

# 强夯加固地面振动响应分析与工程实践

高飞 黄永进 赵伟越

(上海岩土工程勘察设计研究院 200002)

[提要] 在强夯施工过程中,地面振动对周围环境的影响已是一个不容忽视的问题。借用弹性半空间理论中刚性基础瞬态振动的位移解,提出了估算强夯地面振动竖向速度峰值的半经验公式。工程实例的实测数据验证了半经验公式的可靠性,可为强夯振动环境效应评价提供有益的参考。

[关键词] 强夯 动力基础 地面振动 环境效应

Vibration generated by dynamic compaction is often detrimental to the surrounding neighbourhood. Based on elastic half space theory for a rigid dynamic machine foundation, a method for the maximum peak of vertical velocity of ground vibration caused by dynamic compaction is presented. Agreement is found with the result obtained in field tests. The method can be a useful reference for environmental impact evaluation.

**Keywords:** dynamic compaction; ground vibration; environmental impact

## 一、引言

强夯法加固地基施工中,强夯所产生的强大冲击波必然会使地面发生强烈的振动,其引起的地面振动绝大多数处于2~20Hz的低频区域内,与爆破和沉桩振动相比,主频率更接近于邻近建筑物和机器设备的固有频率,可能会对周围的建筑物、精密仪器仪表等造成损害。同时由于是连续夯击,可能改变土体的结构,造成土体强度的降低和地基不均匀沉降,因而强夯振动对周围环境具有更大的潜在危害性。因此,在强夯加固地基施工时,常常需要了解地面的振动响应,以便对其环境效应做出科学评价。

借用弹性半空间理论中刚性基础瞬态振动的位移解,同时考虑弹性半空间理论假定与实际土性的差异,提出了预估强夯地面振动响应的半经验公式,可为强夯振动环境效应评价提供有益的参考。

## 二、强夯地面振动的计算

强夯加固时的地面振动响应涉及到层状半空间中弹塑性波的传播与衰减特征,目前的理论研究尚不够成熟。由于强夯问题的复杂性,在评价强夯振动的环境效应时,尚缺乏成熟的国家或地方标准,目前广泛采用的是标准地基质点振动的最大速度或加速度。

计算离振源不同距离处的地面振动峰值质点速度,文[2]建议采用公式  $V = k(r/W)^{-n}$  进行预估。其中,  $k$  为离振源单位距离处的速度值,  $r$  为距振源距离,  $W$  为振源能量,  $n$  值介于1~2之间;文[3]建议采用公式  $V = 0.2(2gh)^{0.5}(r/r_0)^{-1.7}$ 。其中,  $g$  是重力加速度,  $h$  为夯锤高度,  $r/r_0$  是经夯锤半径归一化后的距离。上述经验公式参数确定较为困难,且没有考

虑不同土体特性的影响,显然是不够合理的。

迄今对强夯引起的地面振动问题依然没有简便易行且具有足够精度的实用计算方法。在强夯施工过程中,只能通过现场动态监测,以实测的加速度、速度值来评价强夯振动的环境效应。文[6]的研究表明,质点振动峰值速度与结构物损坏的关系最为密切。

强夯引起的地面振动在弹性半空间理论中属瞬态振动混合边值问题。非稳态刚性基础作用下近场地面位移的瞬态解<sup>[4]</sup>为:

$$w_r(t) = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{r_0}{r} \left| H \left[ t - \frac{r-r_0}{v} \right] w_0 \left[ t - \frac{r-r_0}{v} \right] \right| \quad (1)$$

式中:  $w_r(t)$  为与基础(或振源)中心距离为  $r$  处的半空间表面的竖向位移;  $w_0(t)$  为刚性基础(或振源)的竖向位移;  $r_0$  为夯锤的半径(或当量半径);  $v$  为折算波速,  $v = 2\theta(1-\theta^2)v_s$ ,  $\theta = v_s/v_p$ ,  $v_s$  和  $v_p$  分别为S波波速和P波波速;  $H(t - \frac{r-r_0}{v})$  为 Heaviside 阶跃函数:

$$H \left( t - \frac{r-r_0}{v} \right) = \begin{cases} 0, & \text{当 } t < (r-r_0)/v \\ 1, & \text{当 } t > (r-r_0)/v \end{cases}$$

对于近场问题,由于土体能量密度相对较大,材料阻尼并不突出,式(1)没有考虑土的材料阻尼的影响。相对于远场,人们更有兴趣了解强夯振动在近场的衰减规律性。若不计阻尼影响,由式(1)强夯引起的近场地面振动速度可写为:

$$V_r(t) = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{r_0}{r} \left| H \left[ t - \frac{r-r_0}{v} \right] V_0 \right| \quad (2)$$

式中,  $V_0$  为夯锤下落至地面的竖向速度。

式(2)表明,夯锤外自由表面的振动速度随时间和距离的变化可分开考虑,其中速度幅值随距离的衰减

规律为 $(2/\pi) \arcsin(r_0/r)$ , 振动随时间的变化规律与夯锤本身的振动规律相同, 但是有相位差 $(r-r_0)/v$ 。从式(2)可推出不计阻尼的地面竖向速度峰值衰减公式为:

$$V(r) = \frac{2V_0}{\pi} \left[ k_1 \frac{r_0}{r} + k_2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 \right] \quad (3)$$

