

桩的旁孔透射波法检测技术进展与应用实例

陈龙珠¹, 杜 烨^{1,2}, 吴宝杰³

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590;
3. 浙江省建筑科学设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 综述了旁孔透射波法检测技术的研究与应用进展, 重点阐述了桩身缺陷的检测分析原理, 认为对于顶部裸露的在建工程桩, 由桩身透射到旁孔的弹性波路径短、干扰小且能反映缺陷以下桩身质量及桩底位置的信息, 比常用的反射波法能够更为全面可靠地评价基桩质量状况, 并以一个工程实例说明了技术的具体应用过程, 结果表明, 其实测信号明晰, 能够反映缺陷以下桩身的质量信息。
关键词: 桩基检测; 旁孔透射波法; 桩长; 桩身缺陷

中图分类号: TV223.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2015)05-0089-06

Progress of parallel seismic testing for piles and a case study//CHEN Longzhu¹, DU Ye^{1,2}, WU Baojie³ (1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Zhejiang Academy of Building Research and Design Co., Ltd, Hangzhou 310012, China)

Abstract: This paper briefly reviews the research and application progress of parallel seismic testing, focusing on the principle of detection of defects in pile shafts. It is considered that for piles under construction with an exposed top shaft, parallel seismic testing can provide a more comprehensive and reliable evaluation of the pile quality as compared with the conventional reflected wave method, because it has a shorter wave propagation path and lower interference, and can provide additional information on the quality of the pile shaft below the defect position and the location of the pile bottom. A case study was performed to show the application process of parallel seismic testing. The results show that measured signals of parallel seismic testing are clear and can reflect information on the quality of the pile part below the defect position.

Key words: pile foundation detection; parallel seismic testing; pile length; defect of pile shaft

桩身工程质量的好坏, 直接关系着桩基承载力及其支撑的建筑安全。目前广泛应用于基桩工程质量检测的低应变反射波法, 在对长径比过大或缺陷严重的基桩进行检测时, 往往由于能量损耗或缺陷段顶面反射强烈而难以接收到其下部桩身和桩底的反射信号, 因而无法有效地检测更深部的桩身缺陷和桩底深度或桩长。

旁孔透射波法(parallel seismic test)是由欧洲科技人员为解决既有建筑工程桩的桩长检测问题而提出^[1]。该方法在与桩相连的基础侧面激振, 在基桩旁注满水的测孔内悬挂检波器接收透射波信号, 根据其 P 波的首至时间与深度关系(简称时深关系)确定桩身及地基土波速和桩长。这一方法不仅可用于既有工程桩的检测, 也适用于在建工程桩的检测^[2-3], 并被尝试用于检测桩身缺陷^[4]。

要成功地应用旁孔透射波法检测桩长和桩身完整性, 一是应有一套合适的测试仪器系统和现场测试工作方法, 二是需将桩长和桩身完整性的分析方法建立在可信的理论基础之上。与此同时, 从工程应用实例中获得实践经验也是一个重要的方面。

旁孔透射波法自提出之后, 由于它比反射波法信号强、干扰少且能反映缺陷以下桩身质量信息^[5], 研究与应用逐渐增多。Kenai 等^[6]采用旁孔透射波法对一机场复工改建工程的 11 根桩进行了检测分析, 除测试桩底深度外, 还通过拟合其 P 波平均速度来判断桩身质量好坏。Sack 等^[7]利用动力触探设备联合开展地基土特性和桩长的旁孔透射波法检测。Lo 等^[8]系统介绍了旁孔透射波检测技术的仪器系统和测试方法, 并对桥柱基础底端埋深进行检测。吴宝杰等^[2,9]采用联合磁法和旁孔透射

