

# 吹填砂场地强夯振动特性研究及安全评估

张朋辉<sup>1</sup>, 韩赛超<sup>2</sup>, 张小东<sup>1</sup>, 葛晓菲<sup>3</sup>

(1. 北京振冲工程股份有限公司, 北京 100102; 2. 北京勘察技术工程有限公司, 北京 100192; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**针对曹妃甸工业园区液化天然气储罐地基加固过程中所引起的地面振动进行了深入研究,通过对现场强夯振动观测记录进行统计分析、频域分析以及规律拟合,给出了吹填砂场地上强夯所引起的地面振动衰减规律、振幅(振速)随夯击次数的变化规律以及强夯振动的主频变化规律,并就场地周围已存的海堤工程和天然气储罐工程进行了振动安全评估,为现场强夯施工参数的选取提供了理论支撑,同时也弥补了国内对于类似场地振动特性研究不足的局面。

**关键词:**强夯;吹填砂;振动;衰减规律;振幅;夯击能

**中图分类号:**TU472.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)08-0058-04

**Vibration Characteristics of Dynamic Compaction and Safety Assessment in Hydraulic Fill Site/ZHANG Peng-hui<sup>1</sup>, HAN Sai-chao<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>, GE Xiao-fei<sup>3</sup>** (1. Beijing Vibroflotation Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. Beijing Explo-Tech Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The ground vibration in LNG storage tank foundation reinforcement of Caofeidian industrial zone is studied. By the statistical analysis, frequency domain analysis and the law fitting based on dynamic compaction vibration observation records in the field, the attenuation law of ground vibration caused by dynamic compaction, the variation of amplitude (vibration velocity) changing with the frequency of tamping and the main frequency variation of dynamic compaction are shown. The safety assessment of vibration is made on the existing seawall and gas tank projects around the field to provide theoretical support for the selection of dynamic compaction parameters, which also makes up the researches on the similar ground vibration characteristics in China.

**Key words:** dynamic compaction; hydraulic fill sand; vibration; attenuation law; amplitude; tamping energy

## 0 引言

强夯法又称为动力固结法,是由法国 Menard 技术公司于 1969 年首创的一种地基加固方法<sup>[1]</sup>。强夯地基加固的主要原理是将夯锤提升一定高度后自由下落,强烈冲击地面使得地基土的原有结构发生改变,从而达到提高地基承载能力或抗液化能力的目的。该方法由于施工简单、经济高效、节省材料等特点,迄今已为国内外广泛采用。但是强夯法自身也存在着不足之处:夯锤与土体相互作用时引起地面强烈震动,对周围的建(构)筑物、仪器仪表及人体等造成损害<sup>[2]</sup>。当然,不同类别的场地土层强夯震动的衰减速率不同,对周围环境的影响也不尽相同。例如:吴绵拨等对河南鹤壁火力发电厂回填粘土强夯振动记录进行了分析,给出了不同夯击能条件下强夯振动的影响半径<sup>[3]</sup>;张孟喜等人对兰州中川机场湿陷性黄土地基强夯振动记录进行了研究,

划分了不同的扰动区域,同时对强夯所引起周围建筑物的环境公害进行了分析,提出了强夯扰动影响系数的概念,为强夯振动的扰动评价提供了依据<sup>[4]</sup>;李俊如等根据砂土中的强夯振动结果,分析了砂土中强夯振动的衰减规律,并对周边建筑物的强夯振动效应进行了安全评价<sup>[5]</sup>。

近些年来,随着海港工业的兴起,强夯法在海港工程中得到普遍应用,强夯振动效应评价问题也越来越受到业主和施工单位的重视。本文以曹妃甸工业区液化天然气储罐地基加固工程为依托,对吹填砂场地中强夯振动的衰减规律、频谱特性以及影响范围进行了深入研究,针对该种类型场地土体的振动特性,为以后类似场地选择强夯施工参数以及安全评估提供借鉴和支撑。

收稿日期:2014-02-25; 修回日期:2014-06-13

作者简介:张朋辉(1984-),男(汉族),河北人,北京振冲工程股份有限公司技术负责人,岩土工程专业,从事岩土工程开发、设计、地灾治理、评价以及岩土工程施工工作,北京市朝阳区望京西园 221 号博泰大厦 12 层, zphlj@163.com。

### 1 工程概况

唐山市液化天然气地基加固工程位于河北省唐山市曹妃甸工业园区,距大陆海岸线约 18 km。场地的地貌特征属于滨海浅滩,地层分布主要为第四系的海相沉积沙层。场地周围视野相对空旷,分布有数千米的海堤工程和已完工的天然气储罐工程。场地具体位置及周围环境(未来规划完成的鸟瞰图)如图 1 所示。



