

余明. 声波透射法在机场改扩建工程中基桩检测的应用分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 177-184. [YU Ming. Application of Acoustic Transmission Method in Foundation Pile Detection in Airport Renovation and Expansion Project [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 177-184]

声波透射法在机场改扩建工程中基桩检测的应用分析

余 明

(湖南省地质灾害调查监测所, 长沙 410000)

摘要: 针对传统基桩检测方法存在的缺陷定位不准、检测结果精度低、分级评价容易出现偏差等问题, 以长沙机场改扩建工程为例, 分析声波透射法在基桩检测中的应用。通过初步检测与跨孔声波透射法结合, 精确探测基桩缺陷范围, 利用声波传播特征和参数变化, 获取缺陷详细信息。采用PSD斜率法量化异常数据, 提高定位精度。结合声学参数分析, 对基桩完整性进行分类评估, 指导建造工作, 提升工程质量。实验结果表明: 声波透射法可以直观的判断基桩是否存在缺陷, 并进行详细定位, 检测结果直观、精确、高效, 提升作业效率, 对于基桩质量的分级评估完全符合工程规范要求, 具有很高的参考价值。

关键词: 基桩检测; 声波透射法; 超声波检测仪; 基桩完整性检测; PSD斜率法; 工程质量;

中图分类号: TU473.1+6

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0177-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.20

Application of Acoustic Transmission Method in Foundation Pile Detection in Airport Renovation and Expansion Project

YU Ming

(Hunan Province Geological Disaster Survey and Monitoring Institute, Changsha 410000, China)

Abstract: In response to the problems of inaccurate defect positioning, low accuracy of detection results, and easy deviation in grading evaluation in traditional foundation pile detection methods, taking the Changsha Airport renovation and expansion project as an example, this paper analyzes the application of acoustic transmission method in foundation pile detection. By combining preliminary detection with the cross-hole acoustic transmission method, the range of foundation pile defects was accurately detected, and detailed information of defects was obtained by utilizing the characteristics of acoustic wave propagation and parameter changes. The PSD slope method was used to quantify abnormal data and improve positioning accuracy. According to acoustic parameter analysis, the integrity of foundation piles was classified and evaluated to guide the construction work and improve engineering quality. The experimental results show that the acoustic transmission method can intuitively determine whether there are defects in the foundation pile and locate the defects. The detection results are intuitive, accurate, and efficient, which improves operation efficiency. The grading evaluation of the foundation pile quality fully meets the requirements of engineering specifications and has a high reference value.

收稿日期: 2024-08-10

作者简介: 余明(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地基基础工作。

E-mail: nguaskd123@126.com

Keywords: Foundation pile detection; Acoustic transmission method; Ultrasonic detector; Foundation pile integrity detection; PSD slope method; Engineering quality

0 引言

机场改扩建工程是为了适应不断增长的航空需求和改善航空服务而进行的工程项目。在机场改扩建工程中,基桩作为承重部件的重要组成部分,扮演着连接地面和建筑结构的角色^[1]。随着工程难度的增加,基桩直径以及长度也逐渐提升,由于施工技术以及质量的约束,使得基桩形成断裂、离析等问题,影响建筑工程质量^[2],造成安全隐患。因此如何快速准确的检测基桩完整性,对于保证工程质量和建筑安全具有重要作用。

已有很多学者对基桩无损检测进行了研究,曹阳等^[3]采用光频域反射(OFDR)技术来进行基于光纤对称粘贴于桩表面的室内模型桩试验,用以解决传统测试技术获取水平荷载作用下基桩变形的不足。但该方法只针对特定的工程背景和损伤类型设计,具有一定的局限性。舒岳阶等^[4]研究了高桩码头基桩损伤的检测方法,采用了光纤光栅应变传感器阵列进行挠度测量,并提出了分段损伤识别方法,满足了高桩码头基桩损伤的监测需求。但该方法只适合对高桩码头基桩的损伤检测,适用范围有限。张娜等^[5]通过声波透射方法获取基桩暴露的不同问题,同时对该种方法的检测准确度进行了科学验证。但该方法在应用过程中,声波参数采集和分析不全面,导致基桩缺陷定位不准确。高崑等^[6]研究了声波透射法的检测原理,梳理了检测方法流程,分析了基桩声学参数的采集情况,并结合工程实例研究了基桩完整性的判断方法,为声波透射法在基桩检测中的应用提供了重要参考。但该方法检测结果精准度低,导致分级评价不准确。韩春雨等^[7]利用声波透射法发现桥梁桩基中存在的质量问题,采取措施进行处治,保证桩基质量和桥梁的安全性。但是该方法对桩身条件敏感,声测管中水位以上部分的生锈、生苔藓等,都可能影响声波的传播,导致数据异常。李索南多吉等^[8]通过平测法结合PSD评判标准,以及声速和波幅的系统分析,判断桩身是否存在缺陷。但是该方法在现场进行检测时,数据处理量较大。

