

高频液压振动锤打桩的应用概况与研究进展

陈福全¹, 汪金卫¹, 李大勇², 乔卫国²

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108, 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 高频液压振动锤有很多技术优势, 可应用于沉桩和拔桩。但当前还是缺乏规范性的指导方法来解决使用高频振动技术打桩可打入深度的确定问题和高频振动打入桩的承载力计算。分早期研究、试验研究和数值分析三个方面对高频振动打桩的研究概况进行了综述。分别从力学、运动学、能量守恒方程和运动规律积分方程等方面阐述了国外各种高频液压振动锤打桩的可打入性模型的相应原理、假设条件、判断方法。指出了若干有待进一步研究的几个问题, 包括在高频振动打桩下桩周土的强度变化、可打入性及打入桩的承载力等等。

关键词: 高频振动打桩; 高频液压振动锤; 试验研究; 数值分析; 桩的可打入性模型

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0224-08

作者简介: 陈福全(1971-), 男, 福建漳平人, 工学博士, 教授, 主要从事岩土工程的研究与教学工作。E-mail: phdchen@163.com。

Application and advance of vibratory driving techniques using high-frequency hydraulic vibratory hammer

CHEN Fu-quan¹, WANG Jin-wei¹, LI Da-yong², QIAO Wei-guo²

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Vibratory driving techniques have become increasingly popular all over the world primarily for driving and extracting piles. High-frequency vibratory hammer with hydraulic clamping device has many advantages. However, its foremost questions are driveability and the bearing capacity calculation of the installed pile. At present limitations in engineering knowledge related to the vibratory driving technique present an impediment for being able to utilize their full potential. A brief history of the vibratory techniques, the functioning of modern vibratory equipments and various components, mechanical action and the most important vibratory parameters are presented. A detailed literature review is given, that is, forepart research, vibro-driveability tests and numerical analysis. And then a series of models of vibratory driveability are depicted including their corresponding theories, assumptions, justifying methods and noticeable questions, which are classified in the terms of mechanics, kinematics, energy conservation and integration of motion law respectively. Finally some aspects are put forward which should be studied to enlarge the engineering knowledge and to utilize the full potential of the techniques.

Key words: high-frequency vibratory driving technique; high-frequency vibratory hammer with hydraulic clamping device; vibro-driveability test; numerical analysis; pile vibro-driveability model

0 引言

高频液压振动锤高频振动沉降技术, 已经在国外广泛使用, 但国内只有近期才开始推广。高频液压振动锤不仅可以沉拔混凝土预制管桩(PHC桩)、各类型钢板桩和钢护筒, 还可用于振动沉管灌注桩、薄壁防渗墙、地表压实和深层土层致密工程的施工, 如图1所示。当然这里的高频指相对于一般振动打桩频率而言。

Holeyman^[1]指出高频液压振动打桩的打入机理涉

及桩、高频振动锤及土层等情况, 其中最复杂的是在高频振动荷载作用下桩土相互作用机理, 其与常规的动力打桩响应特性不同。

为克服其它各种桩锤的种种缺点而发展的高频液压振动锤, 具有其他各种沉桩设备的优点, 如低震感、低噪音、无水气污染、高效、机动性强等。还具有以

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972200, 50778045); 山东省自然科学基金项目(ZR2009FM071)

收稿日期: 2011-08-03

下优点: ①具有更强的地基穿透性, 高频率振动可大幅度地减小土层的阻力, 适用地质范围广; ②锤身为全封闭设计, 完全防尘土和污物影响。可在水下沉拔桩作业; ③自振频率及振幅可在较大范围内进行调节, 对不同的施工地段地质不同的桩型, 可以选择最佳的振动频率及振幅, 以获取最佳的工效; ④施工时, 其激振力用来破坏土的结构及克服端阻力, 桩的下沉力是依靠桩身的重量与振动锤的重量及激振力。当桩端接触到硬岩层时, 振动在原处进行, 桩不下沉, 作用在桩身上的合力基本不变, 对桩破坏影响小。



图 1 高频液压振动锤沉桩 (板桩)

