

赵一锦,谢建斌,时林丰,等. 高频振动沉桩对人的环境影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022, 37(3):35-43. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.006

ZHAO Y J, XIE J B, SHI L F, et al. Influence of High-frequency Vibration Pile-driving on the Surrounding Environment [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):35-43. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.006

高频振动沉桩对人的环境影响

赵一锦¹, 谢建斌^{1,2*}, 时林丰¹, 王卓蕾¹, 陆子豪¹

(1. 云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明军龙岩土工程有限公司, 云南 昆明 650021)

摘要:为研究高频振动沉桩对人的影响,依托云南省昆明滇池国际会展中心4号地块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 建立三维有限元模型.从激振频率、偏心距和土层情况3个方面入手,对高频振动沉桩对人的环境影响进行研究.研究表明:针对普通振动锤,振动沉桩对人的环境影响随着激振频率的增大而增大;针对无级调频调矩振动锤,振动沉桩对人的环境影响随着激振频率的增大而减小;在满足工程要求的情况下减小振动锤的偏心距,有利于减小振动沉桩对人的影响;钢管桩振动沉桩在泥炭质土中施工对人的环境影响最大.最后,提出一种能有效降低振动沉桩对周边人的环境影响方案.

关键词:高频振动沉桩;有限元;参数分析;环境影响

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0035-09

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

ZHAO Yijin¹, XIE Jianbin^{1,2*}, SHI Linfeng¹, WANG Zhuolei¹, LU Zihao¹

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Kunming Junlong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Kunming 650021, China)

Abstract: In order to study the influence of high-frequency vibration pile driving, based on the example of high-frequency vibration pile-sinking of steel pipe piles in No. 4 plot of Kunming Dianchi International Convention and Exhibition Center, Yunnan Province, a three-dimensional finite element model is established based on Midas GTS NX through on-site investigations and indoor geotechnical tests. Starting from the three aspects of excitation frequency, eccentricity and soil condition, the environmental impact of high frequency vibration pile-sinking on the surrounding residents is studied. Results show that the environmental impact of vibration driven pile on the surrounding residents increases with the increase of excitation frequency for common vibrating hammer. Vibration hammer with stepless frequency and torque modulation, the environmental impact of vibration driven pile on the surrounding residents decreases with the increase of excitation frequency. The eccentricity of the vibrating hammer is reduced when the engineering requirement is satisfied. It is beneficial to reduce the impact of vibration pile sinking on the nearby residents. The construction of vibrating steel pipe pile in peat soil has the greatest impact on human environment. Finally, according to the results of parameter analysis, this paper presents a

收稿日期:2019-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11862024);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2019Y0020)

*通信作者,Email:kmxiejb@sina.com

method to effectively reduce the impact of vibration pile sinking on human environment.

Keywords: high-frequency vibration pile-driving; finite element; parametric analysis; environment impact

随着施工技术水平的提高,桩基施工中高频振动沉桩施工法应用越来越广泛.高频振动沉桩具有噪声低、对周边环境影响小、沉桩效率高、地层适应性强,能满足不同土质中沉桩要求等优点^[1-2].然而,根据以往的振动沉桩工程实践发现:在桩振动贯入过程中,桩周土体产生振动波,带动周边地面产生振动,当振动超过一定范围,严重影响现场施工人员和周边居民身心健康.因此,研究高频振动沉桩对周边居民的影响具有重要意义^[3].

近年来,国内外部分学者着重研究高频振动沉桩施工过程中对周边环境的影响.Masoumi等^[4]在桩土相互作用公式基础上提出并建立耦合有限元-边界元振动沉桩模型,分析振动沉桩过程中桩周土体自由振动;Junyoung Ko^[5]利用耦合欧拉-拉格拉日法,研究开口桩在单一土层和复合土层中桩振动贯入过程中产生的挤土效应;张智梅等^[6]利用有限元,研究振动锤、桩体和土层参数变化下振动沉桩对周边环境的影响;杨祁等^[7]采用数值模拟,分析高频振动沉桩过程中振动频率、静载力大小和桩贯入时间长短对桩周土层动力特性影响;罗春雷等^[8]利用有限差分法,分析振动沉桩过程中振动频率、静荷载和弹性模量对贯入深度和液化特性的影响;孟伟^[9]采用耦合欧拉法,研究高频振动沉桩过程中桩土相互作用和群桩效应;时林丰等^[10-12]采用数值模拟、正交分析、灰色关联度理论,对钢管支护桩高频振动沉桩位移影响因素分析;董军锋等^[13]主要研究打桩过程中桩周土体动力响应,采用实验测试法,分析打桩振动测试的具体方法及影响评价;肖勇杰等^[14]采用正交试验和数值模拟相结合的正交有限元法,分析振动贯入过程中各种因素下对施工安全距离的影响程度;姜彤等^[15]通过自行设计沉桩模型试验系统,研究既有桩侧新桩和单桩沉桩过程中周边土体所产生的变形场.

