

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.018

高真空击密法加固后饱和吹填砂性土室内试验

高有斌^{1 2} 沈 扬^{1 2} 徐士龙³ 曹建建⁴

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室 江苏 南京 210098 ;

2.河海大学岩土工程科学研究所 江苏 南京 210098 ;

3.上海港湾软地基工程有限公司 上海 200092 ;4.浙江广川工程咨询有限公司 浙江 杭州 310020)

摘要 :首先对滨海饱和吹填砂性土地基进行高真空击密法地基处理试验 ,然后对加固后的原状土进行室内试验 ,并根据室内试验结果分析了地基加固效果 .结果表明 ,饱和吹填砂性土经过高真空击密加固后 ,干密度明显增大 ,含水量和孔隙比显著降低 ,强度指标显著提高 ,可满足承载力设计要求 ,压缩模量显著增大 ,且压缩模量与孔隙比存在着显著的线性关系 .

关键词 :高真空击密法 强夯法 饱和吹填砂性土 地基处理

中图分类号 :TU473 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)01-0086-05

强夯法是利用重锤在地基土中产生的巨大冲击波和动应力 ,通过振动压密、动力固结和触变效应等作用来提高地基土的强度和抗渗稳定性、降低地基土的压缩性以及增强地基土的抗液化能力的^[1] .当采用强夯法来处理淤泥质土或饱和吹填砂性土时 ,夯击产生的孔隙水压力能否快速消散 ,孔隙水能否顺利排出将直接影响到加固效果^[2] .为了解决孔隙水的排出和压力消散问题 ,采用强夯法时必须设置排水系统 .张凤文等^[3]对设置砂井再强夯的地基土处理效果进行了试验研究 .邹维列等^[4]在处理深厚吹填砂层时采用了填砂-塑料排水板 + 强夯的方法 .姜志全等^[5]在处理软土路基时采用了袋装砂井和砂垫层 + 强夯的方法 .这些设置排水系统的强夯法大大拓宽了强夯法的应用范围 ,并提高了加固效果 .

高真空击密法具有排水固结法和动力固结法的功能 ,是一种井点强降水法和强夯击密法相结合的快速大面积地基处理方法^[6] ,目前已在我国许多工程中得到应用 ,并取得了较好的效果 .为了完善高真空击密法的设计计算理论 ,本文以某工程为例 ,通过室内试验分析了高真空击密法的加固效果和有效加固深度 ,研究了地基土的压缩特性和强度特性 .

1 工程概况

1.1 地质条件

某电厂位于江苏南通滨海滩涂上 ,厂区地基土为围海吹填土 ,地下水位较浅 ,仅为 0.2 ~ 0.3 m ,地基承载力仅为 80 kPa ,存在中等-严重液化现象 .初步勘察的揭穿深度内存在 4 种不同的土层 (a)粉砂层 .为吹填砂性土 ,松散 ,上部潮湿 ,下部饱和 ,层厚 4.5 ~ 5.1 m .(b)粉细砂层 .饱和 ,稍密 ,摇振反应明显 ,层厚 3.4 ~ 4.5 m .(c)粉砂层 .饱和 ,稍密 ,层厚 4.8 ~ 6.0 m .(d)粉质黏土夹粉土层 .可塑 ,粉砂、粉土含量较大 ,层厚 3.9 ~ 7.3 m .地质剖面如图 1 所示 ,图中括号内的数字为离地面的距离 ,即深度 ,单位为 m .地基土的物理力学性质指标如表 1 所示 .

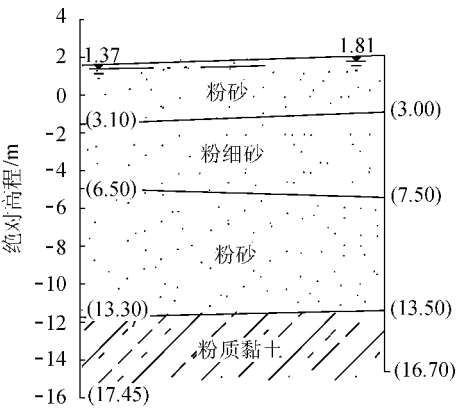


图 1 地质剖面

Fig. 1 Geologic section of foundation

收稿日期 :2007-12-21

基金项目 :国家自然科学基金(50639010)

作者简介 :高有斌(1977 —) ,男 ,河南项城人 ,博士研究生 ,主要从事土动力学与软弱地基处理研究 .

