均匀黏弹性地基中现浇 X 形桩低应变 动测响应数值模拟₀

范玉明^{1,2},丁选明^{1,2},朱振生^{1,2},付强^{1,2}

(1.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;2.河海大学 岩土工程科学研究所,江苏南京 210098)

摘要:建立现浇 X 形桩(XCC 桩)桩-土体系三维有限元模型,对 XCC 桩低应变检测动力响应进行数 值模拟,得到完整桩和缺陷桩的桩顶速度响应结果,并分析完整桩及缺陷 XCC 桩桩顶速度响应特 性及规律。计算结果表明:XCC 桩低应变瞬态动测时桩顶速度响应存在明显的三维效应,桩心(激 振点)附近点的入射波峰值较大,且到达时间较早;距离桩心越远点的入射波峰到达时间越滞后,入 射波峰值从桩心到尖角边界先减小后增大。桩顶距桩心距离相同的环向上各点的入射波和反射波 区别不大,而各点所受的高频干扰情况并不相同。变模量桩的入射波和完整桩相同,反射波峰值较 完整桩小,反射波峰对应时间较完整桩滞后。局部缺陷桩桩顶距桩心距离相同环向各点的第一个 缺陷反射波有微小差别,而第二个缺陷反射波有较大差别。

关键词:现浇 X 形桩;桩身缺陷;低应变检测;有限元法;三维效应 中图分类号:TU473.1 **文献标志码:A 文章编号:**1000-0844(2015)02-0612-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0612

Numerical Simulation of Low Strain Dynamic Test Response for X-section Cast-in-place Concrete Pile on Homogeneous Viscoelastic Foundation

FAN Yu-ming^{1,2}, DING Xuan-ming^{1,2}, ZHU Zhen-sheng^{1,2}, FU Qiang^{1,2}

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Eebankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2.Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: A three dimensional finite model of an X-section cast-in-place concrete pile-soil system is established to simulate wave propagation in a low strain integrity X-section cast-in-place concrete pile (XCC pile). Velocity responses in the time domain at the top of the intact and defective piles are obtained. The velocity response characteristics of the intact pile are analyzed in addition to the velocity response curves of the defective piles. The results reveal that the velocity response at the top of the XCC pile during low strain integrity testing shows serious 3D effects, resulting in the peak value of the incident wave close to the pile center being largest, and the arrival time of the pile center, the more hysteretic is the peak of the arriving incident wave. The peak value of the incident waves first increases and then reduces from the pile center to the pile boundary. The incident and reflected waves at different points along the ring direction at the top of the intact pile are

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金高铁联合项目(No. U1134207);新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-12-0843);国家自然科学基金 项目(51378177)

作者简介:范玉明(1989-),男,硕士研究生,主要从事软基加固与基础工程方面研究工作.E-mail:geofym@163.com

very similar, but the disturbing waves of different points are not the same. The arrival time of the incident waves in the pile with variable modulus are the same as those in the intact pile, but the arrival time of the peak of the reflection wave at the bottom of the pile with variable modulus is later than that in the intact pile, and the peak value is smaller. The first defective reflected waves at different points along ring direction at the top of the defective XCC pile shows little differences, but the second one shows larger differences.

Key words: X-section cast-in-place concrete pile; pile defects; low strain detection; finite element method; three-dimensional effect

0 引言

现浇 X 形桩(XCC 桩)是河海大学岩土工程研 究所研制的一种新形异形截面桩^[1-5],其采用字母 X 形的钢模代替传统的沉管灌注桩圆形钢模,从而形 成一种 X 形的现浇桩。XCC 桩具有较大的单位体 积材料表面积,可达到节省材料、提高单方混凝土承 载力的目的。目前该技术已经在江苏高速公路和市 政工程软基处理中推广应用。

低应变反射波法是目前应用最广泛的基桩完整 性检测方法之一,其依据为一维弹性杆纵波理论。 桩-土系统振动理论对低应变动测信号的分析有重 要的指导作用,国内外学者对与此相关的问题进行 了一系列研究,取得了丰硕的成果^[6-15]。Chow 等^[6] 通过有限元法研究了基桩低应变检测时的三维效 应;陈凡等^[7]研究了尺寸效应对基桩低应变完整性 检测的影响;赵振东等^[8]利用三维有限元法对几种 典型缺陷桩的计算结果进行了探讨。

