



超声导波技术在埋地锚杆检测中的应用研究

何存富, 孙雅欣, 吴 斌, 王秀彦, 刘增华

(北京工业大学机电学院, 北京 100022)

摘 要: 分析了超声导波在埋地锚杆中传播的特性。在理论上, 对于埋地锚杆, 40~90 kHz 的 $L(0, 1)$ 模态的衰减值在所有模态中最小, 传播距离最长; 位移模式简单, 易于激发; 能量速度最大, 容易与其他速度较慢模态区别。此段 $L(0, 1)$ 模态可用来对埋地锚杆进行检测。同时建立实验系统, 对直径 22 mm、长 2 m 的埋地锚杆进行检测, 实验结果与理论分析相吻合。

关键词: 锚杆; 超声导波; 检测; 土壤

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)09-1144-04

作者简介: 何存富(1958-), 男, 山西大同人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代测控技术与方法、无损检测与健康评价、智能仪器与虚拟仪器技术等方面的研究。

Application of ultrasonic guided waves technology to inspection of bolt embedded in soils

HE Cun-fu, SUN Ya-xin, WU Bin, WANG Xiu-yan, LIU Zeng-hua

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Propagation characteristics of longitudinal modes of bolt embedded in soils were studied. The attenuation of longitudinal mode $L(0,1)$ at a range of frequency from 40 kHz to 90 kHz was the smallest in all modes. Its energy velocity was the fastest. And its profile of displacement was simple, which made it to be excited easily. It was indicated that longitudinal mode $L(0,1)$ could be used in the inspection of bolt embedded in soil because it could propagate longer distance in the bolt and be distinguished from other modes with slow energy velocity. At the same time, the experiments with bolts 22 mm in diameter, 2 m in length embedded in soils detected using ultrasonic guided waves were carried out. It was shown that longitudinal mode $L(0,1)$ between 40 kHz and 90 kHz was suitable for the inspection of length and construction quality of bolt embedded in soils.

Key words: bolt; ultrasonic guided wave; inspection; soil

0 引 言

在水利水电工程、城市建设、公路铁路建设工程中, 大量的采用锚杆支护技术(即将锚杆埋入岩石或土壤中以增强岩石或土壤的支护能力)。锚杆的施工质量直接影响着洞室或边坡的安全稳定。锚杆的施工属于隐蔽工程, 常规方法如拉拔实验等不但破坏构件, 而且很难对其进行有效的检测。所以对于锚杆的长度及施工质量的新型无损检测方法越来越受到研究人员的关注^[1-2]。

目前对锚固体体系的无损检测研究大多限于声频应力波法, 还处于探索阶段, 所得测试波形杂乱, 难以识别判断。而利用超声导波技术对锚杆进行检测则成为了近年来一个新的研究方向。Won-Bae Na 和 Tribikram Kundu^[3]利用弯曲柱面导波评估混凝土钢筋界面脱粘情况。M. D. Beard^[4]应用超声导波方法对矿山锚杆的完整性无损检测进行了初步的试验与理论研

究, 并取得了一定的进展, 验证了利用超声导波对锚杆检测的可能性, 但仅限于实验室研究阶段。对于国内, 应用超声导波法对锚杆的长度及锚固完整性进行检测的研究相关报道很少。

超声导波技术对锚杆施工质量的检测具有潜在优势。只需在锚杆露出的端部激励和接收超声导波, 由于导波本身的特性(沿传播路径衰减很小), 其可以沿杆件传播很远的距离, 接收到的信号则包含了锚杆的整体性信息。因此, 这种技术的特点是检测距离大(可达几米甚至十几米), 检测效率高, 大大节省了检测时间。矿业常用锚杆的长度为 2~3 m, 直径为 10~30 mm, 锚杆的尺寸正好在超声导波最佳传播距离之内。此外, 导波在杆的传播非常复杂, 其速度随频率的变化而改

基金项目: 北京市教委资助项目(KZ200510005004, KM200410005003);

北京市自然科学基金资助项目(4052008)

