

文章编号:1673-9469(2014)02-0043-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2014.02.011

纵向瞬态荷载下基桩的动力响应分析

武丹丹¹,杨成斌¹,王江涛²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009;2. 安徽省金田建筑设计咨询有限公司,安徽 合肥 230051)

摘要:文章根据桩土系统波动理论,在桩顶施加竖向瞬态激振力情况下,对基桩竖向振动的时域和频域分析进行理论研究。对完整桩时域速度曲线进行拟合处理,分析桩身、桩侧、桩底参数对完整桩时域速度曲线和速度振幅谱曲线的影响,对非完整桩(缩径桩、扩径桩、断桩)也进行类似的分析处理。研究表明:桩土参数的变化对曲线产生了影响,桩侧土剪切波速越大桩底反射衰减的越多,理论波形图和工程桩动测波形图显示出很好的一致性。

关键词:桩土系统;速度时域曲线;速度振幅谱曲线

中图分类号:TU473.16

文献标识码:A

Dynamic response of piles subjected to transient longitudinal loading

WU Dan-dan¹, YANG Cheng-bin¹, WANG Jiang-tao²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei 230009, China;
2. Anhui Jintian Architectural Design Consulting Co., Ltd, Anhui Hefei 230051, China)

Abstract: Based on the wave theory of the pile-soil system, time domain analysts and frequency domain analysts of pile longitudinal vibration, with a vertical transient impact force applied to the pile top, are studied theoretically. The time-domain velocity curve of integrate pile are fitted with the theoretical curve. The characteristics of time-domain velocity and velocity amplitude spectrum curve of integrate pile are analyzed when pile-soil parameters are changed, similar analysis are studied for non-intact piles (expanding, reducing, segregation). The results shows that the changes have influence on curves, the larger the pile side soil shear wave velocity, the more the pile bottom reflection attenuation. The theoretical response correlates well with the dynamic testing of an engineering pile by the reflected wave method.

Key words: the pile-soil system; time-domain velocity curve; velocity amplitude spectrum curve

低应变纵波测试因具有成本低、适用范围广等特点而得到广泛应用^[1-6]。文献[1]采用分离变量法求出均匀土中有限长完整桩的瞬态桩顶竖向振动速度,为低应变桩基测试的参数反演提供了理论基础。文献[3-6]研究了桩身为有限长均匀弹性圆杆、桩半径与桩侧土剪切波速按指数型变化并考虑变截面桩中的纵波,得到桩的瞬态纵向振动解析解。本文在上述研究的基础上,根据桩周土和桩端土共同作用下基桩纵向振动的微分方程组及数值解模型,由桩身运动方程,桩顶、桩底边界条件、初始条件、构成桩土系统在瞬态激励

下的定解问题,利用有限差分法解决此定解问题。对完整桩和非完整桩(缩径桩、扩径桩、断桩)时域速度曲线和速度振幅谱曲线进行归一化处理,并与理论曲线进行拟合。分析桩身、桩侧、桩底岩土参数对时域速度曲线和速度振幅谱曲线的影响,为桩身纵向瞬态动力响应分析提供理论基础。

1 桩顶纵向振动定解问题与差分解法

本文讨论纵波在桩身的传播规律,将完整桩视为等截面均质线弹性直杆,桩周土体对桩的作用简化为与位移成正比的分布弹性力和与振速成

正比的分布阻尼力的组合,下面给完整桩纵向振动的定解计算方程^[3]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} + \omega^2 u = 0 \quad (1)$$

$$AE \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -p(t) \quad (2)$$

$$(AE \frac{\partial u}{\partial x} + c_b \frac{\partial u}{\partial t} + k_b u) \Big|_{x=l} = 0 \quad (3)$$

$$u \Big|_{t=0} = 0, \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

其中: $a = \sqrt{E/\rho}$, $\beta = \frac{c}{2A\rho}$, $\omega = \sqrt{\frac{k}{A\rho}}$; a 为桩内纵波波速; u 为桩身质点纵向位移; c 、 k 为单位深度桩周土的等效阻尼系数和等效刚度系数; c_b 、 k_b 为单位深度桩底土的等效阻尼系数和等效刚度系数; A 为桩横截面积; E 、 ρ 为弹性模量和质量密度。

