

文章编号: 1000-7598-(2004)05-818-06

# 以吹填砂为覆盖层的饱和软粘土地基强夯试验研究

胡修文<sup>1</sup>, 张 唯<sup>2</sup>, 王 坚<sup>3</sup>

(1.中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2.长江航务工程质量监督中心站, 湖北 武汉 430070;  
3.南京龙潭集装箱有限公司, 江苏 南京 210058)

**摘 要:** 针对某港区工程陆域不同区域的地质条件和工程荷载, 进行了不同工艺的强夯试验, 对夯坑周围地表变形、土体水平位移以及孔压的增长和消散进行了观测, 并对强夯加固效果进行了试验研究。研究表明, 采用强夯法加固以吹填砂为覆盖层的饱和软土地基是可行的, 有效加固深度可达到 6~7 m, 吹填砂层厚度对有效夯击率和碎石土垫层的作用有显著影响。由于吹填砂层和淤泥质粘土层中的粉细砂薄层有利于孔隙水压力的消散, 用强夯法处理该类地基时, 如果设计加固深度较小时, 可以不设置竖向排水体。通过对试验数据的分析研究, 获得强夯法加固该类地基土的最佳强夯参数和施工工艺, 并且认为选择强夯施工工艺应考虑吹填砂层厚度。

**关 键 词:** 吹填砂; 淤泥质粘土; 强夯; 试验  
**中图分类号:** TU 447 **文献标识码:** A

## Experimental study on dynamic compaction to improve saturated soft clay covered with hydraulic fill sand

HU Xiu-wen<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>3</sup>

(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;  
2. Changjiang River Administration of Navigational Affairs, Ministry of Communications, Wuhan 430070, China;  
3. Longtan Container Co. Ltd, Nanjing 210058, China)

**Abstract:** According to geological conditions and engineering loads of different zones of a harbor project, a series of dynamic compaction tests with different techniques were performed. Ground deformation around ramming points, horizontal displacement in soil mass and pore water pressures were monitored; and compaction effectiveness was test. Research results show that it is feasible to treat the saturated soft soil covered with hydraulic fill sand by dynamic consolidation method, of which effective improvement depth is six to seven meters; and the depth of hydraulic fill sand influences remarkably on effective ramming power and function of gravel-soil cushion. Vertical drainage measure may not be taken because of presence of hydraulic fill sand layer and silty sand layer if improved depth to need is shallow. By analyzing the measuring data, the optimal parameters and construction techniques are obtained; and the depth of hydraulic fill sand shall be taken into account when construction techniques is chosen.

**Key words:** hydraulic fill sand; saturated soft clay; dynamic compaction; experiment

## 1 引 言

强夯法适用于大面积场地作业, 具有设备简单、施工方便、节约材料、施工费用低等优点<sup>[1]</sup>, 但对于饱和软土, 一般教科书或工程规范、手册<sup>[1,2]</sup>中都明确规定应慎用。而工程实践和有关研究<sup>[3]</sup>表明, 强夯法加固饱和软粘土地基只要方法适合, 也可以达到预期的加固效果。但加固效果如何, 采用何种强夯参数和施工工艺, 尚需进一步研究。

## 2 工程地质条件

南京某港区集装箱堆场工程, 天然地基承载力为 70~100 kPa, 地基设计承载力在 180 kPa 以上。为满足设计高程要求, 回填了 1.5~3.3 m 的吹填砂。该工程集装箱堆场分为重箱堆场 (A 区) 和冷藏箱堆场 (B 区), 场地天然地基的物理力学性质指标见表 1。淤泥质粉质粘土层下部夹较多粉细砂薄层, 局部呈千层饼状。粉质粘土层分布较均匀, 厚

度为 1.5~3.0 m，粉细砂层大于 25 m。而各区吹填细砂和淤泥质粉质粘土层各不相同，A 区和 B 区吹填细砂厚分别为 2.7~3.3 m 和 1.8~2.2 m，淤泥质粉质粘土厚分别为 3.0~3.5 m 和 10.5~11.0 m。筛分试验表明，吹填砂中粒径大于 0.1 mm 的砂粒含量占 99%，颗粒较均匀，级配不良，易产生液化。

