



考虑信号衰减及叠加修正的 反射波曲线分析方法*

吕述晖^{1,2}, 苏林王^{1,2}, 苏世定^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 缺陷反射信号的衰减、多缺陷反射信号的叠加以及缺陷形态是低应变曲线分析中影响缺陷特征识别的关键因素。考虑波动在缺陷界面入射前和反射后传播衰减系数的差异以及缺陷反射的叠加干扰, 通过完整桩段理论反射波曲线部分拟合受测桩实测反射波曲线及叠加修正获得波动衰减系数, 提出基于实测曲线拟合的完整性系数计算改进方法。同时, 基于成层土中渐变缺陷桩瞬态响应模拟技术, 提出结合完整性系数进一步分析缺陷特征的方法。最后, 结合实测反射波曲线验证了方法的有效性。

关键词: 桩; 缺陷; 完整性系数; 反射波曲线; 信号衰减; 信号叠加

中图分类号: U 65; TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0026-06

Method for analyzing reflection wave curve considering signal attenuation and superposition correction

LYU Shuhui^{1,2}, SU Linwang^{1,2}, SU Shiding^{1,2}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Attenuation of defect reflection signals, superposition of multiple defect reflection signals, and defect shapes are key factors that affect the recognition of defect features during the analysis of low-strain curves. In view of the difference in the attenuation coefficient of wave propagation before incidence and after reflection at the defect interface and the superimposed interference of defect reflection, this paper obtains the attenuation coefficient of wave propagation by partially fitting the measured reflection wave curve with the theoretical reflection wave curve of an intact pile segment and utilizing superposition correction. In addition, the paper proposes an improved method for calculating the integrity coefficient based on measured curve fitting. At the same time, based on the transient response simulation technique of gradually varied defect piles in stratified soil, this paper puts forward the method of further analyzing defect features with integrity coefficient. Finally, the paper verifies the effectiveness of the method by employing the measured reflection wave curve.

Keywords: pile; defect; integrity coefficient; reflection wave curve; signal attenuation; signal superposition

低应变反射波法是桩基成桩完整性检测最为常用的无损检测方法, 其利用桩顶激振后采集的速度反射波曲线识别桩身完整性信息。在有效的

检测桩长范围内, 通过反射波曲线较容易识别缺陷的存在, 但对于缺陷程度则难以准确判断。反射波曲线中缺陷反射脉冲特征(幅值、宽度等)主

收稿日期: 2022-07-07

***基金项目:** 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)河口海岸与岛礁工程创新团队建设项目(311020009)

作者简介: 吕述晖(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水工结构与地基基础、土工测试技术研究。

要取决于激励脉冲特征、土层参数、桩身材料参数、缺陷深度、缺陷特征。一般而言,对比缺陷反射和桩顶入射脉冲幅值可以一定程度上分析缺陷严重与否。但由于受土层引起波动的衰减以及缺陷特征的影响^[1-2],通过缺陷反射脉冲幅值的大小容易误判缺陷严重程度。因此对于有疑问的缺陷,采用有效的方法定量分析缺陷将有利于完整性的准确判断。缺陷程度通常采用完整性系数定量描述,其与缺陷界面处入射波和反射波的比值相关,但仅依据单一的桩顶反射波曲线无法确定这一比值。柴华友^[3-4]提出基于波动理论拟合实测反射波曲线来分析缺陷程度,该方法理论可行,但由于拟合涉及较多的桩土参数,同时缺陷特征本身复杂多变,实际应用时拟合难度较大。之后他进一步通过建立应力波衰减系数与缺陷位置及土阻尼因子的关系式,进而由土阻尼因子及实测反射波曲线计算完整性系数。该方法中土阻尼因子需根据土物理力学参数准确计算,对于低应变受检桩而言难以实现,同时该方法未考虑缺陷特征的影响。

