论基桩完整性检测技术

吴庆曾

(原地矿部水文工程地质技术方法研究所,河北保定 071051)

摘要:阐述桩的分类,产生缺陷的多重因素及完整性检测的必要性。论述一维杆件中反射波理论 依据。激振及接收传感器是检测技术的关键;说明了反射波信号的频率解释和瞬态机械阻抗法的 一致性并均以工程实例加以佐证。文中还论述了声波透射法检测基桩完整性的理论及依据,检测 的判据,还给出了检测实例。介绍最新声 CT 技术及检测成果。

关键词 : 基桩完整性 ;反射波法 ;声波透射法 缺陷 ;声 CT 技术

中图分类号: P631.4; TU473.1+6 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2000)04-0284-12

桩基础是各类建筑物——桥梁、港口、高架路等构筑物的基础形式之一。由于桩深埋于地 下,能将上部结构的荷载传到深部稳定的地层,可减少基础的沉降,并有较好的均匀沉降性能 及抗震性能因而被大量采用。据90年代初的不完全统计,我国每年用桩量已超过100万根。 根据地矿部下属80余个动力验桩单位年验桩量均在12万根推算,近几年我国的年用桩量估 计在500万根左右。

桩的类型按制作地点可分为预制桩及原地灌注桩。预制桩又可分为方桩、预应力圆管桩 及钢桩。原地灌注桩按成孔方式可分为人工挖孔、钻机成孔、沉管、挤压孔等。原地灌注桩按 桩的外形,又可分为非扩底桩、扩底桩或夯扩桩及目前最新工艺的高压、挤压灌注桩。按桩的 承载力,可分为摩擦桩、端承桩、摩擦端承及端承摩擦桩。以上除钢管桩外,其材质均由混凝土 组成。目前尚有粉喷搅拌桩、水泥砂浆桩(CFG)。可见桩的类型繁多,但不论其外形如何,一 般均满足长径比大于10以上,故在一定的弹性波动理论条件下,可将其视为一维杆件。

埋于地下的桩是隐蔽的。不论预制桩或灌注桩,在打入地下或浇灌时,由于地层地质条件 的复杂多变,地下水的赋存及流动,施工人员的技术素质、工作责任心以及不规范的经济行为 等多种原因,使成桩的质量、混凝土标号、桩的不完整性乃至桩长不足等问题时有发生。具体 表现为,桩身总体混凝土标号达不到设计要求,桩身出现缩径、断裂、断开、夹泥、空洞、混凝土 离析以及扩径等缺陷。这些缺陷会严重影响桩基础的稳定性、抗震性能,使桩达不到设计要求 的承载力标准值。事实证实,当前桩身施工质量是不理想的。根据 1995~1997 年地矿系统 80 余个桩基检测单位的年报表中关于桩身完整性检测结果的综合结果表明:每年检测的 12 万条桩中,有缺陷的桩占 20%,甚至有的年份高达 25.6%,而 1997 年在个别省份有缺陷的桩 占被检测桩的 39%~59%。由此可见对桩身完整性检测的必要性。

列入《基桩低应变动力检测规程》(JGJ/T 93-95)中的有反射波法、机械阻抗法及声波透射法。本文将对上述几种检测方法分别加以讨论。

1 反射波法

1.1 基本原理

反射波法检测,是用小锤敲击桩头,产生质 点弹性振动并向桩底方向传播,在桩头附近产 生半球面波动的波场(或称声场),当传播一定 距离后 随半球面波场半径的加大,可近似视 为平面波场(图 1a)。如果弹性波动的波长 λ 满足

$$\lambda > D < L \quad , \tag{1}$$

式中 ,D 为桩径 ;L 为桩长 ; λ 为波长 ,波长是 弹性波传播速度 v 与其波动频率 f 的比值($\lambda = v/f$,这时桩方可视为一维杆件。如桩截面 及质量都不变化,其轴向振动方程如下



$$\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{h}{EA}\frac{\partial u}{\partial t} , \qquad (2)$$

