

基于 NFP 法的超声波检测基桩混凝土缺陷研究

黄鹏¹, 于泽泉^{2,3}, 潘慧明^{2,3}

(1.广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510555; 2.广东建科交通工程质量检测中心有限公司, 广东 广州 510030; 3.广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 超声波是检测基桩完整性的重要方法之一, 具有缺陷位置和范围判定精确、可操作性强等优点。文中提取相关基桩规范中评价桩身完整性的主要参数, 分析各参数的特点和不足, 采用多因素综合概率分析(NFP)法, 提出一种利用波速、波幅、主频为分析参数并输出定量结果的超声波检测基桩完整性的多参量判别方法, 作为超声波检测基桩完整性的有效补充; 将该方法应用于800余根工程桩混凝土缺陷检测, 检测结果与钻芯结果具有较高的一致性, 其中桩身完整且声测管理设平直的桩身完整性评价指标 $K_{(i)}$ 大部分为 1.00~1.35; $K_{(i)} > 1.35$ 时, 除个别点外, 其他均为首波判读错误引起的 $K_{(i)}$ 离散; $0.85 \leq K_{(i)} \leq 1.35$ 时, 声测线位置存在轻微或明显缺陷; $K_{(i)} < 0.85$ 时, 声测线位置存在严重缺陷。该方法可降低因首波位置判读不准引起的波速、波幅临界值变化的影响, 快速判断基桩的完整性。

关键词: 桥梁; 基桩完整性; 超声波; 混凝土缺陷; 声学参数; 多因素综合概率分析(NFP)法

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0132-04

声波透射法(超声波法)利用声波检测仪沿桩身纵轴方向以一定间距逐点检测桩身混凝土截面的声学参数, 确定基桩的位置、范围、程度, 推断检测范围内混凝土质量^[1]。超声波检测基桩完整性主要是依据接收信号中波速、波幅、主频的变化对桩身混凝土缺陷进行定性判别。该方法采用概率法, 可在很大程度上区分混凝土施工过程的偶然误差和过失误差, 但非常依赖检测人员的现场经验, 缺少自动化和智能化。经过近些年的发展, 声学参数从单因素向多因素发展, 判断从定性或经验性向定量发展。混凝土为黏弹塑性材料, 其密实度、强度等存在一定波动, 而声学参数的数值统计基本符合正态分布, 若桩身存在由外界恶劣环境或人为过失导致的缺陷(夹泥、蜂窝、离析等), 则缺陷位置混凝土质量、声波透过缺陷混凝土的声学参数将偏离正态分布。但混凝土并非理想的各向同性材料, 施工中引起的空间范围内强度、密实度波动并不能一概而论地当作缺陷进行分析, 不同类别的偏差也会导致声学参数测试值产生波动。

根据前人的研究成果, 波速、波幅等声学参数对不同形式混凝土质量问题的敏感程度存在不小差异。波速和波幅分别反映混凝土材料的弹性性质和塑性性质。在基桩声波投射法检测多参量判据方

面, 刘雨岚等对桩基缺陷部位进行多角度、多层次研究, 分析了超声波法检测桩身完整性常见缺陷对应声学参数的特性^[2]; 张宏等介绍了超声波法检测基桩的优点及运用模糊数学中多元综合判据评价基桩质量的理论依据, 并结合工程实例进行分析判断, 证明采用多元综合判据比采用单元判据更能真实、准确地对基桩质量进行评价^[3]; 邹兰林等采用小波分析结合神经网络的桩基检测方法, 根据桩基中超声波传播特点, 利用小波分析对采集的超声波信号进行小波包分解, 通过小波分析获取超声波信号特征向量并构建神经网络, 识别桩基缺陷位置及缺陷类型^[4]。但运用复杂数学方法对单一声学参数进行分析, 很难得出评价基桩完整性的有效指标。在桩身混凝土缺陷判别过程中, 采用多个声学参数对缺陷范围和严重程度进行综合分析更具有科学性、合理性。本文采用多因素综合概率分析(NFP)法, 研究超声波检测基桩混凝土缺陷的多参量判别方法。

