

# 跨孔超声波在钻孔咬合桩完整性检测中的应用

杨光升

中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊  
Email: yanggs@163.com

收稿日期: 2021年8月10日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年9月27日

---

## 摘要

本文介绍了跨孔超声波探测技术的原理、探测流程和解释方法, 并以阿曼拉斯玛卡兹原油储罐工程中使用跨孔超声波检测海水取水井钻孔咬合桩完整性的实例, 指出其在混凝土灌注桩质量检测中发挥的作用, 表明了跨孔超声波检测操作方便、准确率高、经济性高等优点。

## 关键词

跨孔超声波, 钻孔咬合桩, 混凝土灌注桩, 完整性检测

---

# Application of the Cross-Hole Sonic Logging Test to Evaluate the Integrity of Secant Piles

Guangsheng Yang

China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. (International Division), Langfang Hebei  
Email: yanggs@163.com

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

This document introduces the cross-hole sonic logging test principle, methods and interpretation. Based on practice at Ras Markaz Crude Oil Park Project in Sultanate of Oman, cross-hole sonic logging test is used to detect the integrity of concrete secant piles for seawater intake well, which points out its role in concrete quality control for cast-in-place pile, and demonstrates that the cross-hole sonic logging test method is highly efficient, accurate, and costless.

## Keywords

Cross-Hole Sonic Logging, Secant Pile, Cast-In-Place Pile, Integrity Test

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钻孔咬合桩属于混凝土灌注桩的一种类型，是一种深基坑围护结构，通常采用素混凝土桩与钢筋混凝土桩间隔布置的工法，相邻的桩互相搭接、咬合，以达到良好的整体连续性和密闭性。由于钻孔咬合桩施工过程中通常会涉及大量的地下或水下混凝土灌注，受地质情况、施工工艺、施工设备和施工经验等多种因素影响，可能会导致蜂窝孔洞、夹泥异物、缩径、密实度差和断桩等质量缺陷的发生。因此，对混凝土桩基的完整性检测尤为重要，常用的检测方法有低应变法(Low Strain Integrity Testing)以及跨孔超声波法(Cross-Hole Sonic Logging, 简称 CSL)两种。低应变法适用于桩型比较简单或桩身阻抗变化不大的情况，虽能检测质量缺陷的存在，但是不能给出缺陷的确切类型，相对来说，跨孔超声波检测法的检测范围和数据精度要高很多。本文以中国石油管道局工程有限公司在阿曼拉斯玛卡兹原油储罐工程中进行海水取水井的钻孔咬合桩施工为例，阐述了跨孔超声波技术在混凝土灌注桩完整性检测中应用的优点。

跨孔超声波检测法是无损检测大直径灌注桩完整性最行之有效的方法之一，该测试方法最早是由法国建筑与公共工程研究实验中心(CEBTP)于上世纪 60 年代后期发展起来的，能够在不破坏材料、结构的组织和使用性能的同时，以相对经济的方法来定位缺陷并评估桩基质量，它可以检测整个混凝土桩身的

各个截面，且具有结果准确、测试成本低、检测快捷等优点。随着近年来计算机等技术的发展，跨孔超声波检测技术越来越多的用于各种形式的混凝土构件的内部或表层质量缺陷的检测，在工业民用建筑、铁路、公路、港口和石油天然气等工程建设中得到了广泛应用。

## 2. 跨孔超声波探测技术介绍

### 2.1. 探测原理

跨孔超声波检测法是利用超声波脉冲穿透介质传播的速度与介质的密度和声波波长相关的理论[1]，是基于对超声脉冲速度测试的研究。声波是在介质中传播的机械波，用于混凝土检测的声波，其主要频率为  $2 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5$  Hz，属于超声频段，能量较小，作用时间短，混凝土不会产生塑性变形，可以近似地看作弹性介质，在声波振动作用下能产生弹性形变。超声波传播速度  $v_p$  是泊松比( $\nu$ )、密度( $\rho$ )和材料弹性模量( $E$ )的函数，当声波穿透时混凝土的形变和应力呈线性关系，运用弹性力学的方法，其速度推导如下面公式[2]所示：

