

# 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究

徐 宏<sup>1,2</sup>, 邓学均<sup>1</sup>, 齐永正<sup>2</sup>, 赵维炳<sup>3</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 210017; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 软土抗剪强度增长规律性研究对真空预压法的推广应用具有重要意义。工程试验现场加固前、加固中及加固后分别进行了十字板剪切试验, 试验结果表明: 真空预压前期软土强度迅速增长, 真空预压后期强度增长缓慢。分析了真空预压排水固结强度增长机理, 运用有效固结应力法强度增长计算公式结合工程土体相关参数对真空预压排水固结强度增长规律性进行了验证, 理论计算真空预压软土强度增长规律性符合现场实测强度增长规律性。运用有限元模拟了试验工程真空预压全过程, 有限元模拟结果推算的真空预压软土强度增长规律性亦表现出真空预压前期软土强度增长速度远远快于真空预压后期, 真空预压排水固结软土强度不是均匀增长而是非线性增长, 且真空预压软土强度不能无限增长, 随着真空预压时间的增加软土强度增长逐渐趋于极值。真空预压软土强度增长的这些特点在真空预压及真空-堆载联合预压工程设计及施工中应引起重视, 避免工程事故及不必要的浪费。

**关键词:** 真空预压; 排水固结; 剪切强度; 增长规律性

中图分类号: TU447, TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)02-0285-06

**作者简介:** 徐 宏(1966-), 男, 江苏滨海人, 博士研究生, 研究员级高级工程师, 主要从事软基基础理论及工程实践方面的研究。E-mail: [xh@ti.js.cn](mailto:xh@ti.js.cn)。

## Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading

XU Hong<sup>1,2</sup>, DENG Xue-jun<sup>1</sup>, QI Yong-zheng<sup>2</sup>, ZHAO Wei-bing<sup>3</sup>

(1. Transportation College of Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Traffic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The study on development of the shear strength of soft clay is very significant for the use of vacuum preloading method. The vane shear tests are carried out before, during and after the vacuum preloading. It is shown that the shear strength increases rapidly in the early stage of the vacuum preloading, but slowly in the late stage. The growth mechanism of the shear strength under the vacuum preloading is analyzed. The law of the shear strength growth under the vacuum preloading is verified by using the shear strength calculation equation based on the effective consolidation stress method and parameters of soft clay. The process is simulated by use of FEM, showing that the shear strength of soft clay in the early stage under the vacuum preloading increases faster than that in the late stage, and that the shear strength of soft clay increases not linearly but non-linearly, and that the shear strength of soft clay increases unlimitedly. The characteristics of the shear strength growth under the vacuum preloading should be paid attention to sufficiently in the engineering design and construction using the vacuum preloading method or vacuum-combined surcharge preloading method.

**Key words:** vacuum preloading; drainage consolidation; shear strength; development

## 0 前 言

真空预压是软土地基加固非常有效的措施之一。近年来, 相关的理论研究和技术创新均取得丰硕成果, 如真空预压加固机理、本构模型的完善和沉降计算、数值模拟方法的改进, 施工工艺等<sup>[1-6]</sup>, 对真空预压排水固结加固软基强度计算方法进行了有益的探讨<sup>[4-5, 7-10]</sup>。但对于真空预压加固期间软基强度增长规律性方面的认识尚不清楚。比如在真空预压加固期间软土强度是均

匀增长还是非均匀增长, 是前期增长快还是后期增长快。这些问题往往在真空预压实际应用中产生一定的误解, 引起人们对真空预压期间强度增长规律性方面的关注。该文对真空预压排水固结加固软基期间强度增长规律性进行了重点研究, 具有一定的工程实用意义。

收稿日期: 2008-09-28

1 试验概况

某真空预压加固软基处理试验工程, 加固区南北长为 136 m, 东西宽为 118 m, 加固区域总面积约为 16048 m<sup>2</sup>。塑料排水板采用 C 型板, 排水板按梅花形布置, 间距 1.0 m, 排水板的打设深度根据场地的地形和地质条件, 划分为 I、II、III、IV 共 4 个区域, 不同区域排水板的打设深度不同, 排水板打设深度区域 I 13 m, 区域 II 16~18 m, 区域 III 20 m, 区域 IV 18 m, 排水板分区如图 1 所示。现场原位试验十字板检测加固前后各 4 组, 加固期间 1 组, 静力触探加固前后各 6 组, 加固期间 1 组, 标准贯入加固前后各 3 组。