波法检测了桩长和钢筋笼的长度。

在理论研究方面, Liao 等^[10]利用 Snell 定律建立了旁孔透射波法的理论基础, 提出由两拟合线交点及相应的校正算式确定桩底深度, 并用有限元模型进行检验。黄大治等^[11-12]通过三维有限元模拟分析了旁孔透射波法检测水泥搅拌桩和顶部带承台的既有工程桩长度的可行性, 提出将上段首至波走时拟合线平移过原点, 其与下段拟合线的交点作为桩底深度。Huang 等^[13]通过模型试验对比分析了桩顶连接承台前后进行的旁孔透射波法测试, 发现桩顶覆盖承台前后均能较好地确定桩底深度。旁孔透射波法测试中钻孔与桩身不平行时测试结果会产生较大误差。Ni 等^[14]则给出了考虑旁孔倾斜角的桩底深度校正算式。陈龙珠等^[3, 15]综述了旁孔透射波法研究与应用的阶段性成果, 并采用简化分析模型, 给出了完整桩的底端深度计算公式和适用条件, 使得检测及分析结果更加可靠。

欧美现有的旁孔透射波法在检测时将检波器悬挂于注满水的旁孔之中, 分析桩底深度或桩长主要利用桩身向下传播的 P 波及其透射传播到旁孔的 P 波(简称 PP 波)的时深关系。若利用下孔法检测地基土波速的三分量检波器, 因其可以通过充气囊或弹簧片弹性固定于孔壁, 不但可以采集 PP 波信号, 而且可以采集到桩身 P 波透射到旁孔的 S 波(简称 PS 波)^[7, 16-17]。Zhang 等^[18-19]通过数值模拟分析了竖向或接近于竖向的斜向激励下旁孔透射波的竖向和水平信号特征, 表明分别在竖向信号上识别 PS 波首至时间、在水平信号上识别 PP 波首至时间相对更加简便。

对 PP 波来说, 若桩基工程所在场地的地下水埋深浅, 土处于饱和状态, 则由于 P 波速度受土孔隙率的影响相对较小^[20], 在旁孔透射波法检测分析时, 可不考虑地基土的层状特性。但对于非饱和地基土, P 波速度受地基层状特性的影响将不可忽视; 对 PS 波来说, 无论地下水位高低, 由于地基土的成层性对 S 波速度的影响较大, 都应该予以修正。降低地基层状特性对旁孔透射波法的影响, 可采取两种方式: ①尽量减小旁孔与被检桩的水平净间距^[2, 8], 使得 PP 波、PS 波在土中的传播时间占比及对地基层状特性的影响得以降低; ②在旁孔中采用下孔法实测地基土 P 波、S 波速度沿深度的变化, 并结合勘探报告划定地基土的分层界面, 然后在桩的旁孔透射波法检测分析时消除它们的影响^[17, 19]。但是第 2 种方式目前尚须研究建立层状地基条件下旁孔透射波法的测试分析方法。

对实际工程来说, 不但桩底深度或桩长需要检

测, 而且还需要了解桩身是否存在缺陷。对此, Liao 等^[10]利用有限元模型模拟分析了缩颈、扩颈段对旁孔透射波法 PP 波时深关系的影响。上海交通大学土木工程系陈龙珠的课题组^[3, 4, 19]利用射线理论建立了桩身具有一段缺陷条件下的 PP 波时深关系计算公式, 由此提出了桩底和缺陷深度、缺陷段长度及其 P 波速度(反映缺陷程度)的确定方法, 并用有限元模型进行了模拟比较分析, 但仍需要接受试验结果的检验。浙江省建筑科学研究院有限公司曾对某实际工程中一根静载抗压试验结果异常的基桩, 采用了旁孔透射波法进行检测。本文首先扼要阐述旁孔透射波法检测桩身缺陷的分析方法, 接着对该试桩的旁孔透射波法检测信号进行分析, 评估其桩身质量和桩底深度, 以此说明旁孔透射波法检测分析桩身质量的过程, 并作为对本文方法的一次检验。

