

基于 C-C 型固化剂的吹填超软土渗透固结特性研究

武亚军^{*1}, 邓清杨¹, 顾赛帅², 栾一斐³

- (1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444;
2. 上海碧桂园企业管理有限公司, 上海 200120;
3. 大连民族大学 建筑学院, 辽宁 大连 116650)

摘要: 在吹填超软土中加入不同掺量的 C-C 型固化剂进行压缩固结试验和真空固结试验, 对固结前后土体的渗透固结特性和基于有效孔隙比与孔隙抗压性能的增渗机制进行研究, 探究既能提高渗透性, 又能保持较高强度的合理掺量. 发现半固化超软土的固结特性与软黏土基本一致, 固结系数随固结压力的增大而增大, 渗透系数随荷载的增大而减小; 相同荷载作用下, 固结系数和渗透系数均随掺量的增加而增大. 加入少量固化剂后, 压汞试验显示孔径分布曲线峰值明显左移, 孔径集中分布区间向小孔隙区间移动, 土样有效孔隙比随掺量变化存在最大值, 土体骨架的存在使得孔隙抗压性能不断增加, 保留了具有较高强度结构的排水通道, 这种压缩性较低的多孔骨架结构对渗透性的提高有着显著作用. 固化过程中, 固化剂掺量越多, 形成土骨架的作用越明显, 土体强度和抗压缩能力就越高, 其中掺量为 10% 的土样无侧限抗压强度高达 360.1 kPa, 远高于直接固化强度. 研究表明, 固化剂掺量在 1%~10% 时, 主要发挥的是增渗作用, 是药剂真空预压处理超软土的理想添加范围; 而大于 10% 后以固化作用为主.

关键词: 半固化; 固化; 吹填超软土; 固结; 增渗机制

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201901011

0 引言

随着城市建设规模的不断扩大, 用地需求量不断增加, 可利用耕地面积不断减少, 依据政府的占补平衡原则, 沿海地区涌现出大量的填海造陆工程. 在我国东南沿海一带的填海造陆工程中, 从浅海海底挖取泥砂吹填到滩涂上的超软土, 具有有机质含量高、含水率大、抗剪强度低、渗透性差和压缩性高等特点. 对于作为土地储备的耕地, 可以待其自重固结多年、地表具有一定强度后再进行加固处理; 但是对于急需开发利用的土地, 往往当场地还处于流动状态时就必须进行加固处理, 这对于工艺方法提出了更高的要求. 真空预压法^[1-10]具有场地适应性强、成本低、见效快、工期短等优点, 目前是处理这种超软土地基的一种常用方法.

在真空预压处理超软土的工程实践中, 常常

发现在塑料排水板附近会形成突起的土柱, 这些土柱一般强度较高; 而在土柱周围都是凹槽, 且土体的强度较低^[9-10]. 事实证明, 这是由于超软土含水率高、黏粒含量高, 在短时间内施加较大真空荷载致使土颗粒向排水板附近聚积而形成的, 所形成的土柱密度大、渗透性差, 并进一步阻碍了外围土中的水向排水板流动. 出现这种状况的原因归根结底还是由于吹填土本身的工程性质太差, 若能改变土体本身的性质, 则有望改善这种现状. 在吹填超软土中加入化学药剂, 改变土颗粒粒径、土颗粒间的连接方式, 以及其中水的存在形式, 整体上改善吹填超软土的渗透与固结特性之后, 再进行真空预压可取得很好的效果, 即药剂真空预压法^[11], 其中药剂主要起着调节土体渗透性的作用, 本课题组在工程废弃泥浆处理中已经取得了

一些研究成果^[12-16].

目前关于超软土的固结渗透特性研究主要是针对原状超软土^[17-19],对于添加少量固化剂后超软土的固结渗透特性研究则相对较少.这种添加少量固化剂而未完全固化的超软土,称之为半固化超软土.半固化超软土有以下特点:(1)固化剂掺量范围广,覆盖多个数量级(0.01%~20%),但远小于完全固化所需要的掺量;(2)含水率随固化剂掺量的增加而降低,但添加之后含水率仍高于100%;(3)黏度随固化剂掺量的增加而增大;(4)强度随固化剂掺量的增加显著提高.

加入不同掺量的固化剂,不但对超软土的强度影响大,而且对超软土的渗透固结特性影响也很大,为了应用到工程实际中,需要确定合理的添加范围.为此,本文通过压缩固结、真空固结试验以及压汞试验,探究半固化超软土的渗透固结特性、孔隙压缩规律和强度增长规律,并给出不同掺量下沉降预测,为工程实际应用提供参考.

