

文章编号:1005-0523(2007)02-0016-05

# 强夯施工对环境振动的影响分析

杨龙才,王炳龙

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092)

**摘要:**利用强夯法加固软弱地基时,其夯击能将以波的形式向外扩散,进而导致周围环境的振动.本文以半无限弹性体理论为基础,考察了瑞利波的径向振动量和竖向振动量沿地基深度的衰减特性,认为竖向振动量是引发环境安全的主要因素;通过现场实测,研究了强夯引起的自由场地地面振动加速度及振动速度随距离的衰减规律,并对隔振沟的隔振效果进行了测试研究.

**关键词:**强夯;环境振动;衰减规律;环境影响;现场测试

**中图分类号:**TU1

**文献标识码:**A

## 0 前言

强夯法是处理软弱地基的常用方法之一,由于其具有施工机械简单、施工成本低、施工效率高等优点,目前被广泛应用来处理碎石土、砂土、粘性土、杂填土以及湿陷性黄土,近年来又被用来处理以软粘土为主的地基<sup>[1~4]</sup>.强夯施工时,施工机械把夯锤提升到一定高度然后自然落下,夯锤在接触地面以前的瞬间,其势能基本上都转化为动能,重锤夯击地面时,动能的一部分以声波形式向四周传播,除一部分由于夯锤和土的摩擦而变成热能外,其余的大部分动能将使土体产生振动,这种振动以压缩波(P波)、剪切波(S波)和瑞利波(R波)联合来传递,其中压缩波占振动能量的7%,剪切波为26%,瑞利波所占的比例最大,为67%.

瑞利波是一种表面波,由于瑞利波积聚的能量较大,且沿自由表面传播,其传播的距离也较大,是强夯施工对周边环境产生振动影响的主要能量.强夯施工时会引起附近区域的场地或建构物振动,给周围居民的工作和生活造成影响,严重时危及周边建筑物的安全,随着强夯技术的大范围运用,强夯所引发的环境振动问题日益受到重视<sup>[5~7]</sup>.

## 1 强夯施工时瑞利波的传播

强夯施工时产生的P波、S波和R波的传播示意图参见图1.其中P波和S波以半球形方式传播,二者在半无限弹性体表面形成R波.

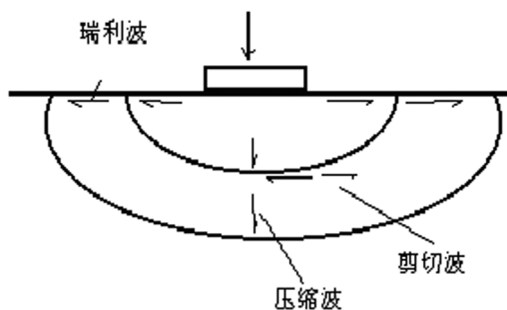


图1 波的传播示意图

强夯时瑞利波传播问题近似看成轴对称的二维问题,取直角坐标系 $xoz$ 的 $x$ 轴和土介质表面重合, $z$ 轴指向土介质的内部,坐标原点位于夯点的中心,假设土体为半无限均匀的弹性体,则有下述波动方程<sup>[8]</sup>

收稿日期:2006-10-08

作者简介:杨龙才(1971-),男,四川隆昌人,博士,工程师,主要从事深基础工程、地基处理等领域的科研与教学工作.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + G \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + G \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ,  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$$\left. \begin{aligned} u &= A_1 n i \left\{ -\exp\left[-\frac{q}{n}(nz)\right] + \frac{\frac{2qs}{n^2}}{\frac{S^2}{n^2} + 1} \exp\left[-\frac{S}{n}(nz)\right] \right\} \exp i(\omega \cdot t - nx) \\ w &= A_1 n \left\{ \frac{\frac{2q}{n}}{\frac{S^2}{n^2} + 1} \exp\left[-\frac{S}{n}(nz)\right] - \frac{q}{n} \exp\left[-\frac{q}{n}(nz)\right] \right\} \exp i(\omega \cdot t - nx) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $A_1$  为常量;  $n$  为波数且  $n = \frac{2\pi}{\lambda_R}$ ;  $\lambda_R$  为瑞利波的波长;  $q = \sqrt{n^2 - h^2}$ ;  $S = \sqrt{n^2 - k^2}$ ;  $h = \frac{\omega^2}{V_p^2}$ ;  $k = \frac{\omega^2}{V_s^2}$ ; 其中  $\omega$  为振动圆频率;  $V_p$  为压缩波的波速;  $V_s$  为剪切波波速。

