

# 饱和砂土中高频振动沉桩环境影响机理研究

何金辉<sup>1</sup>, 李明广<sup>1,2\*</sup>, 陈锦剑<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 201100; 2. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200002)

**摘要:** 近年来, 高频振动沉桩因沉桩效率高、环境效应好等优点而得到了广泛应用。但目前高频沉桩仍存在较大理论空白, 尤其是高频沉桩较于其他频率沉桩的环境影响机理尚不明确, 因此阻碍了工艺的发展。针对该问题, 基于有限差分软件 FLAC 3D 建立了饱和土体振动沉桩数值模型, 并从低频到超高频设置若干工况, 从而对比验证高频沉桩的优势。结果表明, 在避免共振的前提下, 选择合适的高频频率, 有利于增强桩周土体的孔压响应, 促进桩体贯入, 同时可有效控制地表振动, 提高施工的质量。此外, 引入振动桩机免共振施工工艺, 可有效避免低频共振现象的发生, 进一步减少施工对环境的扰动。

**关键词:** 振动频率; 流固耦合; 孔压响应; 位移响应; 共振

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0045-06

## Study on the environmental impact mechanism of high-frequency vibratory piles driven in saturated soil

HE Jin-hui<sup>1</sup>, LI Ming-guang<sup>1,2\*</sup>, CHEN Jin-jian<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201100, China;

2. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** In recent years, high-frequency vibratory piles have been widely used because of their high efficiency and good environmental effect. However, there are still large theoretical gaps for high-frequency piles at present, especially the environmental impact mechanism of high-frequency piles compared with those in other frequencies is still unclear, thus hindering the development of technology. To solve this problem, a numerical model of vibratory pile driven in saturated soil was established based on the finite-difference software FLAC 3D, and several working conditions were set from low frequency to ultra-high frequency to compare and verify the advantages of high-frequency piles. The results show that on the premise of avoiding high-frequency resonance, selecting the appropriate high-frequency is conducive to enhance the pore pressure response of the soil around the pile, thus promoting the pile penetration. Moreover, it can effectively help control the ground vibration, and improve the construction quality. The introduction of resonance-free construction technology for vibratory piles can effectively avoid the occurrence of low-frequency resonance, and further reduce the disturbance to the surrounding environment.

**Key words:** vibration frequency; fluid-solid coupling; pore pressure response; displacement response; resonance

## 0 引言

近年来, 振动桩由于贯入能力强、施工效率高、沉桩质量好、桩身损坏小、施工噪音低等优点<sup>[1]</sup>, 而得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。振动桩贯入时, 振动锤中成对的偏心块产生旋转离心力使桩体竖向振动, 从

而促使桩侧及桩端土受迫振动, 孔压升高而软化甚至液化, 桩体则在自重或较小外荷载作用下顺利贯入<sup>[5]</sup>。

根据振动锤最高施工频率的不同, 可将振动锤分为4类: 低频(15 Hz以内)、中频(15~25 Hz)、高频(25~60 Hz)及超高频(60 Hz以上)<sup>[6]</sup>。其

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978399); 上海市科委项目(18DZ1205304)。

作者简介: 何金辉(1995—), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值算法方面的研究。E-mail: hjhlovesjtu@sjtu.edu.cn。

\*通信作者: 李明广(1987—), 男, 重庆人, 副研究员, 主要从事软土地下工程方面的研究。E-mail: lmg20066028@sjtu.edu.cn。

中, 高频振动沉桩工艺具有沉桩效率高、环保效应显著等优点<sup>[7]</sup>, 因而近年来在工程界广受青睐<sup>[8-11]</sup>。但高频沉桩工艺的理论研究严重滞后于实际, 为此大量学者对高频振动沉桩机理进行了研究, 一定程度上填补了理论的空白。时林丰等<sup>[9]</sup> 基于 Midas GTS NX 建立了高频振动沉桩的三维动力有限元模型, 研究了振动频率、桩径、激振力和土质情况对沉桩环境响应的影响。张智梅等<sup>[12]</sup> 基于有限元软件 ABAQUS 实现了振动桩的全过程贯入, 在此基础上研究了激振频率、静载力、桩径及土质情况对周边环境的影响。邓俊杰等<sup>[13]</sup> 通过现场测试的方法, 分析了桩周土体孔压的变化规律, 并基于单桩竖向静载荷试验, 获得极限承载力并同常规施工方法进行了对比。VIKING<sup>[14]</sup> 通过现场板桩高频振动贯入试验, 研究了振动锤参数、板桩参数、土质参数对桩体可打入性的影响。THONGMUNEE 等<sup>[15]</sup> 通过试验研究了振动锤振幅、频率、桩身尺寸、土体内摩擦角等参数对沉桩效果的影响。ALZAWI 等<sup>[16]</sup> 进行了大量室内试验, 研究了高频沉拔桩引起的土体沉降的问题。

