

DOI:10.11918/201909165

铁盐调理联合真空预压法填埋污泥排水加固试验

武亚军¹, 邓清杨¹, 张旭东¹, 李璟²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 针对目前中国多地污泥填埋库容已严重不足的现状, 为恢复库容并加固坑体, 采用 FeCl_3 对上海某污泥填埋库区的填埋污泥进行调理改性, 并进行真空预压排水加固试验. 试验过程中, 对污泥的累计排水量、累计沉降量进行记录, 试验后分别进行含水率、十字板剪切强度和压汞试验. 结果表明: 直接采用真空预压法对原状污泥进行深度脱水的效果有限, 经 FeCl_3 调理改性后污泥脱水性能改善, 排水速率加快, 排水量增加, 试验后平均含水率由 75.8% 降至 66.6%; 真空预压后污泥的含水率和抗剪强度分布不均, 越靠近排水板变化越大, 含水率沿径向和深度方向逐渐增大, 抗剪强度沿着径向和深度方向逐渐减小; 调理污泥在真空预压后, 孔径主要分布在 200 ~ 100 000 nm, 小孔占比最高, 其次是中孔, 且离排水板越近, 大孔越多, 微孔越少; 调理后污泥含水率和体积分别减小了 9.2% 和 28.8%, 强度提升了 10 倍. 表明铁盐联合真空预压对污泥处理效果较好, 可从优化药剂组合和真空预压工艺参数两方面进一步提升脱水减容效果.

关键词: 填埋污泥; 三氯化铁; 真空预压; 脱水减容; 孔径分布

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)05-0173-09

Experiment on drainage reinforcement of landfill sludge by iron salt conditioning combined with vacuum preloading method

WU Yajun¹, DENG Qingyang¹, ZHANG Xudong¹, LI Jing²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: The storage capacity of sludge landfills in some places in China is seriously inadequate. To restore the storage capacity and reinforce the pit body, the experiment of vacuum preloading drainage reinforcement of landfill sludge conditioned by FeCl_3 was carried out. The accumulative drainage volume and accumulative settlement of the sludge were recorded, and moisture content test, vane shear test, and mercury intrusion porosimetry were carried out after the experiment. Results show that the effect of deep dewatering of the sludge by vacuum preloading method was limited. After chemical conditioning, the dewatering performance was improved, the drainage rate and drainage volume were increased, and the average moisture content was reduced from 75.8% to 66.6%. After vacuum preloading, the distributions of moisture content and shear strength were uneven, and the closer it was to the drainage board, the greater the change was. The moisture content increased gradually along the radial and depth directions, while the shear strength gradually decreased. The pore diameter of the conditioned sludge was mainly distributed in the range of 200 – 100 000 nm. The proportion of small holes was the highest, followed by that of the middle holes, and the closer it was to the drainage board, the more the large holes were, the fewer the micropores were. The moisture content and volume of the sludge decreased by 9.2% and 28.8% respectively, and the strength increased by ten times, indicating that the proposed method had better treatment effect. The dewatering and volume reduction effect can be further improved by optimizing agent combination and vacuum preloading process parameters.

Keywords: landfill sludge; FeCl_3 ; vacuum preloading; dewatering and volume reduction; pore size distribution

随着中国大中型城市第二产业和人口规模的不断扩大, 污水处理的副产物市政污泥的产量也随之大幅增加. 中国每年产生 3 000 万 ~ 4 000 万 t 城市

生活污水(含水率 80% 左右), 预计到 2020 年, 中国的市政污泥产量将会达到 6 000 万 ~ 9 000 万 t. 面对如此庞大的污泥产量, 寻找一个合适的处理处置方式成为当务之急, 污泥处理处置的目标是实现“四化”——减量化、稳定化、无害化和资源化^[1-2]. 当前, 中国主要采用卫生填埋的方式处置市政污泥^[3]. 随着污泥产量的不断增加, 国内许多污泥库或污泥坑的库容已不足, 无法继续填埋污泥且由于

收稿日期: 2019-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(41772303); 上海市自然科学基金(17ZR1410100); 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1415500)

作者简介: 武亚军(1973—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张旭东, xdzhang@shu.edu.cn

土地资源紧张一时又找不到新的填埋场地,污泥库区的排水减容与坑体加固成为目前多数填埋场亟须解决的问题. 现行常用的机械压滤脱水方法处理效率低,特别是针对已经填埋的高含水率污泥,难以大规模开展应用.

