

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.014

偏心激振下大直径桩中弯曲波传播特征

李子卓¹, 卢志堂¹, 马海春¹, 阳栋²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:文章基于有限差分法对大直径桩中弯曲波传播特征开展了数值研究。在试验验证数值模型的基础上,分别采用截断三正弦脉冲和升余弦脉冲进行激振,研究偏心激振下桩中弯曲波的传播特性,并对模拟结果进行离散傅里叶变换,在频域内分析桩周土对弯曲波传播的衰减作用。结果表明:在偏心激振下,桩周土刚度越大,弯曲波的衰减越强烈;在同一土层中,桩中弯曲波衰减程度大于纵波,并且随着频率增高或桩径变小,弯曲波衰减变弱;缩径会引起弯曲波的反射,但其反射波的波形杂乱;缩径程度越大,缩径处反射弯曲波的幅值越大;利用桩顶采集到的弯曲波信号具有识别缺陷位置和缺陷程度的潜力。

关键词:低应变检测;弯曲波;反射;桩身完整性;模型试验

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0094-08

Propagation characteristics of flexural wave in large diameter piles under eccentric excitation

LI Zizhuo¹, LU Zhitang¹, MA Haichun¹, YANG Dong²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: The propagation characteristics of flexural wave in large diameter piles are numerically studied using the finite difference method. On the basis of test validation, truncated three-sinusoidal pulse and raised cosine pulse are used to study the propagation characteristics of flexural wave in piles under eccentric excitation, and the attenuation effect of the soil around piles on flexural wave propagation is analyzed in the frequency domain using discrete Fourier transform. The results show that the greater the stiffness of the soil around piles, the stronger the attenuation of flexural wave under eccentric excitation. For piles buried in the same soil layer, the attenuation degree of flexural wave is greater than that of longitudinal wave, and as the frequency increases or the pile diameter becomes smaller, the attenuation of flexural wave weakens. The necking will cause the reflection of flexural wave, but the waveform of the reflected wave is irregular. The larger the necking degree, the larger the amplitude of the reflected flexural wave at the necking. The flexural wave signal collected at the pile top has the potential to identify the location and degree of defects.

Key words: low strain test; flexural wave; reflection; pile integrity; model test

低应变反射波法主要以一维纵波理论为基础,利用纵波传播特性判断桩身完整性。但若只

考虑纵向振动响应,可能会忽视桩身狭长缺陷而造成误判。因此,挖掘其他类型波检测桩基完整

收稿日期:2023-09-25;修回日期:2023-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41807266);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ70027)和合肥工业大学学术新人提升计划B资助项目(JZ2022HGTB0277)

作者简介:李子卓(1999—),男,安徽蒙城人,合肥工业大学硕士生;

卢志堂(1985—),男,山东青岛人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者:E-mail:zhitang-lu@163.com.

性的潜力以提高检测效果具有重要意义。

目前已有学者对基桩弯曲(横向)振动特性或弯曲波传播规律进行研究。文献[1-3]基于动力 Winkler 模型求出单桩横向动力响应解析解;文献[4-5]推导出瞬态横向振动桩的 Winkler 参数,研究桩顶受到横向冲击荷载时桩的瞬态横向动力响应;文献[6-7]对饱和土地基中现浇大直径管桩水平振动频域特性及黏弹性地基中管桩水平振动响应进行理论研究;文献[8]采用交错网格有限差分法研究大直径桩横向激振下瞬态振动的三维特征。也有学者将横向振动特性与桩长和桩身完整性的评估相结合,文献[9-10]采用 Timoshenko 梁理论提出在横向激振下计算桩长以及评价桩身潜在缺陷的方法并进行优化;文献[11]利用水平激振产生的弯曲波对平行地震法进行修正,提高桩长估计的精度;文献[12-13]提出 EDAR (effective dispersion analysis of reflections)方法估算桩的入土深度,通过考虑土体对弯曲波的衰减作用,对 EDAR 方法进行修正;文献[14]提出一种频域分析方法,通过直接分析弯曲振动相关的快速傅里叶变换谱来确定桩长;文献[15]采用弹性动力有限积分法研究轴向偏心激振下管桩中弯曲波的传播特性。

偏心激振下,基桩中同时存在纵波和弯曲波,此时弯曲波传播会导致桩顶竖向速度波形发生偏移^[16]。对于大直径桩(直径大于等于 800 mm),由于低应变检测时的激振区域相对桩截面较小,弯曲波在传播时会存在明显的三维干扰,对检测结果造成影响,因此研究偏心激振下大直径桩中弯曲波传播规律,对完善现有桩基完整性检测理论具有积极意义。本文在模型试验验证的基础上,利用 FLAC3D 有限差分软件对大直径桩中弯曲波传播规律进行数值模拟分析,通过离散傅里叶变换分析频率和土层性质对弯曲波传播的影响,研究桩周土对弯曲波的衰减作用及影响因素,探讨弯曲波与纵波传播特性之间的差异。