当前研究大多侧重于对高频沉桩环境响应机理及桩身贯入度的分析, 但无法证明高频沉桩相对于其他频率沉桩的优势, 因此在上述 4 种振动锤的选择上仍存在理论指导不足的问题。为此, 本文基于有限差分软件 FLAC 3D, 建立了饱和土体中振动沉桩数值模型, 并研究了从低频到超高频施工频率下桩周土体的响应, 通过对比来验证高频振动沉桩的优势。

## 1 数值模型建立及参数选取

首先基于有限差分软件 FLAC 3D 建立了振动桩的模型。考虑到模型的运算效率, 将桩土系统考虑为 1/4 模型, 从而明显降低了软件迭代求解的负担。桩、土均为实体单元, 通过建立二者之间的接触面考虑桩土间相互作用。

模型中桩的直径  $D=0.6\text{ m}$ , 高度  $L=10.0\text{ m}$ , 初始时刻桩端位于深度  $5\text{ m}$  处。土体厚度为  $20\text{ m}$ , 其水平截面为  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$  的矩形。考虑到计算精度和计算效率间的平衡, 对桩身附近的网格进行了加密, 随距桩身距离的增加网格更加稀疏。模型中网格总数为 27 800, 节点总数为 30 972。初始模型示意图如图 1 所示。

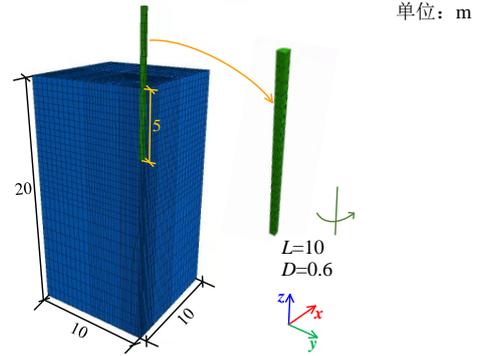


图 1 数值模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model

振动桩下沉时, 打开动力时程流固耦合模块, 以充分考虑振动桩施工引起的土体动力响应及土-水-结构相互耦合作用。为了观察饱和砂土中振动桩贯入引起的孔压累积效应, 采用软件内置 Finn 本构来考虑土体的流固耦合特性。Finn 本构中, 不排水条件下孔压增量  $\Delta u$  与塑性体应变增量  $\Delta \varepsilon_{vd}$  的关系可以表示为:

$$\Delta u = \bar{E}_r \Delta \varepsilon_{vd} \quad (1)$$

式中:  $\bar{E}_r$  为一维卸荷曲线上对应于初始竖向有效应力点  $\sigma'_{v0}$  的切向模量, 可以按下式进行确定:

$$\bar{E}_r = \frac{(\sigma'_{v0})^{1-m}}{mk_2(\sigma'_{v0})^{n-m}} \quad (2)$$

式中:  $m$ ,  $n$  和  $k_2$  为固结仪测定的卸荷曲线中获得的常量;  $\sigma'_{v0}$  为竖向有效应力。在软件中, 关于塑性体应变增量  $\Delta \varepsilon_{vd}$  的计算主要有两种模式, 分别为 Martin 模式和 Byrne 模式。本文选择 Martin 模式进行计算, 表示为:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为剪应变幅值;  $\varepsilon_{vd}$  为累积体积应变;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  和  $C_4$  为材料常量, 对相对密实度为 45% 的二氧化硅砂而言分别取 0.8, 0.79, 0.45, 0.73 为最佳。值得注意的是, Finn 本构实质上是在 Mohr-Coulomb 本构基础上增加了孔压累积的模式, 因此其包含了 Mohr-Coulomb 本构的全部参数。模型中振动桩的桩型为 RC 桩, 并赋予弹性本构。本研究主要数值参数及取值如表 1 所示。

