

# 强夯振动监测与分析

胡 钧<sup>1</sup>, 李 昊<sup>2</sup>

(1. 华东电力设计院, 上海 200002; 2. 无锡市城建职工大学, 江苏 无锡 214031)

**摘要:** 探讨了强夯振动机理和评价标准分析了振动监测仪器设备及测试技术, 并通过工程实例研究了振动监测在划分强夯振动影响范围、计算地基能量吸收系数、确定最大夯击数以及强夯加固深度等方面的应用。

**关键词:** 强夯; 振动监测; 环境

**中图分类号:** TU472.3+1

**文献标识码:** A

**Abstract:** Vibration mechanism during dynamic compaction and standard for evaluation are discussed herein. Vibration monitoring instruments and techniques are also analyzed. The application of the said monitoring to the calculation of the coefficient of energy absorption of ground and to the determination of the depth of consolidation by compaction are studied.

**Key words:** dynamic compaction; vibration monitoring; environment

## 1 引言

强夯施工过程中夯锤落地瞬间, 部分动能转化为冲击波, 以夯点为中心以波的形式向外传播<sup>[1]</sup>, 并引起地表振动, 这种振动在一定条件下可能成为振害, 影响到附近建筑物的安全。为了评价强夯振动的危害程度, 进行振动监测是非常必要的。

在地基加固强夯过程中, 布置一条测线实测振动加速度或速度, 通过对实测数据进行分析计算, 可以得到地面振动(垂直向、水平径向、水平切向)衰减规律及强夯对环境的影响评价。同时, 由于强夯的特点, 这种振动监测可以应用于确定强夯最大夯击数、强夯加固范围、地基能量吸收系数, 为强夯试验和隔振设计提供依据。

## 2 强夯振动机理分析和评价标准

强夯时夯锤以冲击力贯入地基内, 能量是通过夯锤底部和侧面以弹性波传播的应变能形式向外扩散而传递的, 能量转化为体波和面波传到土里, 首先压缩波到达, 剪切波次之, 瑞利波后到。其中振动能量压缩波占7%, 剪切波占26%, 瑞利波占67%, 且体波衰减比瑞利波快。因此, 面波成为影响振动程度的主导波, 并且随着距离的增加而影响增大。随着夯锤入土深度的增加, 强夯振动在地面的影响范围也增大。由于强夯往往是连续施加的, 当多次重复具有一定振幅的振波叠加就会使土体孔压增加, 总应力

增大, 应变能累积加大, 从而引起地面建筑物的振动烈度增大。

为确定强夯施工对周围建筑物的影响及可能产生的危害程度, 以及对精密仪器和人体的影响, 划分强夯振动的影响范围, 在强夯施工过程中进行振动实测是非常必要的。

国外对振动的评价标准有多种, 常见的有振动强度法、质点振动功率法和时程曲线反应谱法等<sup>[2]</sup>, 但目前通用振动对人体的影响是国际标准化组织中的机械振动和冲击技术委员会研制的ISO2631标准。本文推荐国家标准《中国地震烈度表》(GB/T17742-1999)作为的振动对应表, 也是强夯监测的评定标准(表1)。

## 3 测振仪器设备和测试方法

### (1) 仪器设备

测振系统由拾振器、电荷放大器、测振仪(含放大、滤波功能)、计算机、打印机及电缆组成。为了掌握整套系统的整体灵敏度、频率特性、仪器间线性动态特性, 保证测试结果准确、可靠, 整套测振设备在试验前均要进行标定, 并以标定的数值进行计算<sup>[3]</sup>。