1 压缩固结试验

1.1 试样材料

试验所用的吹填超软土来自温州某填海造陆工程,其基本物理指标:含水率 186.5%,含砂率 3.5%,饱和度 100%,液限 63.3%,有机质含量 6.7%(>5%,为有机质土).从以上数据可以看出,吹填超软土的含水率、液限、有机质含量均远高于一般的软土、淤泥质土,但也有一定的含砂率.试验中所用的固化剂为上海大学土木工程系自主研发的 C-C 型固化剂,该系列固化剂通常用于淤泥和污泥的快速加固.

为了研究从超低掺量到高掺量时超软土的固结与渗透特性,分别对 0.01%、0.1%、1%、10%、20% 掺量时的超软土进行固结试验.固结试验中所使用的环刀高度为 2 cm,初级荷载为 12.5 kPa,最后一级荷载为 100 kPa,每一级荷载下的稳定标准为试样变形量小于 0.005 mm/h.

1.2 掺量对压缩渗透固结特性的影响

试验结果从孔隙比 e 、固结系数 C_v 、压缩系数 a_v 、渗透系数 k 等方面分析.

(1)孔隙比

图 1 为不同固化剂掺量下孔隙比-荷载曲线,

随着荷载不断增大,整体上孔隙比呈不断减小的趋势.随着掺量的增加,相同荷载下,孔隙变化有所区别.掺量小于 1% 时,掺量增多,孔隙比压缩曲线上移;掺量大于 10% 后,孔隙比压缩曲线开始下移.此外,所有样本的孔隙比-荷载曲线基本为直线,说明掺量在 20% 以下的样本均未形成较为完整的固化体,未形成显著的团聚化结构,因此属于欠固结土.其中,超低固化剂掺量下的超软土孔隙比-荷载曲线与其他掺量下的明显不同,曲线虽然仍为直线,但明显下移.

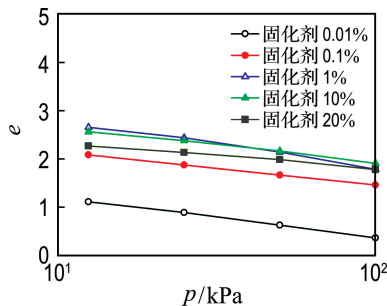


图 1 不同固化剂掺量下孔隙比-荷载曲线

Fig. 1 Pore ratio-load curves under different curing agent contents

(2)固结系数

由图 2 可得,不同固化剂掺量下超软土的固结系数变化区间有所不同,其中掺量 0.01% 的超软土固结系数在 10^{-4} cm^2/s 这一数量级上变化,掺量 20% 的固结系数在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm^2/s 上变化,其他掺量下的固结系数主要在 10^{-3} cm^2/s 数量级上.

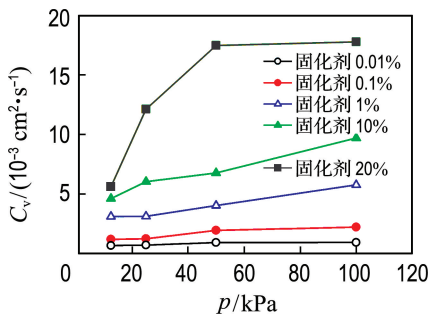


图 2 固结系数变化曲线

Fig. 2 The consolidation coefficient variation curves

随着荷载增大,整体上固结系数呈不断增大的趋势,且掺量越大,增幅越大.这是因为随着固

结压力的不断增大,孔隙水不断被排出,孔隙体积不断减小,土颗粒之间的位置也发生变化,大孔隙受压产生闭合,越来越多的固结压力由土体颗粒骨架来承担,超孔隙水压力越来越小,即固结系数呈增大趋势。在同一级荷载下,固化剂的掺量越多,固结系数越大,且随着荷载的增大,差距不断扩大,12.5 kPa 下掺量为 20% 的固结系数是掺量为 0.01% 的 8.5 倍,100 kPa 下则达到 19.3 倍。掺量 0.01% 的样本固结系数增幅较小,由于其掺量十分少,可以推断原状土的固结系数绝对值和增幅均处于较低水平。半固化吹填超软土的固结特性和规律与地基的上层软土或黏土基本一致,当压力大于先期固结压力时,固结系数随压力的增加而增大。