1 混凝土强度与超声波速度的关系

在外部因素影响下, 混凝土会产生离析、蜂窝、沟槽等病害, 表现为抗压强度降低。混凝土质量指标包括抗压强度、水灰比、和易性、耐久性、氯离子质量浓度、含气量等, 通过超声波检测的声学参数很难

直接反映混凝土的所有指标。本文建立混凝土强度与超声波速度之间的关系,作为衡量混凝土质量的指标之一。

假设混凝土是组合材料与内部微小裂隙组成的各向同性材料,参考文献[5],可运用声速作如下定义:

$$D_0 = 1 - \left(\frac{v_{p0}}{v_{pf}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: D_0 为混凝土初始损伤变量; v_{p0} 为混凝土未受荷载作用时的波速; v_{pf} 为混凝土母体(无损伤)的波速。

以幂函数曲线表示混凝土强度 σ_c 与 D_0 的关系[5]:

$$\sigma_c = A D_0^{-B} \quad (2)$$

式中: A 、 B 为与混凝土弹性模量 E_c 、泊松比 ν 、相位角 φ 相关的参数,在同一混凝土中, A 、 B 为常数。

将式(1)代入式(2),建立波速与混凝土强度关系如下:

$$\sigma_c = A (1 - C v_{p0}^2)^{-B} \quad (3)$$

式中: C 与混凝土 E_c 、 ν 、 φ 相关的参数,在同一混凝土中为常数。

采用450 mm×450 mm×150 mm混凝土试件,养护条件为(20±5)℃,相对湿度90%,混凝土标号分别为C30、C35、C40、C50、C60、C80,每组3个试件,通过测试其抗压强度与波速,研究波速与混凝土破坏强度的关系,得出波速与混凝土强度关系曲线(见图1)。

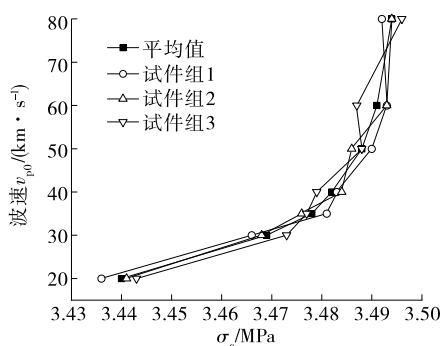


图1 波速与混凝土破坏强度的关系

鉴于由式(3)得出的曲线关系并不方便直接反映 σ_c - D_0 的关系,对式(3)进行指数变换,得:

$$\sigma_c = A_1 e^{B_1 v_{p0}} \quad (4)$$

根据式(4),混凝土破坏强度与波速基本呈正相关关系,当混凝土强度等级大于40 MPa时,超声波在混凝土中的传播速度显著增大。

2 多参量综合判据与桩身缺陷识别理论

DBJ/T 15-60—2019《建筑地基基础检测规范》[6]中桩身各深度剖面完整性函数 $I(j, i)$ 及JTG/T 3512—2020《公路工程基桩检测技术规范》[7]中主要判别特征均来源于波幅、波速,两规范还将实测波形是否畸变作为补充的判别依据。向子明阐述超声波透射法在桥梁大直径桩基完整性检测中的应用,引入有效接收声场的概念,通过对各声测剖面的波速、波幅、频率等声学参数变化的综合分析,定性确定了桩身可能存在缺陷的位置,提出基于波速判据、波幅判据及PSD判据的3种桩基缺陷判别方法,并对实际工程检测结果的各项判据进行了分析和对比[8]。本文选取波速、波幅、主频建立基桩完整性判别模型。

根据工程实际经验,各种单一的判据对不同类型缺陷的敏感程度各不相同,且数量级不同,波速一般为3 800~4 500 m/s,波幅一般为90~120 dB,主频一般为35~55 kHz。由于各声学参数数量级不同,采用层次分析法对各参数赋予权重会导致某一声学参数对完整性判别指标占主导,其余参数变化基本无影响,波速、波幅、主频各自的最大值处用单一参量判断即为混凝土质量最佳位置。为此,对各参量进行归一化,将声测线位置与该剖面混凝土质量最佳位置进行对比,体现该位置的混凝土质量水平。声测线位置声学参数与混凝土质量最佳位置声学参数比值为0~1。