表 1 天然地基土物理力学性质指标  
Table 1 Indexes of physico-mechanical property of natural soils

层号	土层名称	含水率 /%	重度 /kN·m <sup>-3</sup>	孔隙比	塑性指数	压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	压缩指数	压缩模量 /MPa	静力触探 /MPa
1	粉质粘土	31.5	19.0	0.877	16.0	0.41	0.273	4.3	1.07
2	淤泥质粉质粘土	39.2	18.2	1.084	14.2	0.58	0.306	3.4	0.68
3	粉细砂	28.9	18.7	0.85	—	0.26	—	8.2	6.80

### 3 强夯试验方案

在 A 区设 2 个试验块，面积分别为 48 m×48 m (A<sub>1</sub>)和 30 m×30 m (A<sub>2</sub>)。A<sub>1</sub> 试验块回填 0.5 m 厚的碎石土，分别采用 1 600 kN·m 和 2 000 kN·m 的单击能进行点夯试验，A<sub>2</sub> 试验块以吹填砂作为起夯面，单击能为 1 800 kN·m。2 个试验块均采用二遍点夯，一遍满夯，满夯能量为 1 500 kN·m。B 区设 3 个试验块，面积均为 48 m×48 m，B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 试验块以 0.5 m 厚的碎石土为起夯面，B<sub>3</sub> 试验块以吹填砂为起夯面，B<sub>1</sub> 和 B<sub>3</sub> 试验块四遍点夯，一遍满夯，第一、二遍点夯采用 1 500 kN·m 的单击能，第三、四遍点夯采用 2 500 kN·m 的单击能，B<sub>2</sub> 试验块二遍点夯，一遍满夯，第一、二遍夯分别采用 2 500，1 500 kN·m 的单击能，满夯能量均采用 1 000 kN·m。B 区各试验块设 2 个试夯点，第 1 个试夯点确定第 1 个单击能的最佳夯击数，第 2 个试夯点确定第 2 个单击能的最佳夯击数。试验块夯点呈正方形布置，每遍点夯间距为 6 m×6 m，夯坑间距为 3 m×3 m。

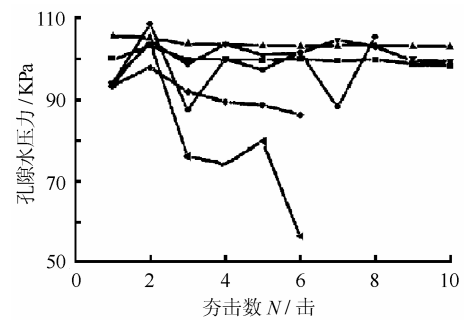
采用静载荷试验、静力触探试验和室内土工试验检验强夯加固效果，并且均在满夯结束后 15 d 进行，以便夯后地基土强度得到一定程度的恢复。为便于埋设监测仪器和不影响试验块的强夯施工，试验点选择在试验块第一遍夯的对角点上。为了保证夯击过程中吹填砂中的地下水顺利排出，在试验区开挖了深为 2~3 m 的排水沟。

### 4 强夯试验成果分析

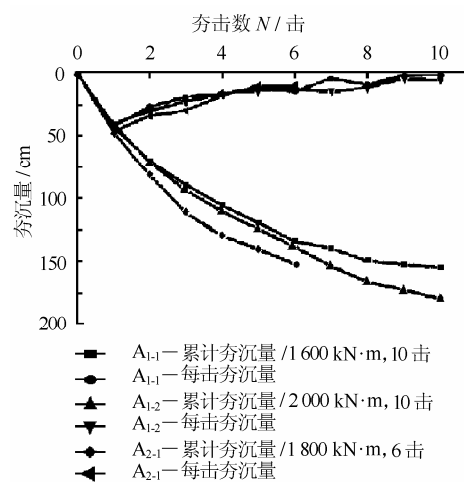
#### 4.1 不同强夯工艺对夯击能的影响

A 区有效夯击率曲线图和夯沉量曲线图(图 1)