(3) 压缩系数

土体压缩系数是描述土体压缩性大小的物理量,其数值越大,土的压缩性越高。在吹填过程中,吹填的高度有明确的规定,是根据固结后的设计高度来确定的。

图 3 给出了压缩系数和固化剂掺量的关系。随着荷载增大,各试样在压缩过程中,其压缩变形规律基本一致,整体上呈压缩系数不断减小的趋势,荷载达到 100 kPa 时,其压缩性趋于稳定。这是由于随着荷载的不断增大,孔隙水被排出,孔隙体积不断减小,土颗粒之间的位置也发生变化,大孔隙因受压产生闭合,土体压缩性降低。因此,其压缩系数相应地减小。在同一级荷载下,固化剂的掺量越多,压缩系数越小,说明试样压缩性越低,即越难被压缩,这是由于越来越多的固结压力由土体颗粒骨架来承担,而固化剂掺量越多,骨架作用越显著,土体抗压缩能力越强。初期荷载较小时

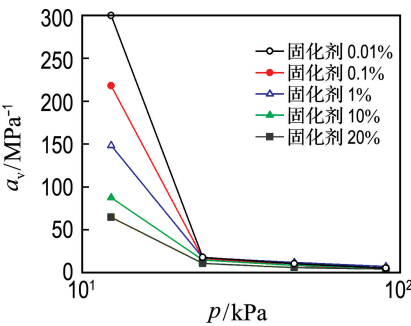


图 3 压缩系数变化曲线

Fig. 3 The compressibility coefficient variation curves

不同掺量下超软土的压缩性相差较大,随着荷载的增大,大部分孔隙水被排出,土体结构趋于稳定,压缩性能趋于一致。

(4) 渗透系数

图 4 给出了渗透系数和固化剂掺量的关系,不同掺量下的渗透系数基本上在 10^{-6} cm/s 这个数量级上变化。

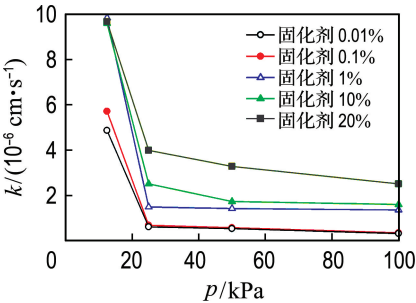


图 4 渗透系数变化曲线

Fig. 4 The permeability coefficient variation curves

随着荷载的增大,渗透系数整体上呈不断减小的趋势。这是由于超软土的初始孔隙比很大,非结合水在较低的固结压力作用下较易排出,孔隙比变化较大;随着固结压力的增加,孔隙水被排出,孔隙体积不断减小,土体颗粒逐渐靠拢、镶嵌,大孔隙因受压产生闭合,孔隙逐渐被结合水占据,土体的渗透系数逐渐趋于稳定。在同一级荷载下,固化剂掺量不同,渗透系数有所区别,掺量为 0.01% 和 0.1% 的渗透系数较小,其他掺量下较大,在低荷载下表现得比较明显,且掺量大于 1% 后,12.5 kPa 压力下的渗透系数不再出现显著的变化,25 kPa 及以上的压力下渗透系数随着掺量的增加而增大。这说明,掺量达到 1% 以上,形成的团聚结构在低荷载下仍能维持稳定的渗透性,掺量继续增加,渗透性不会继续提高;在较高荷载下,渗透性仍与掺量有直接关系,掺量越高,渗透性越好。这与渗透性较高的团聚结构的强度有关,较低掺量的固化剂(不至于直接固化)与土反应,通过固化材料本身以及和土之间的物理、化学反应,形成团聚结构,在固结过程中,起到骨架作用。这种骨架结构的强度随着掺量的增加而增加,这也解释了固化剂添加后超软土压缩系数的减小。低荷载下,团聚结构仍能维持,而在较高荷载下,需提高掺量,才能维持团聚结构的稳定性和渗透

性,渗透性的升高大大提高了半固化超软土的固结速率,提高了固结系数,缩短了固结时间.

2 真空固结试验

2.1 试验方案

试验材料同上.如图 5 所示,真空荷载均为 80 kPa.其中真空排水模型为直径 90 mm、高 500 mm 的柱形有机玻璃装置,均装有 5.8 kg 的超软土,上下采取砂垫层双面排水,通过气液分离器和刻度尺分别读取排水量和沉降量.参考固结试验的结果,真空排水固结模型中掺量选择为 1%、10%,并增加一组原状超软土排水固结试验.