模型建立完成后, 求解初始平衡, 作为后续加载的起始状态。对桩身顶部节点施加振动速度, 桩身在速度加载条件下克服沉桩阻力而向下贯入。其中, 桩顶加载速度  $v(t)$  由静态贯入速度  $v_0$  及激振速度  $v_f(t)$  组成, 表示为:

$$v(t) = v_0 + v_{f_{\max}} \sin(2\pi ft) \tag{4}$$

式中： $v_{f_{\max}}$  为激振速度  $v_f(t)$  的幅值； $f$  为激振速度的频率。

表 1 模型主要参数取值表  
Table 1 Main parameters of the model

材料名称	参数名称	参数取值
地基土	弹性模量/MPa	80
	泊松比	0.3
	内摩擦角/(°)	30
	黏聚力/Pa	0
	干密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 600
RC 桩	体积模量/MPa	$3.80 \times 10^4$
	剪切模量/MPa	$2.85 \times 10^4$
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500

为了研究激振频率对饱和土体动力响应特性的影响, 从低频 ( $f \leq 15$  Hz) 到超高频 ( $f > 60$  Hz) 共设置了 15 组激振频率, 对应于 15 组荷载工况作用在桩顶上 (其中,  $v_0 = 0.02$  m/s 和  $v_{f_{\max}} = 0.05$  m/s 均保持不变)。为使模型具有实际意义, 各频率参数下均使桩身贯入 0.05 m 即停止下沉, 之后对比观察桩周土体的动力响应。

饱和土体中振动沉桩引起的环境扰动主要包括孔隙水压力、土体振动等方面。本文设置了地表质点振动速度监测点以及桩侧沿不同深度分布的孔隙水压力监测点, 其空间分布如图 2 所示。通过对比不同频率下各物理量的时程特性及峰值响应, 获得土体扰动的强弱区间, 验证高频动力沉桩的优势, 为工程设计提供理论依据。

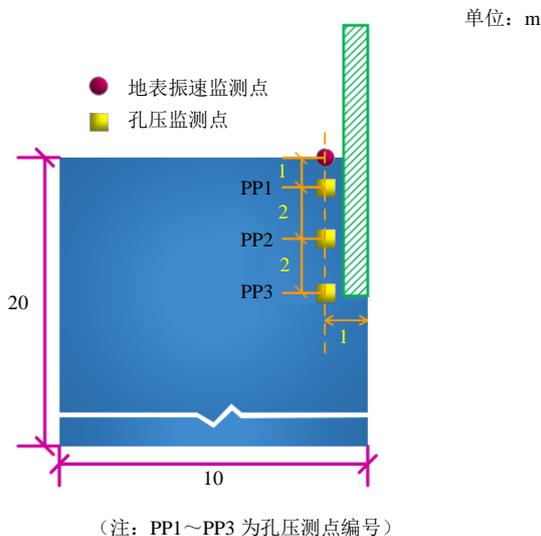


图 2 监测点及监测剖面空间分布示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of monitoring points

## 2 振动沉桩环境影响机理分析

饱和土体中振动沉桩实质上是土-水-结构相互耦合的过程, 必然伴随着土体非线性变形及应力剧烈扰动的现象。研究桩周土体的环境响应机理, 不仅有助于改善桩基施工质量, 而且对邻近地下管线、结构物、地表上覆建筑物的保护具有促进作用。

选取 40 Hz 振动频率条件下终沉时刻的超孔压及位移分布图进行分析。图 3 描述了 40 Hz 频率下终沉时刻的超孔压等值线图。值得注意的是, 对任意施工频率而言, 振动桩停止贯入的前一刻均具有向下的贯入速度, 即处于振动桩的进程期。可以看到, 桩身下部附近土体形成了明显的超孔压区, 且桩端下部土体的超孔压值最高。因此桩侧部分区域和桩端区域的土体发生了软化甚至液化, 从而有效降低了沉桩阻力。桩侧浅层土体孔压响应不明显, 这主要是由浅层土体上覆压力小、易在桩身回程阶段回弹而使孔隙有所扩张引起的。