真空预压法是一种软弱地基处理加固的常用方法,具有处理量大、成本低、安全可靠等优点. 目前技术已非常成熟,衍生出一系列新方法如药剂真空预压法、气压劈裂真空预压法、真空预压联合电渗法等^[4-6]. 污泥的土力学性质极差,将真空预压法直接应用到污泥的排水加固处理效果并不明显^[7]. 这主要由污泥本身的特性决定:1) 由于污泥中含有大量呈胶状结构的有机物和亲水性物质,固结系数和渗透系数极小,排水固结特性极差^[8];2) 污泥具有由胞外聚合物(EPS)与微生物细胞形成的凝胶状絮体结构,且 EPS 中含有大量结合水,采用常规真空预压法难以排出^[9];3) 污泥固体中的大量有机质絮体为柔性结构,在外荷载作用下容易变形而堵塞排水通道.

无机混凝剂由于其具有压缩双电层、电中和、网捕卷扫作用,已被广泛应用于城市污水及工业废水处理,铁盐由于还具有较强水解能力的特点应用更为广泛,目前,一些学者已将其应用到剩余污泥和脱水污泥的研究中. 姚萌等^[10]采用 FeCl_3 和 CaO 为调理剂,比较了调理前后剩余污泥的比阻、污泥粒度及胞外聚合物的变化,对调理的作用机理进行了总结分析;牛美青等^[11]采用无机和有机混凝剂对污泥进行调理,通过测定污泥比阻、Zeta 电位及污泥上清液中大分子有机物含量,研究了不同混凝剂及其投加量对污泥脱水性能的影响;王晓萌等^[12]以铝盐、铁盐、钛盐混凝剂为研究对象,通过测定表征污泥脱水性能的指标,系统比较了它们对污泥的调理性能.

以上都是针对改善剩余污泥或者新鲜脱水污泥的脱水性能或指标展开的研究,针对填埋污泥的深度脱水减容与真空排水加固研究较少. 仅有小部分学者对此展开过研究, Lin 等^[13]对填埋库污泥采用

FeCl_3 化学调理联合真空预压法进行了真空预压现场试验,探讨了该方法在污泥库减量化方面的可行性. 武亚军等^[14]对新鲜脱水污泥的真空固结特性展开了研究,提出了基于药剂调质的真空预压法,以新鲜脱水污泥为研究对象,采用 FeCl_3 和 CaO 作为调理剂,研究了调质污泥的真空固结特性,虽取得了较好的效果,但试验规模小且未采用实际真空预压中广泛使用的塑料排水板,仍与实际工况有较大差别. 长期填埋污泥经过若干年的降解,各方面性质相对新鲜脱水污泥也已发生较大的变化,故需要对填埋污泥的调理药剂和真空排水加固特性展开详细的研究. 经药剂调理改性后,污泥的土力学性质如何变化,在真空负压下污泥的真空排水固结效果、污泥强度能否达到填埋标准,排水板是否会发生淤堵是亟须研究的问题. 基于以上问题,选用常用的铁盐——三氯化铁(FeCl_3)来调理污泥,污泥用量每桶达 150 kg,并采用塑料排水板进行排水固结,研究药剂调理后土工性质的变化,在真空荷载作用下污泥的排水固结规律以及孔隙分布规律,探究铁盐联合真空预压法处理污泥的可行性,对现场原位试验提供一定的参考.

