

旁孔透射波法与反射波法检测基桩的对比分析

张敬一¹, 陈龙珠¹, 宋春霞², 马 晔²

(1. 上海交通大学 船建学院安全与防灾工程研究所, 200240 上海; 2. 交通运输部公路科学研究院, 100088 北京)

摘 要: 为了解决桩基检测中长桩桩底与深部缺陷难以识别的问题,采用旁孔透射波法,建立桩-土系统简化理论模型,对旁孔透射波法提出了桩身缺陷及桩底深度的检测分析方法,并采用三维轴对称有限元模型,对比分析了旁孔透射波法与低应变反射波法检测的技术效果.结果表明,反射波法适用于非长桩的长度和深度不大的桩身缺陷检测,虽然指数放大有助于辨识长桩底端和较深处桩身缺陷的反射信号,但在实际应用中仍会存在一定的不确定性.旁孔透射波法受桩长和长径比的影响显著小于反射波法,在桩身缺陷位置及其程度和桩底深度的检测分析中更具优势.

关键词: 旁孔透射波法; 反射波法; 基桩; 桩身缺陷; 桩端深度

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)08-0099-06

Comparison of parallel seismic and reflected wave tests for piles

ZHANG Jingyi¹, CHEN Longzhu¹, SONG Chunxia², MA Ye²

(1. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Shanghai Jiao Tong University, 200240 Shanghai, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, 100088 Beijing, China)

Abstract: For solving the difficulties in evaluation of the pile tip embedded depth for a long pile and depth of a deep embedded defect, the parallel seismic test is proposed in this paper. A simplified theoretical model of pile-soil system is established to determinate embedded depths of the pile tip and defect. Three-dimensional (3-D) axisymmetric finite element models were established for comparison of the parallel seismic (PS) and the reflected wave (RW) tests for piles. It was found that the RW test was suitable for determination tip embedded depth of a non-long pile and a non-deep embedded defect of a pile. Exponential amplification could be employed to deal with such difficulties, but still there were uncertainties existing in practical application. Compared to RW test, PS test is much less affected by pile length and depth-to-diameter ratio, and has advantages in identifying the embedded depth and degree of a defect as well as the embedded depth of the pile tip.

Key words: parallel seismic test; reflected wave test; pile; defect of pile shaft; depth of pile tip

在我国大量建设工程中,桩基已得到广泛应用,其工程质量和性状是保证工程结构安全的重要因素.桩基属地下隐蔽工程,无法采用简单、直观的方法对其长度及质量进行检测,静载荷试验又因加载、费时和耗资等方面的局限性,而无法进行高比例的抽样检测.因此,在目前的桩基检测技

术中,低应变反射波法以其检测快捷、成本低而得到普遍应用^[1].

然而,反射波法赖以分析的检测信号,会受激励能量、桩侧土辐射能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等诸多因素的影响^[2-4],从桩顶传至桩底再反射回桩顶,传播路径长而发生明显衰减.若基桩长径比过大、桩侧土剪切模量较高,较深部位的缺陷和桩底反射波到达桩顶时其能量便会耗散殆尽,而再由如此微弱的反射波信号来评估桩身缺陷和桩底,其结果的可靠性令人怀疑.其次,对深度不大但较为严重的桩身缺陷,其反射波信号往往较为强烈,以至于难以获得缺陷以下更深

收稿日期: 2012-11-12.

基金项目: 国家自然科学基金(51178267);交通运输部西部交通科技项目(20113182231390).

作者简介: 张敬一(1985—),男,博士研究生;
陈龙珠(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 陈龙珠, lzchen@sjtu.edu.cn.

部的桩身和桩底的反射波信息^[5].