张献民等^[5-6]基于波动理论通过正演计算建立桩径变化程度与波幅比(桩顶入射与缺陷反射的脉冲幅值比值)的关系式(相关系数与桩侧土阻尼因子和缺陷位置有关),通过关系式及由邻近完整桩波幅特征反演的土阻尼因子计算缺陷程度。智胜英^[7]采用类似建立关系式的方法分析缺陷程度,未考虑缺陷特征及土层参数复杂变化的影响。陶明江等^[8]通过对反射波曲线进行频域分析获得桩-土系统的自振频率,进而利用自振频率域桩特征的关系定量分析缺陷,该方法分析时需要人为确定部分桩-土参数,影响结果可靠性。

基桩中波动传播的衰减与多方面因素相关,包括桩-土材料参数、缺陷特征参数、激励脉冲参数等,因此仅由土层参数决定波动衰减因子并不合理。本文考虑波动在缺陷界面入射前传播和反射后传播衰减系数的差异以及缺陷反射的叠加干扰,通过完整桩段理论反射波曲线部分拟合受测

桩实测反射波曲线及叠加修正获得波动衰减系数,建立基于实测曲线拟合的完整性系数计算方法。然后,基于成层土中渐变缺陷桩瞬态响应模拟技术,建立结合完整性系数进一步分析缺陷特征的方法。最后,结合实测反射波曲线验证方法的有效性。本研究可为完整性系数计算以及缺陷特征的分析提供新思路和实用方法。

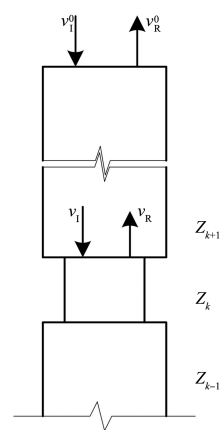
1 缺陷完整性系数分析方法

1.1 完整性系数计算

如图1所示,根据一维弹性杆件波动理论,界面处的反射波峰值 v_R 与入射波峰值 v_I 具有如下关系:

$$v_R/v_I = (1-\beta)/(1+\beta) \quad (1)$$

式中: β 为第 k 与 $k+1$ 桩段界面处的完整性系数, $\beta=Z_k/Z_{k+1}$,其中, Z_k 为第 k 桩段的声阻抗, $Z_k=\sqrt{E_{pk}\rho_{pk}A_k}$, E_{pk} 、 ρ_{pk} 、 A_k 分别表示第 k 桩段的杨氏模量、质量密度及横截面积。



注: v_I^0 为桩顶入射波峰值; v_I 为与界面处入射波峰值;
 v_R 为界面处反射波峰值; v_R^0 为桩顶缺陷反射波峰值。

图1 缺陷桩波动传播

考虑桩身材料阻尼和桩侧土对波动的衰减效应, v_I^0 与 v_I 、 v_R 与 v_R^0 分别具有如下关系:

$$v_I = v_I^0 \varphi \quad (2)$$

$$v_R \varphi \psi = v_R^0 \quad (3)$$

式中: φ 为入射信号衰减系数; ψ 为反射与入射信号衰减系数的比值。

缺陷上界面处的完整性系数 β 可表示为:

$$\beta = (\varphi^2 \psi - \alpha) / (\varphi^2 \psi + \alpha) \quad (4)$$

式中: $\alpha = v_R^0 / v_I^0$ 。

对于缺陷下界面处, 忽略缺陷本身以及缺陷段对应土阻力引起波动能量的衰减, 其完整性系数 β' 可按式估算:

