

高水位场地强夯夯击能损耗分析与计算

李英涛, 陈建业, 张艳霞, 高青松
(山西机械化建设集团有限公司, 山西 太原 030009)

摘要: 在高水位场地中进行强夯时, 由于夯锤与地下水的相互作用, 造成夯锤的有效夯击能损失。通过在夯锤表面安装振动加速度传感器, 测试在高水位场地中强夯时同一夯点上每一次夯击其夯锤的加速度值的变化, 构建夯击模型, 分析计算因地下水的作用导致夯击能的损耗率, 并采用数值积分方法对夯锤加速度进行时域计算分析复核夯击能损耗, 结果显示在高水位场地中强夯夯击能损耗率接近或超过 50%, 并提出了针对性的施工措施, 保障强夯达到预期地基处理效果。

关键词: 强夯; 高水位场地; 有效夯击能; 夯锤加速度; 夯击能的损耗率

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0040-08

Analysis and calculation of dynamic compaction energy loss in high-water level areas

LI Ying-tao, CHEN Jian-ye, ZHANG Yan-xia, GAO Qing-song
(Shanxi Mechanisation Construction Group Co., Ltd., Taiyuan 030009, Shanxi, China)

Abstract: In the context of dynamic compaction activities conducted in regions characterized by a high-water level, a notable reduction in the effective compaction energy delivered by the compaction hammer occurs due to its interaction with the groundwater. The research involves the installation of a vibration acceleration sensor on the surface of the compaction hammer. Subsequently, an investigation is conducted to monitor fluctuations in the acceleration values of the compaction hammer throughout the dynamic compaction process at a site with a high-water level. To analyze and calculate the loss rate of compaction energy resulting from groundwater interactions, a dedicated analytical model is formulated and applied. The analysis also incorporates the application of numerical integration techniques to scrutinize the acceleration profile of the compaction hammer, facilitating a comprehensive assessment of compaction energy losses. The results suggest that the loss rate of compaction energy during dynamic compaction in high-water level areas approaches or exceeds 50%. Consequently, it is imperative to implement rigorous construction measures to ensure the effective execution of dynamic compaction procedures, thereby achieving the intended compaction results.

Key words: dynamic compaction; high-water level area; effective compaction energy; acceleration of the compaction hammer; loss rate of compaction energy

0 引言

随着强夯技术的不断发展, 强夯能级现已发展到 30 000 kN·m 及以上的超高能级。沿海地区通过填海造地形成了新的建筑场地, 其加固多采用强夯处理, 但这种填海形成的地基地下水位一般较高; 此外, 河漫滩、平原、盆地中心及洼地、池塘等地域的地下水位也较高。一般把地下水位在夯坑深度内可见的场地称为高水位场地。在高水位场地中,

当夯锤底面与地下水位面趋近及至接触时, 夯锤夯击能量传递方式由固体介质转变为液-固介质共同传递, 在夯锤与地下水高速撞击瞬间, 因水体“顶托”和夯击振动波先在水中传递造成夯击能损失, 从而使夯锤对地基土的有效夯击能产生附加损耗。董炳寅等^[1]以我国 40 年强夯工程实践阐述了强夯技术创新和发展展望, 强调应在现场对土层本身做文章, 以土治土, 充分利用和发挥土层本身的作用。山西机械化建设集团公司等^[2]在研究高水

位地基强夯施工方法时提出应预先确定地下水位的控制深度和控制方法,但对具有稳定地下水位的固-液土体介质强夯夯击能在夯击界面上的损耗,未给出定量分析方法,需要做进一步的研究。吴民晖等^[3]、张强等^[4]和周雷靖等^[5]研究讨论了强夯法在吹填砂等高水位厚层松散地基应用的有效性和夯后承载力增长时效。姚宝宽等^[6]、陈建业^[7]、高有斌等^[8]讨论了采用真空井点降水等措施联合强夯法处理软土地基。姚凯^[9]研究了滨河冲(淤)积地基本水位高低与土层强夯振动液化的关系。国内学者在沿海防潮、沿江港口、高原机场等高水位软土地基应用强夯加固处理均获预期效果^[10-12]。上述研究工作建立了强夯能级(初始夯击能)与加固效果之间的宏观关联,但尚未见详细探讨有关因场地存在高水位时夯击过程中夯击能额外损耗情况的公开资料。

本文依托辽东半岛金州湾人工岛填海造地工程,在高水位场地的试夯过程中,在夯锤上安装加速度传感器,测试夯锤在夯击过程中的加速度变化,借助“土的三相组成特征”、“强夯加固地基土机理”和“能量守恒定律”建立夯锤夯击土体时的动态模型,分析计算在稳定地下水中夯击时的夯击能损耗率,提出了高水位场地中强夯施工时应采取的措施,从而保障强夯达到预期处理效果。

1 夯击能损耗的实测及分析

1.1 工程地质条件

工程场地位于辽东半岛金州湾人工岛,为填海造地工程,原场地土层自上而下分为4层:①海相沉积层:主要由粉土、粉质黏土、泥砂、淤泥质粉质黏土、淤泥、淤泥质黏土等土层组成,层底高程在-19.9~-13.2 m;②陆相沉积层:主要由黏土、粉质黏土、粉土、粉细砂等组成。黏土、粉质黏土标贯击数在7.8~10.0击,粉土、粉细砂标贯击数在37.4~38.8击,层底高程在-36.7~-21.6 m;③陆相沉积层:主要由强度较高的黏土、粉质黏土、黏土等组成,标贯击数在15.0~18.9击;④基岩:主要由强风化辉绿岩、中风化辉绿岩、强风化石灰岩、中风化石灰岩等组成,初见风化岩顶面高程在-73.8~-38.2 m。