前人对基桩低应变瞬态动测理论的研究主要集 中在轴对称实心桩、空心管桩上。XCC 桩是异形截 面桩,由于其截面的异形性,桩身对于桩心所受的激 振力不是轴对称的,所以 XCC 桩在低应变检测中的 瞬态动力响应是一个异于实心圆截面桩和空心管桩 的三维问题。本文采用三维有限元法对 XCC 桩的 低应变瞬态动测进行模拟,对完整和缺陷 XCC 桩的 桩顶速度响应结果进行分析,以期得到一些对 XCC 桩的低应变检测具有一定参考价值的重要结论。

1 检测方法、分析原理

低应变反射波法是将桩看作一维的线弹性杆, 在桩顶施加一沿桩轴线的激振,在桩身中产生弹性 波,弹性波沿桩身向下传播。如果桩身中存在明显 波阻抗有差异的截面(如桩底、断桩、严重离析、缩 颈、扩颈等),向下传播的弹性波将会被反射回桩顶。 在桩顶通过传感器可接收到这些反射波的信号,对 反射波信号进行分析可判别桩的完整性,确定缺陷 位置或桩长,从而对桩的质量作出综合评价。

对所测桩顶动力响应信号的分析可在时域内进行,也可在频域内进行。在时域中,通过分析桩顶的 速度响应波形,按照式(1)可计算桩长或者桩阻抗改 变界面的位置:

$$L = V_{\rm P} \bullet t/2 \tag{1}$$

$$V_{\rm P} = \sqrt{E/P} \tag{2}$$

式中:L 为桩长或阻抗改变界面距桩顶的距离;V_P 是桩身中纵波传播的速度;t 是桩顶入射波与反射 波的时间差;E 为桩身材料的弹性模量;p 为桩身材 料的密度。

除了对速度响应曲线进行分析,还可以对速度 响应曲线进行傅里叶变换(FFT)得到频域响应曲 线。在频域中完整桩的速度频域响应曲线波峰间隔 相等。根据一维应力波理论,可以计算桩长或桩阻 抗改变界面的深度:

$$L = V_{\rm P} / (2\Delta f) \tag{3}$$

式中: Δf 为相邻谐振峰所对应的频率差。

2 数值模拟

图 1 给出 XCC 桩的横截面示意图,其截面尺寸 由外包圆直径 a、开弧间距 b 和弧度 θ 控制。本文 计算模型的 a、b、 θ 的取值分别为 1 m、0.24 m、90°, 截面参数在本文研究中保持不变。图中 a 方向定义 为尖角方向, β 方向为凹弧方向。

利用有限元软件 ABAQUS 对 XCC 桩低应变 动测响应进行模拟。由于低应变检测时激振能量很 小,所以桩身及桩周土均模拟为线弹性材料,另外在 低应变范围内,桩体与土体之间不会发生显著的相对 滑动,所以假设两者之间的变形是连续的。桩体材料 参数为:桩身密度 ρ_c 取 2 400 kg/m³,弹性模量 E_c 为 30 GPa,泊松比 v_c 为 0.2,计算得 V_P =3 535.5 m/s。 桩周土假设为均质,其密度 ρ_s 取 1 800 kg/m³,泊松 比 v_s 为0.4,剪切波速 $V_s=50$ m/s,阻尼比 ζ 为5%。



图 1 XCC 桩横截面示意图 Fig.1 Cross section of the XCC section pile

为避免应力波从土体人工边界反射回桩体对 桩顶速度响应结果产生影响,土体区域设置得足够 大:桩周土边界距 X 形桩心 5 m,桩底土层厚 5 m, 确保在分析时域内应力波尚未传播到土体边界。桩 身和桩周土均采用八结点等参单元,单元形状均匀, 有限单元长度小于激振力最大频率对应波长的1/10 ~1/8^[14-15]。网格划分情况见图 2。通过计算,增加 土体区域大小和减小单元长度对计算结果已不产生 影响。



图 2 桩-土体系单元划分示意图 Fig.2 Mesh of the pile-soil system

本文分析中,锤击冲击荷载 p(t)采用作用于 桩心的半正弦集中荷载模拟:

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \sin(\pi t/T_d) & 0 \leq t \leq T_d \\ 0 & t > T_d \end{cases}$$