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

超声波检测仪通过超声脉冲发射装置重复发射超声波信号，信号在两个竖向导测管中的探头之间传播，经多次反射、折射、绕射及吸收衰减后，用高精度的接收系统记录下该脉冲波在混凝土内传播的时间、波的能量衰减特性、频率变化及波形畸变程度等特征。脉冲传播速度受两个探头之间所有介质的具体条件影响，包括混凝土、水耦合剂和钢管等。用声波检测仪沿桩的纵轴方向以固定的间距逐点检测声波穿过桩身各横截面的声学参数，当混凝土内存在不连续或破损界面时会形成波阻抗界面，波到达该界面时，产生波的透射、散射和反射等，使接收到的透射波能量明显降低。对不同侧面、不同高度上的超声波动特征进行记录，然后对这些数据进行处理、分析和判断，可以获得测区范围内混凝土的材料性能、内部结构、密实性、缺陷情况等，从而推断桩身混凝土的连续性、完整性和均匀性状况，评定桩身完整性等级。

### 2.2. 检测仪器和设备

#### 2.2.1. 导测管

导测管多采用镀锌钢管，埋设数量根据桩径大小而定，具体布置数量要求视各行业规范稍有不同，其目的是确保桩的全截面混凝土都能被检测到，布设的管数越多声波覆盖面积越大。通常桩径小于 1 m 时，预埋 2 根管，桩径在 1 m 至 1.5 m 之间时，预埋 3 根管，桩径大于 1.5 m 时，预埋 4 根管[3]。每对导测管应依次组合进行测量，因此，3 根管系统将有 3 个组合路径，4 根管系统将有 6 个组合路径，如下图 1 所示，每对管的测试都要进行记录、分析和报告结果。导测管内径一般为 38 至 50 mm (1.5 至 2.0 英寸)，其尺寸要大于声波传感器探头的外径，以便传感器探头能在导测管内顺利通过。

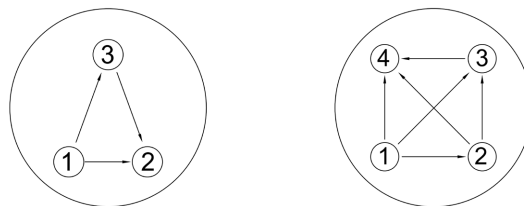


Figure 1. Typical layout for access tube

图 1. 声波导测管典型布置图

### 2.2.2. 跨孔声波检测器

跨孔声波检测器的组成包括：发射系统、发射传感器、放大和接收系统、接收传感器以及计算机组成，如下图 2 所示。检测时，发射和接收传感器分别置于两个导测管中，发射系统将电能转化为超声波，超声波脉冲的发送和接收是通过两个压电式探头来实现的，探头在预先埋置在测试桩内且装满水的金属导测管里移动，进行发射和接收脉冲信号，并通过电缆连接电脑进行记录。



Figure 2. The cross-hole analyzer  
图 2. 跨孔声波检测器

探头中含有陶瓷材料的传感器，选择陶瓷材质是因为其机械阻抗接近混凝土。发射系统应确保能在低电压下工作且保持强劲功率，以减少电缆干扰，尽可能发出清晰的声波信号。接收器能够放大经混凝土、水和管道透射后的声波信号。数据采集系统也将记录探头的深度信息，测量数据要精确到导测管道长度的 1% 以内，探头最深应能够在导测管底部 100 mm 内发射和接收脉冲。检测示意图如下图 3 所示。

