

# 石灰对真空预压加固高含水率淤泥效果影响 试验研究

占宏<sup>1</sup>, 李晗峰<sup>2</sup>, 翁振奇<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学 工程设计集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州交通投资建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 311301;  
3. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 针对石灰添加剂和真空预压联合处理高含水率淤泥过程中石灰的作用尚不明确的问题, 本文采用改进的真空预压室内试验对未经石灰处理和经石灰处理后的高含水率淤泥在自重沉降以及真空预压阶段的沉降、真空度、孔隙水压力等进行分析。试验结果表明石灰处理会促使土颗粒絮凝成团, 增大土体的渗透性, 从而提高了真空预压的效率, 能显著提高土体的抗剪强度。

**关键词:** 石灰处理; 真空预压; 加固效果; 淤泥

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 2096-7195(2020)03-0192-04

## Experimental study on the effect of lime treatment on vacuum preloading to strengthen high water content muck

ZHAN Hong<sup>1</sup>, LI Han-feng<sup>2</sup>, WENG Zhen-qi<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University of Technology Engineering Design Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;  
2. Hangzhou municipal Communications Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 311301, China;  
3. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Considering the unclear role of lime in the process of lime treatment combined with vacuum preloading during the treatment of the high water content muck, this paper adopts improved lab model tests for natural soil samples and lime-treated soil samples under self-weight settlement and vacuum preloading. Soil settlement, vacuum degree, and pore water pressure during the test were analyzed. The test results showed that lime treatment could promote the flocculation of soil particles and increase the permeability of the soil, thereby improving the efficiency of vacuum preloading and increasing the shear strength of the soil.

**Keywords:** lime treatment; vacuum preloading; reinforcement effect; muck

## 0 引言

真空预压法是一种常见的软土地基处理方法。该方法被广泛应用于海涂围垦、机场、道路等各种工程的软土地基处理当中<sup>[1-4]</sup>。但是长期工程实践表明, 采用传统真空预压方法处理高含水率淤泥时, 其处理效果往往不尽如人意<sup>[5]</sup>。在高含水率淤泥真空预压的过程中, 土颗粒会发生迁移, 并逐渐汇聚在排水板周围形成致密的“土柱”<sup>[6]</sup>。同时在真空预压的过程中, 细小的土颗粒会在排水板滤膜孔隙中聚集, 导致排水板滤膜的渗透性下降, 进一步降

低真空预压的效率。将石灰作为添加剂与真空预压结合的新型地基处理方式是近年来出现用于解决真空预压排水板淤堵问题的新办法<sup>[7]</sup>。现有研究主要集中在石灰处理对土体渗透性的影响<sup>[8]</sup>, 然而石灰处理不仅影响淤泥的渗透性, 对淤泥的力学性质也有一定的影响。针对石灰处理对真空预压综合效果影响的相关试验研究较少。本文采用室内试验对石灰处理和真空预压联合处理高含水率淤泥进行研究, 分别在自重固结阶段和真空预压阶段对土体沉降量、真空度、孔隙水压力等多个方面进行分析, 获得石灰处理对真空预压加固效果的影响规律。

### 1 室内试验

试验过程分为自重固结和真空预压两阶段。本试验中自重固结阶段用于模拟实际工程中高含水率淤泥在真空预压处理前的自重固结过程。这一过程能够促使土颗粒充分絮凝, 并且形成稳定的土骨架。当自重固结阶段完成后开始真空预压试验。

#### 1.1 试验所用的土样参数以及制备

试验所用土样取自浙江省温州市瓯飞工程真空预压地基处理现场。土样基本性质如表 1 所示。采用激光粒度仪对土样的级配进行了测定。土样主要由粉粒组成, 粒径主要集中在 0.002~0.2 mm 范围内, 粒径分布较为均匀, 属于黏性土, 土体级配曲线如图 1 所示。