国内外在对高频振动沉桩的研究中,重点多放在对周边环境的影响的分析,缺少分析这些因素对人的环境影响.相关研究表明:振动对人体造成危害不可忽视,振幅在小范围内,振感使人产生“不舒适”的心理状态,对身体并无影响;增大振幅到下一阶段,不仅产生心理上的“不舒适”,而且出现轻微生理反应;继续增大振幅达一定幅度值时,不仅对人的心理和生理上造成一定的影响,严重时还会带来一定的病理性损伤;振动对身体产生的损伤被列入卫计委公布的14种职业病之一^[16].针对这一状况,以昆明滇池国际会展中心4号地块项目钢管支护桩高频振动沉桩工程为例,建立三维有限元模型,从激振频率、桩锤偏心距和土层情况这3个方面分析高频振动沉桩对人的环境影响.根据结果,提出一种对现场施工人员和周边居民影响小的高频振动沉桩工程措施,为其他工程施工提供部分参考.

1 工程概况

如图1所示,图中标记处为云南昆明滇池国际会展中心4号地块,位于昌宏西路与环湖东路交叉口西北侧;紧邻五甲塘湿地公园,距离滇池1.0 km,昆明滇池盆地西南部;东北方和西侧紧邻近两条宽30 m的规划路,东北侧规划路正在路基施工,西侧规划路未修建;现场会展中心项目C-2地块和展馆正在施工;用地红线距离环湖东路边缘线约50 m,沿环湖东路呈南东—北西向从场地南侧经过.

对施工场地内人员实地调研发现:在振动沉桩过程中,周边施工人员有不同程度的心理“不舒适”,身体上感觉不舒适、恶心、头晕和出冷汗等轻微生理反应,少数工作人员出现病理改变.



图1 滇池国际会展中心4号地块

2 三维有限元模型的建立

2.1 有限元建模

利用 Midas GTS NX 三维有限元软件对钢管桩沉桩过程建模中,对以下关键点简要说明:

1) 有限元边界处理

针对模型进行动力分析,计算过程中会产生应力波,边界长度不足或边界条件设置不当会产生应力波反弹,对计算结果造成偏差.因此,模型底面设置为完全固定边界,顶部为自由边界,4 竖向侧面设置为黏弹性边界,消除沉桩过程中波反射.

2) 桩土之间界面单元

土体与钢管桩接触面为库伦摩擦型界面单元,满足钢管桩贯入过程中的滑移效果.界面采用 Coulomb friction 理论,即假设界面摩擦系数、摩擦力和施加在摩擦界面上的法向约束力成比例.

3) 土层划分

根据工程实际土层厚度和参数进行分割,并赋予相应的土层参数.

4) 网格划分

钢管桩通过析取板单元生成,土体为六面体实体单元,通过混合网格生成器生成,网格划分通过播种线尺寸控制.钢管桩周边土体局部加密.

2.2 建模的基本假设

1) 只考虑桩周地面速度、加速度和位移,不考虑沉桩前后超静孔隙水压力变化.

2) 采用 newmark 直接积分法,积分参数选用时间 t 为变量,考虑材料刚度和阻尼非线性特征.

3) 钢管桩选用线弹性模型本构,土体采用 Drucker-Prager 模型本构.

4) 考虑初始地应力.

2.3 计算模型

综上所述,综合考虑建模时边界约束条件,土体单元等各种影响因素,设定本模型的边界尺寸范围:长 \times 宽 \times 高=24 m \times 24 m \times 36 m,并依据该工程实际地层进行土层划分.钢管桩的型号为 Q235 ϕ 830 \times 12,桩长 $L=18$ m,打桩力 F_d 按式(1)计算.

$$F_d = F_0 + F_v = F_0 + F_c \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

式中: 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.深基坑钢管支护桩采用 ICE815C 高频液压振动锤进行沉桩施工,在该情况下 $F_0=85.5$ kN; $F_c=1\ 250$ kN; $\omega=157$ rad/s; $f=25$ Hz; $\varphi_0=0$.故式(1)可表示为

$$F_d = 85.5 + 1\ 250 \sin(157t). \quad (2)$$

截取 $5T=0.2$ s 激振荷载曲线如图 2 所示.