式中, u为质点振动沿轴向位移; t为时间; z为轴线长度; E为桩身弹性模量; A为桩身截面积; h为桩侧土对桩的摩擦阻尼系数; v_{b} 为一维杆件中弹性波的传播速度。

$$v_{\rm b} = \sqrt{E/\rho} \tag{3}$$

如果桩身沿轴向不同部位的密度值 ρ 与传播速度 v ,或 $\rho \cdot v$ 值不变 ,即波阻抗值无变化 ,则图 1a 中小锤激励的弹性波将一直沿桩身向下传播至桩底。由于桩底地层的波阻抗的 $\rho_2 v_2$ 值与 桩身的波阻抗 $\rho_1 v_1$ 不同 ,根据反射定律 ,在桩底处的桩土界面将产生反射 ,反射能量的多少 , 由反射系数决定 ,振速反射系数 R_v 为

$$R_{v} = (\rho_{1}v_{1} - \rho_{2}v_{2}) / (\rho_{1}v_{1} + \rho_{2}v_{2})$$
(4)

或

$$R_{v} = (\rho_{1}v_{1}A_{1} - \rho_{2}v_{2}A_{2})(\rho_{1}v_{1}A_{1} + \rho_{2}v_{2}A_{2}), \qquad (5)$$

式中 A_1 A_2 为桩身截面积的变化。(5)式称广义振速反射系数[•]。当桩身存在缺陷 ,则缺陷 部位的 ρv 值与正常桩身的 ρv 值不同 ,在缺陷部位亦会产生反射波 ,如图 1b 所示。利用式 (5),可由 $\rho_1 v_1 A_1$ 及 $\rho_2 v_2 A_2$ 的大小 ,确定 R_v 值的正负。当扩径时 , R_v 为负 ,其物理含义是: 扩径部位的反射波与直达波的首波相位相反 ,如表 1 中扩径缺陷反射信号 ;缩径、裂缝、空洞、 夹泥、离析部位的反射系数 R_v 为正 ,则表示这些缺陷的反射波的首波相位与直达波首波相位 相同。

1.2 桩身中波的传播及其损失

图 1 所示是理想状态下桩身中声波的传播。实际上还存在波在桩周围的折射及波幅的吸 收衰减等。

1.2.1 桩身周边的折射及折射损失

图 2 所示是当桩受到脉冲力激振后 桩头附近半球面波场的示意。显然 斜入射到桩周围

● 反射系数还可以用声压反射系数 $R_{\rho} = (\rho_2 v_2 A_2 - \rho_1 v_1 A_1) (\rho_2 v_2 A_2 + \rho_1 v_1 A_1)$ 表示,两者是一致的,只不过从不同有度来表征同一物理现象,使用 R_{ρ} 对反射波的特性识别较直观。

· 286 ·

的波将按 Snall 定律产生折射波进入地层,此处折射不仅有折射纵波 PP 波,还有转换的横波 PS 波,其折射角 θ_{2P} 及 θ_{2S} 可由 Snall 定律决定。折射出去的能量,由折射系数决定。理论推导的纵波折射系数为

$$R_{\rm T} = \frac{2\rho_2 v_2 \cos\theta_1}{\rho_2 v_2 \cos\theta_1 + \rho_1 v_1 \cos\theta_{\rm 2P}} , \qquad (6)$$

式中 $\rho_1 v_1 \ D \rho_2 v_2$ 的含义同前 $, \theta_1$ 为纵波入 射角 $, \theta_{2P}$ 为折射纵波的折射角。仅从折射纵 波的折射系数可看出 ,地层越硬 $\rho_2 \ D v_2$ 越 大 ,折射角 θ_{2P} 越大 ,则折射系数也越大 ,即有 更多的波能由桩身中折射入地层。可见桩周 围介质 ρ ,v 值越大 ,折射造成的能量损失越 大。以上这些论断绝非理论分析 ,笔者曾在专 门的研究课题中由严密的实验加以证实。此 外 ,众所周知 ,一个放在空气中的桩 ,桩底反射 可轻易地获得来回多次的反射。软地层中 ,桩 长到 50~60 m ,桩底的反射也可获取 ,但硬地 层中 ,特别是原地灌注桩 ,桩底反射很微弱或 无法获取。其原因主要是折射损失所致。故 对桩做反射波测试时 ,有经验的工程技术人员 可由反射记录特征判断出桩周围土的软硬。