表 1 试验土样的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of the soil sample

取样地点	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
温州	2.55	56	32	24

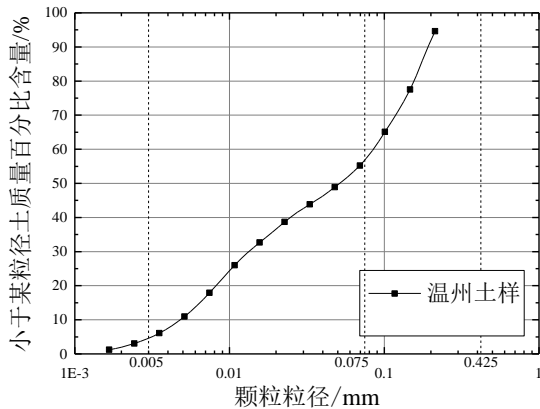
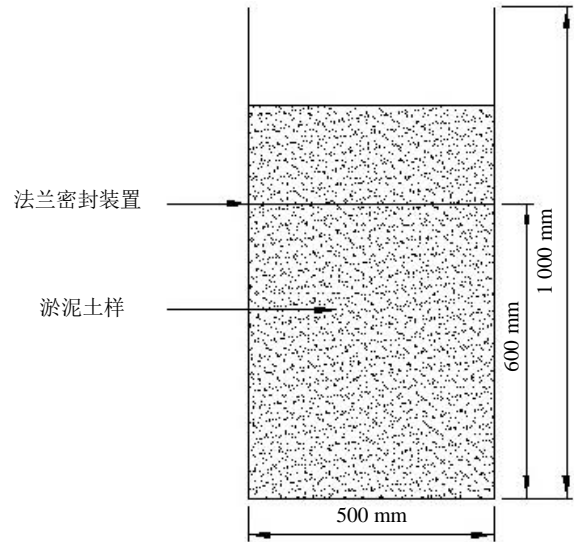


图 1 土的颗粒级配曲线

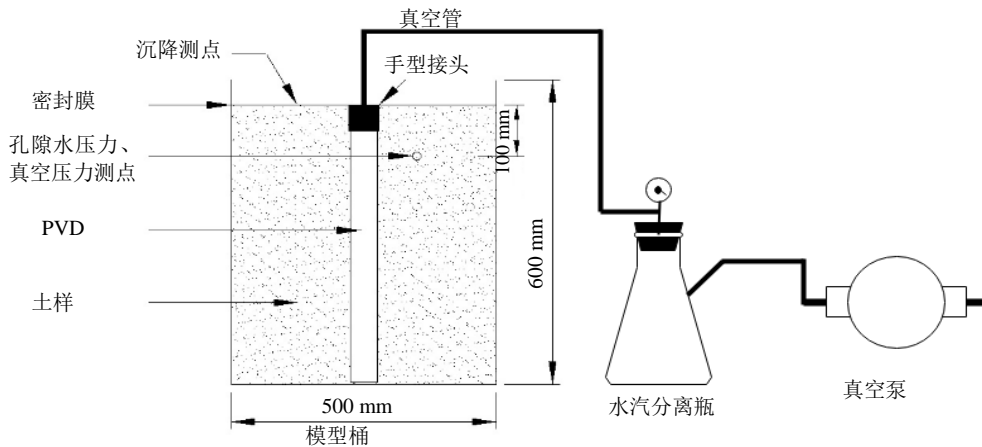
Fig. 1 Grain size distribution of soil sample

#### 1.2 试验仪器以及方案布置

模型试验装置如图 2 所示, 主要由 3 部分组成: 模型桶、排水系统以及数据采集系统。模型桶采用亚克力材质, 整体直径为 0.5 m, 高度为 1 m。模型桶分为上下 2 个部分, 上部高度为 0.4 m, 下部高度为 0.6 m。将模型桶分成 2 部分的原因是当自重固结开始时土样含水率极高 (300%), 因此在自重沉降阶段结束后土体高度大大下降。当自重固结试验结束时, 上部筒体将被移除以降低整体模型桶的高度, 这有利于真空预压试验中密封膜的铺设。排水系统主要由真空泵、水汽分离瓶、真空管、手型接头和等效孔径为 75 μm 的塑料排水板 (PVD) 组成。数据采集系统包括数据采集仪、孔隙水力传感器、位移传感器 (LVDT) 和真空压力计。孔隙水压力传感器量程为 -100~100 kPa, 精度为 0.1%。位移传感器量程为 0~300 mm, 精度为 0.1%。



(a) 自重固结实验装置原理图



(b) 真空预加载试验装置原理图

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test devices

土样经过曝氧消除土体中有机质对试验结果的影响。工程现场检测结果表明吹填土初始含水量约为 300%。因此将土样按含水率  $\omega=300\%$  加入适量的水,并用搅拌机搅拌均匀。对于石灰处理试样,加入干土质量 2% 的石灰并充分搅拌。试样制备完成后静置 24 h。

试验开始时采用泥浆泵将土样抽入模型桶中,土样装填高度为 0.7 m。土样装载达到预定高度后开始自重固结试验,并对自重固结过程中土体固液分离面高度进行监测。当自重固结结束时(日沉降量小于 0.1 mm),准备进行真空预压试验。首先抽去土体上层清液,并将模型桶上半部分移除以降低模型桶整体高度。在自重固结结束后的土体中插入排水板并固定。同时在距离排水板 100 mm,距离土体表面 100 mm 处布设孔隙水压力传感器和真空压力探头。采用手型接头连接排水板和钢丝软管,而后在土体表面铺设 1 层土工布以及 2 层塑料密封膜。钢丝软管从密封膜中穿出。密封膜表面布置位移传感器对土体沉降进行监测。每个试验装置的排水系统通过钢丝软管相互连接,并连接至水汽分离瓶,同时将水汽分离瓶的抽气口连接至射流式真空泵上。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 沉降量变化