收稿日期: 2005-09-20

变, 且对应一个频率点上, 存在多种模式的导波。导波的这种频散和多模态特性虽然使得对接收信号的分析 and 处理变得困难, 但如果选择合适的导波模式和激励频率, 就可以达到检测的目的^[5-7]。因此, 本文正是基于此类问题背景, 研究超声导波在埋地锚杆中的传播特性, 为下一步岩石锚杆的质量检测打下一定基础。

1 理论分析

在圆柱和圆柱壳中传播的超声导波称为柱面导波。超声波在板、杆及空心圆柱壳等波导中传播时, 由于结构的厚度这种特征几何尺寸的影响, 使得在结构中传播的超声波的速度受其频率的影响很大, 从而导致超声波的几何弥散, 即导波中相速度随频率的不同而改变, 这种现象就是导波的频散现象。在杆中传播的超声导波存在 3 种模式, 即纵向轴对称模式 (L 模式)、扭转模式 (T 模式) 和弯曲模式 (F 模式)^[8]。

工程中常用的螺纹钢锚杆与普通钢杆的不同就在于锚杆表面上带有螺纹和肋, 由于在低频段导波的波长较长, 螺纹和肋的尺寸与波长相比较小, 所以在理论上并不会太多的改变导波在其中的传播特性^[4]。故在本文中均将锚杆简化为一杆状波导进行研究。

锚杆埋于土壤中可以简化为钢杆埋置于无限大介质中的两层结构模型。锚固体系模型如图 1 所示。内层是半径为 R 的钢杆, 外层为无限大土壤层。在这一模型中建立柱坐标系, 并假定导波沿 z 轴传播。

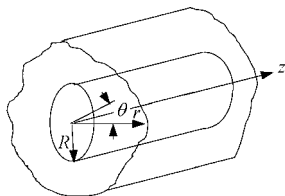


图 1 无限大介质中杆结构示意图

Fig. 1 Structure of rod embedded in infinite media

假设锚固交界面处的连接是刚性的, 即位移与应力在各边界处应满足连续性条件。

利用弹性力学的知识就可求解出内层杆和外部无限介质中的应力及位移值, 并根据两层介质界面处应力及位移连续的条件, 建立两层结构的波动方程组。为使此波动方程组有非零解, 其系数矩阵 $[M_{ji}]$ 的行列式必须为零, 即

$$|M_{ji}| = 0, \quad j, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式 (1) 为图 1 锚固体系模型中导波模式的频散方程。通过数值方法求解此方程, 可得出两层结构的相关频散关系。因土壤对波导的作用为超声能量的泄漏提供了一个通道, 所以必须考虑模式由于能量泄漏到土壤中而引起的能量衰减。通常采用引入一个复波数

($k = k_{\text{Re}} + ik_{\text{Im}}$) 来考虑这一因素, k 的虚部相当于一个衰减因子^[8]。

相速度和衰减系数 (用 $20\lg \alpha$ 表示分贝数) 为

$$c_p = \omega / k_{\text{Re}}, \quad \alpha = k_{\text{Im}}. \quad (2)$$

此外, 还需要注意的是, 在没有能量泄漏的体系中, 杆的群速度是与能量速度一致的 (如处于真空中的杆)。但是在有能量泄漏的体系中 (如埋入土壤中的杆), 杆的群速度与能量速度是有所差别的, 此时应该以能量速度作为参考速度^[9]。

锚杆与土壤的材料参数如表 1 所示, 其中锚杆直径为 22 mm。由于扭转模式较难激励, 故本文只考虑纵向轴对称模式和弯曲模式。图 2 为根据这些参数所得到的埋地锚杆的能量速度频散曲线。图 3 为埋地锚杆的衰减频散曲线。从图中可以看出:

表 1 锚杆和土壤的主要参数

Table 1 Parameters of bolts and soils

材料	密度/(g · cm ⁻³)	纵波波速/(m · s ⁻¹)	横波波速/(m · s ⁻¹)
锚杆	7.932	5960	3260
土壤	1.6	310	95

