

基于冲击弹性波的无损检测技术及其应用

付 阁

北方工业大学土木工程学院, 北京 100144

[摘要]总结了建筑结构无损检测技术的研究现状, 重点介绍了首波相位反转法和冲击弹性波法的技术原理及特点, 采用基于首波相位反转和冲击弹性波的无损检测仪、钢质护栏立柱埋深检测仪分别对试块裂缝、材质、缺陷、厚度以及钢质立柱埋深等进行了试验研究。结果表明: 缺陷位置、尺寸、钢立柱埋深等结果均与实际一致, 验证该技术具有良好的可靠性, 可供土木工程检测技术人员参考借鉴。

[关键词]无损检测; 冲击弹性波; 试验研究

DOI: 10.33142/aem.v4i6.6294

中图分类号: TB115

文献标识码: A

Nondestructive Testing Technology and Application Based on Shock Elastic Wave

FU Ge

School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing, 100144, China

Abstract: This paper summarizes the research status of nondestructive testing technology of building structures, and focuses on the technical principles and characteristics of head wave phase inversion method and shock elastic wave method. The test research on the cracks, materials, defects, thickness and buried depth of steel columns of the test block is carried out by using the nondestructive tester based on head wave phase inversion and shock elastic wave and the buried depth detector of steel guardrail columns. The results show that the defect location, size and buried depth of steel column are consistent with the actual situation, which verifies that the technology has good reliability and can be used as a reference for civil engineering inspection technicians.

Keywords: nondestructive testing; shock elastic wave; experimental study

引言

工程结构无损检测在建筑工程质量保障过程中起着至关重要的作用, 通过无损检测仪器采集接收信息, 可在不破坏被检测对象的前提下, 探测构件内外的结构、性质、形态及缺陷的位置、大小、形状^[1]。相比于传统钻孔取芯等破损检测技术, 无损检测技术更高效、精准, 且能应用于建筑、桥隧、道路, 水利等诸多工程领域^[2]。

田志^[3]用横向驰豫 T2-T2 脉冲进行多孔复合岩石核磁共振研究, 模拟分析了演示扩散耦合时的影响因素, 推导得出可表征扩散耦合强度的速率计算公式, 揭示了孔隙类型的不同导致孔隙连通性间的差异; 马彬、单海涛、高振^[4]等使用不同程度缺陷的混凝土板进行了空气耦合式冲击回波法的数值模拟和现场试验, 利用回波响应, 经过傅里叶变换处理得到了不同缺陷深度下的峰值频率, 结果揭示了该方法在不同深浅缺陷下可以分别精确和准确地得出检测对象中存在缺陷的位置及深度; 孙立春^[5]等提出了一种新的利用电磁感应法研发传感器的思路, 融入数组形式多样感应线圈对复合式电磁传感器进行改良, 结合精密仪器和精准算法, 提升了测量仪器的精度和灵敏度, 可以更好地解决现有传感器结构简单致使钢筋检测结果不准确的问题。许士斌^[6]等测试了现场建筑物结构振型和固有频率, 基于该实测数据分析了建筑物的结构强度。陈禾^[7]等采用红外线热成像法探测钢管混凝土的脱黏缺陷, 得知钢管壁与凝

土之间的脱黏位置与脱黏面积。利用超声波对钢管混凝土孔洞缺陷进行了探测及排除。实验结果表明, 基于红外热成像法与超声波法的无损检测技术在实际工程中能表征出钢管混凝土内的大部分缺陷。