1.2.2 波在传播过程中的吸收哀减

桩身中波在传播过程中,质点振动的幅度随传播距离 / 而衰减。理论证明其衰减是遵循 指数规律的,即

$$A = A_{\rm m} {\rm e}^{-al} , \qquad (7)$$

式中 A_m 是激振点的振幅 A 是传播了 l 距离时的振幅 a 是混凝土衰减系数。理论证明 $a = af + bf^2 + cf^4$ 。考虑到反射波法测试所用频率约在 $300 \sim 1500$ Hz a 大约与频率 f 的 1 次 方及 2 次方有关。频率的 4 次方是散射衰减 ,则关系不大(式中 a b c 为系数 ,它们与介质特性有关)。由(7)式可以看出 桩身中不同的缺陷 ,其衰减系数是不一样的 ,特别是混凝土离析 ,对脉冲信号中高频衰减更多一些。再根据(5)式可看出 ,由于缺陷所形成的波阻抗的差异存在 ,其反射系数也会随缺陷性状而异。于是了解直达波、桩底反射波及缺陷反射波的波幅相对关系 ,有助于对缺陷性状的判断。缺陷的判断 除上述声参数作为判据之外 ,尚应掌握成孔工艺、成桩工艺及地质资料 ,由缺陷成因的可能性辅佐判断。

显然,完全断的桩,其缺陷反射系数最大。如果断开部位又接近桩头,则形成等时间间隔的多次反射。

1.3 反射波检测桩完整性实例

图 3 是完整桩的反射波记录。图 4 是缩径缺陷桩的反射波记录。该桩夹泥、微裂、空洞缺陷的物理机制与之相同,可将它们统称为缩径类缺陷桩。图 5 为扩径缺陷桩反射波记录。地下 13 m 处为淤泥或淤泥质土,流塑态。图 6 为多缺陷桩反射波记录。在 10.2 m 处断裂,15.0 m 处离析。

理论和实践到可证明扩径的多次反射规律(图7)。在实测记录上可见,在扩径下方又有





a

9 m

Ъ

23.1

万方数据

行径三

次反射

12.62

t/ms

扩径

反射

0 1.45 4.25

缩径时的多重反射。图 8 所示为桩头附近严重缺陷(离析)的波形记录。桩与下部桩身已脱 开 激励后形成质—弹体系振动,已不是反射波。

需要提及的是图 3~8 的波形记录,全是 实测波形,都有验证材料。图 3 由岩海公司王 雪峰提供,图 5 由由国家海洋局卢建平提供, 图 6 由中科院岩土力学所刘明贵提供,图 7 由 冶金部第一勘察公司李剑提供,图 8 由四川绵 阳岩土物探所戴爱国提供。

1.4 检测方法中的技术要点

反射波法似乎很简单,只要按图1所示, 小锤一敲,由接收传感器将信号送入仪器记录 即可。但实际上,接收传器的性能及其安装、 检测记录仪器中接收放大系统的滤波特性、锤



图 8 缩径缺陷桩的反射波记录

击的激振技术、接收信号的识别及处理等均很有讲究 技术要求甚高 简述如下。



图 9 尼龙头力棒与木锤、铁锤锤击激励对比 a-2 号桩尼龙头力棒锤击激励曲线;b-2 号桩木锤锤击激励曲线; c-28 号桩尼龙头力棒锤击激励曲线;d-28 号桩铁锤锤击激励曲线

1. 锤击:要求激振脉冲波的频谱成分应在 $300 \sim 1500$ Hz,这不仅可使波长 λ 满足 $\lambda > D < L$ 的一维杆件基本要求,还可有一定的分辨率,锤击的能量是另一个重要的要求,两者均可 由锤的材质及质量加以控制。例如图 9a, b 为同一条桩上以尼龙头力棒及木质锤激励的实测 结果,而图 9c, d 为另一条桩以尼龙头力棒及铁锤激励的实测结果。对比一下可见锤击激励条 件的重要性^{5数据} 2. 接收放大系统的频率响应特性 以低通滤性能为好 在 1 500 Hz 以下应有良好的响应。