与在建工程桩的顶面自由裸露不同的是,对既有工程结构的桩,其顶面已与承台及上部结构浇筑成一体,难以再采用反射波法进行检测^[6]. 为此,欧美科技人员提出了旁孔透射波法^[7-9]. 该法在检测前先在桩附近钻孔埋管并注满清水,再变换检波器高度以在管内不同深度处接收由敲击地面附近基础或外墙侧面产生的透射波信号,然后由首至 P 波达到时间随深度变化的图形来分析桩身质量和桩底所在的深度. 这种方法所接收首至波不受桩顶以上承台或上部结构产生反射波的影响,其传播路径大约只有反射波法的一半,信号相对较强. 对较严重桩身缺陷以下深度,仍可能接收到经缺陷段透射下行的 P 波,并由此分析较深部桩身质量和桩底的信息.

显然,旁孔透射波法也适用于检测桩顶面裸露自由的在建工程桩(图 1). 虽然这会因钻孔埋管增加检测成本,但若与桩身钢筋长度检测的电磁法联合使用,则会起到反射波法远远不及的工程检测效果,浙江省建筑科学研究院已在一根基桩静载试验异常原因查找中对此做过尝试^[10].

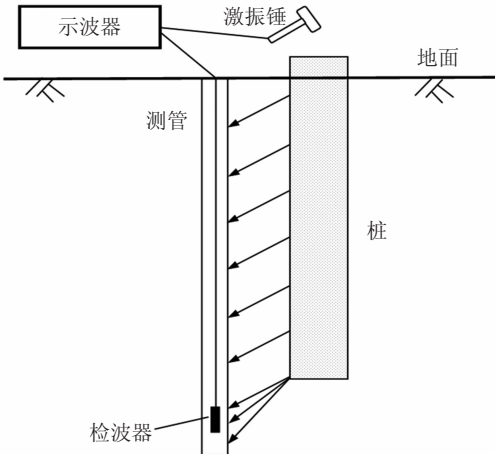


图 1 旁孔透射波法检测示意

为深入了解旁孔透射波法对在建工程桩的测试分析原理,本文将采用轴对称有限元加人工边界模型,模拟分析旁孔透射波信号中首至 P 波时深关系图形特征与桩身缺陷和桩底深度的关系,并与低应变反射波法进行比较分析.

1 模拟分析计算模型

为便于采用轴对称模型,桩取圆形截面,直径为 40 cm,计算参数见表 1. 地基土剪切波速为 140 m/s,由式(1)、(2),桩身一维与土的三维 P 波波速分别为 3 793、1 400 m/s.

$$V_{pp} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{1}$$

$$V_{sp} = \sqrt{\frac{(1-v)E}{(1+v)(1-2v)\rho}}. \tag{2}$$

式中: E 、 v 分别为弹性模量和泊松比, ρ 为质量密度, V_{pp} 、 V_{sp} 分别代表桩和土的 P 波波速.

竖向激振力作用点位于桩顶面中心,采用半正弦的集中荷载^[11]

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \sin \omega t, & 0 \leq t \leq t_c; \\ 0, & t > t_c. \end{cases} \tag{3}$$

式中 $P_0 = 1 \text{ N}$, 激振力持续时间 $t_c = 0.001 \text{ s}$.

表 1 桩-土参数的选取

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	P 波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
桩	2 300	0.2	33.1	3 793
缺陷	2 300	0.2	4.5	1 400
土	1 700	0.495	0.1	1 400

采用 ABAQUS 建立轴对称有限元模型,网格大小、模型尺寸、边界条件经多次试算后确定^[12]: 地基土有限元计算区域取得足够大,且在其侧边和底边分别采用无限元作为吸收边界,以降低从有限元区域边界产生的虚假反射波对旁孔透射波和桩顶低应变反射波信号的影响,见图 2. 桩-土体系采用四节点轴对称实体单元. 由于在基桩低应变动测中激振能量很小,桩身和土均采用线弹性本构模型. 对于一维 P 波波速约为 3 800 m/s 的桩,为保证能准确模拟波的传播问题,最大单元尺寸(m)应小于 $380 t_c / 2.5$ ^[13],由此将桩与土的有限单元尺寸分别取为 0.03 m.