表明：以吹填砂为起夯面的 A<sub>2-1</sub>，总有效夯击率为 90% 左右，从第 3 击起地面开始隆起，每击有效夯击率随夯击数急剧降低，第 6 击有效夯击率降为 56%，而以碎石土为起夯面的 A<sub>1-1</sub> 和 A<sub>1-2</sub>，总有效夯击率都为 100% 左右；单击能为 1 800 kN·m 的 A<sub>2-1</sub>，在第 5 击总夯击能已趋于饱和，总夯沉量为 1.53 m，而单击能为 2 000 kN·m 的 A<sub>1-2</sub>，第 9 击时总夯击能才趋于饱和，总夯沉量达 1.81 m。以碎石土作为起夯面的 A<sub>1</sub> 试验块，单击能为 2 000 kN·m 的 A<sub>1-2</sub> 其总有效夯击率高于单击能为 1 600 kN·m 的 A<sub>1-1</sub>，并且，A<sub>1-1</sub> 从第 7 击起地面出现隆起，有效夯击率开始下降，而 A<sub>1-2</sub> 在 10 击内无隆起现象，每击有效夯击率均为 100% 左右；A<sub>1-1</sub> 第 7 击时，每击夯沉量急剧减小，总夯击能趋于饱和，总夯沉量为 1.50 m，而 A<sub>1-2</sub> 第 9 击时，每击夯沉量才减小明显，总夯击能趋于饱和，总夯沉量达 1.81 m。



(a) 夯击数与有效夯击率的关系



(b) 夯击数与夯沉量的关系

图 1 A 区夯击曲线

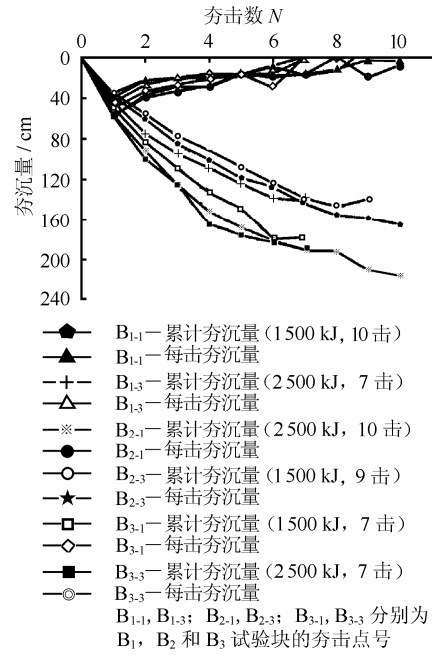
Fig.1 Tamping curves in zone A

显然，就A区来说，直接以吹填砂为起夯面，有效夯击率低，夯沉量小，夯击能量利用率低；而以碎石土作为起夯面，有效夯击率高，夯沉量大，能量利用率高，并且，单击夯击能越大，有效夯击率越高，夯沉量越大。2 000 kN·m 为最佳单点夯击能，最佳夯击数为 8 击。