若把式(1)~(4)中的位移 $u(x,t)$ 关于时间 t 求偏导数,即可得关于桩身质点振速 $v(x,t)$ 的微分方程定解问题。

对于非完整桩,纵向振动定解方程推导过程与完整桩类似,具体公式可参见文献[5]。

采用的脉冲激振力表达式为^[7]:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{I}{t_0} (1 - \cos \frac{2\pi t}{t_0}), & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

对 t 求导,得:

$$\dot{p}(t) = \begin{cases} \frac{2\pi I}{t_0^2} \sin \frac{2\pi t}{t_0}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

激振力参数和桩土参数参考反射波动测资料、工程地质勘察资料、施工记录等资料,或通过模拟实测波形确定。

一般我们采用差分数值解法来求取微分方程,将求解区域分割成 M 行 N 列的矩形网格,当给定桩土参数、激振力参数和网格参数时,便可求出网格上各节点的速度值。文献[3]和[5]详细给出了完整桩和非完整桩纵向振动定解问题的差分解法。

2 完整桩曲线拟合与理论分析

本次进行现场模拟的实验桩位于合肥工业大学纬地楼前,桩型为人工挖孔灌注桩,混凝土等级为 C25。理论计算采用的主要参数:桩密度 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$,桩长 $L = 7.0 \text{ m}$,弹性模量 $E = 3.2502 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$;桩周土密度及剪切波速: $\rho_b =$

1800 kg/m^3 , $c_b = 120 \text{ m/s}$;泊松比 $\nu_s = 0.35$;桩底土密度、剪切波速及泊松比 $\rho_b = 2500 \text{ kg/m}^3$, $c_b = 200 \text{ m/s}$, $\nu_b = 0.35$;激振力参数取值: $t_0 = 1.25 \text{ ms}$, $I = 1 \text{ N} \cdot \text{s}$ 。

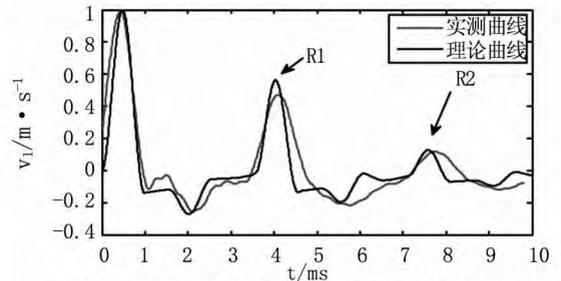


图1 完整桩实测曲线与理论计算曲线对比

Fig.1 Comparison of the measured curve with theoretical curve of integrate pile

图1给出了均匀土中完整桩归一化低应变实测曲线与理论计算曲线。如图所示,最大波峰为入射波,R1为桩底反射波。一次桩底反射波R1与入射波峰值之间时间差约为3.71 ms,波速约为3800 m/s,由公式 $T = 2L/V_p$ 得桩长 L 为7.05 m,与施工资料给出的7.00 m基本一致。

图2分别研究了完整桩桩身、桩侧土、桩底土参数对时域速度曲线和速度振幅谱曲线的影响。为了便于计算,假设基桩桩径不发生变化,为7 m,其他参数不变。

图2(a)给出了桩长 $L = 7, 14, 21 \text{ m}$ 时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,桩长加倍,一次桩底反射到达时间也加倍,各桩底反射波与入射波同相位。由速度振幅谱曲线可见,桩长一定时,随着频率的增加,速度幅值的各个峰值先增加后逐渐减小,波峰和波谷交替一次出现。随着桩长的增加,同一阶的共振峰幅值与共振谷幅值的差值(峰谷差值)减小。

