

# 真空预压加固吹填流泥强度增长规律试验研究

张文彬<sup>1</sup>, 谢锦波<sup>1</sup>, 王贤奔<sup>2</sup>, 潘兵兵<sup>2</sup>, 陈俊杰<sup>2</sup>, 赵欢欢<sup>2</sup>, 陈孟林<sup>2</sup>, 黄建琴<sup>2</sup>

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200030; 2. 乐清湾港区投资发展有限公司, 浙江 温州 325600)

**摘要:** 结合对真空预压的理论认识和工程实践, 通过试验对真空预压加固吹填流泥的孔隙水压力、泥面沉降、出水量、含水率、强度参数的变化特征进行分析。试验结果表明: 真空预压前期泥面沉降增长迅速, 而孔隙水压力增长缓慢; 真空预压后期泥面沉降增长缓慢, 而孔隙水压力增长较快。分析了真空预压加固吹填流泥强度增长机理, 运用有效固结应力法强度增长计算公式结合监、检测数据推算吹填流泥强度增长过程。计算结果表明: 理论计算的强度增长规律符合现场实测强度增长规律; 真空预压前期土体几乎无强度, 真空预压中后期强度增长较快; 且抽真空7个月土体强度增长趋势仍未趋于收敛。真空预压加固吹填流泥强度增长的这些特点在真空预压工程设计及施工中应引起重视, 应综合考虑强度增长规律及工程经济合理性确定预压时间, 并以强度指标作为卸载标准之一。

**关键词:** 真空预压; 吹填流泥; 抗剪强度; 增长规律性

中图分类号: TU 447; U 616<sup>+</sup>.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0151-07

## Experimental study on strength increasing rule of hydraulic fill mud consolidated by vacuum preloading

ZHANG Wen-bin<sup>1</sup>, XIE Jin-bo<sup>1</sup>, WANG Xian-ben<sup>2</sup>, PAN Bing-bing<sup>2</sup>, CHEN Jun-jie<sup>2</sup>, ZHAO Huan-huan<sup>2</sup>, CHEN Meng-lin<sup>2</sup>, HUANG Jian-qin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute, Shanghai 200030, China;

2. Yueqing Bay Harbor Area Investment and Development Co., Ltd., Wenzhou 325600, China)

**Abstract:** Based on the theoretical knowledge and engineering practices about vacuum preloading at present, this paper analyzed the change features of parameters including pore water pressure, mud surface settlement, water yield, moisture content and strength of the hydraulic fill mud consolidated by vacuum preloading through test. The test results show that at the earlier stage of vacuum preloading, the surface settlement increases fast, but the pore water pressure increases slowly; in contrast, the surface settlement increases slowly and the pore water pressure increases fast at the later stage. The strength increasing mechanism of hydraulic fill mud consolidated by vacuum preloading was analyzed, and the strength increasing process of hydraulic fill mud was calculated by applying the calculation formula for the strength increase under effective stress consolidation, and combing with monitoring and testing data. The calculation results show that the strength increasing rule calculated with theory corresponds to the strength increasing rule practically measured in the experiment; the strength of hydraulic fill mud is nearly not existed at the earlier stage of vacuum preloading, but increases relatively fast in the middle and later stages of vacuum preloading; The strength increasing trend of soil mass still doesn't tend to disappear after 7 months' vacuum preloading. These characteristics about the strength increase of hydraulic fill mud consolidated by vacuum preloading should be brought to the attention in the design and construction of vacuum preloading engineering. The preloading period should be reasonably determined by comprehensively considering the strength increasing rule and the rationality of engineering economy, and the strength index shall be regarded as one of unloading standards.