式中:*p*。为锤击峰值荷载大小,取1000 N;*T*_d 为锤击作用持续时间,取1 ms。激振力的半正弦函数波形如图3 所示。

2 完整桩速度响应

完整桩桩长取 10 m,本文从尖角方向和距桩心 距离相同的环向分别对桩顶速度响应进行研究,测 点布置情况见图 4。

图 5 给出了完整桩的桩顶沿尖角方向不同测点 的速度响应曲线,从图中可以看出,速度响应曲线波





形规则,入射波和桩底反射波清晰可见。各点的桩 底反射波波形基本一致,反射波波峰对应时间 t_r 约 为 6.2 ms,由 $\Delta t = t_r - T_d/2$ 算得应力波在桩体传播 一个来回的时间为 5.7 ms。通过 $L = V_P \times \Delta t/2$ 计 算桩长为 10.076 m,与实际桩长 10 m 基本相符。 完整桩的计算结果验证了模型的正确性。

从图 5 中还可以看出 XCC 桩桩顶沿尖角方向 速度响应存在明显的三维效应,沿尖角方向距桩心 (激振点)不同距离测点的速度响应存在明显差别: 激振点附近点(A点)的入射波峰值最大,入射波峰 到达时间最早;距离桩心越远的点入射波峰到达时 间越滞后,尖角边界处(E点)的入射波峰到达时间 最迟;而入射波峰大小呈现出不一样的规律,从桩心 附近(A 点)到尖角边界(E 点)波峰值先减小后增 大;尖角边界处(E点)的应力波传播距离最远,但峰 值并不是最小的,这是因为由激振力产生的应力波 中包含 R 波、P 波和 S 波且各波的波速不一样,位 于桩顶面外围接近桩边的各点,其速度峰值会不同 程度地受到由桩边反射回来的应力波影响。沿尖角 方向各测点的桩底反射波的差别没有入射波那么明 显,说明随着应力波沿桩身向桩底传播,尖角方向各 点的振动响应差别逐渐减小。桩顶各点的入射波和 反射波之间存在高频振荡波,桩顶各点的高频波幅 值并不相同,即各点受到的高频干扰程度不同,桩心 附近和尖角边界附近点受到的高频干扰较大,距桩 心 0.4R 区域干扰较小。从图中结果还可以看出, 激振点附近的点(A、B点)的入射波在第一个波峰 之后有一个反相波。若根据一维波动理论解释,认 为桩顶浅部存在变阻抗段,在工程实践中容易对桩 的完整性做出错误判断。

图 6 给出了几组距桩心相同距离的环向不同测 点的速度响应对比。从图中可以看出环向不同点的 入射波和反射波波形基本一致,距桩约 0.5*R* 区域 (O₂、O₃)环向各点的高频波的差别较大,桩心附近 (O₁)和尖角边界处(O₄、O₅)环向各点高频波差别 很小。XCC 桩由于其截面的异形性,必然导致桩顶 浅部的高频反射情况复杂,异于实心圆桩。

以上桩顶的速度响应的三维效应可以用球面波 的理论予以解释:桩心受到激振之后,一部分应力波 在到达桩周边界之前以半球面波的形式传播,在振 源附近,距桩心距离越近,球面半径越小,三维效应 越明显。随着传播距离增加,应力波在远离振源过 程中与桩周界面反射波耦合后以近似平面的形式传 播,经过桩底反射到达桩顶,桩顶各点的应力波峰值 几乎相同;另一部分应力波沿桩顶面以体波的形式 传播,高频干扰波就是由这些在桩顶来回反射的应



图 6 桩顶环向不同点的速度响应



力波耦合而成。

桩周土体的存在,使得桩体的应力波能量通过 桩土界面向土体消散。为研究桩周土性质对速度响 应结果的影响,本文给出了自由 XCC 桩和不同波速 桩周土中 XCC 桩桩顶一点的速度响应对比,桩周土 的剪切波速分别取 V_s=50 m/s 和 V_s=100 m/s。 图 7 给出了不同桩周土波速对桩顶速度响应的影 响,测点均布置在桩顶沿尖角方向距桩心 0.4*R* 处, 从图中可以看出三种情况下桩顶入射波波形基本一 致,桩底反射波峰对应的时间也基本相同。而受桩 周土的影响,高频干扰波和桩底反射波受到了削弱, 且桩周土越硬削弱越严重。