本文探讨了声波透射法在机场改扩建工程基桩检测中的应用,旨在提升基桩检测的准确性和效

率。机场基桩的质量和可靠性对机场的安全运行至关重要,因此对其进行快速、准确的检测具有重要意义。声波透射法作为一种经典的无损检测方法,能够有效发现基桩的缺陷,并通过先进的数据分析方法实现缺陷的精确定位和识别。通过对基桩的评级分类,能够系统地评估其完整性和承载力,为机场改扩建工程提供有力支持。本研究不仅有助于提升机场基桩检测的技术水平,也为其他领域的基桩检测提供了借鉴和指导,推动了无损检测技术的发展和应用。

1 声波透射法基桩检测

1.1 确定基桩异常检测点

根据声波传播理论,建立声波传输通道,提前在基桩内部埋设声测管,安装接收换能器,通过超声波检测仪脉冲发射换能器向基桩发射高频弹性脉冲波,当脉冲波遇到基桩混凝土的缺陷(如孔洞、裂缝等)时,波的能量发生变化,导致脉冲波的外表振幅发生显著变化。因此,计算脉冲波的外表振幅在识别和定位基桩混凝土中的缺陷方面具有重要作用。

脉冲波的外表振幅 Z_c 计算公式如下:

$$Z_c = Z \cos \sqrt{\frac{p}{o}} \left(t - \frac{c}{s} \right) \quad (1)$$

式(1)中:最大振幅值用 Z 描述, m; 波震和波源之间的差距用 c 描述, m; 弹簧振子的质量用 o 描述, kg; 弹性系数用 p 描述, N/m; 脉冲波的传播时长用 t 描述, s; 脉冲波在混凝土当中的传播速度用 s 描述, m/s。通过公式(1)得到的脉冲波的外表振幅值,评估脉冲波在传播过程中的强度变化。

通过分析脉冲波外表振幅的变化,判断基桩混凝土中的缺陷信息,可以提前发现异常检测点,为后续的缺陷定位工作提供准确的评估依据。

1.2 基桩缺陷定位

在发现异常检测点后,为了更加详细的探测缺陷的范围,本文采用桩内跨孔声波透射法进行基桩检测。该方法在机场改扩建工程当中应用广泛,是当前混凝土灌注基桩检测的常用方法^[9-10]。检测时

需在基桩中部署多个声测管，并且将发射以及接收换能器部署在声测管中。桩内跨孔声波透射法具有作业限制少、检测全面、测量精度高和对基桩无损

害的优点^[11]。调整发射和接收换能器的深度，根据具体情况分别采用平测、斜测和扇形测量的方法进行进一步确认，三种扫测方法的具体操作如图1所示。

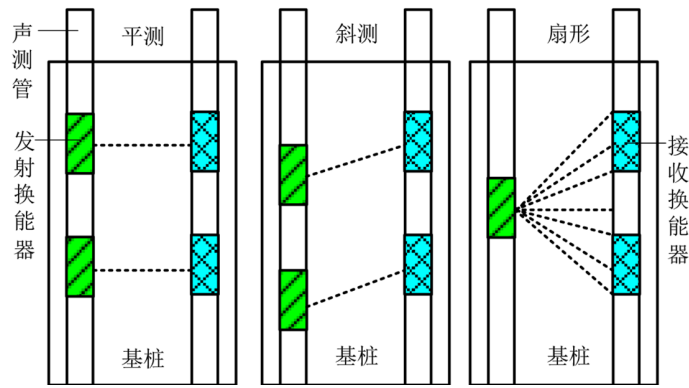


图1 平测、斜测和扇形测量方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of horizontal measurement ,oblique measurement ,and sector measurement methods