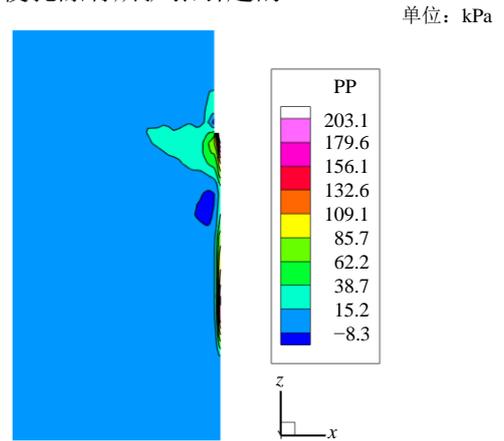


图 3 40 Hz 振动频率下的超孔压等值线图  
Fig. 3 Contours of excess pore pressure at 40 Hz vibration frequency

图 4 为 40 Hz 频率下终沉时刻的位移分布图。竖向位移方面, 桩端下部土体受到较强的冲击作用, 其竖向位移值最大。桩侧土体在桩土界面摩擦的作用下, 也产生了向下的位移, 且越靠近桩身的土体其竖向位移越大。 $x$  向水平位移方面, 桩端附近土体由于受强烈的挤土效应其位移量最大, 此处的高应力水平不断向四周传递引起相应的变形, 且变形量依次衰减。从位移矢量分布图可以看出, 桩侧及桩端土体主要发生竖向变形, 其水平位移相对不明显。桩周土体的位移在桩土界面处最大, 远离该区域则不断减小。施工时应确定主要影响范围, 避免地表建筑发生不均匀沉降破坏。

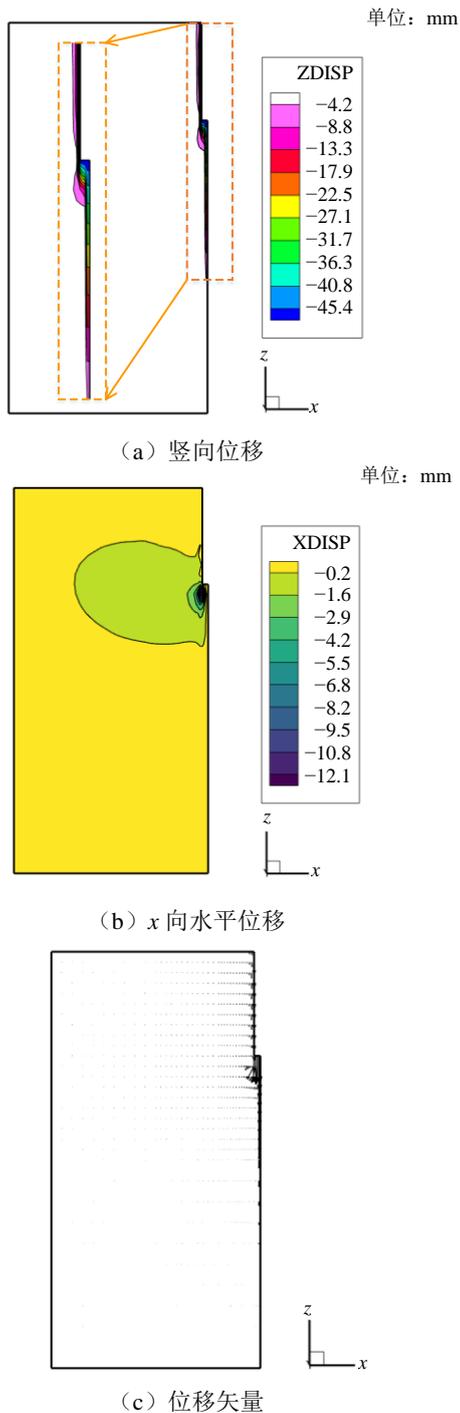


图4 40 Hz 振动频率下的位移分布图

Fig. 4 Displacement distribution at 40 Hz vibration frequency

### 3 振动频率对桩周土体孔压的影响

虽然振动沉桩具有降低沉桩阻力的优点,但关于振动频率对施工质量影响方面的机理仍存在理论空白,因此施工方案的设计存在较大的盲目性。如前文所述,在振动桩周围沿深度方向设置了3个孔隙水压力监测点 PP1~PP3,通过对比不同振动频率下孔压响应规律,可从贯入效率及环境保护的