$$\beta' = Z_{k-1} / Z_k = (1 - \alpha') / (1 + \alpha') \quad (5)$$

式中: $\alpha' = v_R^1 / v_I^1 (1 + \beta)^2 / (4\beta)$, v_R^1 为缺陷下界面在桩顶的反射波峰值。

值得说明的是, 对于无明确上、下界面的非线性渐变型缺陷, β 、 β' 反映了桩身阻抗变化和变化特征耦合的影响。衰减系数 φ 与缺陷界面以上桩-土参数、缺陷特征、激振力等均有关联, 由于实际情况的复杂性, 难以对这一关联进行直接的量化表征, 而采用文献[9]提出的缺陷桩瞬态响应半解析方法可以间接地通过计算桩顶入射波峰值与界面处入射波峰值的比值确定 φ 。同样地, 通过计算桩顶缺陷反射波峰值与界面处反射波峰值的比值可确定 $\varphi\psi$ 。上述缺陷反射信号均指反射波曲线上的首次缺陷反射。

1.2 ψ 值的影响因素及修正

ψ 值需要根据桩顶缺陷反射波峰值和缺陷界面处的反射波峰值计算, 其中缺陷界面处的反射波峰值可以根据缺陷界面处的入射波峰值由式(1)计算获得, 桩顶缺陷反射波峰值则需要由桩顶反射波曲线确定。对于图 2a) 所示的缺陷特征, 桩顶缺陷反射波实际为缺陷上下界面反射波的叠加, 由此计算的缺陷反射波峰值并非实际的缺陷段上界面或者下界面的反射峰值, 因此通过理论计算确定 φ 、 ψ 值需基于图 2b) 所示的缺陷特征。下面首先通过数值计算分析引起波动衰减的主要桩-土参数(包括桩身材料阻尼、土阻尼、土剪切波速)对 ψ 值的影响。

基本桩-土参数为: 1) 桩参数: 桩长 20 m, 纵波波速 4 000 m/s, 材料质量密度 2 500 kg/m³, 阻尼 0.1 MN/(s·m³); 2) 桩侧土层参数: 剪切波速 100 m/s, 质量密度 1 800 kg/m³, 阻尼系数 0.05, 泊松比 0.38; 3) 桩端土层参数: 剪切波速 450 m/s, 其他参数同桩侧土。

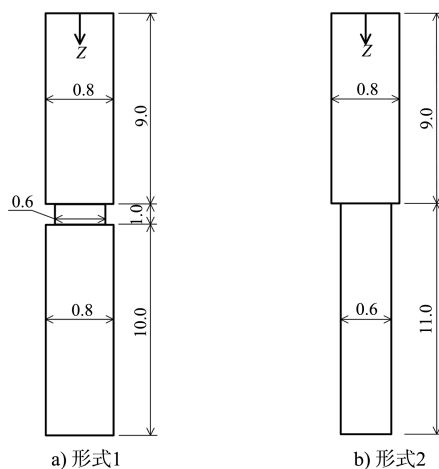


图 2 两种典型缺陷形式 (单位: m)

图 3 对比了缺陷程度不同时桩身材料阻尼对 ψ 值的影响。由图可知, 桩身材料阻尼对 ψ 值的影响呈现出非线性规律, 当桩身材料阻尼减小时, ψ 趋于稳定值; 当桩身材料阻尼增加时, ψ 趋近于 1。

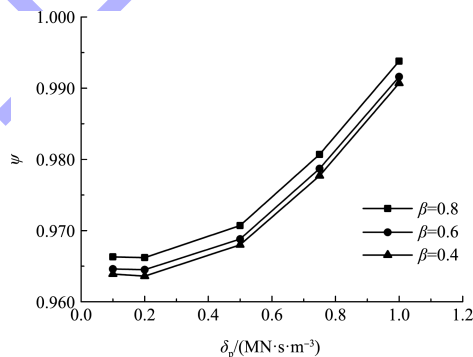


图 3 桩身材料阻尼对 ψ 值的影响

图 4 对比了缺陷程度不同时桩侧土剪切波速对 ψ 值的影响。由图可知, 随桩侧土剪切波速变化, ψ 值的变化相对较为显著, 且呈现近似线性规律。当桩侧土剪切波速较小时, ψ 趋近于 1。