根据填海造地实施方案,第一大层软土层清淤换填,回填开山土石,场地回填厚度为20.0~23.5 m,回填后场地地面标高在+4.50 m左右。场地最高静止水位为+0.97 m,最低静止水位为-1.39 m。

1.2 测试方法与过程

本工程在正式施工前进行了试夯,按夯击能6000 kN·m、10000 kN·m、18000 kN·m、25000 kN·m这4种能级分区进行。夯锤加速度测试在25000 kN·m能级试夯区选择第一个夯点实施,夯锤重98.94 t、起吊高度25.30 m。夯击过程中,夯击至第17击时,夯坑底部开始出现地下水。本次在夯锤顶面安装多道振动加速度传感器,测试每一击过程中从夯锤脱钩开始起至单击夯沉量观测完成时止夯锤的实时加速度值。

1.3 测试结果与分析

力 F 与加速度 a 的关系为 $F=ma$,即加速度因外力作用而产生,若质量 m 恒定,加速度大小仅随外力而变化,加速度方向与力的方向一致。当夯锤脱钩后以自由落体方式下落夯击地面,地面土体受到夯锤冲压,势必对夯锤底面产生巨大的反作用力,即对夯锤产生一个向上的反力 F ,设定加速度向下为“正”,向上为“负”,则这个反力对应夯锤的加速度 a 是一个向上(负)的加速度。随着夯锤继续向下移动, F 增大,相应 a 也在增大,最终 F 、 a 均达到(负)峰值。由于地基土具有一定的弹性,使夯锤呈现反弹现象,在反弹的瞬间,在夯锤的自重、掉落在锤上的土的重量、坑壁土对锤向下的侧摩阻力、锤底因堵塞排气孔产生一定的真空所产生的吸力、空气阻力等向下力的合力作用下,在夯锤上产生一个向下(正)的加速度,随着时间的延续,加速度达到(正)峰值。在夯击过程中通过对夯锤在每一击触地瞬间之前至之后一小段时间的加速度值进行实测,获得一系列形态完好的夯锤加速度时域曲线,夯击第3击和第11~19击时实测夯锤加速度峰值结果汇总于表1,选取曲线形态典型的第3、13、16、19击加速度时域曲线如图1所示。第17击时夯坑底部有地下水渗出,第18、19击出现稳定地下水位,此时夯锤的受力状况发生一定的改变。图1中第19击曲线尾支出现不规则锯齿状,说明夯锤受到地下水影响及夯坑坍塌冲击干扰(第17、18击实测曲线尾支具有相同特征)。如上所述,夯锤脱钩后经自由落体加速后冲击地基土,夯锤与被加固土体之间所发生的相互作用,可以简单地看作是刚体与非弹性体之间的(完全)非弹性碰撞,夯锤在垂直方向的运动过程可以描述为“高阻尼”的非周期性机械运动(夯锤加速度时域曲线表现为单脉冲形态^[13]),该“高阻尼”因子是被加固土体“机械性能或全部物理力学指标”以及夯锤-夯坑

相互作用关系的综合响应,并随夯坑深度、地下水位等因素变化而动态变化。换言之,在夯锤夯击地面(触地碰撞)瞬间,发生相互作用的主体可概括

为夯锤、被加固土体、锤与土之间被压缩的“空气垫”以及夯坑内是否有水所形成的“水垫”(出现液相界面)。

表1 夯击时实测夯锤加速度峰值结果

Table 1 Measured peak acceleration of the compaction hammer during dynamic compaction

击数	地基反力加速度峰值点①		地基反力加速度由负转正点②		反弹加速度峰值点③		累计时长 ($T_1+T_2+T_3$)/s
	峰值/(m/s^2)	时长 T_1/s	时长 T_2/s	峰值/(m/s^2)	时长 T_3/s		
第3击	-495	0.030 0	0.065 0	+107	0.020 0	0.115 0	
第11击	-656	0.033 0	0.042 5	+93	0.037 0	0.112 5	
第12击	-624	0.027 0	0.042 0	+105	0.026 0	0.095 0	
第13击	-647	0.028 0	0.039 0	+116	0.035 0	0.102 0	
第14击	-683	0.024 5	0.041 5	+101	0.035 5	0.101 5	
第15击	-632	0.035 5	0.037 0	+133	0.035 5	0.108 0	
第16击	-683	0.032 0	0.038 0	+114	0.037 0	0.107 0	
第17击	-815	0.097 5	0.042 0	+98	0.146 5	0.286 0	
第18击	-729	0.090 5	0.036 5	+403	0.046 0	0.173 0	
第19击	-927	0.092 5	0.032 5	+430	0.014 0	0.139 0	