1.2.1 声波传播特征及参数变化

在机场改扩建工程施工当中，基桩内部的混凝土会产生各种问题和缺陷，包括离析、局部夹泥、层状离析、桩底沉渣等，对工程和建筑物的安全结构产生严重的威胁。因此对基桩内部的混凝土状态进行检测是保证工程安全的重要措施^[12]。在基桩混凝土缺陷探测的过程中，内部是否存在缺陷，对超声波的正常传播与否具有重要的影响作用，同时混凝土是一个连续的整体。

在超声波的传播过程中，若换能器与缺陷处恰巧处于同一位置，混凝土缺陷范围同混凝土间存在中断界面，超声波在该界面上进行传播会出现很多样的变化^[13]。同时超声波在经过缺陷区后，产生的各种参数也会随之变化，包括以下几个方面：

(1)声时变化

假设基桩内部的混凝土缺陷为孔洞，孔洞内部会有空气或者水汽，超声波在传播途中经过孔洞时会发生绕射现象，此时声波检测仪采集的声时数据就会超长，明显比正常的混凝土基桩更长。

(2)接收波振幅变化

对于基桩的混凝土缺陷而言，可以吸收更多的声波以及反射声波。因此超声波在穿过这些缺陷区域的时候，衰减程度也会大幅度增加，代表性的特征就是超声波的振幅值同步减少，利用这个特点，可以通过测量超声波的第一波振幅，快速发现缺陷。

(3)接收波主频率变化

通过研究接收波的信号频谱可知，超声脉冲波低频分量突然上升，则说明混凝土内部缺陷很多，质量不佳，从而导致接收波的频率值下降，通过这点可以很明显的反应出基桩混凝土内部存在的问题。

(4)接收波波形变化

当超声波透过混凝土内部的缺陷部位时，声波的传播途径会产生很多不同的变化，由于混凝土内部质量被缺陷破坏，因此直达波和绕射波之间的频率、相位等都会产生巨大的偏差，此时将二者进行叠加，则最终波形就会出现畸变，这也是衡量基桩混凝土缺陷的一个重要参数。

通过对声波传播特征参数的分析，可以判断基桩的缺陷类型、位置和大小等信息。

1.2.2 PSD斜率法缺陷定位

通过PSD斜率法量化异常数据，进一步提高缺陷定位的精度和敏感性。PSD判据，也称斜率法判据，是声波透射法在基桩检测当中常用的缺陷定位算法，由于超声波经过基桩混凝土缺陷时，波速会大幅度降低，采集到的声时也会随之增大，因此与缺陷点周围正常区域的声时数据会产生很大的区别，根据这些差别即可判断基桩的缺陷位置、种类等^[14]。为了量化这些异常数据，并进行放大操作，需要提取相邻测点的声时差异数据与深度差异数据，并取二者的比值，公式如下：

$$X = \frac{\Delta t}{\Delta g} = \frac{t_i - t_{i-1}}{g_i - g_{i-1}} \tag{2}$$

式(2)中：基桩深度为深度—声时曲线的纵坐标，

声时变化的斜率用 X 描述, ms/m ;

对 X 同其相邻测点的声时差 $\Delta t (\Delta t = t_i - t_{i-1})$

进行乘积运算, 能够获取 PDS 判据的 K 值, 可表示为:

$$K_i = X\Delta t = \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{g_i - g_{i-1}} \quad (3)$$

式(3)中, X 表示声时 t 同深度差的斜率, ms/m ; g 表示声时 t 同深度差的测点高度, m ; K_i 表示第 i 个测点的 PSD 判据值。

通过以上处理, 将异常数据放大后, 缺陷处与正常混凝土相邻部分的 K 值就会增大, 据此可以判断缺陷区域的位置、区域和面积等。

在建立 PSD—深度曲线时, 根据实时采集的声时获取基桩剖面测点的 PSD, 利用该值检测异常点, 该方法对基桩混凝土的缺陷识别很灵敏, 同时

还可以提高精度, 减少由声测管不平行导致的测量误差。

1.3 基桩完整性判断分类

由于基桩在灌注过程中现场环境复杂, 且工艺环节多, 难度高, 所以基桩的混凝土质量受到多种因素的影响, 很容易产生各种缺陷和不足。评估基桩灌注质量的因素包括基桩的完整度、耐用度和承载力, 其中完整性评估最为重要^[15]。其评判标准是桩身混凝土呈均匀分布, 无明显断裂和钢筋外露现象。