裂缝对钢筋混凝土墙体结构的承载能力、耐久性及墙体内的防水防腐性有极大影响, 温度变化收缩、地基不均匀变化导致的墙体沉降、荷载作用等都可能引起混凝土的开裂。

裂缝曲线走向、长宽等外观特征都容易进行测量和检查, 而裂缝是否贯穿和具体贯穿深度并不易于用简单方法检查^[8]。混凝土厚度与设计尺寸的一致决定了工程的质量。楼板、桥梁腹板, 地下结构衬砌的厚度容易都存在与设计不符的现象, 传统的钻孔法对结构有一定程度的破坏, 因此在不损伤结构的条件下可采用冲击弹性波法进行检测。柱形结构检测以公路立柱、钢管桩为代表, 高速公路护栏立柱起到固定波纹板并阻挡汽车冲出路堤的作用, 其埋置深度直接关系到阻挡力的大小和防护。该结构埋深长度的无损检测方法测量混凝土厚度的原理一致, 可采用冲击弹性波法。

本文在总结无损检测技术原理基础上, 采用冲击弹性波无损检测仪、钢质护栏立柱埋深检测仪对试块裂缝、厚度、材质、缺陷, 立柱埋深进行了相关试验研究。

1 无损检测技术原理

1.1 首波相位反转法

首波相位反转法原理解释有很多不同, 林维正^[9]

提出,衍射波衍射角的改变引起了建筑材料裂缝中尾端沿竖直线方向衍射波位移相位的改变,建筑材料的泊松比也决定了衍射角的改变和角度。

李阳^[10]对林维正提出的原理做出进一步解释,他认为首波相位反转法利用的是波的绕射原理。绕射角大于 90°时,换能器接收到的首波是压缩波,当绕射角小于 90°时,首波发生反转,变为拉伸波。

童年、童寿兴^[11]提出折射角大小之间的不同可以促使首波相位的反转。工作原理是超声波在裂缝末端产生折射时传出横波和纵波,此时横波的速度要小于纵波,但经折射角作用后,横波比纵波更快地到达换能接收器,并且相同的换能器所发射的纵波和接收横波之间的首波相位永远不会对应。横波在水中不传播,因此裂缝中有水存在时只能折射纵波,不会发生相位反向情况,这也就很好地证明理论成立。

虽然目前存在多种原理分析,但其中的共同点就是在临界位置,发射换能器、裂缝尖端与接受换能器三点组成的角度为 90°,如图 1 所示,根据几何原理,可得裂缝的深度为:

$$h = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

式中:h为垂直裂缝深度;d为换能器边缘距离;t₁, t₂分别表示绕缝的传播时间以及相应的无缝平测传播时间。

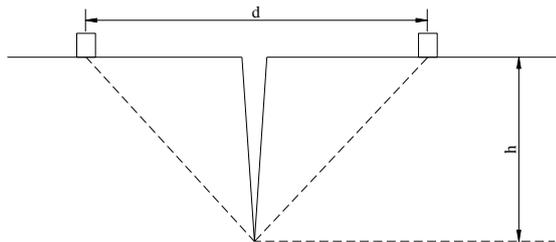


图 1 平测法示意图

当接收点对裂缝非对称时,裂缝深度 $h = \sqrt{I_1 I_2}$ 。

1.2 冲击弹性波法

冲击弹性波技术具有操作性强、实用度高,结果准确的三大优点,可用于混凝土结构和粘钢加固的质量以及各类剥离和脱空的检测^[12]。其原理是通过机械波在固体介质传播,以达到在不破坏混凝土建筑构件内部结构的前提下检测和评估其质量的目的^[13]。

测试的基本理论即在主体结构材料上方发射冲击波,得出其发生反射的时间和材料的冲击弹性波波速,利用公式(2),计算得出材料厚度。

$$H = v_e \cdot T / 2 \quad (2)$$

式中:H为结构厚度;v_e和T为弹性波波速和反射时间。

测试有两种方法,一种为单一反射法。该方法适合厚度大于 1m 的结构,激振信号与反射信号分离后可得到反射时间 T。

另一种为重复发射法,也叫冲击回波法(IE法),适用于面板、衬砌等板状薄壁混凝土结构^[14],冲击锤击打结

构时形成瞬间应力脉冲。当形成的瑞利波传播遇到缺陷或边界时,应力波在两种不同介质中发射得到冲击响应,进行快速傅里叶变换(FFT)后可获得该冲击响应中各种频率成分的振幅分布图,也即频谱图^[15]。