图 1 场地环境鸟瞰图

本区域强夯工程所采用的夯击能为 6000 kN·m,锤重 60 t,落距 10 m。夯点成正方形布置,相邻两次夯击的时间间隔约为 2 min,且夯后夯坑不做平整。

### 2 现场强夯振动观测

此次强夯振动观测仪器采用 SWG 多功能地震探测仪,选配 891-4 型拾振器和 891 型六线放大器。SWG 多功能地震探测仪具有 12 个模拟通道,每道采样点数 512~8192 个,采样时间间隔为 8 μs~15 s,可任意选用设置。仪器增益 0~96 dB,可按 6 dB 的增量度各个通道分别进行调解。仪器频带在 0.5~20 kHz 间,高低通滤波分 8 挡可选。

考虑到现场测试尽量不对强夯施工造成影响,同时又能满足测试要求,所以将测线的布置方向选择为夯点的反向延长线上,如图 2 所示。每条测线布置 12 个拾振器,相邻两个拾振器相距 10 m,最小的夯间距为 8 m。为了获得能够真实反映场地性质

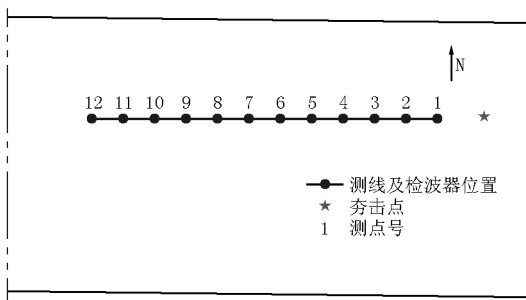


图 2 强夯振动检测测线布置平面图

的波形,测试过程中进行了多次激发,选择振幅大小合适、初动时刻明显、各通道信号连续的波形进行存储,尽量避开其他振动的干扰。

### 3 强夯振动测试结果分析

#### 3.1 振动记录时域分析

描述振动的参数主要有 3 个,即振幅、频谱和持时,称为振动三要素<sup>[6]</sup>。在强夯振动信号的时域分析过程中,作为三要素之一的振幅自然是本次研究的一个重要方面。本文将从振幅大小、振幅衰减规律以及振幅随夯击次数的变化规律 3 个方面进行研究。通过对各个测点上的振动记录进行处理,得到强夯振动的典型时域波形,如图 3 所示。

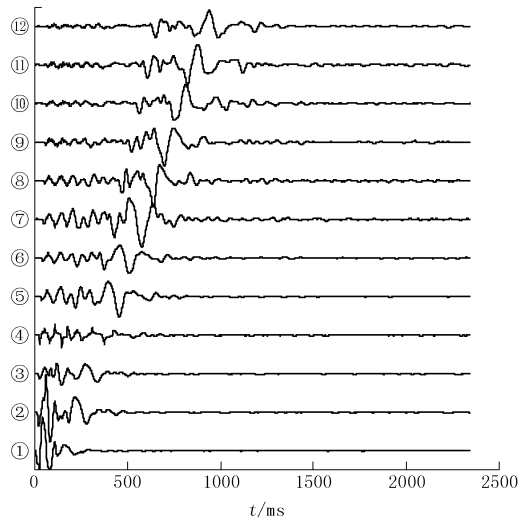


图 3 强夯振动记录波形图

强夯地面振动的振幅随夯击点到观测点距离的增大而减小,这种现象称为强夯振动衰减。强夯振动幅值大小是岩土体振动能量的反映,振幅的变化反映了振动强弱的变化,提取波形图中振幅(振动速度)的最大值进行统计,得到表 1 中不同夯击次数所对应的地面振动强度。通过对距离与振速进行关系拟合(如图 4)可以发现:吹填砂场地中强夯振动的衰减仍然服从负幂函数的衰减规律(公式 1),并且随着夯击次数的增加,地面振动强度也随之增大。出现这种现象的主要原因是和吹填砂场地的性质相关。由于砂体之间的粘聚力很小,随着夯击次数的增加,砂体颗粒之间的固结作用并不是像粘土那样明显,相反还有可能造成砂体变得越来越松散,从而造成每次夯击时场地的初始条件变化不大,所以出现了夯击次数对地面振动强度影响不大的现象。

表1 强夯地面振动强度(振速)

测点距离 $R$ /m	地面振动速度 $v/(cm \cdot s^{-1})$		
	第1次夯击	第3次夯击	第6次夯击
8	6.446281	6.452536	5.983025
18	1.889637	1.286561	1.949945
28	0.582973	0.835073	0.728495
38	0.538721	0.542738	0.597263
48	0.411523	0.461404	0.574628
58	0.903614	0.963855	1.057015
68	0.379639	0.785569	0.520979
78	0.294437	0.500699	0.477410
88	0.310447	0.353521	0.344218
98	0.610998	0.558919	0.721805
108	0.747664	0.493069	0.756474
118	0.586466	0.638629	0.610998