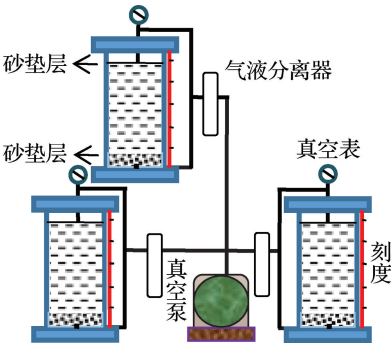


图 5 装置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of device

2.2 固化剂掺量对排水固结特性的影响

图 6 给出了不同固化剂掺量下排水速率,以此来反映固结速率.从排水总时间来看(以低于 30 mL/h 为卸载标准),固化剂掺量越多,排水总时间越短.从排水速率变化来看,三者排水速率均随时间而减小,主要分为 3 部分,分别是排水高峰

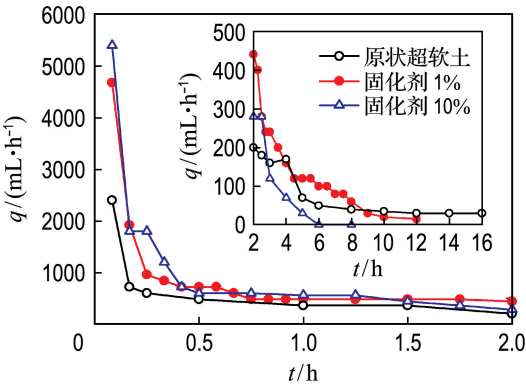


图 6 排水速率
Fig. 6 Drainage rate

期(500 mL/h 以上)、平稳期(100~500 mL/h)、缓慢期(100 mL/h 以下).

其中,原状超软土的排水高峰期 为 0.5 h,后两者的排水高峰期分别为 0.75 和 1.5 h;排水平稳期则相差较大,原状超软土和加固剂 10% 的只有 3 h,加固剂 1% 的为 6 h.这说明固化剂加得越多,在排水前期,排水速率越快,排水高峰期越长.随着排水时间的变化,加固剂 1% 的排水平稳期比较长,加固剂 10% 反而比较短,这是由于后者大部分水已经排出,接近完成固结.

图 7 为含水率 c 变化曲线,固化剂掺量越多,含水率降低越快.固化剂为 1% 的超软土真空固结后的最终含水率略低于固化剂为 10% 的.此外,结合图 7 可得,半固化超软土的含水率降至液限(63.3%)附近时,排水速率即进入缓慢期(100 mL/h 以下).

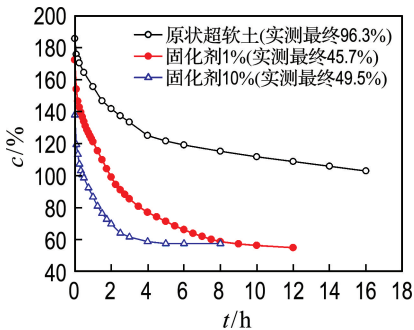


图 7 含水率变化曲线
Fig. 7 The water content change curves

2.3 沉降变形特性

图 8 为沉降 s 曲线,由图可知,原状超软土沉降速率最小,这是由于其渗透性较差,固结很慢;

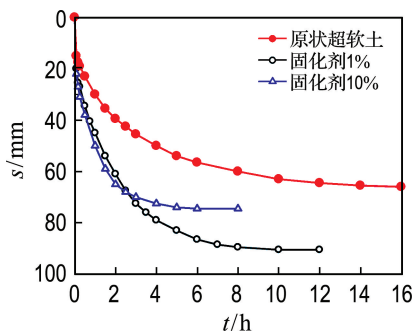


图 8 沉降曲线
Fig. 8 Settlement curves

而加入固化剂后,由于固结速率加快,沉降速率大幅提高.其中,固化剂掺量为 10% 的超软土前期沉降要快于固化剂掺量 1% 的超软土,后期逐渐被超越.

根据模型试验的沉降观测值,运用双曲线法^[16]进行最终沉降量预测.

沉降与时间的关系曲线 $s-t$, 接近双曲线, 双曲线经验公式如下:

$$s_{t1}=s_{\infty}t_1/(a_t+t_1) \tag{1}$$

$$s_{t2}=s_{\infty}t_2/(a_t+t_2) \tag{2}$$

式中: s_{∞} 为推算最终沉降量,理论上所需时间 $t=\infty$; s_{t1} 、 s_{t2} 分别为经历时间 t_1 、 t_2 出现的沉降量; a_t 为曲线常数,待定.