冲击回波法测量混凝土厚度时,先将频谱分析图上的峰值对应的频率换算为时间,再带入公式(1),即能得出板厚。频谱图上的峰值是弹性波混凝土上下介质面来回反射形成的振幅加强所致。

冲击回波法测量混凝土缺陷与测量厚度的原理相似,横纵坐标分别表示传播声时和测点编号,颜色的不同用于区分频率峰值的振幅,存在介质不连续缺陷的区域一般早于正常反射的测点出现振幅幅值,即可确定缺陷位置。

冲击弹性波法检测钢质护栏立柱埋深时,根据弹性波波速和波的传播时间可得出立柱的长度和埋深^[16-17]。对于较长立柱,分析方法采用时域分析(单一反射法),对于较短立柱,结合频域分析(重复反射法)提高精度。立柱长度计算公式为:

$$L = L_s + v \cdot (T_R - T_S) / 2 \quad (3)$$

式中:L为立柱长度;L_s为传感器与立柱顶部间距离;与T_S分别表示反射波到达时刻和激振波到达时刻;v表示在立柱中的弹性波波速。

2 波法的应用与试验

本次实验中所用仪器设备均为某公司生产,仪器设备均满足国家相关规范要求,符合本实验需求,关于仪器设备及相关软件使用说明可参见产品说明书,本文不再赘述。

2.1 冲击弹性波无损检测仪

试块裂缝、厚度、缺陷和材质采用冲击弹性波无损检测仪进行检测,用到的仪器有冲击回波法 DCA-E-0 型号仪器主机、ST-S21C 型号广域振动信号拾取装置,加速度传感器, D10、17 打击锤, CBM-2-DH 型号电荷电缆,工业电脑。图 2 为仪器设备,图 3 为工业电脑操作界面。



图 2 仪器设备

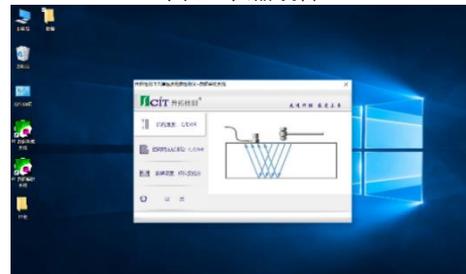
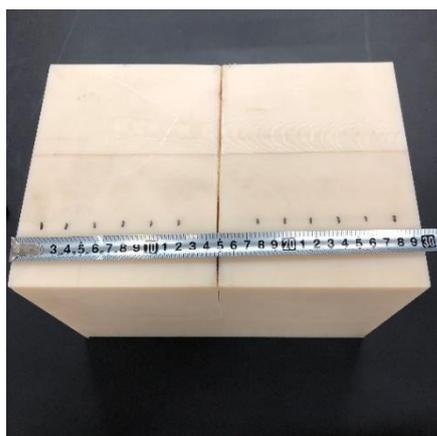