**Keywords:** vacuum preloading; hydraulic fill mud; shear strength; increasing regularity

收稿日期: 2016-02-25

作者简介: 张文彬 (1987—), 硕士, 工程师, 从事岩土工程方面的设计与研究工作。

真空预压是软土地基加固非常有效的措施之一。近年来, 诸多学者对真空预压加固机理、数值模拟方法进行了研究, 对真空预压加固软基强度计算方法、强度增长规律进行了有益的探讨<sup>[1-6]</sup>。但上述文献的研究对象基本是正常沉积固结的软黏土, 对经水力吹填形成的高含水率流泥的相关文献报道较少。

吹填流泥是通过水力吹填形成的一种新近欠固结沉积软土, 含水率超高呈流动状, 压缩性强, 强度和承载力极低, 其物理力学性质指标与普通的正常沉积固结的软黏土差异很大。因此, 对于新近吹填流泥的物理力学性质、真空预压处理吹填流泥的方案设计、施工技术、固结理论与强度增长规律等很多方面仍需要进行深入的研究。本文依托温州某吹填造陆工程, 通过现场试验, 对真空预压加固吹填流泥强度增长规律进行了重点研究, 具有一定的工程实用意义。

### 1 现场模型试验

#### 1.1 试样的制备

试验中所采用的土样取自温州某吹填造陆工程, 利用泥浆泵从吹填区抽出泥浆后直接灌入试验池中, 泥面高度为 1.8 m。试样主要物理性质指标见表 1, 吹填流泥黏粒含量高达 50%、粉粒的含量达到 47%, 表现出高含水率、高黏粒特征。

表 1 试样主要物理性质指标

含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	颗粒质量百分数/%		
				黏粒	粉粒	极细砂
147.2	46	25	21	50	47	3

#### 1.2 模型试验装置

模型试验装置见图 1, 主要装置包括试验池、排水系统、调压系统和量测系统。模型试验加固剖面见图 2, 断面尺寸为 2.4 m×2.4 m, 深 1.9 m; 采用 A 型排水板, 排水板间距 60 cm, 正方形布置, 打设深度 1.8 m。调压系统由电接点真空表和控制系统组成, 通过设置电接点真空表的上下阈值, 自动控制射流泵(即当实际真空度达到下限阈值时, 泵自动开启; 达到上限阈值时, 泵自动关

闭), 以达到稳定真空度、形成真空梯度的目的。量测系统包括刻度尺、真空表、孔隙水压力计和电子称, 刻度尺用来测量泥面沉降, 真空表用来测量膜下真空度, 孔隙水压力计用来测量土体内孔隙水压力, 电子称用来测量抽真空过程中的出水量。

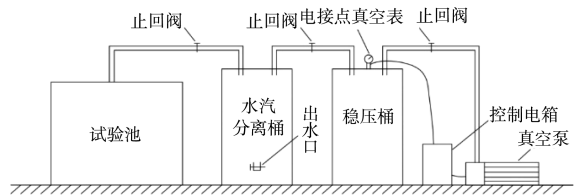


图 1 模型试验装置

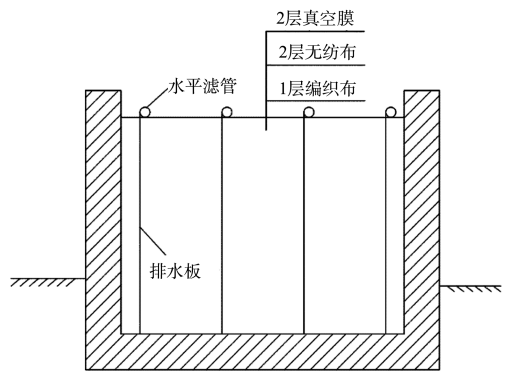


图 2 模型试验加固剖面

### 2 试验成果及分析

#### 2.1 真空度

本次试验采用 40~80 kPa 的真空梯度, 即在抽真空初期维持 40 kPa 的膜下真空度, 第 7 d 后加载至 80 kPa, 并一直保持到试验结束, 膜下真空度时程曲线见图 3。考虑规范<sup>[7]</sup>规定的预压时间不宜低于 90 d, 因此选择在 108 d(满载 100 d)时停泵进行含水率及十字板抗剪强度试验; 之后继续抽真空至 204 d(满载 196 d)停泵卸载。