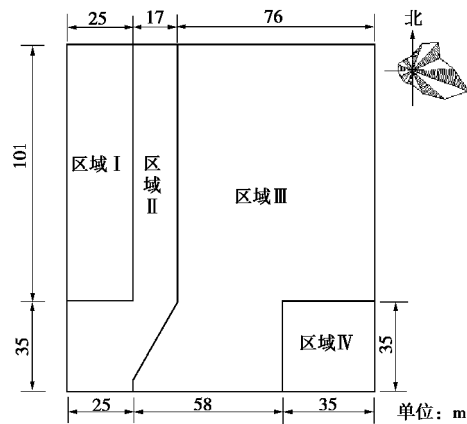


图 1 排水板打设分区示意图  
Fig. 1 Distribution of PVDS

现场采用 16 台 7.5 kW 射流泵。场地土层分布：  
①杂填土，层厚为 1.00~1.60 m；②-1 淤泥质粉质黏土，层厚 13.20~14.90 m；②-2 粉质黏土，层厚 2.30~4.60 m；③粉砂，未钻透。②-1 淤泥质粉质黏土层和②-2 粉质黏土层为需处理土层。地下水主要分为 2 个含水层。场地浅部为孔隙潜水，主要赋存于①杂填土中，稳定水位埋深为 0.40~1.30 m，水位主要受大气降水的影响，其下为承压水，主要赋存于③粉砂中，该含水层富水性好，透水性较强，水位变化主要受地下水的侧向径流补给影响。

整个场地于 2007 年 5 月 8 日开始抽真空, 5 月 13 日膜下真空度稳定在 80 kPa, 膜上覆水 1.4 m, 6 月 21 日在加固区进行一组原位十字板试验, 之后继续抽真空至 2007 年 8 月 13 日停泵, 膜下真空度变化曲线见图 2。各测点超静孔隙水压力历时曲线见图 3。在真空压力作用下, 塑料排水板深度范围内土层的孔隙水压力呈减小趋势。场地软土中 4.3~8.3 m 深夹粉土-粉砂呈透镜体, 埋层厚 0.7~3.8 m, 分布于②-1 中, 孔压监测结果发现地下 6~10 m 孔压下降幅度超过 2~4 m 的孔压下降幅度。真空预压加固前后土体孔隙比变化情况见图 4, 加固后的孔隙比比加固前的孔隙

比减小, 软基加固效果显著。

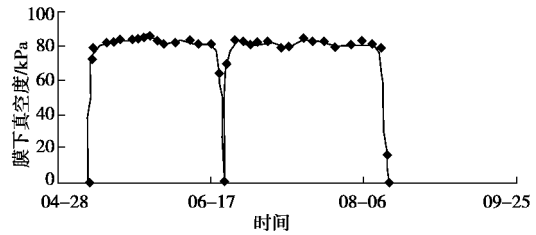


图 2 真空荷载施加曲线  
Fig. 2 Curves of vacuum loading

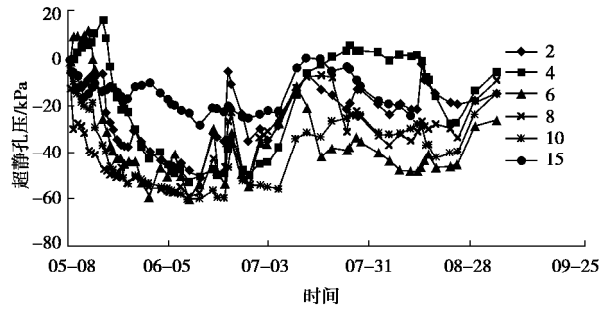


图 3 超静孔压历时曲线  
Fig. 3 Excess pore-water pressure vs. time

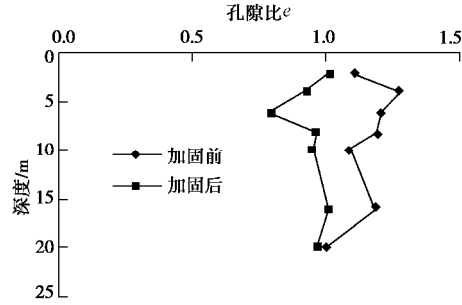


图 4 加固前后孔隙比变化曲线图  
Fig. 4 Variation of void ratio before and after vacuum preloading

