文章编号：1006-1355(2019)03-0158-05+244

高频振动沉桩对周边环境的影响

时林丰[1]，谢建斌[1]，刘克文[2]，胡井友[3]，林煌超[1]，王卓蕾[1]

（1. 云南大学 建筑与规划学院，昆明 650500；
2. 十四冶建设云南勘察设计有限公司，昆明 650031；
3. 昆明军龙岩土工程有限公司，昆明 650021）

摘 要：依托云南省昆明市昆纺原址改造项目钢管桩高频振动沉桩工程实例，通过勘察、室内土工试验，基于Midas GTS NX的三维动力有限元数值模拟，从振动频率、桩径、激振力和土层情况4个方面入手，对高频振动沉桩对周边环境的影响进行参数分析。研究结果表明：振动锤振动频率越低，沉桩对周围环境影响越大；在距离钢管桩一定范围内，钢管桩桩径越小，沉桩对周围环境影响越大；振动锤激振力及土体动弹性模量越大，沉桩对周围环境影响越大。最后，基于分析结果，提出降低振动沉桩环境影响的工程措施。

关键词：振动与波；振动沉桩；数值模拟；参数分析；环境影响

中图分类号：TU472 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.031

Influence of High-frequency Vibration Pile-driving on Surrounding Environment

SHI Linfeng[1], *XIE Jianbin*[1], *LIU Kewen*[2],
HU Jingyou[3], *LIN Huangchao*[1], *WANG Zhuolei*[1]

（1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. 14th Ye Construction Yunnan Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650031, China;
3. Kunming Junlong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Kunming 650021, China）

Abstract: Relying on the engineering case of high-frequency hydraulic vibration pile-sinking in the reconstruction project of Kunming Textile Factory in Yunnan province, through on-site investigations, indoor geotechnical tests and three-dimensional dynamic finite element numerical simulation based on Midas GTS NX, the influence of high-frequency vibrating pile-sinking on surrounding environment of the steel tubular pile is analyzed. The analysis is performed in the aspects of excitation frequency, pile diameter, excitation force and soil conditions. The results show that the lower excitation frequency of pile sinking has the greater influence on the surrounding environment. Within a certain area around the steel tubular pile, the smaller pile diameter, the larger vibration force and dynamic elastic modulus of soil can lead to greater influence on the surrounding environment. Finally, according to the research results, the engineering measures to reduce the environmental impact of vibrating pile sinking are proposed.

Keywords: vibration and wave; vibration pile sinking; numerical simulation; parametric analysis; environment impact

与锤击沉桩相比，高频振动沉桩具有贯入性强、沉桩速度快、沉桩质量好、操作简便等突出优点。然而，大量的工程实践表明，振动锤在施工过程中会在桩周土体中产生弹性波，使地面发生振动，当振动超过规定要求时，会对桩周附近建（构）筑物产生不利影响（建筑物开裂、道路损坏、地下管线偏移甚至断裂等），从而干扰周围居民和有关人员的正常工作和生活，影响了社会安定、城市建设以及投资环境[1-2]。因此研究高频振动沉桩对周围环境的影响已经刻不容缓！

目前国内外已有部分关于高频振动沉桩引起周边环境振动的研究。H. R. Masoumi基于子域公式结合运用有限元和边界元研究桩土相互作用机理，

收稿日期：2018-07-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目（11862024，51264037）；云南大学研究生科研创新基金资助项目（YDY17090）
作者简介：时林丰（1991-），男，河南省新乡市人，硕士研究生，主要研究方向为岩土工程。
通信作者：谢建斌（1973-），男，浙江省台州市人，教授，博士，硕士生导师，主要研究方向为岩土工程、防灾减灾工程与水利水电工程。
E-mail: kmxiejb@sina.com