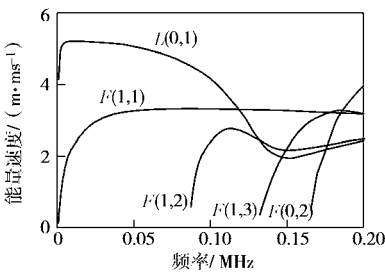


图 2 能量速度频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves of energy velocity

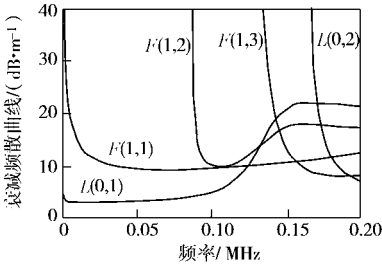


图 3 衰减频散曲线

Fig. 3 Attenuation dispersion curves

(1) 在任意频率, 都存在至少两种模式。除了 $L(0,1)$ 模式和 $F(1,1)$ 模式以外, 其他的模式均存在截止频率; 也就是说, 在 $F(1,2)$ 模式的截止频率 (约为 90 kHz) 以下, 理论上只会同时产生 $L(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 模式, 其他各个模式并不出现。 $L(0,2)$ 的截止频率为 165 kHz, 即在此频率下, 只能激励一种轴对称纵向模式 $L(0,1)$; 这一特点对选择激励导波信号的频率非常有利。

(2) 对于这种锚杆, 在低频段 (0~90 kHz), $L(0,1)$

模态是能量速度最快的模态,信号第一个到达接收端,同时频散特性不明显,这对于接收到的信号的识别是有利的。

(3) 从埋入土壤中的锚杆的衰减曲线(见图3)来看,在所有模态中,120 kHz 频率下的 $L(0,1)$ 模态的衰减值最小,其中 90 kHz 频率下的衰减曲线比较平滑,衰减值基本都在 4 dB/m 左右。

(4) 图4为埋地锚杆中激励频率为 60 kHz 时 $L(0,1)$ 模态的位移分布图。图中,在杆截面径向位移 (U_r) 由杆内部至外部逐渐增大,而轴向位移在杆的内部与外部基本一致。可以看出, $L(0,1)$ 模态的轴向位移模式 (U_z) 简单,易于激发。如在本文中,采用普通超声探伤直探头即可激励 $L(0,1)$ 模态。

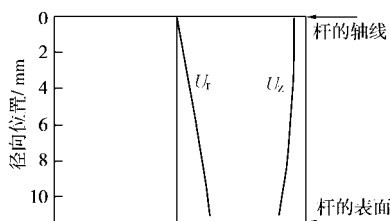


图4 60 kHz 时 $L(0,1)$ 模态的位移分布图

Fig. 4 Displacement profile of $L(0,1)$ at 60 kHz

利用导波技术对埋地锚杆进行质量检测需考虑 3 个因素:①选择位移模式较为简单,易于激发的模态;②选择能量速度较高的模态,这可使其与其他模态相区别,易于识别;③选择衰减较小的模态,这可使其能传播较长距离,增加检测的范围。根据以上 3 个因素,90 kHz 以下的 $L(0,1)$ 模态可以作为埋地锚杆工程检测的选择。

2 实验研究

为了验证理论分析结果,对埋地锚杆结构进行了实验研究。实验装置如图5中所示,由任意波形发生器(HP33120A)、功率放大器(Ultra2020)、数字示波器(TDS3032B)、转换开关、锚杆、计算机和超声探伤直探头所组成。其中,锚杆为直径 22 mm 的二级冷拉螺纹钢,长度为 2 m。埋置于地下 0.5 m 处。锚杆与土壤参数与表1一致。

