

文章编号: 0451-0712(2007)03-0069-04

中图分类号: TU473.16

文献标识码: B

# 大直径超长桩桩身缺陷的 超声波透射法检测研究

张 宏<sup>1</sup>, 鲍树峰<sup>1</sup>, 马 晔<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 长沙市 410076; 2. 交通部公路科学研究所 北京市 100088)

**摘 要:** 介绍了超声波透射法声参量与桩身混凝土质量的关系及现场检测技术, 通过现场检测实例, 对检测判断的缺陷部位进行了钻芯法检测验证。结果表明: 超声波透射法能够相当准确地判断大直径超长桩的缺陷部位, 是一种行之有效的桩基质量检测方法。

**关键词:** 钻孔灌注桩; 超声波透射法; 钻芯法; 缺陷检测

目前, 桩基完整性检测常用的方法有低应变动测法和超声波透射法。低应变动测法被认为是较能准确测定缺陷的方法之一, 然而因其激振能量小, 对深部缺陷及桩底反应不灵敏, 而且受桩长、桩径限制, 以及桩身存在多处缺陷时, 由于多个反射波相互干涉, 形成复杂波列, 故对桩身缺陷的类型、程度及位置都难以做出准确的判断。而超声波透射法不受桩长、桩径限制, 而且能详细查明桩身内部缺陷的性质、深度位置、范围大小、严重程度等。因此, 对于大直径超长桩相对其他的检测方法而言, 采用超声波透射法来检测桩身混凝土质量更为可靠。

## 1 声波透射法的基本原理

### 1.1 声波检测的基本程序

发射换能器置于被测桩的声测管中, 它把发射系统送来的电信号转换为脉冲声波并向桩身内辐射, 声波在桩身混凝土中传播后到达另一个声测管, 被安置在其中的接收换能器接收。接收换能器将声波转换成电信号, 由接收放大器放大, 并由数据采集系统将数据离散化转换成二进制送入微型计算机。一方面将采集到的时间序列的数据信号储存; 另一方面把它显示在显示器上加以观察、判读, 即可做出被测混凝土的质量判断。

### 1.2 桩身混凝土质量与超声波声参量的关系

超声波声参量(声速、波幅、频率)与混凝土的物

理力学指标(动弹模、密度、强度)之间的相关性就是桩基超声波检测的理论依据。其声波传播的特性反映了混凝土材料的结构、密度以及应力、应变关系。

超声波是一种脉冲波, 在混凝土中主要以纵波形式传播。无限弹性介质中纵波的波动方程和纵波的传播速度分别为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2)$$

其中:  $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 + 2\mu)}$$

则纵波波速  $V_p$  为:

$$V_p = [E(1 - \mu)/\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $E$  为介质的动弹模;  $\rho$  为密度;  $\mu$  为泊松比。

声波在混凝土中传播时, 会发生吸收衰减、散射衰减和扩散衰减, 因而波的强度将逐渐减弱。其中波的吸收计算公式为:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

$$I_0 = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v$$

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho v^3} \left[ \frac{4}{3} \eta' + \chi \left( \frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为固体媒质的密度;  $A$  为波幅;  $\omega$  为频

率;  $v$  为波速;  $\alpha$  为吸收系数;  $I_0$  为波的初始强度;  $\eta$  为粘滞系数;  $C_v$  为定容比热容;  $C_p$  为定压比热容。

式(3)和式(4)表明:混凝土的强度与声参量(声速  $V_p$ 、声幅  $A$ 、频率  $\omega$ )息息相关。

### 1.3 声参量判断桩身混凝土质量的机理

#### 1.3.1 由声速或声时判断桩身混凝土质量

由超声波所穿透的混凝土厚度、超声波脉冲发出和到达的时间,即可算出在混凝土中传播的声速  $v$ ,然后,根据声速可直接判断桩身混凝土的质量。混凝土愈密实,声时愈小,相应的声速  $v$  愈大;相反,混凝土愈松散,或声波脉冲路径中有孔洞、裂缝、夹泥或离析等,则声时会增大,相应的声速就会减小。

#### 1.3.2 由接收波首波幅判断桩身混凝土质量

根据声波衰减的原因,当混凝土中存在低强区、离析区以及存在夹泥、蜂窝等缺陷时,将产生吸收衰减和散射衰减以及扩散衰减,使接收波幅明显降低,从而在缺陷背后形成一个声阴影。

