

强夯引起的振动规律及环境效应分析

施有志

(福建省厦门市公路局, 福建厦门 361009)

【摘要】 强夯法是地基处理的一种常用方法, 而强夯施工振动往往是制约强夯法应用的关键。综合国内外的研究成果, 重点分析强夯引起的振动规律及振动对环境的影响, 并结合某沿海地基处理中的强夯振动工程实例, 根据实测结果, 分析振动速度随距离的衰减规律及强夯安全距离的确定。

【关键词】 强夯; 振动; 安全距离

【中图分类号】 TU 472.31; TU 413

Vibration Produced by Heavy Tamping and Its Environmental Effect

Shi Youzhi

(Xiamen Highway Bureau, Xiamen Fujian 361009 China)

【Abstract】 Dynamic compaction is one of the methods for ground treatment. But the vibration during dynamic compaction often becomes a problem that restricts the application of dynamic compaction. Base on the study results at home and abroad, the vibration produced by heavy tamping and the environmental effect is selectively analyzed. Combined with dynamic compaction vibration of a coastal engineering the vibration produced by heavy tamping is analyzed too. The safe distance of heavy tamping construction is determined.

【Key Words】 heavy tamping; vibration; safe distance

0 引言

强夯法加固地基施工简单、效果好、使用经济, 从而在世界范围内得到广泛应用。强夯施工过程中, 在夯锤落地的瞬间, 一部分动能转化为冲击波, 从夯点以波的形式向外传播, 其中面波仅在地表传播引起地表振动, 其振动强度随着与夯点距离的增加而减弱, 当夯点周围一定范围内的地表振动强度达到一定数值时, 会引起地表与周围建构筑物的共振, 从而使之产生不同程度的损坏和破坏等环境公害; 同时由于是连续夯击, 造成地面振动的强度比较大, 因而强夯振动对周围环境将具有更大的潜在危害性。随着强夯加固技术的推广和应用, 上述不利影响已日益引起人民的关注, 从而有必要对强夯引起的地面运动变化规律及其振动强度对周围建构筑物和环境的影响进行研究。研究这种环境扰动公害的目的在于: ①如何合理选定夯击能量与夯击方式, 使得强夯所产生的冲击振动不致于危及周围建构筑物; ②根据振动特征制定相应的隔振与控制措施。

本文综合国内外的研究成果, 重点分析强夯引起的振动规律及振动对环境的影响, 并结合某沿海地基处理中的强夯振动工程实例, 根据实测结果, 分析振动速度随距离的衰减规律及强夯安全距离的确定。

1 强夯引起的振动规律

1.1 振动周期与振动频率

强夯引起地面运动的振动周期和振动频率随着土质不同而变化, 若土质相对松软(如饱和松软的粘土、亚粘土、轻亚粘土等), 则振动周期就长; 若土质相对坚硬(如砂土、碎石土及粗碎屑等), 则振动周期较短, 而且随着距夯心的距离增大而增大, 振动周期一般约为 0.025 ~ 0.2 s; 振动频率约为 5 ~ 40 Hz, 而两次夯击间隔时间为几分钟, 其特性类似于爆破引起的振动^[1-2]。主振频率是指振动频谱中振幅最大的谐波分量的频率, 它是影响建构筑物的一个重要参数。文献[3]列出强夯振动主频见表 1, 可以看出, 强夯产生的振动主振频率较低, 在同一夯点上前几击由于土体处于夯实挤密过程中主振频率更低,

随夯击数的增加, 主振频率增大, 同一夯点同一击不同距离处强夯产生的振动的主振频率不同, 表现为近处频率高, 远处频率低。

表 1 强夯振动主频 Hz

强夯能级/kN·m	8 000	6 000	3 000	2 000
频率范围	3.91~11.72	6.03~12.45	4.15~9.28	8.06~20.26
频率均值	6.51	8.99	7.12	13.23

1.2 振动时间

强夯所引起的振动是一种瞬时型的冲击振动, 振动速度峰值强度的持续时间很短, 约 0.05~0.08 s; 夯心附近振动的总持续时间也不超过 0.1~0.5 s, 振动 2~3 次; 而在距夯心几十米远, 可达 1~2 s, 振动 10 余次。这规律也说明振源近处主要是体波而较远处则为面波^[4]。