表 1 地基土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of foundation soil								
土层	土质	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	塑性指数 I_p	压缩模量 E_s/MPa	渗透系数 $k_v/(10^{-4}cm \cdot s^{-1})$
第 1 层	粉 砂	1.91	30.4	0.883	91.1		10.40	3.15
第 2 层	粉细砂	1.94	27.5	0.773	95.8		13.90	2.51
第 3 层	粉 砂	1.93	28.4	0.800	96.0		13.14	0.56
第 4 层	粉质黏土	1.88	30.1	0.876	93.2	10.1	5.97	0.55

1.2 地基处理方案

试验场地分为一区和二区(图 2) 2 个区均为正方形,边长 30 m.在每遍强夯击密的前后分别进行强降水处理,以降低夯前地下水位,加快孔隙水的排出,快速消散夯后孔隙水压力.真空管分为深管和浅管,深管长为 6 m,浅管长为 3 m,真空井点距纵、横向均为 3.5 m,浅管和深管间隔布置.实行信息化施工,根据水位观测和孔压监测结果优化下一步强夯工艺.

强夯工序为点夯 2 遍、满夯 1 遍,夯点采取正方形布置方式.一区夯点间距为 3.0 m,二区夯点间距为 3.5 m.夯锤重 165 kN,锤底面积为 3.14 m²,落距为 16.97 m,单击夯击能为 2 800 kN·m,每点 8 击.第 3 遍采取满夯方式,目的是加固前 2 遍点夯时被震松的表层土,夯击能为 1 400 kN·m,锤印搭接 1/4.

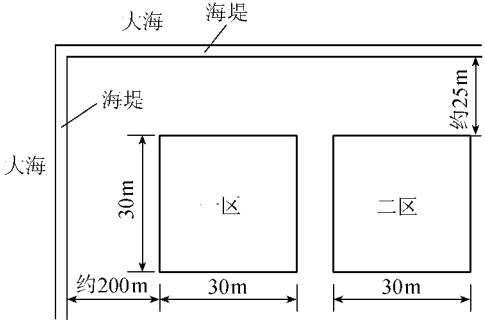


图 2 试验区平面示意图
Fig. 2 Plan of test area

2 加固效果检验

高真空击密法地基处理结束 28 d^[7]后,在现场取回原状地基土进行室内试验.加固前后地基土的物理力学性质指标对比如表 2、图 3 和图 4 所示.

表 2 加固前后地基土的物理力学性质指标对比

Table 2 Comparison among parameters of physical and mechanical properties for foundation soil before and after treatment											
土质	含水量 $w/\%$			孔隙比 e			干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$			压缩模量 E_s/MPa	
	加固前	加固后		加固前	加固后		加固前	加固后		加固前	加固后(二区)
		一区	二区		一区	二区		一区	二区		
粉 砂	30.4	22.2	23.6	0.883	0.563	0.668	1.52	1.73	1.62	10.4	21.3
粉细砂	27.5	26.2	25.8	0.773	0.723	0.723	1.52	1.57	1.57	13.9	15.3

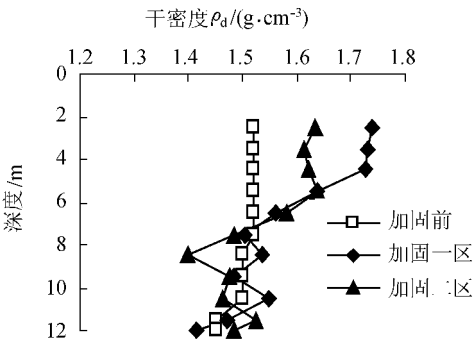


图 3 加固前后土层干密度变化曲线
Fig. 3 Variation of dry density of soil layers before and after treatment