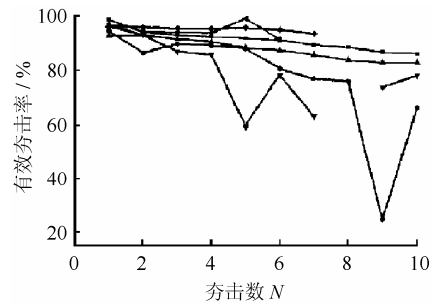
B 区夯沉量曲线图 2 (a) 显示：B<sub>1</sub> 试验块 “先轻后重”，第一遍试夯 B<sub>1-1</sub> 单击能为 1 500 kN·m，第 7 击时，每击夯沉量急剧增加，第 6 击时总夯击能已饱和，第三遍试夯 B<sub>1-3</sub> 采用 2 500 kN·m 的单击能，第 7 击时，每击夯沉量急剧减小，总夯击能趋于饱和；B<sub>2</sub> 试验块 “先重后轻”，第一遍试夯 B<sub>2-1</sub> 单击能为 2 500 kN·m，第 5 击时，每击夯沉量明显减小，总夯击能趋于饱和，第二遍试夯 B<sub>2-3</sub> 采用 1 500 kN·m 的单击能，第 9 击时，地表发生隆起，8 击为最佳夯击数；B<sub>3</sub> 试验块采用 “先轻后重”，第一遍试夯 B<sub>3-1</sub> 单击能 1 500 kN·m，第 6 击时，每击夯沉量急剧增大，夯坑周围地面隆起严重，5 击为最佳夯击数，第三遍试夯 B<sub>3-3</sub> 采用 2 500 kN·m 的单击能，第 7 击时，每击夯沉量几乎为 0，总夯击能趋于饱和。可见，B 区在不同强夯工艺的最佳夯击能作用下，起夯面为碎石土的 “先轻后重” 二遍夯和 “先重后轻” 二遍夯总夯沉量分别为 2.77 和 3.35，而起夯面为吹填砂的 “先轻后重” 二遍夯总夯沉量为 3.58 m，并且在相同夯击能作用下 B<sub>3</sub> 的总夯沉量大于 B<sub>1</sub>。

B 区有效夯击率曲线图 2(b) 表明：B<sub>3-1</sub> 的每击有效夯击率和总有效夯击率均大于 B<sub>1-1</sub> 和 B<sub>2-1</sub>，且 B<sub>3-1</sub> 的每击有效夯击率稳定，均大于 90%，而 B<sub>1-1</sub> 和 B<sub>2-1</sub> 的每击有效夯击率随夯击次数的增加衰减较快，B<sub>1-1</sub> 的每击有效夯击率在第 6 击时降为 80.3%，第 9 击时降为 24.5%，B<sub>2-1</sub> 的每击有效夯击率第 5 击时降为 59.7%；有碎石土的 B<sub>1-1</sub> 和 B<sub>2-1</sub>，夯击能量大的 B<sub>2-1</sub> 其总有效夯击率小于夯击能量小的 B<sub>1-1</sub>。由夯击数与地面隆起量关系曲线图 2(c) 可见，随着夯击次数的增加，总隆起量增大，以吹填砂为起夯面的 B<sub>3-1</sub> 其隆起量比以碎石土为起夯面的 B<sub>1-1</sub> 小；以碎石土为起夯面时，单点夯击能越大，其隆起量也越大。

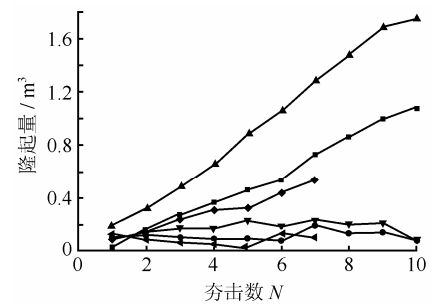
显然，对于 B 区来说，以碎石土为起夯面时，“先重后轻” 的施工工艺优于 “先轻后重” 的施工工艺；直接以吹填砂作为起夯面，其有效夯击率高，隆起量小，夯沉量大，优于以碎石土为起夯面的工艺。因此，B 区应直接以吹填砂作为起夯面。A 区和 B 区在夯击能作用下产生完全相反的效果，即 A 区以碎石土为起夯面时能量利用率高，而 B 区以吹填砂作为起夯面时能量利用率高，原因是 A 区吹填砂较厚，淤泥质粘土层薄，而 B 区吹填砂较薄，淤泥质粘土层厚。



(a) 夯沉量与夯击次数的关系



(b) 夯击数与有效夯击率的关系



(c) 夯击数与地面隆起量的关系

图 2 B 区夯击曲线

Fig.2 Tamping curves in zone B

### 4.2 地基土水平位移

A 区和 B 区的土体水平位移测试数据表明，在不同夯击能作用下，土体发生显著水平位移的深度范围均在地表下 0~8 m 之间，并随深度增加而减小；该区域土体的位移值随夯击数而增加，而 8 m 以下土体的水平位移小，并且不受夯击数的影响。