图 3 操作界面

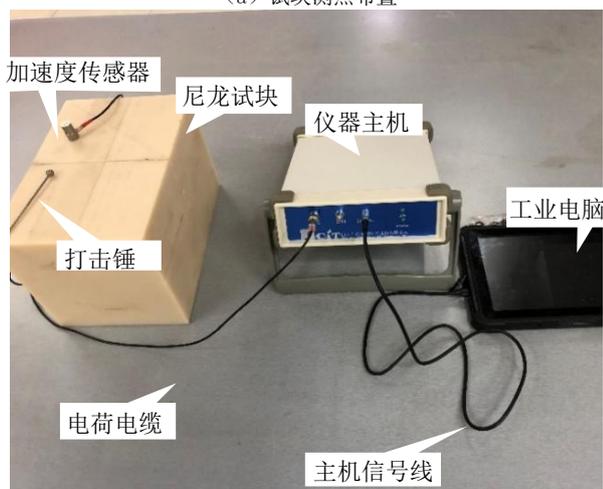
2.1.1 裂缝深度检测

裂缝深度无损检测的工作原理是根据冲击弹性波在裂缝深处传播时产生的衍射角和裂缝深度形成的几何关系,以及冲击波达裂缝末端发生初始相位的变化得出裂缝深度。

在进行数据采集之前,需对被测构件表面进行处理(如清除表面浮浆等),然后进行测点、测线布置及描画,垂直于裂缝在裂缝两边对称各布置一条测线,一条作激振用,一条作受信用;确定起始测点后,依次从距裂缝由近到远的沿测线等距布置测点;测量构件壁厚、起始测点距裂缝距离及测点间距。测点距离需根据构件大小适当进行调整,测点起始点至裂缝距离及测线间距可根据实际情况选择,但原则上间距越小,测试精度越高。本文点间距为2cm,测点布置如图4(a),仪器连接如图4(b)。本实验中测量量选用钢尺量距,钢尺量距相对精度为1/2000-1/5000,满足试验精度要求。



(a) 试块测点布置



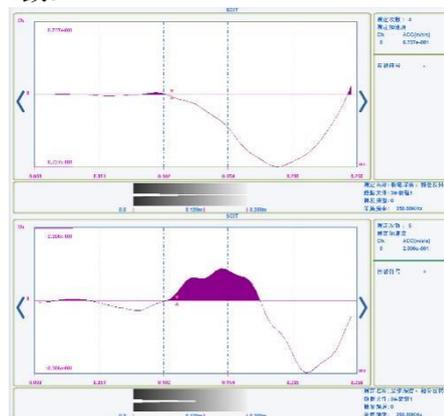
(b) 冲击弹性波无损检测仪连接方式

图4 裂缝深度检测试验数据采集分析装置

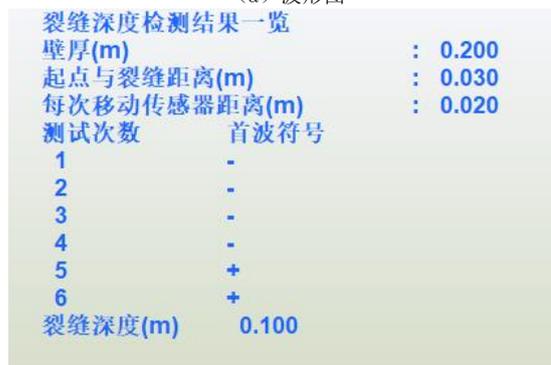
采集数据采用裂深度:相位反缝转法数据采集系统,根据实际情况设置参数,在零点标定后开始采集数据,传感器最开始放置在离裂缝最近的测点,打击锤放置在裂缝

另一边的对应等距测点上,得到相应的波形,从图5(a)可以看出,在第三个波与第四个波首波明显发生了反转。

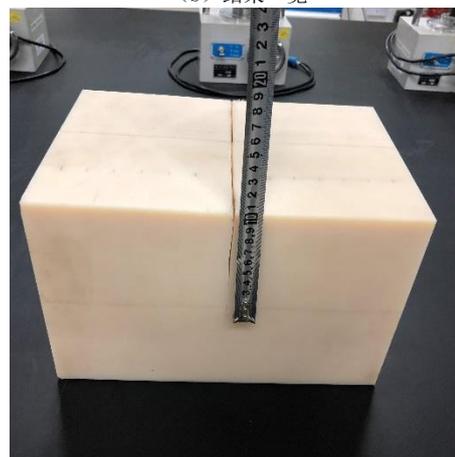
在解析软件中可以看出,将采集到的数据导入软件中,通过批量解析之后可以得到图5(b)所示结果一览,软件通过分析得到的结果0.1m与如图5(c)实际测量得到的结果一致。