图 3 为未处理淤泥和石灰处理淤泥在自重固结以及真空预压过程中土体表面沉降变化曲线。在自重固结过程中,未处理淤泥自重沉降量以及沉降稳定所需时间明显大于石灰处理淤泥。未处理淤泥自重固结过程中固液分离面在试验开始后约 1 000 h 趋于稳定,总沉降量约为 26.65 cm。而掺 2% 石灰的淤泥自重固结过程中沉降稳定时间为 550 h,总沉降量为 9.40 cm。造成这种现象的原因是采用石灰处理淤泥会导致土颗粒迅速絮凝成大直径的絮凝团,同时在自重沉降的过程中絮凝物彼此接触形成蜂窝状絮凝结构。石灰处理淤泥中絮凝物的直径和重量大于未处理淤泥,因此石灰处理淤泥的初始沉降速率明显高于未处理淤泥试验组。同时大直径絮凝团相互接触形成了孔隙比更大的结构,致使石灰处理淤泥的沉降量明显小于未处理淤泥。

对于真空预压阶段,通过分析表 2 中数据可知未处理淤泥真空预压结束时间约为 970 h,而石灰处理淤泥则为 300 h。石灰处理显著缩短了真空预压所需的时间。研究表明石灰处理能显著增强土体

的渗透性<sup>[9]</sup>。因此,当采用真空预压法对淤泥土进行处理时,石灰处理土中真空度衰减远远小于天然淤泥。同时石灰处理可以有效缓解排水板周围淤堵的发生,使土体固结时间大为缩短。

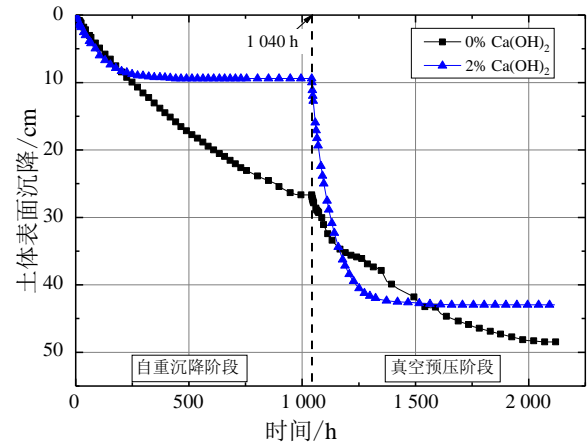


图 3 土体表面沉降随时间变化图

Fig. 3 Relationship between surface settlement and time

表 2 自重沉降和真空预压结束所需时间以及沉降量

Tab. 2 Time required and settlement of self-weight settlement process and vacuum preloading process

土样	自重沉降阶段		真空预压阶段		总沉降/ cm
	所需时长/ h	沉降量/ cm	所需时长/ h	沉降/ cm	
淤泥土	1 000	26.65	970	21.82	48.47
石灰处理土	550	9.40	300	33.54	42.94

### 2.2 真空度变化

图 4 为土体真空压力随时间变化曲线。由图 4 可知,2 种土样真空预压过程中测点处真空压力变化存在较大差异。在试验开始后 24 h 左右,石灰处理淤泥测点处开始出现真空,在试验结束时土体中真空度稳定在 -75 kPa 左右。而对于未处理淤泥,在试验开始后 350 h 测点处才开始出现真空,并且在试验结束时真空度仅为 -20 kPa。上述现象表明在自重固结过程中,石灰处理后的土体形成了较多的排水通道,提高了真空预压过程中真空度的传递效率。

### 2.3 孔隙水压力变化

图 5 为孔隙水压力随时间变化曲线。通过比较 2 种土样真空预压过程中的孔隙水压力变化可以发现未处理淤泥中孔隙水压力下降缓慢。在试验结束时孔隙水压力仍未稳定,最终孔隙水压力约为 -49 kPa。而石灰处理淤泥孔隙水压力在试验开始后 760 h 基本达到稳定,最终孔隙水压力为 -67 kPa。石灰处理淤泥在真空预压过程中孔隙水压力下降