### 4.3 地基土孔隙水压力变化与消散规律

本工程两遍夯的间隔时间取决于粉质粘土层和淤泥质粘土层中超孔隙水压力的消散时间，因此，将孔隙水压力计埋设在粉质粘土层和淤泥质粘土层中。

图 3 为单点夯击数与孔隙水压力的变化曲线，图中， $s$ 、 $h$  分别为孔隙水压力探头埋设点距夯击中心点的水平距离和地表埋深。图中表明，孔隙水压力变化最大的区域发生在淤泥质粘土层中，A 区为 3~7 m 深处，B 区为 3~9 m 深处，并且孔隙水压力的最大值在 5 m 处的淤泥质粘土层中，分别接近 40 和 50 kPa；在同一深度，离夯击点越远，超孔隙水压力越小；在最佳夯击次数内，孔隙水压力一般随夯击数的增加而增大；在淤泥质粘土层中，超孔隙水压力随着深度的增加而减小；同一遍夯坑间距为 6 m 时，对临近夯击点孔隙水压力的影响较小。

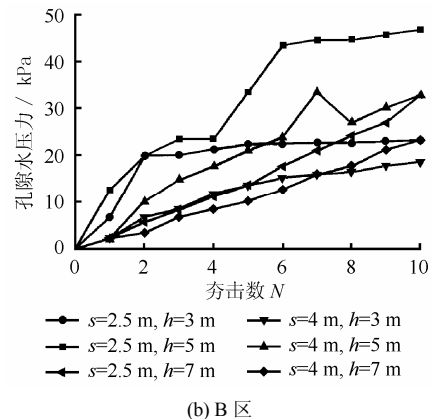
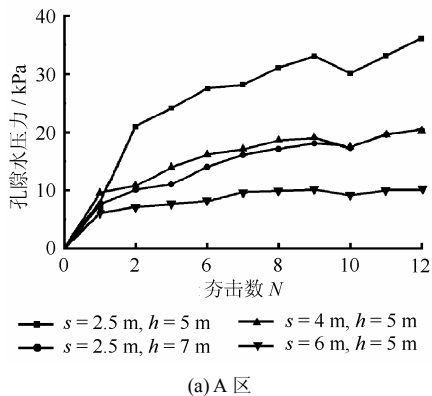


图 3 夯击数与孔压变化的典型关系曲线  
Fig.3 Typical curves of relationship between pore water pressure and Tamping counts

从孔隙水压力消散曲线图 4 可见：离夯坑近的区域，由于形成的裂隙增加了排水通道，孔压消散很快；A 区孔压 12 h 内消散了 80%~94%，2~3 d 内消散完毕，而 B 区 24 h 内消散了 67.7%~85%，5~8 d 内消散完。孔压消散较快，一方面是由于吹填砂透水性好，为淤泥质层中地下水的排出提供了良好的水平通道，另一方面是淤泥质粘土层中的粉细砂薄层也有利于地下水的排出。A 区较 B 区消散快是由于 A 区淤泥质粘土层内强夯影响深度小，B 区淤泥质粘土层内影响深度大，而淤泥质粘土层渗透性差。

