强夯加固地基振动影响的试验研究

李福民 孙 勇

(深圳市土地投资开发中心,深圳 518031)

摘要:通过工程实例对强夯地基时振动加速度进行测试,分析了振动加速度的传播规律,提出建筑物安全距离判别方法及估算方法,研究了隔振沟的隔振效果及其对振动传播规律的影响.采用量纲分析原理,探讨了振动加速度与夯击能量、土的特性及传播距离之间的关系,通过大量的试验数据统计,得到经验公式和经验参数,由此可作为强夯加固地基安全距离的估算方法.

关键词:强夯;振动加速度;安全距离

中图分类号:TU411.6 文献标识码:A 文章编号:1001-0505(2002)05-0809-04

Experimental research on the influence of vibration during improvement of the ground with dynamic compaction

Li Fumin Sun Yong

(Shenzhen Land Investment Development Center, Shenzhen 518031, China)

Abstract: Based on the results of the measurement of the vibration acceleration during dynamic compaction, the rules of the transmission of vibration acceleration are analyzed. The rules to determine the safe distance between a building and the plot of dynamic compaction are suggested and the method to estimate the safe distance is built. It is studied how the ditch of isolating vibration eliminates the vibration due to dynamic compaction and affects the transmission of the vibration. Based on dimension principle, the relationships between vibration acceleration and the energy of dynamic compaction, the characters of the ground and the transmission distance are analyzed. The empirical formula is built by statistics analysis of the data from situ tests. It can be used to estimate the safe distance of improving the ground with dynamic compaction method. **Key words**: dynamic compaction method; vibration acceleration; safe distance

强夯(DCM)作为地基处理的一种方法,由于其 加固效果明显、施工简单等优点得到了广泛应用. 但强夯产生的振动波对周边建、构筑物的影响一直 是一个难以解决的问题.深圳某堆场工程周边为4 条市政道路,该区域地质条件为4.0m人工填土, 呈中密状态,其下为经塑料插板排水固结堆载预压 方法处理了的淤泥.由于堆场工程设计要求高,需 对该区重新进行地基处理,考虑到施工简便、工期 等因素,选用了强夯加固方法,以满足新的工程技 术要求.但是场区周围已有建好的市政道路及各种 地下管线等设施,如何确定合理的强夯安全边界, 并在安全可靠的前提下,使强夯边界尽量接近道 路,使实际使用堆场区面积扩大.本文通过试验找 出了强夯的最小安全距离,采用移动夯点(震源)的 方法,得到不同距离下的振动参数;水平加速度和 垂直加速度与距离的关系;以及隔振沟在强夯施工 中的隔振效果.

1 试验过程及测点布置

根据地基土的性状,选择一个典型的试验区, 试验区面积为20m×20m,试验区夯击2遍,夯点 间距为5.0m,夯点及测点布置如图1、图2所示. 在强夯过程中,使用了2种不同类型的夯锤:一种 是A型锤,直径2.0m、锤高0.85m、落锤质量18t、 落距22m、夯击能为3960kN•m;另一种是B型锤, 直径1.4m、锤高2.0m、落锤质量24t、落距15.7m、

收稿日期:2002-05-10.

作者简介:李福民(1964一),男,副研究员,总工程师.



图 1 第 1 遍强夯测点布置示意图(单位 mm)

市政道路边线



图 2 第 2 遍强**夯**测点布置示意图(单位 mm) 夯击能为 3 768 kN•m.

为减小振动对已建道路的影响,在试验区与已 建道路之间设一隔振沟,隔振沟顶宽 3~3.5 m,底 宽 1.0 m,靠道路边设置,其断面形状及平面布置如 图 1、图 2 所示.测点布置分有隔振沟和无隔振沟 两种情况.为找出在无隔振沟的条件下的最小安全 距离,采用移动夯击点(震源)的方法进行.