速率比未处理淤泥快。这说明在淤泥土中加入石灰可以有效地提高真空度在土体中的传递效率。而真空度在土体中的传递能有效促进土体固结排水, 进而促进孔隙水压力消散。

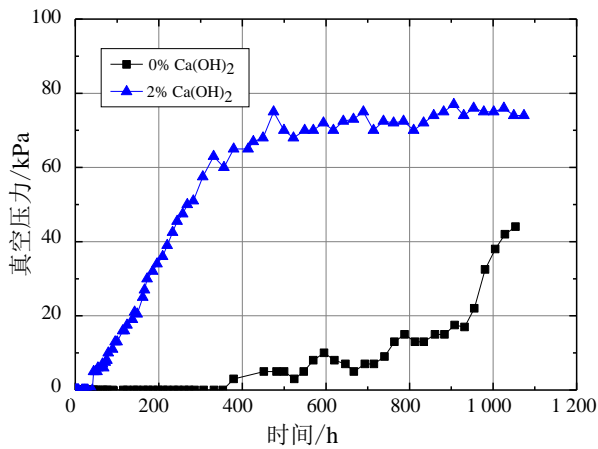


图4 土体真空压力随时间变化图

Fig. 4 Relationship between vacuum pressure and time

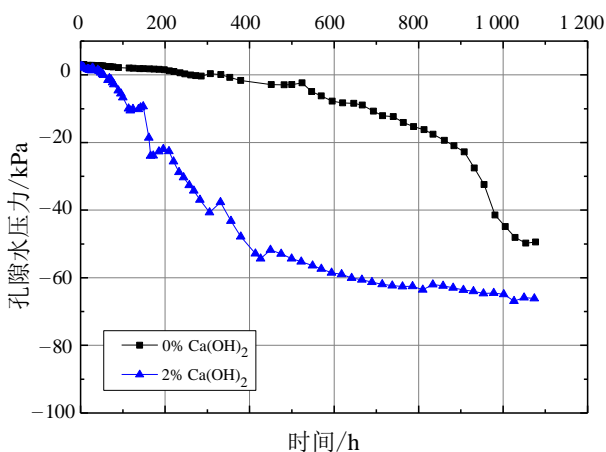


图5 土体孔隙水压力随时间变化图

Fig. 5 Relationship between pore water pressure and time

### 2.4 十字板剪切强度

在真空预压结束后, 分别对未处理淤泥和石灰处理淤泥不同深度处 (5 cm, 35 cm) 的十字板剪切强度进行检测。土体十字板剪切强度如表3所示。石灰处理淤泥距表面5 cm处强度为34 kPa, 相比于石灰处理前强度增长了112.5%。进一步分析表中数据可以发现2种土样十字板剪切强度随深度逐渐减小。天然淤泥距表面35 cm处剪切强度相对于5 cm处下降了32.3%, 而石灰处理土强度下降了5.9%。这说明石灰处理能有效降低土体的不均匀性, 提高深层土体真空固结效率。

表3 十字板剪切强度随深度变化表

Tab. 3 Variation of vane shear strength with depth

土样	十字板剪切强度/kPa	
	距土体表面 5 cm	距土体表面 35 cm
淤泥	16	11
石灰处理土	34	32

## 3 结 论

本文通过室内模型试验对石灰处理淤泥土在自重固结以及真空预压过程中沉降以及固结性质进行了分析。试验结果表明在土样中加入石灰后, 土样中的细小土颗粒会絮凝成团状, 形成孔隙比更大的土骨架。这会导致石灰处理土中的排水通道增加, 使石灰处理土在真空预压过程中真空度沿排水板径向传递的效率大大提高。同时絮凝团粒径增大可以有效缓解排水板周围的淤堵现象, 缩短固结时间。石灰处理联合真空预压比仅采用真空预压进行处理能进一步提高土体强度。

### 参考文献

- [1] 蔡霞. 真空联合堆载预压法在汕头地区的应用[J]. 广东土木与建筑, 2000(5): 73-75.
- [2] 从瑞江. 真空预压加固超大面积软土地基[J]. 地基处理, 1996, 7(2): 30-37.
- [3] 冯汉英. 真空预压软基加固技术在天津港区的应用与发展[J]. 港口工程, 1998(4): 26-30.
- [4] 高志义, 苗中海. 南宁机场软土地基真空预压施工[J]. 港口工程, 1992(1): 18-22.
- [5] 范须顺. 真空预压法软基加固施工中若干问题的概述[J]. 港口工程, 1995(4): 17-20.
- [6] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程, 2012, 462(1): 158-163.
- [7] 武亚军, 陆逸天, 骆嘉成, 等. 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 525-533.
- [8] 杨泽平. 三种改良土的渗透性试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [9] 倪俊峰. 石灰絮凝联合真空预压加固吹填淤泥试验研究[D]. 温州: 温州大学, 2017.