



超大直径钢圆筒的振沉特性计算研究

胡小波¹, 张文渊², 龚济平¹

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对超大直径钢圆筒振沉施工装备受制于外国企业的现状, 解决重大工程建设关键难题。依托宁波舟山某重点水工项目建设工程, 联合国产液压振动锤龙头企业, 进行了国产 12 锤联动大型液压振动锤的研发, 通过液压、机械、电气系统的三同步成功实现了多锤联动。在该系统的研制过程中, 通过在制造基地进行单锤、双锤、12 锤组联动测试, 初步验证了其联动性能。联动测试通过后, 选择依托项目 T2 试验筒进行振沉全过程监测, 通过在大圆筒上安装动态应变计、加速度传感器等监测设备, 全程监测了大圆筒振沉时的动力行为, 并对大圆筒振沉时的振幅、应变特性进行了分析, 提出新的工作振幅动态计算方法, 可以实现对工作振幅的全过程预测。研究成果对于多锤联动国产化替代、超大直径钢圆筒振沉可打性分析均有一定的指导意义。

关键词: 液压锤; 多锤联动; 工作振幅; 必要振幅; 加速度

中图分类号: U655; TU472.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0246-09

Calculation and research on vibration settlement characteristics of ultra large diameter steel cylinder

HU Xiaobo¹, ZHANG Wenyuan², GONG Jiping¹

(1. CCCC Third Harbor Scientific Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the current situation where the vibration sinking construction equipment for ultra large diameter steel cylinders is constrained by foreign enterprises, the key problems in major engineering construction should be solved. Based on the construction project of a key hydraulic engineering project in Zhoushan, Ningbo, we have collaborated with a leading domestic hydraulic vibration hammer enterprise to develop a domestically produced 12 hammer linkage large-scale hydraulic vibration hammer. Through the synchronization of hydraulic, mechanical, and electrical systems, it has successfully achieved multi hammer linkage. During the development process of the system, single hammer, double hammer, and 12 hammer group linkage tests are conducted at the manufacturing base to preliminarily verify its linkage performance. After passing the linkage test, the entire process of vibration settlement is monitored by relying on the T2 test tube of the project. By installing dynamic strain gauges, acceleration sensors and other monitoring equipment on the large cylinder, the dynamic behavior of the large cylinder during vibration settlement is monitored throughout the process. The vibration amplitude and strain characteristics of the large cylinder during vibration settlement are analyzed, and a new dynamic calculation method for working amplitude is proposed, which can achieve full process prediction of working amplitude. The research results have certain guiding significance for the localization and replacement of multi hammer linkage, as well as the analysis of the vibration sinking and hitability of ultra large diameter steel cylinders.

Keywords: hydraulic hammer; multi hammer linkage; work amplitude; necessary amplitude; acceleration

收稿日期: 2024-12-18

作者简介: 胡小波 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 国家注册土木工程师(岩土), 研究方向为水运工程地基处理、深基坑等岩土工程。

在振动沉桩的发展历史中,已有很多学者研究,其中包括 Smart(1969 年)、Leonards 等(1995 年)、Vinking(2002)。瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院土木与建筑工程系的 Kenneth Vinking 在其博士论文中提到,前苏联和德国几乎同时启动了振动打桩机的研究,目前见诸文献的记录是德国在 1930 年开始了振动打桩机的研究,而前苏联于 1931 年开始了相关研究,并在第二次世界大战期间实现了批量生产。此后,振动打桩法在法国、德国和美国得到了较迅速的发展。1930 年 Lorenz 在德国进行了振动打桩试验,1932 年 Hertwig 成功采用振动打桩机在柏林夏洛特-腾堡技术学院建设工程中进行木桩的振动打设,实现了振动打桩机最早的商业应用,之后申请了相关的专利。前苏联 Pavy-luk 在研究土动力学过程中,发现振动可以降低无黏性土的强度,提出采用振动驱动器打桩的概念设想。Barkan 沿此设想,加强了振动驱动器的研究,他指出采用振动打桩桩侧壁摩阻力大大降低。之后,前苏联的学者又提出把振动打桩扩展到黏性土的可能。我国 1956 年在武汉长江大桥建设过程中,引入前苏联 BII-1、BII-3、BII-4 型振动打桩机进行打桩,此后振动打桩技术在我国得到广泛的应用^[1-7]。在振动打桩设备的研发方面,国内中铁工程机械研究设计院于 2003 年研制成功首台 HFV34 型无共振高频液压振动锤。该桩锤工作频率 0~35 Hz,振幅 0~16 mm,额定激振力 1 000 kN,最大激振力 1 600 kN。