2 现场原位十字板剪切试验强度结果

为了研究真空预压期间软基强度增长的规律性, 我们在加固期间即 6 月 21 日做了一组 (S1 孔) 原位十字板剪切试验。图 5 为真空预压加固前、加固期间及加固后 S1 处的十字板强度试验对比曲线, 图 6 为 S1 处十字板检测孔各深度强度增长曲线图, 图 7 为 S1 处十字板检测孔地基平均强度增长曲线。由图 5~7 中曲线可知, 真空预压过程中抽真空前期加固区软土强度增长较快, 而抽真空后期增长较慢, 预压前期软土强度增长快于预压后期。

根据现场检测数据分析 (见表 1, 计算至地面下 10 m 深), 真空预压 39 d 的软基平均强度增长幅度为 63%, 真空预压 92 d 的软基平均强度增长幅度为 95%, 即前 39 d 的软基平均不排水强度增长幅度为 63%, 平均增长速率为 1.62%/d; 后 53 d 的软基平均不排水强度增长幅度为 28%, 平均增长速率为 0.53%/d。

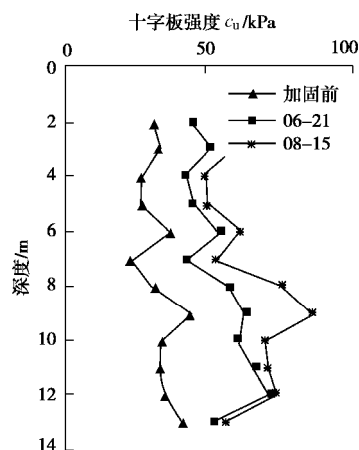


图 5 实测十字板剪切强度试验对比曲线

Fig. 5 Curves of shear strength from vane shear tests

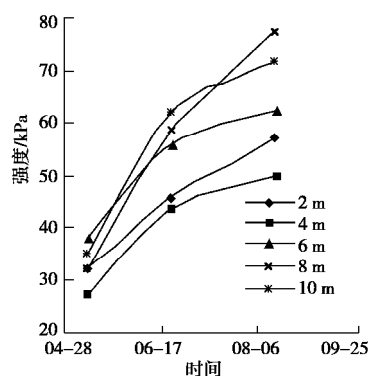


图 6 实测十字板剪切强度增长曲线

Fig. 6 Curves of shear strength growth from vane shear tests

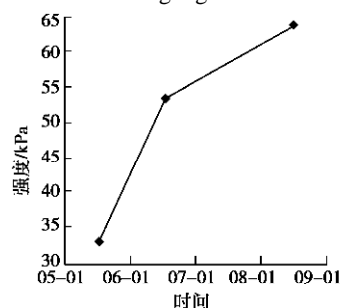


图 7 实测十字板平均强度增长曲线

Fig. 7 Curves of average shear strength growth from vane shear tests

表 1 原位十字板剪切试验强度结果

Table 1 The shear strength of the vane shear tests      kPa						
时间	深度					平均值
	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	
加固前	32	27	38	32	35	32.8
06 - 21	46	44	56	59	62	53.4
08 - 15	57	50	63	78	72	64.0

### 3 成果分析与讨论

#### 3.1 真空预压强度增长机理分析

真空预压加固土体是在等向压力下固结的, 在土体孔隙中形成的超孔隙水压力是负值,  $\Delta u < 0$ , 地基内有效应力增加各向相等, 加固的整个过程中总应力

不变, 即在  $(\Delta s = 0)$  的情况下发生发展。加固中降低的孔隙水压力就等于增加的有效应力, 见图 8。

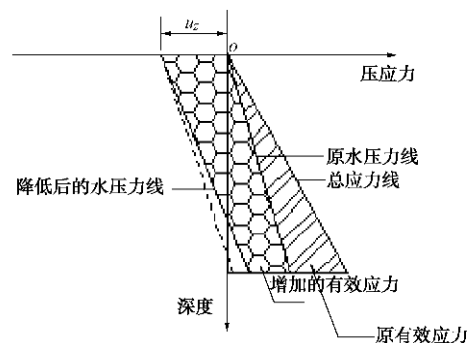


图 8 真空预压强度增长机理

Fig. 8 Mechanism of shear strength growth under vacuum preloading

真空预压强度增长摩尔应力圆如图 9 所示,  $D$  圆为加固前土体中某点的有效应力圆,  $D'$  圆为加固后的摩尔应力圆, 在真空预压过程中, 有效应力圆的直径不变, 位置沿横轴向右移动。当真空卸去后, 被加固的土体由正常固结状态变成超固结状态, 土体的强度沿超固结强度线  $EO'$  返回到  $F$  点,  $F$  点比  $E$  点有更高的强度。因此, 经过真空预压, 被加固的土体强度得到了提高。