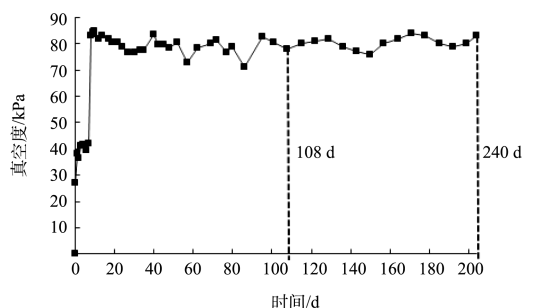


图 3 膜下真空度时程曲线

### 2.2 泥面沉降量

泥面沉降发展过程及沉降统计分析见图 4、表 2, 由试验结果可知: 1) 抽真空初期, 泥面沉降几乎呈线性变化, 第 60 d 累计沉降量已占总沉降量的 82%, 说明土体自由水排出明显。之后沉降继续发展, 60 d 后的累计沉降量仅占总沉降量的 18%, 沉降发展明显变缓。2) 抽真空 108 d 土体沉降速率、沉降固结度及预压时间均已满足规范规定的卸载标准。3) 抽真空 108 d 与抽真空 204 d 的泥面沉降仅相差 33 mm(仅占总沉降量的 5%), 96 d 的沉降固结度仅增长了 4.9%。满足卸载要求后, 继续抽真空对于土体沉降的贡献已不大。

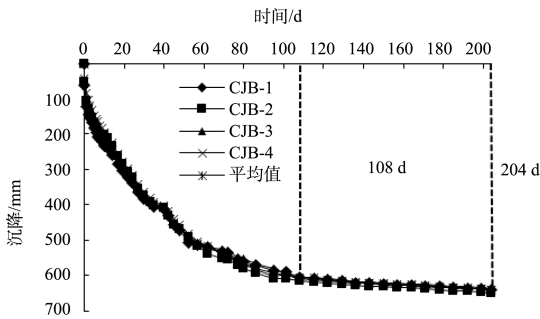


图 4 泥面沉降时程曲线

表 2 泥面沉降统计分析

试验天数/d	累计沉降量/mm	平均值/mm	固结度/%
108	605~614	608	88.3
204	636~650	641	93.2

### 2.3 出水量

试验过程中, 通过使用水汽分离桶和电子称对真空预压过程中的出水量进行测定, 试验池累计出水量及出水速率见图 5、6。由试验结果可知: 1) 抽真空前期, 尤其是前几天, 日均出水量高达 100 kg 以上; 随着抽真空的进行, 出水量迅速衰减, 第 60 d 后日均出水量降至 10 kg 左右。2) 抽真空第 108~204 d 的出水量仅占总出水量的 3%。这些现象均与泥面沉降变化规律相一致, 并可以相互印证。