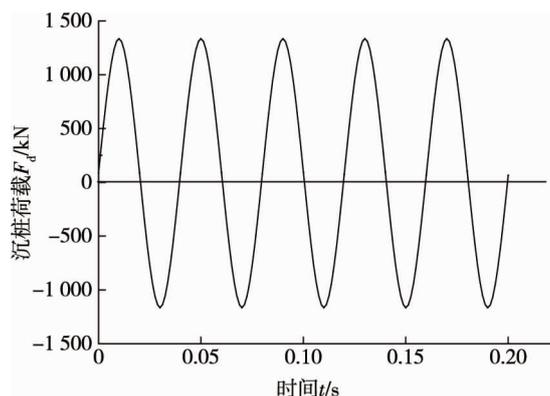


图2 荷载曲线

2.4 参数取值

基于场地工程勘察,地震波速测试、标准贯入试验、动力触探试验、等地层物理力学特性试验,获得土层的物理力学指标,见表1数据.选用 Q235 型钢管桩,桩长 18m、重度为 78 kN/m^3 、弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.28.综上所述,利用三维有限软件 Midas GTS NX 建立高频振动沉桩三维动力有限元模型,如图 3 所示.

表 1 土体参数

层号	土层名称	层厚/m	重度/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	动弹模/MPa	泊松比
①	杂填土	4.3	17.5	33.9	11.1	143	0.46
① ₁	素填土	4.5	18.3	35.8	9.1	176	0.20
②	黏土	1.4	18.9	67.7	12.1	250	0.40
② ₁	粉土	1.8	18.5	54.5	18.7	221	0.35
② ₂	黏土	1.6	17.5	37.6	9.2	123	0.41
③	黏土	2.0	16.8	17.4	7.7	90	0.43
③ ₁	泥炭质土	2.0	11.2	17.7	6.1	41	0.35
③ ₂	粉土	5.1	19.0	17.3	17.7	568	0.32
④	粉土	3.7	18.6	24.9	16.8	319	0.33
④ ₁	黏土	2.3	16.6	32.9	10.6	113	0.42
④ ₂	泥炭质土	2.3	10.9	40.0	9.0	74	0.35
⑤	黏土	3.7	17.7	43.1	11.4	163	0.40
⑤ ₁	粉土	1.3	19.0	15.5	16.1	187	0.36

2.5 模型验证

有限元模拟结果与 SSPM 解析解如图 4 所示.图 4 为有限元模型计算与解析解对比曲线,Y 轴表示地表受扰动后产生的竖向位移值.对比 2 条曲线变化规律,模型计算土移值与解析解位移值基本吻合,离散型较小,因此,采用此方法进行数值模拟,钢管桩振动沉桩计算结果具有可靠性.

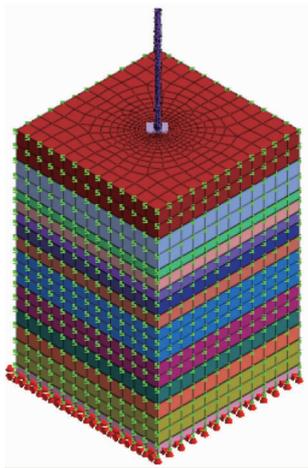


图 3 三维有限元模型

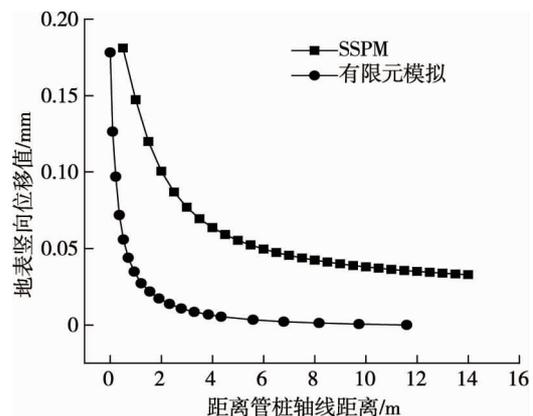


图 4 有限元模拟与 SSPM 对比

3 对人的环境影响参数分析

3.1 参数分析

振动对人的环境影响,国内外统一采用位移、速度、加速度这 3 个标准来衡量,用加速度作为评价标准占据多数.

1) 计权等效加速度 a_w

目前研究振动对人的环境影响研究,普遍采用该标准评价,如式(3).

$$\alpha_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \alpha_w^2 t dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: a_w 为各个时刻的计权等效加速度; T 为测量时间; t 为时间变量.