图2(b)给出了桩径 $d = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ m}$ 时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,入射波幅值随桩径的增加而减小,桩底反射波到时相同,其振幅相差不大,各桩底反射波与入射波同相位;由速度振幅谱曲线可见,桩径增加,速度谱幅值减小,桩径为0.5 m的曲线上第一个共振峰很不明显,除第一个共振峰外,各阶共振峰和共振谷对应的横坐标基本相同。

图2(c)给出了桩身密度不同时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,桩底反射与入射波均同相位,桩身密度增加时,相应的入射波和桩底反射波幅值变化都不大;由速度振幅谱曲线可见,

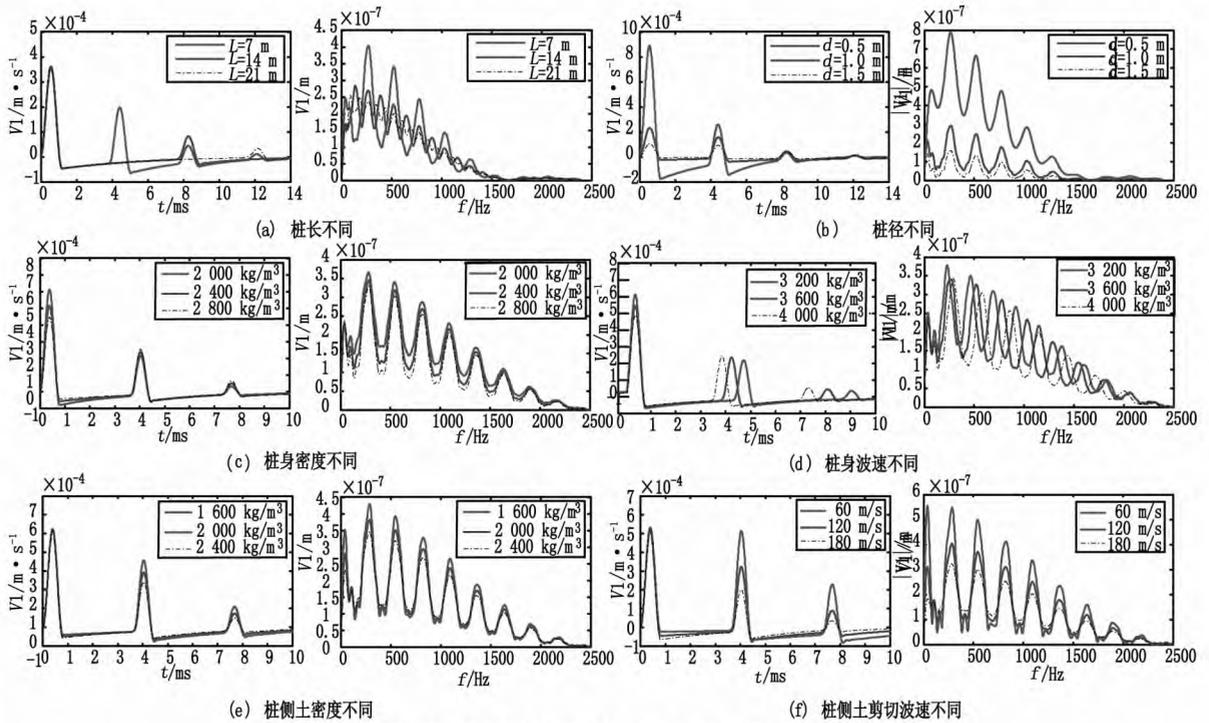


图2 完整桩不同岩土参数下时域速度曲线和速度振幅谱曲线

Fig.2 Time-domain velocity and velocity amplitude spectrum curve of integrate pile under different pile-soil parameters

桩身密度增大时,共振峰和共振谷幅值均减小,但共振谷幅值减小的更大些。密度增大,对第 n 阶共振峰的横坐标位置几乎无影响,且共振峰近乎等间隔分布。

图 2(d) 给出了桩身波速不同时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,桩身波速增加,入射波峰幅值减小,桩底反射波将提前到达;由速度振幅谱曲线可见,波速一定时,除第一个共振峰外,其余共振峰横坐标随频率增加而基本等间隔分布。桩身波速增加,第 n 阶共振峰或共振谷向后平移,同时频差增大。