1 数值模拟

1.1 计算模型

建立桩-土系统模型如图 1 所示,桩身网格边长约为 0.03 m,土体部分网格边长设置为 0.03~0.30 m,其中模型由 Rhino 软件建立,网格由 Rhino 软件中 Griddle 插件划分并导入到 FLAC3D 有限差分软件,采用显式差分格式进行求解。低应变条件下,将桩-土系统看作线弹性体,其物理力学

参数为:桩身弹性模量 E_p 为 36.5 GPa,泊松比 ν 为 0.20,密度 ρ 为 2 450 kg/m³;桩周土密度 ρ_{s1} 和泊松比 ν_{s1} 分别为 1 600 kg/m³ 和 0.38;桩底土密度 ρ_{s2} 和泊松比 ν_{s2} 分别为 1 800 kg/m³ 和 0.35;桩周土剪切模量下文将分情况选取。

所模拟桩基为大直径桩,其长度为 11 m,直径为 0.9 m。为消除场地边界对桩身响应计算结果的影响,桩周土径向计算范围为 10 倍的桩径,竖向计算埋深 15 m。桩身部分网格划分较土体部分网格划分更细密,以保证计算精度。

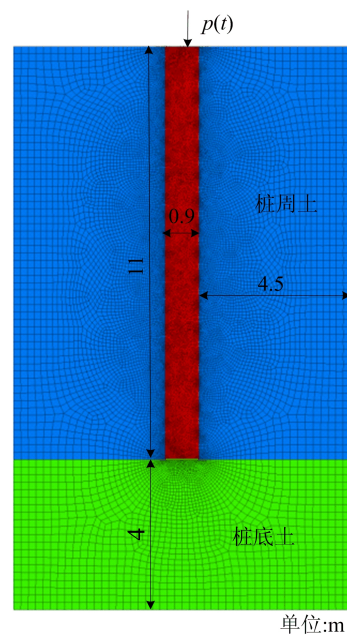


图 1 桩-土系统模型

1.2 边界条件

桩顶受纵向激振力 $p(t)$ 的作用,本文考虑 2 种激振脉冲,分别为截断三正弦脉冲和升余弦脉冲。其中升余弦脉冲符合实际检测中的激振脉冲,截断三正弦脉冲在实际中很难激发,但后者在频谱上存在一主频,可将其视为单一频率脉冲来分析不同频率弯曲波的传播规律,其表达式为:

$$p(t) = \beta [15\omega_1 \sin(\omega_1 t) - 6\omega_2 \sin(\omega_2 t) + \omega_3 \sin(\omega_3 t)] \quad (1)$$

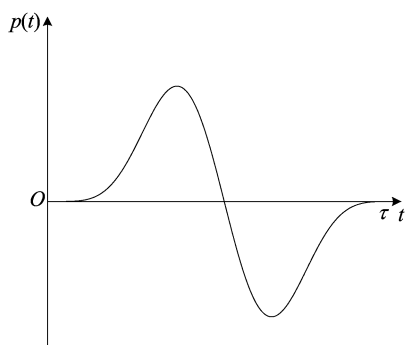
其中, $\omega_m = 2\pi m/\tau$, $m = 1, 2, 3$, τ 为脉冲宽度。其时域波形及频谱如图 2 所示,该脉冲在 $f_m = 1.3/\tau$ 时达到最大, f_m 为主频。

升余弦脉冲表达式为:

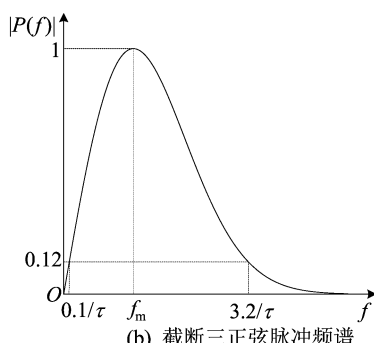
$$p(t) = \frac{I}{t_0} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right) \right] H(t - t_0), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

