

# 强夯施工环境振动影响的评价方法

陆伟东, 韩晓健, 杨放

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 通过强夯振动机理的分析, 给出了强夯施工环境振动影响的测试仪器的组成和测试的方法, 根据天然地震烈度和爆破安全振动速度, 建立强夯振动对邻近建筑物影响的评价体系, 引入了基于“城市区域环境振动标准”(GB 10070-88)的人体的振动影响评价体系。通过某港区强夯施工的环境振动监测, 给出了实测的数据和结果。

**关键词:** 强夯; 环境振动; 监测; 振动污染

**中图分类号:** TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-7643(2002)05-0065-04

强夯法是20世纪60年代末法国梅纳尔(Menard)发明的, 用强夯法处理可液化砂土和软土地基具有效果明显、设备简单、施工方便、工期短、成本低等优点。但是由于强夯法是大能量夯击地基土, 锤击引起的地面振动除向深层传递外, 还向四周扩散。强夯的夯击能大部分被夯点吸收, 一部分从扰动区辐射出来, 以波的形式向外传播, 距夯点越近, 振动就越强烈。故强夯施工振动对邻近建筑物会引起一定的影响, 使附近居民有不安全感; 或对房屋结构安全产生影响, 引起纠纷甚至迫使工程停工<sup>[1~3]</sup>。为了确定强夯振动对周围建筑物的影响范围和程度, 指导今后的强夯设计和施工, 探索由强夯引起的振动方向特征、频率特征、衰减特征及对周围建筑物的影响具有重要的现实意义。

## 1 强夯振动机理分析

强夯加固地基主要是在强大的夯击能下, 在地基中产生强烈的冲击波和动应力对土体进行加固作用。强夯产生的冲击波, 按其在土中的传播和对土的作用特征可分为体积波和界面波, 体积波包括纵波和横波(或分别称为压缩波和剪切波), 界面波包括瑞利(Rayleigh)波和乐夫(Love)波。强夯施工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, 瑞利波最后到。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。

波动在土介质中以不同的波速在不同介质中传播。由波源向外辐射的波, 除了几何阻尼衰减外, 还存在着土体材料对波的能量吸收而引起的土材料阻尼衰减。几何阻尼衰减在近源起主导作用, 远源则以土介质能量吸收衰减为主。

## 2 测振仪器设备和测试方法

### 2.1 测试仪器

对振动的输入和响应两者的动力特性的描述可以通过各种传感器来完成, 传感器可以检测质点的位移、速度或加速度的时间历程。实际应用的时候测得的往往只是某一种动态的物理量, 如加速度或速度, 利用检测分析系统, 可以把此物理量通过积分或微分转换成其它量。

强夯引起的振动, 属于低频振动。同时, 结构物

收稿日期: 2002-07-09

基金项目: 江苏省结构工程重点实验室开放课题资助项目(020107)

作者简介: 陆伟东(1970-), 男, 浙江湖州人, 硕士, 讲师, 主要从事结构抗震减震和结构可靠性研究。

的固有频率也是低频,因此,既要考虑质点振动的幅值(峰值),同时又要注意其频率。根据强夯的特点,我们选用的测试系统由加速度传感器、电荷放大器、A/D采集卡、振动分析及打印机等组成。传感器可以采用中国地震局工程力学研究所的891-II型,它属于动圈往复式拾振器,设有小、中、大速度和加速度4档。放大器选择DLF-4型4合一放大器,采用INV306智能信号自动采集、处理和分析系统进行振动数据处理。为了掌握整套系统的整体灵敏度、频率特性、线性特征,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,并以标定的数据进行后期数据处理。

## 2.2 测试方法

测试场地振动衰减时,测振点不应设在浮砂地、草地、松软的地层和冰冻层上,较好的办法是在每测点处打1根长50 cm、截面为100 mm×100 mm木桩,传感器固定安装在木桩顶端。木桩伸出地面不超过几毫米,并确保木桩与土的紧密接触。传感器放置根据测试需要,测垂直振动衰减就垂直放置,测水平振动衰减就水平放置,传感器的灵敏度主轴方向始终与量测波的传播方向一致。测线沿振动衰减的方向进行布置。由于近距离振动衰减快,远距离振动衰减慢,故一般5 m以内每隔1 m左右布一测点,5~10 m范围内每隔2 m左右布置一测点,15 m以外每5 m左右布置一测点。

测试建筑物的动力响应时,较好的位置是在基础上,考虑到不容易接近基础,典型的测点是设置在底层平面主要承重外墙的底部<sup>[4]</sup>。已有的实测和分析表明,振动在建筑物内可能会放大,并与建筑物的高度成正比,因此,有必要在建筑物内不同楼层设置测点进行同步测量,一般在底层和顶层设置测点,其他层每隔2~4层设置测点。传感器方向一般沿建筑物的横向和纵向进行定位。

## 3 振动影响的评价标准

### 3.1 建筑物受振动影响的评价

目前对天然地震的研究较多,政府也颁布了各种法规。评价地震对建筑物的危害的指标主要有:烈度、加速度、振动持续时间等。对于人工振动影响研究较多的是爆破振动,1986年颁布的国家标准“爆破安全规程”(GB6722-86)中规定度量爆破振动效应对建筑物安全的影响时采用振动速度作控制量。