根据上述公式,就可求解 s_{∞} 和 a_t :

$$s_{\infty}=(t_2-t_1)/\left(\frac{t_2}{s_{t2}}-\frac{t_1}{s_{t1}}\right) \tag{3}$$

$$a_t=s_{\infty}\frac{t_1}{s_{t1}}-t_1=s_{\infty}\frac{t_2}{s_{t2}}-t_2 \tag{4}$$

计算各 t_i/s_{ti} 值,并作出 $t-t_i/s_{ti}$ 曲线,取直线段任意两点,代入式(3)、(4)中,可计算得到最终沉降量和固结度(如表 1 所示).

由表 1 可知,掺量为 10% 的土体固结度略高于掺量 1% 的,达到 97.2%. 根据预测最终沉降结果可知不同掺量固化剂对超软土真空加固后沉降量的影响很大,最大沉降差达到 20.6 mm.

表 1 最终沉降预测值与实测值
Tab. 1 Final settlement prediction and measurement

掺量/%	沉降量/mm		固结度/%
	实测值	预测值	
1	90.5	97.2	93.1
10	74.5	76.6	97.2

2.4 半固化超软土强度增长规律

吹填超软土来源于海底淤泥,有机质含量高,直接真空预压加固效率极低.添加适量的固化剂(不至于直接固化)与土反应,相当于在结构疏松、高孔隙比的软土中加入起胶结或填充作用的固化材料,通过固化材料本身以及和土之间的物理、化学反应,形成胶结结构,在固结过程中,起到骨架作用.这种骨架结构的强度随着掺量的增加而增加,这也解释了固化剂添加后超软土压缩系数的减小.渗透性的升高大大提高了半固化超软土的

固结速率,提高了固结系数,缩短了固结时间.

此外,在超软土排水固结过程中,由于水分不断排出,孔隙比减小,土体不断密实,同时固化剂的有效掺量不断提高(如式(5)、表 2 所示),固化材料的胶结作用明显增强,加固后的土体强度快速提高(如图 9 所示),并随着龄期的增加而增大(如表 3 所示),远高于直接固化而不进行真空预压得到的强度.

$$n_e=\frac{m_c}{m_t-m_w} \tag{5}$$

式中: n_e 为固化剂有效掺量; m_c 、 m_t 、 m_w 分别为固化剂、总体的、水的质量.

表 2 有效掺量
Tab. 2 Effective dosage

掺量/%	排水量/mL	有效掺量/%
1	2 500	1.76
10	1 960	15.10



图 9 土体固结前后对比
Fig. 9 Soil comparison before and after consolidation

表 3 无侧限抗压强度
Tab. 3 Unconfined compressive strength

加固方式	掺量/%	抗压强度/kPa	
		7 d	28 d
半固化后 真空加固	0	0	0
	1	83.0	189.2
	10	130.0	360.1
直接固化	1	0	0
	10	0	0
	20	0	0
	30	15.65	26.08
	50	52.86	89.03

3 半固化超软土的增渗机制

党发宁等^[20]提出:与粗粒土相比,黏性土中绝大多数的孔隙被结合水膜所占据,这部分无效

孔隙的大量存在才是黏性土的孔隙比大、渗透系数小的根本原因. 而半固化超软土由于固化剂的加入, 渗透性发生较大改变, 这可能与无效孔隙的减少有关. 此外, 固化剂能提高土体的抗压缩性且对外荷载作用下土体渗透性的变化也产生很大的影响.

3.1 基于压汞试验的微观孔隙结构定量分析

吹填土的固结主要是由于土中孔隙在外力的作用下被压密而产生的, 其中, 大孔隙先被压缩成中孔隙, 中孔隙被压缩成小孔隙, 小孔隙继续被压缩成微孔隙或超微孔隙. 因而固化剂对超软土渗透固结特性的影响与微观孔隙有关. 根据 Shear 等的孔径划分理论^[21], 结合上海地区软土微观结构孔径特性, 将该地区软土孔径划分为 5 类, 见表 4.