1 缺陷桩的旁孔透射波法检测原理

饱和土地基的成层性对 P 波传播速度的影响不大, 以下将其按均质饱和地基进行分析。如图 1 所示, 对顶面裸露于地表的在建工程基桩, 桩底埋深即桩长为 L ; 假定桩身存在一个低速缺陷段, 缺陷段顶面深度为 z_0 , 缺陷段长度为 ΔL ; 旁孔与被检基桩之间的水平净间距(简称旁孔距)为 D , 有:

$$\sin\theta_1 = \frac{V_{sp}}{V_{pp}} = \frac{1}{n} \quad \sin\theta_2 = \frac{V_{sp}}{V_{dp}} = \frac{\alpha}{n} \quad (1)$$
$$z_p = D \tan\theta_1 = \frac{D}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad z_{dp} = D \tan\theta_2 = \frac{\alpha D}{\sqrt{n^2 - \alpha^2}} \quad (2)$$

式中: θ_1, θ_2 分别为首至 PP 波、PS 波在桩周土中传播路径的水平倾角; n 为桩身 P 波速度 V_{pp} 与地基土 P 波速度的比值, 以下简称桩土波速比; α 为桩身缺陷程度; V_{sp}, V_{pp} 和 V_{dp} 分别为地基土的三维 P 波波速、桩身正常段和低速缺陷段的一维 P 波波速; z_p 和 z_{dp} 分别为桩身正常段和低速缺陷段的透射深度。一般有 $n \geq \alpha > 1$ 。

在不考虑顶部三维效应的情况下, 当旁孔内深度为 z 的测点处于 $z_p < z < z_{du}$ 和 $z_{du} < z < L + z_p$ 范围时, 旁孔内首至波的时深关系为相互平行的两直线段, 其斜率为桩身正常段一维 P 波速度^[4](图 1(c))。对文献[4]的简化理论公式作进一步整理和简化, 则 $z_{du} < z < L + z_p$ 范围内的直线段的上端点深度 z_{du} 可表示为

$$z_{du} = \begin{cases} z_0 + \Delta L + \Delta z_1 + z_p & (\Delta L > \Delta L_{cr}) \\ z_0 + \Delta L + \Delta z_2 + z_p & (\Delta L \leq \Delta L_{cr}) \end{cases} \quad (3)$$

其中

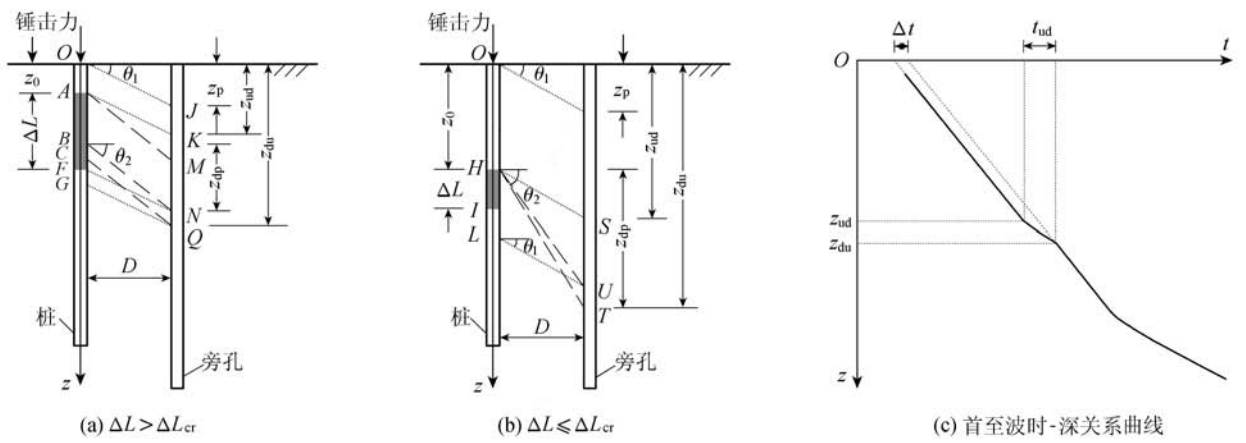


图1 单个低速缺陷段的旁孔透射波法简化分析示意图

$$\Delta L_{cr} = \frac{D}{\alpha - 1} \left(\frac{n^2 - \alpha}{\sqrt{n^2 - \alpha^2}} - \sqrt{n^2 - 1} \right) \quad (4)$$