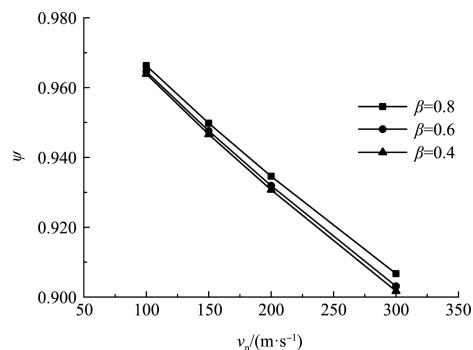


图 4 桩侧土剪切波速对 ψ 值的影响

图5对比了缺陷程度不同时桩侧土阻尼对 ψ 值的影响。由图可知,随桩侧土阻尼增大, ψ 值呈非线性增加,而当桩侧土阻尼减小时, ψ 值趋于稳定值。对比而言,桩侧土阻尼变化对 ψ 值的影响相对较小。

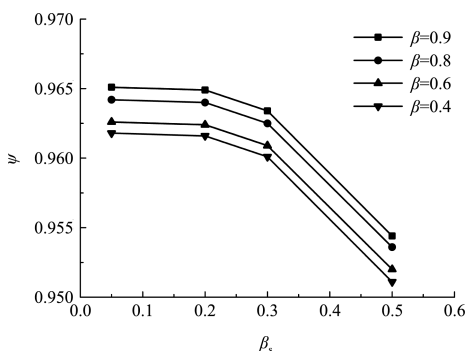
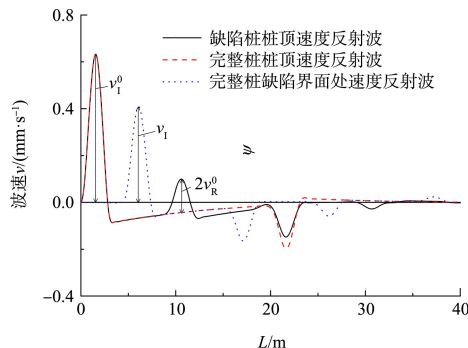


图5 桩侧土阻尼系数对 ψ 值的影响

此外,对比图3~5,随缺陷程度即缺陷反射波峰值增加, ψ 值虽略有增加,但相较而言仍较为接近。

上述分析表明, ψ 值受缺陷界面以上桩土参数的影响规律较为复杂,但缺陷程度对 ψ 值的影响较小。进一步的试算表明,对于一般的工况, $\psi > 0.8$ 。

为了考虑入射波和反射波信号的衰减,首先拟合缺陷反射前的反射波曲线,得到对应完整桩段桩土参数组合,并在此基础上按实际缺陷起始位置设置模拟缺陷以计算 φ 、 ψ 值进而修正 β 值的计算结果。以图2a)所示缺陷桩为算例,如图6所示,理论计算的缺陷桩桩顶速度反射波曲线代表实测曲线,完整桩桩顶速度反射波曲线根据实测曲线拟合(拟合缺陷反射前的实测曲线即可),由二者根据式(4)并忽略 ψ 值影响时($\psi=1$)计算的完整性系数为0.5763,而进行 ψ 值修正后($\psi=0.960$)计算的完整性系数为0.5631,与实际缺陷完整性系数0.5625吻合。



注: $L = tC/2$, 式中: t 为时间; C 为桩纵波波速。

图6 算例1计算速度时程曲线

1.3 信号叠加的影响及修正

图7所示的反射波特征常见于灌注桩桩身存在局部扩缩径缺陷的工况。由于缺陷上、下界面产生的反射波发生叠加,叠加范围及叠加前的脉冲特征会不同程度地影响缺陷反射波峰值的判断。如图所示,缺陷段上、下界面反射波发生叠加的条件可表示为:

$$t_2 - t_1 < t_0/2 \quad (6)$$

式中: t_0 为缺陷段上界面反射波时长, $t_0 = 2 \times (t_3 - t_1)$; t_1 为缺陷段上界面反射波初至时刻; t_2 为缺陷段下界面反射波初至时刻; t_3 为缺陷段上界面反射波峰值时刻; t_4 为缺陷段下界面反射波终止时刻; t_5 为实测缺陷反射波峰值时刻。