以上节确定的高精度的基桩混凝土缺陷类型、大小和范围等信息结果为依据, 根据《建筑基桩检测技术规范》分析声学参数, 对桩身的完整性进行评估和分类, 详细的分类标准如表 1 所示。

根据上述表中的基桩分类标准, 对机场改扩建

表 1 基桩完整性评估分类表

Table 1 Classification of foundation pile integrity assessment

分类级别	基桩完整性分类标准
一类	合格: 桩身完整, 无缺陷
二类	合格: 桩身存在轻微缺陷, 但是不影响单桩极限承载力
三类	不合格: 桩身存在显著缺陷, 对承载力造成不利干扰
四类	不合格: 桩身存在严重缺陷

工程的所有基桩进行声波透射法检测。根据分类的结果安排下一步的工作, 对不同缺陷程度的基桩进行后期补修和重铸作业。

2 工程项目应用分析

2.1 工程项目概况

长沙机场改扩建工程(T3 航站楼)第一标段位于现有长沙黄花国际机场东侧。新建 T3 航站楼约 50 万 m^2 ; 综合交通枢纽 49.23 万 m^2 ; 新建货运站工程 1.99 万 m^2 , 新建航空食品加工厂 3.65 万 m^2 , 具体项目情况如图 2 所示。

长沙机场改扩建工程(T3 航站楼)第一标段第三方检测是目前为止湖南省内唯一一个检测金额过千万的建筑项目。该项目作为湖南省最有影响力的工程(湖南省 1 号工程), 第三方检测单位在该项目检测过程中需要提供准确、公正的试验数据。

委托第三方机构进行工程质量检测的范围主要包括但不限于: T3 航站楼; 货运及机务维修工程; 生产辅助用房工程; 机场应急与消防救援工程; 能源中心工程; 信息中心工程; 驻地建设等单位工程的原材料、地基基础等。

2.2 检测设备

声波透射法基桩检测的主要设备包括: 超声仪、声测管、深度传感器、导向轮、三脚架以及换能器等, 本文采用 RS-ST01C 超声仪, 产自武汉的海岩公司, 同时加上计算机, 采用跨孔法进行基桩检测。