$$\Delta z_1 = \frac{D}{\alpha - 1} \left(\frac{n^2 - \alpha}{\sqrt{n^2 - 1}} - \sqrt{n^2 - \alpha^2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta z_2 = \frac{-(n^2 - \alpha) \Delta L}{n^2 - 1} +$$

$$\frac{n \sqrt{(\alpha - 1) \Delta L [(\alpha - 1) \Delta L + 2D \sqrt{n^2 - 1}]}{n^2 - 1} \quad (6)$$

由初等几何知, $n^2 - \alpha > \sqrt{n^2 - \alpha^2} \sqrt{n^2 - 1}$, 故 $\Delta z_1 > 0$, 而 Δz_2 应为正实根且需满足条件 $\Delta L + \Delta z_2 < z_{dp} - z_p$ 。在 $z_p < z < z_{ud}$ 范围内的直线下端点深度 z_{ud} 为

$$z_{ud} = z_0 + z_p \quad (7)$$

$z_p < z < z_{ud}$ 范围内直线下端点与 $z_{du} < z < L + z_p$ 范围内直线上端点的深度差 Δz 为:

$$\Delta z = z_{du} - z_{ud} = \begin{cases} \Delta L + \Delta z_1 & (\Delta L > \Delta L_{cr}) \\ \Delta L + \Delta z_2 & (\Delta L \leq \Delta L_{cr}) \end{cases} \quad (8)$$

可见, Δz 大于桩身低速缺陷段的长度 ΔL 。而这 2 个端点对应的的时间差为

$$t_{ud} = \Delta t + \frac{\Delta z}{V_{pp}} \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad \Delta t = \frac{\alpha - 1}{V_{pp}} \Delta L \quad (10)$$

为两平行直线在时间轴上的截距之差(图 1(c))。

将 $z_{du} < z < L + z_p$ 范围内直线与桩底以下地基土对应的拟合直线的交点深度记为 z_i , 则可得如下桩底埋深或桩长 L 的计算公式, 它与桩身无缺陷时的形式相同^[3]:

$$L = z_i - \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} D \quad (11)$$

2 桩身缺陷及桩底深度的确定方法

桩身缺陷主要由缺陷顶面深度 z_0 、缺陷长度 ΔL 和缺陷严重程度 α 三要素来衡量。在检测分析中, 观察所得旁孔内各测点首至波时深关系的变化特

征, 在预估的桩长深度范围内, 若能以一条直线拟合, 而且由其确定的桩身 P 波速度值处于正常范围, 则认为桩身完整; 若需要用两条平行直线及其中间过渡段来拟合, 则意味着可能存在一段桩身缺陷。

当初步判断桩身可能存在缺陷时, 细化拟合两平行直线段, 以合理地确定它们的斜率和桩身正常段的 P 波速度 V_{pp} 、平行直线段在时间轴上的截距之差 Δt 及上一直线段下端点和下一直线段上端点所在深度 z_{ud} 和 z_{du} , 两者之差 Δz 以及所对应的时间差 t_{ud} , 并利用式(9)检验这些数据读取的误差程度。按与完整桩类似的方法^[3,15], 在 $z \geq L + 5D$ 范围拟合桩端以下首至 P 波的时深关系, 由其斜率确定地基土 P 波速度 V_{sp} 及桩土波速比 n , 由式(2)确定桩身完整段的透射深度 z_p , 再由式(7)即可确定桩身缺陷位置 z_0 。由桩端以下地基土拟合直线与缺陷段下方拟合直线的交点深度 z_i , 采用式(11)计算桩长 L 。