1 药剂真空预压试验

1.1 试验污泥与化学药剂

试验填埋污泥取自上海某污泥填埋坑,填埋时间在 8 a 以上;试验中采用的药剂 FeCl_3 为工业级无水 FeCl_3 ,质量分数为 98%. 药剂添加时先称好质量,再配置成水溶液,按照药剂占污泥干基的质量分数进行添加. 本文的含水率为水的质量与污泥总质量之比.

1.2 试验器材

烧杯、量筒、滴定管、密封胶、电子天平(精度 0.01 g)、玻璃棒、模型桶(如图 1 所示)、空气压缩机、真空转换阀、真空表、集水瓶、直尺、细管、烘箱、塑料排水板(等效孔径为 75 μm ,如图 2 所示)、塑料扁平接头(如图 3 所示)、密封膜、土工布等.



图 1 试验模型桶

Fig. 1 Test model barrel



图 2 普通分离式排水板

Fig. 2 Ordinary separated drainage boards



图 3 塑料扁平接头

Fig. 3 Plastic flat connector

1.3 加药调理改性

取 150 kg 污泥, 将占污泥干基 20% 约 7.5 kg 的三氯化铁(FeCl_3)溶入 22.5 kg 水中, 配成 0.33 kg/L 的三氯化铁溶液. 配置溶液的过程中, 放热十分明显, 6 min 内水温从 20.3 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 68.5 $^{\circ}\text{C}$, 相当于释放了 4.55×10^6 J 热量. 将溶液分两次加入模型桶对污泥进行调理改性, 每次搅拌 15 min 以上, 快搅慢搅交替进行, 搅拌过程中反应十分剧烈, 体积急剧膨胀产生大量气泡和白烟, 并剧烈放热, 加药后污泥状态如图 4 所示, 加药后的污泥温度变化如图 5 所示.



图 4 加药时污泥状态

Fig. 4 Sludge state when adding reagents

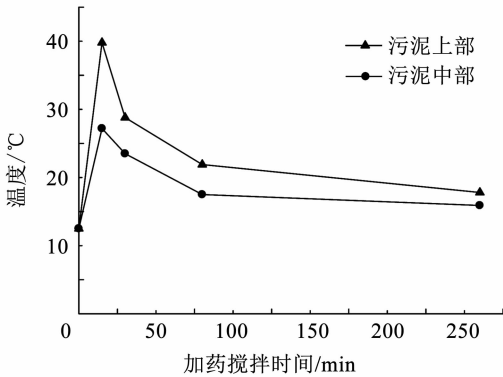


图 5 加药后污泥的温度变化曲线

Fig. 5 Temperature curve of sludge after adding reagents

1.4 真空预压试验方案

实际工程中, 真空预压法处理高含水率淤泥等

超软土常采用塑料排水板进行径向固结排水. 为了贴近实际, 采用塑料排水板进行径向真空固结试验, 探究经 FeCl_3 调理后长期填埋污泥的真空排水加固效果, 验证药剂真空预压法处理长期填埋污泥在实际工程中的可行性. 本次试验污泥用量为 150 kg, 试验组 FeCl_3 掺量为污泥干基的 20% (该添加比例是由以真空抽滤为基础的比阻试验确定的^[15]), 比阻是衡量污泥脱水性能的综合指标, 且比阻值与固结系数呈负相关^[13]. 另设置一个空白对照组, 污泥用量相同不添加任何药剂.