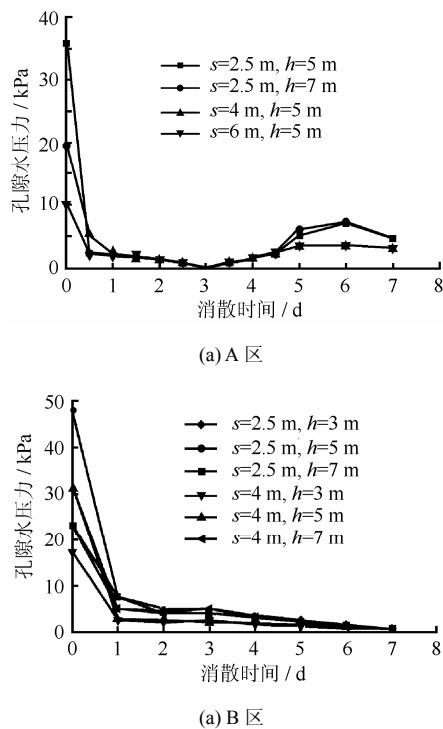


图 4 典型孔压消散过程曲线  
Fig.4 Typical pore water Pressure duration curves

## 5 强夯加固效果检验

### 5.1 载荷试验

为了检验强夯加固后的地基承载力，采用面积为 1.5 m×1.5 m 的载荷板进行载荷试验。A 区载荷试验曲线图 5(a) 表明，A<sub>1-1</sub> 和 A<sub>1-2</sub> 的最大试验荷载分别为设计承载力的 2 和 2.44 倍，最大沉降量分别为 11.17, 18.40 mm，前者未达到 0.01B (B 为载荷板宽度)，后者未达到 0.02B，A<sub>2-1</sub> 的最大试验荷载为设计承载力的 2.89 倍，最大沉降量为 51.80 mm，超过 0.03B，试验过程中均未出现地基急剧破坏现象，加固后的地基承载力都远远超过设计承载力 180 kPa 的要求。A<sub>1</sub> 试验块承载力远大于 A<sub>2</sub> 试验块，是由于前者以碎石土为起夯面，强夯过程中碎

石土和吹填砂相互咬合形成了很好的硬壳层，增加了地基的承载力并有利于夯击能的扩散，而以吹填砂直接为起夯面难以形成有效的硬壳层。

考虑到碎石土硬壳层对地基承载力的有利作用，B区只对以碎石土为起夯面的B<sub>1</sub>和B<sub>2</sub>试验块进行了载荷试验，试验过程中均未出现急剧破坏现象。从图5(b)荷载沉降曲线可见，夯后地基承载力远大于设计要求值，在相同荷载作用下，“先重后轻”施工工艺的B<sub>2-1</sub>和B<sub>2-2</sub>最大沉降量明显小于“先轻后重”施工工艺的B<sub>1-1</sub>和B<sub>1-2</sub>。也就是说，采用“先重后轻”施工工艺的地基承载力高于“先轻后重”施工工艺。

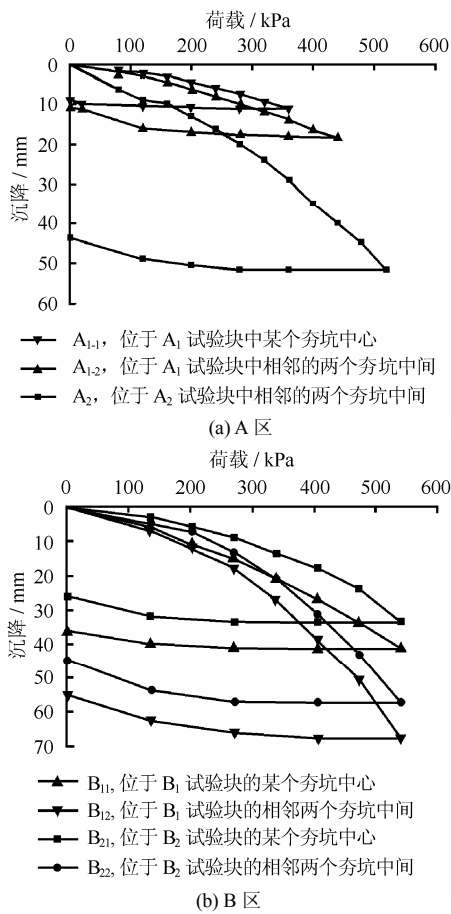


图5 载荷沉降曲线  
Fig.5 Loading-settlement curves

### 5.2 强夯前后地基土性质指标比较

强夯前后A区淤泥质粘土层的物理力学性质指标(表2)显示，在3.2~6.0 m深度范围内，其含水率平均减少19.08%，干密度增大10.7%，土体孔隙比减小17.48%，压缩模量增加45.78%，压缩系数降低35.68%。这说明，6.0 m深度内的淤泥质粘土层的物理性质指标得到了明显改善，地基强度得到显著提高；而6.0 m以下，其物理力学性质改善不明显，有些地方压缩模量和压缩系数反而恶