为评价桩身缺陷程度, 由式(10)得 $\Delta L = V_{pp} \Delta t / (\alpha - 1)$, 将其代入式(8)的第 1 个式子, 得到关于 α 的一元二次方程为

$$a\alpha^2 + b\alpha + c = 0 \quad (12)$$

$$\text{其中} \quad a = \left(\frac{\Delta z}{D} + \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \right)^2 + 1 \quad (13)$$

$$b = -2 \left(\frac{\Delta z}{D} + \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) \left(\frac{\Delta z}{D} + \frac{V_{pp} \Delta t}{D} + \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) \quad (14)$$

$$c = \left(\frac{\Delta z}{D} + \frac{V_{pp} \Delta t}{D} + \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - 1}} \right)^2 - n^2 \quad (15)$$

求解式(12)并根据 $n \geq \alpha > 1$ 确定桩身的缺陷程度 α , 再将得到的 α 分别代入式(4)、式(5)和式(10)计算 ΔL_{cr} 、 Δz_1 和 ΔL 。由前述推导, 得到的 ΔL 应满足 $\Delta L > \Delta L_{cr}$ 且 $\Delta L < \Delta z$ 的条件。

若通过上述计算得到的 ΔL 不满足上述条件, 则桩身的缺陷程度及缺陷长度应按 $\Delta L \leq \Delta L_{cr}$ 进行评价。将式(4)代入条件 $\Delta L \leq \Delta L_{cr}$, 整理得:

$$(1 + \beta^2)\alpha^2 - 2n^2\alpha - n^2(\beta^2 - n^2) \geq 0 \quad (16)$$

由式(16)所得具有工程意义的解和 α 的定义得

$$n \geq \alpha > \alpha_{cr} = \frac{n^2 + n\beta\sqrt{1 + \beta^2 - n^2}}{1 + \beta^2} \quad (17)$$

其中
$$\beta = \frac{V_{pp}\Delta t}{D} + \sqrt{n^2 - 1} \quad (18)$$

α_{cr} 为式(16)取等号时的 α 值。相应地,桩身缺陷段长度 ΔL 的估值范围为

$$V_{pp} \frac{\Delta t}{n - 1} \leq \Delta L < V_{pp} \frac{\Delta t}{\alpha_{cr} - 1} \quad (19)$$

对顶部与基础或上部结构相连的既有工程桩,经公式推导表明,桩长及桩身缺陷参数与波由基础侧面激振点至桩顶面的传播时间 t_0 无关。因此,上述公式对既有工程桩同样适用。

3 工程检测实例分析

位于浙江省沿海城市温岭深厚软土地区的某装饰材料有限公司,其3~5号厂房为两层框架结构。地基土部分物理力学指标如表1所示,其基础采用直径500mm、壁厚65mm的高强预应力混凝土薄壁管桩,桩身混凝土强度设计等级为C60,设计桩长33m(分3节,每节长11m)。在进行单桩竖向抗压静载试验时,发现1根试桩的承载力偏低且与设计要求相差较大。在检测该桩的长度是否达到设计要求的过过程中,因存在桩身接头反射干扰,以及整桩的长径比过大($L/d=66$),桩底反射难以辨识,因而低应变反射波法检测难以给出可信的结论。于是,在桩侧邻近地基土中钻孔埋管(旁孔距约为10cm,可测深度37m),尝试采用了欧美国家用于检测既有工程桩长的旁孔透射波法和磁法联合试验来解决问题^[2]。

表1 地基土力学参数统计

层序	土层名称	层厚/m	压缩模量 E_s /MPa	地基承载力特征值/ kPa	桩基参数 q_s /kPa q_p /kPa
1	素填土	0.50~1.10			
2	淤泥	15.60~22.30	1.93	50	5
3	粉质黏土	5.50~11.10	4.47	110	13
4	粉质黏土	4.50~13.00	4.63	150	24 700
5	粉质黏土	控厚17.40	3.59	95	17 500

旁孔透射波法的检测信号如图2所示,该图曾在文献[2]中出现过,但在制图排版过程中出现失误而使部分竖轴的深度标注偏移了位置,现予以纠正,同时对初至波之前的噪音也作了适当的过滤。