实验时使用三个声测管, 对基桩发射和接收超声波信号, 根据采集到的超声波传播特征研究跨孔之间混凝土的质量, 声测管的布设位置如图 3 所示。

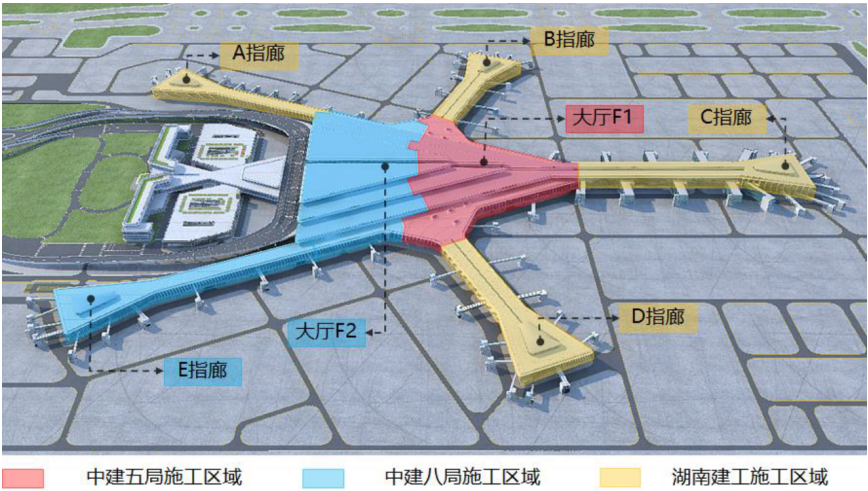


图2 长沙机场改扩建工程总体效果图

Fig.2 Overall rendering of Changsha Airport renovation and expansion project

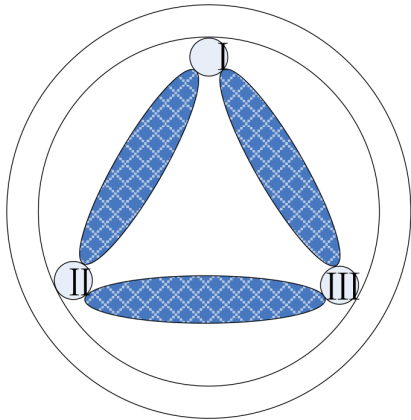


图3 声测管布设位置

Fig.3 Layout of acoustic tubes

打开 WaveViewer 软件，连接超声仪和计算机，设定采样率为 5 MHz、声波的传播速度为 1500 m/s，开始采集声波信号。利用 WaveViewer 软件对采集到的数据进行进一步处理和分析，通过滤波、时域图谱显示等功能，对声波数据进行实时监测和初步分析，以提取出声波在混凝土中传播的特征，识别可能的缺陷部位。使用 PSD(功率谱密度)斜率法对声波数据进行分析，识别声波信号中的频率成分和能量分布情况。结合声波透射法检测结果和声波数据分析的特征，对基桩的完整性进行判断和分类，对基桩的完整性状况进行评估，并记录下相应的判断结果。

2.3 声波透射法基桩检测实验

本文选取长沙机场改扩建工程 B 指廊部分的基桩为检测对象，采用声波透射法进行基桩检测实验，现场检测作业情况如图 4 所示。



图4 声波透射法基桩检测作业现场

Fig.4 On-site detection of foundation piles using acoustic transmission method

实验选取其中 16 号基桩进行检测，其长度、直径分别是 12 m 以及 1500 mm，采用的混凝土强度等级为 C30，桩身中布置 I、II、III 三根声测管，形成三个侧面，检测时采用逐点对测的方式，按照 100 mm/侧面的标准进行，获取各个侧面的超声波波形图，PSD—深度曲线图等测量数据。超声波波形图可以直观的反应桩身是否存在缺陷，具体的实验结果如图 5 所示。

从图 5(a)当中可以看出，当基桩没有缺陷时，超声波波形图波速正常，上下波动幅度均匀连续，并无异常波动情况，因此判定该部位属于正常部位。从图 5(b)当中可以看出，当基桩有缺陷时，超声波的透射波形明显变小，波幅下降很多，同时声时增大，导致波形出现了畸变现象。说明声

波透射法可以直观的判断出基桩是否存在缺陷，定性检测的完整性很高，而且检测作业容易，不受基桩大小的限制，适应性很强。这是因为本文方法通过分析脉冲波外表振幅的变化，判断基桩混凝土中

的缺陷信息，可以提前发现异常检测点。
为了进一步确认基桩缺陷部位的具体位置以及面积大小等信息，通过PSD斜率法判据进行缺陷部分的定位，实验获取的PSD-深度曲线如图6所示。

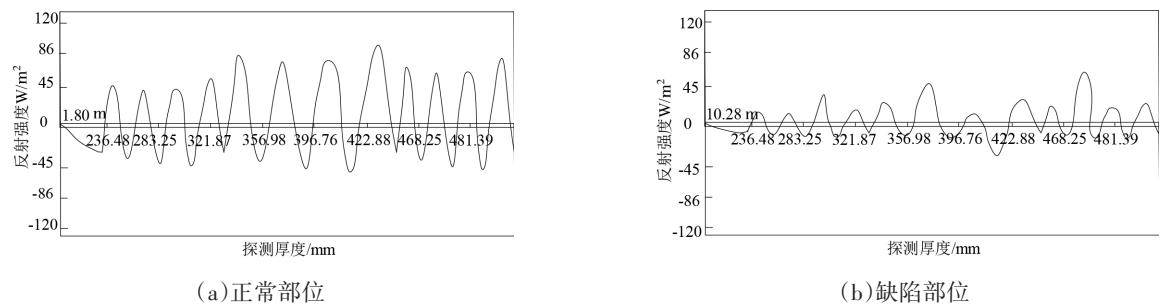


图5 桩身正常与缺陷部位超声波波形图对比
Fig.5 Comparison of ultrasonic waveforms between normal and defective parts of pile body