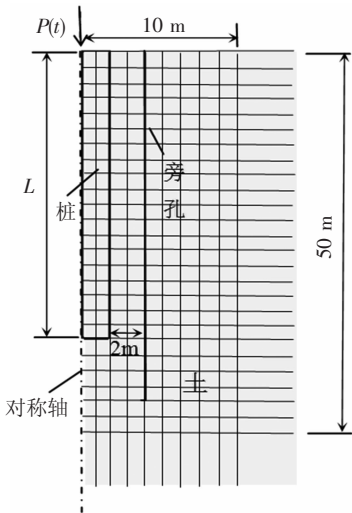


图 2 桩-土系统示意

在桩顶中心激振力作用下,对上述数值模型采用中央差分法计算桩顶面和旁孔处地基土的质点振动速度时程信号. 为了减小桩顶部三维效应的影响,模拟反射波法的测点取于距桩顶中心 0.12 m 处^[14]. 同时在离桩侧 2 m 的竖线上输出

不同深度处的质点振动速度时程信号,用以模拟旁孔透射波法测试.

2 反射波法

2.1 完整桩反射波信号

取桩长分别为 10、20、30 m 的完整桩,长径比相应为 25、50、75. 反射波信号见图 3(a),箭头处为桩底反射的理论位置. 当桩长为 10 m 时,桩底反射清晰,由入射波和反射波的峰点时间差 Δt 和所取波速 V_p 推算桩长 $L = 0.5\Delta t \cdot V_{pp}$ 为 10.2 m,误差仅为 2%. 但当桩长达 20 m 及其以上时,由于能量耗散,已不能识别桩底反射. 对信号进行指数放大见图 3(b),底端反射可见,但准确辨识位置仍有难度.

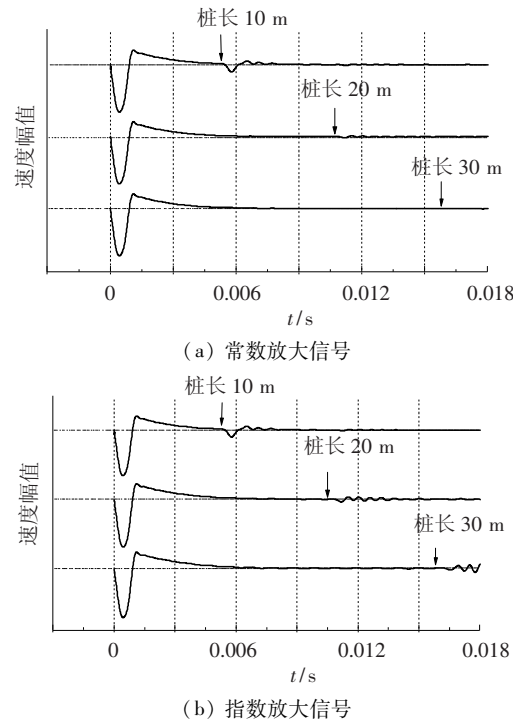


图 3 完整桩反射波信号

2.2 缺陷桩反射波信号

桩长 30 m, 分别在 7、14、21 m 处设置 1.0 m 长的离析段,反射波信号见图 4(a),箭头所示分别为缺陷与桩底反射的理论时间,分析结果见表 2. 离析段位于 7 m 深时,缺陷反射清晰,由缺陷反射时间反算缺陷位置 $H' = 0.5\Delta t \cdot V_{pp}$ 为 7.1 m,误差为 1.4%. 而离析段所在位置越深,缺陷反射越弱,当缺陷深度超过 14 m 时,已难以观察到明显的缺陷反射. 对信号进行指数放大后见图 4(b),桩身缺陷反射信息变得清晰起来,但桩底反射仍难以辨识.

虽然指数放大有助于辨识较深处桩身缺陷和长桩底端反射信号,但在实测信号中由于通常包含一定的背景振动干扰,要准确获得这些微弱反

射信号的历时乃至推算桩身缺陷和桩端所在深度,往往仍然不易,对桩身缺陷的长度更难推算.