2) 铅垂向 Z 振级 VL_Z

由于 a_w 值较小且变化范围大, 记录和处理有较大难度. 因此, 引入振级概念, 又称为铅垂向 Z 振级 VL_Z . 计算公式如式(4).

$$VL_Z = 20 \log \frac{\alpha_{wz}}{\alpha_0} \quad (4)$$

式中: α_0 为基准加速度, 10^{-6} m/s^2 ; α_{wz} 为铅垂 Z 向的计权等效加速度.

依据《城市区域环境振动标准》(GB10070—1988)^[17] 规范内各区域 Z 振级标准, 如表 2 所示. 用铅垂向 Z 振级 VL_Z 作为振动评价指标. 将 65 dB 作为铅垂向 Z 振级 VL_Z 的限值. 从激振频率、偏心距和土层情况 3 个方面入手, 对振动沉桩对周边人的环境影响进行参数分析. 通过对比分析 A, B 这 2 点(见图 5) 铅垂向 Z 振级 VL_Z 的时程曲线和铅垂向 Z 振级 VL_Z 沿径向距管桩壁距离的变化规律, 来研究不同工况下高频振动沉桩对人的环境影响.

表 2 各区域 Z 振级标准值 dB

适用地带范围	昼间	夜间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
商业、工业区	75	72
交通干线两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

3.1.1 激振频率参数分析

选取 15, 20, 25, 30 Hz 这 4 种不同激振频率工况进行研究. 振动锤选取普通振动锤和无级调频调距振动锤, 普通振动锤只可以改变振动频率大小, 不可以改变偏心距大小; 无级调频调距振动锤不仅可以调整振动锤的频率, 还可以调整偏心距大小.

1) 最大激振力 F_c 与频率 f^2 呈正线性关系

只改变沉桩频率, 在钢管桩桩顶施加 10 s 激振力, 得 4 种不同激振频率工况下 A, B 这 2 点铅垂向 Z 振级 VL_Z 的时程曲线和铅垂向 Z 振级 VL_Z 沿径向距管桩壁距离的变化规律如图 6~图 8 所示.

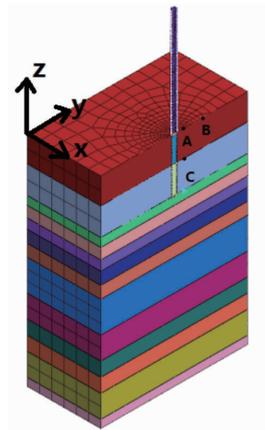


图 5 3 个分析点空间位置

由图 6 和图 7 可知: 在 4 种不同激振频率下, 随沉桩时间的增加, A, B 这 2 点铅垂向 Z 振级 VL_Z 逐渐增大, 且 A, B 这 2 点时程变化曲线趋势基本相同. 对比 4 条曲线变化规律可知: 增大激振频率, 振动沉桩过程中 A, B 点铅垂向 Z 振级 VL_Z 也增大, 即对周边人的环境影响越大; 当激振频率为 30 和 25 Hz 时, 这 2 种工况时程变化曲线非常接近, 说明随激振频率增大, 各工况之间的铅垂向 Z 振级 VL_Z 差异性逐渐减小.