由式(2)可得表面以下深度为  $z$  的一点的水平位移和垂直位移  $u(z)$ 、 $w(z)$  与表面的水平位移和垂直位移  $u(0)$ 、 $w(0)$  之比  $a_u(z)$ 、 $a_w(z)$  随深度  $z$  的变化:

$$\left. \begin{aligned} a_u(z) &= -\exp\left[-\frac{q}{n}(nz)\right] + \frac{\frac{2qS/n^2}{(S^2/n^2 + 1)} \cdot \exp\left[-\frac{S}{n}(nz)\right]}{\left. \right\} \quad (3) \\ a_w(z) &= \frac{\frac{2q/n}{S^2/n^2 + 1} \cdot \exp\left[-\frac{S}{n}(nz)\right] - \frac{q}{n} \exp\left[-\frac{q}{n}(nz)\right]}{\end{aligned} \right\}$$

由式(3)可绘出  $a_u(z)$ 、 $a_w(z)$  随  $z/\lambda_R$  的变化曲线,如图2所示。

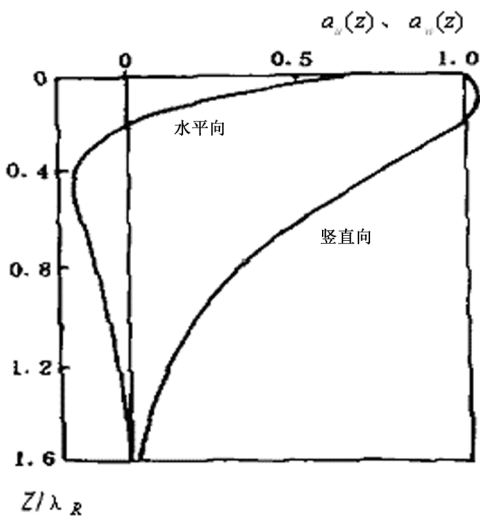


图2  $a_u(z)$ 、 $a_w(z)$  与  $z/\lambda_R$  的关系曲线

瑞利波是具有扭转特性的表面波,在地表附近其质点运动的轨迹为逆转椭圆,水平投影为往复振动,因而具有松土的作用,由夯坑周围的土体隆起可

其中,  $\lambda$  为拉梅常数;  $G$  为介质的剪切模量;  $\rho$  为介质密度;  $u$  为  $R$  波的水平振动位移;  $w$  为  $R$  波的垂直振动位移;  $t$  为时间。

按弹性半空间表面的弹性波理论,在接近于表面的一个有限区域内,瑞利波的水平位移  $u$  和垂直位移  $w$  可用下式加以描述<sup>[9]</sup>。

以得到证实。随着深度的增加,由式(3)及图2可知,水平分量的振幅在地表浅处  $0.1 \sim 0.2 \lambda_R$  处即衰减为零,并随着深度的增加而变为负值,质点的振动轨迹亦由逆转椭圆变化为顺转椭圆,随着  $z$  的增大,竖向分量也逐步衰减,其作用深度约在一个波长  $\lambda_R$  的范围内,强夯时的  $\lambda_R$  通常在  $8 \sim 12$  m 之间。有研究表明,强夯产生的地面振动,就同一点的三个方向上来说,加速度值径向最大,竖向次之,切向最小<sup>[10]</sup>;但由于临近建构筑物的基础通常都具有一定埋置深度,以条形基础为例,其埋置深度一般都在  $2$  m 左右,此时瑞利波引起的径向振动已经大幅度衰减,故瑞利波对环境影响最大的因素通常为竖向振动量。此外,土体介质的非弹性、非均匀性特征十分明显,土体中瑞利波的传播较在弹性介质中的传播要复杂的多。