3 缺陷桩速度响应

3.1 全截面缺陷桩

本节对几类缺陷桩的桩顶速度响应结果进行分析,测点布置在尖角方向距桩心0.4R处。

图 8 给出了一变模量缺陷桩与完整桩的速度时 域响应曲线对比,变模量段为距桩顶 4 ~6 m 段,变 模量段桩体模量取 *E*_d=10 GPa。从图中可以看出, 缺陷桩的速度响应曲线中的缺陷反射波和桩底反射 波清晰可见。图中 O 为入射波,P 为 4 m 深度变模 量界面反射波,Q 为 6 m 深度变模量界面的反射 波,R 波为桩底反射波。从图中还可以看出变模量 桩的桩底反射波(R 波)到达时间较完整桩晚,波峰 值较完整桩小。桩体变模量段模量减低导致此段的 应力波波速减小,桩底反射时间变长。缺陷段桩身 模量减小和一部分能量通过桩侧和桩底桩-土界面 消散到土体中去,使得桩底反射波减弱。

图 9 同时给出了完整桩和变模量桩的速度频域 响应曲线。从图 9(a)中可以看出完整桩的速度频



图 8 变模量桩和完整桩的速度时域响应对比

Fig.8 Comparision of velocity responses in the time domain between pile with variable modulus and intact pile

峰间隔相等约为 $\Delta f = 175.78$ Hz,通过式(3)确定计 算桩长 10.05 m;图 9(b)缺陷桩的速度频峰间隔复 杂,可以轻易地识别此桩是缺陷桩,曲线中前两频峰 对应桩底反射频峰,而 458.98 Hz 和 898.44 Hz 频 峰对应第一个缺陷界面,间隔约为 $\Delta f = 449.2$ Hz。 通过式(3)计算得第一个缺陷界面距桩顶 3.94 m。 从计算结果看,反演计算的桩长和缺陷位置与实际 桩长和缺陷位置相当接近。

3.2 局部缺陷桩

图 10 给出了局部缺陷桩的桩顶速度响应。缺 陷部分模量 E_d 取值为 20 MPa,旨在模拟工程施工 中出现的成桩效果较差的局部颈缩桩。颈缩段距桩 顶 4~6 m,缺陷及测点布置情况见图 11。从图 10 中可以看出各测点的缺陷反射波和桩底反射波清晰 可见,由于缺陷程度较小,局部缺陷的存在并没有对 桩底反射信号产生太大影响。各测点的第一个缺陷 反射波有微小差别,而第二个缺陷反射波的差别较 大。各测点的位置相对于激振力是对称的,受到的 高频干扰情况一致,所以这一现象是由于局部缺陷



图 9 变模量桩和完整桩的速度频域响应对比

Fig.9 Comparision of velocity responses in the frequency domain between pile with variable modulus and intact pile





Fig.10 Velocity responses in the time domain at different points along the ring direction at the top of defective pile

造成的。在实际测桩时有必要沿环向布置多处测 点,若各测点的波形趋势相差较大则桩体可能存在 局部缺陷。桩身局部缺陷会引起桩体振动模态的改 变及复杂的应力波反射,使得桩顶对称位置测点速



图 11 测点位置和缺陷位置示意图

Fig.11 Position of measurement points and the defect

度波响应存在差别。关于局部缺陷速度波特征及形成机理等内容有待进一步深入研究,限于篇幅,本文 不再详述。

4 结论

建立 XCC 桩桩-土体系低应变动测的三维有限 元模型,分析完整 XCC 桩桩顶速度响应特性及缺陷 桩的速度响应曲线的规律,得到以下结论:

(1) XCC 桩桩顶速度响应有明显的三维效应: 沿尖角方向距桩心不同距离测点的速度响应存在明显差别,激振点附近的入射波峰值最大,到达时间最早;距离桩心越远测点的入射波峰到达时间越滞后, 尖角边界处的入射波峰到达时间最迟;入射波峰大小从桩心到尖角边界先减小后增大;在接近桩心区域入射波峰值较大,且入射波在第一个波峰之后出现反相波峰。

(2) XCC 桩桩顶距桩心相同距离的环向上不同点的速度响应曲线中入射波和反射波基本一致, 高频干扰在距桩心大约 0.5R 区域差别较大,桩心 及尖角边界处差别较小。

(3)变模量桩的入射波和完整桩相同,反射波 峰值较完整桩小,反射波峰对应时间较完整桩滞后。

(4)局部缺陷桩距激振点距离相同环向各测点 的第一个缺陷反射波有微小差别,而第二个缺陷反 射波的差别更大,实际检测时可通过沿环向布置多 个测点来判别桩体是否存在局部缺陷。

参考文献(References)

[1] 刘汉龙.现浇 X 形混凝土桩施工工法:中国,ZL200710020306.3 [P].2007-08-22.