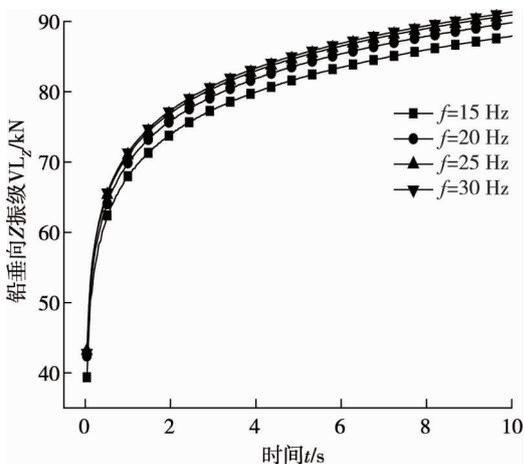


图 6 不同频率 A 点铅垂向 Z 振级 VL_Z 时程变化曲线

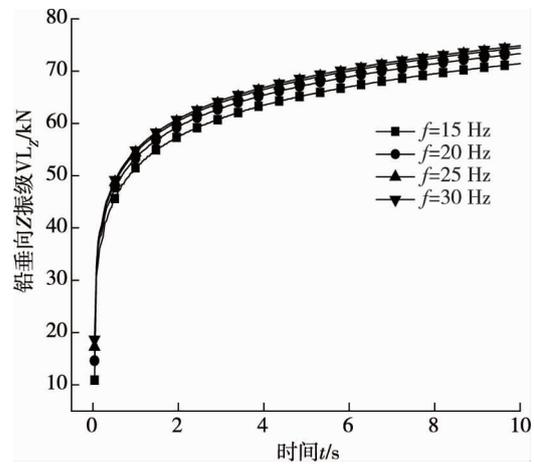


图 7 不同频率 B 点铅垂向 Z 振级 VL_Z 时程变化曲线

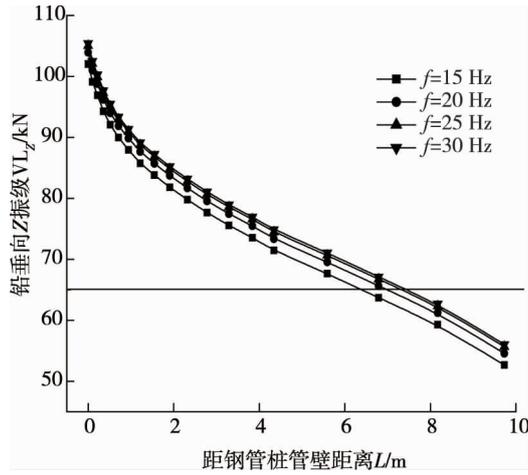


图8 不同频率桩周铅垂向Z振级VL_Z变化曲线

由图8可知:4种不同激振频率下,随沿管桩壁径向距离的不断增大,铅锤向Z振级VL_Z呈现衰减趋势.

综上所述,对该普通振动锤,如果场地没有特殊要求,尽量提高激振频率,能大幅提高沉桩效率,同时不至于对周边施工人员和附近居民的环境影响过大;如果场地有特殊要求,尽量施工时把激振频率控制在 ω_{cp} (破坏频率)20 Hz左右,沉桩效率不至于太低,对周边施工人员和附近居民的环境影响也不至于太大.

2) 最大激振力 F_c 不变,改变 f 和 M_{ci} (偏心距).

在15,20,25,30 Hz这4种频率下A,B这2点铅垂向Z振级VL_Z的时程曲线和桩周附近铅垂向Z振级VL_Z沿径向距管桩壁距离的变化规律如图9~图11所示.

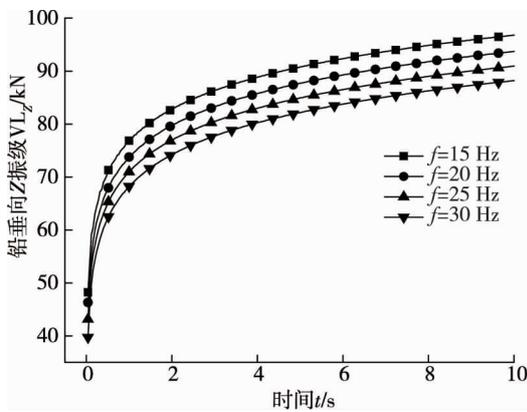


图9 不同频率A点铅垂向Z振级VL_Z时程变化曲线

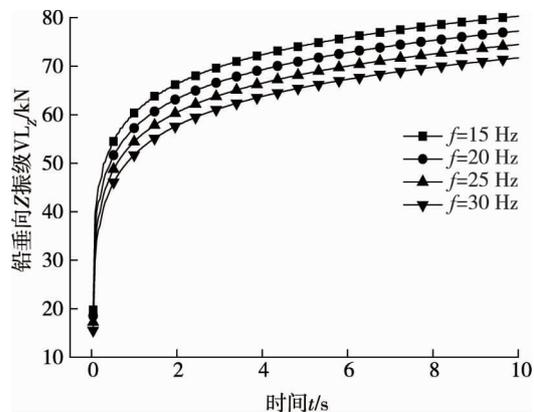


图10 不同频率B点铅垂向Z振级VL_Z时程变化曲线

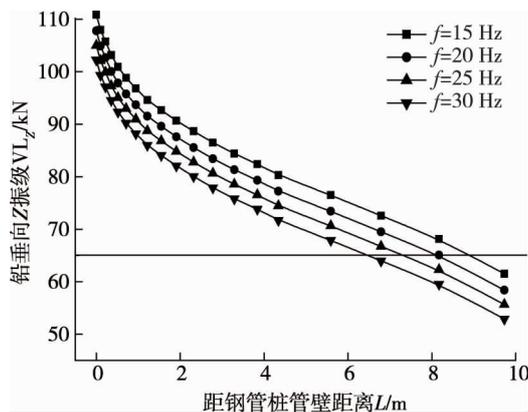


图11 不同频率桩周铅垂向Z振级VL_Z变化曲线

由图9和图10可知:在4种不同激振频率下,随沉桩时间的增加,A,B这2点铅垂向Z振级 VL_z 逐渐增大,且A,B这2点时程变化曲线趋势基本相同.对比4条曲线变化规律可知:减小激振频率,振动沉桩引起这2点的铅垂向Z振级 VL_z 增大,即对人的环境影响越大;任意2个相邻工况之间的铅垂向Z振级 VL_z 差值基本相同.