## 2 强夯施工场地竖向振动实测分析

### 2.1 地质条件及强夯参数

安徽某工程的地基土自上而下的构成为:①层为素填土,层厚  $4.2 \sim 7.8$  m,褐红色,结构松散,湿~饱和,为粉砂岩、砾岩岩块与粘性土混合物等堆积而成,为近期堆积物。②层为耕土,灰褐色,粉土质,层厚  $0.0 \sim 0.6$  m。③层为粉质粘土,黄褐色,可塑,稍湿,第四系冲洪积成因,层厚  $0.0 \sim 5.5$  m。④层为细砂,灰黄~灰白色,松散状,第四系冲洪积成因,层厚  $0.0 \sim 2.0$  m。⑤层为砾石,稍密状态,层厚  $0.0 \sim 2.9$  m。本场地⑤层以下依次为残积粉土、泥质粉砂岩风化带。场区上部滞水埋藏于回填土中,静止水位一般为  $3.5 \sim 5.0$  m;潜水埋藏于④层细砂、⑤层砾石中,静止水位一般为  $6.0 \sim 7.0$  m。

由于天然地基的表层为素填土,其厚度较大,性质极不均匀,且填土时间较短,自重沉降尚未完成,如不加以处理,不能满足工程地基持力层的要求;相关单位确定的地基处理方法为强夯法,点夯单击能为 1 540 kN·m,停锤标准为最后两次的夯沉差小于等于 5 cm,满夯单击能为 800 kN·m,夯锤直径为 2.5 m;锤重 125 kN.

### 2.2 现场测试设备及测线布置

本次测试使用的信号采集系统为美国国家实验设备公司生产的 Measurement & automation 系统中的 NI-DAQmax 测试子系统,主要包括 DAQCard-6036E 采集卡,SCXI-1000 设备箱,SCXI-1531 加速度采集模块及 Vi-Logger 采集软件;传感器为中国地震局工程力学研究所生产的 891-2 型拾振器,信号放大器为中国地震局工程力学研究所生产 891 型放大器.整个测试系统的位移分辨率为  $4 \times 10^{-8}$  m、速度分辨率为  $4 \times 10^{-8}$  m/s、加速度分辨率为  $1 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>.

为考察强夯振动在自由场地的传播以及防振沟的设置效果,其中隔振沟的沟宽约 3 m,沟深约 3.5 m.现场设置了两条测线,参见图 3 所示.

夯击次数的增加,强夯的有效能率较低,更多的能量以波的形式向外传播,环境振动加剧,振动加速度峰值与夯击次数的关系可由一元二次方程加以描述. G1-4 点实测最大竖向振动加速度为 0.65 g.

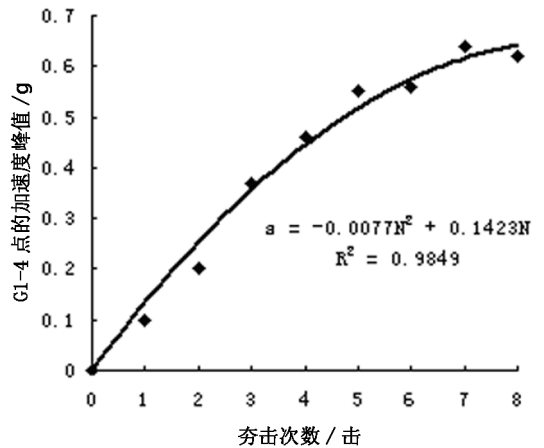


图 4 G1-4 点的加速度峰值与夯击次数的关系

当单坑夯击第八击时,在测线 1 上测点的各测点的振动加速度及振动速度随距离的变化分别见图 5 及图 6 所示.竖向振动加速度及振动速度随距离的衰减可用乘幂函数表示为