图 2(e) 给出了桩侧土密度不同时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,桩侧土密度越大,波在传播过程中衰减越明显,导致桩底反射波幅值减小,但到达的时间相同;由速度振幅谱曲线可见,随着桩侧土密度增加, n 阶共振峰和共振谷的横坐标基本不变,但相应的共振峰幅值减小,共振谷幅值增大。

图 2(f) 给出了桩侧土剪切波速不同时桩顶纵向动力响应,由时域速度曲线可见,随着桩侧土剪切波速的增加,入射波变化不大,但桩底反射波峰值减小,入射波与一次反射波之间的部分曲线会向下偏移更多,偏移越多,说明土质越硬;由速度振幅谱曲线可见,波速一定时,除第一个共振峰

外,其余共振峰横坐标随频率增加而基本等间隔分布。桩侧土剪切波速增加时, n 阶共振峰和共振谷的横坐标基本不变,但各阶共振峰值明显减小,共振谷值增加,峰谷差值减小。

3 非完整桩曲线理论分析

3.1 缩径桩

该模型桩为人工挖孔灌注桩,混凝土强度为 C25,桩长 7.0 m,桩身半径 0.4 m,桩身密度 2400 kg/m^3 ,浅部缩径桩的缺陷位置位于桩顶下 1.0 ~ 1.5 m 处,缩径处的半径为 0.25 m;桩侧土上部 2 m 左右为填土,下部为粘土,桩底持力层为该层粘土。理论计算时,取参数为:桩周土密度 $\rho_s = 1600 \text{ kg/m}^3$,桩周土剪切波速 $v_s = 140 \text{ m/s}$,桩底土密度 $\rho_b = 1800 \text{ kg/m}^3$,桩底土剪切波速 $v_b = 150 \text{ m/s}$,桩底土泊松 $\nu_b = 0.35$,激振冲量 $I = 1 \text{ N} \cdot \text{s}$,激振力作用时间 $t_0 = 0.78 \text{ ms}$ 。

图 3 分析的是缩径的位置和桩径的缩小程度对时域速度曲线的影响。左图显示的是桩径缩小 0.2 m 和 0.4 m 时桩顶的时域速度曲线,由图可以看出,缩径越厉害,缩径反射越明显,桩底发射越不明显。此现象产生原因是,缩径越厉害,缩径处上下界面波阻抗相差越大,桩底处上下界面波阻

