

激振面积对低应变动测法影响的数值研究

戚惠民

(上海市地矿工程勘察院, 上海 200072)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元软件建模, 分析了基桩横向尺寸对低应变检测的影响. 结果表明: (1) 在建模过程中, 当桩端土厚度及桩周土半径达到桩长的 1/2 以上时, 计算所得数值解可以收敛稳定; (2) 基桩横向尺寸对低应变法检测有显著影响, 具体与施加激振面积相关, 当激振面积较大时, 横向尺寸影响能有效弱化; (3) 通过实测曲线与数值解比较, 二者较为吻合, 本文所述规律和方法对工程实践具有一定指导意义.

关键词: 有限元; 横向尺寸; 低应变反射法; 激振面积

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 05-0063-04

随着我国经济水平的不断提高和建筑行业的不断发展, 桩基础已经越来越广泛地应用于道路、桥梁、高层楼房、港口等重要土木工程领域当中. 由于其承载力高、工后沉降小等优点, 桩基础能为构筑物提供可靠的保障. 另一方面, 桩基础作为地下工程, 在施工过程中难以保证桩本身的质量和完整性, 因此对桩基的有效检测必不可少.

当前工程实践中, 常用的桩基检测方法分为静载荷试验法和动态测试法两大类. 前者能直观地得到桩基的承载能力, 但是试验时间长, 成本高, 一般仅用于抽样检测. 而动态测试法中, 低应变反射法应用最为广泛. 基于机械纵波在一维杆件中传递的基本原理, 低应变反射法能对断桩、夹泥等常见基桩缺陷进行有效检测, 同时还能得到桩长、缺陷位置等必要信息.

经过几十年的发展, 众多学者对低应变反射法的解析理论研究已经相当成熟. Novak 等^[1]导出了多层土体中桩基的波阻抗函数传递规律. Gough 等^[2]推导出了只考虑桩端土作用时基桩的自由振动特性. Korten 等^[3]求得了无限长桩在锤击条件下, 考虑桩侧土作用时的纵向振动问题解. 王奎华等^[4]研究了 Winkler 土体下有限长任意截面弹性桩振动的解析解问题. 胡昌斌等^[5]利用平面应变土体模型讨论了基桩的纵向振动响应. 吴文兵^[6]进一步采

用虚土桩法模拟了桩土相互作用.

以上研究都基于 2 个重要假设: (1) 桩为一维杆件; (2) 激振信号均布于桩顶. 在一定工况下, 理论解与工程实测曲线能较好地吻合. 但在大直径基桩的低应变检测中, 无法忽略基桩横向尺寸的影响, 理论解难以解释桩顶振动速度的时域响应.

另一方面, 随着现代计算能力的不断提升, 数值解也逐渐应用于对低应变反射法的研究. 陈安国等^[7]利用差分法获得了考虑桩土相互作用时基桩的纵向振动响应解. 费康等^[8]针对 PCC 桩建立了一维和三维模型进行数值分析. 何伟杰^[9]等相关模型下的解析解和数值解进行了对比分析.

ABAQUS 有限元软件提供了丰富的线性动力学分析功能, 本文将采用 ABAQUS, 对低应变检测中的横向尺寸影响进行探讨.

1 模型尺寸对数值解收敛的影响

1.1 建模

不作特殊说明情况下, 进行数值分析时均采用以下基本参数: 桩长 $H=10.0$ m, 桩径 $D=1.2$ m, 桩顶面积 $S_0=1.131$ m², 桩身混凝土杨氏模量 $E_p=40$ GPa, 密度 $\rho_p=2\,500$ kg·m⁻³. 土体杨氏模量 $E_s=5$ MPa, 密度 $\rho_s=1\,700$ kg·m⁻³, 泊松比 $\nu=0.3$. 根据土体杨氏模量与剪切模量的关系 $G=E/(2(1+\nu))$,

可通过计算公式得到土体剪切波速 $v_s = \sqrt{G/\rho} = 150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 由于在基桩的低应变检测中, 系统仅发生小变形, 因此模型建立时, 桩身和土体都采用弹性模型. 另外, 由于桩土系统具有轴对称性质, 为减少计算, 本文通过轴对称单元(Axisymmetric)依照轴对称的原理建模分析, 桩顶激振的施加面积 $S_F = S_0/150$, 荷载形式为半正弦波. 约束模型左右边界 x 方向的位移, 以及模型底部 x 和 y 两个方向的位移. 另外, 张智卿等^[10]指出, 土体饱和度对桩顶动力响应影响不大, 因此本文模型忽略孔隙水的力学性质. 分析步类型为显式动力分析步. 桩土切向接触形式为罚函数, 系数为 0.3. 为充分考虑激振波在桩身中的三维传播, 桩身网格种子间距划分为 0.05 m, 近端土体水平向网格种子间距为 0.10 m, 远端为 0.40 m, 纵向为 0.25 m, 划分网格的单元类型为 CAX4R.