由图2可知,在整个设计桩长范围内,旁孔透射波信号上的首至P波均清晰可辨,且在深度大约超过11m后,波形特征发生了较为明显的变化。但在当时采用这种检测技术时,尚无缺陷桩的旁孔透射波信号特征和桩身缺陷的分析方法,只能将桩底以

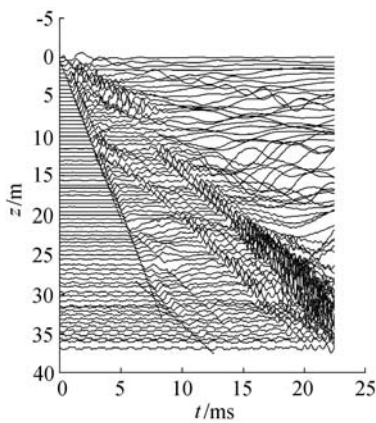


图2 基桩旁孔透射波法实测信号

上首至P波的时深关系拟合成一条直线,意味着认为桩身是完整无缺陷的。但是,由该拟合直线关于横坐标(时间)的斜率确定的桩身P波速度仅约为3650m/s。这对C60的先张法预应力钢筋混凝土管桩来说,这个波速值显然偏低了。因此,不能认为该基桩桩身质量完好。

工程场地地下水位埋深浅,可近似按均质饱和地基来分析被检基桩的旁孔透射波特性和。根据图2信号的特征,在钻孔测试深度范围内,可将首至P波时深关系分成4个区段,其中与桩身有关的3个区段是上、下各1条直线及其之间的过渡段,最下方是桩底以下土层对应的直线段。与桩身对应的首至波时深关系上的两条直线基本平行,由其斜率分别得到桩身P波速度为3945m/s和3750m/s,均值为3848m/s,与用锤击法测试C60混凝土P波速度的常见范围基本相符;对与桩底以下相关的直线,由其斜率确定饱和地基土的P波速度为1346m/s,与饱和软黏土P波速度的常见范围相符^[20]。

取正常桩身P波速度 $V_{pp}=3848$ m/s,它与地基土P波速度之比 $n=2.86$ 。旁孔距 $D=0.1$ m,则桩身完整段的P波透射深度 $z_p=0.04$ m。在桩长范围内,旁孔首至P波时深关系由两条平行线及其之间的过渡段构成,表明该试桩桩身存在缺陷。在图2中,这两条平行线在时间轴上的截距差 $\Delta t=4.525\times 10^{-4}$ s;上一条直线段下端点深度 $z_{ud}=16.5$ m,由式(7)得缺陷顶面深度 z_0 约为16.5m;下一条直线段上端点的深度 $z_{ud}=22.5$ m,则 $\Delta z=6.0$ m。将 V_{pp} 、 D 、 Δt 、 Δz 、 n 代入式(13)~(15),并求解式(12)得到2个解:① $\alpha_1=1.374$,相应有 $\Delta L=4.73$ m, $\Delta L_{cr}=0.009$ m, $z_{dp}=0.055$ m, $\Delta z_1=0.008$ m;② $\alpha_2=1.291$,则 $\Delta L=5.99$ m, $\Delta L_{cr}=0.007$ m, $z_{dp}=0.051$ m, $\Delta z_1=0.007$ m。

上述两种情况均满足 $\Delta L>\Delta L_{cr}$ 和 $\Delta L<\Delta z$ 的条件,但只有②能够同时满足式(8)和式(10),所以它

是有意义的解。由 $\alpha=1.291$ 和 $V_{pp}=3848\text{ m/s}$ 得缺陷段桩身 P 波速度约为 2981 m/s , 严重低于 C60 混凝土波速的正常范围。可以推测, 该段桩身在打桩施工和竖向抗压静载试验过程中已遭受损坏, 从而导致桩顶在明显低于设计要求的极限承载力对应的荷载下发生急剧的沉降。

由图 2 可知, 与缺陷以下完整桩身相关的下一条直线与桩底以下土相关的直线之交点深度为 31.5 m 。可采用式(11)计算出桩底埋深为 31.4 m , 比 3 节预制桩长度 33 m 小约 4.8% 。试桩顶面离场地表面的高差、桩身缺陷段在竖向抗压静载试验过程中破损压缩, 均会使桩底埋深小于 3 节预制桩的长度。