3. 可用速度型接收传感器,但应是短余 振的。若用加速度型的则需在接收后对波形 做加工处理,减少波形的振荡,但处理不当会 丢失一些信息,处理得当信息便较完整(图 10)

反射波的频域分析及机械阻抗法 2

2.1 频域分析

前述的接收信号及其分析 均是在时间域 的记录上进行的。根据波形分析理论 时域信 号经 FFT 变换后,还可在频率域内对接收信 号进行分析。傅氏变换原理有

$$F(w) = \int S(t) e^{-iwt} dt$$
 (8)

(8) 武表明 时间域脉冲信号 S(t) 经上述运算 后 可变为频率信号 F(w)。 F(w)与 S(t)是 等价的。图 11 是 ø 377 mm 长 18 m 沉管灌注 桩的实测信号的时间域波形及经 FFT 变换后 的频率曲线。

对(2) 武求解后,可知在敲击时,在轴向会 产生多阶振动。图 11b 中 f_0 , f_1 是全桩的一 阶及二阶轴向振动频率 其频率值分别为 53.14 Hz 及 141.96 Hz 则由(2)式的求解可知

式中 Δf 为频差 , $\Delta f = f_1 - f_0$, L 为桩长 ;v为桩身混凝土声速。由图 11b 中看到的 f'_1 , f'_{2}, f'_{3} 是桩身严重缩径以上部位的轴向多阶 共振频率,由(9)式亦可算出缩径部位的埋深 $\Delta L'$

$$\Delta L' = v / (2\Delta f'), \qquad (10)$$

式中 $\Delta f'$ 为 f'_1 , f'_2 , f'_3 频差均值。 2.2 机械阻抗法

机械阻抗法分为稳态激振及瞬态激振 后 者在检测方法上与反射波法完全一致。不同 的是在敲击的锤头上,装有力传感器,并将力 传感器测到的敲击瞬间力信号同时记录,再将 波形为半个正弦的力信号同样做频谱分析 得 到力谱 将力谱去除速度型接收传感器振速曲 线的频谱<u>于是得</u>到的谱称为导纳谱。由于力



不同传感器对接收信号的响应及处理结果 图 10 ·般速度型传感器接收波形;b—高阻尼短余振 速度型传感器接收波形; 。——加速度传感器接收波 形 : ----加速度传感器接收信号积分处理后的波形

 $v = 2L(f_1 - f_0) = 2L \cdot \Delta f$, (9)



图 11 时间域信号经 FFT 变换后的频率域曲线 a—S(t)曲线;b—F(w)曲线

谱曲线基本上不随频率而变化,在工作频率范围内是平直的,即是恒定的,那么上述2个谱相 除后的曲线状态并无变化,只是纵坐标的量纲有所变化,这样做的目的,仅为测取承载力,在此 不加讨论。可见,反射记录的频域解释在本质上与瞬态机械阻抗法是一致的。

3 声波透视法

反射波法在桩顶上即可施测,它只能测取桩身混凝土的平均声速。声波透射法在施测前 必须在桩身上有一对或数对平行的孔,一般以内径为50~60 mm的钢管顶替钢筋笼内的主 筋,浇灌混凝土时,钢管也就埋设其中,故此法俗称埋管法。

3.1 基本原理

在埋设的检测管内,分别放入发射脉冲声波的发射换能器 T 及接收换能器 R(图 12a)。 发射换能器发射的是一组衰减振动的脉冲声波,其振动频率在超声范围,一般为 20~50 kHz, 有时这种检测方法又被称作'超声波检测"。脉冲波经检测管中的清水辐射入混凝土中,以球 面声场向接收换能器传播,被接收换能器接收。实测的接收波形如图 12b。





a--检测方法示意;b,c--接收波形(北京市政设计研究院研制的NM-3非金属超声检测仪的测试结果)

