

文章编号: 1000-7598-(2003)06-0983-04

强夯加固软土上覆填海砂层的试验研究

邹维列¹, 吴国高², 安骏勇³, 肖海斌⁴

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 南昌有色冶金设计院, 江西 南昌 330000;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4. 武汉市水利局, 湖北 武汉 430012)

摘 要: 强夯加固期间对上覆填海砂层的软土进行了孔压的监测, 分析了强夯时软土中孔压的长消规律和随水平距离的变化及影响范围; 通过对强夯后静力触探试验成果的分析, 研究了软土上覆砂层强夯加固的机理, 并对强夯的有效影响深度和单点击数问题提出了看法。

关 键 词: 软土; 填砂层; 强夯; 试验

中图分类号: TU 441.6 **文献标识码:** A

Experimental study on improving filled sand above soft soil with DC

ZOU Wei-lie¹, WU Guo-gao², AN Jun-yong³, XIAO Hai-bin⁴

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Nanchang Designing Institute of Nonferrous Metal, Nanchang 330000, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
4. Wuhan Water Conservancy Bureau, Wuhan 430014, China)

Abstract: By monitoring the pore-water pressure in mucky soft soil during dynamic compaction (DC), the laws of the increment and the dissipation of pore water pressure and the variation of pore water pressure with number of passes and lateral distance are studied. In terms of the results of SCPT after DC, the mechanism of improving filled sand above soft soil with DC is analyzed. In addition, effective depth of influence and number of drops per impact point are discussed.

Key words: soft soil; filled sand; dynamic compaction (DC); experiment

1 前 言

强夯法在开始应用阶段, 主要用于加固砂土和碎石土地基, 后来逐渐扩大到低饱和度的粉土、粘性土、湿陷性黄土、杂填土等地基的处理。对于饱和和粘性土的强夯加固也有成功的例子。至于软粘土的强夯加固, 国内外学者结合实际工程进行了一些研究^[1~5], 其中文献 [1, 2] 对软土的强夯加固工艺都总结了较为相近的指导性原则, 即“先轻后重, 逐级加能, 少击多遍”等等。

某填海工程, 需要处理的软土面积达 $33.3 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均海平面高程 -0.34 m 。海底面遍布淤泥质土, 其厚度为 $2 \sim 7 \text{ m}$ 不等, 自上而下基本上分为淤泥质土和残积粘性土层。为保证后续填土 (土质要求粘性土或粉质粘土) 能够按干法施工, 需要在淤泥层上抛填海砂, 其最大填砂厚度达到了 10 m

左右。设计方案采取填砂——插塑料排水板后强夯。但对于软土上覆深厚砂层的强夯加固, 如何合理选择强夯工艺和强夯参数, 使填砂得到密实, 并使软土强度有所提高, 必须进行强夯试验。

2 强夯试验

根据夯前的静力触探资料, 选取砂层厚 10 m 和 8 m 的两个区域作为典型试验区 (分别称为 I 区和 II 区), 试验区面积均为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 。采用圆形夯锤, 直径 D 为 2.5 m 。每个试夯区夯击 4 遍, 其中第 1 遍和第 2 遍为“隔行跳夯”, 夯点按正方形布置, 夯点间距 5 m 。第 1 遍夯点数为 25, 第 2 遍为 16; 第 3 遍为间夯, 夯点数为 40; 第 4 遍为低能满夯 (采用 9 t 方锤, 落距 3 m)。对于单击夯击能按 Menard 修正公式^[6]进行初选:

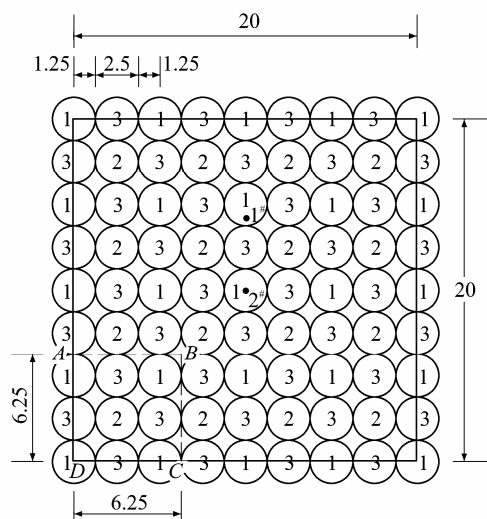
$$D = \alpha \sqrt{WH}$$

式中 α 为修正系数, 暂取 0.6; W 为锤重 (t); H 为落距 (m)。同时, 作每遍 3 击和 4 击的比较试验。两夯区强夯参数见表 1。另在两夯区不同夯点下软土层内沿不同深度埋设不同量程的孔压探头。其中 I 试验区夯点布置见图 1; I, II 试验区孔压测点布置见图 2。

表 1 两试验区的主要强夯参数

Table 1 DC details of test zones I and II

夯区 编号	不同 击数 区域	强 夯 参 数				
		锤重 /kN	夯击 遍数	落距 /m	单击夯击能 /kN·m	单位面积夯击能 /kN·m·m ⁻²
I	4 击区	175	4	12	2 100	1 712
	3 击区	175	4	12	2 100	1 283
II	4 击区	175	4	15.5	2 712.5	2 212
	3 击区	175	4	15.5	2 712.5	1 657



① 第 1 遍夯点 ② 第 2 遍夯点 ③ 第 3 遍夯点
第 4 遍用 9t 方锤按落距 3m 满夯, ABCD 为 3 击区, 其余为 4 击区。

图 1 I 试验区夯点及孔压测点平面布置图 (单位: m)

Fig.1 Plane layout of impact points and pore-water pressure gauges (unit: m)

3 孔压监测成果分析

3.1 孔隙水压力的增长和消散

(1) 从各测点孔压-时间关系曲线可知, 夯击时, 各点孔压上升, 但停夯后, 孔压消散较快, 表明淤泥层中打插塑料排水板和上覆填砂有很好的排水效果。所以本工程基本上采取连续夯击施工。

(2) 整个夯击过程中, 夯击能在淤泥层中引起的孔隙水压力增量都不大 (见表 2), 最大不超过 26 kPa。这一方面说明插塑板可以减小孔压的增长; 另一方面是因为填砂较厚, 传至淤泥层的能量不大。从实验区各测点孔压来看, $u_2 > u_1$, 符合能量传递的

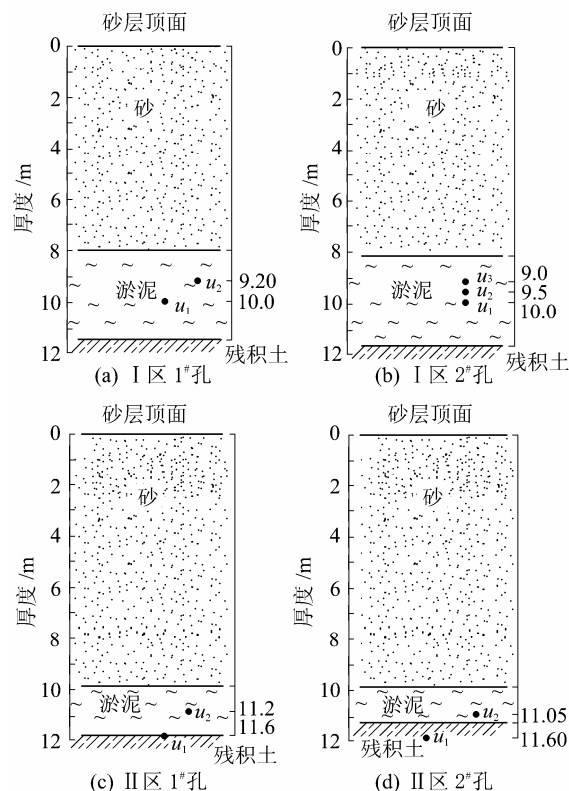


图 2 孔压计布置深度

Fig.2 Depths of pore-water pressure gauges in muck

规律, 且孔压测头离填砂与淤泥界面越近, 孔压的消散也越快。但 I 试验区 1# 孔出现 $u_1 > u_2$ 的反常现象。这可能是埋设的各探头与排水板的距离不一样所致, 也有可能是探头受损所致。