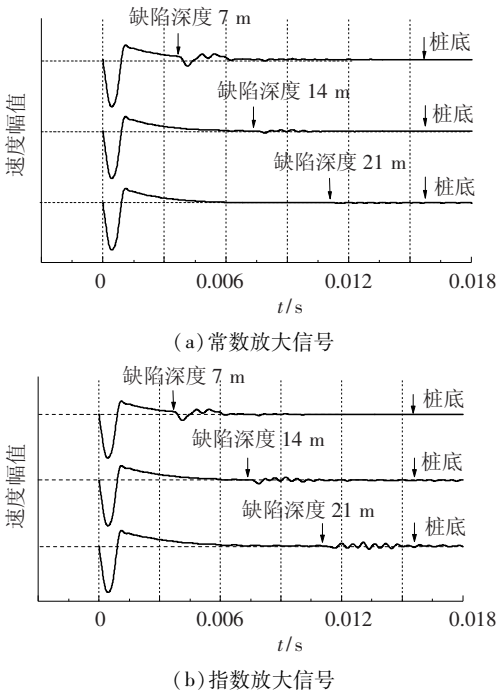


图 4 缺陷桩反射波信号

表 2 反射波法检测缺陷桩分析结果

预设缺陷深度/m	放大类型	计算缺陷深度/m	误差/%
7	常数	7.1	1.4
14	常数	—	—
21	常数	—	—
14	指数	14.2	1.4
21	指数	21.7	3.3

3 旁孔透射波法分析结果

3.1 完整桩的旁孔透射波信号

桩长分别为 20、30 m 的完整桩,桩孔距为 2 m,其时间 - 深度图见图 5,读取各深度首至波走时点并分别用直线进行拟合(虚线),由其斜率推算的桩身和地基土的 P 波速度分别列于表 3.

由图可见,尽管随着桩长的增大,桩端深度及其附近的旁孔透射波信号也逐渐减弱,但其 P 波首至点仍容易辨识.

由桩端上、下两条拟合直线交点对应的深度,采用文献[15]的修正公式,形式如同本文后述式(12),便能计算桩底深度,分析结果见表 3.

在不同的桩长条件下,从表 3 分析可知,采用旁孔透射波法确定桩长误差较小,分析结果不受长径比增加的影响,拟合的桩身一维 P 波波速与桩底土层三维 P 波波速较为准确. 而且,波形与幅值的变化,也可作为判断桩底位置的辅助信息.