声波在混凝土中的传播 ,是介质质量弹性振动的传递过程。由弹性理论可知 ,在无限固体 介质由应力、应变引起的弹性波动方程为

$$\begin{cases} \rho(\partial^2 u_x/\partial t^2) = (\lambda + \mu)(\partial \theta/\partial x) + \mu \nabla^2 \mu_x \\ \rho(\partial^2 u_y/\partial t^2) = (\lambda + \mu)(\partial \theta/\partial y) + \mu \nabla^2 \mu_y \\ \rho(\partial^2 u_z/\partial t^2) = (\lambda + \mu)(\partial \theta/\partial z) + \mu \nabla^2 \mu_z \end{cases},$$
(11)

式中 , θ 为体积膨胀率 ; $\theta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$,它表示在声波扰动下体积相对变化 ; u_x , u_y , u_z 分别为 x,y,z 方向的位移 ; λ , μ 为拉美常数 ; ρ 为密度。由(11)式经计算可知

$$p_{\rm P} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-\sigma)}} , \qquad (12)$$

式中 ,E 为弹性模量 ; σ 为泊松比 ; v_P 纵波传播速度。由此可见 ,声速与介质的力学性能存在 一定相关天 物 烟图 12b ,由首波的初至点可测取到声波的传播时间 $t(365.2 \mu s)$,当已知 2 个检测管间的距离 L_{ka} ,即可计算出混凝土的纵波速度 $v_{P} = L_{ka}/t$ 。由声速与混凝土强度的 相关关系,可对混凝土强度作出定性分级。如需提供定量关系,则需取芯,测取一定数量芯样 的声速与其单轴抗压强度的关系,由抗压强度——声速的散点图、回归其间关系,方可提供较为 确切的强度定量值。

比较 3)式与(12)式,它们同是声速,但表达式不一致,原因是(3)式为一维杆件的声速, (12)式是无限体的声速,后者比前者大1.05~1.10 倍,这就是声波测试的声速为何会大于反



图 13 孔深—波列图 a 与声速及波幅—孔深图 b 的对比

射波法测出的声速的主要原因。当桩身内部存在缺陷时,如图 12a 中换能器处于 T´,R´位置时,暂以缺陷是块夹泥为例,说明这时声波的传播。由于缺陷的波阻抗 $\rho_2 v_2$ 与桩身正常混凝 土波阻抗 $\rho_1 v_1$ 不同,声波传播至缺陷处,会产生折射、反射以及绕过缺陷传播的绕射现象。于 是,由发射换能器 T[´]发射的声波,由不同的路径传播至接收换能器 R[´],形成声传播路径加长,声传播时间加长($t = 494 \ \mu_s$);不同路径的声波先后到达接收点,波的叠加又使接收波形畸变。 这些均可由图 12c 中看出。

正常混凝土与有缺陷的混凝土对声波的衰减也不一致,显然后者要大于前者。由图 12b, c首波波幅加以比较,前者为 92.42 dB,后者为 61.4 dB。

此外,还应提及的是波幅值更能反映缺陷。只要缺陷处于发射换能器辐射的声场范围内, 接收信号的首波波幅即发生变化。有时如声波传播路线显示直接穿过缺陷,首波声时还没有 变化,而波幅却会有明显改变,这是因为波幅值实际反映的是接收换能器所接收到的声场中声 能变化。例如,有的超声仪可同时给出全部波列曲线,图13是将其自动打印出的声速—孔深 及波幅—孔深曲线反时针转90°后,与其同时存储的波列图放在一起,对比孔深 – 19.17 m 处 的反应。图12b c 的波形是不一致的,对它们进行频谱分析,FFT 变换的结果必然不一致,有 缺陷部位的频谱曲线是多峰的,且主频向低频方向漂移。