由式(6)可进一步计算发生叠加所需缺陷长度:

$$L_{\text{defect}} < Ct_0/4 \quad (7)$$

缺陷段的宽度可按式(8)计算:

$$L_{\text{defect}} \approx (t_4 - t_1 - t_0) \times C/2 \quad (8)$$

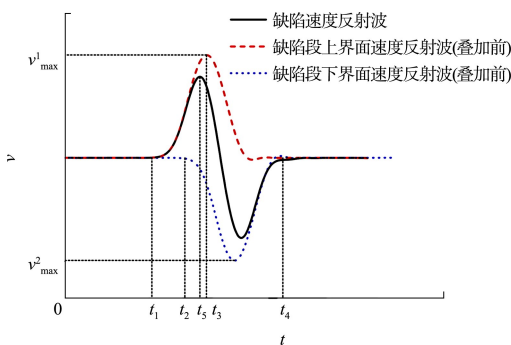


图7 缺陷上、下界面速度反射波叠加曲线

对于仅考虑几何尺寸变化的缺陷问题,缺陷段上、下界面反射波特征与入射波相似,且脉冲宽度接近(缺陷为较长的渐变缺陷时有所差异,但考虑到叠加限于较小的缺陷宽度,仍可考虑二者近似)。因此,可分别采用式(9)(10)中升余弦函数表示无叠加影响时缺陷段上、下界面的反射波 v_D 、 v_U :

$$v_D = 0.5v_{\max}^1 \{1 - \cos[\omega_0(t - t_1)]\} \quad (9)$$

式中: $t \in [t_1, t_1 + 2\pi/\omega_0]$; $2\pi/\omega_0$ 为升余弦函数周期; v_{\max}^1 为不考虑缺陷下界面反射信号叠加影响时缺陷上界面反射波峰值。

$$v_U = 0.5v_{\max}^2 \{1 - \cos[\omega_0(t - t_2)]\} \quad (10)$$

式中: $t \in [t_2, t_2 + 2\pi/\omega_0]$; v_{\max}^2 为不考虑缺陷上界面反射信号叠加影响时缺陷下界面反射波峰值。

则二者叠加后的反射波 v 为:

$$v = v_D + v_U \quad (11)$$

以此为基础,可采用2种方式拟合实测缺陷反射波曲线从而确定 v_{\max}^1 。方式1采用式(11)拟合桩顶反射波曲线 $[t_2, t_2 + t_0]$ 区间的缺陷反射波;方式2采用式(9)拟合桩顶反射波曲线中 $[t_1, t_2]$ 区间的缺陷反射波。拟合算法为最小二乘估计。由拟合得到的 v_{\max}^1 计算 β 可在一定程度上消除信号叠加的影响。

图8对比了缺陷程度不同时突变型缺陷和非线性渐变型缺陷的反射波特征。由图可知,对应不同程度缺陷的反射波曲线中,缺陷反射的初至时刻 t_1 和峰值时刻 t_5 较为一致,而终止时刻和谷值时刻有所差异。这一差异主要与渐变型缺陷反射波曲线呈现缺陷反射波宽度增加特征以及桩横向惯性效应导致紧随缺陷反射的振荡有关。