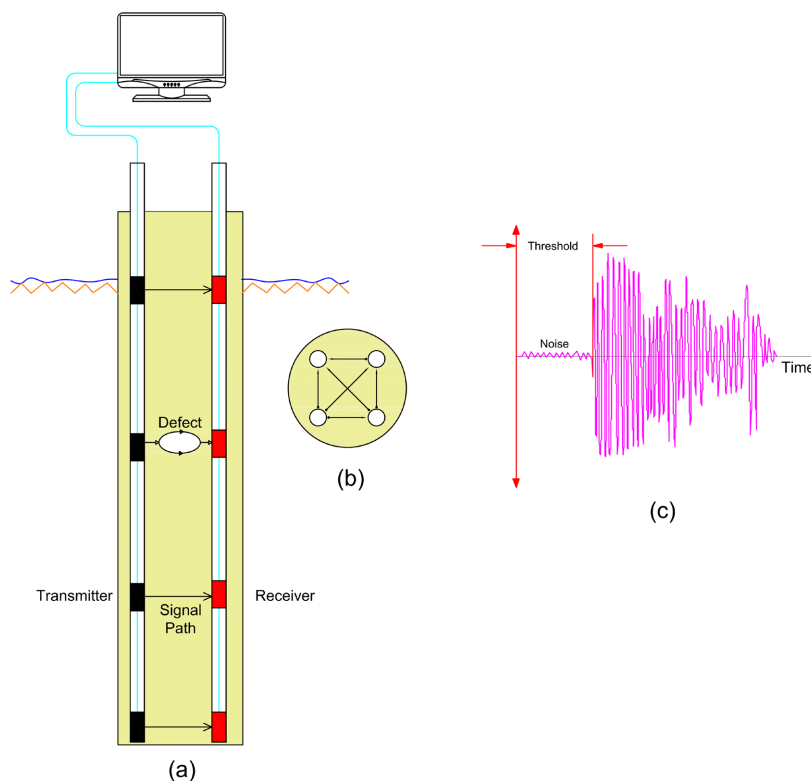


Figure 3. Schematic diagram for cross-hole sonic logging testing  
图 3. 跨孔声波检测示意图

图 3(a)是跨孔超声波检测设备的典型布置,将两个探头分别沉降到导测管底部,左侧黑色为发射端,右侧红色为接收端,注意检测时需将两个探头保持在同一水平面上,确保匀速提升。图 3(b)是导测管的平面布置及每对测量组合路径(以 4 根管为例)。图 3(c)展示的是跨孔超声波检测时由探头实时检测到的信号强弱数据,在遇到混凝土缺陷时会发现有明显的时间延迟和声波振幅减小现象。

检测中发现信号异常后,应继续对各检测组合进行完整记录后再进行仔细评估,因为有多种因素可能会影响评估结论,如平均传播时间的偏差大小、异常点所在深度范围、同一深度范围内多个方向是否存在异常等,应该综合内外部因素认真审视。

### 3. 工程实例

#### 3.1. 项目概况

阿曼拉斯玛卡兹原油储罐项目的建设场区位于阿曼中部省的东南部,东临阿拉伯海,本工程的海水取水站紧邻海岸线布置,地表标高约 3.0 m。地勘报告显示,该区域地下主要为中等风化的泥岩、砂岩以及石灰石地层,地下水位较高。

根据设计图纸,本取水站共计 68 根地下混凝土咬合桩,设计桩长为 14.2 m,桩中心间距 770 mm,素混凝土桩和钢筋混凝土桩交错布置,咬合厚度 230 mm,采用欧标 C40/50 混凝土浇筑,如下图 4 所示。