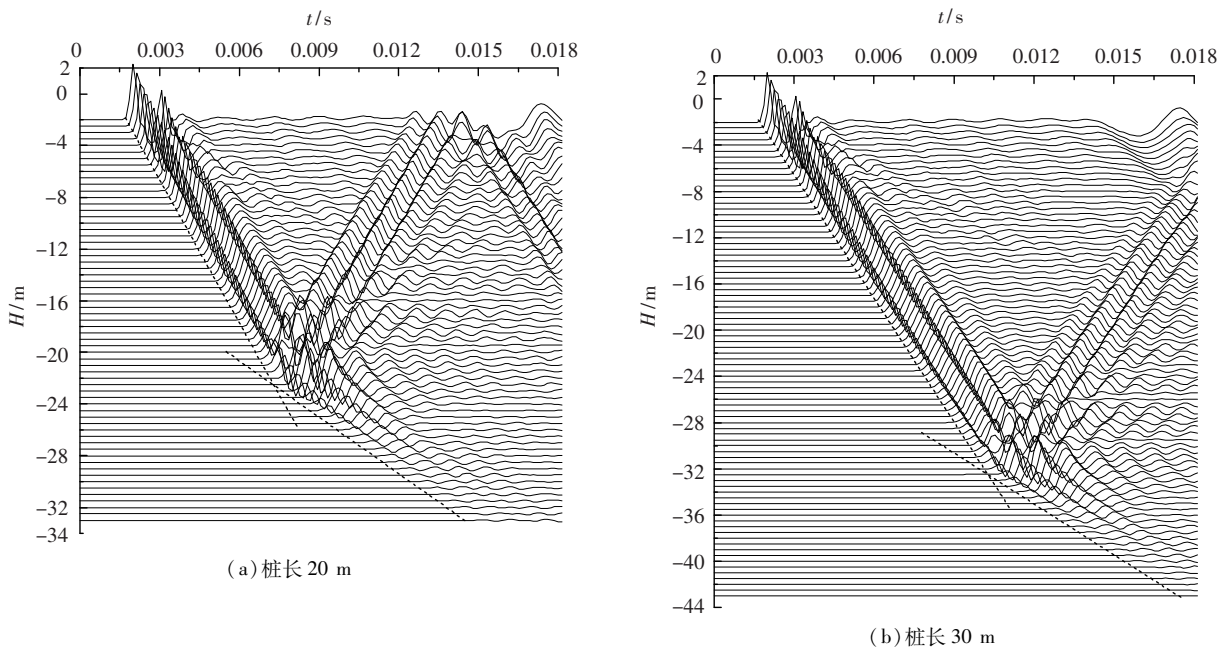


图 5 完整桩的时间 - 深度信号

表 3 旁孔透射波法完整桩分析结果			
桩身波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	桩底土波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	桩长/m	误差 /%
3 678	1 458	19.7	1.5
3 660	1 420	29.6	1.3

3.2 缺陷桩的旁孔透射波信号

图 6 给出了桩长 30 m, 分别在 14、21 m 深处各设置长度 1 m 的离析段条件下的旁孔透射波信

号. 可见, 桩底以上旁孔透射 P 波首至点连线(虚线)已由缺陷上、下完整桩段对应的两条平行直线段及其中间过渡段组成. 由图可见, 虽然缺陷会使部分能量变成反射波返回桩顶, 但下行波通过缺陷段后透射到旁孔的信号仍然可以用来辨识 P 波的首至点, 并可由此绘制时深关系图形, 见图 7.