其中: I 为单位激振力冲量; t_0 为脉冲宽度; H 为

函。该脉冲时域波形及频谱如图 3 所示。

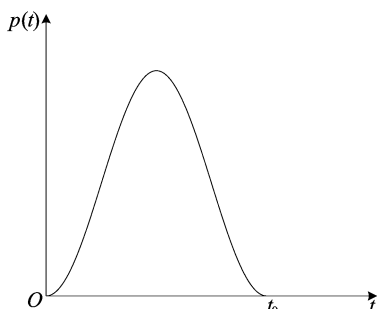


(a) 截断三正弦脉冲时域波形

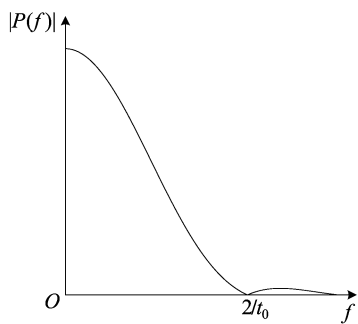


(b) 截断三正弦脉冲频谱

图 2 截断三正弦脉冲时域波形及其频谱



(a) 升余弦脉冲时域波形



(b) 升余弦脉冲频谱

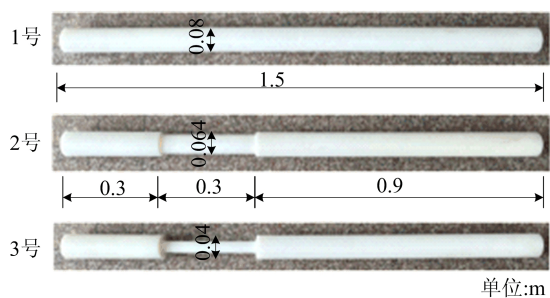
图 3 升余弦脉冲时域波形及频谱

2 计算结果及分析

2.1 试验验证

2.1.1 模型桩及测试设备

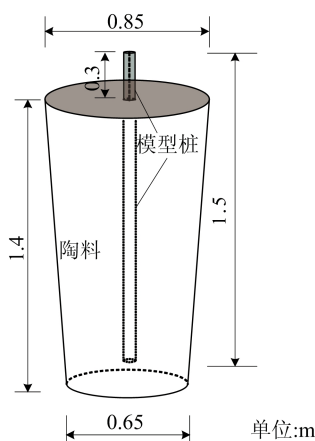
模型桩及现场测试示意图如图 4 所示。



(a) 模型桩实拍图



(b) 模型桩测试



(c) 模型桩测试简图

图 4 模型桩及现场测试示意图

其中选用硬质尼龙棒作为模型桩(图 4a), 1 号桩为完整桩, 2 和 3 号桩为缩径桩, 缩径段直径 d 分别为 $0.8D$ 、 $0.5D$, 对应的缩径段损失截面积为 36% 、 75% 。桩身密度 ρ 为 $1\ 150\ \text{kg/m}^3$, 泊松比为 0.12 。由模型桩低应变测试结果可以求出模型桩中一维纵波波速 $c_b=1\ 800\ \text{m/s}$, 其弹性模量 $E=\rho c_b^2=3.7\ \text{GPa}$ 。

为了符合实际工程中混凝土桩-土模量比, 本文采用轻质材料陶粒代替土。试验时将模型桩放入圆桶中, 桩周用陶粒填充, 圆桶尺寸为上径 $0.85\ \text{m}$ 、下径 $0.65\ \text{m}$ 、高 $1.40\ \text{m}$, 陶粒堆积密度 $\rho_t=106\ \text{kg/m}^3$, 弹性模量 E_t 为 $2\ \text{MPa}$ 。试验采用武汉岩海公司研发的 RS-1616K(S) 型基桩动测仪, 用小钢钉进行激振现场测试(图 4b、图 4c)。

2.1.2 模拟结果与试验数据对比

在桩顶沿纵向进行偏心激振激发出弯曲波,并采集桩顶纵向和横向振动速度,其中横向速度响应对应于弯曲波信号^[16]。将采集到的加速度信号积分后得到速度-时程曲线,并做归一化处理。试验与模拟得到的桩顶纵向及横向速度-时程曲线如图 5 所示,其中脉冲宽度 $t_0=0.75$ ms。图 5 中:工况 1~3 分别表示对 1~3 号桩左侧(近缩径端)激振并接收信号;工况 4、5 分别表示对 2、3 号桩右侧激振并接收信号。