$$y = a \cdot x^b \tag{4}$$

式中,  $y$  为竖向振动量;  $x$  为距离夯点中心的距离;  $a$ 、 $b$  为振动量  $y$  相关的常数.

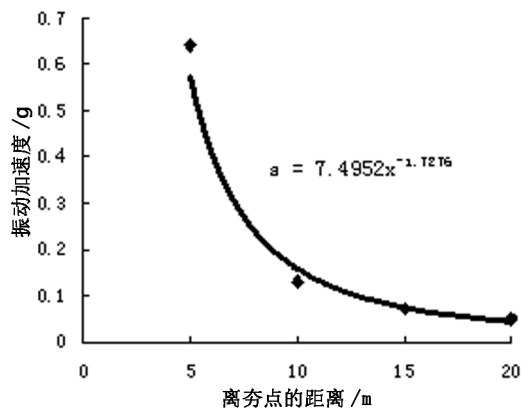


图 5 自由地面竖向加速度峰值随距离的变化曲线

目前国内还没有专门制定强夯振动的环境安全允许标准,在具体评价强夯环境振动影响时,基本上都参照《爆破安全规程》(GB6722-2003)中的相关规定,该规程规定:一般建筑物和构筑物的爆破地震安全性应满足安全振动速度的要求,对于钢筋混凝土结构房屋而言,当振动主频  $f_0 < 10$  Hz 时,房屋的安全振动速度  $v \leq 3.0 \sim 4.0$  cm/s,当振动主频  $10 \text{ Hz} \leq f_0 < 50$  Hz 时,房屋的安全振动速度  $v \leq 3.5 \sim 4.5$  cm/

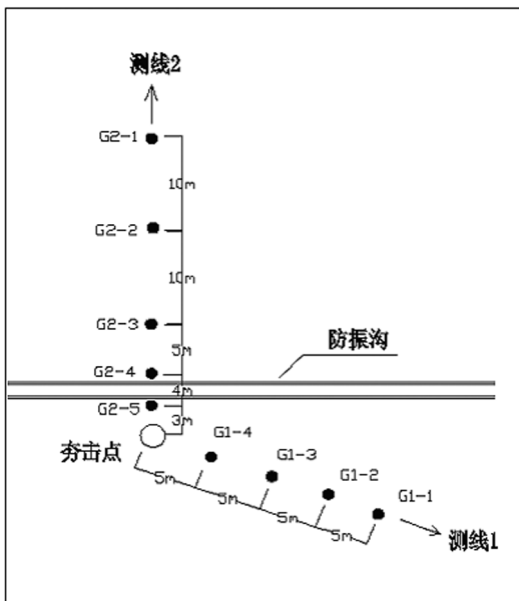


图 3 现场振动测试的测点布置图

### 2.3 自由场地竖向振动的衰减

测点 G1-4 距离夯点中心 5 m,其竖向振动峰值加速度随夯击次数的关系见图 4.

由图可见,随着夯击次数的增加,初期的振动加速度峰值增加较快,后期的增加较慢,这主要是由于初期的夯击能量主要消耗于土体的压密做功,有效夯击能占单击能的比重较大,环境的振动较小,随着

s;美国的爆破规程确定的安全振动速度界限值为 5 cm/s,即认为当建筑物的振动速度  $v \leq 5$  cm/s 时,建筑物是安全的;显见国内的规程较美国的规程要求更加严格.此外,美国矿业局还推荐了一个建筑物振动加速度评判的建议值,当建筑物的振动加速度  $a < 0.1$  g 时,建筑物安全;当建筑物的振动加速度  $0.1$  g  $\leq a < 1$  g 时,建筑物轻微破坏;当建筑物的振动加速度  $a > 1$  g 时,建筑物严重破坏.