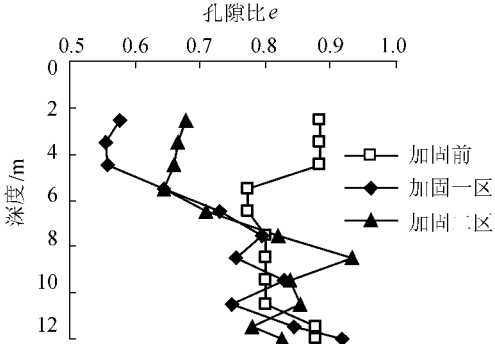


图 4 加固前后土层孔隙比变化曲线
Fig. 4 Variation of porosity ratio of soil layers before and after treatment

2.1 加固前后性质指标对比

经过高真空击密处理后,加固区地基土的含水量和孔隙比明显降低,干密度明显增大.以二区为例,在

2.5~7.5 m 范围内,平均含水量从加固前的 29.0%降低到 24.7%,降低了 14.8%;孔隙比从 0.833 降低到 0.695,降低了 16.6%;平均密度从 1.91 g/cm³ 提高到 2.01 g/cm³,提高了 5.2%;平均干密度从 1.52 g/cm³ 提高到 1.62 g/cm³,提高了 5.3%;平均压缩模量从 12.2 MPa 提高到 18.3 MPa,提高了 50.2%。在 7.5 m 以下仍有一定的加固效果,但不太明显,甚至部分区域出现恶化现象,主要原因是 8~9 m 范围内存在很薄的淤泥质夹层。总之,在加固范围内饱和吹填砂性土的物理力学性质指标得到显著改善,压缩性指标显著提高。

2.2 加固深度

在强夯击密时,夯击能向下传递并逐渐递减,达到一定深度后,夯击能对地基土强度的影响可以忽略,所以存在着加固深度的概念。目前,国内外尚没有关于强夯有效加固深度的确切定义^[8]。地基土的强度除与自身颗粒成分和粒径有关外,还与孔隙比和干密度等指标有关,这些指标的变化可反映强度的变化规律,所以可通过孔隙比和干密度沿深度的变化规律判定加固深度。从图 3 和图 4 可知:二区的加固深度为 7.5 m;一区虽在 7.5 m 处加固效果不甚明显,但在此软弱夹层的下面,性质又得到明显改善,故可判定一区加固深度为 8.5 m。一区和二区的加固深度均大于设计要求的深度(6 m)。

强夯的有效加固深度 H 与土的性质、不同土层的厚度和埋藏顺序以及地下水等因素有密切关系^[9],通常采用修正的 Menard 公式(式(1))来计算 H 。

$$H = \alpha \sqrt{\frac{Mh}{10}} \tag{1}$$

式中: M ——夯锤重, kN; h ——夯锤落距, m; α ——修正系数。

式(1)仅考虑了夯击能量因素,而没有考虑其他影响因素。

据统计, α 取值范围一般为 0.34~0.80。工程实践表明,即使地基土和单击夯击能一样,如果采用不同的单位夯击能,修正系数也不相同。2 个试验区单击夯击能相同但夯点间距不同,所以修正系数也有差异。反演得到的一区和二区的 α 值分别是 0.51 和 0.45,与文献[9]中的砂土地基取值 0.5 基本相当。

3 饱和吹填砂性土的压缩特性

为了检验经过高真空击密加固后的饱和吹填砂性土的压缩特性,对二区的原状土进行了高压固结试验。图 5 为压缩试验得到的典型 $e-p$ 曲线,A、B、C 3 条曲线分别表示位于 4 m、7 m、8 m 深度处的土体的 $e-p$ 曲线。

由图 5 可知:(a)土的压缩性显著降低。处理前 7.5 m 范围内压缩系数为 0.168 MPa⁻¹,属于中压缩性土;处理后,加固深度范围内压缩系数为 0.096 MPa⁻¹,属于低压缩性土。压缩模量大幅提高,由夯前的 10.18 MPa 提高到 21.25 MPa,提高了 108.7%。(b)加固后土的压缩模量 E_s 与孔隙比 e 呈良好的线性关系(图 6),经直线拟合得到经验公式

$$E_s = - 52.7e + 57.3 \tag{2}$$

该式相关系数 r 为 0.999 5,表明拟合公式线性关系显著。

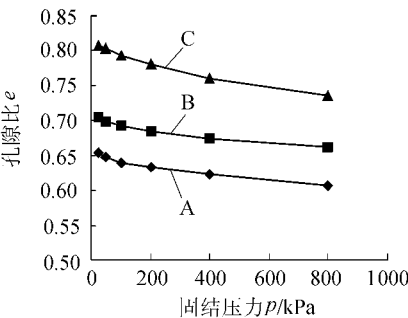


图 5 孔隙比与固结压力的关系曲线
Fig. 5 Relationship between porosity ratio and consolidation pressure