化，可能是由于液化所致。强夯前后静力触探结果(图6)表明，A区地表下3~7 m是淤泥质粘土层，其比贯入阻力P<sub>s</sub>提高了20%~40%，而B区地表下3~11 m为淤泥质粘土层，其中，P<sub>s</sub>提高了40%左右；并且直接以吹填砂为起夯面的淤泥质粘土层的比贯入阻力P<sub>s</sub>较以碎石土为起夯面的大。

表2 夯击前后地基土工性质指标  
Table 2 Indexes of physico-mechanical properties of soils before and after tamping respectively

深度 / m	含水率 w / %		干密度 ρ <sub>d</sub> / g·cm <sup>-3</sup>		孔隙比 e		压缩系数 a <sub>v</sub> / MPa <sup>-1</sup>		压缩模量 E <sub>s</sub> / MPa	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
3.2	44.9	30.9	1.24	1.44	1.218	0.877	0.88	0.45	2.5	4.2
3.5	39.3	39.5	1.29	1.34	1.113	1.042	0.79	0.59	2.7	3.5
5.5	48.7	36.2	1.19	1.37	1.277	1.01	0.93	0.56	2.5	3.6
6.0	42.8	34.2	1.25	1.40	1.154	0.934	0.83	0.45	2.6	4.3
6.2	35.2	34.9	1.37	1.37	0.988	0.983	0.47	0.48	4.2	4.1
6.4	40.9	39.8	1.27	1.27	1.141	1.128	0.71	0.76	3.0	2.8

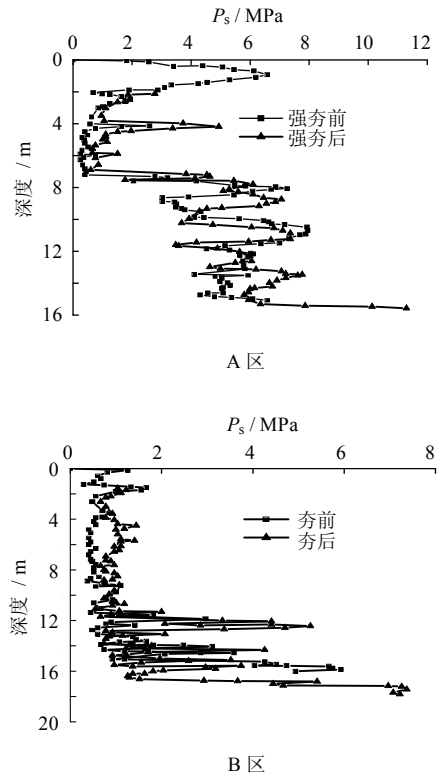


图6 强夯前后静力触探P<sub>s</sub>曲线  
Fig.6 Static penetration test P<sub>s</sub> curves

### 5.3 强夯有效影响深度

综合分析孔隙水压力变化规律、土体水平位移和静力触探试验结果，以及夯击前后地基土性质指标，可知A区和B区强夯影响深度为8~9 m，有效加固深度为6~7 m左右，满足设计要求的加固深度。静力触探试验结果表明，以吹填砂为起夯面的有效加固深度大于以碎石土为起夯面的有效加固深度，导致这种现象的原因是碎石土层孔隙率大，