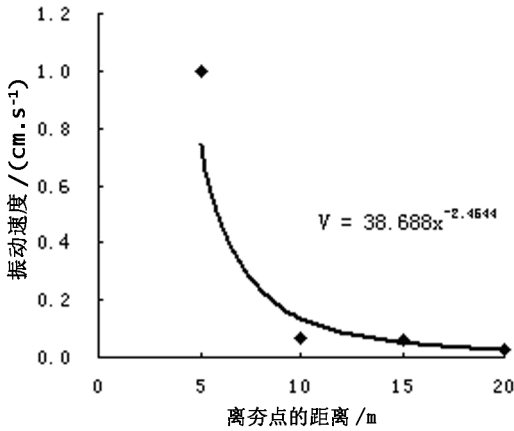


图 6 自由地面竖向速度峰值随距离的变化曲线

参照上述标准,结合图 5 及图 6 的测试结果可知,该场地条件下的振动加速度为影响周边环境的控制因素,实测结果表明,要满足场地竖向振动加速度  $a < 0.1$  g,则要求夯点离开周边建筑物的最小距离为 13 m.

### 2.4 防振沟的隔振效果测试

当单坑夯击到第八次时,对设置了防振沟(沟宽 3 m、沟深 3.5 m)的测线 2 进行了同步测试,图 7 为典型的实测地面速度的时程曲线,统计结果见图 8 及图 9.

实测结果表明,离夯点中心 3 m 处测点(G2-5)的竖向最大振动加速度为 0.73 g,振动速度为 7.5 cm/s;测点 G2-4 距离夯点中心距离仅为 7 m,中间设置有防振沟,其实测加速度为 0.09 g,振动速度为 0.88 cm/s;仅为 G2-5 点的振动加速度和振动速度的 12% 左右,且其振动量值均小于相关环境保护的要求;综合比较图 5 及图 8 的实测数据可知,防振沟的设置能有效的减小强夯施工对周边环境的影响.关于防振沟设置参数,如平面位置、沟深及沟深等对隔振效果的影响,尚有待于进一步的研究.