NFP法运用波速 v 、波幅 A 、频率 f 3个声学参数(波幅与波速对缺陷敏感,主要体现在波幅和波速急剧下降;以主频体现波形畸变),通过综合分析获得综合判据临界值作为缺陷判据。利用概率统计方法,根据正态分布原理,缺陷混凝土声学参数实测值主要集中在异常值区间内,且小于统计临界值,则正常混凝土与混凝土统计临界值之比大于等于1,小于1判定为异常值。算法如下:

$$K_{(i)} = \frac{v_i f_i A_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i f_i A_i) - m \sigma_i} \quad (5)$$

式中: $K_{(i)}$ 为声测线完整性评价指标; v_i 为检测剖面第 i 条声测线的实际波速与该剖面最大波速的比值; f_i 为检测剖面第 i 条声测线的实际主频与该剖面最大主频的比值; A_i 为检测剖面第 i 条声测线的实际波幅与该剖面最大波幅的比值; m 为概率保证

系数; σ_i 为 $v_i f_i A_i$ 对单个检测剖面所有计算值的标准差。

通过测试声测线的波速、波幅、主频参数,计算得到声测线完整性评价指标 $K_{(i)}$ 。 $K_{(i)} \geq 1$,表示声测线完整; $K_{(i)} < 1$,表示声测线存在缺陷, $K_{(i)}$ 越低,偏离异常概率统计值的程度越高,缺陷程度越大。

将声测线完整性函数 $I(j, i)$ 与完整性评价指标 $K_{(i)}$ 对比,若 $I(j, i) = 1$,且 $K_{(i)} > 1$,记为符合样本。选取 836 条包含完整混凝土与缺陷混凝土的声测线,通过调整概率保证系数 m 的取值,降低两种声测线完整性判断结果不符合项的数量,确定适合多参量法的概率保证系数 m 。概率保证系数 m 与声测线完整性判断结果不符合数量 n 的关系见图 2。由图 2 可知: $m = 2.2$ 时,两者判断不符合数量仅为 9 个,准确率达到 98.9%。

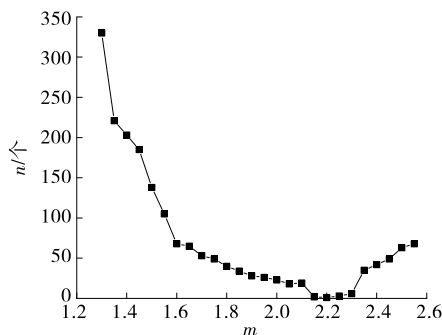


图 2 概率保证系数 m 与声测线完整性判断结果不符合数量 n 的关系

此外,现场检测数据会受其他声源或换能器振动、老化等因素影响,超声波数据存在各种声源信号叠加,导致仪器无法准确自动识别首波位置,造成声学参数曲线异常。如图 3 所示,未处理波形数据图存在大量“跳波”情况,根据波速 v -深度 h 曲线、波幅 A -深度 h 曲线进行判读会出现大量低于临界值的异常值,无法进行准确判断;进行首波人工判读,该剖面声测线的波幅与波速均大于临界值。

如图 4 所示,两波形均为完整混凝土波形,且没有明显畸变。未调整波形经传统方法自动判读难以反映基桩完整性实际类别,而采用完整性评价指标 $K_{(i)}$ 可计算得出混凝土质量水平。

传统声测数据需要考虑由其他声源或换能器振动、老化等因素产生的杂波对单波曲线的影响,但以上因素不会导致波速、波幅和主频同时变小,即 $K_{(i)} < 1$ 。因此,多参量法在处理杂波影响的基桩完