(a) 波形图



(b) 结果一览



(c) 裂缝实际值

图5 裂缝深度检测值与实际值

2.1.2 材质及缺陷检测

试块缺陷检测基于冲击回波法(IE法),采用在试块表面进行激振、接收的方式。当测试位置无缺陷时,弹性

波反射时间在标准范围内；当试块内部存在缺陷时，弹性波发生绕射，传播距离增大，返回时间延长。

材质及缺陷检测测量对象分为两个构件：标定波速标准构件、内部缺陷构件。本文采用边长 150mm 的构件进行波速标定，选另一块存在缺陷的试块进行缺陷测试，测量点为光滑平整元件上对角线的交点处。根据构件规格设置完成测点，点位置离边界不小于 5cm，如图 6 (a)。缺陷检测测点布置需描画测点，垂直边缘绘制两条竖线，为测试线。首点离试块边缘不得小于 5cm，点距 2-3cm，一条测线中测点数量要求大于 8 个，如图 6 (b)。缺陷检测仪器的连接如图 6 (c)，除将电荷电缆换成广域振动信号拾取装置外，其他设备连接与裂缝检测一致。

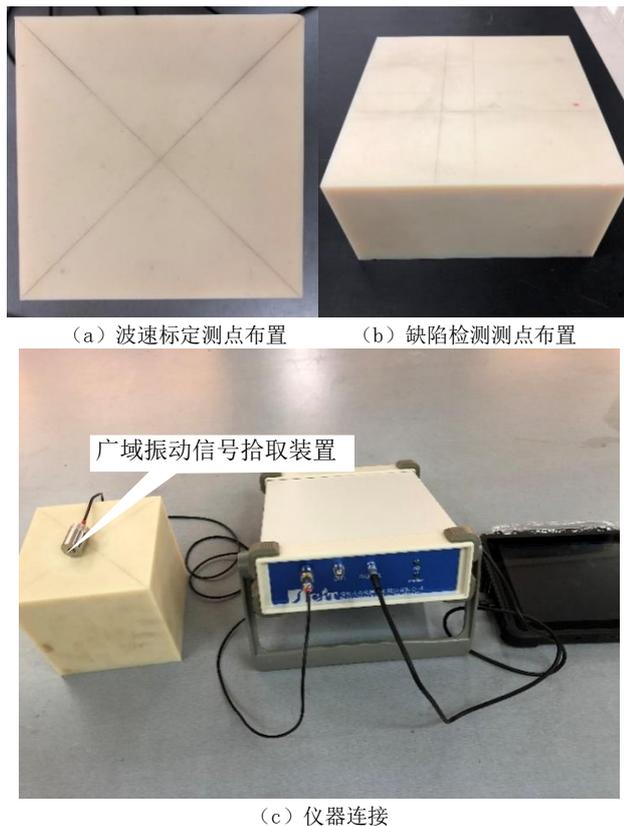
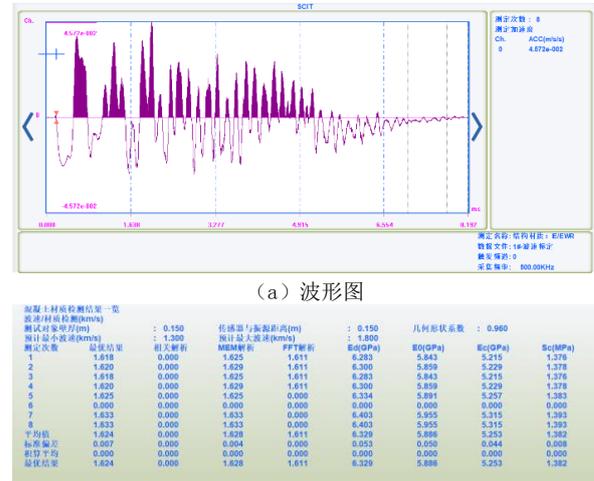