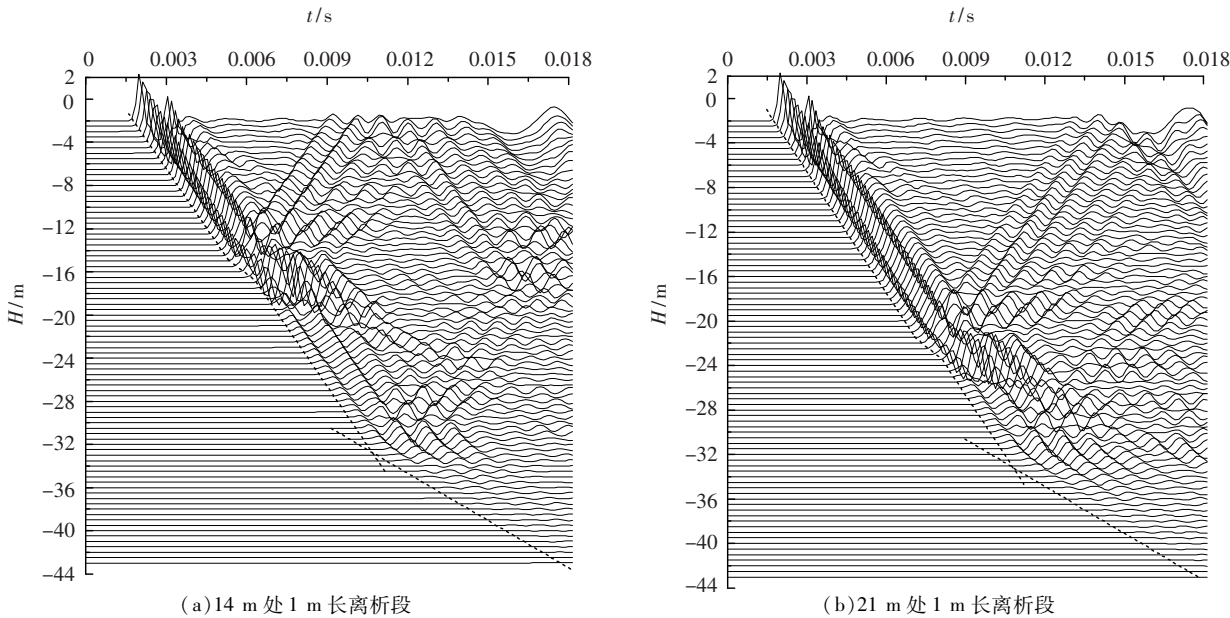


图 6 缺陷桩的时间 - 深度信号

4 缺陷桩的旁孔透射波法检测分析

4.1 桩身缺陷分析公式推导

如图 8 所示, 设桩身有一离析缺陷段, 长度为

ΔL , 所在深度为 $z_0 \sim z_0 + \Delta L$. 由波动理论, 旁孔深度 z 处接收的 P 波是从桩身深度 T 处透射到土中的, 其透射角 θ 按 Snell 定律得

$$\sin \theta = 1/n, \tag{4}$$

式中 $n = V_{pp}/V_{sp}$, V_{sp} 、 V_{pp} 分别为地基土三维 P 波波速和桩身一维 P 波波速. 对本文主要研究的深厚饱和土地基, V_{sp} 一般处于 1 300 ~ 1 700 m/s (其均值与水的 P 波速度接近)^[15], 它和常用完整桩 V_{pp} 的变化范围均较小, 本文暂不考虑 n 的变化以求简化.

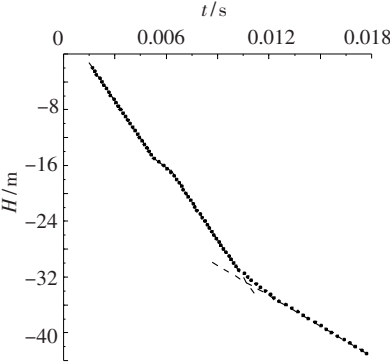


图 7 缺陷桩的旁孔透射波时深关系 (14 m 深处 1 m 长离析)

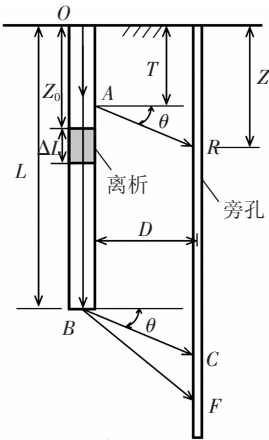


图 8 缺陷桩的旁孔透射波法简化计算模型

当在桩顶激振时, 产生的弹性波沿路径 $O \rightarrow A \rightarrow R$ 传播.

当 $T < z_0$ 时, 其历时为

$$t = \frac{\overline{OA}}{V_{pp}} + \frac{\overline{AR}}{V_{sp}} = \frac{T}{V_{pp}} + \frac{D}{V_{sp}} \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (5)$$

式中: $\overline{OA} = T$, $\overline{AR} = D/\cos \theta$, D 为桩与旁孔距.

由 $z - T = D \tan \theta$, 代入上式得

$$t = \frac{1}{V_{pp}} z + \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{V_{pp}} D. \quad (6)$$

容易验证, 与 $T = z_0$ 相对应, 式(3)直线段下端点的旁孔深度:

$$z_{c1} = z_0 + D \tan \theta = z_0 + \frac{D}{\sqrt{n^2 - 1}}. \quad (7)$$

当 $T > z_0 + \Delta L$ 时, 图 8 中的 A 点移到桩身缺陷以下至桩端附近的深度范围内, 旁孔透射波历时为

$$t = \frac{\overline{OA} - \Delta L}{V_{pp}} + \frac{\Delta L}{V'_{pp}} + \frac{\overline{AR}}{V_{sp}} = \frac{1}{V_{pp}} z + \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{V_{pp}} D + \left(\frac{1}{V'_{pp}} - \frac{1}{V_{pp}} \right) \Delta L. \quad (8)$$