Fig. 1 Vibratory driving of sheet piles

高频振动打桩研究可追溯到 20 世纪 30 年代^[2]。1930 年德国进行了首次打桩试验, 并在 1932 年开始商业应用, 并注册了相关高频率振动打桩技术的专利。20 世纪 60 年代德国、法国、美国、苏联和日本都进行高频振动锤的商业生产。目前, 高频液压振动锤在国外使用已是非常普遍, 是一项较为成熟的实用技术, 生产相关设备的厂家众多, 但理论研究远落后于工程实践。其中的一些厂家也生产液压自激式高频振动锤, 但应用远不及偏心轴式振动锤广泛。先进的振动锤的振幅及频率都可在工作时作无级调节, 沉桩作业的自动化程度也高。KRUPP 生产的 MS-200HHF 振动锤, 激振力达 4000 kN, 沉桩深度达 50 m, 深层振动致密深度达 25 m, 是世界上最大的高频液压振动锤。国内首台 HFA34 型无共振高频液压振动锤在中铁工程机械研究设计院研制成功, 该桩锤工作频率 0~35 Hz, 振幅 0~16 mm, 额定激振力 1000 kN, 最大激振力 1600 kN, 装备功率 300 kW, 技术指标达到国际同类产品先进水平。

本文对高频液压振动锤打桩的应用及研究概况进行综述。

1 高频振动打桩的研究概况

1.1 早期研究概况

高频率振动打桩的概念由前苏联的 Pavyluk 在研究基础振动时提出的, 1931 年 Barkan 指出相对于锤击沉桩, 高频率振动沉桩大幅度降低了桩身阻力^[3]。1946 年 Rusakov 研究了低频率下振锤沉桩机理^[4]。1949 年 Barkan 在《Construction of Foundations Using the Vibratory Method》中详细阐述了高频振动打桩的基本原理^[5]。

1953 年 Neimark 研究了高频振动贯入机理^[6]。1955 年 Tatarnikov 设计并安装低频率 (7~16 Hz) 桩机, 但是桩端阻力很大。在低频率的条件下, 振幅较大, 振动锤向上运动时导致桩尖桩土分离, 当向下运动时锤击将要克服更大的桩端阻力^[4]。1955 年 Eastwood 进行了模型试验研究, 表明桩不管其埋深如何, 打桩系统固有频率接近于常数, 但增加桩的质量和截面面积时固有频率将有所降低^[3]。

Barkan 指出: ①桩侧阻力主要受加速度的影响, 加速度大, 阻力将降低; ②贯入速度与振幅成线性比例关系; ③贯入速度与频率与几乎无关, 随着频率增加, 桩侧阻力减少, 但桩端阻力却增加; ④增加截面面积, 贯入速度将呈现指数规律降低^[3]。

Barkan 利用振动系统的共振效应来提高激振力。1961 年, 美国 Bodine 公司成功研制了一种高频率的振动桩锤, 频率可达 150 Hz, 高频率非常接近桩的纵向共振频率, 从而增大了桩的贯入速率。1953 年 Savnoy 和 Luskin 把这桩架导向振动锤系统引入市场。

1.2 试验研究

Kondner 和 Edwards 通过黏性土中高频振动剪切和贯入的一系列小比例室内试验^[3], 试验结果表明: ①在高频振动荷载的条件下, 贯入速度随附加静荷载增加而增加; ②贯入深度随高频振幅和振动荷载的增加而增加; ③在某一频率下可达到更大的贯入速度, 该频率不一定是共振频率。Szechy 在细砂中测试一系列的开口和闭口桩来比较高频振动打桩和锤击打桩的承载力, 表明高频振动打桩下由于土的压缩导致孔隙比大幅度降低, 高频振动的开口管桩承载力主要由桩端阻力承担, 而锤击开口管桩的承载力主要为桩侧阻力, 无黏性土的初始孔隙比的影响比较明显。

Hill^[7]、Schmid & Hill (1966)、Hill & Schimid (1967) 先后通过模型试验建议在干砂中低频率施工摩擦桩的承载力用一个经验方程来计算:

$$B = \frac{F_s}{c + mf V_s / g} \quad . \quad (1)$$

式中 f 为假设振动频率; a 为桩的加速度; F_s 为偏心重; V_s 为桩的贯入速度; $c = 0.018 - 0.0036a/g$; $m = 2.4(a/g)^{-0.75}$ 。由于参数 c 是从大量分散数据中得到的, 式 (1) 并不能准确得到实际的值。

Ghahramani^[8]通过详细的实验研究了高频振动模型桩的打桩阻力和承载力。采用电磁高频振动器, 改变频率而保持打桩力不变, 显示在共振频率达到最大的贯入速度, 桩侧摩阻力很小。

Schmid (1968) 测出开口管桩中的动阻力要小于静阻力, 而在闭口管桩中动阻力与静阻力非常接近^[3]。 Stefanoff 等^[9]研究了高频振动打入的空心管桩承载力, 指出管桩中土塞对承载力的作用取决于土的剪切阻力、变形特性与桩的内径。