由于单个振动锤击振力的限制,在大直径圆筒的振沉施工中,单个振动锤难以满足沉贯的需

求。在长江口深水航道治理二期工程大圆筒试验段工程中,借鉴和研究国内外桩基工程和工程机械发展状况的基础上,创新性地提出了采用多个振动锤联合振动下沉大直径混凝土圆筒的方案,并实现 4 个 APE400 型振动锤联动下沉的成功应用。目前,该工艺已经在长江口航道治理二期试验段工程、番禺蒲州海堤护岸工程(2003 年)、港珠澳工程以及深中通道工程中实现了应用,其中长江口航道治理二期工程实现了直径 12 m、高 22 m 的混凝土大圆筒的下沉,番禺蒲州海堤工程实现了直径 13.5 m、高 27 m 钢圆筒的下沉,港珠澳工程实现了采用 8 个 APE600 型振动锤对直径 22 m 的大直径钢圆筒的振动沉贯,深中通道实现了采用 12 台 APE600 对 28 m 大直径钢圆筒的振动沉贯^[8-10]。

1 国产化多锤联动效果分析

虽然多锤联动振沉方案在我国多个重大工程中得到应用,然而截至目前,上述工程所采用的核心装备几乎都是美国 APE 和荷兰 ICE 供应的,不仅采购价格较高,而且服务响应速度不如本土企业。在目前各个产业关键技术国产化替代的大背景下,解决重大工程建设中的重大装备问题也势在必行。为了解决这个难题,中交三航局联合国内振动打桩锤研发制造核心厂家,进行多锤联动装备研制、开发、试验。主要解决思路是基于 YZ-400L 型振动锤开发 12 锤联动打桩系统,通过齿轮机械系统、液压系统、电气控制等 3 个主要系统的同步,达到整体同步的目的,该型 12 锤联动设备的主要技术规格参数见表 1。

表 1 国产化多锤联动设备 YZ-400L×12 规格参数

Tab. 1 Specification parameters of domestic multi hammer linkage equipment YZ-400L×12

偏心力矩/(kg·m)	最大激振力/MN	最高转速/rpm	最大空载振幅/mm	最大静拔桩力/MN	总质量(不含油管)/t
2 400	51.6	1 400	37	28.8	728

该型打桩系统采用了 6 个 2600P 的动力站,12 锤联动振动锤组由振动平台、液压振动锤、角齿轮箱以及联动轴等组成(不包含实际施工时的分配梁系统)。12 台 YZ-400L 型液压振动锤使用螺栓安装

于振动平台上,每台振动锤内侧有 2 个角齿轮箱同样安装在振动平台上,相邻角齿轮箱通过万向联动轴连接,而角齿轮箱的另一端与振动锤伸出轴使用联轴器连接。其机械连接原理见图 1。

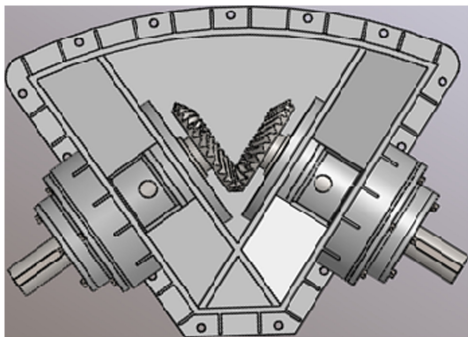


图 1 机械同步原理

Fig. 1 Mechanical synchronization principle

振动平台成环形，由 12 个主梁和 12 个副梁拼接而成。主梁与副梁采用方销及螺栓连接，满足竖向剪切以及横向连接要求。把每个振动锤的偏心块转动方向进行强制机械同步。每台振动锤的齿轮箱均有 2 条伸出轴，每 2 台相邻振动锤间通过角齿轮箱变换角度，角齿轮箱间再通过万向联轴器连接，形成一个闭环，尽可能地达到每个振动锤的振动频率一致，见图 2。

在设备实际振动沉桩前，为了更好地评估联动后各锤的同步性指标，必须在出厂前测试其同步性。试验性测试主要有 3 个目的：1) 通过振动传感器(加速度计)获得各振动锤的振动时域曲线；2) 采集一段时间(5 或 10 min)的振动信号，对振动信号进行傅里叶变换，求出各振动锤的频域曲线，按照能量功率谱求出 1、2、3 阶主频值；

3) 根据各振动锤的振动时域曲线，进行 12 锤联动后的振动同步性分析，并评价同步性能。



图 2 多锤联动系统

Fig. 2 Multi hammer linkage system

测试通过在振动锤和驱动平台上安装加速度传感器和动态应变计的方式对其转速振幅、相位差等指标进行分析。实时转速主要通过在轴承处布置转速传感器进行监测。主要监测方法为：在轴承处布置 1 个转速传感器，通过转速分析仪采集转速的动态数据，并与振动分析仪相互对比，以校核确定液压振动锤实时转速。在 1 号、4 号、8 号、12 号液压激振器处分别安装加速度传感器，利用振动分析仪采集加速-时程曲线，并通过对加速度-时程曲线的积分求得振幅-时程曲线，通过傅里叶变换将时域数据转换成频域数据求得振动频率曲线。加速度传感器为 INV9822 型，采用频率 1 024 Hz，时间精度为 1×10^{-6} s。各项参数监测结果见表 2。