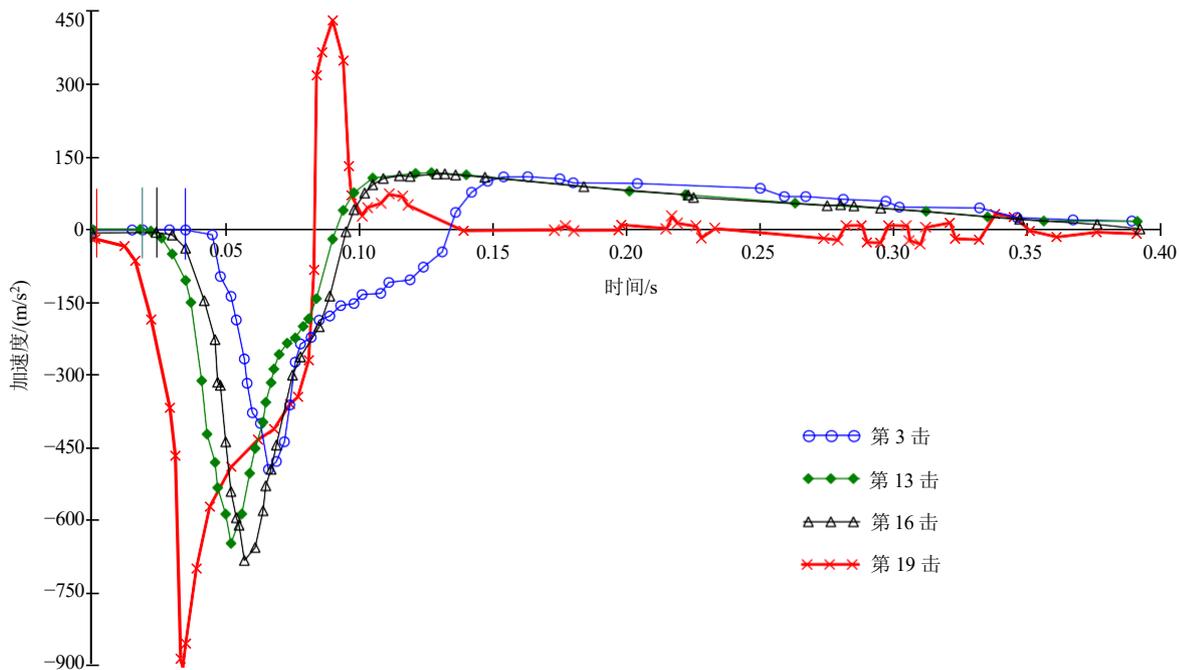


图1 实测夯锤加速度时域曲线

Fig. 1 Time domain curves of measured acceleration of the compaction hammer

如图1所示,在加速度时域曲线上,夯锤在触地后呈现4个阶段,以第16击为例(见图2),落地之前夯锤除受到重力与空气阻力外没有受到其它外力,忽略空气阻力并设重力加速度恒定,则夯锤受到外力的加速度为0,夯锤落地后:

(1) 向上加速度急剧增大,直至出现最大峰值,这一阶段表现为夯锤主要受地基土抵抗压缩变形的向上反力作用,亦即夯锤向下动能充分发挥作用的阶段;

(2) 最大峰值后,向上加速度逐渐减小到0,此时夯锤动能逐渐衰减,地基土-气-水向上反弹力的反力逐渐发挥主要作用;

(3) 当加速度由负转正时夯锤呈现回弹上跳,这时地基土-气-水反弹反力由盛转衰,夯锤上跳所受到的各种阻力合力发挥作用并逐渐占据主导,直至最大;

(4) 夯锤上跳阻力的合力逐渐衰减,最终夯锤加速度逐渐趋于0。

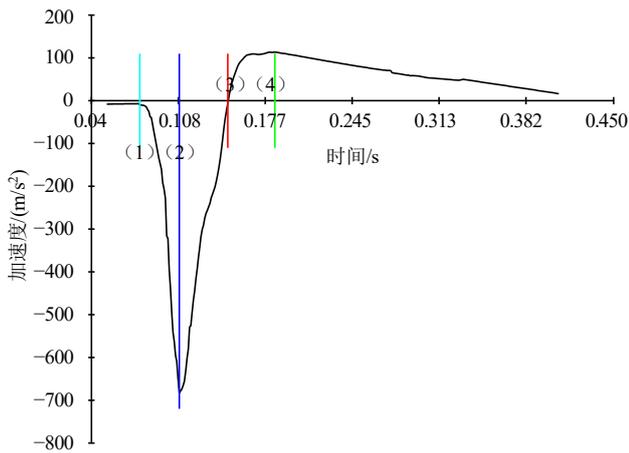


图 2 第 16 击夯锤加速度的 4 个阶段

Fig. 2 Four stages of the compaction hammer acceleration at the 16th compaction

当仅研究有无地下水对强夯效率的影响时,可以考察从夯锤触地开始、至向下位移速度减至最小这一阶段,这时包含了被加固土体全部的塑性变形

和弹性变形以及“气-水”向下阻尼起主导作用的阶段,如图 2 夯锤加速度时域曲线上,可认为是为第(1)阶段起点至第(2)阶段终点。当夯坑有水时,夯锤下落会先与水面碰撞,再向下位移夯击到地基土。由于水的阻力与地基土的反力两者产生向上的合力(忽略落锤时锤底面空气垫的影响),比无地下水时的反力更大,则会产生一个向上(负)的更大的加速度,即图 2 所示第(1)阶段末期的负峰值,在图 1 中表现为第 19 击较之前各击负峰值更大。夯锤在向下位移速度减至最小值时转为向上反弹,在反弹瞬间其所受向下合力产生向下的加速度,随后达到峰值。因有地下水的作用,其合力比无地下水时更大,因此产生的加速度也更大。此时如图 2 所示第(3)阶段,在图 1 中表现为第 19 击较之前各击正峰值也更大。第 11~16 击的均值、第 17 击(见水)与第 18、19 击的实测数据对比列于表 2。