Heerema^[10]进行了砂土中桩土接触面试验, 研究桩侧动摩擦力、位移速度和水平应力的关系。结果表明, 保持振幅和频率不变, 荷载水平变化, 砂土中动摩擦力与正应力的关系是线性关系的; 保持水平荷载不变, 砂土在试验中动摩擦力与施加的位移速度无关。 Dierssen 亦提到 Heerma 的试验结果, 指出高频振动打桩时板桩桩侧动摩擦阻力与打桩频率无关。

Rodger 等^[11]通过总结试验成果, 建议了针对不同的桩和土的类型如何选择振动锤参数的方法, 如考虑打桩频率、加速度和位移幅值。Rodger 同时进行了保持偏心矩 M_e 不变, 而打桩频率在 20~50 Hz 之间变化进行沉拔桩的室内试验, 指出在沉桩稳定状态时, 打桩频率与贯入速率成线性关系, 揭示了存在一个频率的门槛值。

Jonker^[12]简述了高频振动打桩的可打入性, 建议在选择振锤时应考虑最大桩身质量, 桩身质量越重, 消耗能量就越多。通过高频振动产生的应力波会降低土颗粒间接触压力, 所以土间摩擦力和桩-土之间摩擦力都得到减少; 若工作频率逐渐降低, 部分土将达到更高的密度, 侧阻力也将增加。在黏性土中, 高频振动沉桩桩端的土将重塑并且产生超孔隙水压力。在黏性土中桩的可打入性取决于土的振动残余强度。试验表明不管是锤击打桩还是高频振动打桩, 桩的摩擦承载力基本一样, 但高频振动打桩的桩端承载力较低。

Beloff^[13]进行了足尺试验, 使用加速传感器、应变传感器和摄像机采集了连续的量测数据。沉桩深度为 7.5 m, 土体标准贯入击数 $N=10\sim 14$, 振动频率为 23~26 Hz, 平均贯入速度范围为 2~4 m/min。Brioud 等^[14]完成了在砂中三台高频振动 H 型桩和三台锤击 H 型桩的打桩试验, 测量了静定轴向响应和荷载的分布并进行比较。结果是高频振动打桩与锤击打桩具有相同的最终承载力, 但在极限荷载的二分之一荷载作用下, 高频振动沉桩位移是锤击打桩产生位移的 2.5 倍时, 两种沉桩的桩体才达到相同的阻力。

美国陆军工程公司在密西西比河谷作了高频振动打桩与锤击打桩的承载力直接对比试验^[15], 共 5 个足尺试验, 试验结果表明: ①高频振动锤非常有效地使

松散土颗粒变得中密; ②锤击打桩比高频振动打桩使桩尖的土更加密实, 高频振动打桩桩尖阻力将更小; ③高频振动沉入桩的总承载力比锤击打桩低。Prakash 等^[16]通过一个小比例尺试验发现高频振动打桩的最终贯入深度与工后承载力和工作频率有关。密砂中高频振动打入桩的桩端阻力仅仅占总承载力的 25%~30%, 与摩擦桩是一样的。最终静载端阻力随打桩力成正比例变化。

Floyd 等^[17]陈述了钢板桩的足尺高频振动打桩试验。通过五组钢板桩的加载试验得到桩的承载力, 根据这些试验结果表明钢板桩的承载力与高频振动贯入速度无关。

Wong^[18]、O'Neil 等^[19-20]分别对 22 根桩径为 100 mm 的模型桩进行试验, 研究土体的有效粒径、相对密度、原位应力和动力参数等因素的影响。当频率为 20 Hz 时达到最大贯入速度, 偏心荷载越大, 贯入速度越大。对贯入速度影响最明显的是土的初始相对密度, 增加土的相对密度和原位水平应力会降低贯入速度。相对密度为 90% 的密砂中高频振动桩的桩身、桩端阻力都高于锤击桩的 20%~30%; 在相对密度为 65% 的中密砂高频振动桩的桩身阻力、桩端阻力分别比锤击打桩低 25%, 15%。图 2 所示为模型试验的承载力和贯入速率关系。相对密实度为 65% 土体与相对密实度为 90% 的土体相比承载力比较小, 贯入速率大。

Rao^[21]、Wang^[22]在美国休斯顿大学进行总共 30 个大比尺模型试验, 研究桩的几何形状对挤土桩和非挤土桩的可打入性。试验结果表明不同的桩尺寸, 开口管桩桩的可打入性曲线(贯入速度和贯入深度关系曲线)具有相同的趋势; 小尺寸 H 型桩的可打入性曲线跟一般的打桩趋势(贯入速率随深度 z 增大而减小)相反, 它的贯入速率为开始增大, 而后期逐渐减小, 饱和砂相对干砂来说对贯入速率影响更大。大尺寸开口管桩比大尺寸 H 型桩的贯入速率大, 两者均产生高的孔隙压力, 但 H 型桩产生的孔隙压力更高。