桩顶沉降为桩身压缩量与桩底沉降之和。在静载试验加载过程中, 若桩底沉降正常, 但桩身缺陷段受压破坏而产生较大的压缩量, 则桩顶便会出现骤增的沉降。在这个工程实例中, 工程桩的抗压特性应属于端承摩擦型的, 桩底埋深即使略有不足, 也不会严重降低基桩的极限承载力。

综合上述旁孔透射波法检测分析结果, 笔者认为, 该试桩在竖向抗压静载试验中出现异常的主要原因, 很可能是因为桩身中部存在缺陷段或被打桩挤土效应产生了竖向弯曲, 在加载到一定数值后发生桩身破坏所致。

4 结 语

由欧美提出的用于检测既有建筑工程桩基长度的旁孔透射波法, 经过 20 年来的不断研究, 其测试系统、分析理论和应用范围都得到了良好的发展, 这其中我国科技人员在提高桩底深度或桩长测试精度、桩身缺陷分析方法以及 PS 波利用等方面作出了贡献。

采用旁孔透射波法对浙江沿海深厚软土地区某工程竖向抗压静载试桩进行检测与分析, 结果表明该桩在静载试验过程中出现异常的主要原因, 很可能是桩身受力破坏, 而不是桩长不足而未进入持力层所致。

旁孔透射波法由于实测信号是经桩身传播透射到紧邻旁孔的直达波, 对既有服役建筑下的桩, 其首至时间不受与桩顶相连的基础和上部结构反射下行波的影响; 对顶面裸露的在建工程桩, 其传播路径远比反射波法的短且能量损耗小。因此, 实测信号相对更为清晰, 能够反映缺陷以下桩身的质量信息, 是一种在桩基检测中值得推广应用的新技术。

致谢: 第二作者参与本文研究工作, 并由此得到了山东省高等学校青年骨干教师国内访问学者项目资助。

参考文献:

- [1] DAVIS A G. Nondestructive evaluation of existing deep foundations [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(1): 57-74.
- [2] 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. (WU Baojie, YANG Hua. Using parallel seismic and magnetic to detect length of prestressed concrete long tube pile [J]. Quality Test, 2009, 27(1): 27-29. (in Chinese))
- [3] 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. (CHEN Longzhu, ZHAO Rongxin. On determination of pile length with parallel seismic testing for exiting structures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 157-161. (in Chinese))
- [4] 杜烨, 陈龙珠, 张敬一, 等. 缺陷桩的旁孔透射波法检测分析原理 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(10): 1562-1568. (DU Ye, CHEN Longzhu, ZHANG Jingyi, et al. Analysis on defects of pile shaft for parallel seismic test [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(10): 1562-1568. (in Chinese))
- [5] 张敬一, 陈龙珠, 宋春霞, 等. 旁孔透射波法与反射波法检测基桩的对比分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 99-104. (ZHANG Jingyi, CHEN Longzhu, SONG Chunxia, et al. Comparison of parallel seismic and reflected wave tests for piles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(8): 99-104. (in Chinese))
- [6] KENAI S, BAHAR R. Evaluation and repair of Algiers new airport building [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6): 633-641.
- [7] SACK D A, SLAUGHTER S H, OLSON L D. Combined measurement of unknown foundation depths and soil properties with nondestructive evaluation methods [J]. Transportation Research Record, 2004, 1868: 76-80.
- [8] LO K F, NI S H, HUANG Y H, et al. Measurement of unknown bridge foundation depth by parallel seismic method [J]. Experimental Techniques, 2009, 33(1): 23-27.
- [9] 吴宝杰, 姬美秀, 杨桦, 等. 灌注桩钢筋笼长度及长桩桩长无损检测技术研究 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(3): 371-374. (WU Baojie, JI Meixiu, YANG Hua, et al. Research on nondestructive detection technology of reinforcement cage length and long pile length in cast-in-situ pile [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(3): 371-374. (in Chinese))
- [10] 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.