3.2 孔隙水压力增量与遍数的关系

从表 2 中强夯第 1 遍和第 3 遍的孔压增量变化可以看出, 随着遍数增加, 孔压增量明显减小。将第 3 遍与第 1 遍的孔压增量峰值 $\Delta u_{\max}$ 相比较, 第 3 遍比第 1 遍小得多。其原因在于第 1 遍夯击破坏了淤泥土层结构, 使其孔压上升较大, 而第 3 遍夯击时, 由于填砂变密, 强度提高, 产生“隔离效应”, 因而, 第 3 遍强夯对淤泥结构的破坏小, 孔隙水压力上升较小。

因此, 合理的夯击遍数可以根据孔压增量的变化加以考虑。结合静力触探试验成果与砂层加固的设计要求, 确定夯击遍数为 4 遍, 每遍 4 击。

3.3 孔压随水平距离的变化

图 3 反映了 I 试验区 1# 测孔超孔隙水压力增量 Δu 与水平距离 L 之间的关系。从图中可以看出, 随着离夯点水平距离的增大, 淤泥层中的孔隙水压力增量明显减小。当水平距离超过 10 m 时, 孔隙水压力增量 Δu 已小于 1 kPa。这与冲击能量衰减的规律是符合的。由试区各测点处的砂层厚度可知,

表 2 测点孔压增量峰值
Table 2 Maximum value of pore-water pressure increment per test point

孔压增量最大值	遍 次	I 区				II 区			
		1 [#] 孔		2 [#] 孔		1 [#] 孔		2 [#] 孔	
		u_1	u_2	u_1	u_2	u_1	u_2	u_1	u_2
$\Delta u_{\max}/\text{kPa}$	第 1 遍	25.4	23.6	10.9	15.3	9.03	9.47	18.4	20.6
	第 2 遍							4.80	7.06
	第 3 遍	15.3	11.6	7.81	6.72	4.12	5.27	6.37	7.64

强夯时砂层的扩散角为 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。由图 3 还可以看出，第 3 遍强夯的孔压增量较第 1 遍小，且其随水平距离的变化也较第 1 遍缓慢。

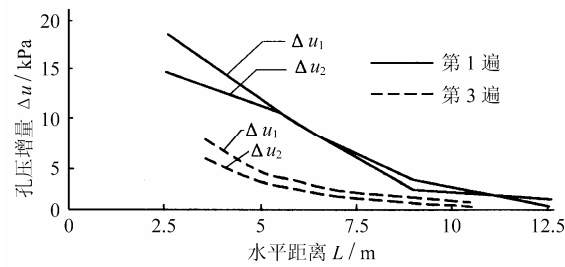


图 3 水平距离与孔压增量关系曲线
Fig.3 Variation of pore-water pressure increment with lateral distance

4 静力触探试验成果分析

根据夯前夯后对 I，II 试验区各测点的静力触探试验结果绘出的 $z-p_s$ 曲线有如下规律：

(1) 满夯后 $z-p_s$ 曲线可以概化为图 4 的 4 个区。I 区：在表层 $0 \sim 1\text{ m}$ 深度内为顶部松动区；II 区： $1 \sim 5\text{ m}$ 深度为强增长区；III 区： $5 \sim 8\text{ m}$ 深度为弱增长区；IV 区： $8 \sim 10\text{ m}$ 深度即淤泥面上 2.0 m 内的底部过渡区。

图 5 反映了 I 试验区 2[#]测孔在夯前、夯第一遍后及夯第四遍（满夯）后的 $z-p_s$ 曲线。在 $1 \sim 5\text{ m}$ 的强增长区范围内 $z-p_s$ 值得到很大提高，其平均值在 $12 \sim 13\text{ MPa}$ 左右，比夯前增大了 2.5 倍。