表 2 12 锤联动系统同步性测试结果

Tab. 2 Synchronization test results of 12 hammers linkage system

计算项目	振动频率/rpm	振幅相位差/(°)	偏心力矩折减系数	偏心力矩/(kg·m)	振幅/mm	振动质量/kg	激振力/kN
12 锤组实测值	180	11.60	0.990	2 376.0	4.505 4	527.367	843.35
12 锤组理论值	200	16.78	0.978	2 347.2	—	—	833.12
比较偏差/%	11.10	—	—	1.20	—	—	1.20

由表 2 可知，12 锤联动系统的偏心力矩和激振力指标实测值与理论值基本一致，差异非常小。振幅相位差实测值为 11.6° 优于理论值 16.78°，从平台上的测试结果看，多锤联动系统达到了设计指标，具备进行实际振沉施工的条件，因此，2023 年 4 月 6 日，将该多锤联动系统应用于舟山宁波某重点水工项目 T2 试验筒的试验性振沉施工。

2 工程概况及现场测试方案

舟山某围海造陆项目由于工期较紧，海堤前沿水深较大，为了快速成陆，大部分海堤采用钢圆筒抛石斜坡堤的方案。海堤长度超过 3 km，需要振沉的超大直径钢圆筒数量为 126 个，钢圆筒直径为 22 m，质量为 481~677 t。根据地质勘察报告《SA-2022-0045 围堤、堆场区施工图勘察报告

PDF(出版)》, T2 筒临近的地质勘探钻孔为 A1、B203, 其地质勘察剖面见图 3。

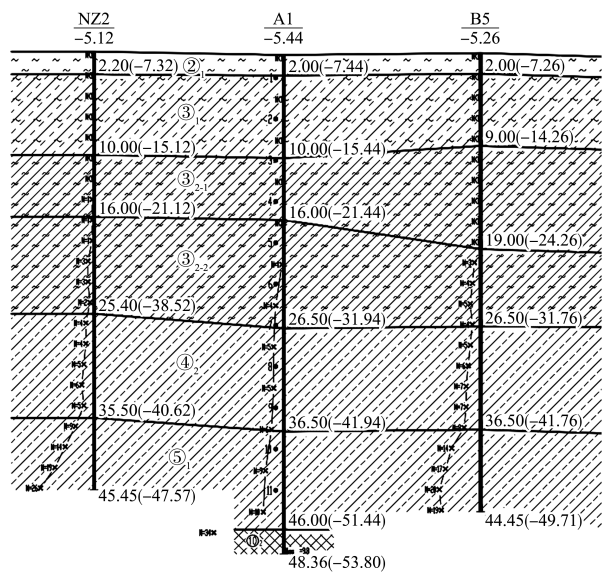


图 3 A1、B5 勘探孔地质剖面 (单位: m)
Fig. 3 Geological profiles of exploration holes A1 and B5 (unit: m)

本场地在最大勘探范围内分布地层主要为全新世(Q_4)的灰色淤泥质土层, 晚更新世(Q_3)灰绿、灰黄色黏性土层、灰色粉性土层及碎石混黏

性土, 沉积环境为海相冲湖相及洪积相沉积, 其下伏基岩为侏罗系凝灰岩, 各岩土层的工程地质特征自上而下分布见表 3。

表 3 大圆筒试验性下沉位置邻近地层分布
Tab. 3 Distribution of strata near experimental sinking position of large cylinder

土层号 及名称	A1 钻孔		B203 钻孔		标贯 击数/ 击
	层顶 高程/m	层底 高程/m	层顶 高程/m	层底 高程/m	
② ₁ 淤泥	-5.44	-7.44	-5.31	-9.01	<1
③ ₁ 淤泥质粉质黏土	-7.44	-15.44	-9.01	-15.31	<1
③ ₂₋₁ 淤泥质黏土	-15.44	-21.44	-15.31	-24.31	<1~1
③ ₂₋₂ 淤泥质黏土	-21.44	-31.94	-24.31	-33.91	1~3
④ ₂ 粉质黏土	-31.94	-41.94	-33.91	-39.81	3~7
⑤ ₁ 粉质黏土	-41.94	-51.44	-39.81	-47.76	9~26