表 4 孔隙类型划分

Tab. 4 Classification of pore types

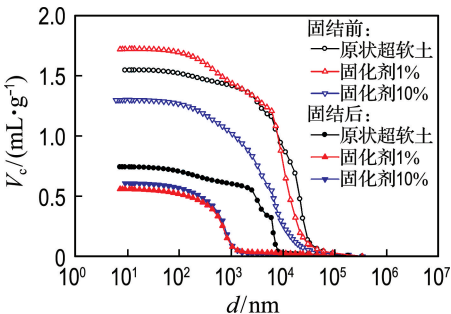
孔隙类型	孔径范围/nm	孔隙结构
大孔	$d>20\ 000$	团粒间孔隙与部分团粒内孔隙
中孔	$10\ 000<d\leq20\ 000$	团粒内孔隙
小孔	$2\ 000<d\leq10\ 000$	团粒内孔隙和部分颗粒间孔隙
微孔	$100<d\leq2\ 000$	颗粒间孔隙
超微孔	$d\leq100$	颗粒内孔隙

不同固化剂掺量、真空固结前后的土样, 采用液氮真空冷冻升华干燥法制样进行压汞试验, 得到土样中孔隙的分布规律 (如图 10 所示). 其中, 原状超软土由于含水率较高, 部分土颗粒呈游离态, 经液氮冷冻升华干燥后, 会产生微小的收缩变形, 因而经压汞试验测试得出的原状超软土孔隙比会略小于真实孔隙比.

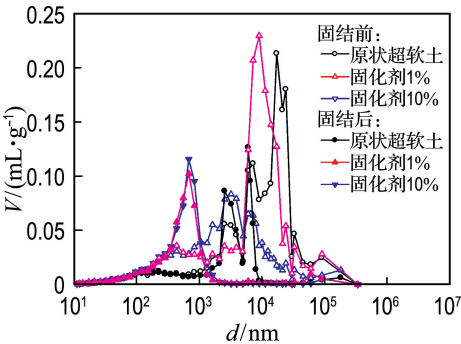
由图 10、表 5 可得, 原状超软土的孔隙体积主要分布在孔径小于 100 000 nm 的范围内. 半固化土的孔隙体积分布与固化剂掺量有关. 其中, 掺量 1% 的土样和原状超软土相比, 大孔隙减少, 中孔隙增多; 掺量增加至 10% 时, 大、中孔隙均大量减少, 孔径分布曲线峰值明显左移, 孔径集中分布区间向小孔隙区间移动. 原状超软土固结后的孔隙体积主要分布在孔径小于 10 000 nm 的范围内, 半固化土固结后的孔隙体积主要分布在孔径小于 1 000 nm 的范围内, 随着掺量变化未出现显著差别.

分析可知, 原状超软土处于自然饱和未固结

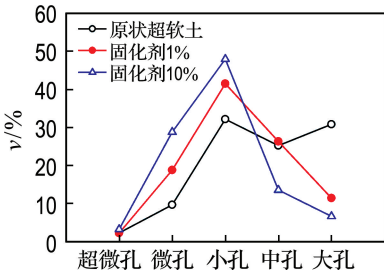
状态, 孔隙较大. 加入少量固化剂, 相当于在结构疏松、高孔隙比的超软土中加入了具有胶结或填充作用的固化材料, 大孔隙减少, 团粒间孔隙转化为团粒内孔隙. 随着掺量大幅增加, 大、中孔隙被分隔成小、微孔隙, 团粒内中孔隙向团粒间孔隙转化, 但并未完全被填充.



(a) 累计孔体积-孔径曲线



(b) 孔隙体积-孔径分布曲线



(c) 孔隙体积含量分布曲线

图 10 孔隙分布

Fig. 10 The pore distribution

表 5 真空固结前后的孔隙比

Tab. 5 Pore ratio before and after vacuum consolidation

掺量/%	孔隙比		固结后含水率/%
	固结前	固结后	
0	3.62	1.12	96.3
1	3.73	0.49	45.7
10	2.53	0.60	49.5

3.2 基于有效孔隙比的增渗机制

根据党发宁等^[20]提出的稠度指标法及有效孔隙比修正公式(式(6)),计算出不同修正有效孔隙比:

$$e_u=e_0-\alpha_0\frac{\rho_s}{\rho_w}W_l$$
 (6)

式中: e_u 为有效孔隙比; e_0 为压汞试验得出的真空固结前孔隙比; α_0 为结合水占液限 W_l 的比例系数,为黏性土中结合水质量占土体刚好处于液限时孔隙水总质量的比例($0<\alpha_0<1$),对于某一特定黏性土可近似为常数; ρ_s 为土粒密度; ρ_w 为土粒相对密度.

由表 6 可知,虽然原状超软土孔隙比较大,但是其有效孔隙比较小,造成渗透性较差,这与结合水含量较高有关.而添加固化剂 1%后,结合水含量降低,有效孔隙比增加;继续添加固化剂至 10%,孔隙被大量填充,孔隙大量减少.