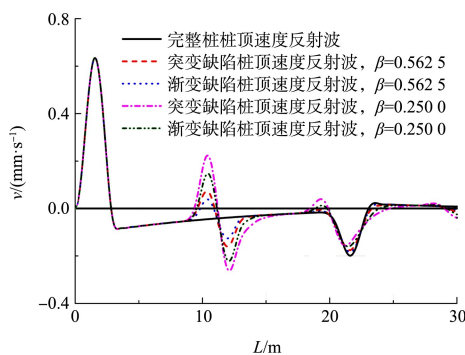


图8 算例2计算速度时程曲线

将图8中计算的缺陷桩桩顶反射波曲线视为实测曲线,采用1.1节方法计算完整性系数,并进行叠加修正,结果见表1。对比可知,叠加修正后计算的完整性系数与实际值更为接近,而突变型缺陷的计算结果相对渐变型缺陷更为准确。采用方式2的修正结果略优于方式1。但当 $t_2 - t_1$ 趋向于0,方式2拟合所依据的数据点减少,将降低结果的准确性。此外,缺陷反射波曲线可能由于缺陷特征的复杂性以及其他信号的叠加导致信号特征与升余弦脉冲特征存在较大差异,亦将降低拟合的有效性。实际拟合时可根据式(12)分析叠加修正的必要性,叠加修正值 γ 值越小,叠加影响越大。同时,应对比拟合与实测结果以分析拟合结果的合理性。

$$\gamma = 2(t_2 - t_1)/t_0 \quad (12)$$

上述方法仅是提供估算 v_{\max}^1 值的一种方式。对于拟合失效但叠加影响显著的情况,有必要估计 v_{\max}^1 以考虑叠加效应对 β 计算值的影响。

表1 叠加修正前后计算完整性系数

实际完整性系数	计算完整性系数	
	叠加修正前	叠加修正后
0.562 5	0.620 0/0.720 0	0.550 0(0.570 0)/0.660 0
0.250 0	0.310 0/0.450 0	0.220 0(0.250 0)/0.360 0

注:斜线左、右侧分别对应突变型和渐变型缺陷,括号内、外分别表示采用方式1、2修正的结果。

2 实例分析

1#桩为高桩码头灌注桩,桩孔采用回旋+冲孔方式成孔,桩长40.5 m,设计桩径1.2 m,混凝土标号C40,桩顶以下18.28 m采用直径1.3 m、壁厚8 mm钢护筒护壁,泥面距桩顶13.38 m,桩身材料纵波波速为4 000 m/s。土层参数根据经验取值,见表2。

表2 1#桩土层计算参数

土层名称	层厚/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)
粉土	3.45	80
细-中砂	1.45	150
黏土质粉砂	10.55	150
全风化胶结砂	5.63	300
全风化胶结砂	4.87	250
细-粗砂	1.17	150

由实测桩顶反射波曲线确定激振力及缺陷特征参数为:激振力幅值 34.5 kN, 激振脉冲宽度 1.65 ms, 缺陷距桩顶 9.0 m, 结合式(8)确定缺陷段长度约为 1.7 m。根据桩-土参数计算完整桩桩顶速度波曲线如图 9 所示, 由此计算 $\varphi = 0.978$, $\psi = 1.000$ 。根据式(12)计算 $\gamma = 0.96$, 可知叠加影响较小。根据式(4)计算缺陷上界面完整性系数 $\beta = 0.620$, 而根据式(5)估算缺陷下界面完整性系数 $\beta' = 1.430$ 。由上、下界面完整系数计算等效的上、下界面桩径分别为 1.02、1.08 m。由上述分析结果并考虑等效桩径的非线性变化 ($a_3 = 0.51$ m、 $r_T = 0.51$ m、 $r_D = 0.54$ m) 计算缺陷桩桩顶反射波曲线如图 9 所示, 由图可知, 计算缺陷反射波与实测值整体吻合, 但缺陷下界面反射峰值计算值略大于实测值(计算方法未考虑缺陷引起的波动能量损耗)。