根据设计图纸, 大圆筒结构直径 22 m、筒壁板厚 16 mm、T2 筒总高 53 m, 在振沉过程中, 为了获得大圆筒在振沉过程的位移、沉降数据以及动力响应参数, 在筒身布置了沉降、位移、测斜、加速度以及动应变监测, 具体测点布置见表 4。动应变监测采用全桥工具式应变计 TZT230 和动静态电阻应变仪 TZT3826H, 主要性能参数见表 5。

表 4 T2 筒振沉试验监测内容
Tab. 4 Monitoring contents for T2 cylinder vibration sinking test

监测项目	数量	备注
筒顶沉降、位移	4 点	海侧、陆侧各 2 点
筒身变形(测斜管)	1 组	测斜管与筒同高, 固定测斜仪测列每米 1 个探头, 总共 50 个
筒身振动加速度	1 测列, 13 测点	筒高范围内均匀布置, 每 4 m 布置 1 个传感器, 总共 13 个传感器
筒身动应力	4 测列, 52 个测点	筒高范围内均匀布置, 其中陆侧布置 3 个测列, 测线夹角约 30°(实际安装时避开筒体竖向肋), 海侧布置 1 个测列, 总共 4 个测列, 52 个传感器

表 5 应变片主要参数
Tab. 5 Main parameters of strain gauges

规格 型号	尺寸参数			性能参数			
	标距 L /mm	外形尺寸/(mm×mm×mm)	孔直径 D /mm	测量范围/ $\mu\epsilon$	灵敏度/($\mu\epsilon \cdot mv^{-1} \cdot v^{-1}$)	拱桥电压/VCD	漂移/ $\mu\epsilon$
TZT230	76	114×32×12.5	10	±1 000	约 5 000	≤10	≤±3

传感器的安装在钢圆筒的预制厂同步进行, 并采用槽钢、空心钢管分别对传感器以及电缆进行保护, 其安装过程见图 4。

在安装传感器前后都对传感器的工作性能进行了测试, 并在完成全部安装后进行了归零处理。



图 4 传感器的安装与保护
Fig. 4 Installation and protection of sensors

3 现场原位振沉试验过程

本次试验的系统总吊重为 1 650 t，主要包含大直径钢圆筒、12 锤联动系统(含振动锤、连接系统、振动平台、夹具)、分配梁系统，试验性振沉拟定的地点为马迹山基地西堤，选择了西堤 T2 及 T3 号圆筒进行振沉试验，过程照片见图 5。



图 5 大圆筒的施工定位
Fig. 5 Construction positioning of large cylinder

在起重船、钢圆筒、定位船舶等各项准备完成后，开始振沉施工，振沉过程除了记录上述传感器的监测数据，另外对各时间段的筒底高程、贯入速度进行记录，振沉主要过程见表 6。

表 6 大圆筒试验性振沉过程主要参数
Tab. 6 Main parameters of experimental vibration sinking process of large cylinder

阶段	时间	阶段末筒底高程/m	用时/min	下沉/m	贯入速度/(mm·s ⁻¹)
自重下沉阶段	22:00:00—22:26:00	-13.6	26	4.94	3.17
	22:26:00—22:31:00	-14.3	5	0.76	2.53
	22:31:00—22:47:00	-23.1	16	8.76	9.13
	22:47:00—22:52:00	-25.0	5	1.90	6.33
振动下沉阶段	22:52:00—22:56:00	-26.5	4	1.50	6.33
	22:56:00—23:06:00	-31.5	10	5.04	8.40
	23:06:00—23:20:00	-39.1	14	7.54	8.97
	23:20:00—23:29:00	-39.9	9	0.80	1.47
	23:29:00—23:46:00	-40.2	17	0.32	0.31
停锤	23:47:00	-	-	-	-

2023 年 4 月 6 日晚，对 T2 试验筒进行了试验性振沉施工，大圆筒到达预定位置后开始振沉施工。振沉大概可以分为 2 个阶段，第 1 阶段为自重下沉阶段，从 22:00:00 至 22:26:00，历时 26 min，在自身重力作用下筒底高程从-8.64 m 下沉至-13.58 m。在自重下沉阶段，主吊机吊重从 1 650 t 逐渐释放减小至 1 420 t。第 2 阶段为振动下沉阶段，22:26:00 开启振动锤，主吊的吊重回升至 1 550 t，振动锤转速开至 900 转，至 23:46:00 结束，历时 80 min。大圆筒底高程从-14.34 m 下沉至-40.20 m，最大贯入速度为 9.13 mm/s，停锤时最小贯入速度约 0.31 mm/s。贯入速度虽然不是停锤的唯一标准，但对于振动沉贯而言，贯入速度仍然是终止振动贯入的重要指标。Smart 建议以 6.2 mm/s 作为停锤标准，而 Viking 建议以 8.0 mm/s 作为停锤标准。由表 6 可知，23:06:00—23:20:00，大圆筒仍然保持了较高的振动贯入速度，以 8.97 mm/s 进行贯入，此时离最终高程还有约 1.1 m；之后，由于筒底进入④₂层底并接近⑤₁层粉质黏土，其贯入速度显著减小至 1.47 mm/s，最终贯入速度仅为 0.31 mm/s。综上，对于超大直径钢圆筒，如果以 6.2 或 8.0 mm/s 作为其停锤贯入速度的控制值均偏大，建议本工程以 1.5~2.0 mm/s 作为其停锤控制标准。