图 6 材质及缺陷检测试验数据采集分析装置

采集过程分为两步，先采集波速标定数据，再采集缺陷数据。在波速标定采集数据过程中，敲击方向与侧面方向垂直，敲击后会得到相应的波形图如图 7 (a)。缺陷数据采集时，传感器固定于测点上，敲击点位于测线一侧，逐一将一条测线测试完毕，得到波形图，如图 8 (a)

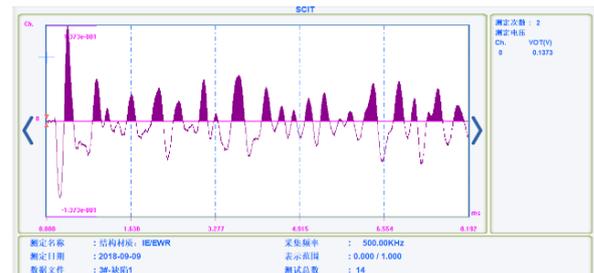
在解析软件中可以看出，采用结构材质及缺陷选项对采集到的数据进行解析，软件解析得到的波速标定结果为 1.624km/s，如图 6 (b)，将波速值放入缺陷检测数据解析参数中，通过软件解析可得等值图如图 8 (b)，矩形上下边 Y 坐标的坐标差约为 0.15m，如图 8 (c)，测量值与实际缺陷宽度 0.15m 一致。



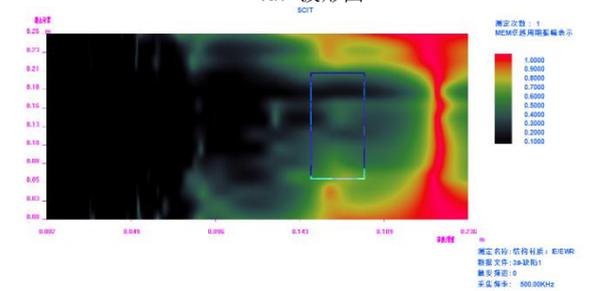
(a) 波形图

(b) 结果一览

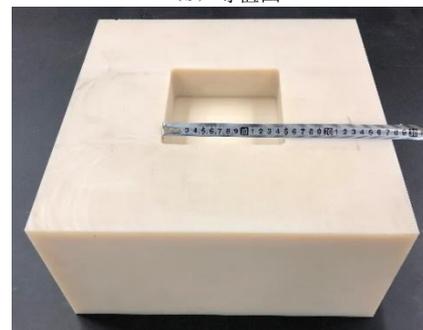
图 7 波速标定数据采集及分析结果



(a) 波形图



(b) 等值图



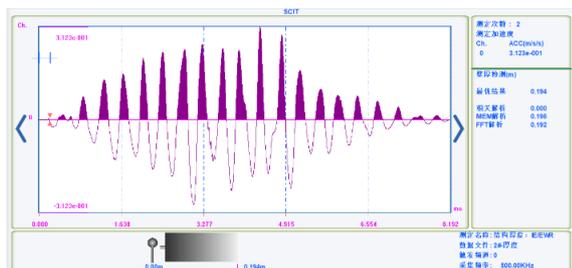
(c) 缺陷宽度

图 8 缺陷检测数据采集分析结果与实际值

2.1.3 厚度检测

试块厚度检测利用冲击波的特性，在物体周围激发弹性波信号，利用信号处理方法或频谱技术识别构件底部的反射信号，来测定结构物厚度（波速）等。

其测点布置和仪器连接方式与缺陷检测的波速标定一致,数据采集过程分为两步,先进行波速标定,再进行厚度检测。由于波速标定试块与缺陷检测使用的一样,这里将直接使用 1.624km/s 波速值带入解析软件参数中,厚度检测数据采集波形图如图 9 (a)。打开厚度检测解析软件,输入参数值后进行解析,从结果一览看到解析最后结果厚度为 0.201m,如图 9 (b),与实际结果 0.2m 误差在控制范围之内,实际结果如图 9 (c)。