Westerberg 等^[23]研究了挤土桩与非挤土桩的连续桩端和桩身阻力, 认为工程中可用 CPT 结果计算打桩动阻力。开口管桩和 H 型桩的桩身阻力可从 CPT 侧阻力数据得到的, 但闭口管桩还应包括 CPT 结果的端阻力。土的动阻力计算式为

$$R_{\text{Dyn}} = R_{\text{DynShaft}} + R_{\text{DynBsde}} = f_s k_{\text{shaft}} + q_c k_{\text{Base}} \quad (2)$$

式中 f_s 为 CPT 套管摩擦; q_c 为 CPT 圆锥阻力; k_{shaft} , k_{Base} 为针对土的具体状态进行校准的转换函数。

Bement 等^[24]通过室内试验研究来确定因高频振动沉拔桩产生的振动导致土体的潜在压缩沉降, 表明: ①随加速度的增加松散土体的压缩增大, 但是当加速度

度小于 $1g$ 时响应很小, 而当大于 $2g$ 或者更大时, 发生土体液化, 变形响应急剧增强; ②土的压缩与垂直有效应力紧密相关, 当有效应力大于 100 kPa , 土的压缩性降低; ③级配好的土比均匀土的压实性更好。Bosscher 等^[25] (1998) 进行 24 组足尺现场试验, 研究桩的尺寸和几何形状 (H 型和开口管桩) 在高频振动打桩中的承载力问题。

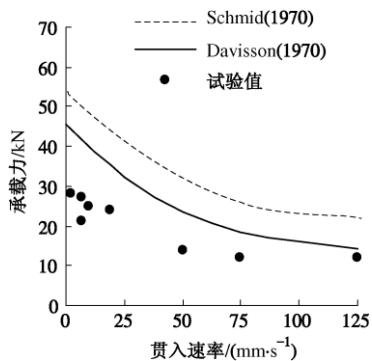


图 2 振动模型桩的承载力与贯入速率的关系

Fig. 2 Bearing capacity versus penetration rate from vibratory model pile tests (Vipulanandan et al, 1990)

许多欧洲国家的研究机构都进行过相关的足尺试验。比利时建筑研究所 (BBRI) 于 1992~1994 年间在比利时 10 个不同的地方进行 21 项高频振动可打入性研究。Holeyman 等^[26-28] 均对这些试验做了报道。1996~1998 年间又报道了 24 组典型的高频振动可打入性试验。这些研究加深了对贯入阻力的理论理解, 发展了一种对不同土条件下最有效的现场打桩的分析新方法——研发计算机程序来有效地预测打桩施工。

20 世纪 90 年代, 德国卡尔斯鲁厄福尼得尼西亚纳大学进行了高频振动打桩可打入性研究, 研究内容包括桩侧和桩尖的土力学方面、动力系统中的不可恢复位移、安全方面、试验系统鉴定、高频振动打桩控制方面。Vanden Berghe^[29] 研究了周期剪切作用下砂强度降低的机理, 通过小比尺试验研究砂强度降低的现象, 表明即使在循环剪切中土的强度在膨胀较大阶段暂时的增加, 在每个循环的末期土的抵抗强度也会连续地降低。有效平均主应力是控制土强度降低的重要参数, 并控制滞回环的形状, 试验历史和初始应力状态并无影响。通过室内试验结果与数值模拟的对比, Vanden Berghe 还研究了由 Baner 和 Gudehus 提出的亚塑性本构方程。研究结果表明此本构方程能准确地模拟每个周期的不同阶段, 考虑了滞回环与有效平均应力的相关性, 但每个循环的后期平均应力的累积降低现象不能模拟。

Viking^[2] (2002) 通过了现场板桩高频振动贯入足尺试验, 研究了影响高频振动打桩可打入性的主要参

数, 包括与振动锤相关的参数, 板桩相关的参数, 无黏性土相关的参数。

1.3 数值分析方法研究

一维波动方程 (Smith, 1960; Wong, 1988) 经常用于研究桩中的应力波和桩—土反应。同样地也可用于模拟高频振动打桩, 能说明土或桩端的不同状态。