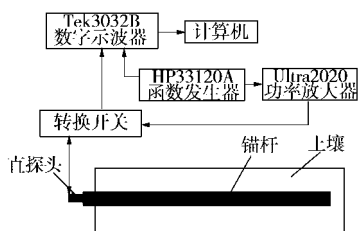


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental equipments

激励信号选取的是单音频信号,即经汉宁窗调制的 10 个震荡周期的正弦信号^[5]。频率为 50 kHz 单音频信号的时域波形和频域图如图6所示。

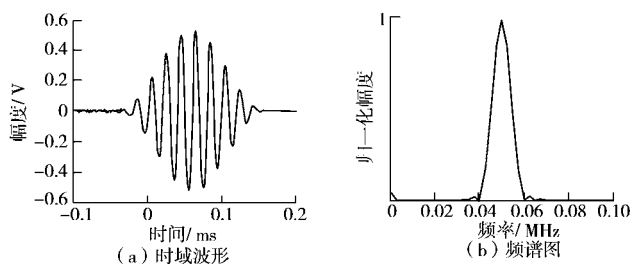


图6 激励信号

Fig. 6 Excitation signal

图7给出了激励频率分别为 40~90 kHz 时,从锚杆端部所接收的反射回波。在入射波之后可看到连续的几个明显的波包,其幅值呈指数衰减分布。经过计算其速度并且与图2相应频率下的模态的能量速度相对照,可以确定为 $L(0,1)$ 模态。由图7可见,40~90 kHz 频率下都能够接收到 3 次较为清楚的 $L(0,1)$ 模态,而在 60, 70 kHz,可以看到第四次端面回波。同时,在第一次端面回波与第二次回波之间,存在着一个较小的波包,计算其速度,为 $F(1,1)$ 模态。从理论上讲,在结构和载荷均对称的情况下,不会出现弯曲模态。但由于实验时难以精确满足这两个条件,实验结果会产生弯曲模态,但幅度较小。在实际工程检测中,应尽量避免弯曲模态的出现以免干扰检测结果。

根据图7所示的时域图,可以得到 $L(0,1)$ 端面回波的时间,将其乘以理论能量速度,即可计算锚杆的长度。如在 60 kHz, $L(0,1)$ 模态第一次端面回波为 817 μ s,而理论能量速度为 4975 m/s,故锚杆计算长度为 2.032 m。与锚杆的实际长度 2 m 相比,相对误差仅为 1.6%,误差在工程要求的误差范围之内。通过对埋在土壤中的锚杆的导波检测结果来看,应用超声导波技术对埋地锚杆长度检测是切实有效的。

图8给出了利用图7所示的时域图计算出来的超声导波在埋地锚杆结构中的 40~90 kHz 频率下的能量速度的实验值,与理论值相比,两条曲线较吻合,说明该结构的频散曲线可作为模态选取的理论指导,应用于埋地锚杆导波检测。此外,尽管从理论上分析,小于 90 kHz 的超声导波都可用于检测,但由于实验设备的限制,40 kHz 下的超声导波激励效果不理想。所以,可用于实际检测的导波频率范围为 40~90 kHz。