吸收和散射的能量较多,不利于夯击能向深部土层传播,而吹填砂孔隙率小,吸收和散射的能量较少,更有利夯击能向深部土层传播。考虑地基土的性质、不同土层的厚度和埋藏顺序、地下水位等因素的影响,强夯有效影响深度  $H$  通常采用修正的 Menard 公式:

$$H = \alpha \sqrt{\frac{Mh}{10}} \quad (1)$$

式中  $M$  为夯锤重 (kN);  $h$  为夯锤落距 (m);  $\alpha$  为修正系数。

将试验所得的最佳单击夯击能和强夯有效影响深度代入式(1),反算可求得修正系数  $\alpha = 0.42$ 。

## 6 结论

(1) 强夯法加固以吹填砂为覆盖层的淤泥质粘土层地基是可行的,其有效加固深度可到达 6~7 m,有效加固深度修正系数宜取 0.42;

(2) 吹填砂层和淤泥质粘土层中的粉细砂薄层能促进超孔隙水压力的消散。该类地基中的孔压能够在 12~24 h 内消散 80% 以上,并在 2~8 d 内消散完毕;

(3) 采用强夯法加固以吹填砂为覆盖层的淤泥质粘土层地基时,碎石土垫层对夯击能的利用有显著影响,其作用取决于吹填砂层的厚度。当吹填砂层厚度大于 2.5 m 时,以回填碎石土层为起夯面,

夯击效果好,并且单击夯击能越大,有效夯击率越高;当吹填砂层厚度为 1.5~2.5 m 时,以回填碎石土层为起夯面,夯击效果较差,而直接以吹填砂作为起夯面,有效夯击率高,隆起量小,夯沉量大,能量利用率高。因此,当吹填砂层厚度大于 2.5 m 时,应回填碎石土作为起夯面;而当吹填砂层厚度为 1.5~2.5 m 时,宜直接以吹填砂为起夯面,但考虑到施工方面,可以铺设少量碎石土;

(4) 对于富含粉细砂薄层的饱和软土地基,当吹填砂层厚度为 1.5~2.5 m 时,如果以回填碎石土层为起夯面,宜采用“先重后轻”的施工工艺。

## 参考文献

- [1] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] JGJ79-91, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 郑颖人, 陆新. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
- [4] 叶为民, 唐益群, 杨林德, 等. 强夯法加固饱和软土地基效果研究[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 72-76.
- [5] 龙岩峰, 高贵才. 威海市“海联大厦”强夯法处理高填土、松软土地基工程实录[J]. 岩土力学, 1995, 16(1): 78-83.
- [6] 张仓平, 汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 76-80.

上接第 817 页

## 4 结语

本文分别推导出了带垫层的刚性桩复合地基在理想弹性和理想弹塑性条件下的桩土应力比的计算公式,并对计算公式进行了分析与实测数据进行了比较,讨论了各种参数对复合地基桩土应力比的影响情况,这对复合地基的优化设计有积极意义。文中假设不计负摩阻力作用<sup>[7]</sup>。实际上,在垫层作用下,刚性桩复合地基在适当荷载下,桩头、桩周附近有负摩阻力作用,但在较大的荷载作用下,根据实测数据<sup>[8]</sup>负摩阻区逐渐变小直至消失,而对桩土应力比的分析在接近破坏荷载时是比较有意义的,因为对此分析的目的是调整桩、土、垫层的各种参数使它们强度同时发挥,以优化复合地基的设计。从文中计算值和实测值比较结果来看,实测值也较好的反映了计算值的变化趋势,所以在这种情况下,这个假设是可取的。

## 参考文献

- [1] 李宁, 韩焯. 复合地基中褥垫层作用机理研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 10-15.
- [2] 化建新, 董长和, 孙东晖. GFG 桩垫层效应研究[J]. 岩土工程技术, 1998, 2(2): 48-52.
- [3] 池跃君, 宋二祥. 素混凝土桩复合地基荷载传递机理的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 39-42.
- [4] 傅景辉, 宋二祥. 刚性桩复合地基工作性状分析[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 335-339.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002, 158-159.
- [6] 毛前, 龚晓南. 刚性桩复合地基柔性垫层的效用研究[J]. 岩土力学, 1998(6): 67-73.
- [7] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1-8.
- [8] 池跃君, 沈伟, 宋二祥. 桩体复合地基桩、土相互作用的解析法[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 546-551.