2 测试方法

各测点分别布置垂直和水平两个方向的加速 度传感器,传感器将测到的振动加速度信号输出到 放大器进行放大,然后通过信号采集仪采集信号并 存在磁盘中,测试系统框图如图3所示.实测波形 和分析结果由绘图仪、打印机输出.本次试验采用 ADS6-A信号采集仪,四通道,采样频率100kHz, 分辨率16位;采用SD-12双积分电荷放大器,四 通道,最大输入电荷10⁵ PC;频率检测范围0.5~ 100kHz;传感器采用压电式加速度传感器,可检测 频率范围0.5~700Hz,灵敏度1500PCg,可检测 最大加速度为100g.



图 3 振动效应测试系统框图

3 试验结果

第1遍强夯共布置测点11个,在3个不同位 置的夯击点夯击,每个夯击点夯击8次,即每测点 采样8次,取8次测试中的最大值为本次夯点的测 试结果.测点各次采样的实测加速度值为实测时域 曲线中最大峰值,测试结果见表1和表2.

表1 第1遍振动效应试验测试结果

_								
	测点编号	距夯击点的距离 m	实测水平加速度	实测垂直加速度	水平振动频率 Hz	垂直振动频率 Hz	有无隔震沟情况	夯锤形状
	2	10.2	0. 394 g	0. 401 g	7.0	7.4	无	В
	4	12.5	0. 104 g	0 .100 g	5.8	8.5	有	В
	5	12.5	0 .101 g	0 .100 g	5.8	6.5	有	В
	6	15.0	0.173 g	0 .144 g	6.6	5.3	无	В
	7	15.2	0.299 g	0.217 g	6.4	4.4	无	А
	8	17.5	0.096 g	0.086 g	5.5	7.2	无	В
	9	17.8	0.090 g	0 .080 g	7.0	7.4	有	В
	10	20.0	0.083 g	0 .089 g	6.0	5.3	无	В
	11	20.0	0.082 g	0.088 g	5.5	7.2	无	В
	12	22.8	0.081 g	0 .071 g	6.1	5.8	有	А
	表 2 第 2 遍振动效应试验测试结果							
	测点编号	距夯击点的距离 m	实测水平加速度	实测垂直加速度	水平振动频率 Hz	垂直振动频率 Hz	有无隔震沟情况	夯锤形状
	1	10.2	0.272 g	0 .315 g	5.5	7.0	无	В
	2	15.2	0 .207 g	0 .204 g	5.3	7.1	无	В
	3	15.2	0.164 g	0.180 g	5.0	7.0	无	В
	4	17.8	0.086 g	0 .090 g	5.0	6.6	有	В
	5	18.5	0.093 g	0 .098 g	5.7	7.0	有	В
	6	20.4	0.062 g	0.104 g	5.0	6.5	无	В
	7	20.4	0.085 g	0 .090 g	5.2	6.6	有	В
	8	22.8	0.048 g	0 050 g	5.0	6.6	右	в

4 试验结果分析

4.1 安全距离判别依据

根据 建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)中对 地震烈度的定义,地震烈度与相应的水平和垂直加 速度的关系,参见表 3.

表 3 地震烈度、相应的水平和垂直加速度

-					
	地震烈度	水平加速度	垂直加速度		
	9	0.4g	0 .8 g		
	8	0.2g	0.4 g		
	7	0.1 g	0.2 g		
	6	0 .05 g	$0.1 \ g$		
	5	$0.025 \ g$	0.05g		

安全距离的确定应根据被保护物要求确定,根据文献[1,2],对一般工业与民用建筑需抗7度地震,因此与其相配套的市政工程的各种地下构筑物应具有相应的抗震能力.所以,强夯安全边界的确定标准为:水平加速度小于0.1g,垂直加速度小于0.2g.

4.2 振动加速度变化规律的研究

通过强夯振动效应的测试,可进一步研究强夯 振动加速度与其他物理量之间的函数关系.影响强 夯振动加速度传播的因素很多,其中包括夯击能 量、夯锤形状、地基土的特性等.设落锤为刚体,则 落锤的质量、落距、地面介质(如地基压缩模量)为 已知的独立物理量,而距落锤夯击中心距离为 *R*. 地面上振动加速度为因变量,忽略夯锤形状等其他 次要因素的影响,其相互关系为

$$a = f(M, g, H, E_s, R)$$
(1)

式中, a 为加速度; M 为夯锤质量; g 为重力加速度; E, 为地基压缩模量.