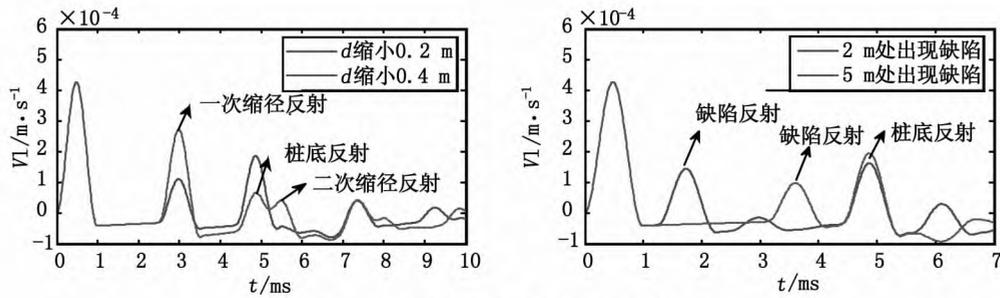


图3 缩径桩不同参数下时域速度曲线

Fig. 3 Time-domain velocity curve of reducing pile under different parameters

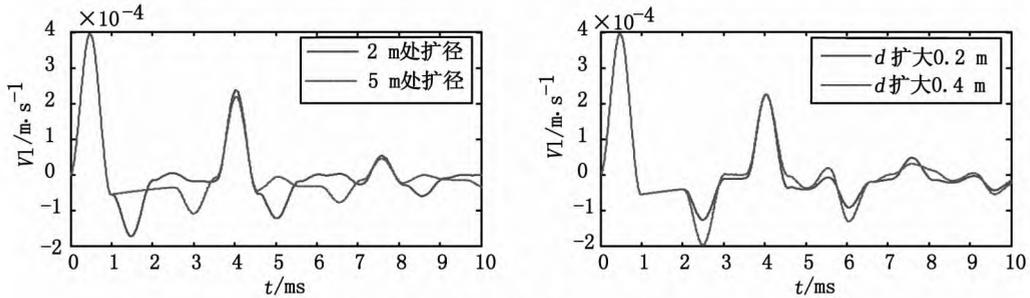


图4 扩径桩不同参数下时域速度曲线,

Fig. 4 Time-domain velocity curve of expanding pile under different parameters

抗相差越小,所以缩径反射越明显,桩底反射越不明显。只观察桩径缩小0.4 m的曲线,第一个波峰为入射波,第二个波峰为一次缩径反射,由图可知入射波峰与一次缩径反射波间时间大概为2.5 ms,所以下一个缩径反射也应相差2.5 ms,即5.5 ms处的波峰为二次缩径反射,前面5 ms处为桩底反射,桩底反射与二次缩径反射有所重叠,所以就形成如图所示的波形图。

右图显示的是在2 m和5 m处出现缩径时桩顶的时域速度曲线,由图可以看出,缺陷出现的位置越浅,缩径反射越靠前,当缩径程度一样时,缩径反射的程度也一样,且桩底反射大小和程度都一样。

3.2 扩径桩

图4分析的是扩径的位置和桩径的扩大程度对时域速度曲线的影响。左图中桩径分别扩大0.2 m和0.4 m,由图可见,扩径处直径越大,则扩径反射越明显。这是由于扩径越厉害,扩径处上下界面波阻抗相差越大,所以扩径反射就越明显。桩底反射相差不大;右图中分别在2 m和5 m处出现扩径,由图可见,当扩径程度一样时,扩径出现的位置越浅,扩径反射越靠前,且扩径反射越明显,但桩底反射位置和程度都相差不大。

3.3 断桩

该模型桩为人工挖孔灌注桩,混凝土强度为C25,桩长7.0 m,桩身半径0.4 m,桩身密度 2400 kg/m^3 ,浅部缩径桩的缺陷位置位于桩顶下约1.0 m处,缩径处的半径为0.25 m,桩侧土上部2 m左右为填土,下部为粘土,桩底持力层为该层粘土工程中,断桩的桩土系统比较复杂,在这里实际计算时,采用将断裂段的参数设计为桩侧土的参数。

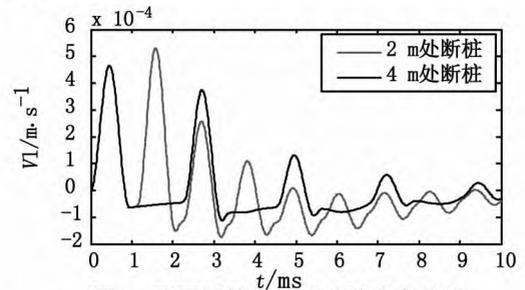


图5 不同断桩位置下时域速度曲线

Fig. 5 Time-domain velocity curve under different segregation location

图5分析的是断桩位置对时域速度曲线的影响,分别在2 m和4 m处出现断桩,由图可知,断桩位置越浅,缺陷反射出现的越靠前,相同时间内出现的频率增加。由计算得2 m处断掉的,就相当于是2 m的桩,4 m处断掉的就相当于是4 m的桩,那么除了入射波,各个反射就(下转第51页)

是数千年文化积淀的实体展示,是历史空间的延续发展,我们只有保护好传统建筑,并把人文主义作为精神支撑点,现当代住宅才能更好、可持续地发展下去。

参考文献:

- [1] 王建国,陈晓卫.人文视野下的德国国际建筑展[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(1):40-44.
[2] 王其亨.风水理论研究[M].天津:天津大学出版社,2005.