由式(6)、式(8)可见, 当离桩上、下两端并非很近的桩身存在一段缺陷时, 其上、下完整桩身对应的首至旁孔透射波的时深关系可拟合成两段平行的直线, 其斜率均为完整桩身 P 波波速的倒数, 而两者在水平时间轴上的截距之差则为

$$\Delta t = \left(\frac{1}{V'_{pp}} - \frac{1}{V_{pp}} \right) \Delta L = \frac{\alpha - 1}{V_{pp}} \Delta L. \quad (9)$$

式中 $\alpha = V_{pp}/V'_{pp}$. 可见, 缺陷段长度越大, 缺陷程度越严重 (波速降低越多), 则旁孔透射波时深关系图上两直线段的水平距离越大, 而与桩孔距 D 的大小无关.

对图 8 所示旁孔中深于 C 点的任意测点 F, 首至 P 波历时为

$$t = \frac{\overline{OB} - \Delta L}{V_{pp}} + \frac{\Delta L}{V'_{pp}} + \frac{\overline{BF}}{V_{sp}} = \frac{L}{V_{pp}} + \frac{\alpha - 1}{V_{pp}} \Delta L + \frac{\sqrt{D^2 + (Z - L)^2}}{V_{sp}}. \quad (10)$$

当 $Z - L \geq 5D$ 时, 将 $\sqrt{1 + \left(\frac{D}{Z - L} \right)^2}$ 取为 1 的误差不大于 2%. 在此条件下, 式(7)可简化为

$$t = \frac{1}{V_{sp}} z + \left(\frac{1}{V_{pp}} - \frac{1}{V_{sp}} \right) L + \left(\frac{1}{V'_{pp}} - \frac{1}{V_{pp}} \right) \Delta L = \frac{1}{V_{sp}} z + \frac{\alpha - 1}{V_{pp}} \Delta L - \frac{n - 1}{V_{pp}} L. \quad (11)$$

联立求解式(8)和式(11), 则可得到桩身缺陷以下段拟合直线与桩底土段拟合线的交点深度 z_i , 经整理后, 桩长 L 可表示为

$$L = z_i - L_c, \quad L_c = \sqrt{\frac{n + 1}{n - 1}} D. \quad (12)$$

式(12)表明, 利用缺陷以下完整桩段与桩端以下土层对应的两条拟合直线的交点深度来推算桩底深度, 其公式与完整桩的相同^[15].

4.2 桩身缺陷检测模拟分析

为初步检验上述简化理论模型的适用性, 现对本文第 3 节缺陷桩的数值模拟结果进行比较分析. 以图 7 为例, 对应桩长 30 m, 直径 0.4 m, 在深度 14 m 开始设置了长度为 1 m 的离析段, 桩孔距 $D = 2$ m. 由缺陷上、下完整桩段数据拟合并平均得到的桩身 P 波速度为 3 744 m/s (误差 -1.3%), 由桩底以下数据拟合得到的土中 P 波速度为 1 423 m/s (误差 1.6%); 由缺陷以下完整桩段与桩底以下土体对应拟合直线, 求得其交点

对应深度 $z_i = 32.8 \text{ m}$. 将这些数据代入式(12)计算得该桩长度 $L = 29.8 \text{ m}$, 误差为 -0.7% .

图7中缺陷以上对应直线下端点深度 $z_{cl} = 15 \text{ m}$, 由式(7)可计算缺陷段的起始深度为

$$z_0 = z_{cl} - \frac{D}{\sqrt{n^2 - 1}} = 15 - \frac{2}{\sqrt{2.63^2 - 1}} \approx 14.2 \text{ (m)},$$

与模拟计算取值 14 m 颇为相符.

从图7得出缺陷上、下完整桩身相应的两平行线时间之差 $\Delta t = 0.47 \text{ ms}$ 和完整桩段P波速度 $V_{pp} = 3744 \text{ m/s}$, 由式(9)可将缺陷段长度表达为

$$\Delta L = \frac{V_{pp} \Delta t}{\alpha - 1}. \quad (13)$$

其中 α 尚难以从图7中直接求出. 定性来说, 建立缺陷以上直线段下端与缺陷以下直线段上端的深度差随桩身缺陷等参数而变的关系, 并与式(13)联立求解, 或能同时确定出 ΔL 和 α 乃至缺陷段波速 V'_{pp} , 但目前的尝试尚未获得结果.