角度获得施工频率较优解。

图5描述了2 Hz频率下PP1、PP2、PP3三点的孔压时程特性。可以看出,不同测点的孔压均随时间呈周期波动性变化,且一个周期约为0.5 s,与振动荷载的周期一致。在振动桩向下贯入时,桩侧土体受剪切作用,其孔隙收缩,孔隙压力上升;当振动桩向上拔出时,土体由于桩土摩擦而回弹,孔隙结构扩张,孔隙压力有所回落。对于浅层的PP1测点而言,其波动累积现象不明显,而深部的PP2和PP3则呈现明显的累积上升趋势。这种差别主要是由3个测点不同的上覆土重引起的。因此振动桩侧土体超孔压主要在偏下部产生,这是桩侧摩擦力降低的主要原因。

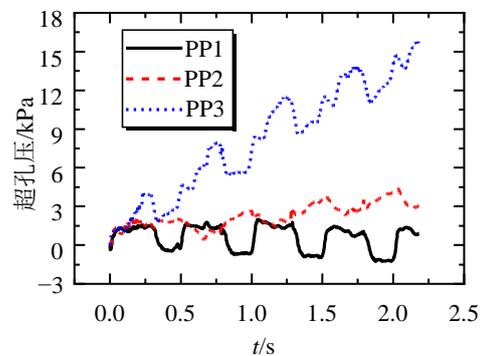
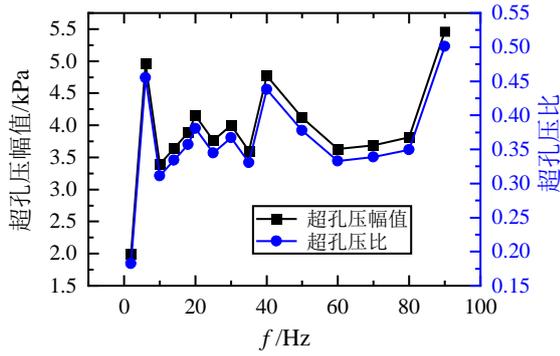


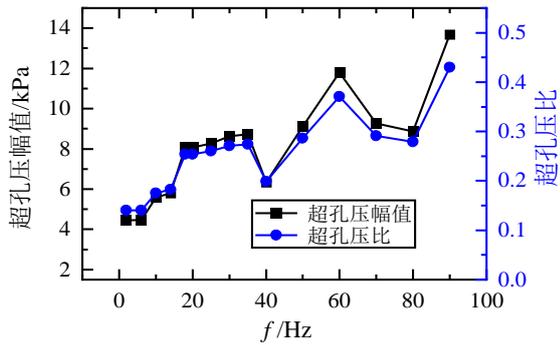
图5 2 Hz 施工频率下3个孔压监测点时程曲线示意图

Fig. 5 Pore pressure at 3 monitoring points under 2 Hz vibration frequency

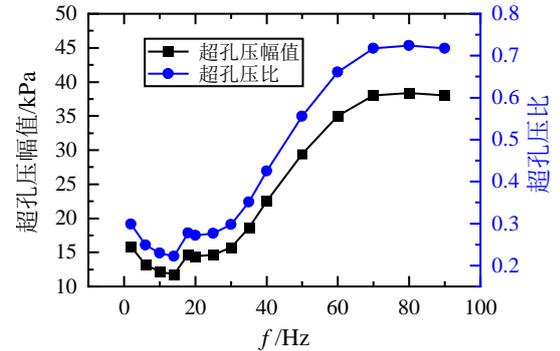
图6描述了3个测点在贯入过程中超孔压幅值及超孔压比(定义为超孔压与初始竖向有效应力的比值)与振动频率之间的关系。首先可以看出,不同深度的测点超孔压幅值随频率呈现的规律不尽相同,主要体现在幅值曲线的拐点位置及数量不一致,这反映了不同深度的土发生共振的频率点不一样,且在90 Hz以内浅层土具有更多的共振点。在忽略共振效应的前提下,各孔压测点的数值均显示出随施工频率增加而上升的趋势,表明较高的施工频率有助于促进桩周土体超孔压的升高,这可能是由高频波波长短,其振动能量主要耗散于桩周邻近土体而引起的。这种效应表明,高频振动沉桩工艺有助于明显软化桩周土体,从而提高沉桩效率,这从超孔压比的变化趋势中也可以得到。此外可以看出,PP1质点在6 Hz附近的超孔压比较高,因此如果启动阶段不避开该频率将引起该处土体较大的破坏,为此有必要引入免共振施工工艺。