从振动产生的波在土中的传播角度出发预测高频振动打桩引起桩周围的自由振动，并对附近结构的安全进行了安全评估[3]。魏楠研究了国产高频振动锤在饱和软黏土上的工作性能，分析了振动锤振动频率与桩身振动量、地基土体振动量之间的关联性[4]。杨祁等人借助ABAQUS有限元软件模拟高频振动打桩过程，研究了桩周附近土层性质的变化[5]。张龙通过施工现场监测和ABAQUS有限元软件相结合的方法，就振动沉桩在近海工程中对附近地下管廊安全运营产生的影响进行了建模探究与比对[6]。董军锋等人论述打桩振动对建筑物影响形式，列举了有关现行规范标准的振动容许限制，通过一个振动沉桩工程实例，对打桩振动监测的具体方法及影响评价进行了系统分析[7]。张智梅等利用有限元软件ABAQUS对振动沉桩过程进行数值模拟，对比分析了锤击法和振动法两种沉桩方式引起的振动衰减规律[8]。

以往研究中，为了简化模型，大多将土层简化为单一均质土体，仅研究高频振动沉桩在某一种土体中的环境影响，与实际工程不符；此外，在具体高频振动沉桩施工中，涉及各种工艺参数，诸如激振力、激振频率、桩径等，目前国内研究沉桩施工各工艺参数与环境影响两者之间的相关性很少。

因此，本文针对云南省昆明市昆纺原址改造项目钢管桩高频液压振动沉桩工程实例，借助数值分析工具，对土层进行实际划分，并从振动频率、桩径、激振力和土层情况4个方面对周围环境的影响进行系统分析，最后根据研究结果，提出相应的工程措施，进而降低沉桩施工对周围环境的影响。旨在为目前密集城市地带深基坑中钢管支护桩高频振动沉桩的工程应用提供借鉴。

1　工程概况

昆纺原址改造项目深基坑工程位于云南省昆明市盘龙区白龙路西端与白塔路交叉路口西南侧原昆明纺织厂东区、星耀大厦以西约30 m处。该深基坑场地土层自地表以上往下依次为杂填土①、粉质黏土②$_1$、圆砾②$_2$、粉砂③$_1$、粉质黏土③$_2$和粉砂③$_3$。工程勘察同时揭示，该项目场地地下水为第四系松散层孔隙潜水及基岩岩溶水，基坑开挖范围涉及的含水层主要为②$_2$圆砾、③$_1$粉砂和③$_3$粉砂层，但含水量总体较小；另外，基坑开挖范围内各含水层间分布有相对隔水的粉质黏土②$_1$和粉质黏土③$_2$，各土层的水力联系较差。因此，在深基坑开挖深度范围内，地下水含量相对较少。

本工程的基坑侧壁为层状结构的土质地基模型，自稳性差，基坑侧壁破坏模式以变形滑移或剪出破坏为主，局部存在坍塌危害。为确保周边环境、基坑开挖和基础施工的安全，基坑支护选排桩+锚索+挂网喷砼联合支护方式，支护桩采用可回收钢管桩，型号为Q235∅830×12，桩长18 m，通过国产ICE高频振动锤进行施工。

2　沉桩模型的建立

2.1　有限元建模

本文通过大型岩土工程有限元软件Midas GTS NX对沉桩过程进行数值建模。在有限元建模过程中，需对以下几个关键问题进行简要说明。

1）有限边界处波反射的处理

通常在进行静力数值模拟分析时，边界范围的选择要求不能影响到实际变形结果，边界设置可以完全自由或固定。然而，由于该模型为动力分析，在数值模拟过程中势必会产生一定的应力波，当传递到有限元边界处时会发生反弹，应力波的反弹易导致数值模拟结果不精确，若力求准确而设置较大边界则计算单元量和内存、时间剧增，故难以实现。为解决该问题，本模型采用底面为完全固定边界，上表面为自由边界，4个侧面采用黏弹性边界，从而抵消应力波反弹。

2）土层情况的模拟

在以往的研究中，为了简化模型，通常将实际工程的土层简化为单一均质的土体，这与实际工程相矛盾。本模型按照实际土层厚度进行分割，并赋予其相对应的土层参数，与实际工程情况更为相符。