### 2.4 孔隙水压力

采用压入法在吹填流泥 40、100 cm 深度处埋设振弦式孔压计, 抽真空期间超静孔压时程曲线见图 7。由试验结果可知: 1) 40、100 cm 深度

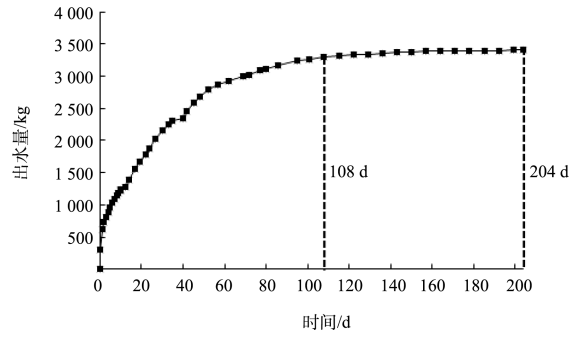


图 5 累计出水量随时间变化曲线

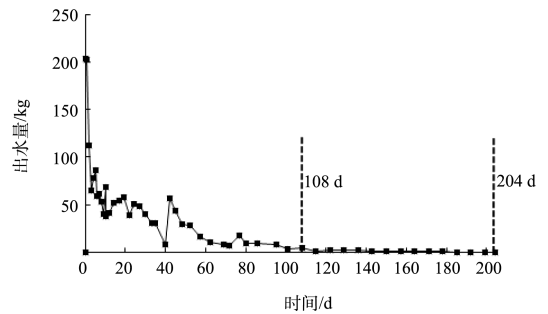


图 6 出水速率随时间变化曲线

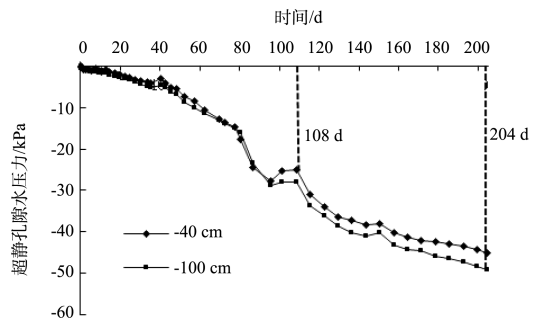


图 7 超静孔隙水压力时程曲线

处超静孔隙水压力变化规律基本相同; 超静孔隙水压力的变化特征可分为两个阶段, 即前期排水期、中后期结构形成期。在抽真空初期, 如前所述, 出水量及泥面沉降均较大; 但此时吹填流泥的含水量仍然很高, 土体含有大量的自由水, 土颗粒悬浮在水中, 呈泥水混合物状态; 此阶段土体总应力几乎全部由孔隙水压力承担, 孔压的减小仅仅是排出的自由水使得孔压计上部土重减小, 总应力减少所致。到了真空预压中后期, 大部分自由水被排出, 土颗粒相互接触, 土骨架开始承担压力; 此阶段土体有效应力迅速增大, 在总应力变化不大的情况下, 孔压也迅速降低; 由于土颗粒与结合水的相互吸附作用, 土体排水已相当困难; 导致出水量及泥面沉降的变化均很缓慢。

2) 抽真空第 108~204 d 期间的超静孔隙水压力变化仍然较快, 其变化值占试验期间超静孔隙水压力总变化值的 36%。

### 2.5 含水率

试验结束后加固土体厚度约为 1.1 m, 取排水板中间(即离排水板水平距离最远处)进行含水率试验, 含水率沿深度变化关系见图 8。由试验结果可知: 1) 含水率呈随深度增加而增大的趋势。2) 抽真空第 108~204 d 期间的含水率仅降低 1%。这一现象与泥面沉降、出水量变化规律相一致, 并可以相互印证。

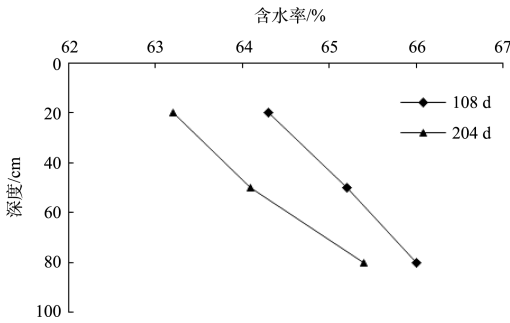


图 8 不同深度的土体含水率

### 2.6 十字板抗剪强度

十字板抗剪强度试验检测点均在排水板间, 十字板抗剪强度变化曲线见图 9、10。由试验结果可知: 1) 十字板抗剪强度呈随深度增加而减小的趋势。2) 抽真空第 108~204 d 期间的十字板抗剪强度变化仍然较快, 其变化值占试验期间总十字板抗剪强度值的 31%。这可能是因为在真空预压后期, 在真空压力的作用下, 由于土颗粒间位置及接触方式的调整, 土体结构性强度逐渐增强的缘故。满足卸载要求后, 在出水量及泥面沉降的变化均很缓慢的情况下, 土体强度仍在增长。

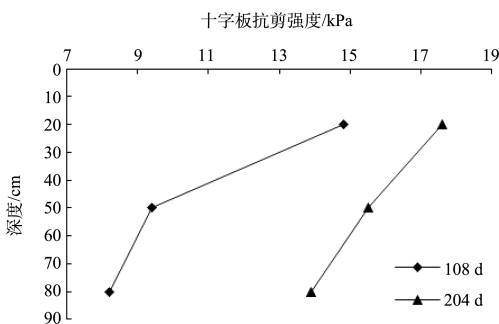


图 9 不同深度的土体十字板抗剪强度  $C_u$

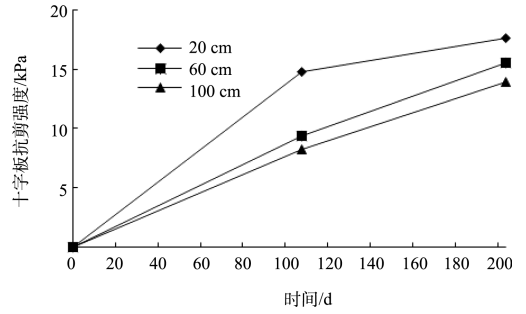


图 10 十字板抗剪强度增长曲线

## 3 真空预压加固吹填流泥强度增长特征

### 3.1 真空预压强度增长理论公式

只有有效应力的变化才能引起强度的变化, 依据库伦公式可得强度增长公式:

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma' \tan\varphi_{c_u} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\sigma'$  为有效应力增量;  $\varphi_{c_u}$  为  $c_u$  试验得出的土体内摩擦角。

魏汝龙<sup>[8]</sup>基于有效固结应力法认为  $\tan\varphi_{c_u}$  代表土的强度随着破坏面上的法向总应力而增长的速度 ( $\tan\varphi_{c_u} = \tau_f / \sigma_{nf}$ )。将这样定义的  $\tan\varphi_{c_u}$  作为固结不排水强度指标显然是不合适的, 因此建议采用  $\tan\varphi_{c_q} = \tau_f / \sigma_c$  作为固结不排水强度指标更为恰当。由推导可得:

$$\tan\varphi_q = (1 + \sin\varphi_{c_u}) \tan\varphi_{c_u} \quad (2)$$

因此计算真空预压强度增长理论公式为:

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma' (1 + \sin\varphi_{c_u}) \tan\varphi_{c_u} \quad (3)$$

### 3.2 有效应力增量计算

依据有效应力原理, 可得抽真空前、抽真空任一时刻的有效应力:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - \mu_0 \quad (4)$$

$$\sigma'_t = \sigma_t - \mu_t \quad (5)$$

由式(4)、(5)相减可得:

$$\Delta\sigma' = \sigma'_t - \sigma'_0 = (\sigma_t - \sigma_0) - (\mu_t - \mu_0) \quad (6)$$

式中:  $\sigma_0$ 、 $\mu_0$  为抽真空前计算点处的总应力和孔隙水压力;  $\sigma_t$ 、 $\mu_t$  为抽真空任一时刻计算点处的总应力和孔隙水压力;  $\mu_t - \mu_0$  即为超静孔隙水压力(图 7)。

$$\sigma_t - \sigma_0 = \rho_t g h_t - \rho_0 g h_0 \quad (7)$$

式中:  $h_0$ 、 $h_t$  为抽真空前和抽真空任一时刻计算点距泥面的深度;  $\rho_0$ 、 $\rho_t$  为抽真空前和抽真空任一时刻计算点以上土体平均密度。

考虑本次试验加固土体厚度不大, 且不同深度含水率相差不大(图 8), 计算时假定土体不同深度的密度、压缩率相同, 则  $\rho_t$  可依据泥面沉降及出水量监测数据反算含水率, 并通过经验公式<sup>[9]</sup>(式 8) 计算得到:

$$\rho g = 32.4 - 9.07 \lg w \quad (8)$$

同时, 可得:

$$\begin{cases} h_t = (1 - \zeta) h_0 \\ \zeta = s_t / H \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $s_t$  为任一时刻的泥面沉降;  $H$  为加固土体厚度;  $\zeta$  为土体压缩率, 可通过泥面沉降计算(图 4)。最后, 将式(7)、(9)代入式(6), 可得有效应力增长公式:

$$\Delta \sigma' = h_0 [(1 - \zeta) \rho_t g - \rho_0 g] - (\mu_t - \mu_0) \quad (10)$$