LIU Han-long, Construction Method of the Cast-in-place Concrete X-type Pile: China, ZL200710020306.3[P].2007-08-22.

[2] 刘汉龙,刘芝平,王新泉.现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究 [J].中国铁道科学,2009,30(1):17-23.

LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Study on the

Geometric Characteristics of the Cast-in-place X-type Vibro-Pile Section[J].China Railway Science, 2009, 30(1): 17-23.(in Chinese)

- [3] Kong G Q, Chen Y M, Liu H L, et al. Numerical Analysis of Xsection Cast-in-place Concrete Pile Groups Under Vertical Load[J]. ASCE, Geotechnical Special Publication, 2011, 220: 162-168.
- [4] Zhou H, Liu H L, Kong G Q, et al. Analytical Solution for Stress and Displacement After X-section Cast-in-place Pile Installation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 11, ID 973421.http://dx.doi.org/10.115/2013/937421.
- [5] Lv Y R. Ding X M. Liu H L. In Situ Tests on Cast-in-place Concrete X-section Pile for Bearing Capacity of Single-pile Composite Foundation [J]. ASCE, Advances in Pile Foundations, Geosynthetics, Geoinvestigations, and Foundation Failure Analysis and Repairs, GeoHunan, 2011; 39-47.
- [6] Chow Y K,Phoon K K,Chow W F,et al.Low Strain Integrity Testing of Plies: Three-dimension Saleffect [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129 (11):1057-1062.
- [7] 陈凡,王仁军.尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J]. 岩土工程学报,1998,20(05):95-99.
 CHEN Fan, WANG Ren-jun. Dimension Effect on Low Strain Integrity Testing of Prestressed Pipe Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(5):95-99.(in Chinese)
- [8] 赵振东,杉本三千雄,铃木善雄.桩基低应变完整性检测的分析 研究[J].地震工程与工程振动,1995,15(4):104-111.
 ZHAO Zhen-dong, Sugimoto Michio, Suzuki Yoshio. Analyticalstudy on Low Strain Integrity Testing for Piles[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(4): 104-111 (in Chinese)

- [9] 雷林源,杨长特.桩基瞬态动测响应的数学模型及基本特性
 [J].地球物理学报,1992,35(4):501-509.
 LEI Lin-yuan,YANG Zhang-te.The Mathematical Models and Basiccharacters of Transient Response for Dynamic Test of Pile[J].Acta Geophysica Sinica,1992,35(4):501-509.(in Chinese)
- [10] 徐攸在,刘兴满.桩的动测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.

XU You-zai, LIU Xing-man.New Technology of pile Dynamic Test[M].Beijing:China Architecture & Building Press, 1989.

- [11] Ding X M,Liu H L,Liu J Y,et al.Wave Propagation in a Pipe Pile for Low Strain Integrity Testing[J].Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2011, 137(9):598-609.
- Ding X M, Liu H L, Zhang B. High-frequency Interference in Low Strain Integrity Testing of Large-diameter Pipe Piles[J].
 Science China Technological Sciences, 2011, 54(2): 420-430.
- [13] 郑长杰,丁选明,刘汉龙,等.考虑土体三维波动效应的现浇大 直径管桩纵向振动响应解析解[J].岩土工程学报,2013, (12):2247-2254.

ZHENG Chang-jie, DING Xuan-ming, LIU Han-long, et al. Analytical Solution to Vertical Vibration of Cast-in-place Concrete Large-diameter Pipe Piles by Considering 3D Wave Effect of Soils[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, (12); 2247-2254. (in Chinese)

- [14] Lin Y, Sansalone M, Carino N J. Impact-echo Response of Concrete Shafts[J].Geotech Test J,1991,14(2):121-37.
- [15] Huang Y H,Ni S H,Lo K F,et al.Assessment of Identifiable Defect Size in a Drilled Shaft Using Sonic Echomethod: Numerical Simulation[J].Computers and Geotechnics, 2010, 37: 575-768.