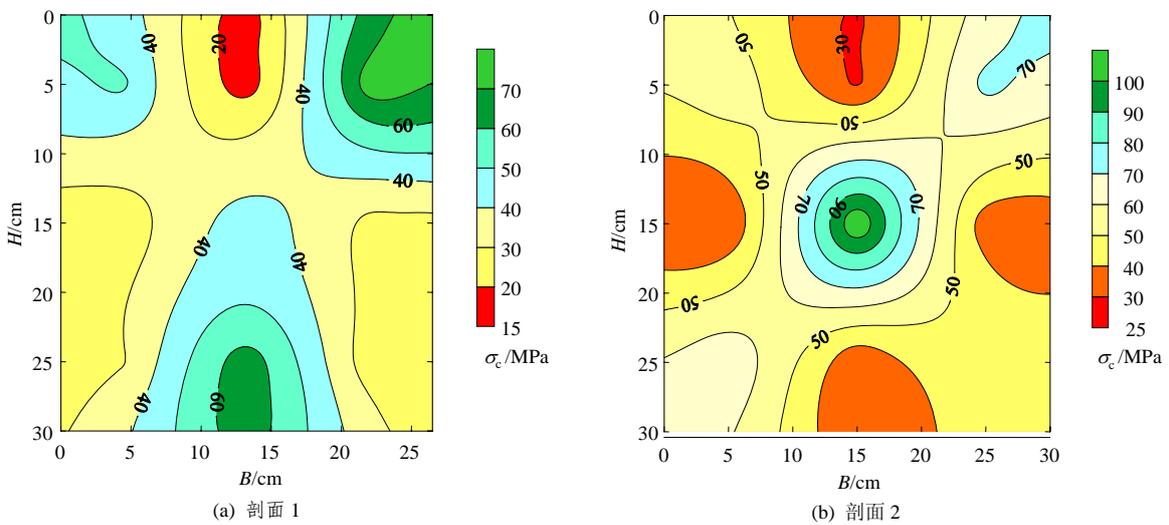


图 10 2-3x#条石抗压强度剖面图

Fig.10 Compression strength distribution in the detected across section of 2-3x# rock bar

图对照可知, 低速区条石的单轴抗压强度和弹性模量相对较小。

4 结 语

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。本文从理论上和方法上对利用超声透射 CT 法测试文物建筑的风化状况进行了详细的讨论, 提出了确定文物建筑材料风化程度的具体方法, 并结合室内力学试验得到材料的主要力学参数的分布情况。这套方法在浙江省义乌市古月桥的风化程度检测中应用, 得出了桥身条石的风化状况以及条石的单轴抗压强度和弹性模量的分布情况。测试结果与实际情况较为吻合, 反映了这套方法的可靠性。

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. (Wang Zhendong. The Applied Technique on Seismic Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.(in Chinese))
- [2] 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.(Gao Yanhe, Wei Shuman. The realization and application of seismic computerized tomography[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994, 1: 64 - 66.(in Chinese))
- [3] 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.(Liu Jinguang. Application of CT in the engineering detection[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994, 5: 65 - 68.(in Chinese))
- [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.(Cui Zhanrong, Yang Wencai, Ma Wenliang, et al. Application of CT imaging technique to detect the damage of underwater deep-buried pipeline[J]. Site Investigation Science and Technology, 1995, 2: 60 - 64.(in Chinese))
- [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.(Wang Wende. The seismic CT technique and its application to the engineering geological exploration[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1997, 4: 65 - 68.(in Chinese))
- [6] 赵法锁, 彭建兵, 杜东菊, 等. 地震 CT 法在滑坡勘测中的应用[J]. 西北地质, 1998, 19(4): 48 - 53.(Zhao Fasuo, Peng Jianbing, Du Dongju, et al. Application of CT in the landslides' exploration[J]. Northwestern Geology, 1998, 19(4): 48 - 53.(in Chinese))
- [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]. 地震学刊, 1999, 4: 43 - 46.(Nan Jinsheng, Ma Jianjun. Application of supersonic wave CT image to pile foundation[J]. Journal of Seismology, 1999, 4: 43 - 46.(in Chinese))
- [8] 张平松, 刘盛东, 吴荣新. 地震波 CT 技术探测煤层上覆岩层破坏规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 510 - 2 513.(Zhang Pingsong, Liu Shengdong, Wu Rongxin. Observation of overbureden failure of coal seam by CT of seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 510 - 2 513(in Chinese))
- [9] 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): 1 394 - 1 397.(Yu Zhixiong, Xue Guiyu, Zhou Hongbo, et al. Review on dam CT technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 394 - 1 397.(in Chinese))
- [10] 李张明, 练继建, 戚 蓝. 地震波层析成像技术探测复杂岩体结构应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 107 - 111.(Li Zhangming, Lian Jijian, Qi Lan. Study on detection of complex rock structure by CT technique of seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 107 - 111.(in Chinese))
- [11] Sun Jinzhong, Zhang Hui, Feng Yongge. Application of surface wave detection to the assessment of the weathering situation of stone relics[A]. The Proceedings of the 2nd International Conference - New Development in Rock Mechanics and Rock Engineering[C]. Pinceton: Rinton Press, 2002. 542 - 545.
- [12] 孙进忠. 岩土体动力学若干问题的研究与应用[博士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学, 2001.(Sun Jinzhong. The research on some application problems of dynamics of rock and soil mass[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences, 2001.(in Chinese))