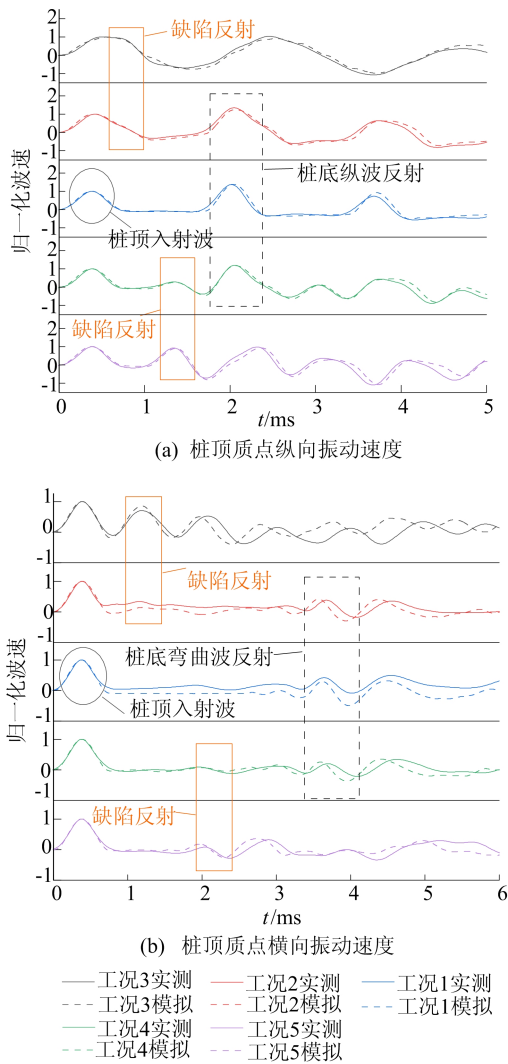


图 5 模型桩桩顶速度-时程曲线

从图 5 可以看出,数值模拟结果和试验结果吻合效果较好,说明数值模型的合理性。近缩径端激振并接收时(图 5a 工况 2、3),纵向速度响应中桩顶入射信号与缺陷反射信号叠加在一起,无法清楚辨别,即在桩身浅部存在盲区^[17],而横向速度响应(图 5b 工况 2、3)可以清晰地辨别桩顶

入射波和缺陷反射信号;远缩径端激振并接收时(图 5 工况 4、5),纵向速度响应和横向速度响应都能很好地反映出缺陷响应,并且缩径程度越大,缺陷反射信号峰值越大,可以注意到此时横向速度信号(图 5b 工况 4、5)的缺陷反射峰值明显小于近缩径端激振时(图 5b 工况 2、3)的缺陷反射信号峰值,这是因为随着弯曲波沿桩身传播,频散效应变强,频率范围变宽,不同频率的弯曲波越分散,所以可观察到的反射信号强度较弱。

当缩径段损失截面积为 75% 时,无论是纵波还是弯曲波,都已无法清楚辨别出桩底反射,由于缺陷处截面积过小,导致弯曲波的大部分能量反射回桩顶,能够到达桩底的能量已经很少,因此桩底反射信号会被缺陷反射信号覆盖。

2.1.3 缺陷预测深度与实际深度对比

由缺陷反射弯曲波到时,推测缺陷深度,结果见表 1 所列。预测缺陷深度表达式为:

$$\bar{z} = c_f \Delta t / 2 \tag{3}$$

其中: c_f 为桩身中初至反射弯曲波的波速; $\Delta t = t_1 - t_i$, t_1 为缺陷处反射弯曲波到时, t_i 为桩顶入射弯曲波到时。

由表 1 可知,计算出的预测深度与实际深度二者基本一致,但是当缺陷程度较大且位于较深处时,利用弯曲波预测缺陷深度会出现较大误差。

由以上分析可知,当缺陷距桩顶较近时,相比纵向速度响应,横向速度响应对于浅部缺陷的检测效果较好,而对于较深部缺陷的检测效果较差,因此建议实际检测中可采用纵波与弯曲波结合的方式进行低应变检测。

表 1 缺陷预测深度和实际深度对比

工况	实际深度/m	Δt /ms	c_f /(m/s)	预测深度/m
2	0.3	0.792	883.39	0.35
3	0.3	0.792	803.86	0.32
4	0.9	2.052	889.68	0.91
5	0.9	1.992	817.00	0.81

2.2 桩身三维效应

对于大直径桩,桩身的三维效应是不可忽略的问题,低应变测桩时的频率范围在 2 000 Hz 以内,取 f_m 分别为 500、750、1 000、1 500 Hz 这 4 种主频的截断三正弦脉冲对完整单桩进行偏心激振,在桩顶中心接收横向速度响应,桩顶三维效应影响如图 6 所示。图 6b 中点 1~6 位置示意图如图 7 所示。由图 6a 可知,随着主频增大,脉冲宽