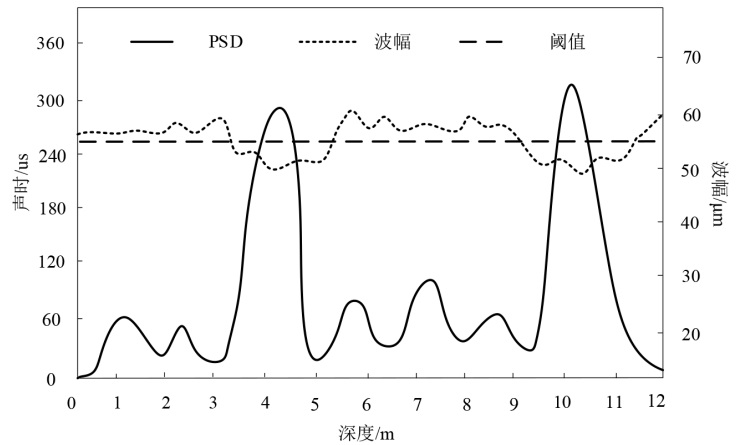


图6 PSD—深度曲线图
Fig.6 PSD-depth curve

从图6当中可以看出，16号基桩在大约3.85~4.56 m处，以及9.85~11.23 m处，发现两个较大的缺陷部位，这两个区域大部分声测点的波幅都低于阈值，且PSD产生了大幅度的畸变，同时桩底的声学参数也产生了异常现象，很可能是桩底沉渣，因此根据表1 基桩完整性评估分类表，将16号基桩划分为四类桩，即桩身存在较大缺陷，不符合建筑工程安全标准，需要重新进行补桩。

实验说明使用声波透射法进行基桩检测可以直接定位基桩缺陷的具体位置和类型等，检测结果直观、高效，能够缩短检测时间，提高作业效率。

2.4 钻芯法基桩混凝土取样核验

为了验证声波透射法基桩检测实验结果的准确性，对16号基桩进行钻芯法混凝土取样，从而对

桩身缺陷的具体位置和情况进行实际确认，取样的结果如图7所示。



图7 基桩钻芯法混凝土取样
Fig.7 Concrete sampling by pile core drilling method

从图7当中可以看出,16号基桩在进行混凝土钻芯法取样后,在3.85~4.56 m处以及9.85~11.23 m处,均发现了混凝土芯样不完整、结构破碎、胶结程度低、钻进取样难度高等问题,因此这两个部位确实存在较大的缺陷。根据基桩完整性判断标准进行评估,在3.85~4.56 m处以及9.85~11.23 m处,混凝土原材料的质量不达标,混合比例不当,导致混凝土内部存在空洞、裂缝缺陷,得出的结论与声波透射法的检测结果相同,同样将16号基桩判定为四类桩。

实验说明声波透射法的检测结果与钻芯法基桩混凝土取样的实际核验结果一致,准确度很高,完全可以取代传统的基桩检测方法,具有很强的实用性。这是因为声波透射法结合PSD斜率法能够对基桩内部的材料变化和结构缺陷进行高灵敏度、高分辨率的检测,捕捉到基桩内部的微小变化,准确地定位可能存在的缺陷部位,从而使得检测结果更加可靠和准确。同时声波透射法结合PSD斜率法无需对基桩进行破坏性取样,因此不会影响基桩的完整性,避免了传统检测方法对基桩结构的损伤,也减

少了后期的维护工作。

2.5 基桩静载试验

基桩的质量除了完整性以外,最重要的一个指标就是承载力,因此在机场改扩建工程的基桩检测当中,对于基桩承载力的检测也是十分重要的,为了确定单桩的极限承载力和沉降量等参数,基桩静载实验室最准确可靠的检测方法。

长沙机场改扩建工程(T3航站楼)B指廊部分的地基基础采用深层搅拌桩,该结构的安全等级是2级,同时要求单桩承载力规划值是250 kN,地基承载力特征值应不低于200 KPa。

为了进一步验证声波透射法的基桩检测性能,基于《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94),对包括16号基桩在内的B指廊部分共8根基桩分别进行了单桩静载实验,编号从10~18号,上述基桩均通过了声波透射法基桩检测,除了16号基桩以外,其它的基桩均符合建筑工程质量标准。具体的实验结果如表2所示。