Zheng^[3] 使用差分程序 FLAC 软件模拟高频振动打桩的桩、土和振动锤系统相互作用, 以及荷载—沉降特性。土是用各向同性硬化和瑞利阻尼的双曲线应力应变关系来模拟, 并且考虑了网格和吸收边界的几何阻尼。对打桩过程和工后荷载—变形特性进行了参数研究, 分析了主要参数对高频振动打桩的影响。

高频振动打桩产生对土的循环剪切, 会导致超孔隙水压力的产生, 超孔隙水压力使土软化, 并降低了桩土界面的最大摩擦力。Toyoaki 等^[30] 对此问题进行了分析。桩土相互作用采用 Winkler 模型, 考虑了由于孔隙水压力的发展土出现软化和桩土界面的滑动。分析表明高频率和相互作用使土体产生大的剪切应变, 引起高孔隙水压力。降低了最大的表面摩擦力, 使土体软化, 最大表面摩擦力的降低比土的软化更影响桩的承载特性。Masoumi 等^[31] 研究了由高频振动打桩引起的自由场振动预测数值模型, 主要考虑远场的动力响应。假设桩是线弹性材料, 土模拟成层状的弹性半空间。运用有限元和边界元计算自由场振动。

2 高频振动打桩的可打入性分析模型

为了预测打桩的能力、计算打桩的贯入速率、确定贯入深度, 最后评估对环境的影响, 在过去的几十年中高频振动打桩下土的性状和桩土相互作用都得到广泛的研究。国外学者提出的高频振动打桩的可打入性分析的预测模型, 主要可分为以下几种类别: ①力平衡模型 (Force—balance methods), 论述打桩设备产生的打桩力与桩的贯入阻力的关系; ②能量平衡模型 (Energy—balance methods), 论述打桩设备产生的能量与打桩过程中能量的耗散之间的关系; ③动量守恒模型 (Momentum—conservation methods), 运用了土阻力的冲量与整个振动打桩系统总的力在一个循环时间内产生的动量的改变量; ④运动规律的积分模型 (Integration of the laws of motion), 在打桩时间内对系统平衡条件进行积分判断其可打入性。

2.1 力平衡模型

力平衡模型目的在预测振动锤产生的打桩力是否能克服贯入阻力, 而不能计算贯入速度。

Jonker (1987) 提出一个 β 公式预测管桩的可打入性, 这是建立在 Jonker 高频振动大型海上管桩工程

项目的归纳的基础上, 表达式为

$$F_v + F_i + F_0 = \beta_0 R_{so} + \beta_i R_{si} + \beta_t R_t \quad (3)$$

式中 F_v 为激振器产生的惯性力; F_i 为动力体系在一个循环内的最大惯性力; β_0 为管桩外侧的侧阻力经验系数, 可根据表 1 取值; R_{so} 为桩外侧土阻力; β_i 为管桩内侧的侧阻力经验系数, 可根据表 2 取值; R_{si} 为桩内侧土阻力; β_t 为桩尖经验系数, 可根据表 1 取值; R_t 为桩尖土的阻力。

Warrington^[32]提出另外一个力平衡公式, 已在美国 Tunker 公司广泛使用, 表达式为

$$F_v = \sigma A_s \quad (4)$$

式中 F_v 为高频振动锤产生的力, kN; σ 为土的阻力, kPa, 可根据表 2 取值; A_s 为桩身表面积, m^2 。Warrington 建议, 式 (4) 当振幅小于 2.38 mm 时才适用。当应用于板桩时, Tunker 公司建议 2.81 倍的板桩宽度代替桩的桩身面积 A_s 。

表 1 β 方法桩侧阻力经验系数 β 值^[12]

Table 1 Empirical values of resistance for Beta method

| 土的类型 | β 值 |
|-------------------|-----------|
| 圆的粗砂 | 0.10 |
| 砂质软黏土或软灰土、软黄土、硬砂岩 | 0.12 |
| 圆的中砂、圆砾石 | 0.15 |
| 细角砾石、角质砂黏土、角质黄土 | 0.18 |
| 圆细砂 | 0.20 |
| 角砂、粗砾石 | 0.25 |
| 角细砂或干细砂 | 0.35 |
| 灰泥、硬或者坚硬黏土 | 0.40 |

表 2 Tunker 法的土阻力值 σ (Warrington^[32])

Table 2 Values of soil resistance

| SPT 值/cm | 土阻力 σ /kPa | |
|----------|-------------------|-------|
| 无黏性土 | 黏性土 | |
| 0~5 | 0~2 | 9.86 |
| 5~10 | 2~5 | 11.87 |
| 10~20 | 5~10 | 12.83 |
| 20~30 | 10~20 | 14.84 |
| 30~40 | 20~30 | 15.80 |
| >40 | >30 | 16.76 |