采用文献 [1,3] 中的量纲分析方法,寻找各独 立物理量之间的本质联系.如果有 N 个具有量纲 的独立物理量(自变量),其中有 K 个是基本量纲 单位,则只能组成(N - K)个相互独立的无量纲参 数.同样表征因变量的物理量,也可以组成无量纲 参数的函数.

在工程单位制中,各独立物理量的量纲为

 $[M] = FT^{2}L^{-1}, [H] = [R] = L$ $[g] = LT^{-2}, [E_{s}] = FL^{2}$

上述各物理量中包括 3 个量纲单位力 F、长度 L 和时间 T,即 K = 3,则可组成 2 个相互独立的无 量纲数组,从上述 5 个变量中任取 3 个相互独立的 物理量,例如 E_s ,R,H,则

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_s \end{bmatrix}^{a_1} \bullet \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}^{a_2} \bullet \begin{bmatrix} g \end{bmatrix}^{a_3}$$
(2)
$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}\mathbf{T}^2 \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}\mathbf{L}^{-2} \end{bmatrix}^{a_1} \bullet \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix}^{a_2} \bullet \begin{bmatrix} \mathbf{L}\mathbf{T}^{-2} \end{bmatrix}^{a_3}$$

得

$$F : 1 = \alpha_{1}$$

$$T : 2 = -2 \alpha_{3}$$

$$L : -1 = -2 \alpha_{1} + \alpha_{2} + \alpha_{3}$$
(3)

求解式(3)得 $a_1 = 1$, $a_2 = 2$, $a_3 = -1$.

所以无量纲数 $\pi_1 = Mg(E_s R^2), \pi_2 = H R,$ 因变量的无量纲数 $\pi = a g.$

据量纲分析法的 π定理,得 π =
$$\phi(\pi_1, \pi_2)$$
,即

$$\frac{a}{g} = \phi \left(\frac{Mg}{E_s R^2}, \frac{\pi}{R} \right)$$
(4)

显然,强夯对地面的振动传播加速度 a 与夯击 能量 MgH 有关,则式(4)为

$$\frac{a}{g} = \phi \left(\frac{MgH}{E_s R^3} \right)$$
(5)

令比例距离 $R' = R/(M_g H E_s)^{\frac{1}{3}}$,式(5)亦可写成

$$\frac{a}{g} = k \left(R' \right)^{a} \tag{6}$$

式中, k 为待定系数; a 为衰减指数.对式(6)两边 取对数,可得

$$\ln \left(\frac{a}{g}\right) = \alpha \ln R' + \ln k \tag{7}$$

根据式(7),采用线性回归可求出振动加速度 a、比例距离的幂指数衰减系数 a及系数 $k^{[4]}$.

4.3 结果分析

根据现场试验结果和式(7),绘制了 $\alpha = R'$ 曲 线,令 $y = \ln (a g), x = \ln R'$,则得到水平和垂直 振动加速度与比例距离的回归公式,如图 4、图 5 所 示.根据地质勘察资料地基压缩模量 $E_s = 3.5$ MPa,第1遍强夯后地基压缩模量 $E_s = 5.0$ MPa.图 6、图 7 为振动加速度通过隔振沟与不通过隔振沟 的衰减对比图.试验结果表明:

1) 在强夯夯击作用下,各测点水平和垂直振动加速度值基本一致.安全标准 GBJ 11—89 中,水 平加速度仅是垂直加速度的一半,因而强夯的安全 距离确定应以水平振动加速度值作为控制标准.



图 4 水平振动加速度线性回归曲线

2)各测点的振动加速度随距夯击点距离的增加而迅速减小^[5],第1遍强夯时水平加速度衰减指数为-2.381,垂直加速度衰减指数为-2.034,第2



图 5 垂直加速度线性回归曲线

遍强夯时水平加速度衰减指数为-2.2983,垂直加速度衰减指数为-1.5686.