对各类建筑物的安全振动速度值作出了明确规定:

- 1) 土窑洞、土坯房、毛石房的安全振动速度为1.0 cm/s;
- 2) 一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物的安全振动速度为2~3 cm/s;
- 3) 钢筋混凝土框架房屋的安全振动速度为5 cm/s。

关于强夯的振动效应研究不多,“强夯地基技术规程”(YBJ 45-92)中规定,当单击夯击能为1 000 kN·m时,安全距离应大于15 m,当单击夯击能大于1 000 kN·m时,对仪表车间及灵敏度高的建(构)筑物的安全距离,尚应通过试夯实测的结果进行调整与修正。但这种规定似乎与实际不符。如果按照“爆破安全规程”中的安全振动速度,一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物为2~3 cm/s,则强夯振动对30 m以外的建筑不会造成影响,这也与实际不符。其原因在于爆破振动的频率较高,一般都在25 Hz以上,而强夯振动的频率为10 Hz以下,与天然地震的频率及建筑物的自振频率较为接近。为此,我们综合天然地震的烈度和安全振动速度作为强夯振动效应对建筑物影响的控制量。

根据国家地震局的研究成果,加速度与烈度的关系为:

$$\lg a = 0.320 I - 0.170$$

式中 $a$ 为加速度,单位为 $\text{cm/s}^2$ ;  $I$ 为烈度,而加速度与速度的关系为 $a = 2\pi fV$ 。因此,对应振动频率为4~5 Hz,距离强夯点50 m范围内,振动速度大于或等于1 cm/s,划分为V度区。其宏观特征为一般房屋门窗颤动作响、灰土掉落、抹灰出现微细裂缝、不稳定器物翻倒,对结构不会造成损害。距离强夯点50~90 m范围内,振动速度 $1 > V > 0.5$  cm/s,划分为IV度区。其宏观特征为一般房屋门窗作响,悬挂明显摆动,质量较差房屋可能出现微细裂缝。距离更远范围的建筑物一般不会受强夯地震效应的影响。

另外值得注意的是共振现象。当外界振动的频率与建筑物的自振频率一致时,会使建筑物的振动明显加强,可能会放大数倍甚至更大,使建筑物遭受严重破坏。建筑物的自振频率在10 Hz以下,与强夯振动频率比较接近,容易产生共振现象。这是某些建筑物虽然距夯击点较远,但仍然出现了微细裂缝的主要原因之一。

### 3.2 人体受振动影响的评价

人体对强夯等环境振动会感到不适,这可以称

为环境振动污染。随着人民生活的不不断提高,为控制城市环境振动污染,国家制定了“城市区域环境振动标准”(GB 10070-88)和“城市区域环境振动测量方法”(GB 10071-88),标准规定测量量为铅垂向之振级。对于强夯振动这种冲击振动,取每次冲击过程中的最大示数为评价量。对于重复出现的冲击振动,以 10 次读数的算术平均值为评价量。城市各类区域铅垂向 Z 振级标准值如下表 1。

表 1 城市各类区域铅垂向 Z 振级标准值(dB)

Table 1 Z vibration level standard values in vertical direction of various urban regions

适用地带范围	昼间	夜间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

铅垂向 Z 振级(VL<sub>Z</sub>)是指按 ISO 2631/1 规定的全身振动之加权因子修正后得到的振动加速度级。而振动加速度级(VAL)是指测得的加速度与基准加速度之比的以 10 为底的对数乘以 20:

$$VAL = 20\lg(a/a_0)$$

式中:a——振动加速度有效值,m/s<sup>2</sup>;

a<sub>0</sub>——基准加速度,a<sub>0</sub>=10<sup>-6</sup> m/s<sup>2</sup>

### 4 实测分析

#### 4.1 工程概况

某港区地貌单元比较单一,属长江滩地,土层均为第四纪松散堆积物,表层为黄灰色粉砂,中层为含砾中细砂和亚粘土夹砾砂以及卵砾石。因工程需要对港区地基采用强夯法进行加固。强夯施工工艺为二遍点夯一遍普夯,采用跳行不跳点,隔排强夯,点夯间距为 3 m×3 m。I、II 区强夯控制标准为:第一遍点夯能量采用 2 000 kJ,夯击数 8 击;第二遍点夯能量采用 2 000 kJ,夯击数 > 6 击,最后两击平均夯沉量 ≤ 10 cm。II 区强夯控制标准为:第一遍点夯能量采用 2 500 kJ,夯击数 5 击;第二遍点夯能量采用 1 800 kJ,夯击数 > 7 击,最后两击平均夯沉量 ≤ 10 cm。为保证邻近建筑物的安全和控制振动污染,我们对强夯施工时的振动进行了监测。