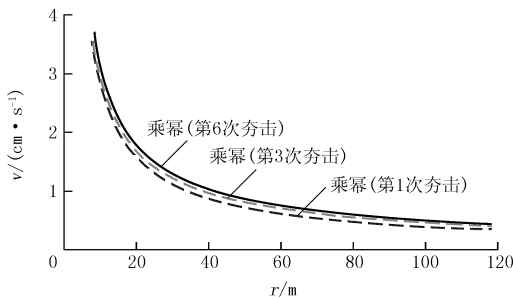


图4 吹填砂场地强夯地面振动衰减曲线

$$v = kr^{-\beta} \quad (1)$$

式中: $v$ ——测点最大振动速度; $k$ ——当量系数; $r$ ——夯间距; $\beta$ ——衰减指数。

### 3.2 强夯振动的影响范围及安全评估

受到文献[7]~[9]的启发:夯锤下落与高耸建筑物爆破拆除塌落过程基本相似,所以本文对公式(1)做了进一步推导,形如下式:

$$v = k \left[ \frac{R}{(MgH/\sigma)^{1/3}} \right]^\beta \quad (2)$$

式中: $v$ ——塌落引起的地面振动速度; $k$ 、 $\beta$ ——塌落振动速度系数当量和衰减指数; $R$ ——观测点至冲击地面中心的距离; $M$ ——下落构件的质量; $g$ ——重力加速度; $H$ ——构件的高度; $\sigma$ ——地面介质的破坏强度,一般取1 MPa。

借鉴我国现行国家标准《爆破安全规程》(GB 6722-2011)中对爆破安全允许距离的规定:对于单次或短期强夯控制振速在3.0 cm/s以下,对于频繁的强夯引起的振动带来的疲劳问题,取控制振速的一半,即强夯振动速度在1.5 cm/s以下将不会对建筑物造成损害和《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001)规定:对安全等级为一级或设计使用年限分别为100年及以上时,重要性系数分别不应小于1.1。依据上面的规范,利用公式(2)反求

距离 $R$ 值就可以确定本次夯击强夯地面振动的影响范围。关于公式(2)的具体表达式以及不同夯击次数所对应的影响半径如表2所示。

表2 强夯地面振动的回归关系及影响半径

夯击序号	回归方程	影响半径/m	相关系数
第1次夯击	$v = 21.126r^{-0.860}$	24.37	0.6504
第3次夯击	$v = 18.876r^{-0.806}$	26.18	0.7473
第6次夯击	$v = 19.254r^{-0.795}$	28.01	0.7221

经测量,海堤工程距最近夯点的距离为31 m,已建天然气储罐工程距离夯点450 m,所以本区域内的强夯地基加固工程不会对周围建筑产生损害。

### 3.3 振动频谱分析

对强夯振动信号记录通过matlab软件进行傅里叶变换,从而可以在频域内分析。频谱又是另一个反映强夯质量的关键元素,因此在频域内,将从振幅随频率衰减关系、主振频率分布范围及频率衰减函数等方面进行分析。经过快速傅里叶变换,得到各个测线质点振动振幅谱(如图5)。

强夯引起的质点振动是由多种不同频率的简谐振动叠加而成,是一个瞬态冲击振动过程。其中振动主振频率是指振动频谱中的最大振幅所对应的频率,是影响建构筑物发生共振的主要因素之一。因此说明谱峰振幅的主频比其他分量重要,从图5中12个测点数据可以看到,强夯产生的最大振幅值基本随距夯点间距离增大而减小,并且主振频率成增大趋势,但很缓慢,主要分布在6~9 Hz。进而振幅谱也反应不同频率成分的强夯振动强度不同。

## 4 结论

经过本文分析可以总结出以下结论:在吹填砂场地上,强夯振动速度同样呈现负幂函数曲线形式极速衰减关系,但随着夯击次数的增加夯实度不是很明显。以地表振速为判断标准,夯击能为6000 kJ在不同夯击次数下的影响半径依次为24.37、26.18、28.01 m;随着夯击次数的增加影响范围也不断的变大。在频域分析中,距夯点约为120 m平面内,其强夯振动主频为6~9 Hz。