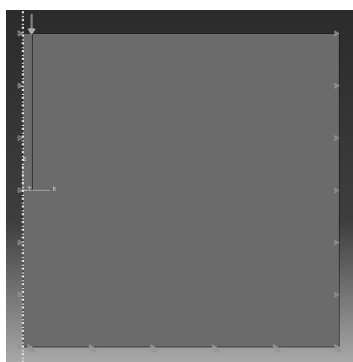


图1 模型示意图

1.2 数值分析

建模中, 考虑地基土对桩身动力响应的影响, 但地基土无法延伸至无限远处. 因此讨论桩底土厚度 h 和桩周土半径 r 对所得数值解收敛情况的影响. 为便于对比, 取桩顶初始激振的最大速度为 1 个速度单位, 对桩顶速度进行无量纲化处理.

桩长 $H=10.0 \text{ m}$, 考虑桩底土厚度 h 分别取 $H/2$, $H/5$, $H/20$, 0. 计算得到图 2, 当 $h=0$ 时, 桩端自由, 在桩顶振动的速度曲线上表现为反向的反射信号. 随着桩端土厚度增加, 桩端具有足够的支撑, 桩底反射信号与初始激振信号同向. 同时, 当 $h=H/2$ 以及 $h=H/5$ 时, 2 条曲线完全重合, 这是由于桩端对土体的作用力发生扩散, 当桩底土具有足够的厚度时, 扩散至最底层的土体应力可忽略不计, 因而随着桩端土厚度的增加, 曲线趋向一致.

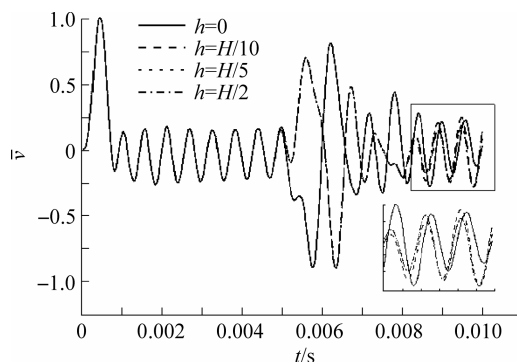


图2 桩端土厚度对桩顶纵向振动速度响应的影响

对于桩周土的讨论, 考虑由桩身中心向外辐射 r 范围内的土体影响, r 分别取 $H/2$, $H/5$, $H/10$, 0. 由图 3 可知, 当 $r=0$ 时, 桩底反射接近于初始激振信号的 2 倍, 这是因为完全消除了桩周土的影响, 并且边界条件限制了桩身水平向变形. 随着桩周土半径增加, 桩底反射信号逐渐变弱, 当 $r=H/2$ 和 $r=H/5$ 时, 曲线重合. 这是由于桩顶施加荷载固定, 土体最外层的面积随 r 同步增加, 应力则相应减小, 当应力可忽略不计时, 曲线呈现一致的形状. 由上即可认为当 $h>H/2$, $r>H/2$ 时, 桩顶纵向振动速度响应已经稳定收敛, 后续研究中, 即取 $h=H/2$, $r=H/2$.

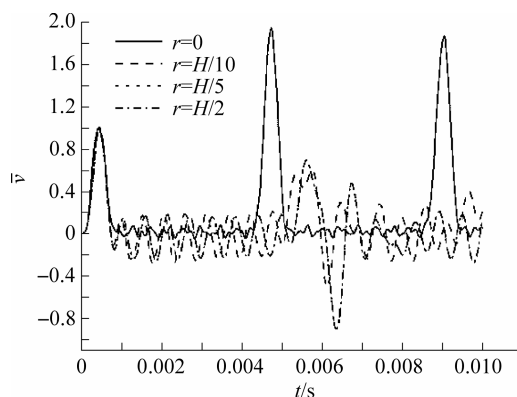


图3 桩周土半径对桩顶纵向振动速度响应的影响

1.3 模型验证

基于上述模型收敛性的参数设定, 将本文数值解与成熟的解析解^[4]进行对比.

在工程低应变反射法检测中, 初始激振信号至第 1 次桩底反射信号之间的曲线是最重要的区段(以下记为区段 C), 能提供较为清楚的基桩完整性状况. 如图 4 所示, 在区段 C 上, 数值解与解析解基本一致, 反映基桩尺寸和完整性相同, 验证了数值解的可靠性. 另一方面, 数值解有明显的波动, 这是由于数值解的求解过程考虑了基桩的横向尺

寸, 而解析解仅将基桩简化为一维杆件形式.