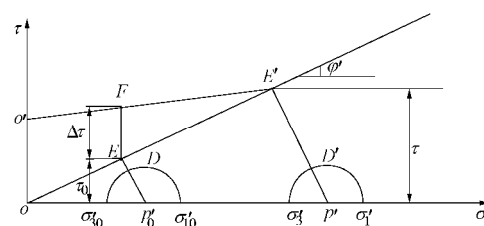


图 9 真空预压强度增长摩尔圆

Fig. 9 Stress circular of shear strength growth under vacuum preloading

沈珠江<sup>[11-12]</sup>提出了有效固结应力法及相应的强度增长计算公式:

$$\Delta t_{fc} = \Delta s_z U \tan j_{cu} \quad (1)$$

魏汝龙等<sup>[13]</sup>基于有效固结应力法认为  $\tan j_{cu}$  代表土的强度随着破坏面上的法向总应力而增长的速率 ( $\tan j_{cu} = t_f / s_{nf}$ )。将这样定义的  $\tan j_{cu}$  作为固结不排水强度指标显然是不合适的, 因为后者应该代表不排水强度随着固结应力而增长的速率。因此建议采用  $\tan j_{cq} = t_f / s_c$  作为固结不排水强度指标更为恰当, 它与  $\tan j_{cu}$  的关系见图 10。

$j_{cu}$  和  $j_{cq}$  之间存在几何关系, 由图 10 推导可得:

$$\tan j_{cq} = (1 + \sin j_{cu}) \tan j_{cu} \quad (2)$$

因此魏汝龙建议计算固结不排水强度公式为

$$\Delta t_{fc} = \Delta s_z U (1 + \sin j_{cu}) \tan j_{cu} \quad (3)$$

式中,  $\Delta s_z$  为堆载在土体中产生的竖向主应力,  $U$  为土体固结度,  $j_{cu}$  为 CU 试验得出的土体内摩擦角。

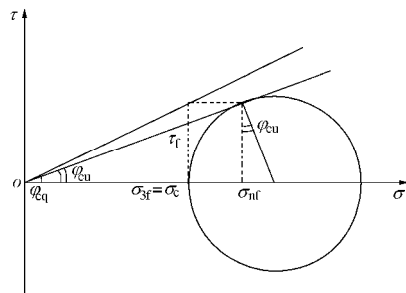


图 10  $j_{cq}$  与  $j_{cu}$  之间的关系示意图

Fig. 10 Relationship between  $j_{cq}$  and  $j_{cu}$

3.2 真空预压强度增长规律性计算分析

工程应用中通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, 本文采用式 (3) 分析真空预压排水固结软基强度增长的规律性。

根据实测沉降曲线推算出真空预压 39 d 与 92 d 的地基固结度分别为 83.5% 和 93.94%, 对于大面积真空预压等同于大面积堆载, 则式 (3) 中地基各深度处  $\Delta S_z$  可近似取为真空压力约 80 kPa。

表 2 为地下 2, 6, 10 m 深度处计算的真空预压加固期间软基强度增长值。

表 2 理论计算软基强度增长结果

Table 2 Calculated values of shear strength growth						
计算 点深 度	$j_{cu}$ /( $^{\circ}$ )	06 - 21		08 - 15		计算 强度 增长 值 /kPa
		平均 固结 度 $U_t$	$\Delta S_z$ /kPa	平均 固结 度 $U_t$	$\Delta S_z$ /kPa	
2 m	15.9	83.5	80	24.3	93.94	80
6 m	17.4	83.5	80	27.4	93.94	80
10 m	18.3	83.5	80	29.1	93.94	80
平均值				26.9		30.3

表 3 为真空预压加固前、加固中及加固后的理论计算强度值。图 11 为理论计算强度增长曲线图。

表 3 理论计算强度结果

Table 3 Calculated values of shear strength kPa				
时间	深度			平均值
	2 m	6 m	10 m	
加固前	32.0	38.0	35.0	32.8
06 - 21	56.3	65.4	64.1	61.9
08 - 15	59.3	68.8	67.7	65.3