2.2 能量平衡模型

能量平衡模型就是假设振动锤系统产生的能量等于打桩过程中消耗的能量。能量模型是基于稳定状态的, 而没有考虑瞬时作用, 最简单表达为

$$R_u v_p = \beta_t W_t + (F_i + F_0) v_p \quad (5)$$

式中 R_u 为土的阻力; v_p 为平均贯入速率; β_t 为经验损失系数; W_t 为理论输入功率; F_i 为动力体最大惯性力。式 (5) 还可用别的参数来表示, 比如用速率来表示:

$$v_p = \frac{\beta_t W_t}{(R_u - F_i - F_0)} \quad (6)$$

Davisson (1970) 公式用来估算共振打桩 (BRD) 的单桩承载力, 建议用经验参数 β_t 的表达式表示:

$$\beta_t = 1 - v_p s_e (R/1000) W_t \quad (7)$$

式中 s_e (mm/周期) 是一个经验确定的所有能量损失。Warrington^[32]把式 (7) 叫做 Vibdrive 公式, 经验损失系数 $\beta_t = 0.1$, W_t 计算根据 Warrington^[33]。

2.3 动量守恒模型

动量守恒模型运用土阻力的冲量与整个振动打桩系统总的力在一个循环时间内产生的动量的改变量, 由 Schmid (1969)^[34]首先提出。他认为桩尖部分的动阻力表现为冲量的性质, 在整个循环下积分的总和为零:

$$(m_0 + m_{vib} + m_p) g f^{-1} = \int_0^{T_c} R dt = \alpha R_t T_c \quad (8)$$

式中 m_0 为偏心体总质量; m_{vib} 为振动器质量; m_p 为桩的质量; g 为重力加速度; f 为打桩频率, T_c 为一个周期内桩尖与土接触的时间; α 为经验系数, 在 0.5~1.0 之间变化, 常取 2/3; R_t 为桩尖土的阻力。

为了计算一个循环内桩尖与土的接触时间 T_c , 需要用试验来确定最小的加速度, 就是超加速度 ($a_e = a - a_{\min}$)。计算式为

$$T_c = \sqrt{\frac{2v_p}{fa_e}} \quad (9)$$

式中 T_c 为一个循环内桩尖和土的接触时间; v_p 为贯入速率; f 为打桩频率; a_e 为超加速度。

贯入速率与加速度成线性关系, 计算最小加速度 a_{\min} 要谨慎确定。由式 (8)、(9) 可计算贯入速率

$$v_p = \frac{(a - a_{\min})}{2T} \left[\frac{(m_0 + m_{vib} + m_p) g f^{-1}}{\alpha R_t} \right]^2, \quad (10)$$

式中各它参数如前述一样。

2.4 运动规律的积分模型

上述几种不同模型都只考虑了一个循环内的最大打桩力和加速度。进一步模拟桩土相互作用, 积分模型描述当振动打桩系统达到惯性平衡后桩贯入运动的整个过程。最简单的积分模型是对运动方程积分, 认为桩是一个刚性体, 运用牛顿第二定律, 有

$$a(t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{(M_s + M_v + M_c + M_p) g}{M_v + M_c + M_p} + \frac{m \omega^2 \sin(\omega t) \pm R_s - R_t}{M_v + M_c + M_p} \quad (11)$$

式中 $a(t)$ 为 t 时刻桩的加速度; u 为桩的位移; M_s

为配重质量; M_v 为激振器质量; M_c 为夹具质量; M_p 为桩的质量; R_s 为侧阻力; R_t 为桩端阻力。

此类模型能够考虑桩端和桩侧阻力的不同特性, 灵活地选择本构方程来模拟土的特性。打桩过程中桩端和桩侧土的阻力行为不同, 但都是桩的位移函数, 桩侧阻力与桩的位移方向是相反的, 而桩端阻力在桩向下运动时是一致变化的。典型的此类模型有如下几种。

(1) Vibdrive 模型

最初是由 Holeyman^[35]提出。De Cock (1998), Vanden Berghe 和 Holeyman (1997) 进一步细化了模型参数。该模型假设土完全塑性, 可以从正弦打桩力和相反的土阻力条件下推断出一个循环内的净加速度, 也考虑了桩尖和桩端土阻力的性状, 注意到桩之间摩擦作用。平均贯入速度通过直接对向下、向上的加速度在一个完整的循环里积分, 土的阻力通过 CPT 试验结果进行计算, 以摩擦力比和加速度的函数进行折减, 考虑了土强度的衰减。这个模型已经在不同的足尺试验中得到校核 (BBRI, 1994)。