### (2) 测试方法

测振点不应设在浮砂地、草地、松软的地层和冰

收稿日期: 2000-04-16; 修订日期: 2000-06-08

作者简介: 胡钧(1972-), 男(汉族), 上海人, 硕士, 工程师。

工程勘察 *Geotechnical Investigation & Surveying* 1

强夯振动评定标准

表1

强烈	振动程度	$V_{max}/mm \cdot s^{-1}$	$a_{max}/mm \cdot s^{-2}$
I	无感		
II	室内个别静止中人有感觉		
III	室内少数静止中人有感觉, 门窗轻微作响		
IV	室内多数人有感觉, 门窗作响		
V	室内人普遍有感觉, 房屋灰土掉落, 抹灰出现微细裂缝	30 (20~40)	310 (220~440)
VI	多数人站立不稳, 房屋损坏, 墙体出现裂缝	60 (50~90)	630 (450~890)
VII	房屋轻度破坏, 开裂, 小修可继续使用	130 (100~180)	1250 (900~1770)
VIII	房屋中等破坏, 结构破坏, 需修复才能使用	250 (190~350)	2500 (1780~3530)
IX	房屋严重破坏, 如墙局部倒下, 修复困难	550 (360~710)	5000 (3540~7070)

冻层上, 较好的办法是在每测点处打一根长50 cm、截面为100×100 mm<sup>2</sup>木桩, 拾振器固定安装在木桩顶端。拾振器放置根据需要, 测垂直振动衰减就垂直放置, 测水平振动衰减时就水平放置, 拾振器摆的振动方向始终与量测波的传播方向一致<sup>[4]</sup>。测线沿振动衰减的方向进行布置。由于近距离衰减快, 远距离衰减慢, 一般5m 以内每隔1m 布一测点, 5~15 m 范围内, 每隔2 m 布置一测点, 15 m 以外每5 m 布置一测点。

当夯锤举起后, 仪器进入采集状态, 采集时间设置为15s。强夯振动全过程可以被记录下来。每夯击一次作为一个文件储存。

#### 4 实例分析

##### 4.1 工程实例1

###### (1) 概况

某工程场地工程地质条件复杂, 冲沟内分布厚度不等的填土。通过对多种地基处理方案的技术经济分析比较, 采用强夯加固方案。

强夯试验场地面积为21×35 m<sup>2</sup>, 分成I、II两个区域, 夯点间距均为3.50 m。夯锤质量为190 kg, 底面直径为2.40 m。在I区夯击能采用1600 kJ, II区夯击能采用2400 kJ。

###### (2) 测点、测线布置

单点夯击试验试验区I、II分别布置1个测点, 距离夯击点约10 m, 测试水平径向地面振动加速度。强夯试验试验区I、II分别布置测线I、II, 每条测线设7个测点, 各测点距离强夯点边缘距离1.5、2.5、4、6、10、20、30 m, 每条测线按垂直向、水平径向、水平切向三个方向布置拾振器。