1.3 振动速度及加速度

测试不同距离处垂直向、水平向(分径向和环向)的振动速度或加速度可得出如下规律: 在松软土层中近处水平径向速度最大, 垂直其次, 水平环向最小; 随着距离增加水平环向和垂直向渐趋接近, 环向仍为最小。在较坚硬的土层中近处垂直向速度最大, 水平径向其次, 水平环向最小; 随距离增加水平环向和垂直向渐趋接近, 环向仍为最小。强夯引起的振动, 并不完全取决于夯击能的大小。它与土的类别关系很大, 如土质松软则因每锤夯击下沉量大, 夯击能消耗于变形能就多, 引起的振动就小。在同一场地, 则随着夯击次数和遍数的增加, 振动的影响也增大。

1.4 振动的衰减

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^[4]。文献[5]较详细地讨论了质点位移与距离的几何衰减规律(见表 2), 可以看出, 振幅 A 随着振源距离 r 的增大而迅速递减。

表 2 波的三种振幅随距离 r 的几何衰减规律

部位	振源类型	瑞利波	纵波	横波
半空间表面	点源	$1/r^{1/2}$	$1/r^2$	$1/r^2$
半空间表面	线源	与 r 无关	$1/r^{3/2}$	$1/r^{3/2}$
无限空间内部	点源	无瑞利波	$1/r$	$1/r$
无限空间内部	线源	无瑞利波	$1/r^{1/2}$	$1/r^{1/2}$

文献[6]通过实测表明: 离夯点越近, 振幅越大, 振动最强烈, 但随着距离增大, 振幅很快衰减; 振幅随着夯击次数的增大而增大, 但其增量逐渐减小, 表明夯击次数增大后土的密实度提高; 竖向振动和水平振动变化差别不大。文献[7]根据大量的实测资料统计分析认为, 强夯振动的加速度、振幅及速度随距夯点距离呈负指数曲线衰减, 其衰减规律可用 $k \cdot r^{-\beta}$ 式来表示, 其中 k 为当量系数, 与强夯夯击能及场地介质条件有关; β 为衰减指数, 主要与场地介质条件有关。文献[8]研究影响强夯地面振动衰减的因素表明, 夯击能量和场地土层条件是影响强夯地面振动衰减的两个重要因素: 夯击能量越大, 地面振动衰减越快; 在较小的夯间距上, 强夯地面振动的强度对夯击能量的变化相对较敏感, 表现为近距离上地面振动强度随夯击能量的增加速率较大。

2 强夯引起振动的环境效应

强夯的巨大冲击能量可使附近的场地下沉和隆起, 并以冲击波向外传播, 对附近的土体及周围建筑产生扰动影响, 引起场地表面和建筑物不同程度的损伤与破坏, 对人的身心健康造成危害, 并产生振动和噪声等环境效应。下面重点讨论强夯引起的振动对周围建构筑物的影响。

目前地震引起对建构筑物的影响研究较多, 评价地震对建构筑物的危害指标主要有: 烈度、加速度、振动持续时间等。强夯引起的振动与地震显然不同, 危害也不同, 但目前尚未形成对建构筑物危害判别的统一标准, 国内外采用的判别标准主要有以下三种:

1) 以地面速度作为判别标准

该方法一般参照爆破破坏的判别标准。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2003)^[9] 中规定, 度量爆破振动效应对建构筑物安全的影响时, 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、非抗震的大型砖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。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, 更接近于建构筑物的固有频率, 因此, 爆破所产生的地基振动导致结构共振并引发的破损比强夯要小得多; 另一方面, 强夯击数多, 间隔小, 其折算振动时间将比地震或爆破振动的时间长得多。可见在同等振幅的情况下, 强夯振动将更容易引起结构破坏。因此, 直接套用该规程的技术

标准来评价强夯振动的环境效应是不够科学的,只能作为参考计算。

2) 以地面加速度作为判别标准

任书考^[10]认为:考虑到机械类型的振动作用时间较长,以此类型的振动标准作为判据,结果会更安全。《动力机器基础设计规范编制说明》中规定:对松散砂土, $a_{\max} < 0.1 g$; 对粘土, $a_{\max} < 0.2 g$, 可以此作为强夯振动的判别标准。方磊等人通过对某高速公路强夯振动实测资料的分析,认为强夯所引起的地面振动加速度衰减到 $0.1 g$ 时,对建构物几乎没有危害^[11]。叶书麟、叶观宝也认为:可将地表最大振动加速度为 $0.1 g$ 处作为强夯振动的安全距离^[12]。