由图11可知:在这4种不同频率下,随沿管桩壁径向距离的不断增大,铅垂向Z振级 VL_z 逐渐减小.对比4条曲线变化规律可知:激振频率减小,振动沉桩桩周铅垂向Z振级 VL_z 增大,即对人的环境影响越大; $f=15\text{ Hz}$ 时桩周径向8.93 m范围内受影响; $f=20\text{ Hz}$ 时桩周径向8.12 m范围内受影响; $f=25\text{ Hz}$ 时桩周径向7.25 m范围内受影响; $f=30\text{ Hz}$ 时桩周径向6.45 m范围内受影响.因此,在这4种不同频率工况情况下,振动沉桩对人的扰动范围从大到小依次为:15,20,25,30 Hz.

综上所述,对该无级调频调矩振动锤,如果周边无施工人员,可尽量减小激振频率,提高桩振动贯入速率;如果周边有施工人员或居民,适当提高激振频率,有利于减小振动沉桩对附近居民的影响.

3.1.2 偏心距参数分析

选取无级调频调矩振动锤中45.7,50.7,55.7,60.7 $\text{kg}\cdot\text{m}$ 这4组振动锤偏心距进行参数分析.

保持其他参数不变,在钢管桩桩顶施加10 s激振力,在4种不同工况下A,B这2点铅垂向Z振级 VL_z 的时程曲线和桩周附近铅垂向Z振级 VL_z 沿管桩壁径向距离的变化规律如图12~图14所示.

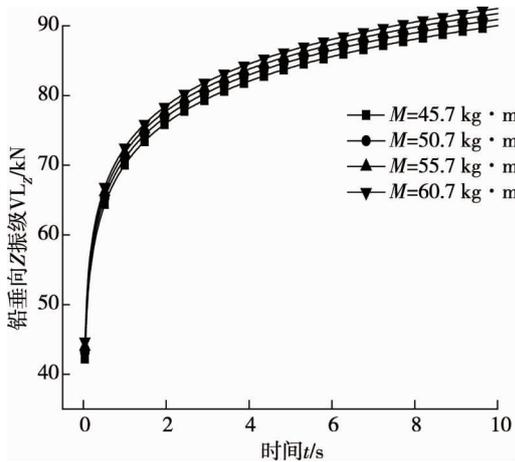


图12 不同偏心距A点铅垂向Z振级 VL_z 时程变化曲线

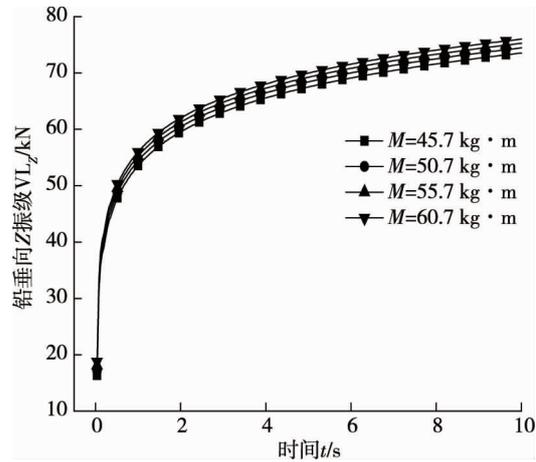


图13 不同偏心距B点铅垂向Z振级 VL_z 时程变化曲线

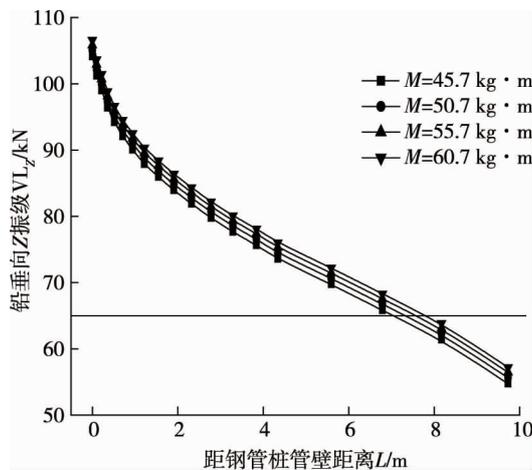


图14 不同偏心距桩周铅垂向Z振级 VL_z 变化曲线

由图12和图13可知:4种不同偏心距工况下,随沉桩时间的增加,A,B这2点铅垂向Z振级 VL_z 逐渐增大,且A,B这2点时程变化曲线趋势基本相同.对比4条曲线变化规律可知:偏心距越大,对人的影响越大.