#### 1.3.3 由接受波主频率判断桩身混凝土质量

超声波是复频波,具有多种频率成分,当它穿过混凝土后,高频部分比低频部分衰减严重,所以当发射波遇到缺陷时,接收波主频率会明显降低。

## 2 检测方法

(1)粗测。一般采用水平同步法。此法在检测过程中保持两探头在同一高度,探头每次同步上升或下降0.4 m。每组检测管测试完成后,测试点应随机抽测10%~20%。判读若有异常,需对异常位置进行细测。

(2)细测。细测是在粗测的基础上,对声参量异常或怀疑有缺陷的部位进行加密平测,并结合高差同步法。加密平测是指两探头仍在同一水平面上,测点间距缩小至20 cm;高差同步法是指检测过程中使两探头保持一定的高差,测点间距也应缩小至20 cm。有时,还需增加另一倾斜方向的斜测。此法可以进一步对声参量异常部位进行“诊断”。

(3)扇形检测法。扇形检测法,即固定发射换能器,移动接收换能器。可分为单扇形和双扇形检测法。单扇形检测法主要应用于检测管中有堵管的情况,此法可以增加检测范围;双扇形检测法应用于部分导管外泥浆附着过厚,而用平测、斜测的方法无法采样的情况,此法检测桩身断面较大范围内混凝土的质量,如图1所示。

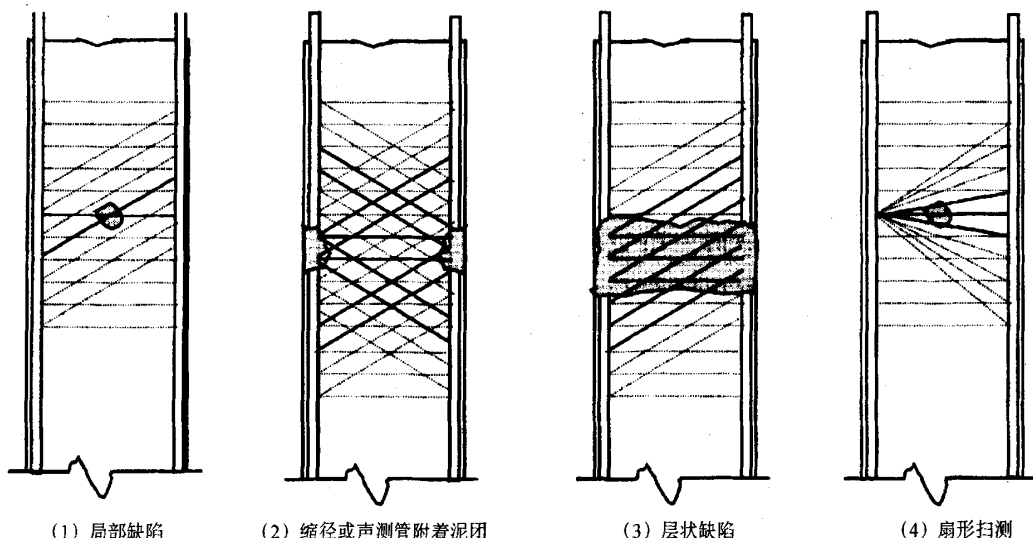


图1 声波透射法检测示意

## 3 检测数据的处理

### 3.1 检测数据统计分析参量

(1)声速测量值的平均值:

$$V_m = \sum \left( \frac{V_i}{n} \right) \quad (5)$$

(2)声速测量值的标准差:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum V_i^2 - nV_m^2}{n-1}} \quad (6)$$