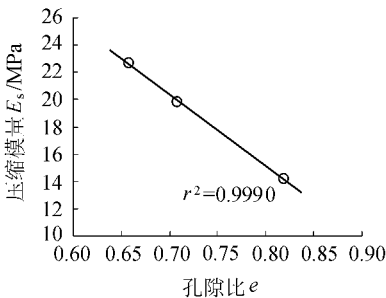


图 6 压缩模量与孔隙比的关系曲线
Fig. 6 Relationship between compression modulus and porosity ratio

夯击能作用于地基土表面,夯击能和动应力向下传递并逐渐衰减,故上部土体加固效果要好于下部土体。由于吹填砂性土处于欠固结状态,高真空强排水后含水量很低,所以加固效果受其他因素的影响程度已降到最低,强夯能量决定了夯后地基土性质指标的变化趋势,加固后地基土性质指标之间存在着某种函数关

系并非偶然.由式(2)可知,加固后的压缩模量取决于砂土的孔隙比^[10],故由孔隙比可推求出压缩模量.

地基土压缩特性指标可通过室内固结试验获得,但目前尚没有可靠的原位试验方法,故可利用经验公式来计算压缩模量.

4 饱和吹填砂性土的强度特性

图 7 为典型的直剪试验曲线.从图 7 可知,剪应力与剪切位移为双曲线型关系,剪应力达到峰值后呈现应力软化现象,表现出明显的超固结土特征,抗剪强度也大幅提高.试验结果表明:当直剪试验的竖向荷载为 200 kPa 时,抗剪强度均值 τ_f 由 103.7 kPa 提高到 156.1 kPa,提高了 50.5%;当竖向荷载为 300 kPa 时,抗剪强度均值 τ_f 由 150.6 kPa 提高到 211.0 kPa,提高了 40.1%.经过高真空击密加固后,吹填地基土颗粒重新排列和重新定向,具有很强的咬合作用,表现出很大的抗剪强度^[10].

根据直剪强度指标,可利用理论方法计算地基极限承载力.太沙基等根据地基整体破坏原理,导出了极限地基承载力 q_u 的计算公式^[11]

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \rho_s g b N_\gamma \tag{3}$$

式中: N_c, N_q, N_γ ——承载力系数; c ——黏聚力; q ——超载; b ——计算宽度; ρ_s ——土的密度; g ——重力加速度.

太沙基等导出的计算公式是基于整体破坏情况而言的,如果要将其应用于局部剪切破坏模式下的承载力计算,强度指标需按 $c^* = \frac{2}{3} c, \varphi^* = \cot\left(\frac{2}{3} \varphi\right)$ 进行折减^[10].经折减计算,本试验场地 $c^* = 30.7, \varphi^* = 20.1$.

根据太沙基等的计算公式计算出的地基容许承载力为 184 kPa,满足设计要求.与静载荷试验得到的地基容许承载力 150 kPa 相比,室内直剪试验所得到的地基容许承载力偏大.

5 结 语

由于滨海地基饱和吹填砂性土地下水位较浅,地基承载力很低,强夯法不能直接在地面使用,故先进行排水处理后再采用强夯的高真空击密法进行了地基处理.通过对加固后原状地基土的室内试验研究,得到了以下几点结论:

- a. 饱和吹填砂性土的干密度明显增大,孔隙比显著降低,压缩性指标明显改善.加固深度达到 7.5 ~ 8.5 m,明显大于设计要求深度.
- b. 地基土压缩模量和孔隙比具有显著的线性关系,类似工程可通过孔隙比推求出压缩模量,并根据压缩模量来判断地基土压缩特性的改善程度.
- c. 加固后地基土的抗剪强度明显提高,地基承载力满足设计要求.室内试验所得地基承载力与静载荷试验结果相比偏高,故利用室内试验结果来判定地基承载力时应进行适当折减.