在淤泥顶面之上 2 m 范围内，出现过渡区的原因主要是：① 由于填砂层很厚（ $8 \sim 10\text{ m}$ ），使能量传至砂与淤泥界面处时，大为减小；② 在淤泥层上，一定厚度的砂体被挤入淤泥中形成淤泥混砂过渡层，此过渡层的 p_s 值必然比砂层要小；③ 受下卧淤泥的影响，在界面处一定半径范围内的砂体会随静力触探探头一起向淤泥中下沉，所测得的 p_s 值也会变小。

(2) 从与试验区相距 7.1 m 的两个测点的 $z-p_s$ 曲线来看（文中未给出），其 p_s 值几乎没有增长，甚至有削弱的趋势。这说明强夯的侧向与底部竖向

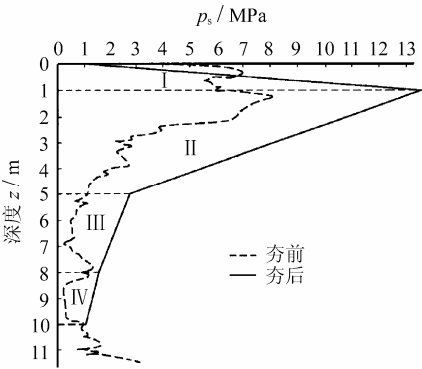


图 4 p_s 曲线概化图
Fig.4 Generalized plot of curves p_s

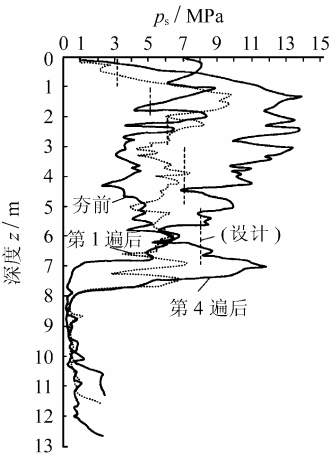


图 5 静力触探曲线
Fig.5 Curves of SCPT before and after tamping

的加固效果相比是很小的。它不象爆炸产生的应力波，对周围介质产生均匀应力。因此，在满夯时应使锤印搭接或相切，使夯点间的砂层得到均匀密实。

(3) 由于填砂厚达 $8 \sim 10\text{ m}$ ，所以强夯第 1 遍和第 2 遍采取“隔行跳夯”（参见图 1），夯点间距较大，有效地防止了在浅层形成“硬壳层”而产生隔离作用，夯能得以向深层传递，先使下卧软土层和深层填砂得到加固，达到预期效果。然后，再夯余下遍数加固浅层。

(4) 从本工程试夯结果来看，对于淤泥层上厚度在 $8 \sim 10\text{ m}$ 之间的抛填砂的强夯，Menard 修正公式中的修正系数 $\alpha = 0.43 \sim 0.55$ 。

5 强夯对下卧淤泥层强度的改善

强夯产生的冲击应力波传至砂与淤泥界面处时,一部分应力波反射回砂层,一部分入射到淤泥中。入射应力波使淤泥中孔压升高,孔隙水从排水板中排出,淤泥逐渐得到一定程度的固结。同时,强夯施工期间由于上覆深厚填砂的预压排水作用,使淤泥层强度也得到提高;另一方面,在动力作用下,软土层上部剪切波的应力超过了淤泥质软土的抗剪强度,出现剪切破坏的薄弱区域,使上覆砂层被挤入淤泥中,改善了软土的土质结构,起到压密效果。图 6 反映了 I 试验区 2[#]测孔(填砂厚 8 m,淤泥厚 2.0 m,参见图 2)夯前、夯后淤泥层 p_s 值的变化。