3）桩土之间界面单元的模拟

本模型通过在钢管桩管壁与土体接触面之间设置库伦摩擦型接触界面单元来模拟桩土之间的滑动效果。该界面单元采用Coulomb friction理论，即假设界面摩擦力、摩擦系数和施加在摩擦界面上的法向约束力成比例。

4）模型网格的划分

本模型通过析取的板单元来模拟钢管桩，土体采用混合网格生成器生成的六面体实体单元，网格划分采用播种线尺寸控制。为保证模型分析的精确度和准确性，钢管桩竖直以下方向土体采用局部加密划分。本模型的边界尺寸范围为：长×宽×高=24 m×24 m×36 m，模型共有79 098个单元，46 610节点。

2.2　数值分析中的基本假设和条件

1）采用newmark直接积分法进行分析计算，将时间t视为积分参数从而求解动力平衡方程，以便充

分考虑材料刚度及阻尼非线性特征。

2）由于基坑开挖深度范围内地下水含量较少，不考虑土体中孔隙水压力消散的影响。

3）由于钢管桩弹性模量较大，其刚度远远大于岩土材料，受力后以弹性形变为主，故本文中的钢管桩选用线弹性模型本构。土体则考虑为弹塑性材料，采用德鲁克-普拉格（Drucker-Prager）模型本构。

4）考虑沉桩之前土体初始地应力场的影响。

3 高频振动沉桩环境影响参数分析

本文首先基于大型岩土工程有限元软件Midas GTS NX建立三维动力有限元模型，然后分别从振动锤振动频率、钢管桩直径、振动锤激振力和土层情况4个方面入手，研究沉桩过程中钢管桩桩周地表竖向位移和地表竖向加速度随距钢管桩距离的变化规律，研究这4个因素与环境影响评估指标之间的关系。

3.1 土层物理力学性能指标

通过场地工程勘察，配合标准贯入度试验、重型动力触探试验、地震波速测试、地微振观测进行工程场地内土体物理力学特性试验研究，获取土层和钢管支护桩的物理力学性能指标。结果如表1和表2所示。

3.2 加载模型

桩位于模型中心，采用Q235∅830×12的钢管桩，桩长L=18 m，高频振动沉桩模型所施加于桩顶的打桩力可由如下公式所示

$$F_d = F_0 + F_v = F_0 + F_c\sin(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

式（1）中：F_0为静载力；F_v为激振力；F_c为离心力；ω为角频率；t为振动时间；φ_0为初始相位角。本工程采用ICE高频液压振动锤进行施工，该情况下F_0=85.5 kN；F_c=1 250 kN；ω=157 rad.s^{-1}；f=25 Hz；φ_0=0。故公式（1）可表示为

$$F_d = 85.5 + 1250\sin(157t) \quad (2)$$

为了便于观看曲线趋势，现只截取10 t=0.4 s沉桩荷载曲线如图1所示。

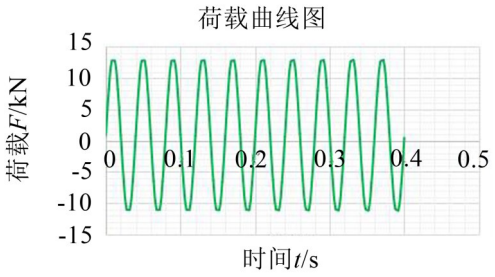


图1 荷载曲线图

综上所述，基于大型岩土工程有限元软件Midas GTS NX建立的高频振动沉桩三维动力有限元整体模型如图2所示。

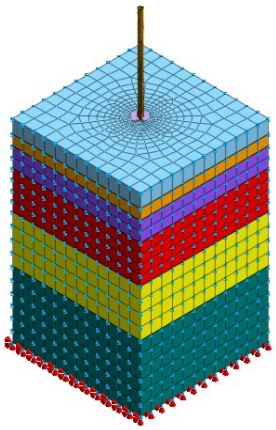


图2 三维有限元整体模型

3.3 评估指标的采用

高频振动沉桩对周围环境的影响主要体现在以下两个方面。首先，振动锤施加于钢管桩上的振动力以波的方式传递到与之接触的周围土层中，从而使周围土体产生振动，如果振动幅值超过规范要求，则建设于该土体上的建(构)筑物将发生振动破坏；其次，振动可能会引起周围土体的“软化”甚至“液