(3)声速测量值的离异系数:

$$C_v = \sigma_v / V_m \quad (7)$$

(4)波幅测量值的平均值:

$$A_m = \frac{\sum A_i}{n} \quad (8)$$

式中:  $V_i$ 、 $A_i$  分别为各测点的声速、声幅。

### 3.2 桩身完整性及缺陷判据

(1) 声速判据: 用正常混凝土声速平均值减去 2 倍的声速标准差作为判断有无缺陷的临界值, 即

$$V_0 = V_m - 2\sigma_v \quad (9)$$

(2) 波幅判据: 用波幅平均值减去 6 dB 作为波幅临界值, 当实测波幅低于波幅临界值时, 应将其作为可疑缺陷区, 即

$$A = A_m - 6 \quad (10)$$

(3) PSD 判据: 采用斜率法作为辅助异常判据, 当 PSD 值在某测点附近变化明显时, 应将其作为可疑缺陷区, 即

$$PSD = \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (11)$$

### 4 桩身完整性类别判定

I 类桩: 各声测剖面每个测点的声速、波幅均大于临界值, 波形正常;

II 类桩: 某一声测剖面个别测点的声速、波幅略小于临界值, 但波形基本正常;

III 类桩: 某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值小于临界值, PSD 值变大, 波形畸变;

IV 类桩: 某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值明显小于临界值, PSD 值突变, 波形严重畸变。

## 5 工程实例分析

### 5.1 工程地质概况

湖南省某公路桥梁一大直径超长钻孔灌注桩, 施工桩长为 60.20 m, 设计桩长为 61.0 m, 设计桩径为 2.0 m, 桩端持力层为粘土。其工程地质情况如下。

(1) 种植土: 深度 0~1.4 m, 层厚为 1.40 m, 黄褐色, 松散, 湿, 以亚粘土为主, 含少量粉砂, 植物根系发育。

(2) 淤泥质粘土: 深度 1.4~20.9 m, 层厚为 19.50 m, 灰绿色, 湿可塑~坚硬, 淤泥质呈不均匀分布。

(3) 粉砂: 深度 20.9~23.2 m, 层厚为 2.30 m, 灰黑色, 松散, 饱和, 软塑~可塑, 可见淤泥与粉质交

替形成的微层理, 含少量粉砂。

(4) 砾砂: 深度 23.2~31.2 m, 层厚为 8.00 m, 灰、灰黄色, 密实, 饱和, 以中细砂为主, 卵砾石呈不均匀分布。

(5) 圆砾土: 深度 31.2~41.0 m, 层厚为 9.80 m, 杂色, 密实, 饱和, 卵砾石呈不均匀分布, 砂泥质充填。

(6) 砾砂: 深度 41.0~43.8 m, 层厚为 2.80 m, 杂, 密实, 饱和。

(7) 砾砂: 深度 43.8~53.4 m, 层厚为 9.60 m, 灰黄色, 密实, 饱和, 含少量卵石。

(8) 粘土: 深度 53.4~60.6 m, 层厚为 7.20 m, 黄褐色, 湿, 软塑~可塑, 含少量粉砂。

### 5.2 超声波法判断桩基缺陷

由于该桩的直径为 2.0 m, 布置了 3 根声测管。其 3 边检测的声速—深度、声幅—深度、声时—深度、频率—深度以及 PSD—深度的波形结果如图 2 所示。

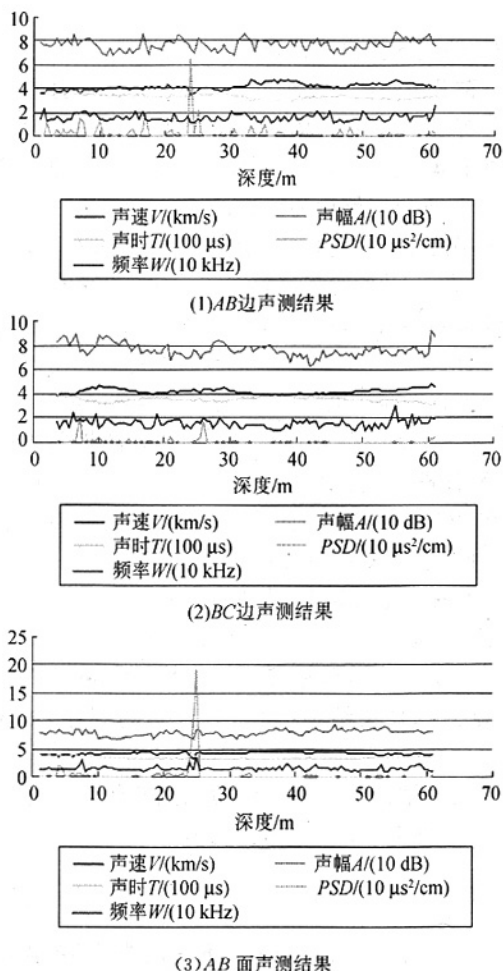


图2 检测桩声测结果

AB 面的声测曲线表明:该桩在 AB 管的 24.00~25.00 m 范围内声速、声时以及 PSD 判据明显异常。其中,最异常的测点在 24.5 m 处,声速为 3.542 km/s,降低了 15%左右;声时为 394.9  $\mu$ s,增长了 20%左右;PSD 判据值达到 65。