参考文献:

[1] 张福海,王保田,刘汉龙,等.强夯法在城市防洪工程地基加固中的应用研究[J].岩土力学,2004,25(3):490-494.
[2] 白冰.强夯荷载作用瞬间饱和土层固结变形分析[J].岩土力学,2003,24(1):57-60.
[3] 张凤文,王庭林.强夯砂土桩复合地基承载力的试验研究[J].岩土力学,2000,21(1):81-84.
[4] 邹维列,吴国高,安骏勇,等.强夯加固软土上覆海砂层的试验研究[J].岩土力学,2003,24(6):983-986.
[5] 姜志全,李廷芥,倪光乐,等.动力固结法加固软土路基试验分析[J].岩土力学,2004,25(12):2033-2036.
[6] 滕圣康,王金璟,徐土龙,等.高真空击密法加固水力吹填粉煤灰地基的试验[J].水运工程,2004(2):9-12.
[7] JGJ79—2002,建筑地基处理技术规范[S].
[8] 逮海,水伟厚.强夯法在城市防洪工程地基加固中的应用研究[J].石河子大学学报:自然科学版,2004,22(4):45-48.
[9] 龚晓南.地基处理手册[K].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:255-265.

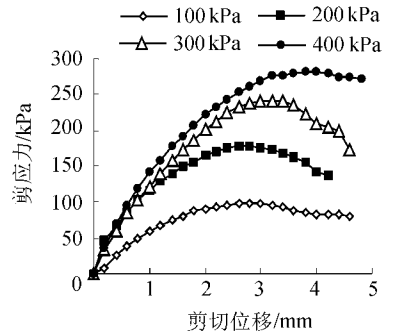


图 7 剪应力与剪切位移的关系曲线
Fig. 7 Relationship between shear stress and shear displacement

[10] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,1996 290-293.

[11] 林宗元.简明岩土工程勘察设计手册:上册[K].北京:中国建筑工业出版社,2003 931-939.

Laboratory tests on saturated hydraulic fill sandy soil by
high vacuum densification method

GAO You-bin^{1,2}, SHEN Yang^{1,2}, XU Shi-long³, CAO Jian-jian⁴

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 21098 , China ;
3. Shanghai Harbor Soft Soil Treatment Engineering Co. , Ltd. , Shanghai 200092 , China ;
4. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co. , Ltd. , Hangzhou 310020 , China)

Abstract : Field tests on the foundation treatment of saturated hydraulic fill sandy soil in costal areas were carried out by use of the high vacuum densification method (HVDM). Laboratory tests on the consolidated undisturbed soil were employed. The treatment effect of HVDM was analyzed according to the results of laboratory tests. The test results show that the treatment effect of the saturated hydraulic fill sandy soil by HVDM is remarkable : the dry density increases , the water content and the porosity ratio obviously decrease ; the soil strength is greatly improved and can satisfy the design requirements of the foundation bearing capacity ; the compression modulus linearly increases with the porosity ratio.

Key words : high vacuum densification method ; dynamic consolidation ; saturated hydraulic fill sand ; foundation treatment

· 简讯 ·

第 2 届全国水工抗震防灾学术交流会将于 2009 年 5 月召开

由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办的第 2 届全国水工抗震防灾学术会议将于 2009 年 5 月在四川省成都市举行.会议将对以下专题进行交流和研讨:汶川地震震后水工建筑物震损调查、震害分析与灾害评估;震损水工结构的安全度及修复加固技术;高混凝土坝、高土石坝抗震性能和抗震安全;水库诱(触)发地震的预测、监测及其影响研究;水工建筑物抗震分析理论与方法、抗震设计标准;水工建筑物抗震试验研究方法和技术;水工建筑物场地地震动输入;水工建筑物与地基材料动态特性;水工结构工程振动、爆炸与冲击;水工建筑物现场测试与动力性态检测、健康诊断与鉴定;水电工程抗震防灾措施、风险评估及应急预案;水工结构减震、隔震和控震技术.会议将邀请著名的水工抗震与地震工程的院士、专家就本学科的研究与发展、汶川地震对水工结构的影响作特邀报告.

有关会议详情,可访问 http://www.hydropower.org.cn/jsp/news_detail.jsp?news_id=2167.

(本刊编辑部供稿)