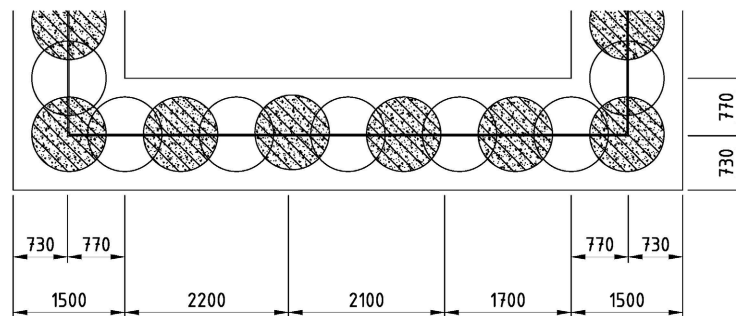


Figure 4. Typical drawing of secant pile  
图 4. 钻孔咬合桩典型布置图

#### 3.2. 现场探测

##### 3.2.1. 准备工作

声波探测仪器在现场施测前要按照使用说明书的要求进行全面的调试和校验。

施工承包商已提前根据图纸将长度为 15.15 m、内径为 50 mm 的导测钢管垂直固定在桩身的钢筋笼上进行了混凝土浇筑。检测前导测管应填满水,水作为传感器与导测管之间的耦合剂。钢管应无腐蚀,内外部表面清洁以确保混凝土和管道之间良好的粘结,以免影响检测精度。管底封死,确保不漏水。

通常选择混凝土浇筑后的 3~7 天进行声波检测,具体取决于混凝土的强度和桩径大小,对于大直径桩一般选择在接近 7 天的养护时间时进行。本工程选取 3 根桩进行检测,详细信息如下表 1 所示。

Table 1. Description of testing piles

表 1. 测试桩信息表

序号	桩号	桩径(mm)	桩顶海拔(m)	桩底海拔(m)	养护时长(天)
1	P32	1000	+3.00	-11.2	7
2	P44	1000	+3.00	-11.2	8
3	P66	1000	+3.00	-11.2	8

### 3.2.2. 检测步骤

将声波发射探头和接收探头放入各自的导测管并沉降到导测管底部，放置在同一水平面上，然后两个传感器同时以 300 mm/s 的速率缓慢提升，同时发射探头以每秒 10 次脉冲的频率发射声波脉冲，声波被相邻管中的接收器检测接收。大约每提升 5 cm 进行一次测量数据采集，直到到达导测管顶部。为每对导测管组合重复这一过程，依次进行探测，并记录每个探测结果。通过检测记录，可以建立起两个探头之间的混凝土区域的“声波剖面图”。

检测过程中，对桩身质量可疑的测点周围，可采用加密测点，或采用斜测、扇形扫测等方式进行复测，进一步确定桩身缺陷的位置和范围。

### 3.3. 数据收集、处理及结果释义

跨井声波检测技术的主要测量指标是声波信号从发射器到接收器的传输时间。声波信号到达时间的变化使我们能够定位和评估低密度和受损的混凝土区域，如混凝土中含有泥土夹杂物、砾石、膨润土或蜂窝等，其传播速度要低得多，信号的振幅和正弦形状也会改变，因此能够很容易的发现这些不规则的信号。

通常情况下，由于探头在导测管内位置的变化、管子垂直度偏差及其他因素的影响，传播时间在±20% 内的变化都在超声探测技术的正常误差范围内。根据建筑业研究和情报协会(CIRIA) 144 号报告以及仪器制造商的规范说明，检测到缺陷的定义是指，与周围良好质量的混凝土区域相比，声波的传播时间增加了 20% 以上。声波信号在一定的传播时间内的强度，可用能量来显示。信号衰减，或能量损失，是该区域混凝土质量差的标志，严重的混凝土质量缺陷会导致明显的传播时间的延长和相对能量的减少。基于此，Garland Likins 等人在 2007 年曾提出了如下表 2 所示的检测结果分级表。

Table 2. Suggested CSL results scale

表 2. 跨孔超声波检测结果分级表

混凝土质量	传播时间增量(%)		声波幅值衰减(分贝)
优	0~10	并且	<6
良	10~20	并且	<9
一般	20~30	或者	9~12
差	>30	或者	>12

声波图是将所采集到的数据进行直观显示，可以将每个深度的每个数据信号数据层层关联起来。下面图 5 中，纵轴是桩的深度，横轴是时间，象限内容表示接收机检测到信号强度的相对能量。信号强度高表示传播时间少，代表混凝土完整性较好，而信号强度低则表明混凝土质量差或桩存在缺陷。