为进一步查明桩身缺陷, 对该桩采用钻芯法检测, 4 个钻孔 360° 对称布置且靠近钢筋笼内侧(钢筋笼外径为 1.05 m), 采用跨孔超声波检测, 检测结果并未发现明显异常。对比邻近基桩检测结果, 考虑到缺陷后土阻力影响及桩端附近反射信号仍清晰可见, 推测缺陷可能由于钢护筒冲孔过程变形导致桩身缩颈所致。

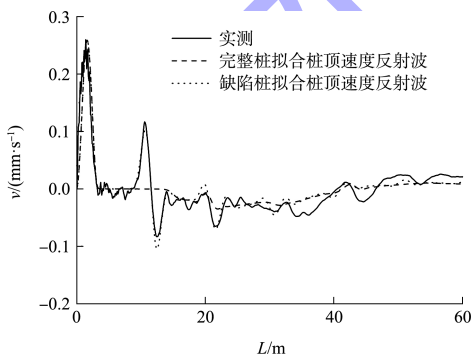


图 9 1#桩拟合及计算速度反射波曲线

2#灌注桩桩孔采用回旋+冲孔方式成孔。桩长 65.5 m, 设计桩径 1.5 m, 混凝土标号 C40, 桩顶以下 18.00 m 采用直径 1.5 m、壁厚 8 mm 钢护筒护壁。桩身材料纵波波速取值为 4 000 m/s, 土层参数根据经验取初值, 并以实测曲线为基础拟合修正缺陷以上土层的计算参数, 见表 3。

表 3 2#桩土层计算参数

土层名称	层厚/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)
中砂	21.24	120
黏土质粉土	4.10	80
中砂	4.40	150
黏土质粉土	20.30	100
细砂	7.30	150
全风化胶结砂	7.31	250
中风化花岗岩	0.95	500

由实测桩顶反射波曲线确定激振力及缺陷特征参数为:激振力幅值 53.3 kN, 激振脉冲宽度 1.3 ms, 缺陷距桩顶 18.33 m, 缺陷段长度约为 4.0 m。根据桩-土参数计算完整桩桩顶速度反射波曲线如图 10 所示, 并计算得到 $\varphi = 0.510$, $\psi = 0.850$ 。 $\gamma > 1$, 不考虑叠加影响。由此计算缺陷上、下界面的完整性系数分别为 3.270、0.310, 等效的上、下界面桩径分别为 2.72、2.70 m。

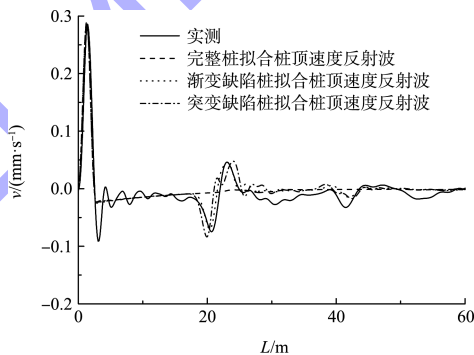


图 10 2#桩拟合及计算速度反射波曲线

图 10 分别以等效桩径为基础考虑线性渐变型缺陷 ($r_T = 1.36$ m、 $r_D = 1.35$ m) 和抛物线渐变型缺陷 ($a_3 = 1.36$ m、 $r_T = 0.75$ m、 $r_D = 0.75$ m) 2 种情况计算桩顶反射波曲线, 对比表明, 由后者参数计算的反射波曲线与实测曲线吻合较好。

2#受测桩下钢筋笼前进行了超声波孔径测试, 测试结果(图 11)表明, 护筒底部存在约 2.54 m 直径扩径, 扩径段长约 4.00 m, 该孔径数据与低应变检测分析结果较为一致。

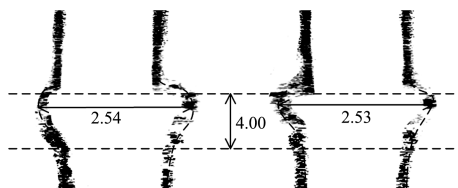


图 11 2#桩成孔孔径超声波检测结果(单位: m)