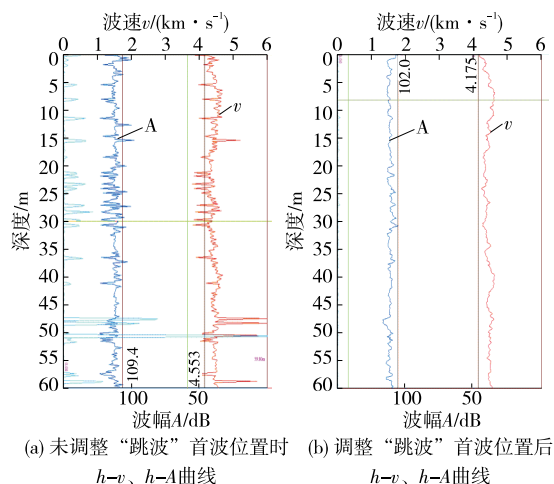


图 3 仪器首波自动判读波形与人工调整后波形对比

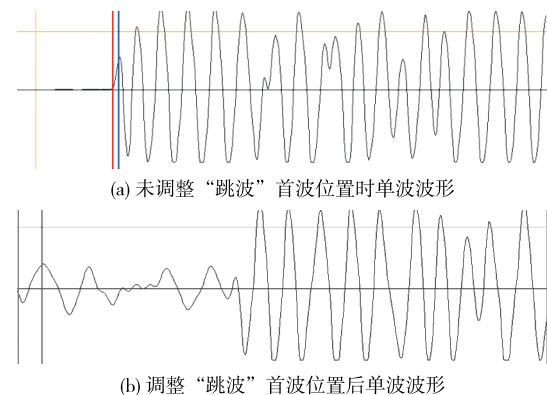


图 4 单波首波判读正确与判读异常

整性判别方面具有良好效果。

根据实测的 836 条声测线进行完整性评价指标统计,结果见图 5。由图 5 可知:样本峰值为 1.08,样本的完整性评价指标 $K_{(i)}$ 大部分为 1.00~1.35。 $K_{(i)} > 1.35$ 时,除个别点外,均为首波判读错误引起的 $K_{(i)}$ 离散; $0.85 \leq K_{(i)} \leq 1.35$ 时,该区间内所有声测线均为波速、波幅轻微或明显异常、波形明显畸变的情况,即声测线位置存在轻微或明显缺陷; $K_{(i)} < 0.85$ 时,该区间内所有声测线均为波速、波幅严重异

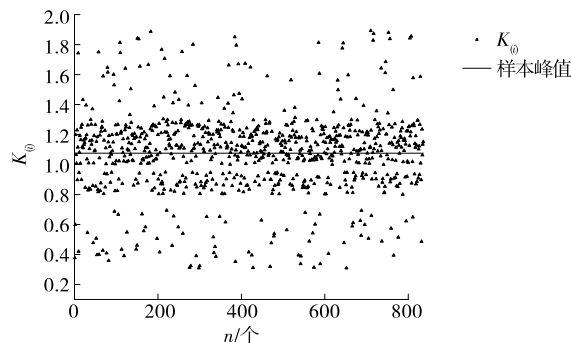


图 5 样本声测线 $K_{(i)}$ 散点图

常、波形明显畸变的情况,即声测线位置存在严重缺陷。

3 超声波法多参量综合判据的应用

某工程 1[#] 桩,桩径 1 400 mm,桩长 27.8 m。在钢筋笼内平均布置 3 根声测管,检测结果为 1-2 剖面完整,1-3 剖面 9.4~10.0 m 深度处、2-3 剖面 9.5~9.9 m 深度处声测线参数严重异常、波形畸变严重,且波速-深度曲线、波幅-深度曲线在上述深度区间小于临界值。

以 1-3 剖面 9.6 m 深度处为例,计算声测线的完整性评价指标 $K_{(i)}$ 。1-3 剖面 9.6 m 深度处的声测线波速为 3 086 km/s,波幅为 78.1 dB,主频为 25.5 kHz, $m=2.2$,代入式(5),计算得 $K_{(i)}=0.83<1$ 。同理可得 1-3 剖面 9.4~10.0 m 深度处、2-3 剖面 9.5~9.9 m 深度处声测线的完整性评价指标 $K_{(i)}$ (见表 1、表 2)。根据完整性评价指标 $K_{(i)}$,判定这两个位置存在严重缺陷。1-3 剖面单波波波形见图 6,1-3、2-3 剖面波速、波幅与深度的关系曲线见图 7。