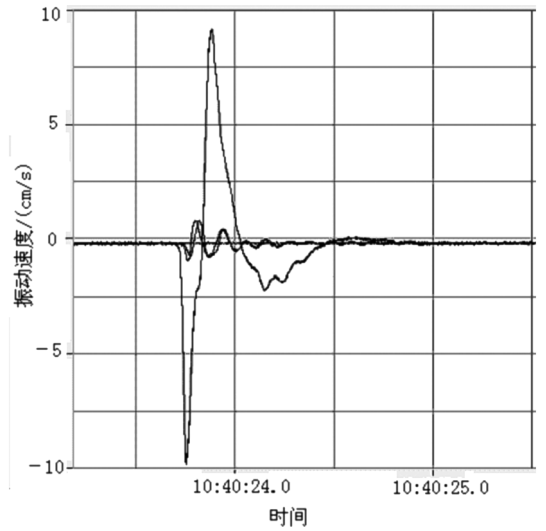


图 7 有防振沟的地面振动速度时程曲线

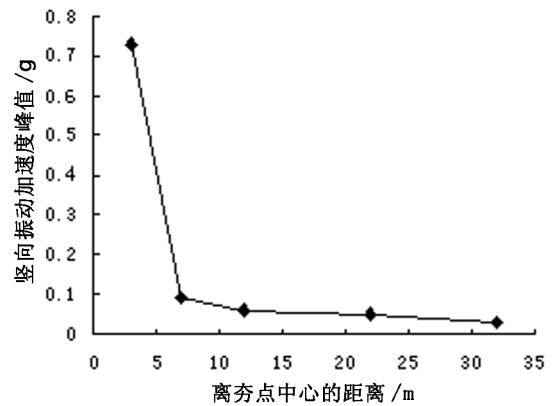


图 8 设置防振沟后地面竖向加速度峰值随距离的变化曲线

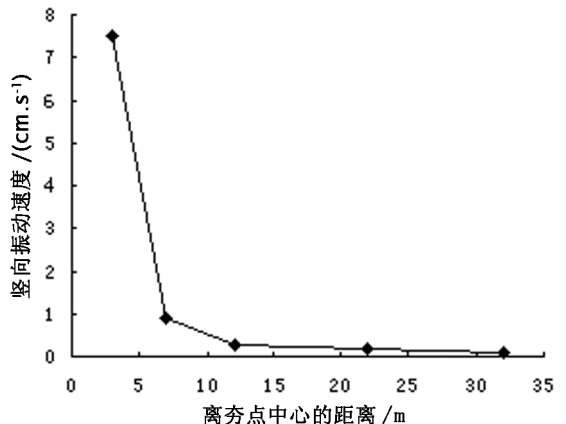


图 9 设置防振沟后地面竖向速度峰值随距离的变化曲线

### 3 结论

1)以半无限弹性体中波动理论为基础,研究了瑞利波的径向振动量和竖向振动量沿地基深度的衰减特性,认为强夯施工对环境影响最大的因素是瑞利波的竖向振动量。

2)强夯引起周边环境的竖向振动加速度与单坑的夯击次数有关;随着夯击次数的增加,初期的振动加速度峰值增加较快,后期的增加较慢,竖向加速度和夯击次数的关系可由一元二次方程加以描述。

3)随离夯点距离的增加,自由场地的竖向振动加速度及竖向振动速度以乘幂形式递减;在满足周围场地的竖向振动加速度  $a < 0.1 \text{ g}$  条件下,要求夯点离开周边建筑物的最小距离为 13 m。

4)防震沟的设置能有效的加快地面竖向振动量的衰减,对于周边环境的保护是有利的;关于防震沟设置参数对环境的振动影响尚有待于进一步的研究和探讨。

### 参考文献:

- [1] 地基处理手册编委会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [2] 阎明礼.地基处理技术[M].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [3] 郑颖人,李学志,冯遗兴,等.软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5):517—580.
- [4] 杨龙才,王炳龙,吴邦颖.粘性土地基强夯加固的对比试验研究[J].上海铁道大学学报,1999,20(10):34—37.
- [5] 胡钧,李昊.强夯振动监测与分析[J].工程勘察,2000,(6):1—4.
- [6] 方磊,经纬,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.
- [7] 陆伟东,韩晓健,杨放.强夯施工环境影响的评价方法[J].南京工业大学学报,2002,24(5):65—68.
- [8] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
- [9] 孔令伟,袁建新.R波在强夯加固软弱地基的作用探讨[J].工程勘察,1996,(5):1—5.
- [10] 水伟厚,朱建锋.10000KN.m高能级强夯振动加速度实测分析[J].工业建筑,2006,36(1):37—39.

## Analysis for the Environmental Vibration Effects Caused by Dynamic Compaction

YANG Long cai , WANG Bing long

(Key laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China)

**Abstract:** When dynamic compaction method is used to improve the soft soil foundation ,environmental vibration will appear due to radiating of compaction energy .Based on the wave —theory of semi —infinite elastic solid ,attenuation of radial direction and vertical direction of Rayleigh with depth wave have been studied ,and environmental influence is mainly decided by the vertical vibration of Rayleigh wave .Through in —situ test ,attenuation law of acceleration and velocity of free ground ,effects of vibration reduction by trench have been analyzed in this paper .

**Key words:** dynamic compaction ;environmental vibration ;attenuation law ;environmental influence ;in —situ test