表 2 地下水对夯锤加速度峰值的影响对比

Table 2 Comparison of the effect of groundwater on the peak acceleration of the compaction hammer

击数	夯锤受反力作用产生的最大加速度/(m/s ²)	夯锤受反力作用达最大加速度的时长/s	夯锤受反力加速度作用的持续时长/s	夯锤反弹加速度峰值/(m/s ²)	达到峰值的时长/s
第 11~16 击均值	-654	0.030 0	0.070 0	110	0.104 3
第 17 击(见水)	-815	0.097 5	0.139 5	98	0.286 0
第 18 击	-729	0.090 5	0.127 0	403	0.173 0
第 19 击	-927	0.092 5	0.125 0	430	0.139 0

由表 1~2 数据可知,在第 17 击之前(第 11~16 击,下同),因反力产生的最大加速度在-624~-683 m/s²,平均值为-654 m/s²;夯锤因反弹产生的加速度在+93~+113 m/s²,平均值为+110 m/s²。在第 18、19 击时,因反力产生的最大加速度分别为-729 m/s²、-927 m/s²,均大于第 17 击前的平均值;而达到最大加速度的时长分别为 0.090 5 s、0.092 5 s,比第 11~16 击达到最大加速度的平均时长延迟;夯击第 18、19 击时,夯锤因反弹产生的加速度峰值为 403 m/s²、430 m/s²,比无地下水位时第 17 击前的平均值 110 m/s² 大。

综上所述,夯锤在夯击地基时,若单击夯击能为定值,即夯击能 $E = mgh = (1/2)mv^2$,则夯锤触地前的速度 v 也为定值,实测数据反映由于地下水的作用,反力对夯锤产生了一个更大的加速度,但对土体的压密作用时程 t 反而更长,按动量定理 $m\Delta v = Ft$ 可知,夯锤速度 Δv 小于其触地前速度 v ,即夯击能有损失。

2 夯击能损耗的模型计算分析

2.1 构建夯锤夯击地基土的运动过程模型及分析

(1) 夯击运动过程分解: a) 夯锤自由下落(落距 25.3 m+夯坑深度); b) 夯锤底面碰撞水面; c) 夯锤底面穿过水面后继续下移夯击地基土; d) 夯锤受到水与地基土的反力,加速度在达到峰值后减小至 0; e) 夯锤受到反弹力作用向下位移速度降为最小后向上反弹并达峰值最终回落静止。

(2) 根据土的三相组成特征与上述运动过程建立如下模型:图 3(a) 模型为夯击第 17 击时的状况,此时刚刚显现地下水迹(水土结合面),第 16 击夯完后,夯坑的实测深度为 3.70 m,因此第 17 击夯锤的实际落距为 (25.30 m+3.70 m)=29.00 m;图 3(b) 模型为夯击第 18 击时的状况,出现稳定地下水位,夯锤实际落距为 (25.30 m+3.76 m)=29.06 m;图 3(c) 模型为夯击第 19 击时的状况,稳定地下水位不变,水层增厚,夯锤实际落距为 (25.30 m+

3.80 m)=29.10 m。从地下水水位面算起,图3(b)和图3(c)模型的落距均按29.00 m计算。

(3) 运动过程中的参数分析

当夯锤以29.00 m (25.30 m+3.70 m)的高度自由落下碰撞地基土面图3(a)模型或地下水水面图3(b)、(c)模型的瞬间,视其速度相同并设为 v_0 。碰撞后因受到反力,产生向上的加速度,随着夯锤下移反力达到最大,反力产生的加速度最大,随后反力逐渐削减直到消失,最终向下速度减至最小。因3种模型的工况不同,夯锤在夯击过程中产生的反力、加速度、位移均不同,但有一点是相同的,加速度由负峰值减为0时夯锤的速度值最小。因此,可以假定反力加速度由0→最大→0时在夯锤位移

范围内,即图2的(1)(2)阶段,夯锤及其周围整体近似为“均质体”,夯锤仅受一个综合反力作用,取这个综合反力产生的加速度为 $a_{\text{综合}}$ 。根据式(1)可求出 $a_{\text{综合}}$ 。

$$v_t = v_0 + a_{\text{综合}} \times t \quad (1)$$

式中: v_t 为夯锤因反力加速度产生的速度,此时其值不再增大,为最低值,可令 $v_t = 0$; v_0 为夯锤底面接触地基土面或水面瞬间的速度,这里为落距29.00 m的自由落体速度,为23.84 m/s; $a_{\text{综合}}$ 为夯锤加速度由0→最大→0时位移范围内“均质体”的综合加速度; t 为夯锤因反力加速度完成负峰值所用的时间。