3.2 声波透视法对缺陷的判据

判据是方数据重要的问题。我们由检测管的孔底至孔口,测取了许多声波在桩身中的传

播时间 t(或传播速度 v) 接收信号首波波幅 A、接收信号的频谱曲线或主频 f_0 。这些声参量 又都和混凝土的缺陷有关。问题是声学参量 v ,A , f_0 变化到什么程度 ,方可由其对缺陷作出 判断。这里我们引用'基桩低应变动力检测规程 '中声波透射法的有关判据。

3.2.1 声时或声速判据

采用声时平均值 μ_{t} ,与声时 2 倍标准差 σ_{t} 之和作为判定桩身有无缺陷的临界值

$$\mu_{t} = \sum_{i=1}^{N} t_{ci} / n , \qquad (13)$$

$$\sigma_{t} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (t_{ci} - \mu_{t}) 2/n} , \qquad (14)$$

式中,*n* 为测点数; t_{ci} 为混凝土中第*i* 测点声波传播时间。由于 2 个检测管是平行的,而声速 $v_{Pi} = L/t_{ci}$,故也可用声速判定桩身有无缺陷,只需将(13)式、(14)式中的 t_{ci} 换成 v_{Pi} 即可。这时由声速判断有无缺陷的临界值将是声速平均值 μ_c 与声速 2 倍标准差 σ_c 之差。 3.2.2 K_{ic} · Δt 判据

 $K_{tz} \cdot \Delta t$ 判据又称 PSD 判据(product of slope and difference)。检测管埋设时,万一不能保 持平行,用声时(或声速)判据肯定会出现判断困惑。故可采用声时—深度曲线相邻测点的斜 率 K_{tz} 与相邻 2 点声时差值 Δt 的乘积,即 $K_{tz} \cdot \Delta t$ 作为缺陷判据

$$K_{tz} = \frac{t_{ci} - t_{ci-1}}{Z_i - Z_{i-1}} , \qquad (15)$$

$$\Delta t = t_{ci} - t_{ci-1} , \qquad (16)$$

$$K_{tz} \cdot \Delta t = \frac{(t_{ci} - t_{ci-1})^2}{Z_i - Z_{i-1}} \circ$$
 (17)

3.2.3 波幅判据

声波波幅比声时对缺陷的反应更灵敏,可采用接收信号波幅(能量)平均值 µq 的一半作为 判断缺陷的临界值 q_D,即

$$q_{\rm D} = \mu_{\rm q} - 6$$
 , (18)

$$\mu_{\rm q} = \sum_{i=1}^{N} q_i / n \quad , \tag{19}$$

式中 , μ_q 为波幅的平均值 ,单位 dB ; q_D 为第 i 测点的波幅 ;n 为测点数。(18)式中的 – 6 表示 波幅衰减一半。

图 14 是利用 NM-3 型非金属超声检测分析仪,对某工程桩实测后,在专用软件支持下自 动绘制出的检测结果。它的 3 条曲线分别是 $v_P - Z$, $A - Z \ D K_t - Z$ 。图中以 v_a 代表声速 μ_c ; v_0 代表 $\mu_c - 2\sigma_c$; A_0 代表 q_D ; A_a 代表 μ_q ; K_t 代表 $K_{tz} \cdot \Delta t$ 。当 v, A, K_t 均超过判据临界 值时,可判断该深度不存在缺陷。

图 12b *c* 图 13 及图 14 系由北京市政工程研究院康科瑞公司濮存亭及张立平提供。 3.3 声波透视法最新检测技术——声 CT 技术

CI(computerize tomography)技术也就是计算机层析成像技术。不过这里用的信息载体 是声波,故又称之为声层析成像技术,简称声 CT 技术。其原理如下:设有 2 个钻孔 H₁,H₂。 孔之间等分为称段,在孔深方向按同样尺寸可分为 *M* 段。于是 2 孔间便有 *N*·*M* 个正方格