表 1 1-3 剖面 9.4~10.0 m 深度处完整性评价指标

深度/m	完整性评价指标 $K_{(i)}$	深度/m	完整性评价指标 $K_{(i)}$
9.4	0.91	9.8	0.85
9.5	0.87	9.9	0.86
9.6	0.83	10.0	0.93
9.7	0.81		

表 2 2-3 剖面 9.5~9.9 m 深度处完整性评价指标

深度/m	完整性评价指标 $K_{(i)}$	深度/m	完整性评价指标 $K_{(i)}$
9.5	0.91	9.8	0.84
9.6	0.86	9.9	0.87
9.7	0.84		

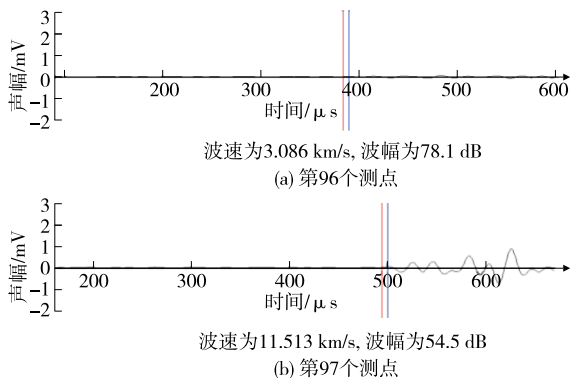


图 6 1-3 剖面 9.6~9.7 m 深度处单波波形

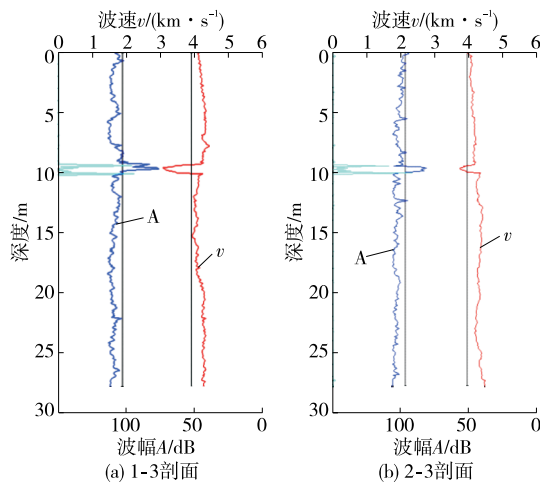


图 7 1-3、2-3 剖面波速、波幅与深度的关系曲线

进行钻芯法验证检测,在 2[#] 声测管向桩中心偏移 10 cm 位置钻取混凝土芯样,第 8 次钻取的芯样约 9.5 m 处出现混凝土破碎,长度为 16 cm(见图 8),与多参量判别法的判别结果一致。

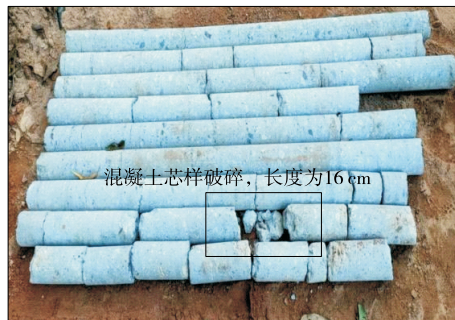


图 8 距 2[#] 声测管 10 cm 位置的混凝土芯样

4 结语

本文提取相关规范中评价桩身完整性的主要参数,运用概率统计的方法,得出根据波速、波幅、主频 3 个参数综合判定桩身缺陷位置及严重程度的方法,提出一种超声波检测基桩完整性的多参量综合判别方法,采用该方法计算得出定量结果,作为超声波法检测基桩完整性的有效补充。通过对 836 条声测线进行完整性评价指标统计,桩身完整且声测管埋设平直的桩身完整性评价指标 $K_{(i)}$ 大部分为 1.00~1.35。 $K_{(i)}>1.35$ 时,除个别点外,其他均为首波判读错误引起的 $K_{(i)}$ 离散; $0.85\leq K_{(i)}\leq 1.35$ 时,该区间内所有声测线均为波速、波幅轻微或明显异常、波形明显畸变的情况,声测线位置存在轻微或明显缺陷; $K_{(i)}<0.85$ 时,该区间内声测线均为波

(下转第 140 页)