表 6 有效孔隙比
Tab. 6 Effective pore ratio

掺量/%	e_0	W_l /%	e_u			
			$\alpha_0=0.95$	$\alpha_0=0.90$	$\alpha_0=0.85$	$\alpha_0=0.80$
0	3.62	63.3	2.83	2.88	2.92	2.96
1	3.73	47.5	3.13	3.16	3.20	3.23
10	2.53	45.1	1.95	1.98	2.01	2.04

3.3 基于孔隙抗压缩性能的增渗机制

土的 3 个主要力学指标,即强度、变形和渗透性,三者之间有着密切的相互关系,使渗透性的研究不限于渗流问题本身.渗透性除了与有效孔隙比有关,还与外荷载作用下的孔隙抗压缩能力有关,这种抗压缩能力得益于固化剂填充和一系列物化反应所形成的土体骨架.这种微观骨架结构的强度和含量可通过宏观的压缩性能体现出来.结合图 3 和表 1 可知固化剂掺量为 10%的超软土有效孔隙比虽然有所降低,但其强度更大,抗压缩能力更强.原状超软土的孔隙体积虽然比较大,但是在外荷载作用下迅速压缩,土体的骨架作用较小,造成排水路径较少甚至堵塞.而固化剂的适量添加,不至于完全填充孔隙,所形成的骨架承担了更多的压力,保留了具有较高强度结构的排水路径.这种压缩性较低的多孔骨架结构对渗透性的提高有着显著的改观.

4 结 论

(1)半固化土属于高压缩性土,固化剂掺量与土体压缩性呈负相关,与固结系数有较强的正相关性,固化剂掺量越多,固结速率越大.

(2)在掺量小于 1%时,固化剂对软土渗透性的影响不显著.掺量在 1%和 10%之间时,固化剂大幅度提高了软土的渗透性.但当掺量大于 10%后,渗透性的提高就不明显了.在工程应用中,综合工期、渗透系数、加固效果等因素,固化剂掺量 1%~10%是最经济实用的选择.

(3)在真空固结过程中,固化剂掺量越多,土体强度提高越快,龄期 28 d 的强度绝对值越大,10%掺量时达到 360.1 kPa,远高于同掺量下的直接固化强度.

(4)外荷载作用下,固化剂的加入降低了自由水含量,提高了有效孔隙比.与此同时会在土样中形成骨架结构,强度和抗变形能力大幅提高,渗透性因而得以改善.

(5)关于固化剂使无效孔隙减少的作用机理和土体骨架的微观结构形式两个方面还有待进一步研究.

参考文献:

[1] BO M W. Compressibility of Ultra-Soft Soil [M]. Singapore: World Scientific, 2008.

[2] CHAI J C, CARTER J P, HAYASHI S. Ground deformation induced by vacuum consolidation [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2005, **131**(12):1552-1561.

[3] CHAI Jinchun, HONG Zhenshun, SHEN Shuilong. Vacuum-drain consolidation induced pressure distribution and ground deformation [J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, **28**(6):525-535.

[4] BO M W, CHOA V, WONG K S. Constant rate of loading test on ultra-soft soil [J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2010, **33**(3):192-200.

[5] HARVEY J A F. Vacuum drainage to accelerate submarine consolidation at Chek Lap Kok, Hong Kong [J]. **Ground Engineering**, 1997, **30**(6):34-36.