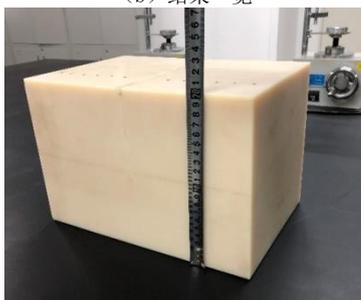


(a) 波形图

厚度检测结果一览

厚度检测(m)	解析用P波波速(km/s)	传感器与振源距离(m)	预计最小壁厚(m)	预计最大壁厚(m)
0.201	1.624	0.150	0.050	0.250
测定次数	最优结果	相关解析	MEM解析	FFT解析
1	0.202	0.000	0.203	0.202
2	0.202	0.000	0.202	0.202
3	0.202	0.000	0.202	0.202
4	0.202	0.000	0.000	0.202
5	0.202	0.000	0.000	0.202
6	0.198	0.000	0.195	0.202
7	0.202	0.000	0.000	0.202
8	0.202	0.000	0.000	0.202
平均值	0.201	0.000	0.200	0.202
标准偏差	0.001	0.000	0.004	0.000
计算平均	0.000	0.000	0.000	0.000
最优结果	0.201	0.000	0.200	0.202

(b) 结果一览



(c) 实际厚度

图 9 厚度检测数据采集分析结果与实际值

2.2 钢质护栏立柱埋深检测仪

本次检测采用的检测仪主要包括:仪器主机(DCA-E-2),加速度传感器(S305M-16),自动激振装置,激振控制器以及平板电脑,如图 10 所示。



图 10 钢质护栏立柱埋深检测仪

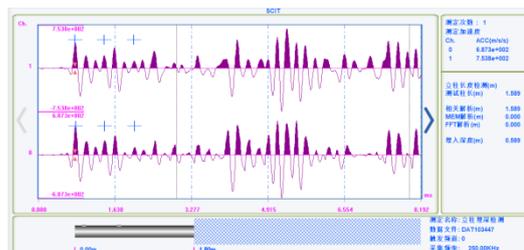
通过激振装置在柱头端面上发出脉冲信号,脉冲信号反射到另一端,同时使用仪器来接收该信号,再由信号分析软件计算出弹性波的传播时间,结合波速和露出地面长度,得出立柱长和立柱埋深。

仪器安装时,0 通道(CHO)设置在距离立柱端面 10cm 处,1 通道(CH1)设置在距离立柱端面 60cm 处,且保证 0,1 通道的磁性卡座与激振头在同一竖直线上,如图 11 所示。



图 11 钢质护栏立柱埋深检测仪接线布置

数据采集时,利用激振控制器上的击打按钮击打立柱产生波形,得到反射信号明显的波形并保存,一般保存 5-8 个有效波形如图 12 (a),对较差波形可进行删除,在批量解析后,得到结果一览如图 12 (b),软件通过计算后,得出总长为 1.498m,由于设定的外露长度为 1m,得埋深长度为 0.498m,如图 12 (c),实际柱长为 1.504m,测量得出结果,接近于实际结果。



(a) 波形图

立柱测试结果

自由立柱	弹性波速(km/s)	设计长度(m)	测试日期	
4.700	0.000	1.700	2018-10-21	
激振点与柱头距离(m)	最小预测长度(m)	最大预测长度(m)	传感器与柱头距离(m)	
0.000	1.250	1.870	0.100	
测定次数	2	传感器移动间距(m)	0.500	
测试次数	测试柱长(m)	相关解析(m)	MEM解析(m)	PFFT解析(m)
1	1.589	1.589	0.000	0.000
2	1.445	1.445	0.000	0.000
3	1.458	1.458	0.000	0.000
4	1.521	1.521	0.000	0.000
5	1.417	1.417	0.000	0.000
6	1.528	1.528	0.000	0.000
7	1.523	1.523	0.000	0.000
8	1.515	1.515	0.000	0.000
单纯平均值	1.500	1.500	0.000	0.000
修正平均值	1.498	1.498	0.000	0.000
标准偏差	0.055	0.055	0.000	0.000
计算平均值	0.000	0.000	0.000	0.000
最优结果	1.498	1.498	0.000	0.000
埋入深度(m)	0.498			