(上接第42页)对比载荷试验和静力触探试验方法所确定的地基承载力特征值,其结果均相近,说明浅层平板载荷试验过程以及试验资料分析确定的方法较合理。

5 结语

在规范中,虽然明确规定载荷试验成果确定地基土承载力特征值的方法,但试验成果较复杂,如何更好地应用规范里的方法得到符合实际的地基承载力特征值尤为重要。本文以邯郸市丰源小区工程的三点浅层平板载荷试验为例,采用不同方法确定地基土承载力特征值为66 kPa。最后静力触探试验确定的地基承载力值(71.97 kPa)与其结果相近,说明此试验成果分析得较合理。

(上接第46页)是桩底反射。位置不同的断桩在相同的时间上缺陷波的大小相差不大,说明了缺陷的位置不怎么影响振动速度的衰减程度。

4 结论

(1)桩土模型中,桩侧土剪切波速越大,一次桩底反射信号衰减越多,桩底反射幅值变得很小。一次桩底反射波的相位随着桩底岩石的剪切波速 V_{sb} 的增大,其同相位信号逐渐减小至消失,而同相位后面的反向相位逐渐增大直至将同相信号取代。

(2)对于缩径桩,缩径位置一定时,缩径程度越厉害,缩径反射越明显,桩底发射越不明显;缩径程度一样时,缩径出现的位置越浅,缩径反射出现的时间越靠前,缩径反射程度一样。

(3)对于扩径桩,扩径位置一定时,扩径程度越大,扩径反射越明显;扩径程度一样时,扩径出现的位置越浅,扩径反射出现的时间越靠前,且扩径反射越明显。

(4)对于断桩,断桩位置越浅,缺陷反射出现

- [3] 何晓昕.风水探源[M].南京:东南大学出版社,1991.
[4] 李约瑟.中华科学文明史[M].上海:上海人民出版社,2010.
[5] 姜涛,杜莹,杨芳绒.郑州绿博会城市展园景观设计与文化表达[J].河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(2):7-40.
[6] 张述任,张怡鹤.黄帝宅经[M].北京:团结出版社,2009.

(责任编辑 刘存英)

参考文献:

- [1] GB50007-2011,岩土工程勘察规范[S].
[2] 谢定义,陈存礼,胡再强.试验土工学[M].北京:高等教育出版社,2011.
[3] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2007.
[4] 徐超,石振明,高彦斌,等.岩土工程原位测试[M].上海:同济大学出版社,2005.
[5] 杨绍端,杜方江.银川地区粉细砂层地基土承载力特征值试验研究[J].工程勘察,2012(4):25-28.
[6] 薛卫军.浅层平板载荷试验确定地基承载力特征值[J].陕西水利,2012(5):85-88.
[7] 邵江.河北省建筑地基承载力确定方法研究[D].天津:河北工业大学,2005.

(责任编辑 王利君)

的越靠前,相同时间内出现的频率增加。除了入射波,各个反射就是桩底反射。

参考文献:

- [1] 雷林源,杨长特.桩基瞬态动测响应的数学模型及基本特征[J].地球物理学报,1992,5(4):501-509.
[2] 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,2002.
[3] 刘东甲.完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2000,23(5):683-687.
[4] 刘东甲.完整桩瞬态纵向振动参数影响分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2000,23(6):1014-1018.
[5] 陈义全,任志国,刘东甲.非完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(10):1210-1214.
[6] 刘东甲.指数型变截面桩中的纵波[J].岩土工程学报,2008,30(7):1066-1071.
[7] 刘东甲.纵向振动桩侧壁切应力频率域解及其应用[J].岩土工程学报,2001,23(5):544-546.

(责任编辑 王利君)