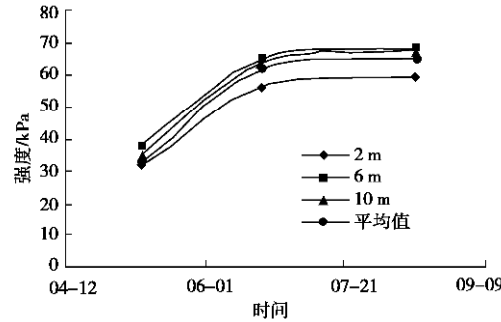


图 11 计算软基强度增长曲线

Fig. 11 Curves of calculated shear strength growth

由计算得出的强度增长曲线可以看出, 真空预压加固期间加固前期软土强度增长速度远远快于加固后期的强度增长速度。

4 FEM 模拟分析真空预压软基强度增长规律性

本次数值模拟对象采用上述实测数据。按实体 1 : 1 进行模拟, 采用二维平面模型。单元模型采用平面应变孔压单元类型 (CPE8RP), 8 结点二次缩减积分四边形网格划分, 各层土体按实际模量输入, 采用 ABAQUS 非线性软件进行数值模拟。

4.1 塑料排水板 (砂井) 转化为砂墙的方法

由于塑料排水板 (砂井) 本身细而长, 对整个砂井群地基进行精确的三维有限元分析所花费的工作量相当巨大, 甚至是不可能完成的。所以有必要将含竖向排水体地基固结按平面应变问题来处理。本文采用赵维炳提出的考虑涂抹作用的砂墙地基平面应变有限元方法, 将三维问题简化为二维平面问题。如图 12 所示, 通过在平面应变有限元计算时调整砂井地基的实际渗透系数来实现。

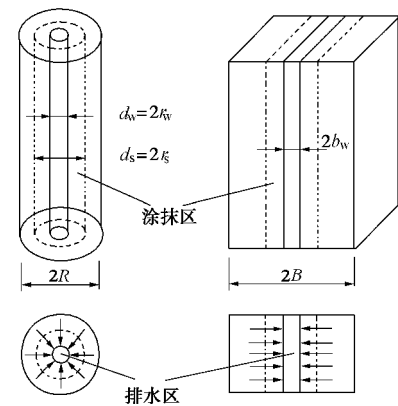


图 12 轴对称砂井转换为平面应变砂墙

Fig. 12 Method of sand drain transformed into sand wall

其等效方法如下:

$$\left. \begin{aligned} k_{xp} &= D_x k_{ra} \\ k_{zp} &= D_z k_{za} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $k_{xp}$ ,  $k_{zp}$  分别为砂墙地基的水平 and 垂直向渗透系数;  $k_{ra}$ ,  $k_{za}$  分别为砂井地基的水平 and 垂直向渗透系数; 水平和垂直向渗透系数的调整系数分别为

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \frac{4(n_p - s_p)^2 (1+n)L^2}{9n_p^2 m_a - 12(1+n)b(n_p - s_p)(s_p - 1)L^2} \\ D_z &= \frac{2(1+n)}{3} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中,  $n_p = B/r_{wp}$ ,  $B$  为 1/2 砂墙间距,  $r_{wp}$  为 1/2 砂墙厚度,  $s_p = r_{sp}/r_{wp}$ ,  $r_{sp}$  为 1/2 砂墙涂抹区宽度,  $v$  为泊松比,  $L = B/r_c$ , 为砂井间距放大因数,  $r_c$  为砂

井的有效排水区半径,  $b = k_{ra}/k_s$  为渗透系数涂抹损失比,  $k_s$  为涂抹区渗透系数,  $m_a$  为与井径比  $n = r_e/r_w$  ( $r_w$  为砂井半径)、涂抹半径比  $s = r_s/r_w$  ( $r_s$  为涂抹区半径) 以及  $b$  有关的计算参数,

$$m_a = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s \quad (6)$$

为考虑砂井阻力对真空度传递和孔隙水渗流的影响, 计算中将砂井剖分成砂墙单元并参与计算, 砂垫层内各结点孔隙水压力作为已知值并等于真空度 (负值)。

4.2 计算模型分析

塑料排水板加权平均深度为 18.2 m, 根据土质条件及真空预压的影响范围, 地基的计算宽度为 119 m, 其中 59 m 是加固区, 60 m 是影响区。按土质条件及真空预压的影响深度, 计算深度取 26 m。等效井径按  $d_w = 2(a+b)/\pi$  计算得  $r_w = 6.6$  cm。考虑到计算的方便, 取加固区的一半进行研究。计算中土层采用修正剑桥模型, 排水板采用线弹性模型, 变形模量和重度取与同层土的参数一致, 模型参数见表 4。