4 大直径钢圆筒下沉中的动力特性分析

从沉贯过程的力学平衡以及运动学规律分析, 振动沉桩的振动锤对桩的作用力以及其运动学规律不同于静力压桩和锤击沉桩。静力压桩的力持续作用于桩顶, 但是在运动学上桩作单向的运动。锤击沉桩锤与桩顶接触后即弹开, 桩的运动在宏观上同样呈现单一的运动方向, 但是在力上, 由于桩底反射应力的存在, 锤击沉桩往往会产生较大的拉应力。振动沉桩与静力压桩类似的是, 锤与桩始终保持接触, 但是在运动学上, 由于振动锤作简谐振动, 锤桩体系存在一个反方向的运动。因此在力学和运动学上, 振动沉桩明显不同于锤

击沉桩与静力压桩, 然而目前振动沉桩的可打性分析几乎均采用拟静力学方程或基于锤击打桩的一维波动方程。本文结合试验测试的应变、加速度数据对其应力、振幅特性进行分析。在大圆筒振沉试验过程中, 对各测点的应变进行全过程的监测, 并形成微应变-时程曲线。对信号质量进行了初步分析, 排除明显异常的测点数据后, 选择6个具有代表性的测点进行数据分析, 其位置分别为筒顶(1-1测点、1-2测点)、筒体中部(1-7测点、1-52测点)和筒体底部(1-12测点、1-20测点), 应变-时程曲线见图6。

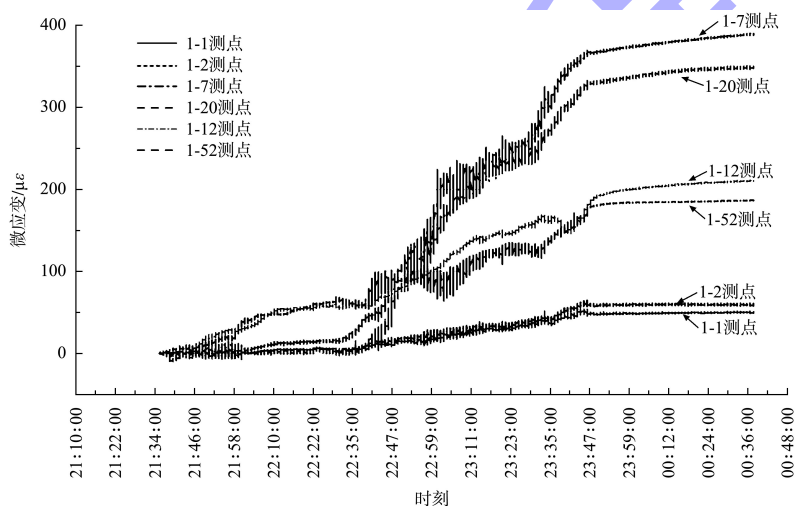


图6 振沉过程各测点应变-时程曲线

Fig. 6 Strain and time history curve of each measuring point during vibration sinking process

从图6曲线形态分析, 振动下沉阶段应变-时程曲线大概可分为3个大的阶段, 第1阶段为21:38:00—22:31:00, 第2阶段约为22:31:00—23:46:00, 第3阶段约为23:47:00以后。由表6可知, 第1阶段主要为自重下沉阶段和初始起锤阶段, 该阶段吊机逐步释放, 吊重从1 650 t逐渐减小至1 420 t, 大圆筒在自身重力作用下逐渐下沉, 下沉深度约5 m。从该阶段3个不同高度测点的应变曲线看, 筒体底部的1-12测点和1-20测点应变值增加较明显, 而筒体顶部和底部的几个测点应变值变化不明显, 该阶段筒体底部逐渐进入土层, 而筒体中部和顶部都在水面以上。第2阶段开始振动后, 3个位置测点的应变值均有较明显的变化, 从曲线形态上