###### (3) 测试结果

单点强夯试验夯击数与地面振动加速度关系曲线见图1。试验区I、II的测线I、II地面振幅随振源

距离衰减曲线(垂直向、水平径向、水平切向)见图2、图3;地基能量吸收系数随距振源的距离而变化见图4。

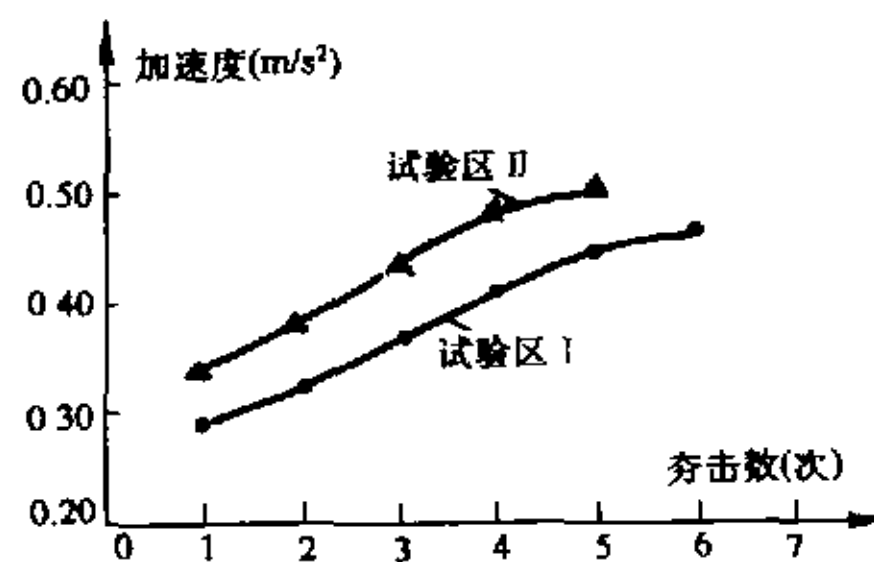


图1 夯击数与振动加速度关系曲线

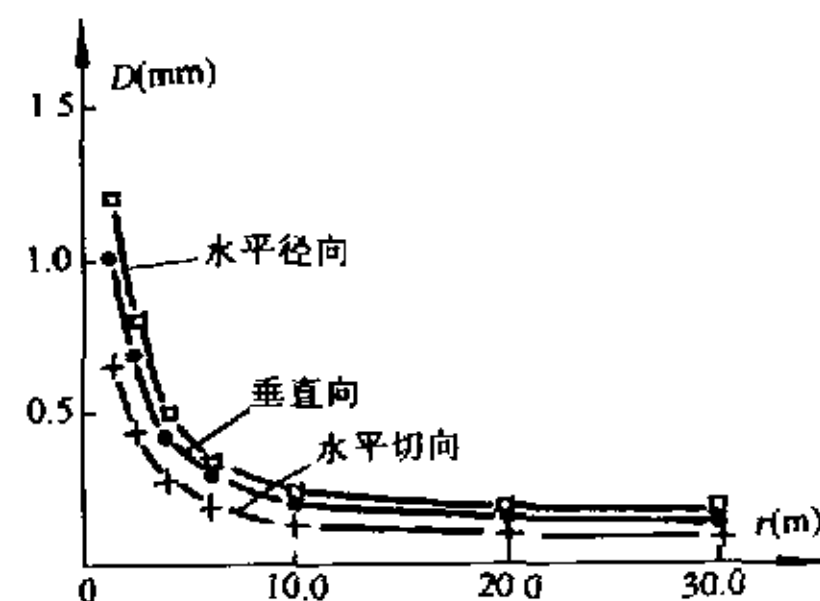


图2 测线I地面振幅随距离衰减曲线

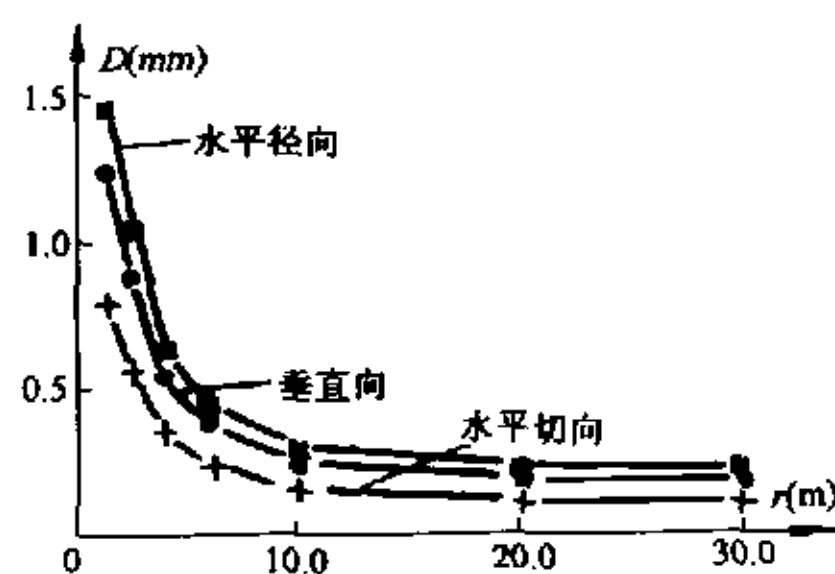


图3 测线II地面振幅随距离衰减曲线

###### (4) 测振成果综合分析

强夯施工夯锤落地瞬间, 部分动能转化为冲击波, 从夯点以波的形式向外传播。这种地表振动的强

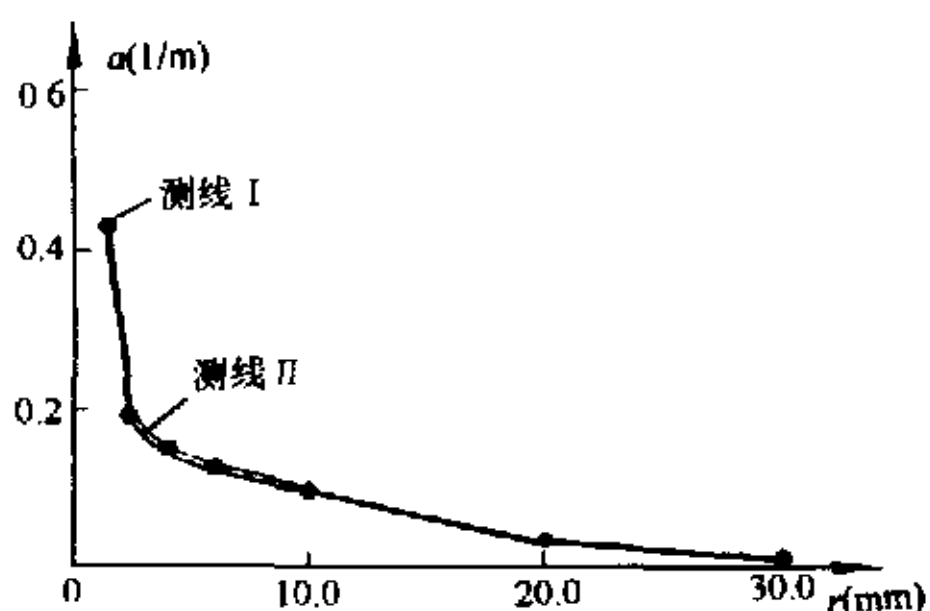


图4 地基能量吸收系数随距离变化曲线

度随着与夯点距离的增加而减弱。振动实测表明,强夯引起的振动是瞬时冲击振动,振动频率约5~20 Hz,振动持续时间一般不超过1 s。锤土接触的时间约为0.05 s,并为三角形波形。

由于加固地基的要求和地基土性质的不同,强夯试验选择了一定的夯击能后,首先要确定单点夯击数,使之不超过该强夯能级的单点饱和夯击能。在单点强夯试验时,随着夯击数的增加,土体被夯实,加速度值不断增大。当夯击数达到一定时,加速度达到峰值;如果继续夯击,则加速度值趋于定值峰值。因此在距离夯点中心10 m处布置测点进行加速度振动测试,绘制夯击数与加速度关系曲线,根据加速度定值峰值对应的夯击数为最大夯击数,相应的即饱和夯击能。