(图 15)。在 2 孔间逐点做扇面测试,孔 H₁ 中发射,孔 H₂ 中接收。其中声线之一为 T 至 R,第 *ij* 块网格内的声线度为*L_i*(*i* = 1 2,...,*N*;*j* = 1 2,...,*M*),声波在此方格内的走时为*t_{ii}*

$$t_{ij} = \frac{L_{ij}}{v_{ij}} = L_{ij} \cdot G_{ij} , \qquad (20)$$

$$G_{ij} = \frac{1}{v_{ij}} , \qquad (21)$$

上 2 式中 , v_{ij} 为第 ij 方格内的声速 , G_{ij} 是声速的倒数称之为慢度。于是 ,在第一排网格内声波 由 H_1 传播至 H_2 的总走时应为

$$L_{11} \cdot G_{11} + L_{12} \cdot G_{12} + \dots L_{1N} \cdot G_{1N} = T_{1N}$$
(22)

于是可写出所有声线的声时为

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{M1} & L_{M2} & \cdots & L_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{NM} \end{bmatrix} .$$
(23)

(23) 武为大型稀疏超定矛盾方程组,可称为

[L].[G]=[T]。 (24) 实际是先用扇面测试法在很多条测线上测取 了声时值 T_m,并应保证每个小方格内至少要 有2条以上声线穿过。然后按(22)式先赋与 [G]值,计算[T]值,当[T]与实测 T_m相接近 至最小误差后,停止计算。这时对每个方格内 赋声速值,便接近2孔间声速的实际分布状态 了。之后,可勾绘出2孔间的声速等值线图, 也可用不同灰度或彩色表示孔间声速分布,从 而了解孔间缺陷的分布。图 16 是在某工程的



· 293 ·

一条 ø1.4 m ,长 38.5 m 的灌注桩内 ,在检测管底 1 m 范围内的声层析成像图。它显示出孔底 沉渣。声速 3 000 m/s 以下的范围应认为是沉渣的分布位置。

声 CT 技术需采集大量信息,估计具备完善而准确的自动判读首波声时的数字化超声检 测仪做进一步全自动检测后,有望对缺陷部位作出声 CT 检测,给出缺陷空间分布将为时不远 了。



图 16 桩底声层析成像 a—检测后的计算结果 ;b—底面测线示意

4 结语

反射波法及声波透射法检测桩身完整性,被公认为最有效的方法。这2种方法各有其特点,又各有其不足,但却可以互补,应结合使用;在检测技巧、检测结果分析方面的许多细节,限于篇幅,只作了一般性的介绍。

参考文献:

- [1] 吴庆曾.小应变动力验桩纵横谈[A].见:刘明贵 蔡忠理 ,佘诗刚主编.基桩与场地检测技术[C].武汉 ;湖北科学技术 出版社 ,1995.
- [2] 《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京.中国建筑工业出版社,1995.
- [3] 地质矿产部勘查技术司主编.中华人民共和国行业标准 JGJ/T 93—95 基桩低应变动力检测规程 S].北京:中国建筑 工业出版社,1995.
- [4] 吴庆曾.基桩完整性检测[J].探矿工程,1999(23).

万方数据

THE TECHNIQUE FOR INSPECTION OF THE PERFECTION OF THE FOUNDATION PILE

WU Qing-zeng

(Institute of Techniques and Methods ,MGMR ,Baoding 071051, China)

Abstract : This paper deals with the classification of piles ,the multiple factors responsible for the defects and the necessity of perfection inspection. It is held that the reflected wave theoretical basis and the activation and receiving sensor constitute the crux of the inspection technique for one-dimensional rods. The consistency of the frequency interpretation of reflected wave signal with the transient mechanic impedance method is illustrated with practical engineering examples. The paper also expounds the theory and grounds of applying sonic transmission method to inspect the perfection of the foundation pile, the discrimination basis and examples of the inspection and the latest sound CT technique and its inspection achievements.

Key words: perfection inspection of foundation pile ;defects ;reflected wave method ;sonic transmission method ; sound CT technique

作者简介:吴庆曾(1933-),男,1954年毕业于上海交通大学电信工程系,原地质矿产部水文工程地质技术方法研究所声波研究室主任,教授级高级工程师,曾选聘为第一至第三届中国声学学会理事,检测声学分会副主任,地矿部桩基无损检测协会理事长,北京市政工程研究院客座研究员公开发表论著论文多部。