度随之变窄,同时由于高频成分增加,曲线由平滑变得震荡,即三维干扰突出。

使用主频 $f_m = 750$ Hz 的截断三正弦脉冲,于距桩顶中心 $0.6R$ 处进行偏心激振,在如图 7 所示的点 1~6 处接收横向速度响应。

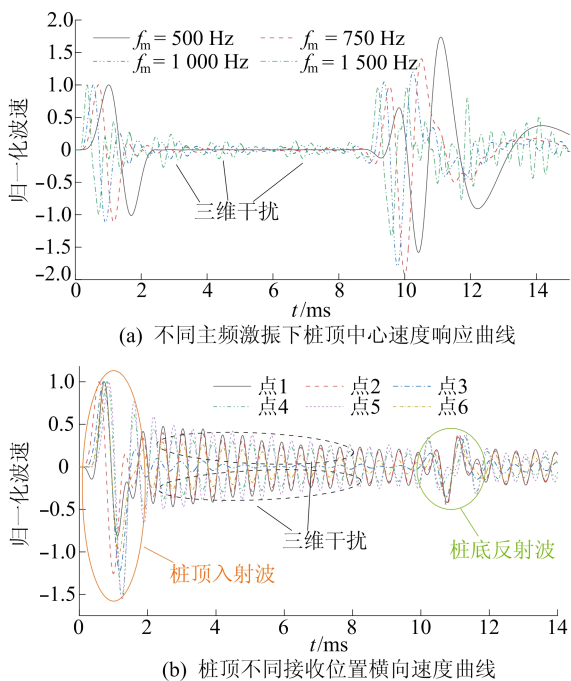


图 6 桩顶三维效应影响曲线

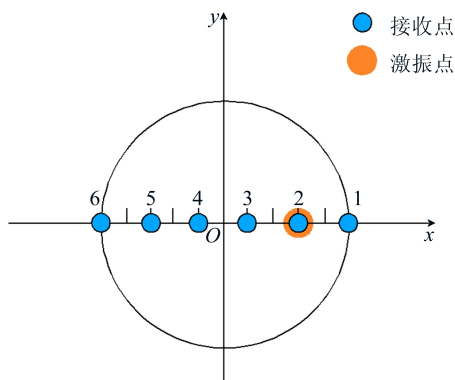


图 7 激振和接收点位示意图

模拟得到桩顶横向速度曲线如图 6b 所示。由于桩身三维效应,在桩顶入射波与桩底反射波之间存在不同程度的三维干扰,图 6b 中显示在桩顶中心接收到的信号三维干扰最小,曲线更加平滑,这是由于桩顶中心点位于桩身震荡的对称面,类似于梁理论中的中性层,在此面上受桩身震荡影响较小。因为激振点位于 x 轴正向部分,所以震荡是沿 x 轴的正向或负向,对于 y 轴方向的信号响应微乎其微,下文中的横向速度均指 x 轴方向的信号响应。为避免三维干扰的影响,后续模

拟中信号接收点都将设置在桩顶中心。

2.3 桩周土对弯曲波的衰减作用

弯曲波存在频散效应,在桩身中传播时波形会不断发生变化,因此在时域的波形中无法准确分析其传播特性。对时域波形曲线进行离散傅里叶变换,得到频域曲线,利用频域内的波形分析弯曲波的衰减规律。以归一化直达波幅值 V_i/V_0 的变化情况定义应力波的衰减, V_i 为自桩顶到桩底各深度桩截面中心的直达波幅值, V_0 为桩顶中心的入射波幅值。为减少振源附近三维干扰的影响,取约 $2D$ 处为近场和远场的边界^[18],同时由于在 $10\sim 11$ m 深处(即桩底附近),直达弯曲波与桩底反射弯曲波叠加导致振幅剧增,故本文采用 $2\sim 9$ m 的桩身响应进行研究,选择在各深度桩截面中心处接收速度响应以减小高频干扰信号的影响。以质点距桩顶的深度为横坐标,各深度截面中心质点的归一化直达波幅值为纵坐标。

2.3.1 土层的影响

考虑无土、软弱土、中软土和中硬土这 4 种情况对应的剪切模量见表 2 所列。选取主频 $f_m = 750$ Hz 脉冲对桩顶进行偏心激振,在桩顶中心接收横向速度响应,结果如图 8 所示。

表 2 不同土质对应的剪切模量

土层情况	剪切模量/MPa
无土	0
软弱土	16
中软土	64
中硬土	100

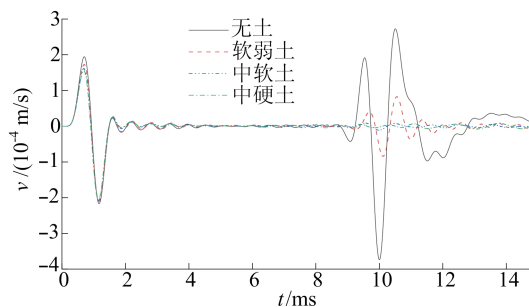
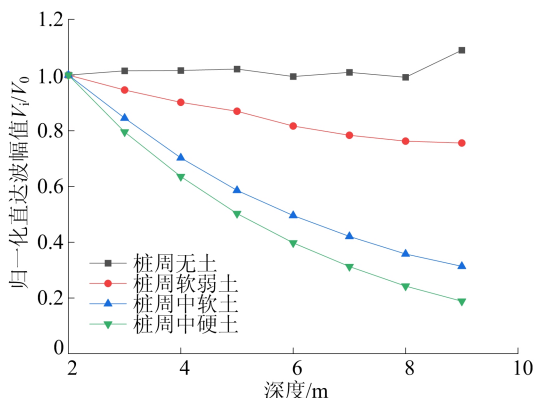


图 8 不同土质桩顶横向速度曲线

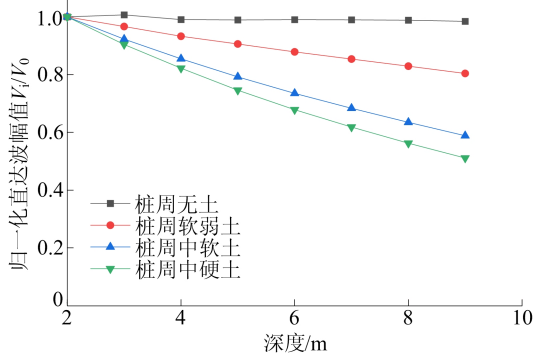
由图 8 可知,随着桩周土体剪切模量增大,桩底反射弯曲波振幅逐渐降低,这表明土体刚度越大,弯曲波衰减越严重。当桩周土剪切模量达到 64 MPa 以上时,桩底反射已难以识别,仅有少部分能量从桩底反射回桩顶。