(a) PP1



(b) PP2



(c) PP3

图6 孔压测点超孔压幅值及超孔压比随振动频率变化示意图

Fig. 6 Variation of excess pore pressure amplitude and ratio with frequency at pore pressure measuring points

### 4 振动频率对地表振速的影响

振动沉桩时, 桩周土体受迫振动, 可能引起地表建筑振动破坏。为此, 有必要研究不同频率下地表土体的振动强度, 从而为施工频率优化提供依据。在上文所述的地表质点处, 分别对不同施工频率下沿  $x$ ,  $y$ ,  $z$  的 3 个方向的振动速度进行了监测, 其结果整理如下。

图7展示了2 Hz施工频率下地表质点三方向的振速时程曲线。可以看出, 振动速度呈现一定的周

期性, 且周期与施工荷载相一致。 $z$  方向上的振动速度明显大于  $x$  方向和  $y$  方向, 表明地表主要发生竖直振动, 而水平振动强度较弱, 因此振动沉桩时应主要考虑地表竖向振速对上部建筑物的影响。

为了从减振角度考虑施工频率的优化问题, 整理了三方向振速幅值随频率的变化结果, 如图8所示。可以看出, 在任意施工频率下,  $z$  方向的振速幅值均明显高于水平两个方向, 表明垂直方向上振动强度是最高的。因测点距桩身轴线的距离在  $x$  及  $y$  方向上分量是相同的, 故除个别点外,  $x$  和  $y$  方向上的振速幅值随频率的变化规律基本一致, 且数值基本相当, 表明振动波在土体中沿  $x$  方向和  $y$  方向的衰减性质大致相同。3 个方向上除个别共振点处出现极值外, 随着频率的升高振速幅值逐渐降低而趋于平稳, 且在 10 Hz 附近已达到稳定水平。综合来看, 尽管各方向上振动速度的共振频率不尽相同, 但在 2 Hz 施工频率下三方向的振速幅值均为最大。因此若振动桩机能够进行免共振施工, 则能明显减弱周围建筑物的振动破坏强度。

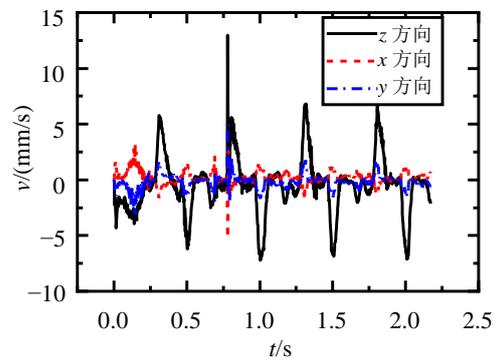


图7 2 Hz 施工频率下地表振速监测结果

Fig. 7 Surface vibration velocity under 2 Hz vibration frequency

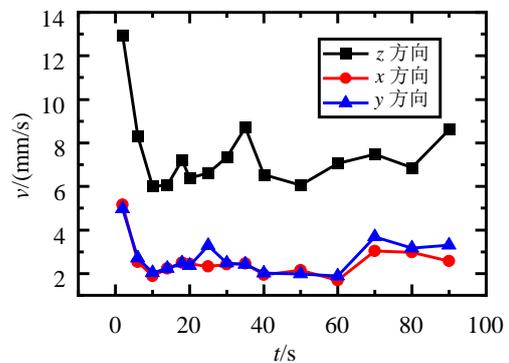


图8 不同施工频率下地表质点三方向振速幅值变化图

Fig. 8 Three-dimensional vibration velocity amplitude of surface particles under different vibration frequencies

## 5 结 论

为了验证高频振动沉桩的优势,基于有限差分软件FLAC 3D,开展了从低频到超高频的数值模拟研究,所得的主要研究结论如下:

(1) 振动桩贯入时,在桩侧土体受剪切作用及桩端土体受挤压和冲击作用的影响下,桩侧及桩端土体均产生了明显的超孔压。高频振动频率条件下,因振动波波长较短而使邻近土体产生更加明显的孔压响应,因此能有效促进振动桩的贯入。

(2) 高频振动沉桩时,桩周土体主要发生垂直方向上的振动,而水平方向上振动强度较弱。如选择合适的高频频率,且避免垂直振速的共振频率点,可明显降低地表峰值振速,从而保护上部建筑物。

(3) 低频施工频率下,可能诱发土体发生共振,从而使浅层土体明显软化,且地表竖向振速亦明显增强,大大提高了工程的风险,因此引入免共振施工工艺十分必要。

值得注意的是,模型共振点受桩土参数影响显著,本文模拟获得的共振特性是在特定参数下获得的,不具有普适性,因此桩土共振的预测理论及方法仍有待进一步地研究。

### 参考文献

- [1] 沈保汉. 桩基础施工技术讲座 第十九讲 振动法沉桩[J]. 施工技术, 2001, 30(11): 44-45.  
SHEN Bao-han. Lecture on pile foundation construction technology vibratory pile driving (19)[J]. Construction Technology, 2001, 30(11): 44-45.
- [2] 张占杰. 渔光互补光伏电站项目振动打桩机施工的介绍及工艺浅析[J]. 太阳能, 2016(6): 74-76.  
ZHANG Zhan-jie. Introduction and process analysis of vibration pile driver construction in Yuguang complementary photovoltaic power station project[J]. Solar Energy, 2016(6): 74-76.
- [3] 董健飞. 振动打桩机施工碎石挤密桩质量初探[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2012(29): 1-4.  
DONG Jian-fei. Discussion on quality of gravel compaction pile constructed by vibratory pile driver[J]. Theoretical Research in Urban Construction: Electronic Edition, 2012(29): 1-4.
- [4] 张春晓. 钢板桩码头振动沉桩施工方案[J]. 工程技术: 引文版, 2016(4): 190-192.  
ZHANG Chun-xiao. Construction scheme of vibration pile sinking for steel sheet pile wharf[J]. Engineering Technology: Citation Edition, 2016(4): 190-192.
- [5] 秦朝辉. 高频振动沉拔钢板桩施工性状及环境影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
QIN Zhao-hui. Investigation on construction characters and environmental impacts of steel sheet pile driving and pulling with high frequency vibrators[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [6] 魏楠. 饱和地基高频振动特性的数值分析与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
WEI Nan. Numerical and experimental analysis on dynamics of saturated ground at high frequencies[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [7] 林煌超. 饱和砂土层中钢管桩高频液压振动沉桩机理研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.  
LIN Huang-chao. Study on mechanism of high-frequency hydraulic vibration sinking of steel pipe pile in saturated sand layer[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [8] 邱维衍. 高频液压振动锤在PHC管桩沉桩中的应用[J]. 福建建设科技, 2017(6): 17-19.  
QIU Wei-yan. Application of high frequency hydraulic vibrating hammer in pile driving of PHC pipe pile[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2017(6): 17-19.
- [9] 时林丰, 谢建斌, 刘克文, 等. 高频振动沉桩对周边环境的影响[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 158-162, 244.  
SHI Lin-feng, XIE Jian-bin, LIU Ke-wen, et al. Influence of high-frequency vibrattion pile-driving on surrounding environment[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(3): 158-162, 244.
- [10] 赖永如. 高频振动锤与传统沉桩锤应用对比的工程实例[J]. 福建建材, 2016(8): 75-76, 105.  
LAI Yong-ru. Engineering example of application comparison between high frequency vibrating hammer and traditional pile driving hammer[J]. Fujian Building Materials, 2016(8): 75-76, 105.
- [11] 朱剑君, 赵欢. 浅析液压高频振动锤在施工中的质量控制[J]. 江苏水利, 2017(12): 61-64.  
ZHU Jian-jun, ZHAO Huan. Analysis on quality control of hydraulic high frequency vibration hammers in construction[J]. Jiangsu Water Resources, 2017(12): 61-64.