表1 土体参数

层号	土层名称	层厚/m	重度/(kN·m^{-3})	粘聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)	动弹性模量/MPa	泊松比
1	杂填土①	2.5	19	21.6	13.3	160	0.46
2	粉质黏土②$_1$	1.9	18.5	40.3	17.8	210	0.43
3	圆砾②$_2$	3.6	21	5	30	482	0.38
4	粉砂③$_1$	7	18.9	11.8	23.2	327	0.39
5	粉质黏土③$_2$	8.7	19.1	41	18.3	301	0.41
6	粉砂③$_3$	12.3	19.3	11.8	23.2	368	0.39

表2 钢管桩参数

材料类型	重度/(kN·m^{-3})	弹性模量/(GPa)	泊松比	桩长/m
Q235钢	78	210	0.28	18

化”，从而使土体的强度大幅度降低，引起建(构)筑物发生不均匀沉降破坏。研究表明，建(构)筑物所承受的振动破坏与地表竖向加速度之间的关联性很大[9]，因此可以通过地表竖向加速度反映振动沉桩环境影响的大小。同时，高频振动沉桩引起的周围土体竖向位移可直接导致建(构)筑物发生不均匀沉降破坏。综上所述，可以通过地表竖向位移和地表竖向加速度对沉桩引起的环境影响进行评估。

3.4　参数分析

1）振动频率参数影响分析

选取20 Hz、25 Hz、30 Hz、35 Hz共4组不同的振动锤振动频率，保持其他模型参数不变，在桩顶施加10 s激振力，分析桩周土体竖向位移沉降量和土体竖向加速度随距钢管桩距离的变化规律。结果如图3－图4所示。

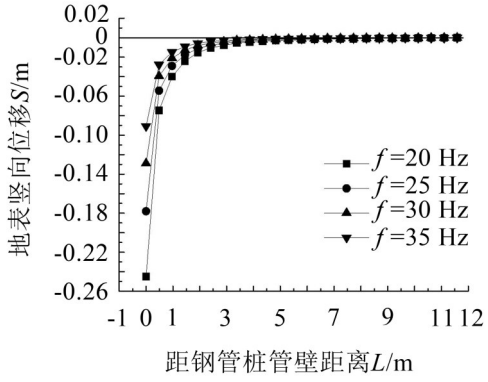


图3　不同频率桩周地表土体竖向位移变化曲线

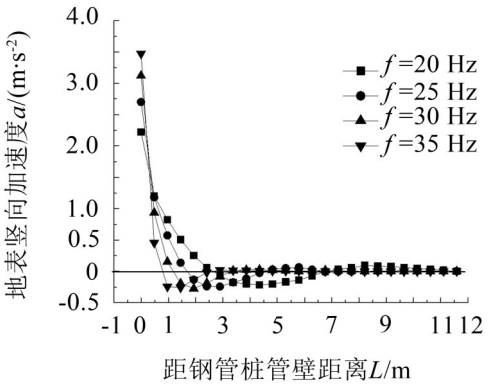


图4　不同频率桩周地表土体竖向加速度变化曲线

由图3－图4可知，随着振动频率的提高，地表竖向位移逐渐减小，地表竖向加速度衰减逐渐增大，即对周边环境的影响越来越小。因此，适当提高振动频率对减小振动沉桩造成的环境影响非常有利。

2）桩径参数影响分析

选取0.83 m、1.00 m、1.20 m、1.40 m共4组不同的钢管桩直径，其他模型参数不变，在桩顶施加10 s激振力，分析钢管桩直径与环境影响评估指标之间的关联性。结果如图5－图6所示。