通过式(10)可得真空预压期间 40、100 cm 深度处有效应力变化曲线(图 11)。

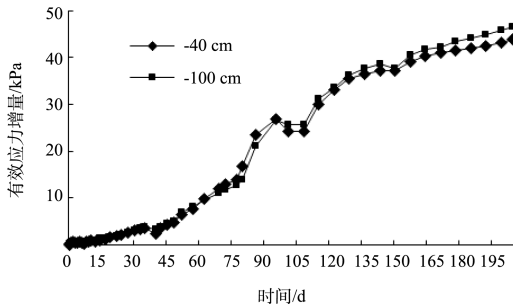


图 11 有效应力增量时程曲线

### 3.3 强度增长规律性计算分析

依据固结快剪试验结果, 取  $\varphi_{cu} = 12^\circ$  代入式(3), 可得真空预压过程中 40、100 cm 深度处不排水抗剪强度时程曲线(图 12)。由计算结果可知: 1) 抽真空前 42 d, 土体不排水抗剪强度均在 1 kPa 以下。表明: 抽真空初期, 土体含有大量的自由水, 土颗粒悬浮在水中, 呈泥水混合物状态, 土体几乎无强度。因此, 可将十字板抗剪强度增长曲线(图 10)前 42 d 的十字板抗剪强度修正为 0, 见图 12。2) 修正后的实测十字板抗剪强度的变化规律与计算值较为符合, 且计算值略小于实测值。3) 抽真空 7 个月卸载时土体强度增长趋势仍未趋于收敛。4) 100 cm 深度的计算值略大于 40 cm 深度的计算值, 这可能是由于公式的假设条件及真空预压加

固土体的不均匀性造成的。

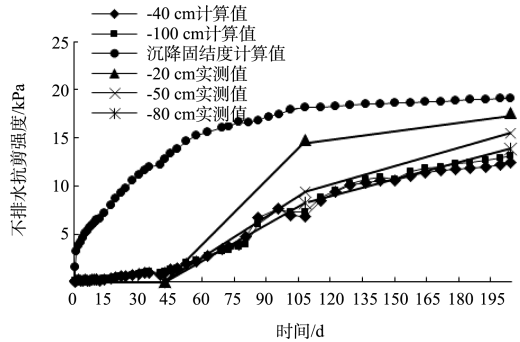


图 12 不排水抗剪强度时程曲线

工程中通常使用沈珠江等<sup>[10-11]</sup>提出的有效固结应力法及相应的强度增长公式研究土体强度增长规律:

$$\Delta \tau_{fc} = \sigma_z U (1 + \sin \varphi_{cu}) \tan \varphi_{cu} \quad (11)$$

式中:  $\sigma_z$  为堆载在土体中产生的竖向主应力;  $U$  为土体固结度。

在实际工程中<sup>[12]</sup>, 常把真空预压施加的荷载等同于相同大小的堆载作用进行简化处理; 而固结度通常使用根据沉降数据推求的沉降固结度。将上述数据代入式(11), 可得不排水抗剪强度计算值(图 12)。由计算结果可知: 由于未考虑吹填流泥高含水率、几乎无强度的特征, 依据沉降固结度计算的不排水抗剪强度增长规律与泥面沉降一致, 呈前期快、中后期慢的特征。因此, 在真空预压加固吹填流泥工程中, 考虑吹填流泥特殊的物理力学性质, 计算时不宜采用沉降固结度。

## 4 真空预压加固吹填流泥卸载标准

### 4.1 卸载标准

JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》对真空预压加固卸载标准要求如下: 1) 沉降-时间曲线达到收敛, 实测地面沉降速率连续 5~10 d 平均沉降量小于或等于 2 mm/d。2) 真空预压所需的固结度宜大于 85%~90%, 沉降要求严格时取高值。3) 加固时间不小于 90 d。但是, 许多工程实践表明, 新近吹填流泥用真空预压处理后, 其沉降速率、固结度及加固时间均已满足规范要求, 但加固后的强度相对较小, 承载力难以满足场地基使用要求, 需要进行二次处理<sup>[13]</sup>。因此, 结合

上述真空预压加固吹填流泥强度增长规律的实测及计算结果,建议在满足上述卸载标准的前提下,宜采用十字板抗剪强度、静力触探等原位试验进行自检,以判定加固土体的强度及承载力是否满足合同要求,确定是否可以停泵卸载。

### 4.2 工程实例

试验区位于温州某吹填造陆工程场地中,吹填土深度在 3.8~4.2 m,初始含水率为 100%左右;试验区面积为 100 m×30 m,采用 A 型排水板,排水板间距 60 cm,正方形布置,打设深度 4 m;试验区布置 3 台 7.5 kW 射流泵。

整个场地于 2013 年 7 月 4 日开始抽真空,7 月 13 日膜下真空度稳定在 80 kPa;10 月 11 日在加固区进行两组原位十字板试验(分别为测试点 1 与测试点 2)。之后继续抽真空至 2013 年 11 月 29 日停泵,并在测试点 1 与测试点 2 处进行原位十字板试验及载荷板试验。值得注意的是,十字板抗剪强度试验检测点均在排水板中间(即离排水板水平距离最远、加固效果最差处)。膜下真空度时程曲线见图 13,加固中及加固后不同深度的土体十字板抗剪强度  $C_u$  见图 14,载荷板的载荷-沉降曲线见图 15。