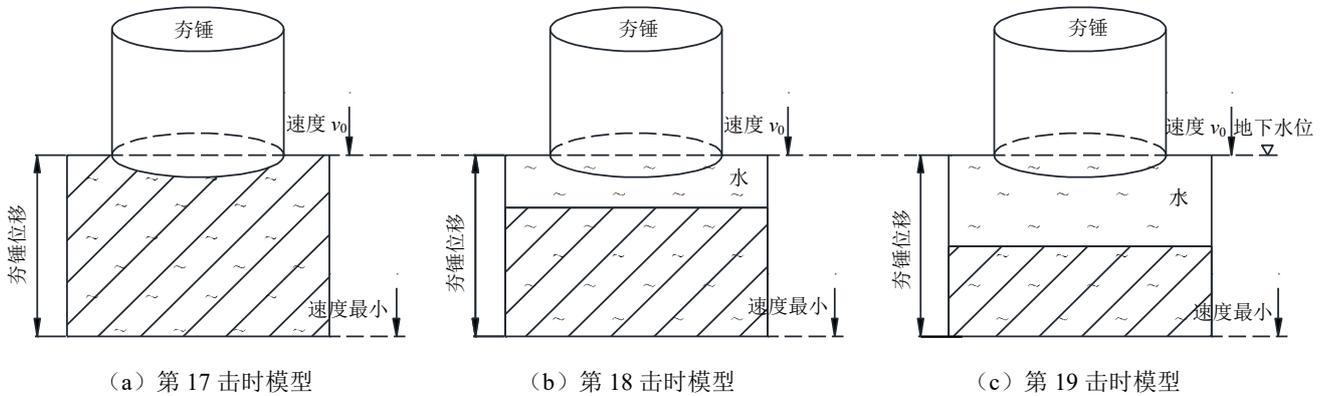


图3 夯击模型

Fig. 3 Dynamic compaction model

2.2 模型计算过程

(1) 根据有水夯击模型(图3(b)和(c),下同),由式(1)分别计算第18、19击时的 $a_{\text{综合}}$,其中:已知 $v_t = 0$, $v_0 = 23.84$ m/s;

$$t_{(18)} = 0.0905 + 0.0365 = 0.1270 \text{ s};$$

$$t_{(19)} = 0.0925 + 0.0325 = 0.1250 \text{ s}.$$

计算结果如下:

$$\text{第18击时, } a_{\text{综合}(18)} = -188 \text{ m/s}^2;$$

$$\text{第19击时, } a_{\text{综合}(19)} = -191 \text{ m/s}^2.$$

(2) 计算有水模型夯锤速度由 v_0 减为最低时其减速时间相对于无水模型(图3(a),下同)有延迟的速度值。

因有水模型有稳定水位,无水模型无稳定水位,通过测试数据可知:第18、19击加速度负峰值持续时长比第11~16击加速度负峰值持续时长0.0700 s分别延迟了0.0570 s、0.0550 s。也就是说有水模型因有水的作用夯锤下移速度比无水模型有延迟,其延迟或增加的时间会引起夯锤的速度(能量)损失。由此可以计算夯锤下移由 v_0 减为最

低时分别延迟了0.0570 s、0.0550 s的速度值,用 $v_{\text{延迟}}$ 表示。利用式(2)可求出 $v_{\text{延迟}}$ 。

$$v_{\text{延迟}} = v_0 + a_{\text{综合}} \cdot t_{\text{延迟}} \quad (2)$$

计算结果如下:

$$\text{第18击时, } v_{\text{延迟}(18)} = 23.84 - 188 \times 0.0570 = 13.12 \text{ m/s};$$

$$\text{第19击时, } v_{\text{延迟}(19)} = 23.84 - 191 \times 0.0550 = 13.34 \text{ m/s}.$$

(3) 计算因水的作用损耗的夯击能 $E_{\text{损失}}$

根据能量守恒定律,无水模型夯锤提升到29.00 m时的夯击能与夯锤自由下落到地基土面或水面时动能相等(忽略空气阻力不计),即夯锤的夯击能为:

$$E_{\text{夯击能}} = mgh = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (3)$$

式中: m 为夯锤质量, 98.94×10^3 kg; g 为重力加速度, 9.8 m/s²; h 为夯锤落距,第17击时, $h_{(17)} = 29.00$ m。

有水模型第18、19击时,因地下水的作用,致使夯锤额外减速,造成功能损失,其动能损失即为夯击能的损失。根据式(3),夯击能损失如式(4):

$$E_{\text{损失}} = E_{\text{夯击能}} - \frac{1}{2} m (v_{\text{延迟}})^2 \quad (4)$$

夯击能损耗率为:

$$\frac{E_{\text{损失}}}{E_{\text{夯击能}}} = [E_{\text{夯击能}} - \frac{1}{2} m (v_{\text{延迟}})^2] / E_{\text{夯击能}} = 1 - (v_{\text{延迟}} / v_0)^2 \quad (5)$$

第 18 击的夯击能损耗率为:

$$\frac{E_{\text{损失}}}{E_{\text{夯击能}}} = 1 - (13.12 / 23.84)^2 = 69.7\%$$

第 19 击的夯击能损耗率为:

$$\frac{E_{\text{损失}}}{E_{\text{夯击能}}} = 1 - (13.34 / 23.84)^2 = 68.7\%$$

3 夯击能损耗的计算分析

3.1 触地后夯锤速度的计算

现场实测夯锤速度时域曲线失真较大, 且受测试仪器信号采样频率限制, 通过对实测夯锤加速度数据进行数值积分, 求解夯锤在触地后的速度时域曲线, 据此获得夯锤在触地之后的初始速度, 再比较夯坑无水与有水不同工况的差异变化, 也可分析夯击能的损耗情况。由加速度通过积分求解速度和位移的积分表达式为:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt \quad (6)$$

