

大面积吹填软土地基处理效果评价

李琳,王清

(吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130026)

摘要 :介绍某造、修船基地软土地基处理工程情况。根据地层条件和使用功能等将地基分为 A 区和 B 区。A 区采用真空预压法处理,B 区采用真空预压和表层拌和换填法处理。按设计要求采用取土试验、十字板剪切试验和静载荷试验进行检测。结果表明:A 区的含水量下降了 31% 左右,B 区的含水量下降了 39% 左右;A 区的承载力提高了 47~78 kPa,B 区的承载力提高了 160~223 kPa,均能满足设计要求。

关键词 :软土地基;真空预压;表层拌和换填;吹填软土

中图分类号 :TU41 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)01-0078-04

Evaluation of consolidation effects of soft soil foundation by large-area hydraulic filling//LI Lin, WANG Qing(*Construction Engineering College, Jilin University, Jilin 130026, China*)

Abstract :An introduction was given to the soft soil foundation treatment for a ship building base. According to the stratum condition, function, and foundation strength, the base was divided into area A and area B. The vacuum preloading method was adopted in area A, while the vacuum preloading method and surface earth replacing method were adopted in area B. From the soil sampling test, the vane shear test, and the static loading test, it is concluded that the moisture content of area A and area B decreases by about 31% and 39%, respectively, while the bearing capacity of area A and area B improves 47-78 kPa and 160-223 kPa, respectively. The results can meet the requirement of design.

Key words :soft foundation; vacuum preloading; surface earth replacing; hydraulic filling of soft soil

某大型造、修船基地的地基由吹填陆域形成,此类土具有高含水量、高孔隙比、低渗透性、低强度等特点。为了保证施工期和运营期的稳定,消除过大的沉降变形,工程建设的首要任务就是先对这种软土地基进行处理^[1-2]。真空预压法^[3-4]是一种有效的加固方法,近年来得到大面积推广使用。

该工程设计要求 A 区采用真空预压法,B 区采用真空预压+表层拌和换填法。该试验区竖向排水体为 B 型塑料排水板,间距为 1.0 m,正方形布置,排水板打穿软土层,平均打设深度为 11 m,膜下真空度大于 80 kPa,预压时间为 90 d。初步检验 B 区部分区域表层 2~3 m 范围内土层强度较低,将预压时间延长至 127~137 d,并对 B 区进行二次处理即表层拌和换填。表层拌和换填对 B 区真空预压后的表层土进行开挖,开挖后土体的标高约为+4.8 m(开挖厚度约为 0.8 m),拌和软土的深度为 2.0 m,将软土、生石灰、砂子按体积比 1:0.1:0.2 的比例用反铲进行搅拌,直至掺和物搅拌均匀,再在软土、生石灰、砂

子的拌和物表层 1.0 m 深度范围掺入 0.5 m 厚的石子,用反铲搅拌均匀,即形成约 2.5 m 厚的表层拌和层,其中上部 1.5 m 掺石子,下部 1.0 m 不掺石子。为探讨采用不同处理方法加固软土地基的效果,验证设计方案,通过检测对其加固效果进行评价。

1 地质概况

该试验场地位于海西湾岛观嘴区域,系吹填而成,所形成的地基主要为吹填淤泥质黏土地基,现有泥面标高约为+6.8 m,吹填厚度为 6~17 m,地基处理总面积约 45 万 m²。第四系地层自上而下共分为 4 层,第 1 层为吹填土层,第 2 层为淤泥质粉质黏土及粉质黏土层,第 3 层为砂砾层,第 4 层为砂(砾)质黏性土层。主要土层物理力学指标如表 1 所示。

2 地基处理检测

为测试加固效果及处理后地基土的均匀性,按设计要求在真空预压法后采用了取土试验和十字板

剪切试验^[5] ,在 B 区表层换填后对两区进行静载荷试验。各试验区检测点布置见图 1。

表 1 主要土层物理力学指标

岩土层 层号	岩土层 名称	厚度/ m	含水量/ %	快剪 φ / ($^{\circ}$)	快剪 $\bar{c}$ / kPa	
① ₁	粉土	0.2~1.7	16.6~28.9	22.0	5.0	50
① ₂	淤泥(淤泥 质粉质黏土)	0.6~5.7	53.0~98.3	4.0	3.0	25
① ₃	淤泥质粉土	0.6~8.5	33.0~54.0	22.0	7.0	45
① ₄	淤泥	0.9~4.0	36.3~43.9	4.0	5.0	50
②	淤泥质粉质黏土 ~粉质黏土层	0.5~3.7	30.3~47.1	4.0	5.0	60