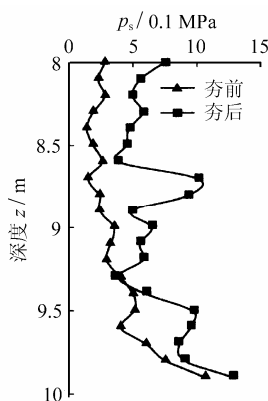


图 6 强夯前后淤泥层 p_s 值的变化

Fig.6 Increment of p_s in muck before and after tamping

6 有效影响深度与单点击数

强夯有效影响深度涉及到夯能、夯点间距、夯击顺序、单点击数、夯击遍数、各遍间隔时间、加固土类及其最初状态和地下水位等因素,十分复杂。因此,国内外学者各自所给出的有效影响深度判别标准都不一致。强夯法的有效影响深度一般在 5~8 m 左右,视土质情况而定。对于软土上覆 8~10 m 填砂的强夯加固,强夯能量传至其下淤泥层中已经很小,因而,不会对淤泥层造成过大的结构破坏。本工程与直接强夯加固粘性土、软土及硬卧层上覆砂层的强夯都有所不同。如何确定单点击数与有效影响深度,有其自身特点。如果按孔压增量 Δu 等于上覆土重时的击数来确定单点击数、按孔压增量 Δu 等于上覆土重所对应的深度来确定有效影响深度是不恰当的。以 II 试验区为例:已知砂的重度 $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$,砂层厚 $h = 10 \text{ m}$,则上覆砂层的自重应力 $\sigma_z = rh = 173 \text{ kPa}$ 。而淤泥层中的孔压计测出单点 4 击时的孔压增量 Δu 最大值仅为 20.6 kPa 左右,

远小于 173 kPa,但 4 击后,其静力触探结果满足了设计要求(参见图 5)。从试夯和大面积强夯资料来看,以埋设在淤泥面下 1.0 m 深度处的孔隙水压力仪测出的孔压峰值 $\Delta u \leq 26 \text{ kPa}$,最后一击夯沉量为 7~10 cm 和单点击数不少于 4 击为控制标准取得了较好效果。

7 结 论

(1) 采用强夯法加固软土上覆填海砂层效果十分明显,不仅使深厚砂层得到密实,达到了设计要求,同时使下卧淤泥层一定深度内产生动力固结,强度得到一定提高。

(2) 为了防止形成“硬壳层”,第 1、2 遍采用较大夯点间距,“隔行跳夯”,夯能得以向深层传递,先使深层得到加固,后续夯击使浅层得到加固。

(3) 淤泥层中插设塑料排水板,既减小了孔压的增长,也使其消散较快。因此,在淤泥层中设置排水通道对软土强夯加固效果是十分必要的。

(4) 根据实施大面积强夯后的检测结果分析,当砂层厚度在 6 m 左右时,Menard 公式的修正系数 $\alpha = 0.38 \sim 0.40$;当加固 8~10 m 厚砂层时, $\alpha = 0.43 \sim 0.55$ 。当砂层厚度较小时,锤底直径宜大些;当砂层厚度较大时,锤底直径宜小些。对于加固厚度小于 10 m 的砂层,锤径在 2.1~2.5 m 之间是合适的。这些经验参数对类似工程具有参考作用。

(5) 对于软土上覆砂层的强夯,其有效加固深度和夯点击数问题有其自身特点,作者对此进行了分析。

参 考 文 献

- [1] 邱建金. 动力排水固结机理[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1996.
- [2] 郑颖人, 陆新, 李学志等. 强夯加固软粘土地基的理论研究与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
- [3] Lo K W, Ooi P L, Lee S L. Unified approach to ground improvement by heavy tamping[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering*, 1990, 116(3): 514-527.
- [4] 李福民. 排水固结处理后地基强夯加固的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 499-502.
- [5] 吴国高. 软土上砂层强夯加固试验研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997.
- [6] Lukas R G. Dynamic compaction for highway construction. Vol.1, Design and Construction guidelines[M]. Washington, D.C: U. S. Federal Highway Administration U. S. Department of Transportation, 1986.