3 结 论

通过对埋地锚杆的频散曲线的分析,提出利用导波技术对埋地锚杆进行质量检测需考虑 3 个因素:①

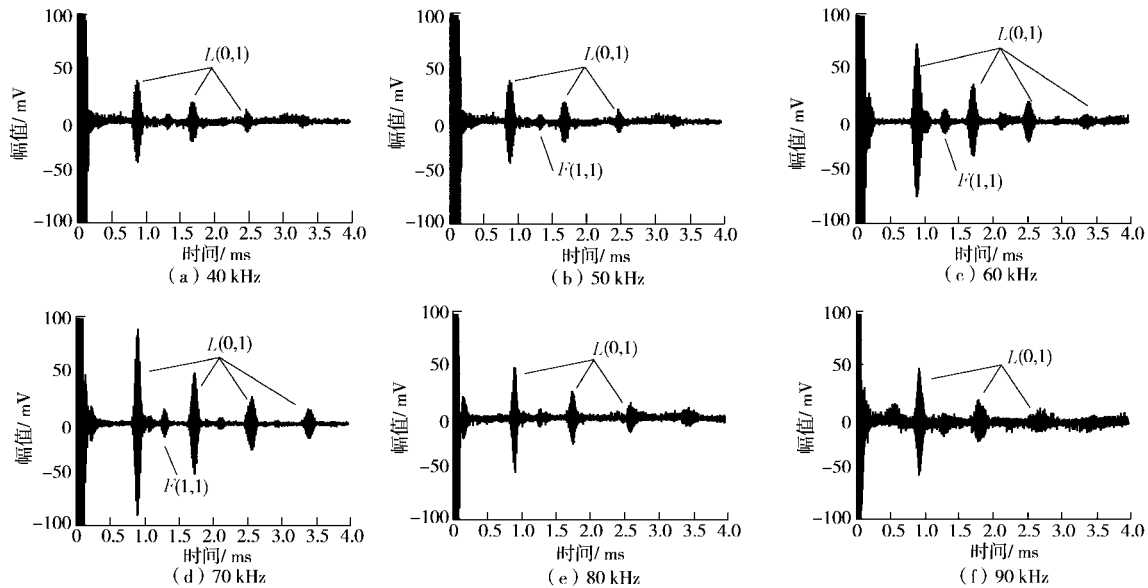


图7 实验结果

Fig. 7 Results of experiment

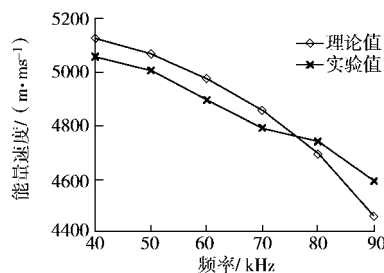


图8 能量速度的理论值与实验值

Fig. 8 Theoretical and experimental energy velocity

选择位移模式较为简单, 易于激发的模式; ②选择能量速度较高的模式, 这可使其与其他模式相区别, 易于识别; ③选择衰减较小的模式, 这可使其能传播较长距离, 增加检测的范围。根据以上3个因素, 同时考虑实验装置的局限, 40~90 kHz的 $L(0,1)$ 模式可以作为埋地锚杆工程中检测的选择。实验结果与理论相吻合, 验证了这一观点。这同时也为下一步分析更为复杂的岩石锚杆打下一定基础。

参考文献:

- [1] WANG Ming-wu, WANG He-ling. Nondestructive testing of grouted bolts system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1):109 - 113.
- [2] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (YAN Mo-ming, XU Zhen-xiang, SU Zi-yue. Technical manual of geotechnical anchorage[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.)
- [3] NA W B, KUNDU T, EHSANI M R. Ultrasonic guided waves

for steel bar concrete interface testing[J]. Materials Evaluation, 2002, **60**:437 - 444.

- [4] BEARD M D, LOWE M J S, CAWLEY P. Development of a guided wave inspection technique for rockbolts[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 2002, **21**:1318 - 1325.
- [5] 吴斌, 郑璟瑜, 何存富, 等. 采用PZT传感器激励和接收超声导波[J]. 北京工业大学学报, 2003, **29**(1):1 - 4. (WU Bin, ZHENG Jing-yu, HE Cun-fu, et al. Excitation and reception of ultrasonic guided waves using PZT transducers[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2003, **29**(1):1 - 4.)
- [6] 王秀彦, 王智, 焦敬品, 等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(1):11 - 16. (WANG Xiu-yan, WANG Zhi, JIAO Jing-pin, et al. Theoretical and experimental studies of ultrasonic guided waves propagation in pipes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, **40**(1):11 - 16.)
- [7] 何存富, 李隆涛, 吴斌. 超声导波在管道中的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2004, **30**(2):129 - 133. (HE Cun-fu, LI Long-tao, WU Bin. Numerical simulation of guided ultrasonic wave transmitted in pipe[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, **30**(2):129 - 133.)
- [8] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004. (ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. HE Cun-fu, WU Bin, WANG Xiu-yan translator. Beijing: Science Press, 2004.)
- [9] Malcolm David Beard. Guided wave inspection of embedded cylindrical structures[D]. London: Imperial College, 2002.