对于黏性大、排水条件差的饱和软黏土地基,可按  $\varphi_0=0$  法求极限承载力,极限承载力公式如下:

$$p_u = 5.14C_u \quad (12)$$

则地基承载力特征值为:

$$f_{ak} = \frac{5.14C_u}{F_s} \quad (13)$$

式中:  $p_u$  为地基极限承载力;  $f_{ak}$  为地基承载力特征值;  $F_s$  为安全系数。

载荷板试验承压板为边长 70.7 cm、面积 50 cm<sup>2</sup> 的方形板,考虑浅层载荷板试验一般用于测定地基承压板下 1.5~2.0 倍承压板的宽度或直径深度的承载力,计算用十字板抗剪强度  $C_u$  取 0.5、1.0 m 深度两测试点的均值。通过公式(13)及实测十字板抗剪强度、地基承载力反算安全系数  $F_s$ ,建立十字板抗剪强度与地基承载力特征值之间的关系(表 3)。

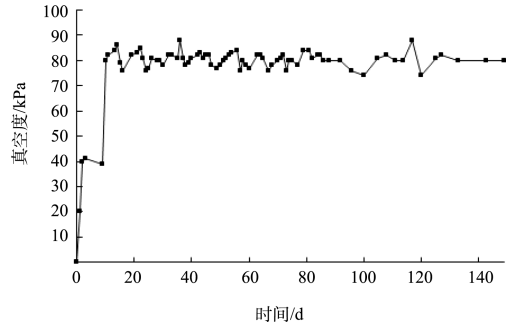


图 13 膜下真空度时程曲线

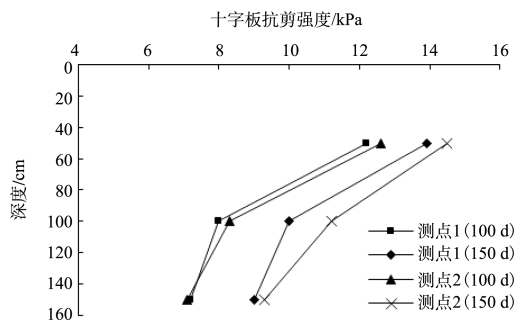
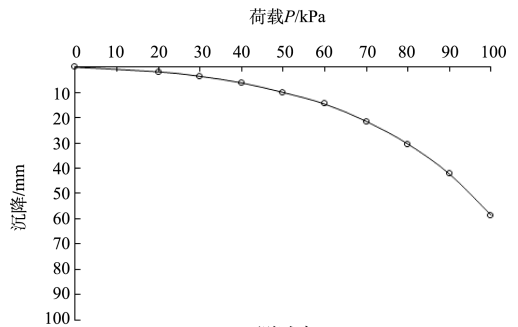
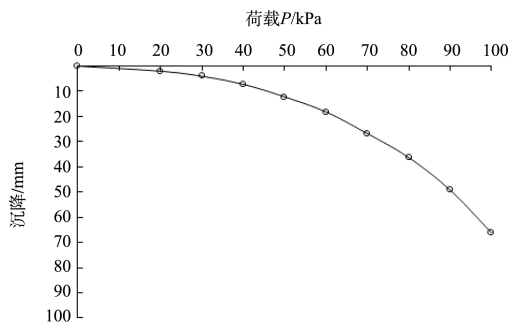


图 14 试验区不同深度的土体十字板抗剪强度  $C_u$



a) 测试点1



b) 测试点2

图 15 载荷-沉降曲线

表 3 安全系数反算结果

测试点	十字板抗剪强度 $C_u$ /kPa		承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa	安全系数 $F_s$
	100 d	150 d		
1	10.1	12.0	54	1.14
2	10.5	12.9	59	1.12