#### 4.2 振动场地衰减

在测试场地衰减时,在距夯击点不同距离处设

置加速度传感器,传感器方向分别为径向、切向和铅垂方向,测定不同距离处各方向在夯锤夯击激振下测得的加速度如图 1 所示。从图中可以看出,三个方向的振动衰减都很快,在距夯击点较近距离的同一测点上,水平径向振动最大,铅垂向次之,水平切向较小,而在距夯击点较远距离的同一测点上,铅垂向振动最大,水平径向次之,水平切向较小。

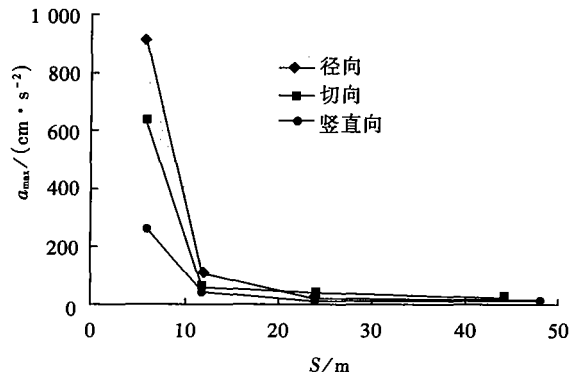


图 1. 强夯振动的场地衰减

Fig. 1 Attenuation of ground vibration by dynamic compaction

#### 4.3 邻近建筑物的振动监测

本次监测在港区施工现场周围的孝庄、大桥村、圣庄和甲庄中邻近施工现场的建筑物中进行了强夯的振动影响测试,各建筑物在某一夯击点整个夯击过程中各个方向的加速度和速度峰值见表 2。

表 2 强夯激振时邻近房屋地面加速度峰值和速度峰值

Table 2 Ground acceleration peak and velocity peak values of surrounding constructions by dynamic compaction

地点	距夯击点距离/m	影响施工区域	传感器方向	加速度峰值/(cm·s <sup>-2</sup> )	速度峰值/(cm·s <sup>-1</sup> )	振动加速度级/dB
孝庄	124	I 区	水平切向	1.07	0.056 8	60.59
			水平径向	1.94	0.103 0	65.76
			铅垂向	2.00	0.106 2	66.02
大桥村	190	II 区	水平切向	1.78	0.094 5	65.01
			水平径向	3.84	0.203 8	71.69
			铅垂向	2.82	0.149 7	69.00
圣庄	125	II 区	水平切向	1.72	0.091 3	64.71
			水平径向	1.69	0.089 7	64.56
			铅垂向	4.90	0.260 1	73.80
甲庄	160	II 区	水平切向	1.37	0.072 7	62.73
			水平径向	3.29	0.174 6	70.34
			铅垂向	3.10	0.164 5	69.83

从表中可知,四处房屋检测到的水平向加速度峰值和速度峰值均较小,振动对房屋结构的影响较小。除

圣庄外的监测地点的振动加速度级均小于标准中“混合区”的振级标准值(昼间 75 dB; 夜间: 72 dB), 振动对人体舒适度影响较小, 但应限制其在夜间施工。

## 5 结 论

5.1 强夯施工产生的环境振动影响涉及邻近房屋的安全和振动污染问题, 应引起足够的重视, 开展环境振动监测是一种可行的方法。

5.2 强夯振动实测表明, 强夯引起的环境振动是瞬时冲击振动, 振动频率 3~15 Hz, 振动持续时间一般不超过 1 s。距夯击点较近距离的同一测点上, 水平径向振动最大, 铅垂向次之, 水平切向较小, 而在距夯击点较远距离的同一测点上, 铅垂向振动最大, 水平径向次之, 水平切向较小。

5.3 可以综合采用天然地震的烈度和爆破安全振动速度作为强夯振动效应对建筑物影响的控制量。

5.4 强夯施工引起的环境振动污染是引起纠纷的重要原因, 可以采用“城市区域环境振动标准”(GB 10070-88)和“城市区域环境振动测量方法”(GB 10071-88)进行测试和评价。

## 参考文献:

- [1] 孔庆根, 张胜利, 范仲喧. 强夯振动对邻近建筑物影响的实例[J]. 西部探矿工程, 1992, 4(5): 48-50.
- [2] 胡 钧, 李 昊. 强夯振动监测与分析[J]. 工程勘察, 2000, (6): 1-4.
- [3] 方 磊, 经 绯, 刘松玉. 强夯振动影响与构筑物安全距离研究[J]. 东南大学学报, 2001, 31(3): 29-32.
- [4] GB/T 14124-93, 机械振动与冲击对建筑物振动影响的测量和评价基本方法及使用导则 [S].

## Evaluation method of the environmental vibration effects caused by dynamic compaction

LU Wei-dong, HAN Xiao-jian, YANG Fang

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** By analyzing dynamic compaction's vibrating mechanism, the testing method and the testing instrument composition of environment vibration effects by dynamic compaction construction are provided. According to natural earthquake intensity and blasting safe vibrating velocity, the evaluation system of the vibration effects of the dynamic compaction on adjacent structure is established. The evaluating system of vibration effect on human body which is based on vibration criteria of urban regional environment is introduced. Finally, the site measured data and result by monitoring environmental vibration of a certain harbour district is submitted.

**Key words:** dynamic compaction; environmental vibration; monitor; vibration pollution