从图1可见,随着夯击数的增加,土体被夯实,加速度值不断增加。当强夯区 I、II 单点夯击试验分别达到第6击和第5击时,加速度增加趋势逐步减缓,由此可见已接近最大夯击数,此时夯击能仍未饱和。

从振动位移随距离衰减曲线(图2、图3)可以看出,近距离衰减快,远距离衰减慢。图2中水平切向衰减曲线拟合方程为:

$$\log y = -0.737 \cdot \log x + 0.844$$

在同一测点上,水平径向振动最大,垂直向次之,水平切向最小。

为了求取地基能量吸收系数,为动力基础振动和隔振设计提供地基动力参数,这是强夯进行振动监测的又一应用。

地基土能量吸收系数  $\alpha$  按式(1)计算:

$$\alpha = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{1}{r_0 - r} \ln \frac{A_r}{A \left[ \frac{r_0}{r} \xi_0 + \sqrt{\frac{r_0}{r} (1 - \xi_0)} \right]} \quad (1)$$

式中, $\alpha$ —地基能量吸收系数(s/m); $f_0$ —激振频率(Hz); $r$ —测点到夯点边缘的距离; $r_0$ —基础当量半径(m); $A_r$ —距振源 $r$ 处的振幅值(m);

$A$ —测试基础的振幅值(m); $\xi_0$ —无量纲系数。

从图4可以看出,地基能量吸收系数  $\alpha$  不是一个定值。在近夯击点处(5 m),振动衰减很快,计算得到的  $\alpha$  值较大;到一定距离(20 m)后, $\alpha$  值比较稳定,趋向一个变化不大的值。因此,设计可以根据距离振源远近选用  $\alpha$  值。