注: φ 为内摩擦角平均值, $\bar{c}$ 为黏聚力平均值。

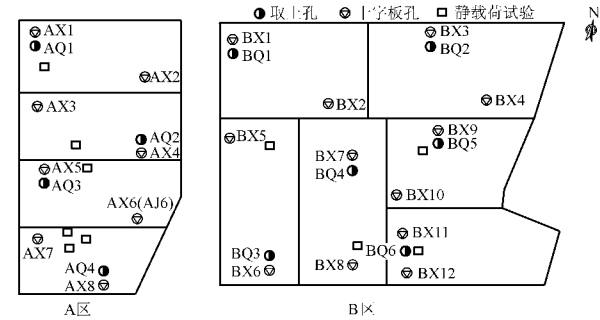


图 1 A 区和 B 区原位测试平面布置

静载荷试验采用慢速维持荷载法 ,加载装置为油压千斤顶 ,千斤顶反力为压重平台 ,压重为 2 000 kN ,荷载板采用直径为 2.37 m 的钢质圆形荷载板。加荷等级为 8 级 ,A 区每级为 20 kPa ,B 区每级为 30 kPa。压板沉降采用百分表测量 ,在其 2 个正交直径方向对称安放 4 只百分表 ,压板沉降量取这 4 个百分表所测沉降的平均值。承载力特征值的确定^[6]依次采用 :

- a. 当压力 ~ 沉降曲线上的极限荷载能确定 ,而极限荷载不小于对应比例界限的 200% 时 ,取比例界限值 ;当承载力特征值小于对应比例界限的 200% 时 ,可取极限荷载的 1/2。
- b. 当压力 ~ 沉降曲线是平缓的光滑曲线时 ,可按相对变形值确定 ,本工程为以黏性土为主的地基 ,取 $S/D=0.015$ 所对应的压力(其中 S 为沉降量 , D 为承压板的直径)。
- c. 按相对变形值确定的承载力特征值不应大

表 2 地基处理前后的物理力学指标对比

土 层	地基 状态	含水量/ %	孔隙比 e	液性指数 I_L	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压缩系数/ MPa^{-1}	直剪黏聚力/ kPa	直剪 内摩擦角($^{\circ}$)	地基 处理区域
黏质粉土	处理前	30.0	1.3	1.5	1.7	0.16	13.4	27.5	A 区
	处理后	29.1	0.8	1.4	2.0	0.22	15.0	35.5	A 区
粉质黏土	处理前	46.6	1.2	1.5	1.6	0.72	16.9	21.8	A 区
	处理后	32.1	0.9	1.4	1.9	0.65	19.5	29.6	A 区
淤泥质 黏土	处理前	93.2	1.9	2.9	1.5	0.49	6.6	3.1	B 区
	处理后	44.3	1.1	1.0	1.8	0.60	12.3	6.0	B 区
淤泥质粉 质黏土	处理前	48.4	1.7	2.1	1.6	0.95	9.8	18.9	B 区
	处理后	29.3	1.0	1.5	1.9	1.07	20.0	33.7	B 区

于最大加载压力的 1/2。

3 地基处理效果评价

根据软基处理的设计要求 ,处理后地基土的相关指标应达到如下要求 :地基土含水量小于 36% ;A 区承载力特征值大于 80 kPa ,B 区承载力特征值不小于 120 kPa。