整个试验段的加载过程, 共分为施加真空荷载、卸除真空荷载两个步骤。根据真空预压加固地基的工程实际情况, 将真空荷载分为 3 个子步, 进行分级施加: ①第一步施加真空荷载, 时间步为 5 d; ②第二步恒载 80 kPa, 时间步为 92 d; ③第三步为卸除真空荷载, 时间步 6 d。由工程地质勘察报告知该场地为超固结软黏土, 因此计算前需进行地应力平衡, 即施加先期固结压力后地表沉降应为零, 地应力平衡后再施加真空压力及覆水荷载进行数值计算。

4.3 计算结果与分析

经过有限元模拟计算, 加固区中心地表随时间沉降曲线如图 13 所示。从图中曲线可以看出, 因为计算模型、计算参数与实际情况存有一定误差, 因此不能完全模拟实际土体的应力 - 应变关系, 但真空预压固结有限元计算的结果还是令人满意的。

图 14 为 FEM 模拟结果代入软基强度计算公式 (3) 计算得出的真空预压排水固结地面下 2 m, 6 m 软基强度增长时程曲线。

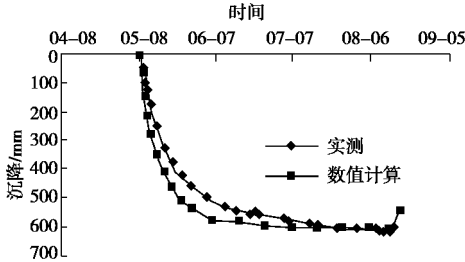


图 13 加固区中心表面沉降量 - 时间曲线  
Fig. 13 Relationship between surface settlement and time of improvement center

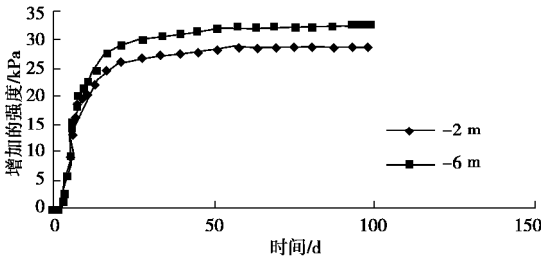


图 14 地基强度增长曲线  
Fig. 14 Curves of shear strength growth of soft clay

由图 14 中曲线可见, 软土强度在真空预压前期迅速增长, 真空预压后期, 软土强度增长逐渐减缓, 随着加固时间的增加软土强度增长逐渐趋向极限。

图 15 为地下 2 m 处 FEM 模拟计算的软土强度增长曲线与实测结果推算的软基强度增长曲线对比图, 图中“计算值”为根据数值模拟计算的强度增长曲线, 图中“实测值”为根据现场实测结果推算的强度增长曲线, 图中曲线显示了真空预压排水固结强度增长的规律性, 即真空预压前期软基强度增长幅度很大, 后期强度增长幅度逐渐减小, 随着加固时间增加, 强度增长趋于极值。

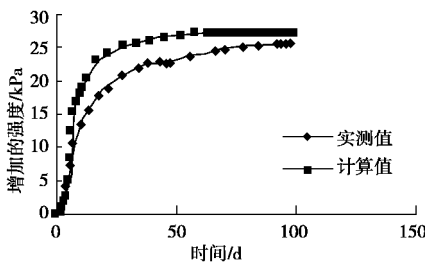


图 15 - 2 m 处地基强度增长曲线对比图  
Fig. 15 Comparison between observed and calculated shear strengths