(b) 结果一览



(c) 实际柱长

图 12 钢质护栏埋深采集分析结果与实际值

3 结论

(1) 由试验结果可知, 首波相位反转法测试简便, 对场地要求小, 更适用于裂缝小于 20cm 的结构, 但测试结果受裂缝内部水、灰尘、钢筋及信号衰减的影响, 较实际值有偏浅的趋势。

(2) 通过基于冲击弹性波法的无损检测仪分别检测了试验对象的裂缝、材质、缺陷、厚度等, 试验结果与实际值相一致, 表明冲击弹性波法在无损检测领域中具有良好的可靠性, 该方法具有一定的推广应用前景。

(3) 钢质立柱埋深检测试验结果表明, 该设备操作简单, 技术可靠, 检测结果和实际值误差仅为 0.39%。该技术在高速公路钢制护栏检测中具有良好的推广应用价值。

项目基金: 国家重点研发计划项目(2018YFC0809900)、教育部产学合作协同育人项目(201802308010), 国家自然科学基金(41772335)。

[参考文献]

- [1] 耿荣生. 新千年的无损检测技术—从罗马会议看无损检测技术的发展方向[J]. 无损检测, 2001, 23(1): 2-5.
- [2] 郭东军. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用探析[J]. 安徽建筑, 2018, 24(6): 98-99.
- [3] 田志. 多尺度孔隙岩石的核磁共振扩散耦合现象及其探测方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 1119-1130.
- [4] 马彬, 单海涛, 高振, 等. 基于空气耦合冲击回波法的混

凝土板缺陷识别研究[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2020, 20(4): 1-7.

[5] 孙立春, 郝冬妮, 管钧. 一种电磁感应法的新应用及研究[J]. 工程质量, 2014, 32(7): 79-82.

[6] 许士斌, 时战, 贾志文, 等. 建筑结构强度无损检测方法的探讨[J]. 建筑结构, 1999(6): 56-57.

[7] 陈禾, 秦迎, 陈劲, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(1): 890-895.

[8] 吴佳晔. 土木工程检测与测试[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.

[9] 林维正, 苏勇, 洪有根. 混凝土裂缝深度超声波检测方法[J]. 无损检测, 2001, 23(8): 323-326.

[10] 李阳. 超声波在混凝土裂缝检测中的物理模拟研究[D]. 四川: 西南交通大学, 2016.

[11] 童年, 童寿兴. 超声波首波相位反转的机理解析[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 678-81.

[12] 宋福春, 赵洁, 付东华. 冲击弹性波法检测钢板加固混凝土质量试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(15): 84-88.

[13] 冯炜, 贾金生, 张德全, 等. 冲击弹性波法测试胶凝砂砾石性能的试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(3): 80-83.

[14] 王荣鲁. 水工结构混凝土质量检测冲击弹性波技术的研发和应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 472-478.

[15] 张子豪, 杨朝辉, 王月钱. 冲击弹性波法在高速公路钢质护栏立柱埋深检测中的应用[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2017(4): 10-13.

[16] 刘力博. 基于冲击回波法的混凝土构件厚度及内部缺陷检测技术研究[J]. 天津建设科技, 2016, 26(5): 44-45.

[17] 张高强. 基于冲击弹性波的公路护栏立柱埋深检测技术研究[J]. 四川理工学院学报自然科学版, 2009, 22(4): 8-11.

作者简介: 付阁(1997.4-)女, 北方工业大学硕士研究生在读。