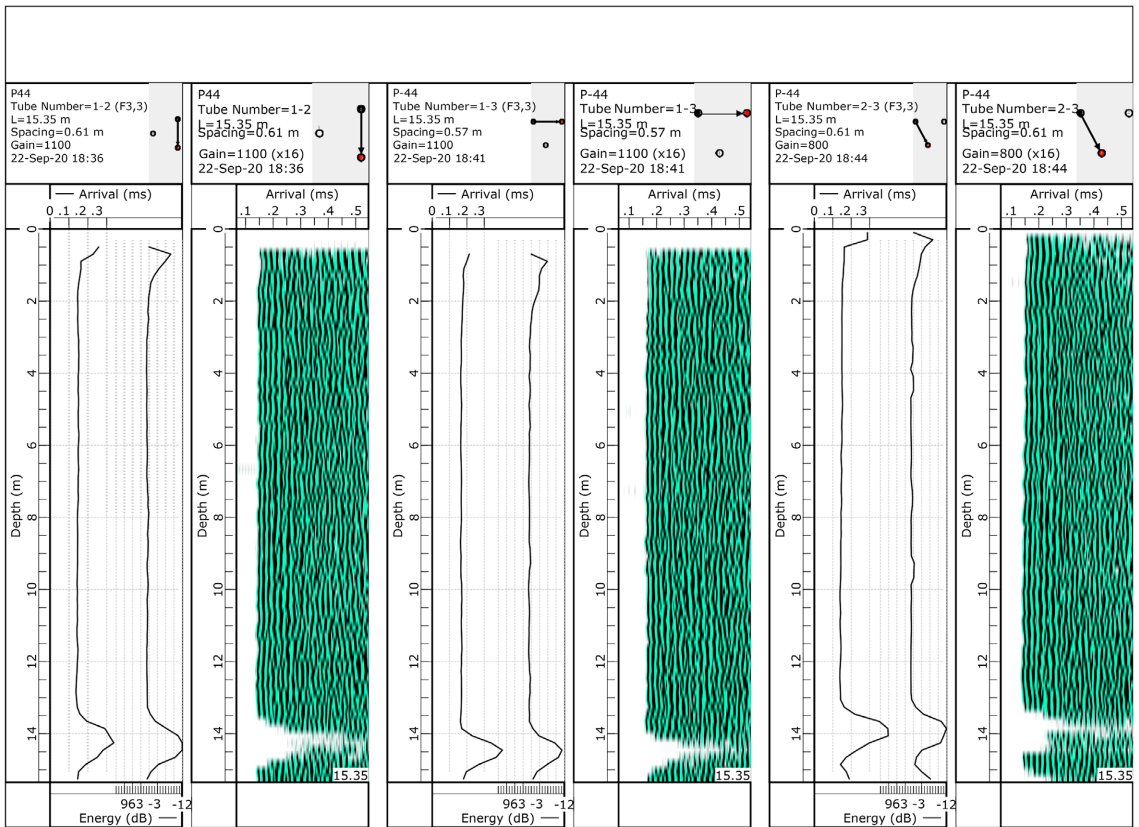
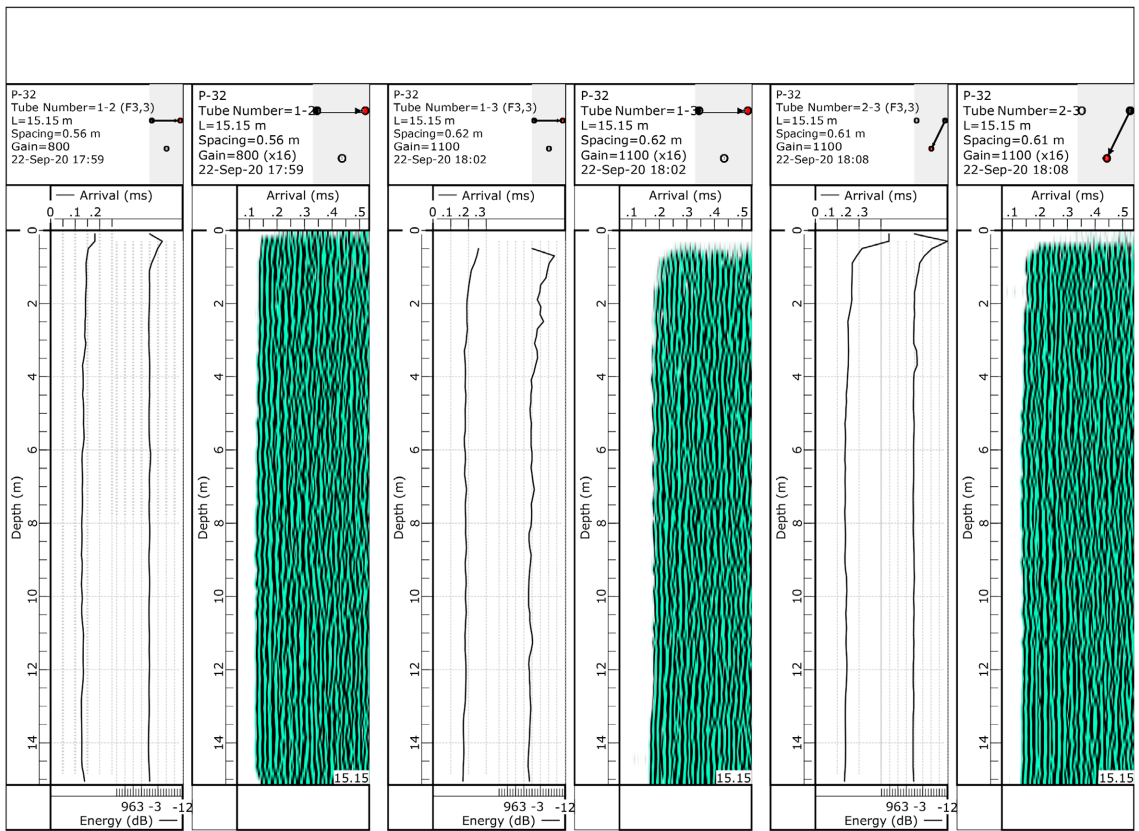
需要注意的是，数据的后期处理时，还需要充分考虑检测区域的地质环境和混凝土桩自身的内在因素，如配筋率、骨料的种类、粒径和含量等都会影响波的传播速度，应结合工程地质和施工情况来综合判断，这样才能得出更接近实际情况的结论。