3.1 取土试验

A 区和 B 区处理后的取土检测含水量结果如图 2 所示。将典型区域地基处理前后的物理力学指标统计于表 2。

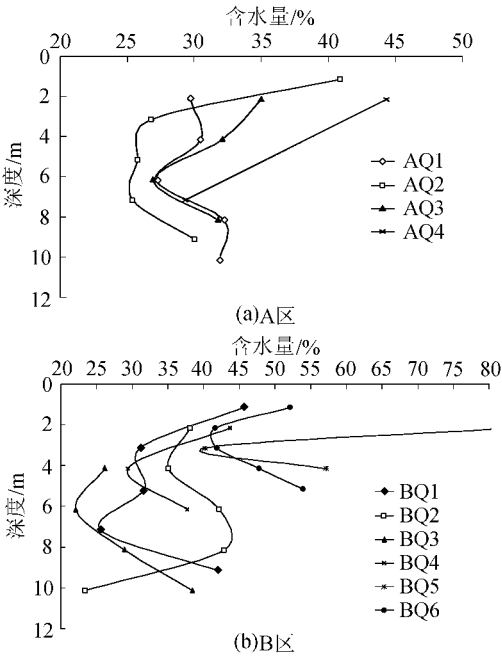


图 2 A 区和 B 区含水量曲线

图 2 表明 ,A 区大部分区域地基处理后的含水量低于 36% ,在东南角上部 2.5 m 左右的淤泥质黏土层含水量为 38% ~ 44.3% ,接近设计要求 ;B 区(换填前)大部分区域上部 3 m 左右的淤泥质黏土层含水量为 43.0% ~ 60.1% ,与设计要求相差较大。由表 2 可知 ,地基加固后含水量、孔隙比、液性指数有较为明显的降低 ,土的密度、压缩系数、黏聚力和内摩擦角有明显的提高 ,这些变化都说明了经过真空预压加固后土体强度有不同程度的增长。

3.2 十字板剪切试验

A 区和 B 区十字板剪切试验结果如图 3 所示。根据 GB50007—2002《建筑地基基础设计规范》推荐的公式^[7]计算地基土承载力特征值：

f_a = 3.14 C_u (1)

式中：C_u 为十字板抗剪强度，kPa；f_a 为地基承载力特征值，kPa。

根据图 3 中得到的 A 区和 B 区吹填土层范围内十字板抗剪强度统计值，由式(1)计算相应的承载力特征值，见表 3。

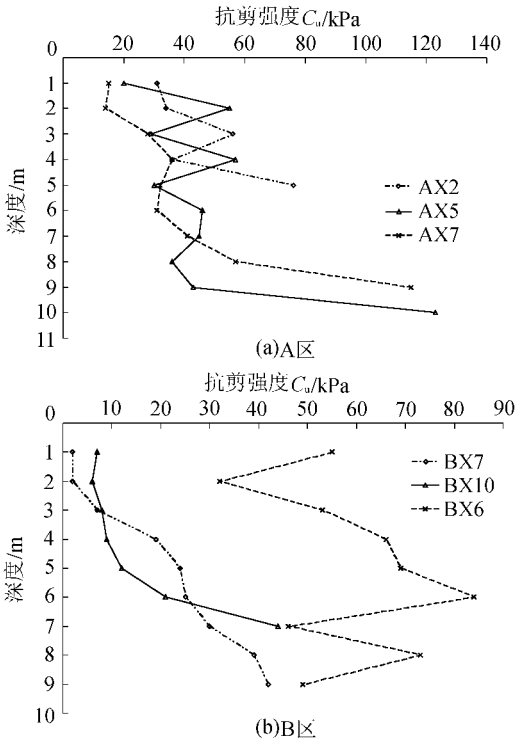


图 3 十字板剪切试验曲线

表 3 地基处理前后十字板抗剪强度对应的地基承载力特征值

区号	检测点编号	土层	处理后		处理前	
			C _u /kPa	f _a /kPa	C _u /kPa	f _a /kPa
A 区	AX2	黏质粉土	39.3	123.4	16.2	50.9
	AX5	黏质粉土	40.3	126.4	14.4	45.2
	AX5	粉质黏土	40.0	125.6	25.7	80.7
	AX7	淤泥质粉质黏土	14.5	45.5	9.9	31.1
	AX7	粉质黏土	48.6	152.5	11.0	34.5
B 区	BX6	黏质粉土	59.8	187.7	4.0	12.6
	BX6	淤泥质粉质黏土	56.0	175.8	34.1	107.1
	BX7	淤泥质黏土	3.6	11.3	3.5	11.0
	BX7	淤泥质粉质黏土	29.8	93.6	7.0	22.0
	BX10	淤泥	7.1	22.29	4.1	12.9
	BX10	粉质黏土	32.5	102.05	9.1	28.6