看, 筒体中部的2个测点应变增加最为迅速, 很快超过筒体底部的应力水平, 而筒体顶部的应变值虽然也有较明显的增加, 但增加幅度远小于筒体中部和底部。这与静力压桩的桩身轴力分布明显不同, 静力压桩的力是从顶部向下面逐渐衰减, 桩顶轴力较大, 而桩下部的轴力较小。据此可知, 目前振动打桩中常用的拟静力学模型并不符合实际, 静力学模型假定力是自上而下传播的, 这与实测的曲线有根本的不同。由图6可知, 筒体中部最大应变约为375 $\mu\epsilon$, 筒体底部最大应变约为210 $\mu\epsilon$, 筒顶最大应变约为50 $\mu\epsilon$, 三者换算应力分别约为77、42和10 MPa。可见在振动沉桩的过程中, 筒体整体应力水平明显低于钢材的屈服极

限。但是沉桩过程中可以发现,在筒体最顶部(液压振动锤夹具的附近)由于振动锤不是绝对同步,且存在左右晃动的情况,筒体顶部处于非常复杂的应力状态,筒体顶部容易产生大量的热量,进而加速疲劳破坏。对测试获得的加速度-时程曲线进行分析,见图 7。

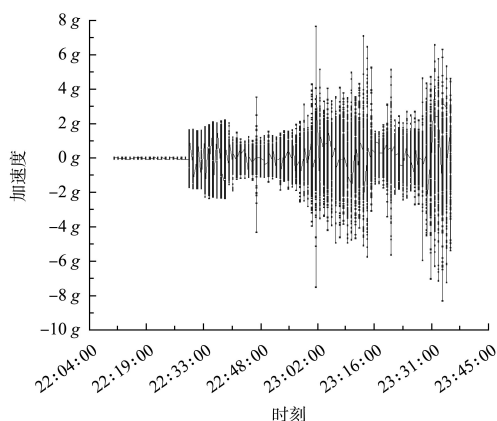


图 7 13-6 测点加速度-时程曲线

Fig. 7 Acceleration and time history curve of 13-6 measuring point

由图 7 可知,23:02:00 以前,加速度较小,基本在 $1.5g \sim 2.0g$,该阶段自开锤后,大圆筒从 -14.3 m 逐渐沉至 -31.5 m ,振动锤档位为 2 档,转速约为 $900 \sim 1\,000$ 转。23:02:00 之后,大圆筒底高程进入④₂层粉质黏土层,标贯击数 N 值为 $3 \sim 7$ 击,振动锤开至 1 档,转速由 $1\,000$ 转逐渐提升至 $1\,300$ 转,振动加速度增至 $4g \sim 6g$,中间几分钟下调振动锤转速,振动加速度随之下降。由此可知,大圆筒的振动加速度主要与振动锤的转速即击振力相关,击振力越大,振动加速度越大。

对大圆筒振沉时的振幅与挤密砂桩振动沉桩时的振幅进行对比,对图 7 加速度-时程曲线进行二次积分得到振幅-时程曲线,图 8a)、8b)分别为大圆筒接近沉桩极限和打至沉桩极限时的振幅-时程曲线。

图 8a)振幅值约为 $2.2 \sim 2.5\text{ mm}$,该阶段筒体在④₂层粉质黏土层,贯入速度约为 9.17 mm/s 。图 8b)振幅约为 1.3 mm ,筒体已沉至极限状态,贯入速度约为 $0.31 \sim 1.47\text{ mm/s}$ 。由此可见,越接近沉桩极限,土体的动阻力越大,在振动击振力