3) 以扰动影响系数 k 作为判别标准

采用地面振动速度和加速度来评价强夯振动的环境效应,难以反映出结构的真实受力状态和破坏机理的。因此,仅用振动速度和加速度来评价强夯振动的环境效应只能算是一种实用的近似方法。实际上强夯引起的振动对周围建构物的扰动影响,不仅与建构物附近地面的最大振动速度、最大振动加速度、振幅、振动频率有关,而且与土质、建筑物本身的强度及刚度有着密切关系。根据大量的实测统计资料,可以建立强夯振动对建构物扰动影响系数 k 的函数^[1]:

$$k = \frac{20a/g + 2v + 100A - 6f}{24}$$

式中: a/g 为建构物附近地面最大水平加速度与重力加速度的比值; v 为建构物附近地面最大水平速度, cm/s ; A 为建构物附近地面振幅, cm ; f 为建构物本身的强度刚度综合系数,对一般建构物取 1.0 , 临时建构物取 $0.5 \sim 0.8$ 。根据 k 值的大小可将强夯振动对建构物的不利扰动分为 3 个区域:

① 强不利扰动区, $k \geq 1$ 。在该区地面最大水平加速度超过 $0.5 g$, 最大水平速度超过 5 cm/s , 振幅超过 1.0 mm , 会对一般建构物造成一定的破坏;

② 中不利扰动区, $0 \leq k < 1$ 。在该区地面最大水平加速度介于 $0.1 \sim 0.5 g$, 最大水平速度介于 $1 \sim 5 \text{ cm/s}$, 振幅介于 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$, 对一般建构物不会造成破坏,但对强度刚度较低的建构物,有一定的损伤。

③ 弱不利扰动区, $k < 0$ 。在该区地面最大水平加速度小于 $0.1 g$, 最大水平速度小于 1 cm/s , 振幅小于 0.2 mm , 对普通建构物不会造成损伤。

上述各个不利扰动区距夯点的距离一般随夯击能量的变化而变化,对 $1\ 000 \sim 3\ 000 \text{ kJ}$ 的夯击能量,强不利扰动区一般距夯点的距离小于 10 m ; 中不利扰动区一般距夯点的距离为 $10 \sim 30 \text{ m}$; 弱不利扰动区一般距夯点的距离大于 30 m 。

强夯振动涉及到层状半空间中弹塑性波的传播与衰减特征,加之不同土质的差别较大,目前理论上的研究尚不够成熟。迄今为止,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,只能通过现场监测,以实测的加速度、速度来评价强夯振动的环境效应。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

场区位于厦门市的吹填造地工程,陆域形成总面积为 637.7 万 m^2 ,共分四个标段实施,标段号分别为 A、B、C、D。试验区域位于 C 标的施工场地,系在原虾池及塘埂地形上采用堆砂填埋形成,填土厚度 $5.0 \sim 6.0 \text{ m}$ 。根据勘察报告及本次试验测试资料,场地内岩土层分布自上而下依次分别为素填土、淤泥(混砂)、砂混淤泥、粉质粘土、中粗砂、圆砾、砾砂、残积砂质粘性土等。表层回填砾砂层除上部 0.5 m 因车辆碾压呈稍密状态外,其余均呈松散一极松散状。淤泥(混砂),呈灰黑色,饱和,流塑状,有腥臭味,主要由粘粒组成,含中粗砂 $10\% \sim 30\%$ 及少量有机质,局部砂粒成份较高,主要分布在塘埂处,厚度 2 m 左右;虾池中的次生淤泥层与上覆回填砾砂层相混。下伏海相中粗砂层及残积砂质粘性土层物理力学性能好,强度高、压缩性低、工程性能好。由于回填砾砂层及下伏淤泥层力学性质不能满足工程需要,为了获取合适的强夯参数,施工前选定典型地段进行试夯,本次强夯试验区面积为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。

3.2 强夯施工参数

试验区分三遍进行强夯施工,第一、二遍为点夯,第三遍为满夯。第一遍点夯夯点按 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 加梅花点布置,第二遍点夯夯点按 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 加梅花点布置,与第一遍夯点交错排列成 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 方格。二遍点夯后的覆盖率(夯锤底面积与夯锤处理的面积之比)为 21.6% 。第三遍为满夯,锤印搭接 $1/3$ 。

3.3 强夯振动测试

由强夯夯击产生的振动,将通过地基土向四周传播,对周围构建筑物(老海堤)和人的工作环境产生不利影响。振动波在地基中的传播由于受到地基土中的内阻尼和振动能量的扩散,其振幅随着离开

震源的距离增大而逐渐减小。在试验区第 1 组孔隙水压力计附近选定 1 和 2 夯点, 对其夯击过程中产生的振动进行测试。振动监测系统主要包括自记仪系统和测量数据数字记录系统。振动监测系统采用振动观测的物理量为质点振动速度。现场监测采用的仪器系统由速度传感器、信号采集与记录设备、数据处理系统三部分组成。传感器采用 CD-1 型速度传感器, 记录仪器为 TOPBOX-508 振动信号自记仪。波形显示处理设备为装有振动分析软件