针对这个吹填砂场地进行分析,利用爆破坍塌物振动速度公式对场地的安全范围进行评价。利用强夯振动是研究场地工程岩土体性质的一个重要途径。

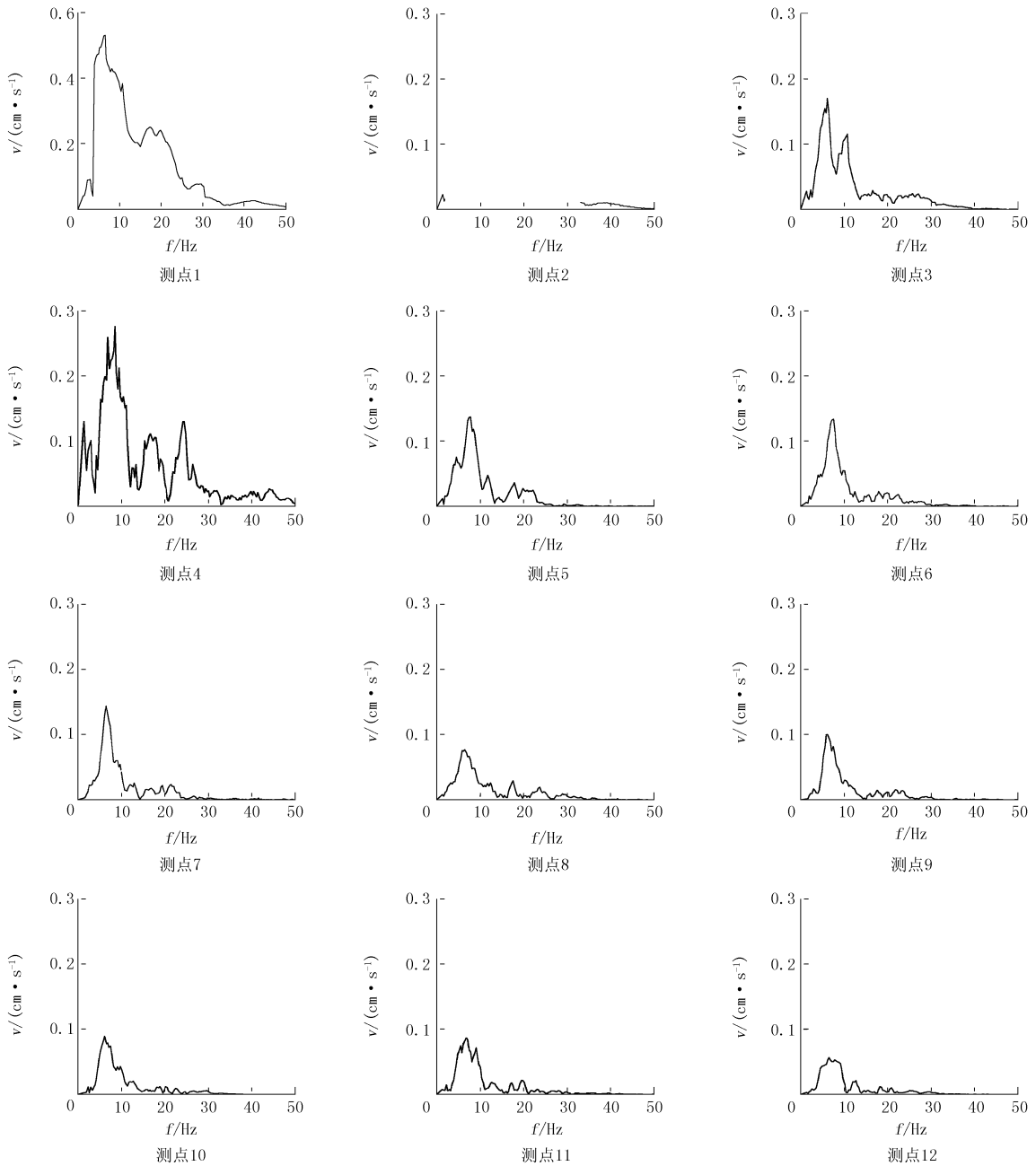


图5 强夯振动速度振幅谱

参考文献:

[1] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[2] 守田荣, 等. 振动——被忽视的环境公害[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[3] 吴锦拔, 等. 强夯对环境振动影响研究[J]. 土木工程, 1992, 6(2): 13-18.

[4] 张孟喜, 等. 黄土受强夯扰动的工程特性与环境公害研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1903-1909.

[5] 李俊如, 等. 砂土中的强夯振动对周边环境的影响研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(S1): 198-200.

[6] 谭捍华, 孙进忠, 等. 强夯振动衰减规律的研究[J]. 工程勘察, 2001, (5), 11-14.

[7] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4.

[8] 周家汉. 爆破拆除建筑物时震动安全距离的确定[J]. 工程爆破, 1993, (S2), 165-169.

[9] 周家汉. 建筑物爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论和应用[A]. 中国爆破新技术 II [C]. 北京: 中国力学学会, 2008. 727-732.

[10] 安惠泽. 某站场地强夯振动影响范围研究[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 50-53.

[11] 孙进忠. 强夯振动的频域分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 412-415.

[12] GB 6722-2011, 爆破安全规程[S].

[13] GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].