不变的情况下,大圆筒的振幅越小。因此,振动体系的振幅不仅与振动锤的偏心力矩、振动体系质量相关,还与外部的阻力相关。

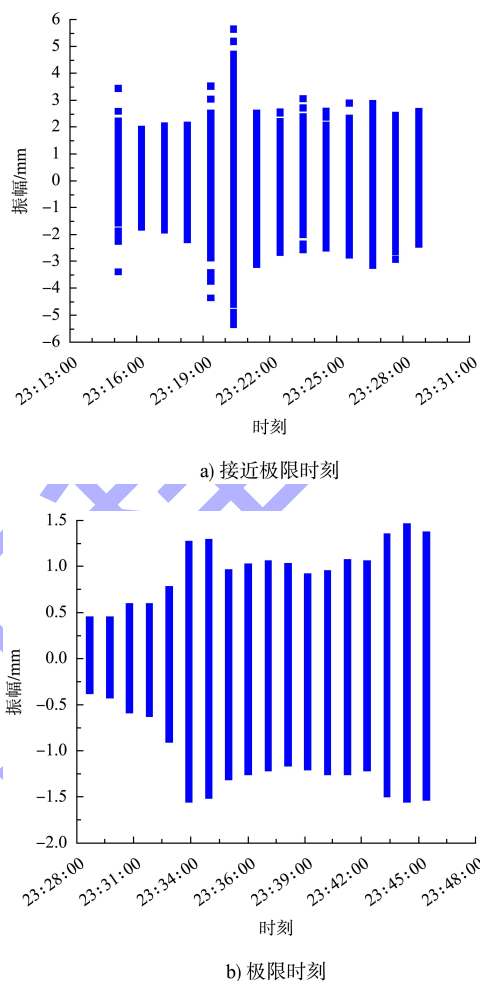


图 8 13-6 测点振幅-时程曲线

Fig. 8 Amplitude and time history curve of 13-6 measuring point

从表 6、图 8 以及文献[11]可以看出,虽然港珠澳东人工岛岛壁附近的土层地质条件好于本项目大圆筒试验性下沉的位置,其标贯击数总体大于本项目,但是从沉桩过程及沉桩至极限位置的振幅看,前者沉桩至极限的振幅约为 2.28 mm ,而后者沉至极限的振幅约为 1.2 mm ,明显小于前者,这说明,沉桩至极限的振幅不仅与土质(砂土或者黏土)、土性相关(土体物理力学指标的高低),也与振动体系相关(振动体系的类型、质量、振动频率等),后者振动体系的质量较大,达到 $1\,400$ 多吨,可以以较小的振幅保持贯入。Van Rompaey 认为,实际上桩主要不靠振动而靠自身重力进入土

层。John White 提出了相似的看法, 认为桩的自身重力越大, 所需要的必要振幅越小。

必要振幅理论认为, 振动沉桩最终时刻的体系振动振幅应大于其必要振幅。然而, 现在几乎所有的分析方法都将体系最初的振幅当做最终的振幅, 根据振动锤打桩力学原理, 振动锤的偏心力矩 M 等于偏心块质量 m 和偏心矩 r 的乘积, 偏心力矩带动振动体系的振动:

$$M=A_0m_c$$

(1)

式中: A_0 为初始振幅; m_c 为振动体系初始质量, 主要为振动锤的自有质量。

在振动打桩过程中, 由于振动锤夹持桩具, 其质量发生变化, 因此假如夹持桩具后空振, 该时的振幅如下:

$$A_T=\frac{M}{m_c+m_z}$$

(2)

式中: A_T 为最终振幅; m_z 为振动锤夹持的桩具(含夹具)的质量。

在振动打桩的过程中, 由于桩体会受到土体的摩擦阻力和端阻力, 因此, 振动锤体系不是自由振动。在振动打桩时, 其在土体阻力作用下的振幅可按下式计算:

$$A_T=\frac{M}{m_c+m_z+F_s/g+F_c/g}\cdot\eta$$

(3)

式中: F_s 为振动沉桩时的动摩阻力; F_c 为振动沉桩时的动端阻力; g 为重力加速度; η 为系统联动引起的振幅折减系数。

根据振动沉桩时不同土质条件下动摩阻力和动端阻力以及静摩阻力和静端阻力的关系, 可以较好地预测 F_s 和 F_c , 根据式(3), 可以求得振动体系最终运动时的振动幅度, 根据 $A_T\geq A_0$, 预测其最终时刻体系的振幅是否大于其必要振幅。

空振时的最大振幅为 37 mm, 振动锤自身质量为 21 t, 12 个锤联动后, 其体系总的质量为 1 469 t(不含分配梁质量), 根据动摩阻力计算得到动阻力, 见表 7。

表 7 T2 试验筒动阻力估算值

Tab. 7 Estimated values of dynamic resistance of T2 test cylinder

土层	土层 厚度/m	标贯入 击数/击	侧摩阻力/ kPa	灵敏度 S	基于灵敏度的动 侧阻力降低系数	基于灵敏度的 动摩阻力/kPa	基于灵敏度的 动侧摩阻力/kN
② ₁	3.0	≤1	5	5.5	0.21	1.05	216.7
③ ₁	4.5	≤1	15	4.7	0.24	3.67	1 140.9
③ ₂₋₁	10.3	≤1	15	4.35	0.26	3.97	2 821.6
③ ₂₋₂	6.0	1	15	4.35	0.26	3.97	1 643.6
	5.7	2~4	20	2.43	0.47	9.47	3 726.9
④ ₂	20.0	5~7	40	1.81	0.64	25.41	35 112.5
⑤ ₁	2.0	13~16	70	1.50	0.77	53.67	7 414.6
合计	—	—	—	—	—	—	52 076.7

根据以往在挤密砂桩动摩阻力测试等试验中获得的经验, 动摩阻力可以以灵敏度的倒数即 $1/S$ 的方式折减, 并乘以一个修正系数, 根据挤密砂桩测试的经验, 修正系数根据土质不同可在 1.05~1.20 之间取值, 取为 1.15。根据表 8 的计算结果, 在沉桩至极限时刻时, 其总的动端阻力和动摩阻力为 5 207 t, 将上述计算结果代入式(3)进行计算, 系统联动引起的振幅折减系数根据 12 锤联动测试获得的数据并考虑在实际工况下实际