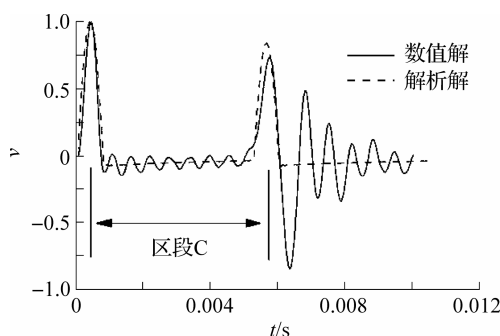


图4 数值解与解析解对比

2 激振面积对横向尺寸效应的影响

通过对图2~3观察可知, 除了初始激振信号峰及桩底反射信号峰之外, 测试曲线还存在较多的波动, 这是因为桩身具有一定体积, 并不是理想的一维杆件. 激振波向下传播后桩顶仍在进行振动, 当桩顶接收桩底反射信号之后, 产生更为凌乱的速度响应. 基桩进行低应变反射法检测时存在的横向尺寸效应与众多因素相关, 本文将利用有限元模型模拟激振面积的影响.

当桩顶面积为 S_0 时, 分别设置激振面积 S_F 为 $S_0/150$, $S_0/120$, $S_0/90$, $S_0/60$, $S_0/30$, S_0 , 利用 ABAQUS 建模求得桩顶速度响应.

从图5中可知, 随着激振面积增大, 区段C之间的波动峰值降低, 并逐渐趋向解析解. 这是由于桩顶接收初始激振后, 激振波以球面波的形式向下传播, 当经过 L_0 的传播距离后, 波阵面可近似看作平面, 而在 L_0 之前的传播段, 则会显著地体现出横向尺寸的影响. 图6中, 当激振波同样传播1m的距离, 由于图6(a)的桩顶激振面积较小, 波阵面仍有明显的弧度, $L_0 > 1$ m, 而图6(b)的激振面积

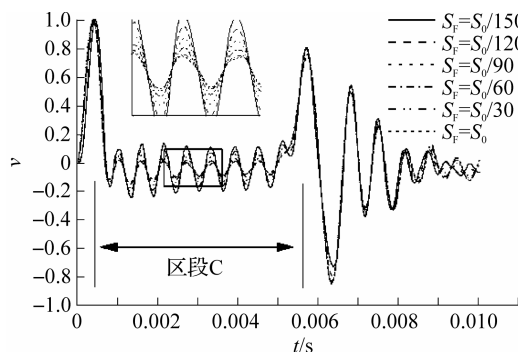


图5 激振面积对桩顶纵向振动速度响应的影响

较大, 各激振点产生的球面波相互重叠, 波阵面很快形成平面, $L_0 \leq 1$ m, 相对应地, 桩身更为符合一维杆件模型, 因此横向尺寸引起的振幅波动渐弱. 值得一提的是, 在桩顶以圆对称形式施加激振荷载时, 激振波的波阵面能更快地达到近似平面的状态, 横向尺寸影响也能得到有效的控制.

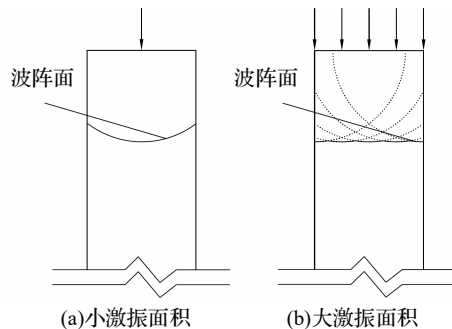


图6 波阵面示意图

3 工程应用

为验证上述方法和结论的合理性, 以上海浅滩43-01地块项目围护灌注桩的低应变动测结果作对比. 该项目位于浦东新区, 设计209根钻孔灌注桩, 桩径为850, 900 mm, 桩长为19.0, 20.0, 21.0, 22.0 m, 桩身混凝土强度C35, 桩尖持力层为⑤₂₋₁层砂质粉土夹粉质粘土, 具体工程地质简况见表1. 将各层厚度土体的剪切模量和泊松比等力学参数按照厚度权重取平均值, 得到 $E_{S0}=2.37$ MPa, 密度 $\rho_{S0}=1840$ kg·m⁻³, 泊松比 $\nu_0=0.28$.