由图 14 可知:在这 4 种不同偏心距工况下,随沿管桩壁径向距离的增大,铅垂向 Z 振级 VL_z 逐渐减小.对比 4 条曲线变化规律可知:偏心距增大,振动沉桩引起桩周铅垂向 Z 振级 VL_z 也增大,即对人的环境影响越大. $M=60.7 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 时桩周径向 7.75 m 范围内受影响; $M=55.7 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 时桩周径向 7.51 m 内受影响; $M=50.7 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 时桩周径向 7.41 m 范围内受影响; $M=45.7 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 时桩周径向 7.01 m 范围内受影响.因此,在这 4 种不同偏心距工况情况下,振动沉桩对人的扰动范围从大到小依次为 60.7,55.7,50.7,45.7 $\text{kg} \cdot \text{m}$.

综上所述,在满足沉桩能力和沉桩效率的情况下,应尽量减少振动锤的偏心距,进而减少振动沉桩对人的影响.

3.1.3 土体参数分析

为了研究不同土体中沉桩对人的环境影响,选 4 种土体.因只研究钢管桩在不同土体沉桩过程中对人的环境影响,所以均采用均质土体,保持其他模型参数不变,在钢管桩桩顶施加 10 s 激振力,把钢管桩分别在杂填土、黏土、泥炭质土和粉土这 4 种不同土层下 A, B 这 2 点铅垂向 Z 振级 VL_z 的时程曲线和桩周附近铅垂向 Z 振级 VL_z 随沿管桩壁径向距离的变化规律如图 15~图 17 所示.

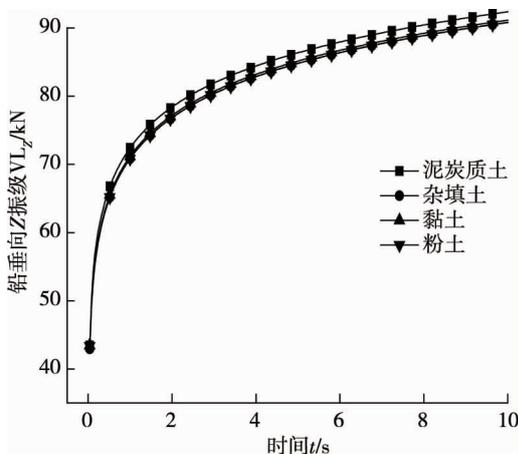


图 15 不同土体 A 点铅垂向 Z 振级 VL_z 时程变化曲线

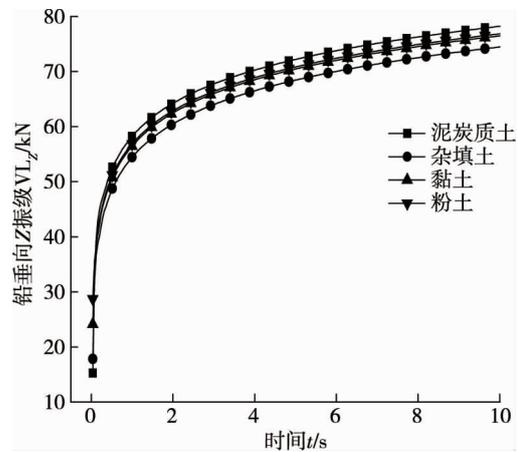


图 16 不同土体 B 点铅垂向 Z 振级 VL_z 时程变化曲线

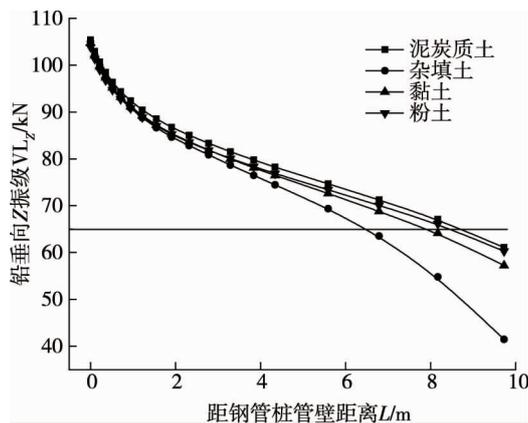


图 17 不同土体桩周铅垂向 Z 振级 VL_z 变化曲线

由图 15 和图 16 可知:在 4 种不同土体工况下,随着沉桩时间的增加, A, B 这 2 点铅垂向 Z 振级 VL_z 逐渐增大.通过对比图中 4 条曲线的变化规律可知:钢管桩在这 4 种不同土体沉桩过程中,在泥炭质土中振动沉桩对人的环境影响最大;在粉土中对人的环境影响仅次于泥炭质土.