式中,  $V(r)$ 是距夯点中心  $r$  处的地面竖向速度峰值;  $k_1$  和  $k_2$  是两个无量纲近场效应系数, 它们的引入是为了考虑弹性半空间理论假定与实际土性的差异以及在求解中所作近似处理。由于当  $r=r_0$  时  $V=V_0$ , 有  $k_1+k_2=\pi/2$ 。

由式(3)可见, 只需选取仪器安装操作方便的少量测点(理论上仅需一点), 由实测数据反算出  $k_1, k_2$ , 就可以从整体上大致了解竖向速度峰值的空间分布, 对于降低测试费用、提高效率等具有积极意义。

目前国内不少工程技术人员采用公式  $V(r)=kV_0(r_0/r)^n$  来拟合强夯振动地面速度的衰减方程。需要指出, 该式对于远场可能是适用的, 但不适用于近场。当  $r=r_0$  时  $V=V_0$ , 若按该式应有  $k=1.0$ , 而实测值表明  $k=0.10\sim 0.20$ , 这显然是相互矛盾的。因此, 采用该式来拟合近场地面振动的衰减似欠妥当。

### 三、工程实例分析

某工程为7层的砖混结构住宅小区, 工程地质勘察资料见表1, 在该场地所属设计地震分组为第一组的情况下, 深度约为15m以内部分土层将会产生液化。根据现场施工情况, 该场地建筑若采用较为经济的夯扩桩基础, 则将因土层振动液化而使桩体混凝土严重离析甚至断桩。经分析比较后采用强夯法对地面以下约6m深的软弱土层进行处理, 以使地基能够同时满足承载力和抗震两方面的要求, 并根据对试夯区进行的孔隙水压力、地面振动与地基荷载板试验等现场测试分析结果确定最终工程设计方案<sup>[5]</sup>。

工程地质资料 表1

层号	土层名称	层厚(m)	含水量 $w(\%)$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	地基承载力(kPa)
①	杂填土	0.4~0.8					100
②	砂质粘土	1.7~2.8	32.2	0.88	8.8	0.92	130
③	粘质粉土	3.7~7.5	36.2	0.99	9.7	1.07	80
④	砂质粘土	3.0~5.5	31.2	0.87	7.5	0.97	110
⑤	碎石	1.5~3.2					250

试夯的主要技术参数包括: 夯锤重为8t, 底面直径  $D=2.3\text{m}$ , 夯锤落距  $h=12.5\text{m}$ 。在距夯点12m处实测地面振动, 竖向速度峰值为  $2.77\text{cm/s}$ 。对此实测速度峰值反演可得  $k_1=0.15, k_2=1.42$ , 即可初步了解竖向速度峰值的空间分布。计算结果及其与实测数据的比较可见表2, 可见式(3)计算值同实测值较为接近。

工程实例表明: 只需选取少数几个仪器安装操作

方便的测点, 反算出  $k_1, k_2$  值, 就可以大致了解强夯振动竖向速度峰值在近场的空间分布。

式(3)计算竖向速度峰值与实测值对比(cm/s) 表2

测试位置 (m)	实测值	计算值	相对误差 (%)
10	3.78	3.64	-3.70
18	1.29	1.32	+2.33
24	0.84	0.80	-4.76
56	0.20	0.19	-5.00

### 四、结论与建议

通过弹性半空间理论分析以及工程实例分析, 可以得出如下结论:

(1) 对于强夯引起的近场振动问题, 采用公式  $V(r)=kV_0(r_0/r)^n$  拟合地面振动速度衰减欠合理。

(2) 采用式(3)弹性半空间理论导出的半经验公式估算强夯振动近场的竖向速度峰值分布是切实可行的, 对于降低测试费用、提高效率等具有积极意义。

致谢: 上海交通大学安全与防灾工程研究所所长陈龙珠教授为本文提供了实测资料, 在此谨表谢意!

### 参 考 文 献

1. Miller G F, Pury H. On the partition of energy between elastic waves in the semi-infinite isotropic solid. Proc of Royal Society, London, A, 1964, 223.
2. Svinkin M R. Prediction and calculation of construction vibrations. 24th Annual Members' Conference, Decades of Technology-Advancing into the Future, 1999.
3. Mayne P W. Ground response to dynamic compaction. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(6).
4. 何少敏, 王贻荪. 瞬态地面波动分析及试验. 湖南大学学报, 1992, 19(3).
5. 杭州复兴地区11#地块强夯加固地基的试验研究报告. 浙江大学土木工程系, 1996.
6. Bollinger G A 著, 刘锡荃, 熊建国译. 爆炸振动分析. 北京: 科学出版社, 1975.

(上接第31页)

导致非结构构件的损伤。建议厂方对选粉机进行动平衡调试或对该选粉机采取隔震措施, 以降低振动影响程度。厂方最终选择对选粉机进行平衡调试, 通过减小机器扰力, 满足了振动要求。

### 参 考 文 献

1. 马大猷等. 噪声与振动控制工程手册. 机械工业出版社, 2002.
2. 柳炳康等. 工程结构鉴定与加固. 中国建筑工业出版社, 2000.
3. 王广军等. 建筑自振周期计算方法和实测资料手册. 中国建筑科学研究院, 1988.
4. 徐建等. 建筑振动工程手册. 中国建筑工业出版社, 2002.
5. German Standard DIN4150: Part3-1986, Structural vibration in buildings, Structural Damage-Safe Limits for Building Vibration.
6. 伯野元彦. 土木技术者のための振动便覧. 日本建筑学会, 1985.