由表 3 可知，A 区真空预压加固后黏质粉土层的地基承载力特征值有较大提高，是加固前的 2.5 倍左右，粉质黏土层的地基承载力特征值提高幅度不均匀，是加固前的 1.5~4.5 倍，西南角上部的地基承载力较弱，为 45.5 kPa。B 区上部约 3 m 厚的淤

泥质黏土层的地基承载力特征值最小为 11.3 kPa，与设计要求相差较大，如不处理 B 区地基承载力就达不到设计要求。

受地形和吹填施工工艺的影响，表层吹填土的性质差别较大，在部分区域细颗粒汇集集中，形成流泥，厚度约为 2~3.2 m，施工前表层因晾晒形成 20~30 cm 厚的硬壳层，硬壳层下的软土仍为流动状态，真空预压就是在这种情况下进行施工的。表层以下 2~3 m 范围内土层经真空预压加固后部分区域强度较低的原因主要有两个：①对吹填回填材料进行颗粒分析，发现该层流泥的颗粒中小于 0.002 mm 的胶粒所占比重大，其所吸附的强结合水和弱结合水的水膜很厚，在 80 kPa 预压荷载作用下土颗粒间的自由水可以排出，但土颗粒吸附的结合水很难排出，土体在受到剪力作用时，由于结合水的润滑作用，土的抗剪强度很低。②JTJ 250—98《港口工程地基规范》中建议土体的强度增长公式^[8]为：ΔS_{uk}=σ_{zk}Utanφ_{eq}。土体的强度增长值同预压荷载、固结度 U 和固结快剪的内摩擦角 φ_{eq} 有直接的关系，在预压荷载和固结度一定的情况下，土的固结快剪内摩擦角对土的强度增长起到了关键作用。该种淤泥的固结快剪内摩擦角较小（表 1），平均值仅为 4.0°，在 80 kPa 预压荷载下固结度达到 85% 时，其十字板抗剪强度理论计算值也只能达到 6.5 kPa。因此，这种土的固结快剪摩擦角小也是造成预压加固后土体十字板强度低的原因。

3.3 静载荷试验结果

在 B 区经过表层拌和换填后，对 A 区和 B 区进行静载荷试验，P~S 曲线（P 为荷载，S 为沉降量）如图 4 所示，承载力特征值汇总见表 4。

表 4 承载力特征值汇总

试验点号	f _a /kPa	S/D/%	试验点号	f _a /kPa	S/D/%
A1	103	21.69	B2-1	240	33.03
A2	97	20.86	B2-2	240	34.94
A3	110	15.37	B2-3	224	28.38
A4	60	11.34	B2-4	195	35.06
A4 补 1	107	12.10	A4 补 2	113	27.62

注：D 为承压板的直径。

由表 4 可知，A 区静载荷试验与十字板剪切试验所确定的承载力特征值基本相符，A4 点处的地基承载力特征值偏低，但补充的两组（A4 补 1 和 A4 补 2）静载荷试验表明，其地基承载力特征值达到了设计要求（不小于 80 kPa）；B 区经过表层拌和换填后，地基承载力特征值达到设计要求（不小于 120 kPa）。

4 结 语

由于吹填料源、吹填工艺等条件的限制，该试验

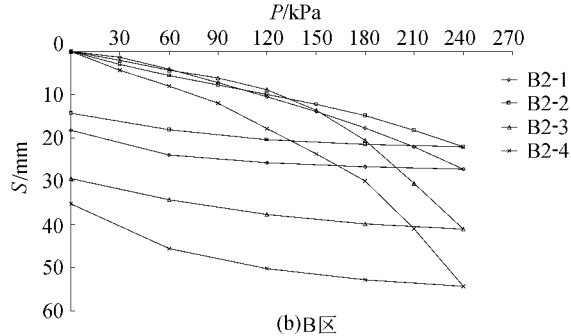
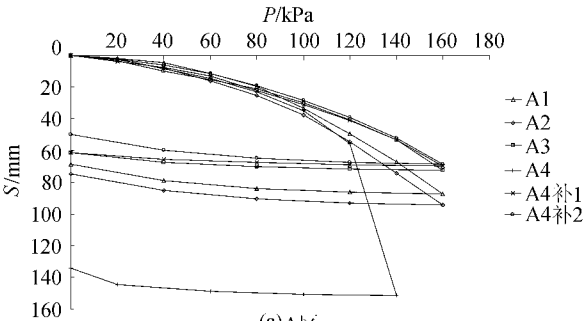