由图 17 可知:在 4 种不同土体工况下,随沿管桩壁径向距离的增大,铅垂向 Z 振级 VL_z 逐渐衰减.对比 4 条曲线的变化规律可知:粉土中沉桩引起的环境影响衰减最慢,杂填土相比于其他土体在距钢管桩管壁较远处产生更为明显的衰减.

综上所述,模型在理想单一均质土体中,在泥炭质土中钢管桩振动贯入对施工作业人员和附近居民的

环境影响最大;在粉土中沉桩施工引起的环境影响衰减速度最慢,对人的环境影响仅次于泥炭质土;在杂填土中沉桩施工引起的环境影响衰减速度最快.因此,如果工程概况土层中含有较多的泥炭质土和粉土时,应加强周边环境的监测,做好记录,以防对施工人员和附近居民产生较大的影响.

4 结论

1)对于普通振动锤,增大振动锤激振频率,振动沉桩对施工人员和附近居民的环境影响也增大,但相邻工况之间的环境影响差异性逐渐减小.对于无级调频调矩振动锤减小振动锤激振频率,振动沉桩对附近居民的环境影响增大,且相邻工况之间环境影响的差异性基本相同.

2)振动锤偏心距越大,钢管桩沉桩引起的周围居民环境影响也都越大.

3)采用Z振级 VL_z 评价对人的环境影响,根据Z振级 VL_z 评价方法,在单一匀质土体中状态下分析,泥炭质土工况中振动沉桩对施工人员和附近居民的环境影响最大,在粉土中的施工人员和附近居民环境影响衰减速度最慢,且对人的环境影响仅次于泥炭质土,在杂填土中人的环境影响衰减速度最快.

参考文献:

- [1] 陈福全,汪金卫,李大勇,等.高频液压振动锤打桩的应用概况与研究进展[J].岩土工程学报,2011,33(s2):224-231.
- [2] 张智梅,黄海涛,张继红.锤击法和振动法沉桩对周边环境影响的研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(4):1129-1136.
- [3] 张庆贺,柏炯.沉桩引起环境病害的预测和防治[J].岩石力学与工程学报,1997(6):595-603.
- [4] Masoumi H R, Degrande G. Numerical modeling of free field vibrations due to pile driving using a dynamic soil-structure interaction formulation[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2006, 215(2): 503-511.
- [5] Junyoung K, Sangseom J, Joon K L. Large deformation FE analysis of driven steel pipe piles with soil plugging[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 71(1): 82-97.
- [6] 张智梅,黄海涛,张继红.高频振动沉桩施工对周边环境的影响[J].上海大学学报(自然科学版),2016,22(5):680-690.
- [7] 杨祁,肖勇杰,陈福全,等.高频振动沉桩全过程数值模拟的方法与应用[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):44-50.
- [8] 罗春雷,贺建超,丁吉,等.振动桩锤沉桩过程液化特性和贯入度数值分析[J].广西大学学报(自然科学版),2011,36(6):923-929.
- [9] 孟伟.小型预制管桩的高频振动沉桩数值分析[D].广州:华南理工大学,2017.
- [10] 时林丰,谢建斌,刘克文,等.基于灰色关联度理论的钢管支护桩沉桩位移[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):32-39.
- [11] 时林丰.钢管桩高频液压振动沉桩数值模拟及模型试验研究[D].昆明:云南大学,2019.
- [12] 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.
- [13] 董军锋,张旻,雷波.打桩振动对相邻建筑影响的测试与分析[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):397-401.
- [14] 肖勇杰,陈福全,林良庆.灌注桩套管振动贯入引起的地面振动及隔振研究[J].岩土力学,2017,38(3):705-713.
- [15] 姜彤,李博,杨晓燕,等.静压桩沉桩对既有桩桩周土影响的PIV试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1185-1194.
- [16] 李建.振动对驾驶人的危害和预防[J].安全与健康,2005(10):55.
- [17] 国家环境保护局.城市区域环境振动标准:GB 10070—1988[S].1988.