(2) Karlsruhe 模型

Dierssen (1994) 从现场试验确定了存在两种类型的高频振动运动模式, 即快速振动打桩和慢速振动打桩。快速振动桩尖一直与桩端土接触, 而慢速振动模式出现了桩尖与桩端土分离的现象。其分析了慢速振动模型中模拟桩端阻力。Rodger 和 Littlejohn(1980)提出快速高频振动打桩模型和慢速高频振动打桩模型。

(3) Vipere 模型

由 Vanden Berghe (2001)^[29]提出, 采用了由 Holeyman 提出的土体亚塑性本构方程, 把桩假设成一个刚体的特性, 对土进行一维离散。Bauer (1996)^[36] 和 Gudehus (1996)^[37]最早提出把土的亚塑性本构方程用于 Vipere 模型, 用于模拟不排水周期剪切下土的性状。桩的贯入速度和桩周围波的传递通过对运动方程的积分求得。

(4) 纵向一维模型

Smith (1960)^[38]对一维波动方程进行了补充, 可有效地扩展这个方程到高频振动打桩领域, 但是相关的研究还是很少的。后来有许多学者都尝试了这方面的工作。Middendorp 和 Jonker (1987), 还有 Ligterink 等 (1990) 使用计算机程序分析海上管桩的可打入性。他们认识到需要一个更好的土的模型用于描述稳定状态下土的阻力, 同时也注意到输入计算程序的土的参数与所选的打桩频率和桩的位移幅值有关。

有关更详细的高频振动打桩的可打入性研究可见

文献[39]。

3 结 论

本文较为详细地对高频液压振动锤系统的发展、应用及研究概况与进展进行论述, 显然基于其的优点, 也必将在我国的建筑工程、水利水电工程、港口工程和海洋工程得到广泛应用。但由于理论研究尚远落后于工程实践, 以下几个方面问题有待于进一步研究。

(1) 在高频振动打桩下桩周黏土的强度变化问题, 包括频率、振幅、激振力、桩的特性及土的基本性质等因素的影响; 大多数研究高频振动锤打桩集中在无黏性土方面, 然而黏性土在可打入性方面带来更多问题有待于解决, 包括黏性土地基中不同桩型的贯入速率与影响参数之间的关系。

(2) 桩土界面附近土体在高频反复剪切作用下的性质。

(3) 高频振动打入桩的承载性状, 特别是工后桩间土的重固结对其性状的影响。

(4) 提出简洁而较为合理的可打入性分析模型, 以期在工程上能根据模型, 针对各种情况, 确定桩的可打入性及最佳的振动频率、振幅和激振力等。

参考文献:

- [1] HOLEYMAN A E. Soil behavior under vibratory driving[C]// Proceedings of the Int Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Belgium, 2002: 3 - 19.
- [2] VIKING K. Vibro-driveability, a field study of vibratory driven sheet piles in non-conhesive soils[D]. Stockholm: Royal Inst of Technology, 2002.
- [3] FENG Zheng-yi. Bearing capacity and load-deformation Characteristic of vibratory driven piles[D]. West Lafayette: Purdue University, 1997.
- [4] RODGER A A, LITTLEJOHN G S. A study of vibratory driving on granular soils[J]. Géotechnique, 1980, **30**(3): 269 - 293.
- [5] MEDVEDEV S R. The use of vibrators for driving steel sheet piling[J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1953, **48**: 559.
- [6] HEJAZI H A. The influence of forced longitudinal vibrations on rods penetrating soils[D]. Columbus: Ohio State University, 1963.
- [7] HILL H T. Frictional resistance in vibratory pile driving[D]. Princeton: Princeton University, 1966.