为初步考察式(13)的可靠性, 由图7数值模拟计算所得桩身、地基土波速计算 $n = 2.63$, 并根据模拟分析时取定的 $\alpha = n$ 代入, 则求出 $\Delta L \approx 1.08 \text{ m}$, 缺陷长度检测分析的相对误差约为 8% .

从这个算例来看, 对较深处局部存在较为严重缺陷的桩来说, 旁孔透射波法对确定桩长、缺陷位置及其程度具有较高的可靠性.

5 结 论

1) 反射波法可以较好地确定短桩或离析缺陷不太深时, 其桩底或缺陷所在深度, 而对于较深处的桩底及缺陷反射往往较微弱, 虽然指数放大有助于辨识较深处桩身缺陷和长桩底端反射信号, 但在实际应用中仍存在一定的不确定性.

2) 对于旁孔透射波法, 通过建立桩-土系统简化模型, 提出了适用于离析缺陷桩的桩底与缺陷深度确定方法以及缺陷程度的评价方法, 并对其可靠性利用数值模拟结果进行了初步检验.

3) 旁孔透射波法受桩长和长径比的影响较反射波法的小, 可以较好地确定完整长桩的桩端深度, 对桩身缺陷位置及其程度和桩端所在深度的检测分析比反射波法更具优势, 值得开展进一步的理论和试验研究, 并逐步加以推广应用.

参考文献

- [1] 陈凡, 徐天平, 陈久照, 等. 基桩质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 2-25.
- [2] CHAI H Y, PHOON K K, ZHANG D J. Effects of the source on wave propagation in pile integrity testing[J].

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(9): 1200-1208.

- [3] LIAO S T, ROESSET J M. Identification of defects in piles through dynamic testing[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(4): 277-291.
- [4] KIM D S, KIM H W. Effects of surrounding soil stiffness and shaft length in the impact-echo test of drilled shaft[J]. Journal of Civil Engineering, KSCE, 2003, 7(11): 755-762.
- [5] HUANG Y H, NI S H, LO K F, *et al.* Assessment of identifiable defect size in a drilled shaft using sonic echo method: numerical simulation [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(6): 757-768.
- [6] GASSMAN S L, FINNO R J. Cutoff frequencies for impulse response tests of existing foundations [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2000, 14(1): 11-21.
- [7] LO K F, HUANG S H, ZHOU X M. Measurement of unknown bridge foundation depth by parallel seismic method[J]. Experimental Techniques, 2009, 33(1): 23-27.
- [8] KENAI S, BAHAR R. Evaluation and repair of Algiers new airport building [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25: 633-641.
- [9] 黄大治, 陈龙珠. 旁孔透射波法检测既有建筑物桩基的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1569-1574.
- [10] 吴宝杰, 杨桦. 联合平行地震法和磁法检测预应力混凝土长管桩的长度[J]. 工程质量, 2009, 27(1): 27-29.
- [11] LIAO S T, TONG J H, CHEN C H, *et al.* Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7/8): 2279-2298.
- [12] ZHANG Jingyi, CHEN Longzhu. Selection of pile testing signals for parallel seismic test [J]. Advanced Materials Research, 2012, 368-373: 2045-2049.
- [13] KIM D S, KIM H W, KIM W C. Parametric study on the impact-echo method using mock-up shafts [J]. NDT&E International, 2002, 35: 595-608.
- [14] CHOW Y K, PHOON K K, CHOW W F. Low strain integrity testing of pile: three-dimensional effect [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(11): 1057-1062.
- [15] 陈龙珠, 赵荣欣. 旁孔透射波法确定桩底深度计算方法评价[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 157-161.

(编辑 赵丽莹)