表1 上海浅滩43-01地块的地质简况 m

层号	土层名称	层顶标高
① ₁	杂填土	3.30~0.28
① ₂	浜底淤泥	2.02~0.68
②	粉质粘土	1.83~0.90
③	淤泥质粉质粘土	0.03~4.00
③ ₁	粉质粘土	-0.89~-2.13
④	淤泥质粘土	-10.77~-12.10
⑤ ₁	粘土	-12.90~-14.08
⑤ ₂₋₁	砂质粉土夹粉质粘土	-23.97~-26.10
⑤ ₂₋₂	粉砂	-35.97~-38.58
⑤ ₃	粉质粘土	-49.97~-50.58
⑦	粉砂	未钻穿

W48 灌注桩桩径 900 mm, 桩长 20 m. 由图7可见, 在区段C上, 数值模拟得到的曲线与实测曲

线吻合较好,在桩底反射之后的曲线段,数值模拟结果显示较为凌乱.这是因为本例所求数值解考虑了基桩的横向尺寸,且当桩底反射波与桩顶的初始振动状态叠加时,桩顶速度响应更为复杂,实测曲线经过信号的采集和滤波处理后,较为光滑.所关心的区段 C 证明,通过有限元模型计算得到关于低应变反射法的相关规律是合理的,对工程实践具有一定的指导意义.

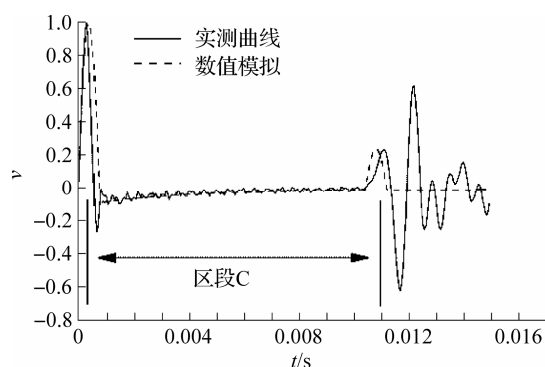


图7 W48号桩的实测曲线与数值模拟对比

4 结论

本文利用 ABAQUS 有限元软件,将桩土系统合理建模,对工程中基桩的低应变检测方法进行了相关分析,得到以下结论:(1)在有限元模型中,为使得计算结果收敛,对于长度为 H 的桩,桩端土厚度 h 的取值应不小于 $H/2$,桩周土半径 r 不小于 $H/2$;(2)在低应变检测中,基桩横向尺寸对桩顶振动有显著影响,导致速度响应曲线波动较多,横向尺寸引起的振幅波动与激振面积密切相关,激振

面积越大、越均匀,曲线波动越小;(3)通过工程实测曲线与数值模拟曲线比较,两者较为吻合,证明了上述理论的合理性,实际检测工作中为避免横向尺寸的影响,应采用环形、大面积的激振装置.

参考文献:

- [1] Novak M, Aboul-Ella F. Impedance functions of piles in layered media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, 104(3):643-661.
- [2] Gough W, Richard J P G, Williams R P. Vibration and Waves[M]. New York: Halsted Press, 1983.
- [3] Korten H V, Middendorp P, Brederode P V. An analysis of dissipative wave propagation in a pile[C]. International Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, 1980.
- [4] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及其应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6):27-35.
- [5] 胡昌斌, 王奎华, 谢康和. 基于平面应变假定基桩振动理论适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5):595-601.
- [6] 吴文兵. 基于虚土桩法的桩土纵向耦合振动理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [7] 陈安国, 刘东甲. 基桩低应变检测的波动方程法数值计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(10): 1336-1340.
- [8] 费康, 刘汉龙, 张霆. PCC 桩低应变检测中的三维效应[J]. 岩土力学, 2007, 28(6):1095-1102.
- [9] 何伟杰, 杨冬英, 崔周飞. 考虑横向惯性下桩的纵向振动理论解和数值解对比分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2757-2763.
- [10] 张智卿, 王奎华, 谢康和, 等. 成层非饱和土中桩的纵向振动特性分析[J]. 科技通报, 2007, 23(1):88-96.

Numerical study on the effects of excitation area on low-strain integrity test

QI Hui-min

(Shanghai Institute of Geological Engineering Exploration, Shanghai 200072, China)

Abstract: Effects of horizontal size on low strain integrity test was studied based on ABAQUS finite element modeling. The results show that: (1) In the modeling process, when the soil thickness of pile bottom and the soil radius around pile reach half the length of pile, numerical solution can be converged and stabilized. (2) Horizontal size has a significant influence on low strain integrity test, and as the area of excitation increases, the influence can be effectively weakened. (3) The measured curve is in good agreement with the numerical solutions, therefore the laws and methods proposed above are instructive for engineering.

Key words: finite element; horizontal size; low-strain integrity test; excitation area

(责任编辑 韩超)