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \int_0^t [\int_0^t a(t) dt] dt \quad (7)$$

从式 (6)、式 (7) 可知, 欲求得 $v(t)$ 、 $s(t)$ 需要确定 v_0 、 s_0 两个参数。 $t=0$ 时无位移, 令 $s_0=0$, 而确定 v_0 的方法有多种, 其中对强夯最容易理解的条件是 $v(t_f)=0$ 、 $s(t_f)=$ 单击夯沉量, 这里 t_f 为单击夯击终了时点。由于实测时受采样时长的限制, 用于式 (6)、式 (7) 中的积分上限 t 并不等于 t_f , 造成 $v(t)$ 曲线尾支上翘。同样, 由于受采样频率 (步长) 的制约, 夯锤触地后瞬间的加速度激变不易实测到, 通常测得的曲线只是稍后“锤+土”一起运动的状态描述, 因此, 将由 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 计算得到的落地速度直接设为初始条件可能有超前, 即该计算速度为 $t=0$ 之前的速度, 在 $t=0$ 之后, 用 $v_0 = [m/(m+M)]\sqrt{2gh}$ 更为客观, 式中 M 是地基土的参振质量。地基土参振质量 M 具不确定性, 不属于本次研究范围。换一个视角, 在 $[0, t]$ 区间, 对于 t , 式 (6)、式 (7) 中右侧最后一项是“定值”, 即 $v(t)$ 的曲线形态不变, 因此, 用“ $s(t_f) =$ 单击夯沉量”这一确定性参数作为终了条件反演确定 $v(t)$ 的初始位置具有合理性。由式 (7), 将“ $s_0=0$, $s(t_f) =$ 单击夯沉量”代入, 可求得初速度 v_0 , 记为 $v_{0(\text{积分})}$:

$$v_{0(\text{积分})} = \{s(t_f) - \int_0^{t_f} [\int_0^t a(t) dt] dt\} / t_f \quad (8)$$

综上, 以第 3、13、16、19 击为例, 将加速度开始变化的时间点归 0 作为起始时点 (见图 1 短垂线标示处), 对实测加速度时域曲线进行修正, 取实测单击夯沉量 $\Delta h_{(3-2)} = 0.40 \text{ m}$ 、 $\Delta h_{(13-12)} = 0.07 \text{ m}$ 、 $\Delta h_{(16-15)} = 0.06 \text{ m}$ 、 $\Delta h_{(19-17)} = 0.06 \text{ m}$ (下标数字代表第几击, 第 19 击夯沉量从出现地下水的第 17 击算起, 即水层厚度+第 19 击实测夯沉量), 分别代入式 (8), $s(t_f)$ 转换为下列数值积分形式的夯锤速度计算公式:

$$v_i = v_{0(\text{积分})} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(a_i - a_{i-1}) \Delta t] \quad (9)$$

其中, 取采样间隔 $\Delta t = 0.001 \text{ s}$, 对实测加速度时域曲线进行数值采样, 将采集的数据转化为 TXT 格式并导入 EXCEL 表格, 利用其单元格的计算功能按式 (9) 进行数值计算, 得出夯锤相对速度时域数据并绘制成曲线, 见图 4, 对速度时域数据继续积分计算得出位移时域数据, 第 16、19 击的加速度、速度和位移时域曲线见图 5~6。

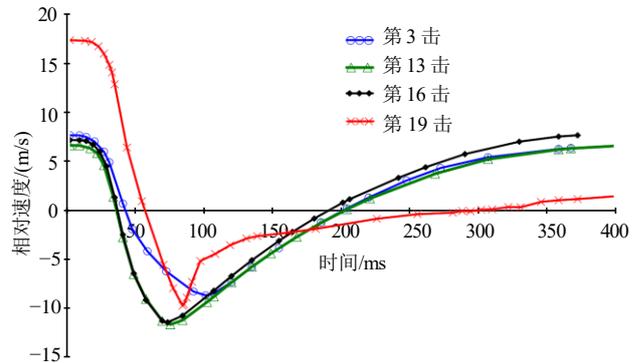


图 4 由加速度积分所得的夯锤相对速度时域曲线

Fig. 4 Time domain curve of relative velocity of the compaction hammer obtained from acceleration integration

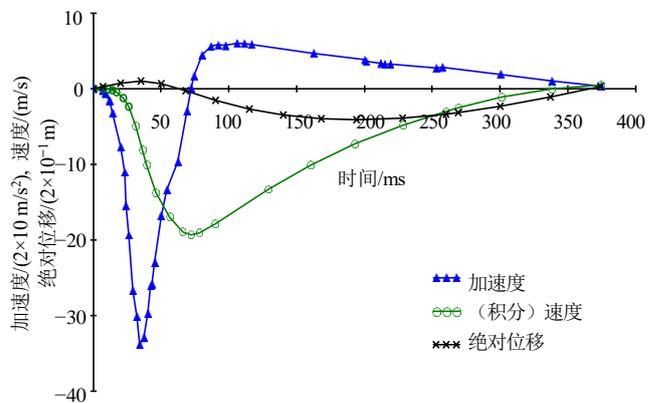


图 5 第 16 击加速度、速度和位移时域曲线

Fig. 5 Time domain curve of acceleration, velocity and displacement at the 16th compaction