注: 1. 承载力特征值  $f_{ak}$  通过载荷板试验确定。2. 十字板抗剪强度  $C_u$  为 0.5、1.0 m 深度处的均值。

由反算结果可知: 安全系数仅为 1.14, 小于一般软土地基的安全系数<sup>[14-15]</sup> ( $F_s = 1.5 \sim 2.5$ )。为研究其安全系数较小的原因, 试验结束后, 在测点 1、测点 2 附近通过直接挖土的方式, 测定了 50 cm 深度处距离排水板不同水平距离的土体含水率(图 16)。由试验结果可知: 在最靠近排水板处, 土体含水率仅为 42%左右; 距排水板 10 cm 内的土体含水率增长很快; 而距排水板 10~35 cm 范围内(35 cm 为距离排水板最远处), 土体含水率变化相对较小, 最大含水率为 54.28%。同时, 现场十字板抗剪强度数据也显示, 土柱部位的十字板抗剪强度可达 25 kPa 以上; 而排水板间土体的抗剪强度一般较低(图 9、14)。由此可见: 真空预压处理后吹填土地基不同位置的抗剪强度及含水率有较大的离散性, 可以将真空预压加固后的地基作为一种复合地基考虑, 其土柱为竖向加筋体。利用十字板抗剪强度计算的地基承载力仅表征该测试点处的地基承载力(本次测试点为  $C_u$  最小处), 而地基承载力表征基础下一定宽度和深度范围内的一个综合指标, 使得反算的安全系数较小。

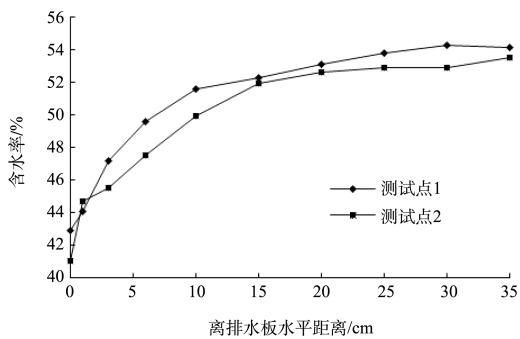


图 16 距排水板不同水平距离的土体含水率

合同规定的验收标准为: 1.5 m 深度范围内的承载力特征需达到 50 kPa, 1.5 m 以下深度范围的承载力特征需达到 40 kPa。取安全系数  $F_s = 1.15$ , 通过反算可得表 4。因此, 施工方可利用十字板试验进行自检, 当 1.5 m 深度范围内的十字板抗剪

强度不小于 11.2 kPa、1.5 m 以下深度十字板抗剪强度不小于 8.9 kPa 即可卸载。

表 4 十字板抗剪强度评价地基承载力

深度	承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$	安全系数 $F_s$	十字板抗剪强度 $C_u/\text{kPa}$
1.5 m 内	50	1.15	$\geq 11.2$
1.5 m 以下	40		$\geq 8.9$

## 5 结语

1) 真空预压加固吹填流泥变形及强度增长规律可分为两个阶段: ①排水期。吹填流泥的固结过程主要为排出土体中的自由水, 出水量及泥面沉降均较大, 孔压增长缓慢, 土体几乎无强度。②结构形成期。土体有效应力迅速增大, 孔压也迅速降低, 出水量及泥面沉降变化速率开始变缓。

2) 运用有效固结应力法强度增长计算公式结合监、检测数据推算了吹填流泥强度增长过程; 理论计算的强度增长规律符合现场实测强度增长规律; 真空预压前期土体几乎无强度, 真空预压中后期强度增长较快。

3) 抽真空 108 d 土体沉降速率、沉降固结度及预压时间均已满足规范规定的卸载标准; 但之后继续抽真空, 强度仍有较大增长; 抽真空 7 个月卸载时土体强度增长趋势仍未趋于收敛。真空预压加固吹填流泥强度增长的这些特点在真空预压工程设计及施工中应引起重视, 应综合考虑强度增长规律及工程经济性合理确定预压时间及卸载标准。

4) 结合各项监测指标均已满足规范要求的卸载标准, 而地基强度相对较小、承载力难以满足场地使用的现状, 通过现场试验, 建立了地基承载力特征值与十字板强度之间的关系, 建议采用十字板试验进行自检以判定地基是否可以卸载。同时, 考虑土体含水率随着距排水板水平距离的增加而迅速增大的特点, 设计中可采用减少排水板间距的措施, 以缩短加固时间、改善加固效果。

(下转第 162 页)