- [8] GHAHRAMANI A. Vibratory pile driving ultimate penetration and bearing capacity[D]. Princeton: Princeton University, 1967.
- [9] STEFANOFF G, BOSHINOV B. Bearing capacity of hollow piles driven by vibration[C]// Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Tokyo, Japan, Proceedings, 1977(1): 753 - 758.
- [10] HEEREMA E P. Relationships between wall friction, displacement velocity and horizontal stress in clay and in sand, for pile driveability analysis[J]. *Ground Engineering*, 1979(1): 55 - 65.
- [11] RODGER A A, LITTLEGOHN G A. Study of vibratory driving in granular soils[J]. *Geotechnique*, 1980, **30**(3): 269 - 293.
- [12] JONKER J. Vibratory pile driving hammers for pile installations and soil improvement projects[C]// Offshore Technology Conference, the 19th Annual OTC, Houston, 1987: 549 - 560.
- [13] BELOFF W R. Vibratory Hammer Study Field Measurements [R]. Report prepared by Goldberg- Zino & Associates, Inc. for the Deep Foundations Institute. File No.B-7946, 1987.
- [14] BRIAUD J L, COYLE H M, TUCKER L M. Axial response of three vibratory and three impact driven H-piles in sand[C]// the 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D C, 1990.
- [15] MOSHER R L. Axial capacity of vibratory- driven piles versus impact-driven piles[C]// the 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D C, 1990.
- [16] PRAKASH S, RANJAN G, GHUMMAN M S. Response of a pile driven by longitudinal vibrations[C]// 12th ICSMFE (International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering), 1989: 959 - 962.
- [17] FLOYD D, ALDINGER P B. Load testing of steel sheet piling driven with a vibratory hammer[C]// the 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D C, 1990.
- [18] WONG D O. Driveability and load transfer characteristics of vibro-driven piles[D]. Houston: University of Houston, 1988.
- [19] O'Neil M W, VIPULANANDAN C. Laboratory evaluation of piles installed with vibratory hammers[R]. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1989.
- [20] O'Neil, M W, VIPULANANDAN C, WONG D O. Laboratory modeling of vibro-driven piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1990, **116**(8): 1190 - 1209.
- [21] RAO Pramod M. Effect of pile geometry and soil saturation in the behavior of no displacement piles installed by vibration[D]. Houston: University of Houston 1993.
- [22] WANG Hongkuan. Experimental study and finite element analysis of driveability and static behavior of various piles installed by vibratory driving[D]. Texas: University of Houston, 1994.
- [23] WESTERBERG E, ERIKSSON K, MSAAARSCH K R. Soil resistance during vibratory pile driving[R]. International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Swedish Geotechnical Society, Vol.3, 1995.
- [24] BEMENT R, SELBY A. Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibro-driving of piles[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1997(15): 121 - 143.
- [25] BOSSCHER P J, MENCLOVA E, RUSSEL J S, et al. Estimating bearing capacity of piles installed with vibratory drivers[R]. Technical Report CPAR-GL-98-2; U S Army Corps of Engineers, Washington D C, USA, 1998.
- [26] HOLEYMAN A, LEGRAND C. Soil modeling for pile vibratory driving[C]// Int Conf on Design and Construction of Deep Foundation, Orlando, 1994: 1165 - 1178.
- [27] HOLEYMAN A, LEGRAND C. A method to predict the driveability of vibratory driven piles[C]// Proc of 5th Int Conf. on the application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, 1996: 1101 - 1112.
- [28] HOLEYMAN A. Vibratory driving analysis. keynote lecture[C]// The Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Sao Paulo, Brazil, 2000.
- [29] VANDEN BERGHE. Sand strength degradation within the framework of vibratory pile driving[D]. Louvain Catholique University, 2001.
- [30] TOYOAKI NOGAMI, REN Fen-zhi, CHEN Jen-wha, et al. Vertical vibration of pile in vibration-induced excess pore pressure field[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(5): 422 - 429.
- [31] MASOUMI H R, DEGRANDE G Lombaert. Prediction of free field vibrations due to pile driving using a dynamic soil-structure interaction formulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, **27**(1): 126 - 143.
- [32] WARRINGTON DON C. Driveability of piles by vibration[C]// Paper Presented at Deep Foundation Institute

- 14th Annual Member Conf, 1989a: 139 - 154.
- [33] WARRINGTON DON C. Theory and development of vibratory pile driving equipment[C]// Proc of the 21st Annual Offshore Technology Conf, Dallas, 1989b: 541 - 550.
- [34] SCHMID W E. Driving resistance and bearing capacity of vibro-driven model piles[S]. American Society of Testing and Materials, ASTM STP 444, 1969: 362 - 375.
- [35] HOLEYMAN A. An analytical model based computer program to evaluate the penetration speed of vibratory driven sheet piles[R]. Brussels: Belgian Research Institute, 1993: 23.
- [36] BAUER E. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(1): 13 - 26.
- [37] GUDEHUS G. A comprehensive constitutive equation for granular materials[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(1): 1 - 12.
- [38] SMITH E A. Pile-driving analysis by the wave equation[J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1962, 127(1): 1145 - 1170.
- [39] 陈福全, 汪金卫, 简洪钰. 高频液压振动锤打桩的可打入性分析模型[J]. 福建工程学院学报, 2009, 7(1): 9 - 15. (CHEN Fu-quan, WANG Jin-wei, JIAN Hong-yu. The models for vibratory driveability of piles by vibratory hammer[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2009, 7(1): 9 - 15. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)