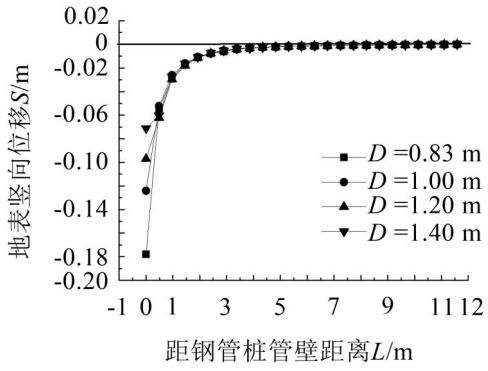


图5　不同桩径桩周地表土体竖向位移变化曲线

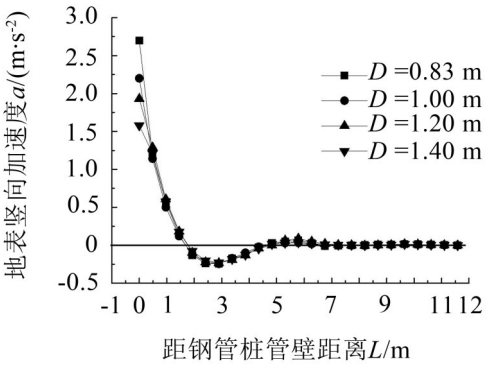


图6　不同桩径桩周地表土体竖向加速度变化曲线

由图5－图6可知，从本文研究的这4种钢管桩直径来看：钢管桩各直径对地表土体竖向位移的影响主要集中在离管壁2 m范围之内，在这一区间，D=0.83 m对地表土体扰动影响相对较大一些。当超过2 m范围时，随着距钢管桩管壁距离的增大，各桩径对土层影响逐渐降低且差异减小。

3）激振力参数影响分析

选取0.8F_c、1.0F_c、1.2F_c、1.5F_c共4组激振力，其他模型参数不变，在桩顶施加10 s激振力，分析管壁周围土体竖向位移沉降量和土体竖向加速度，结果如图7－图8所示。

由图7－图8可知，不同激振力下的钢管桩高频振动沉桩引起的环境影响主要集中在离管壁2 m范围之内。在该范围内，随着沉桩激振力的增大，桩周地表竖向位移逐渐增大，地表竖向加速度衰减逐渐减小，当激振力为1.5 F_c时对桩周土体扰动最大。当超过2 m范围时，各激振力对土层影响的差异性逐渐变小。因此在达到最大激振力的一定范围内随着激振力的增大，高频振动沉桩引起的桩周土体扰动也随之增大。

4）土体参数影响分析

已有研究表明，土质情况是影响地面振动传播和振动施工效应影响的最主要因素[2]。选取本文建

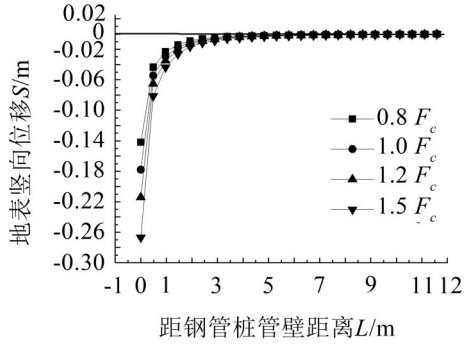


图7 不同激振力桩周地表土体竖向位移变化曲线

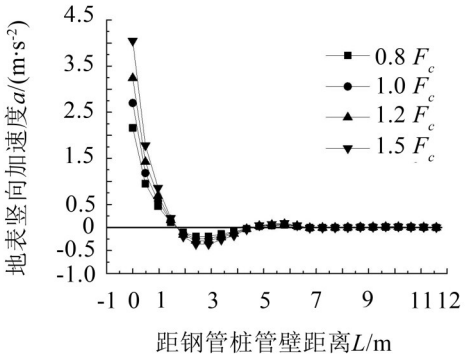


图8 不同激振力桩周地表土体竖向加速度变化曲线

模中6种不同土体，分别为：动弹性模量为160 MPa的杂填土；动弹性模量为210 MPa的粉质黏土；动弹性模量为482 MPa的圆砾；动弹性模量为327 MPa的粉砂；动弹性模量为301 MPa的粉质黏土；动弹性模量为368 MPa的粉砂。因为只研究机理性状，故采用单一均质土体，所采用的土体物理力学性能指标见表1所示。其他模型参数不变，在桩顶施加10 s激振力，分析不同土质条件下沉桩施工所产生的环境影响。结果如图9－图10所示。