表2 各基桩极限承载力统计表
Table 2 Statistics of ultimate bearing capacity of each pile

编号	完整性评级	承压板面积/m ²	承压板直径/m	极限承载力/kN	是否合格
10	一类	0.375	0.82	346	合格
11	一类	0.375	0.82	298	合格
12	一类	0.375	0.82	323	合格
13	二类	0.375	0.82	350	合格
14	一类	0.375	0.82	264	合格
15	一类	0.375	0.82	258	合格
16	四类	0.375	0.82	186	不合格
17	二类	0.375	0.82	225	合格
18	一类	0.375	0.82	312	合格

从表2中可以看出,经过声波透射法检测后,不合格的16号基桩在静载试验中的极限承载力仅为186 kN,远低于设计值和工程质量要求。而其余检测合格的7个基桩,其极限承载力均超过了设计值,表现出良好的承载性能。这一结果充分说明了声波透射法在基桩质量检测中的准确性和有效性,有利于工程质量的严格把控。这是因为声波透射法结合PSD斜率法能够对基桩内部材料的微小变化和结构缺陷进行高灵敏度的检测,因此能够及时发现可能存在的问题,并给出准确的评估结果。并且声

波透射法能够直接定位基桩的缺陷位置和类型,而PSD斜率法可以提供更精确的缺陷识别。这使得对基桩缺陷的评估更加准确和直观,有效避免了主观因素的干扰。

3 结论

本文在机场改扩建工程当中采用桩内跨孔声波透射法进行基桩检测,使用PSD斜率法定位基桩的缺陷部位,并根据工程质量要求进行评级分类,经

实验得出以下结论:

(1)声波透射法通过分析脉冲波外表振幅的变化,能够判断基桩混凝土中的缺陷信息,为工程质量评估提供了重要依据。同时,这一方法操作简便,适用范围广泛。

(2)声波透射法结合PSD斜率法能够对基桩内部的材料变化和结构缺陷进行高灵敏度、高分辨率的检测,捕捉到基桩内部的微小变化,从而准确地定位缺陷部位,提高作业效率,确保工程质量。

(3)通过声波透射法进行基桩质量分级评估结果准确可靠,有利于严格控制工程质量,确保基础设施工程的安全可靠性。

参考文献

- [1] 谢亚东. 混凝土龄期对基桩声波透射法测试的影响[J]. 电声技术, 2022, 46(11): 152-156.
- [2] 卢亮. 声波透射法在基桩检测中常见的问题与探讨[J]. 工程质量, 2020, 38(05): 41-44.
- [3] 曹阳, 孙义杰, 胡谢飞, 等. 水平荷载下基桩分布式变形检测模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(01): 107-116.
- [4] 舒岳阶, 吴俊, 周世良, 等. 高桩码头基桩损伤的光纤光栅传感阵列识别[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10): 2349-2362.
- [5] 张娜, 胡朝彬, 李广元, 等. 声波透射法在蒙华铁路基桩检测中的应用分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(15): 72-74.
- [6] 高颀, 白军营. 声波透射法在冲孔灌注桩质量检测中的应用研究[J]. 港工技术, 2020, 57(01): 113-116.
- [7] 韩春雨. 桥梁桩基检测中声波透射法检测的应用[J]. 低碳世界, 2020, 10(07): 166-167.
- [8] 李索南多吉, 肖青云, 王文军, 等. 谈声波透射法在桩基完整性检测中的应用[J]. 山西建筑, 2020, 46(03): 69-70.
- [9] 秦月, 朱磊, 董亮. 基于DSP技术的密肋复合墙体空鼓声波检测[J]. 计算机仿真, 2020, 37(11): 412-416.
- [10] 李娟. 声波透射法基桩检测中管斜修正方法研究应用[J]. 中国建材科技, 2020, 29(04): 11-12+18.
- [11] 余察军. 声波透射法现场检测相关问题研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(23): 20-23. DOI: 10.
- [12] 林婷. 基于低应变法和声波透射法的基桩完整性检测研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(12): 18-20.
- [13] 刘扬. 声波透射法及低应变法检桩工程实例分析[J]. 北方建筑, 2022, 7(02): 20-24.
- [14] 王诗东. 声波透射法与钻芯法在基桩检测中的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(13): 22-23+25.
- [15] 马驰. 声波透射法结合钻芯法检测灌注桩桩身完整性的应用[J]. 建材与装饰, 2020(06): 231-232.