同一脉冲主频下不同土质的衰减特性具有一定的相似性,不同桩周土质弯曲波和纵波衰减曲线如图 9 所示。由图 9a 可知,主频为 750 Hz 的直达波频域幅值时,桩周无土的弯曲波几乎无衰减,随着桩周土剪切模量增大,土层对桩身的“束缚作用”变强,对能量的吸收变强,弯曲波衰减越快,衰减程度随之变大。

研究桩中纵波沿轴向的衰减特性无需考虑频散效应的影响,且升余弦脉冲的时域波形较为简单清晰,桩顶和桩底响应容易辨别,因此采用升余弦脉冲激振进行模拟研究。提取各深度桩截面中心纵向速度-时程响应曲线如图 9b 所示。与图 9a 弯曲波的衰减特性进行对比,可以看到整体的衰减特性类似,但纵波的直达波幅值变化较弯曲波的直达波幅值变化更加平缓稳定,趋近于直线,且衰减程度更小。



(a) 不同桩周土质下弯曲波频域 V_i/V_0 变化曲线



(b) 不同桩周土质下纵波时域 V_i/V_0 变化曲线

图 9 不同桩周土质弯曲波和纵波衰减曲线

另外,在模拟过程中发现弯曲波传播过程中存在相位变化的现象,如当主频为 750 Hz 时,提取 z 分别为 0、3、6 m 处的横向速度曲线进行对比,结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,弯曲波在桩身传播中不管是直达波还是反射波,其波形相位在不断发生变

化并且无规律,因此低应变法中无法用弯曲波来准确判断缺陷的类型。

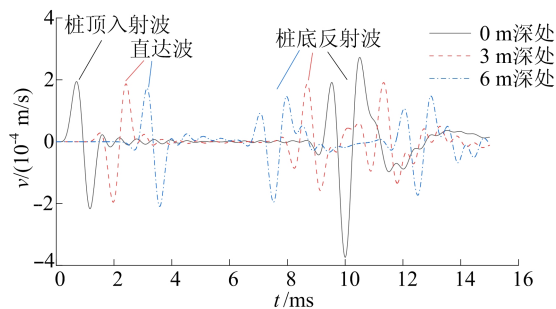
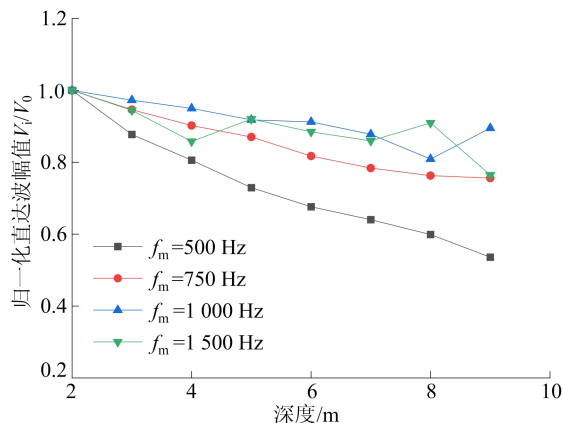


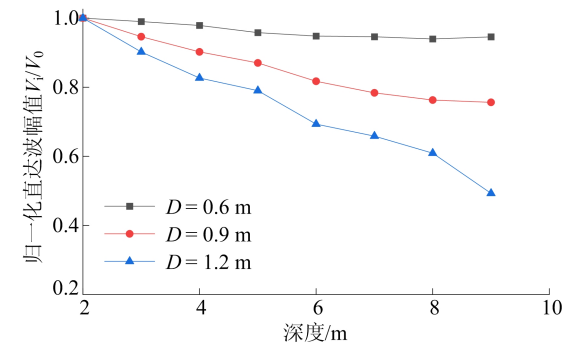
图 10 距桩顶 0、3、6 m 处截面横向速度曲线

2.3.2 脉冲宽度与桩径的影响

脉冲宽度与桩径对弯曲波衰减特性的影响如图 11 所示。



(a) 不同脉冲宽度下弯曲波频域 V_i/V_0 变化曲线



(b) 不同桩身直径下弯曲波频域 V_i/V_0 变化曲线

图 11 脉冲宽度与桩径对弯曲波衰减特性的影响

桩周为软弱土情况下,使用截断三正弦脉冲激振,改变激振频率即改变脉冲宽度,保持桩身直径 D 为 0.9 m 不变,模拟主频 f_m 分别为 500、750、1 000、1 500 Hz,各主频脉冲对应的脉冲宽度 τ 分别为 2.60、1.73、1.3、0.87 ms,得到桩身各深度质点横向振动速度,提取各深度直达波速将其转化为频域,结果如图 11a 所示。由