折减系数的放大, 此处 η 取 0.97, 沉至极限时的最终振幅如下式:

$$A_T=\frac{37\times(21\times12)}{1\,469+5\,207}\times0.97=1.35\text{ mm}$$

(4)

根据式(4)计算结果, 考虑沉桩过程动摩阻力和动端阻力影响的工作振幅计算值约为 1.35 mm, 与图 8 振沉至极限时刻的振幅-时程曲线相比, 该计算结果与实测值非常吻合, 说明考虑振动过程的阻力是必要且合适的。

5 结论

1) 通过制造基地和现场试验性振沉试验,证明国产多锤联动系统工作性能良好,通过液压系统、电气系统、机械系统 3 个系统的同步,适用于超大直径大圆筒振沉的多锤联动系统开发取得成功。

2) 振动沉桩应力-时程曲线以及其沿桩身的应力分布与静力压桩明显不同,目前常用的振动沉桩拟静力学模型与实际的测试有较大的出入,不同截面的应力增长随入土深度的变化有明显差异。

3) 传统的振幅法分析振动沉桩采用起振振幅大于必要振幅这个条件具有局限性,振动沉桩时的振幅随土层阻力的变化而不断变化,因此采用与土层阻力相关的模型分析工作振幅与必要振幅的关系更符合实际。

参考文献:

- [1] 韩亮. 渤海钻井平台桩基工程打入桩波动分析及其设计方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
HAN L. Wave analysis and design method of driven pile in Bohai drilling platform pile foundation engineering[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [2] 张捷. 沉入式大圆筒下沉过程数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2009.
ZHANG J. Numerical simulation of sinking process of submerged large cylinder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [3] 刘晗晗, 孙克俐, 徐艇. 大圆筒结构振动下沉过程的瞬态有限元分析[J]. 港工技术, 2013, 50(1): 25-28.
LIU H H, SUN K L, XU T. Transient finite element analysis on vibrating subsidence of large-diameter cylinder [J]. Port engineering technology, 2013, 50(1): 25-28.
- [4] VAN ROMPAEY D, LEGRAND C, HOLEYMAIF A. A prediction method for the installation of vibratory driven piles[J]. Transactions on the built environment, 1995, 14: 533-542.
- [5] 黄邦, 王海峰, 王幸. 大直径钢管桩施工前可打性分析与实际沉桩验证对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(6): 223-224.
- HUANG B, WANG H F, WANG X. Comparative analysis of drillability analysis and actual pile driving verification before construction of large-diameter steel pipe piles [J]. China water transport (the second half of the month), 2018, 18(6): 223-224.
- [6] 滕爱国, 吴启和, 仇正中. 大直径钢圆筒多锤联动振沉设备及工艺[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(9): 85-89.
TENG A G, WU Q H, QIU Z Z. Joint pile-hammer vibration sinking equipment and construction technology of large diameter steel cylinder [J]. China harbour engineering, 2017, 37(9): 85-89.
- [7] 胥新伟, 刘亚平, 黎双邵. 大直径钢圆筒振沉计算方法[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(10): 14-16.
XU X W, LIU Y P, LI S S. Calculating method for vibro-sinking large diameter steel caissons [J]. China harbour engineering, 2014, 34(10): 14-16.
- [8] 孟凡利, 孔令磊, 刘昊槟, 等. 大直径钢圆筒振动下沉工艺及设备的开发与应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(7): 116-119.
MENG F L, KONG L L, LIU H B, et al. Development and application of vibration sinking technology and equipment of large diameter steel cylinder [J]. China harbour engineering, 2015, 35(7): 116-119.
- [9] 郭全生, 王向平, 付永刚, 等. 大直径桩波动方程可打性分析及应用[J]. 地震工程学报, 2017, 39(S1): 232-235.
GUO Q S, WANG X P, FU Y G, et al. Drivability analysis of offshore large diameter piles using a wave equation analysis program and its application [J]. China earthquake engineering journal, 2017, 39(S1): 232-235.
- [10] 陈岱杰, 陈龙珠, 郑建国. 高频振动打桩机理的试验研究[J]. 铁道建筑, 2006, 46(7): 49-51.
CHEN D J, CHEN L Z, ZHENG J G. Experimental study on mechanism of pile driving based on high-frequency vibration[J]. Railway engineering, 2006, 46(7): 49-51.
- [11] 胡小波, 何洪涛, 张曦. 挤密砂桩振动沉桩可打性分析中必要振幅的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(9): 36-42.
HU X B, HE H T, ZHANG X. Experimental study on the necessary amplitude in the analysis of the drivability of compacted sand pile vibration driving [J]. China harbour engineering, 2024, 44(9): 36-42.

(本文编辑 赵娟)