[6] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T,

- YOUWAI S, *et al.* Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs) with and without vacuum preloading [J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, **28**(1):1-11.
- [7] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4):45-56.
- GAO Zhiyi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, **11**(4):45-56. (in Chinese)
- [8] BO M W, CHOA V, WONG K S. Reclamation and soil improvement on ultra-soft soil [J]. **Ground Improvement**, 2005, **9**(1):23-31.
- [9] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(5):1073-1080.
- DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, *et al.* Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai New Area [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, **30**(5):1073-1080. (in Chinese)
- [10] 曹永华, 李卫, 刘天韵. 浅层超软土地基真空预压加固技术[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(S1):234-238.
- CAO Yonghua, LI Wei, LIU Tianyun. Surface-layer improvement technology for ultra soft soil by vacuum preloading [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, **33**(S1):234-238. (in Chinese)
- [11] 武亚军, 陆逸天, 牛坤, 等. 一种处理工程废浆的药剂真空预压法: ZL 2015 1 0322445.6 [P]. 2017-09-29.
- WU Yajun, LU Yitian, NIU Kun, *et al.* A vacuum preloading with flocculation for treating engineering waste mud: ZL 2015 1 0322445.6 [P]. 2017-09-29. (in Chinese)
- [12] WU Yajun, KONG Gangqiang, LU Yitian, *et al.* Experimental study on vacuum preloading with flocculation in waste slurry improvement [J]. **Geomechanics and Engineering**, 2017, **13**(2):319-331.
- [13] 武亚军, 陆逸天, 牛坤, 等. 药剂真空预压法处理工程废浆试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8):1365-1373.
- WU Yajun, LU Yitian, NIU Kun, *et al.* Experimental study on solid-liquid separation of construction waste slurry by additive agent-combined vacuum preloading [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, **38**(8):1365-1373. (in Chinese)
- [14] 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.
- WU Yajun, LU Yitian, LUO Jiacheng, *et al.* Anti-clogging function of vacuum preloading with flocculants in solid-liquid separation of construction waste slurry [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, **39**(3):525-533. (in Chinese)
- [15] 武亚军, 牛坤, 陆逸天, 等. 工程废浆处理过程中药剂真空预压法的防淤堵机理[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(6):95-103.
- WU Yajun, NIU Kun, LU Yitian, *et al.* Anti-clogging mechanism of vacuum preloading with flocculation in treating construction waste slurry [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, **50**(6):95-103. (in Chinese)
- [16] 武亚军, 杨建波, 张孟喜. 真空加载方式对吹填流泥加固效果及土颗粒移动的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8):2129-2135.
- WU Yajun, YANG Jianbo, ZHANG Mengxi. Study of impact of vacuum loading mode on dredger fill flow mud consolidation effect and soil particles moving [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, **34**(8):2129-2135. (in Chinese)
- [17] 朱耀庭, 郑爱荣, 李卫. 吹填超软土固结特性的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, **35**(11):120-123.
- ZHU Yaoting, ZHENG Airong, LI Wei. Laboratory tests for the consolidation property of dredger fill in the Shenzhen area [J]. **Journal of Hunan University (Nature Sciences)**, 2008, **35**(11):120-123. (in Chinese)
- [18] 文海家, 李耀刚, 汪东云. 超软土渗透固结的控制性因素分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, **22**(z1):9-14.
- WEN Haijia, LI Yaogang, WANG Dongyun. Analysis on governing factors of seepage and consolidation of super soft soil [J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2000, **22**(z1):9-14.

(in Chinese)

[19] BO M W, CHOA V, WONG K S. Compression test on slurry with small scale consolidation [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, **39**:388-398.

[20] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(9):1909-1917.

DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu, *et al.* Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, **34**(9): 1909-1917. (in Chinese)

[21] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. **Effects of Desiccation on the Hydraulic Conductivity Versus Void Ratio Relationship for a Natural Clay** [M]. Washington D C: National Academy Press, 1992.

Study of permeability and consolidation characteristics of hydraulic fill ultra-soft soil based on C-C type curing agent

WU Yajun^{*1}, DENG Qingyang¹, GU Saishuai², LUAN Yifei³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Country Garden Business Management Company Limited, Shanghai 200120, China;
3. College of Architecture, Dalian Nationalities University, Dalian 116650, China)

Abstract: To determine the optimal dosage of C-C type curing agents in the hydraulic fill ultra-soft soil for both permeability and strength improvement, compression consolidation test and vacuum consolidation test were carried out. After the test, the mechanism of permeability and consolidation characteristics improvement was evaluated by the effective pore ratio and the pore anti-compressive performance. Test results show that the consolidation coefficient of the semi-solidification ultra-soft soil, similar with soft clay, is increased with increasing pressure while the permeability coefficient is decreased with increasing load. And the coefficients are increased with the increasing addition under the same load. After adding a small amount of curing agents, mercury injection test shows that the peak value of pore size distribution curve shifts to left evidently, interval of concentrated aperture is moved to small pore interval, and the effective pore ratio exists maximum with different additions. The porous structure with low compressibility, increasing compressive properties of pores, retaining high strength drainage path and improving permeability, is formed. The more the curing agent is added, the more obvious the phenomenon of soil skeleton is and the higher soil strength and anti-compression ability are. Particularly, the unconfined compressive strength of the sample with 10% addition is up to 360.1 kPa. It is far higher than that of the sample prepared by curing only. The study reveals that with the addition in 1%-10%, curing agents can improve the permeability primarily, and it is appropriate for vacuum preloading with flocculants treatment, and while >10%, curing action will be primary.

Key words: semi-solidification; solidification; hydraulic fill ultra-soft soil; consolidation; permeability increasing mechanism