BC 面的声测曲线表明:该桩在 BC 面的 25.5 m 处出现声速、声时以及 PSD 判据较明显异常。该测点的波速为 3.900 km/s,降低了 10%;声时为 370  $\mu$ s,增长了 12%;PSD 判据值为达到 20。

AC 面的声测曲线表明:该桩在 AC 面的 24.00~24.50 m 范围内,声速、声时以及 PSD 判据有很大异常。其中,24.5 m 处的声速为 3.355 km/s,降低了 20%;声时为 429  $\mu$ s,增长了 25%;PSD 判据值达到 200。

综合上述 3 个检测剖面判断结果,及《公路工程基桩动测技术规程》(JTG/T F81-01-2004)可知,该桩属于Ⅲ类桩。因此,建议对该桩进行钻芯检验,以进一步验证超声波检测结果的正确性。

### 5.3 缺陷部位的钻芯分析

钻芯法是检测现浇混凝土灌注桩的成桩质量的一种有效手段,不受场地的限制,特别适用于大直径混凝土灌注桩。钻芯法不仅可以直观测试灌注桩的完整性,而且能够检测桩长、桩底沉渣厚度以及桩底岩土层的性状;另外,对查明大面积的混凝土疏松、离析、夹泥、孔洞等也比较有效。因此,在多种桩身完整性检测方法中,钻芯法最为直观可靠。实践经验表明:采用钻芯法与超声波联合检测、综合判定的办法评定大直径灌注桩的质量,是十分有效的办法。

因此,为了验证超声波透射法检测桩基的完整性,对该桩进行了钻芯。根据声波检测结果可知,该桩在 AC 面缺陷最大。于是钻芯单位在此面钻了一孔,抽芯总进尺为 29.2 m。

其抽芯结果如下:从桩头往下 24 m 范围和 25 m 以下桩身混凝土基本连续,结构基本呈柱状。而桩身在 24~25 m 范围,钻芯局部有大约 2 cm 的泥团和混凝土砂浆胶结物,无卵石骨料的现象,如图 3 所示。

抽芯结论与超声波法检测判断的结论完全一致,对该桩判定为Ⅲ类桩是正确的。

## 6 结论

根据对大直径超长钻孔灌注桩进行的超声波法



(1) 桩身在 18.00~18.50 m 处夹有泥团



(2) 桩身在 24.00~24.5 m 处只有混凝土砂浆胶结物,无卵石骨料

图 3 钻芯结果

检测以及针对缺陷部位进行的钻芯可知:

(1)超声波透射检测法不受桩长的限制,能准确地反映桩身缺陷的确切位置、大小、严重程度等方面的信息;

(2)超声波检测中发现的异常情况,可根据各种判据、深度曲线的规律,结合工程地质资料、施工情况,并采用一些非常规的检测方法如扇形检测法或其他辅助检测技术(如钻芯法等),来综合判断异常部位的性质,使判断结论更符合实际,从而避免误判;

(3)声测管倾斜会对超声波检测造成一定的影响,比如会发生漏判、误判、轻判甚至重判现象,所以,保持声测管的平行和保证声测管的施工质量,是施工单位应该重视的问题。否则,很可能对桩身质量造成误判,从而造成不必要的损失。

### 参考文献:

- [1] 张宏. 灌注桩检测与处理[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [2] 陈国栋. 超声波在混凝土桩基础无损检测中的应用研究[D]. 武汉理工大学,2005.
- [3] 何结兵,等. 超声波透射法检测大直径超长桩[J]. 扬州大学学报,2004,7(3).
- [4] JTG/T F81-01-2004,公路工程基桩动测技术规程[S].
- [5] 罗骥先. 桩基工程检测手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.