根据本次实测数据以及有关国内外相关资料,可将本次强夯试验振动影响划分为以下3个区。

①振动破坏区:距离夯点边缘距离小于5 m。该区域内土体振动加速度大于 $5.00 \text{ m/s}^2$ ,速度大于 $50 \text{ mm/s}$ ,振幅大于 $0.5 \text{ mm}$ 。该区域内振动将对一般建筑物造成破坏。

②振动损坏区:距离夯点5~30 m。该区域内土体振动加速度为 $0.4 \sim 5.0 \text{ m/s}^2$ ,速度为 $10 \sim 50 \text{ mm/s}$ ,振幅 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。该区域内振动将对一般建筑物造成一定程度损坏。

③相对安全区:距离夯点大于30 m。该区域内土体振动加速度小于 $0.4 \text{ m/s}^2$ ,速度小于 $10 \text{ mm/s}$ ,振幅小于 $0.1 \text{ mm}$ 。该区域内振动除对精密仪器设备有一定影响外,对一般建筑物不会造成损坏。

由于本次强夯测振是在第一遍夯击时实测,第二遍及搭夯时振动影响将会有所加强;本次试验场地周围有一宽、深近1m的排水沟,起一定隔振作用。实际设计和施工时应考虑这些因素,必要时采取一定隔振和振动监测措施。

## 4.2 工程实例2

### (1) 概况

试验区位于杭州湾某地,面积为 $60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,试验区地形平坦,场地20 m深度内为全新世冲积、海积粉土、砂土。

强夯前进行了井点降水,井距20 m,降水深度为4 m。强夯点距3.3 m,边距0.8 m,锤重125 kN,锤直径2.5 m,落距16 m。单点夯击能2000 kJ。夯点按等边三角形布置。强夯时,第一遍隔行不隔点,夯完一遍后推平再夯第二遍。

### (2) 测振结果及分析

强夯前在夯点下不同深度及不同距离处埋设了加速度传感器,一组检测水平方向地面振动加速度,另一组量测不同距离不同深度处的加速度变化。

图5是某夯点第四击时振动加速度等值线,贯入深度1.2 m。夯锤下地面振动加速度最大为 $166.5 \text{ m/s}^2$ ,土中最大可达 $589.4 \text{ m/s}^2$ 。从图中可以看出,强夯冲击振动在地面传播时,水平径向加速度随传播距

离增大而很快衰减，土中加速度随深度增加而急剧衰减，土中加速度等值线呈梨形，表明该区内各种应力都较大，出现一个上部屈服区，也即单点夯击的加固范围。土中振动加速度在7 m 深度处衰减为9.8  $m/s^2$ ，而此深度以上土体力学性质强夯前后有明显变化，故确定为强夯加固有效深度。