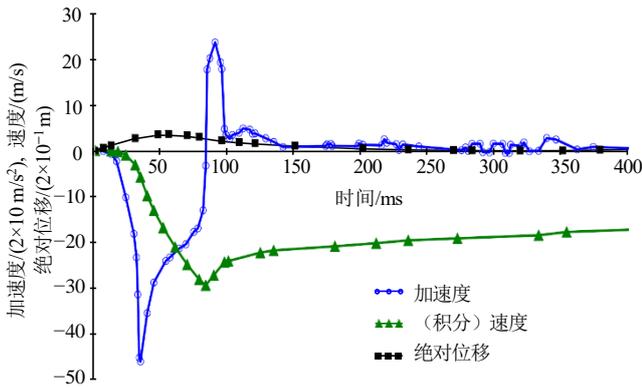


图6 第19击加速度、速度和位移时域曲线

Fig. 6 Time domain curve of acceleration, velocity and displacement at the 19th compaction

由图4可见, 夯锤速度时域曲线中段无水工况(第3、13、16击)速度最低值基本接近, 反映出在同一个夯点上地基土性能无差异, 但夯击进程后段无水工况(第13、16击)要强于有水工况(第19击)。在曲线起始段, 有水工况的第19击形态明显不同于无水工况的形态, 证明地下水的存在起着重要作用。

3.2 数值计算结果分析

考察触地(水)后瞬间 $t \rightarrow 0^+$ 时的夯锤初速度 $v_{0(\text{积分})}$, 取无水工况第13、16击 $v_{0(\text{积分})} = 6.64 \text{ m/s}$ 、 7.20 m/s , 两击平均 $v_{0(\text{积分}, \text{无水})} = 6.92 \text{ m/s}$, 有水工况第19击 $v_{0(\text{积分}, \text{有水})} = 17.79 \text{ m/s}$ 。由前述可知, 该 $v_{0(\text{积分})}$ 是积分计算时以夯锤下落静止后的实测夯沉量 $s(t_f)$ 为终了条件反演回来的夯锤速度初始值, 而非直接取落距计算所得夯锤触地(水)前速度 $v_{0(\text{落距})}$, 该 $v_{0(\text{积分})}$ 计算值已经涵盖了夯锤触地(水)后下移行程的全过程, 仅取值时点在 $t=0$ 之后(图4时间轴0点右侧), 因此在有水工况下, $v_{0(\text{积分}, \text{有水})}$ 值即包含了夯锤下移行程中全程所受地下水影响产生的夯击能损耗。由此可知, 夯锤触地(水)前后其速度存在明显的差异, 即夯击能存在较大的界面损失。

按式(3), 夯锤触地(水)后:

$$\text{无水工况: } E_{(\text{剩余夯击能}, \text{无水})} = \frac{1}{2} m [v_{0(\text{积分}, \text{无水})}]^2$$

$$\text{有水工况: } E_{(\text{剩余夯击能}, \text{有水})} = \frac{1}{2} m [v_{0(\text{积分}, \text{有水})}]^2$$

按式(4), 无水工况下, 夯锤触地的夯能变化:

$$E_{(\text{消耗}, \text{无水})} = E_{(\text{落距夯击能}, \text{无水})} - E_{(\text{剩余夯击能}, \text{无水})} = \frac{1}{2} m \{ [v_{0(\text{落距}, \text{无水})}]^2 - [v_{0(\text{积分}, \text{无水})}]^2 \}$$

可以认为, 该夯击能消耗量被用于加固土体, 有水工况下, 夯锤触地(水)的夯能变化:

$$E_{(\text{消耗}, \text{有水})} = E_{(\text{落距夯击能}, \text{有水})} - E_{(\text{剩余夯击能}, \text{有水})} = \frac{1}{2} m \{ [v_{0(\text{落距}, \text{有水})}]^2 - [v_{0(\text{积分}, \text{有水})}]^2 \}$$

该夯击能消耗被用于加固“土+水”固液体。有水工况的夯击能损耗率:

$$\frac{E_{(\text{消耗}, \text{有水})}}{E_{(\text{消耗}, \text{无水})}} = \frac{[v_{0(\text{落距}, \text{有水})}]^2 - [v_{0(\text{积分}, \text{有水})}]^2}{[v_{0(\text{落距}, \text{无水})}]^2 - [v_{0(\text{积分}, \text{无水})}]^2} \quad (10)$$

取无水工况实测第13击夯坑深度3.45 m、第16击夯坑深度3.64 m, 则 $v_{0(13)} = 23.74 \text{ m/s}$ 、 $v_{0(16)} = 23.82 \text{ m/s}$, 两击平均 $v_{0(13,16)} = 23.78 \text{ m/s}$; 有水工况夯坑深度自第17击见水时起均为3.70 m, 则 $v_{0(19)} = 23.84 \text{ m/s}$, 代入式(10), 得有水工况夯击能损耗率:

$$E_{(\text{消耗}, \text{有水})} / E_{(\text{消耗}, \text{无水})} = (23.84^2 - 17.79^2) / (23.78^2 - 6.92^2) = 48.66\%$$

上述采用实测夯锤加速度时域数据数值积分计算分析方法所得数据, 对比前述根据土的三相组成构建夯击加固模型分析方法所得数据, 两者均得出强夯夯击能量在出现地下水位以后会产生较大损耗的结果, 其损耗率接近或超过50%。