3)由图4和图5的线性回归公式,可计算出强 夯的安全距离.以7度地震烈度为标准,第1遍强夯 时安全边界在18.2m附近,第2遍强夯的安全边界 为18.4m.第1遍强夯安全距离小于第2遍强夯的 安全距离,这主要是经第1遍强夯后,人工填土密 实度得到增大,地基压缩模量提高,土颗粒孔隙减 少,振动加速度衰减指数减少,由此可见,强夯的安 全距离除了与夯击能量有关外,与地基土的特性有 密切关系.地基土的弹性模量越大,则所需的安全 距离则越大.

4)试验中采用了 A,B 两种锤型,从测试结果 来看,未通过隔振沟时,在与夯点距离约15.0 m时, B锤的实测水平加速度为 0.173g,垂直加速度为 0.144g,A锤的水平加速度为 0.299g,垂直加速度 为 0.217g,A锤产生的加速度是 B锤的 1.5~1.7 倍.这一方面是因为 B锤的夯击能量 3768 kN•m小 于 A锤的夯击能量 3960 kN•m;另一方面夯锤形状 对振动波的传播有一定影响,扁平锤产生的振动效 应大于柱状锤的振动效应.这主要是由于柱状锤比 扁平锤夯击时产生的地基变形大,因此柱状锤因地 基变形而消耗的能量大于扁平锤.测试结果还表 明:对同一夯击能量,其波的振动频率基本相同,即 夯击后振动波的频率与夯击能量有关,而夯锤形状 对振动频率影响不大.

5)由图6和图7可以看出,振动垂直加速度通 过隔振沟后迅速衰减,第1遍强夯时,垂直加速度 由0.401g降低至0.10g,降低了75%;第2遍强夯 由0.264g降低至0.09g,降低了66%.由此可见,隔 振沟具有明显的隔振效果.通过隔振沟后,振动加 速度缓慢衰减,但远离隔振沟后,振动加速度与无 隔振沟的振动加速度趋于一致.这说明振动波绕过 隔振沟后仍按原有的规律向前传播.因而在设置隔 振沟时,应尽量靠近被保护的物体,否则隔振沟的 作用将不明显.

5 结 论

1)振动加速度传播与夯击能量、夯锤形状、地



图 7 第 2 遍强夯隔振沟对垂直加速度衰减的影响

基土的类型及传播距离等有关.夯击能量越大,产 生的振动就越大;夯锤形状对振动加速度有一定的 影响,扁平锤产生的振动效应大于柱状锤产生的振 动效应;地基土的弹性模量越大,地基越密实,振动 波衰减越慢;振动加速度传播随距离成密指数衰 减.通过试验可以找到强夯的安全距离.

2)对一定尺寸的夯锤夯击产生的振动,强夯施 工的振动安全范围可采用式(6)进行估算,当有大 量实测数据时,可分别进行线性回归,确定衰减指 数的范围,由此得到强夯施工的振动安全范围经验 估算方法.

3)采用隔振沟对防止振动的传播具有很好的 效果.由于振动波绕过隔振沟后仍按原有的规律向 前传播.因而隔振沟的形状、深度及设置位置应根 据被保护的物体的特性设置,否则隔振沟的作用将 不明显.本工程中无隔振沟时安全距离为 18.2 m, 有隔振沟时安全距离缩小为 12.0 m,减少了 35%. 根据实验结果,实际大面积施工时,全面推广使用 隔振沟这一技术措施,取得了良好的效果.

参考文献(References)

- [1] 杨人光,史家癱.建筑物爆破拆除[M].北京:中国建筑 工业出版社,1985.20-25.
- [2]中国建筑科学研究院.GBJ 11—89 建筑抗震设计规范
 [S].北京:中国建筑工业出版社,1990.32 39.
- [3] 李之光.相似与模化理论与应用 [M].北京:国防工业 出版社,1982.33 - 36.
- [4] 李国胜,宋鸿金,林焕枢.实用建筑结构工程师手册 [S].北京:中国建筑工业出版社,1997.256-270.
- [5]中国建筑科学研究院.GB-50023-95 建筑抗振鉴定 标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1996.45-55.