(TOPVIEW2000) 的便携计算机。

本次试夯施工共布置 7 个测点进行强夯振动监测, 其中 5[#] 测点是监测强夯振动对海堤的振动影响, 测点布置在海堤衬砌防护墙上, 其它测点布置在两个夯击试验点(1 和 2)连线中点与 5[#] 点间连线的回填砂表面上, 测点位置及到夯源距离见图 1。仅对夯源 1 的最后两击及夯源 2 的最后一击进行了监测, 共获得 16 个有效监测数据。

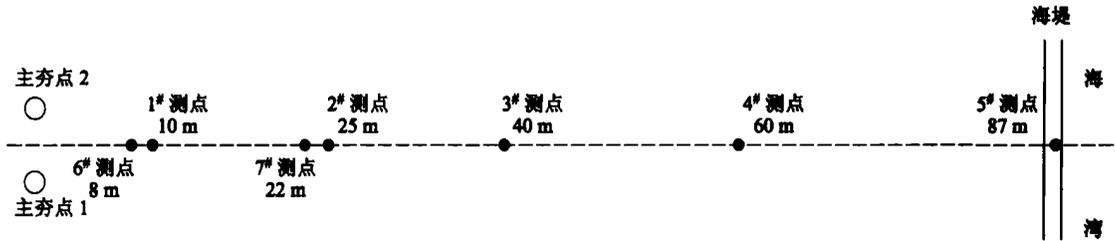


图 1 强夯振动测试测点布置示意图

3.4 测试成果分析

测试结果见表 3。

表 3 监测点的质点振动速度和频率

监测对象	测点号	水 平		垂 直		距离/m
		速度/(cm·s ⁻¹)	频率/Hz	速度/(cm·s ⁻¹)	频率/Hz	
夯源 1 的倒数第二击	1	4.33	14.88	0.56	19.53	10
	2	0.50	7.81	0.44	9.68	25
夯源 1 的最后一击	1	5.47	14.20	0.69	16.45	10
	3	0.11	16.45	0.25	13.11	40
	4	0.12	8.68	0.05	7.81	60
夯源 2 的最后一击	5	0.10	14.88	0.042	14.20	87
	6	1.82	31.25	2.97	11.79	8
	7	0.15	6.51	0.94	12.50	22

通过对表 1 中数据进行分析, 3 000 kJ 能级强夯水平向速度衰减规律为:

$$v_{\parallel} = 222.87R^{-1.8975} \quad \text{相关系数 } R = 0.8977$$

3 000 kJ 能级强夯垂直向速度衰减规律为:

$$v_{\perp} = 214.39R^{-1.9152} \quad \text{相关系数 } R = 0.9744$$

振动速度随距离的衰减规律见图 2、图 3。

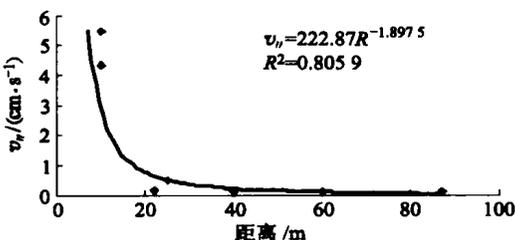


图 2 水平向振动速度衰减规律

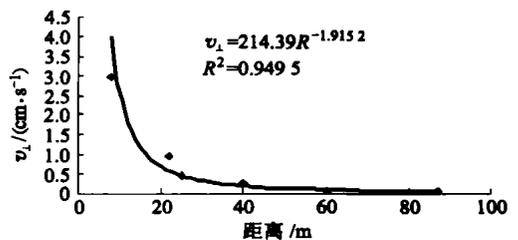


图 3 垂直向振动速度衰减规律

由图 2、图 3 可知, 强夯引起的质点振动速度在 15 m 以内比较大, 而在 20 m 以外则较小, 振动速度衰减很快。

振动的作用时间都在 1 s 以内, 振动速度的频谱分析表明, 强夯振动的频率较低, 主频率一般在 5 ~ 20 Hz 之间(见图 4)。

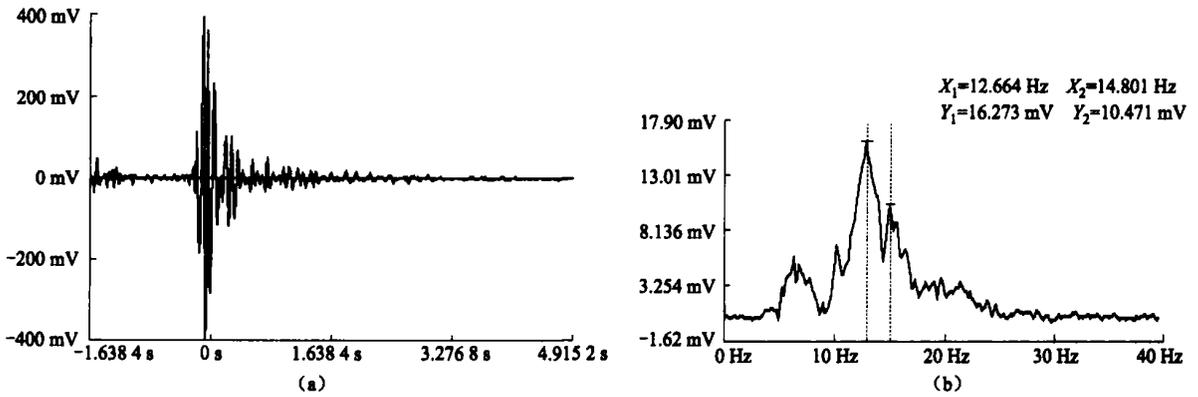


图4 典型的实测波形和幅值谱

3.5 安全距离的确定

长江科学院张正宇等在分析爆破振动观测的许多成果后,总结并提出有病害的土坝、堆石坝的质点安全振动速度不大于 1 cm/s ,含有砂层的土坝坝基不产生液化的安全振速应小于 3 cm/s 。参考《爆破安全规程》(GB 6722—2003)^[9]、《建构筑物抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[13] 以及相关文献和实践经验,把海堤看作建在砂土上的小型土石坝,则其振动速度安全控制标准在 $1 \sim 2 \text{ cm/s}$ 。结合本文第2节的讨论,考虑到海堤对整个工程及人民生命财产安全的重要性,为确保海堤的安全,从严控制海堤的安全质点振动速度,以 1 cm/s 的质点振动速度作为其安全控制标准。在现有地质及施工条件下(点夯 3000 kJ),强夯振动的安全距离可以取为 20 m ,即夯点距老海堤坡脚安全距离为 20 m ,则距离老海堤防浪墙的安全距离取为 30 m 。

4 结论

1) 强夯引起的振动与地震显然不同,危害也不同,但目前尚未形成对建构筑物危害判别的统一标准,国内外采用的判别标准主要有:以地面速度作为判别标准;以地面加速度作为判别标准;以扰动影响系数 k 作为判别标准。在强夯施工过程中,应加强现场监测,选择适当的方法评价强夯振动的环境效应。

2) 试夯区在能量为 3000 kJ 强夯作用下,质点振动具有速度小、频率低的特点。振动速度随距离的增加衰减较快,衰减规律表明:强夯振动对 15 m 以内的建(构)筑物有一定影响,而对 20 m 以外的则比较小。 3000 kJ 能量下强夯振动的安全距离可以取距离老海堤坡脚 20 m ,距老海堤防浪墙 30 m 。

3) 强夯振动影响评价应根据具体项目具体分

析,与建筑场地类型、周边地物抗震设防等级、回填料、场地土均匀性和强夯施工工艺等有关,并注意与其他强夯施工监测方法相结合,进行全面系统的评价。

参考文献

- [1] 周健,吴世明,徐建平.环境与岩土工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:207-218.
- [2] 《地基处理手册》(第二版)编写委员会.地基处理手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:255-296.
- [3] 褚宏宪,史慧杰.强夯施工振动影响评价[J].岩土工程界,2004,7(11):78-80.
- [4] 陆伟东,韩晓健,杨放.强夯施工环境振动影响的评价方法[J].南京工业大学学报,2002,24(5):65-68.
- [5] 严仁觉,王贻荪,韩清宇.动力基础弹性半空间理论概论[M].北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [6] 王杰贤.动力地基与基础[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] 谭捍华,孙进忠,祈生文.强夯振动衰减规律的研究[J].工程勘察,2001(5):11-14.
- [8] 孙进忠,谭捍华,祈生文,等.影响强夯地面振动衰减的因素分析[J].现代地质,2000,14(2):230-234.
- [9] GB 6722—2003 爆破安全规程.
- [10] 任书考.强夯振动测试与资料分析研究[G]//第四届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [11] 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,2001,31:29-32.
- [12] 叶书麟,叶观宝.地基处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [13] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].

收稿日期:2007-02-02