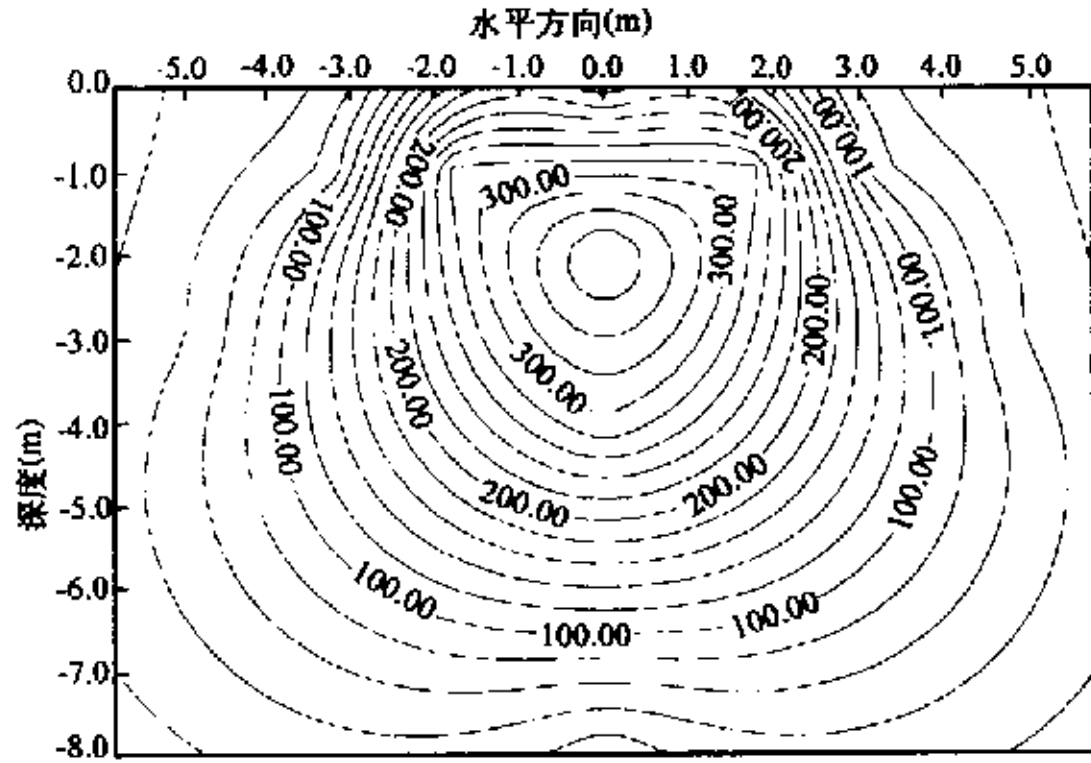


图5 强夯时土中振动加速度等值线

## 5 结论

(1) 振动实测表明，强夯引起的振动是瞬时冲击振动，振动频率约5~20 Hz，振动持续时间一般不超过1 s。锤土接触时间为0.04~0.1 s，并为三角形波

形。在同一测点上，水平径向振动最大，垂直向次之，水平切向较小。

(2) 强夯振动监测最大加速度法是确定单点夯击试验最大夯击数和强夯加固有效深度的有效方法之一。

(3) 强夯施工过程中尽可能进行振动监测，以实测的加速度、速度值定量划分强夯振动影响范围，必要时采取隔振措施，确保周围建筑物和精密设备的安全。

(4) 地基能量吸收系数是一个变值，随着离开夯点距离而变化，动力基础振动和隔振设计应根据实测数据取值。

致谢：对刘小青处长、高倚山书记对本文的大力支持表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 朱晓曦等. 降水强夯处理软弱粉土地基试验研究. 地基处理, 1998, (2): 29~34.
- [2] 张忠苗等. 打桩振动机理与监测防治. 物探与化探. 1993, (1): 57~70.
- [3] 石沅. 振动量测与分析. 上海: 同济大学出版社, 1990. 28~30.
- [4] 中华人民共和国机械工业部. GB/T50269-97, 地基动力特性测试规范. 北京: 中国计划出版社, 1998. 159~170.

(上接第40页)

(1) 强度及柔性大。加筋土墙是重力式挡土墙，墙宽约为墙高的70%，墙能够承受较大的水平推力、倾覆力和垂直力，地基承受的压力分布比较均匀。加筋土墙柔性大，可承受一定程度的地基不均匀沉降和整体沉降。由于加筋土墙没有刚性基础，建造时，地基随着回填料的回填增高，地基土所承受的压力也不断增加，从而加速了地基土的固结，提高了地基的承载能力。

(2) 质量易控制。加筋土墙由预制件组合而成，混凝土面板板块和筋条都在工厂预制。所以质量容易保证和控制，砂质回填土也可在工程开工前先进进行试验检查，淘汰不合格的材料。

(3) 建造方法简单。建造加筋土有一定的规范和建筑步骤。偷工减料或错乱程序不易发生。建造程序简单，质量容易保证，没有豆腐渣工程。

(4) 外表美观，工地整洁，美化环境。加筋土墙面板预制件是在铁模中由混凝土浇筑而成。与现浇混凝土墙不同，加筋土墙不用搭施工支架和模板。因此，加筋土墙的建筑工地整洁、安全、没有垃圾，对工地附近的交通和环境影响不大。面板预制件可以变换款式，配合周围景物，美化环境。

## 参 考 文 献

- [1] Winkerkorn, H. F. and Fang, H. Y. Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold Company, 1975.