图 11a 可知,随着脉冲宽度变大,桩身质点的横向振动速度衰减速率变大,主频越高,脉冲的能量越大,因此在同一土质下随着脉冲主频增大,相对应的直达波幅值也变大,衰减程度变小。

桩周土为软弱土情况下,保持脉冲宽度及桩身其余参数一致,脉冲宽度 τ 取 1.5 ms,改变桩身直径,分别模拟直径 D 为 0.6、0.9、1.2 m 的情况,对比得到桩身各深度质点横向振动频域速度衰减曲线,如图 11b 所示。由图 11b 可知,桩径越小,桩身质点横向振动速度衰减速率越大,即认为随着桩径变小,弯曲波衰减变快。

2.3.3 桩身截面变化的影响

本文使用升余弦脉冲对桩顶进行偏心激振,模拟完整单桩、缩径单桩及缩径桩桩周中软土的情况。桩身分段示意图如图 12 所示。

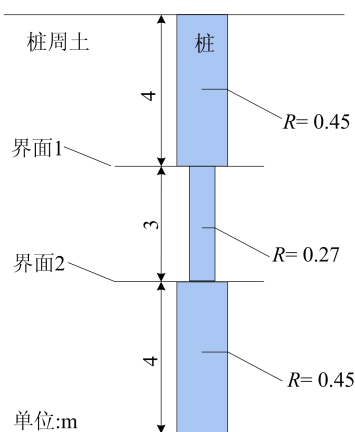
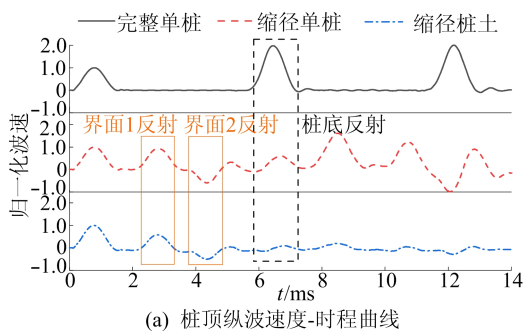


图 12 桩身分段示意图

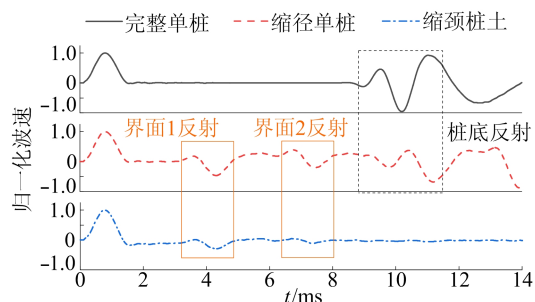
将桩分为 3 段,长度分别为 4、3、4 m,第 1 段和第 3 段的桩参数与上文相同,第 2 段为缩径段。其中, R 为正常段桩半径,缩径段桩半径为 $0.6R$ 。

纵波和弯曲波桩顶速度-时程曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,当桩侧有土存在时,纵波和弯曲波对于缩径缺陷和桩底的反射信号强度都变弱,尤其是弯曲波,桩底反射几乎消失,无法识别,进一步说明土层对弯曲波有较强的衰减作用。



(a) 桩顶纵波速度-时程曲线



(b) 桩顶弯曲波速度-时程曲线

图 13 桩顶速度-时程曲线

同时注意到不同于纵波在变截面处的反射有明显规律,弯曲波在变截面处的反射相位杂乱无规律,因此无法利用弯曲波准确判断缩径情况。

3 结 论

1) 对桩身中弯曲波传播的模拟结果表明,桩周土刚度越大,弯曲波衰减越快,同时桩身中弯曲波的衰减特性受脉冲宽度和桩径的影响,弯曲波在桩身中传播时,波形相位在不断翻转变化的。

2) 对于缩径桩,弯曲波的时域波形和幅值在缩径段会发生突变,桩周土的存在会导致缺陷处和桩底处的反射波幅值明显降低。

3) 弯曲波的波速较慢,桩顶入射弯曲波和浅部缩径缺陷反射弯曲波不会叠加在一起,因此对于浅部缺陷的判别,弯曲波较纵波更有优势。但由于频散效应,弯曲波的衰减相较于纵波的衰减速度更快,当缺陷程度较大且位置较深时,利用弯曲波检测可能会存在较大误差。

[参 考 文 献]

- [1] 胡安峰,谢康和,王奎华.粘弹性地基中有限长桩横向受迫振动问题解析解[J].岩土力学,2003,24(1):25-29.
- [2] 胡安峰,谢康和,应宏伟,等.粘弹性地基中考虑桩体剪切变形的单桩水平振动解析理论[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1515-1520.
- [3] 胡安峰,谢康和.双层地基中考虑桩体剪切变形的单桩水平振动解析解[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13):2298-2304.
- [4] 刘东甲,王建国.瞬态横向振动桩的 Winkler 参数[J].岩土力学,2003,24(6):922-926.
- [5] 刘东甲,王建国.均匀土中有限长桩瞬态横向动力响应[J].工程力学,2003,20(6):160-165.
- [6] 郑长杰,刘汉龙,丁选明,等.饱和黏性土地基中现浇大直径管桩水平振动响应解析解[J].岩土工程学报,2014,36(8):1447-1454.
- [7] 郑长杰,丁选明,栾鲁宝.黏弹性地基中管桩水平动力特性分析[J].岩土力学,2017,38(1):26-32.