- [11] HUANG D Z, CHEN L Z. Studies on parallel seismic testing for integrity of cemented soil columns[J]. Journal of Zhejiang University Science; Ser A, 2007, 8(11): 1746-1753.
- [12] 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. (HUANG Dazhi, CHEN Longzhu. 3D finite element analysis of parallel seismic tests for integrity of piles of existing structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1569-1574. (in Chinese))
- [13] HUANG Y H, NI S H. Experimental study for the evaluation of stress wave approaches on a group pile foundation[J]. NDT&E International, 2012, 47: 134-143.
- [14] NI S H, HUANG Y H, ZHOU X M, et al. Inclination correction of the parallel seismic test for pile length detection[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 127-132.
- [15] ZHANG J Y, CHEN L Z. Discussion of a study on the application of the parallel seismic method in pile testing [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 67: 370-371.
- [16] YU X, FANG J, LIN G. Seismic CPTU to assist the design on existing foundations [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2010, 201: 169-177.
- [17] NIEDERLEITHINGER E. Improvement and extension of the parallel seismic method for foundation depth measurement[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(6): 1093-1101.
- [18] ZHANG J Y, CHEN L Z. Selection of pile testing signals for parallel seismic test [J]. Advanced Materials Research, 2012, 368-373: 2045-2049.
- [19] 张敬一. 既有工程桩动测技术及分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [20] 陈龙珠, 吴世明. 勘测完全饱和土层初见深度的弹性波速法[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 82-88. (CHEN Longzhu, WU Shiming. Determination of full saturation depth of strata with elastic wave velocities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 82-88. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-06-09 编辑: 郑孝宇)

(上接第 82 页)

- [41] GOUDA V K, HALAKA W Y. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: embedded in concrete[J]. British Corrosion Journal, 1970, 5(5): 204-208.
- [42] MANERA M, VENNESLAND O, BERTOLINI L. Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 554-560.
- [43] TANG L, UTGENANNT P. A field study of critical chloride content in reinforced concrete with blended binder[J]. Materials and Corrosion, 2009, 60(8): 617-622.
- [44] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Weilun, et al. Chloride threshold value for reinforcement corrosion in concrete with additions of silica fume or fly ash[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(12): 905-913.
- [45] ANN K Y, JUNG H S, KIM H S, et al. Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 530-535.
- [46] REOU J S, ANN K Y. Electrochemical assessment on the corrosion risk of steel embedment in OPC concrete depending on the corrosion detection techniques [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113(1): 78-84.
- [47] ORMELLESE M, BOLZONI F, LAZZARI L, et al. Effect of corrosion inhibitors on the initiation of chloride-induced corrosion on reinforced concrete structures[J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(2): 98-106.
- [48] MAMMOLITI L, HANSSON C M, HOPE B B. Corrosion inhibitors in concrete: part II effect on chloride threshold values for corrosion of steel in synthetic pore solutions [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10): 1583-1589.
- [49] 徐金霞. 混凝土中钢筋腐蚀的临界氯离子浓度研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [50] 王麒. 钢筋腐蚀的临界氯离子浓度及提升措施研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [51] 吴珊珊. 阻锈剂和矿物掺合料对钢筋氯盐腐蚀的影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [52] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Weilun, et al. Effectiveness of inhibitors in upgrading chloride threshold value for steel corrosion [J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3): 354-363.
- [53] MAMMOLITI L T, BROWN L C, HANSSON C M, et al. The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solutions [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 545-550.
- [54] MOHAMMED T U, HAMADA H. Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions [J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(4): 233-242.
- [55] MANERA M, VENNELAND O, BERTOLINI L. Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 554-560.
- [56] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[J]. 公路, 2001(2): 66-69. (HONG Naifeng. Corrosion of steel in concrete and structure durability [J]. Highway, 2001, (2): 66-69. (in Chinese))
- [57] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

(收稿日期: 2014-06-09 编辑: 方宇彤)