表 4 模型计算参数

Table 4 Parameters of soft clay

土层	$g/(kN \cdot m^{-3})$	$E/MPa$	$\nu$	$I$	$k$	$M$	$e_0$	$k_x/(cm \cdot s^{-1})$	$k_y/(cm \cdot s^{-1})$
填土	18.0	3.00	0.30	0.123	0.010	1.126	1.160	$45 \times 10^{-5}$	$6.0 \times 10^{-5}$
淤泥质粉质黏土	17.3	3.00	0.30	0.143	0.021	0.992	1.206	$54.9 \times 10^{-6}$	$8.03 \times 10^{-9}$
粉质黏土	17.5	4.89	0.30	0.115	0.012	1.104	1.083	$56.7 \times 10^{-6}$	$7.67 \times 10^{-6}$
粉砂	18.4	7.94	0.3	0.09	0.01	1.0	0.827	$419 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$

## 5 结 论

(1) 根据加固前、加固中、加固后现场原位十字板剪切试验强度结果可知, 真空预压加固软基期间, 真空预压前期软土强度增长迅速, 真空预压后期软土强度增长缓慢, 前期软土强度增长快于后期。

(2) 强度理论增长计算公式计算的真空预压软土强度增长规律性与现场实测的强度增长规律性一致, 真空预压早期强度增长快, 后期增长较慢。

(3) FEM 模拟分析结果表明真空预压加固软基随着真空预压时间的增加, 软基强度增长由前期的迅速增长逐渐发展到后期的缓慢增长并最终趋于极值, 真空预压排水固结软基强度不是均匀增长, 而是非线性增长, 同时软基强度也不能无限增长。

### 参考文献:

- [1] 闫澍旺, 陈 环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, 7(2): 35 - 44. (YAN Shu-wang, CHEN Huan. Mechanism and calculation methods of vacuum stabilization of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 7(2): 35 - 44. (in Chinese))
- [2] 赵维炳. 砂井地基固结分析半解析解方法的改进[J]. 岩土工程学报, 1991, 12(4): 51 - 58. (ZHAO Wen-bing. Improvement of semi-analytic method for consolidation of foundation with sand drains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 12(4): 51 - 58. (in Chinese))
- [3] LEONG E C. Soil improvement by surcharge and vacuum preloading[J]. Geotechnique, 2000(5): 601 - 605.
- [4] 娄 炎. 真空预压加固软基技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 22 - 28. (LOU Yan. Technique of vacuum preloading improving soft foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 22 - 28. (in Chinese))
- [5] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (CEN Yang-run. Vacuum preloading: experiment and theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [6] 彭 劼. 真空 - 堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (PENG Jie. Study on improvement mechanism and computation theory of vacuum combined surcharge preloading[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [7] 麦远俭. 真空预压加固中软黏土不排水剪切强度的增长[J]. 水运工程, 1998(12): 53 - 57. (MAI Yuan-jian. Total stress shear strength increment of soft clay under vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 1998(12): 53 - 57. (in Chinese))
- [8] 张志允. 堆载预压法和真空预压法加固机理的比较研究[J]. 岩土工程界, 2002, 5(11): 24 - 26. (ZHANG Zhi-yong. Study on mechanics of surcharge and vacuum preloading[J]. Geotechnical Engineering World, 2002, 5(11): 24 - 26. (in Chinese))
- [9] 付天宇. 真空预压下地基抗剪强度计算的研究[J]. 岩土工程界, 2005, 9(6): 27 - 29. (FU Tian-yu. Study on calculation of shear strength of soil foundation under vacuum preloading [J]. Geotechnical Engineering World, 2005, 9(6): 27 - 29. (in Chinese))
- [10] 赵明华. 真空预压土体强度增长机理及其计算方法研究[J]. 勘察科学技术, 2006(1): 3 - 5. (ZHAO Ming-hua. Study on mechanism and calculation of shear strength of soil body consolidated by vacuum preloading[J]. Site Investigation Science and Technology, 2006(1): 3 - 5. (in Chinese))
- [11] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 108 - 110. (SHEN Zhu-jiang. The behavior of soft soil and the design of soft-clay foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 108 - 110. (in Chinese))
- [12] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的黏土土压力公式[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 353 - 356. (SHEN Zhu-jiang. The equation of clay soil pressure based on the theory of the effective consolidation stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 353 - 356. (in Chinese))
- [13] 魏汝龙, 张 凌. 稳定分析中的强度指标问题[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(5): 24 - 30. (WEI Ru-long, ZHANG Ling. The parameter of the shear strength in the stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(5): 24 - 30. (in Chinese))