4 结论

(1) 在高水位场地强夯时, 若有地下水的存在, 当夯坑内出现稳定地下水位后, 将使夯锤在触地后产生比无地下水时更大的加速度峰值, 造成夯击能量额外损失。

(2) 当有稳定地下水位时, 因地下水的作用, 强夯有效夯击能减小, 经本文分析计算结果表明, 实测夯击能损耗率接近或超过50%。

(3) 在高水位场地强夯时, 建议采取以下措施: a) 为保证强夯处理效果, 在强夯能级设计时, 应考虑到地下水对强夯效率的影响, 试夯时强夯设计能级宜按规范提高30%以上。b) 采取填高场地的方式, 保证地下水位在预计夯坑深度以下最少0.5 m; 采取降低地下水位措施, 保证地下水位在预计夯坑深度以下最少0.5 m。降水措施包括明沟排水、真空预压、管井(或井点)抽水等。c) 因水的载体作用, 在夯坑深度接近地下水时, 强夯施工的安全距离应增加至30 m以上并采取有效安全防护措施, 防止水石飞溅造成伤害; 出现稳定地下水位时, 为保证

强夯效果, 应停止强夯或采取有效降水措施后再行施工。

经此后诸多工程实践证明, 以上措施对高水位场地强夯加固适用且有效。

参考文献

- [1] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.
DONG Bing-yin, SHUI Wei-hou, QIN Shao-jie. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1-16.
- [2] 山西机械化建设集团公司, 山西建筑工程(集团)总公司. 高水位地基强夯施工方法: 中国, CN201410615137.8[P]. 2017-04-12.
Shanxi Mechanisation Construction Group Co., Ltd., Shanxi Construction Engineering (Group) Corporation. Dynamic compaction construction method for high water level foundation: China, CN201410615137.8[P]. 2017-04-12.
- [3] 吴民晖, 刘海旺. 强夯法处理吹填海砂地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(4): 322-328.
WU Min-hui, LIU Hai-wang. Field test on the treatment of hydraulic reclamation sand foundation by dynamic compaction[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(4): 322-328.
- [4] 张强, 卓拥. 垫层强夯法加固高水位粉土地基现场试验研究[J]. 民航学报, 2022, 6(6): 44-49.
ZHANG Qiang, ZHUO Yong. Field test study on strengthening high water level silt foundation with cushion dynamic compaction method[J]. Journal of Civil Aviation, 2022, 6(6): 44-49.
- [5] 周雷靖, 周匡营. 高水位、厚填土、松软地基强夯试验分析[J]. 电力勘测设计, 2003(3): 24-26.
ZHOU Lei-jing, ZHOU Kuang-ying. Dynamic compaction tryout analyzing for thick and loose fill with high water level[J]. Electric Power Survey, 2003(3): 24-26.
- [6] 姚宝宽, 刘聪, 李全军, 等. 真空井点降水、挤密砂桩联合浅层强夯在软基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(2): 118-125.
YAO Bao-kuan, LIU Cong, LI Quan-jun, et al. Application of vacuum well point dewatering and sand compaction pile combined with dynamic compaction method in soft foundation treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(2): 118-125.
- [7] 陈建业. 吹填砂软土地基的真空降水强夯加固方法[J]. 山西建筑, 2003, 29(7): 66-67.
CHEN Jian-ye. Reinforcement of soft soil foundation with hydraulic fill sand based on the method combined with dynamic consolidation and vacuum drainage[J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(7): 66-67.
- [8] 高有斌, 刘汉龙, 王博, 等. 高真空击密法加固滨海吹填土地基试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(8): 64-68.
GAO You-bin, LIU Han-long, WANG Bo, et al. Experimental research on high vacuum densification method to reinforce saturated dredger fill foundation[J]. Industrial Construction, 2011, 41(8): 64-68.
- [9] 姚凯. 黄河冲淤积平原区强夯加固地基技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
YAO Kai. Study on dynamic compaction to reinforce foundation in the Yellow River Alluvial Plain[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [10] 孙威, 刘金波, 张寒, 等. 西南某炼油厂强夯法处理填土地基事故分析[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 23-28.
SUN Wei, LIU Jin-bo, ZHANG Han, et al. Analysis on an accident of filled ground reinforced by dynamic compaction of an oil refinery in southwest China[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(2): 23-28.
- [11] 陈凯, 胡坪, 齐晓. 高水位高含水率地基强夯置换与强夯加固分析[J]. 中国住宅设施, 2021(3): 36-37.
CHEN Kai, HU Ping, QI Xiao. Analysis of dynamic compaction replacement and dynamic compaction reinforcement for high water level and high water content foundation[J]. China Housing Facilities, 2021(3): 36-37.
- [12] 常玉军, 孔锁财, 张吉庆. 强夯置换在高水位淤泥地层地基处理中的应用[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(4): 62-64.
CHANG Yu-jun, KONG Suo-cai, ZHANG Ji-qing. Application of dynamic compaction replacement in silt stratum foundation treatment with high water level[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2017, 37(4): 62-64.
- [13] 韩云山, 董彦莉, 白晓红. 夯锤冲击黄土行程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 631-638.
HAN Yun-shan, DONG Yan-li, BAI Xiao-hong. Model test on process of hammer under dynamic compaction of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 631-638.