图4 A区和B区静载荷试验P~S曲线

区的吹填土有以下特点:黏土颗粒的含量差别大,黏土颗粒的含量在20%~41.3%之间;含水量高、强度较低;土的成分和强度在空间上分布极不均匀;检测点

的十字板剪切强度相差较大。检测结果表明:采用真空预压法、真空预压+表层拌和换填法加固不同功能区的吹填淤泥质黏土地基基本达到了设计承载力要求,地基承载力也有很大程度的提高,其中A区提高2.5倍左右,B区提高3~6.5倍。小面积区域如A区的西南角上部承载力较弱,使用前应进行处理。综上所述,利用真空预压法、真空预压+表层拌和换填法加固吹填淤泥质黏土地基是可行的,可以在类似的工程中推广。

参考文献:

[1] 姜炎.真空预压法加固技术[M].北京:人民交通出版社,2002.

[2] 朱建才,温晓贵,龚晓南.真空排水预压加固软基中的孔隙水压力消散规律[J].水利学报,2004(8):123-128.

[3] 张功新,董志良,莫海鸿,等.真空预压中真空度及其测试和分析[J].华南理工大学学报:自然科学版,2005,33(10):57-61.

[4] 梅国雄,徐锴,宰金岷,等.真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J].岩土工程学报,2006,28(9):1168-1172.

[5] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S].

[6] 王清.土体原位测试与工程勘察[M].北京:地质出版社,2006.

[7] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].

[8] JTJ250—98 港口工程地基规范[S].

(收稿日期:2007-08-13 编辑:方宇彤)

(上接第73页)

式中: η_p 为原型泵的效率,%; η_m 为模型泵的效率,%; e_p 为原型泵过流表面的粗糙度; e_m 为模型泵过流表面的粗糙度,这里设 $e_p/e_m=2$; δ_E 为摩擦损耗系数; Q 为计算点的流量, m^3/s ; Q_{opt} 为最高效率点的流量, m^3/s ; δ_{Eopt} 为最高效率点的摩擦损耗系数; n_s 为泵的比转速; n 为泵的转速, r/min ; H_{opt} 为水泵在最高效率点的扬程, m 。

具体计算结果如表4所示。由表4可以看出,模型试验结果与现场实测结果非常吻合,因此也进一步说明了模型试验结果与现场实测结果均具有较高的准确性与真实性。

表4 模型试验结果与现场测试结果对比

叶片 角度/(°)	装置 扬程 H_{sy}/m	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$		装置效率 $\eta_{sy}/\%$	
		模型 试验	现场 实测	模型试验 $\eta_m + \Delta\eta$	现场 实测
-4	3.46	23.18	23.86	$67.37 + 1.32$ $= 68.69$	$63.53/0.94$ $= 67.59$
-2	3.51	24.82	25.63	$65.3 + 1.48$ $= 66.78$	$63.18/0.94$ $= 67.21$

4 结 论

a. 本文首先采用理论计算的方法分段计算出上

桥泵站的流道阻力系数S值,然后将水力模型的泵段性能曲线转化为装置性能曲线,以装置效率最优为准则,同时兼顾流量和空蚀性能,直观有效地选出水力模型350ZMB-3.8作为上桥泵站技术改造换泵模型。泵装置模型试验和现场实测结果说明该水力模型的选择是正确的,方法是有效的,可作为其他泵站更新改造或新建选择水力模型时的参考。

b. 上桥泵站在保留原进出水流道、原电动机和原导叶的基础上只进行换泵改造的方案是可行的,在节省大量工程投资的条件下取得了显著的改造效果,对其他大型泵站的更新改造具有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 严登丰.泵站工程[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[2] H E 依捷列契克.实用流体阻力手册[M].华绍曾,杨学宁,李世铎,等译.北京:国防工业出版社,1985.

[3] SL140—97 水泵模型验收试验规程[S].

[4] GB3216—89 离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法[S].

[5] SL317—2004 泵站安装及验收规范[S].

[6] JISB8327—2002 Test Methods for Performance of Pump Using Model Pump[S].

(收稿日期:2007-03-15 编辑:方宇彤)