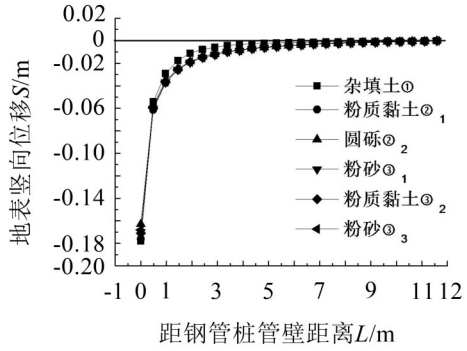


图9 不同土体下桩周地表竖向位移变化曲线

由图9－图10可知，在6种不同土质情况下，高频振动沉桩对周围环境影响的趋势大致相同，即随钢管桩管壁距离的增大，地表竖向位移和地表竖向加速度逐渐减小。通过对比分析不同土质条件下桩周地表竖向位移和桩周地表竖向加速度的变化规律

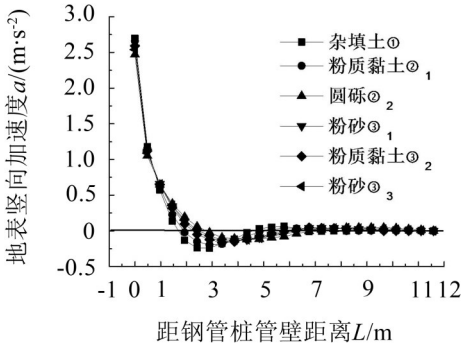


图10 不同土体下桩周地表竖向加速度变化曲线

可知，土体动弹性模量越大，周边土体竖向位移越大，竖向加速度衰减速度越小，既对周边环境影响越大，在圆砾土层中的影响最为明显，杂填土层中的影响最小。因此，在高频振动沉桩过程中，坚硬土层相比于软弱土层更容易引起较大的环境影响。

4 结 语

(1) 通过振动频率参数分析可知，随着振动频率的提高，高频振动沉桩对周围环境的影响逐渐变小，因此在工程实践中适当提高振动锤的振动频率，有利于减小振动沉桩对周围环境的影响。这也是为什么振动桩锤朝中频、高频以及超高频方向发展的重要优势和原因之一。

(2) 桩径参数影响分析结果表明：在一定区间内，桩径越小，则对地表土体扰动影响相对越大，但是超过该区间，桩径与高频振动沉桩环境影响之间的相关性很小。因此不建议在工程实践中通过改变桩径来减小振动沉桩对周围环境的影响。

(3) 通过激振力参数影响分析发现，随着激振力的提高，高频振动沉桩对周围环境的影响越来越大。因此在满足沉桩能力和沉桩效率的情况下，应尽量减小激振力，进而减少振动沉桩对周围环境的影响。

(4) 振动锤施加于钢管桩上的能量不变，桩在较硬土层情况下贯入速度小，则传递到周围土中的振动能量就越大，从而对周围土体产生较大的扰动；而在软弱土层情况下钢管桩快速下沉，大部分能量消耗在桩的沉桩过程中，则传递到周围土中的振动能量较小，则对周围土体产生较小的扰动。

因此，在密集城市地带的高频振动沉桩实际工程中，可以通过适当提高振动频率和降低沉桩激振力等方式来减小高频振动沉桩对周围环境的影响。同时，研究结果表明在软弱的杂填土以及黏土层中应用高频振动沉桩时产生的环境影响较小，因此该土层情况下适宜应用高频振动沉桩技术。

（下转第244页）