- [8] CHANG X M, LIU D J, GAO F, et al. A study on lateral transient vibration of large diameter piles considering pile-soil interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 90(11): 211-220.
- [9] WU J T, NAGGAR M H, WANG K H, et al. Lateral vibration characteristics of an extended pile shaft under low-strain integrity test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 126: 105812.
- [10] WU J T, NAGGAR M H, WANG K H, et al. Analytical study of employing low-strain lateral pile integrity test on a defective extended pile shaft[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(9): 4020103.
- [11] ZHANG J Y, CHEN L Z, JIN Y. Theoretical basis and numerical simulation of parallel seismic test for existing piles using flexural wave[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 84(5): 13-21.
- [12] VIVEK S, MURTHY G. Nondestructive method for length estimation of pile foundations through effective dispersion analysis of reflections[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(2): 1-11.
- [13] VIVEK S, MURTHY G. Nondestructive length estimation of an embedded pile through combined analysis of transverse and longitudinal waves[J]. *NDT & E International*, 2020, 110: 102203.
- [14] YU C P. Evaluation of pile lengths using impact-induced flexural vibrations—a frequency domain approach[J]. *NDT & E International*, 2019, 108: 102174.
- [15] LU Z T, WANG Z L, LIU D J, et al. Propagation characteristics of flexural wave and the reflection from vertical cracks during pipe-pile integrity testing[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2022, 46(9): 1660-1684.
- [16] 卢志堂, 王志亮, 柯宅邦, 等. 偏心瞬态激振下基桩横向和竖向振动分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(9): 1751-1759.
- [17] 龙丽丽, 刘东甲, 卢志堂, 等. 基于 Timoshenko 梁模型的完整桩瞬态横向振动模拟计算[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(3): 403-407.
- [18] CHAI H, PHOON K, ZHANG D. Effects of the source on wave propagation in pile integrity testing[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(9): 1200-1208.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 66 页)

- [14] DEGUCHI H, HAYASHI T, SAITO H, et al. Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers[J]. *Applied Physics Express*, 2023, 16: 062004.
- [15] MARIAMI G, UMEMOTO A, NOMURA S. A homemade portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond[J]. *AIP Advances*, 2022, 12: 065321.
- [16] BLASCO G, DÜRICH D, REH H, et al. A sub-ns integrated CMOS laser driver with configurable laser pulses for time-of-flight applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(16): 6547-6556.
- [17] CHEN Z, YAN Y, SHU J, et al. Modulated high power and narrow pulse width laser drive circuit for lidar system [J]. *Electronics*, 2021(7): 10070823.
- [18] MIAO W, HUANG J, CHEN H, et al. Simulation and analysis of pulse driving circuit for semiconductor laser [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 632(4): 042076.
- [19] HUANG H, NI J, WANG H, et al. A novel power stability drive system of semiconductor laser diode for high-precision measurement [J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(5/6): 46272.
- [20] ZHAO Y, TIAN Z, FENG X, et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): s22249989.
- [21] 李金一, 王华睿. 多工作模式下的非温控式半导体激光驱动器设计[J]. *应用激光*, 2023, 43(8): 159-169.
- [22] 王彪, 程林祥, 薛金波, 等. 复合式 VCSEL 型 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统设计 [J]. *激光杂志*, 2023, 44(7): 27-31.
- [23] ZHANG S, ZHANG C, PAN X, et al. High-performance fully differential photodiode amplifier for miniature fiber-optic gyroscopes[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2125.
- [24] 秦正波, 任羊弟, 王辉. 微弱信号检测的超低噪音宽带放大器设计[J]. *现代经济信息*, 2017(5): 339-340.
- [25] 陈晓娟, 樊欣欣, 吴洁. 低频低噪声测量放大器的设计[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(10): 116-119.
- [26] 刘宝衡, 付天晖, 侯文达. 一种低频低噪声前置放大器的设计[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(12): 1-5.
- [27] 王秀华. 前置低噪声放大器的研究与设计[J]. *电子测量技术*, 2013, 36(6): 35-37.
- [28] MOHAN S S, HERSHENSON M M, BOYD S P, et al. Bandwidth extension in CMOS with optimized on-chip inductors[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2000, 35(3): 34655.

(责任编辑 胡亚敏)