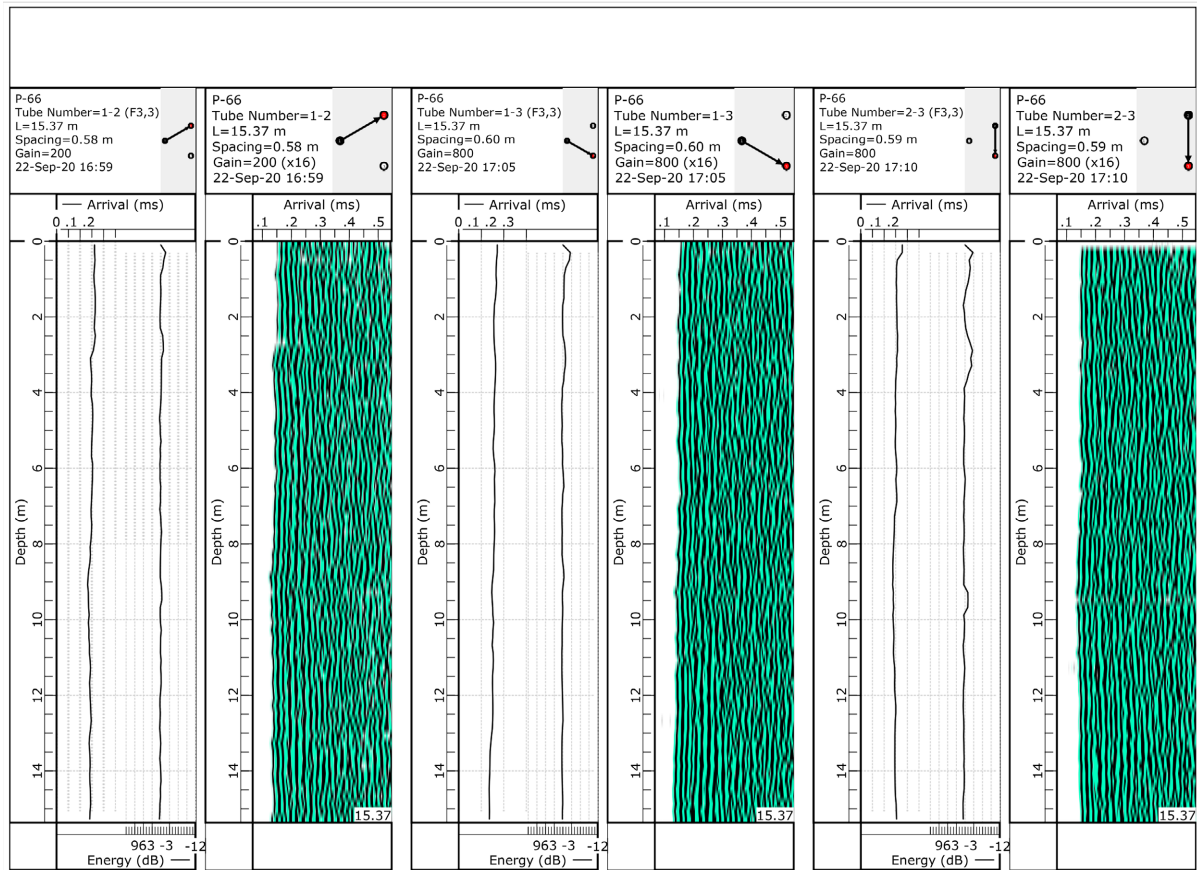
经对所采集数据结果进行认真审核评估后，得出下表 3 的结论和解释：

试验结果表明，试验桩有效长度内未发现明显异常。因此，试验桩具有良好的混凝土整体性。

## 4. 结论

通过上述进行地下混凝土钻孔咬合桩完整性检测的过程可知，跨孔超声波检测技术作为一种先进的探测手段，有如下优点：





**Figure 5.** Sonic map of secant pile  
**图 5.** 钻孔咬合桩声波图

**Table 3.** CSL results analysis  
**表 3.** 跨孔超声波检测结果分析

桩号	观测记录	结果分析
P32	未发现异常	-
P44	在 13.8 m 至 14.8 m 桩身位置发现信号丢失	在该桩的最底部出现微弱的时间延迟和信号减少的原因是由于阻断了信号传输的直接路径而造成的，这是因为环绕声波导测管的外部材料，可能是橡胶接头、管道胶带、以及使用其他材料来包裹密封管的底部造成的，从而导致管与混凝土脱粘。因此，声波信号从发射机到接收机的传播有一定的延迟。
P66	未发现异常	-

- 1) 现场操作简便、安全，检测速度快，且不受长径比和桩长限制，尤其适用于大桩径和超长桩；
- 2) 高分辨率的图像结果直观可视，解读相对容易；
- 3) 检测结果准确度高，比低应变检测法的结果更细致精确；
- 4) 能一次性准确测定多处混凝土缺陷的位置、大小、形状、种类、严重程度等，为下一步的混凝土质量处理提供了可靠的依据；
- 5) 检测基本无盲区，探头能到达的区域均能检测，包括桩顶低强区和桩底沉渣区域，且不受地下水位高低影响；
- 6) 检测质量缺陷的同时，还可估算混凝土的强度。



## 参考文献

- [1] ASTM International (2016) ASTM Standard D 6760-2016, Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing.
- [2] 楼一珊. 利用声波测井计算岩石的力学参数[J]. 探矿工程, 1998(3): 47-48.
- [3] Zhussupbekov, A., *et al.* (2019) Evaluation of the Quality of Pile Foundations by Different Methods. *MATEC Web of Conferences*, Volume 265, Article No. 05013 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505013>