真空预压试验装置由模型桶、密封膜、排水管、集水瓶、空压机组成, 桶高约 98 cm, 桶体直径约 58 cm, 排水板与塑料扁平接头连接从密封膜中心穿孔通过软管连接到集水瓶, 集水瓶另一端再与真空源相连, 达到气液分离的目的, 如图 6 所示. 密封膜铺设于污泥上表面, 两者之间铺设一层土工布, 为保证较好的密封效果, 密封膜四周塞入污泥与模型桶间, 向下深入约 25 cm, 排水板与真空源之间采用塑料扁平接头、集水瓶、排水管进行连接. 排水板一端接入扁平接头, 再通过排水管接入集水瓶, 集水瓶与空压机通过细管、快速插接头和真空转换阀进行连接, 部分接头处用绝缘胶带和玻璃胶加密, 形成一个稳定的真空排水系统. 采用等效孔径为 75 μm 的普通分离式排水板, 每个桶放置 1 根排水板位于试样的正中心. 为了防止试验初期真空荷载过大致使大量细小颗粒往排水板迁移造成排水板滤膜淤堵, 试验采用分级施加真空荷载的加载方式, 通过调压阀调节真空荷载, 初级荷载为 40 kPa, 待加载时间持续 24 h 后, 将荷载增加至 80 kPa, 直至试验结束. 试验过程中对排水量、沉降量和真空度进行监测, 对径向收缩导致的漏气采用泥封处理. 试验完成后对模型桶内污泥进行十字板剪切试验、含水率试验、密度测试、压汞试验等, 试验点及取样点见图 7.

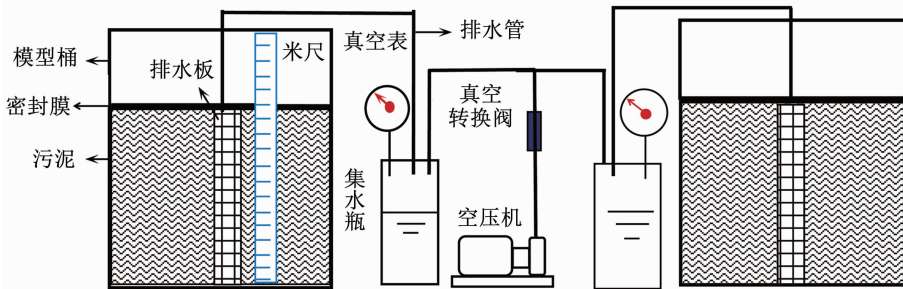


图 6 真空预压试验装置示意

Fig. 6 Schematic diagram of vacuum preloading test device

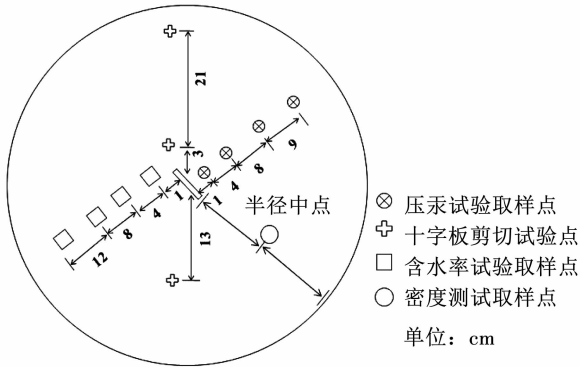


图 7 试验点和取样点示意

Fig. 7 Schematic diagram of test and sampling points

2 试验结果与分析

2.1 加药调理改性前后性质变化

FeCl_3 溶液与原始污泥发生了剧烈反应, 颜色由黑变黄, 污泥反应前后的性质发生了一些变化, 如表 1 所示.

表 1 原状和调理污泥基本性质

Tab. 1 Basic properties of raw sludge and conditioned sludge

| 类别 | 含水率/ % | 相对体积 w (有机物)/ 质量 | w (有机物)/ % | pH | 孔隙比 e | 渗透系数/ ($10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----|-----------|-----------------------|-----------------|-----|------------|--|
| 原状 | 76.1 | 1.8 | 40.9 | 7.5 | 4.1 | 1.9 |
| 调理 | 75.8 | 2.2 | 35.7 | 4.1 | 6.8 | 4.1 |

由于 FeCl_3 是以溶液的形式加入的, 含水率略微有所变化; 由于 FeCl_3 的混凝作用以及 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的网捕卷扫作用, 污泥的比重有所增加; 由于 Fe^{3+} 的水解作用以及较强的氧化作用, 有机物质量分数有所减少; 由于 Fe^{3+} 的强水解反应, pH 减小到 4.1, 减小了 45%. FeCl_3 溶液与污泥发生剧烈反应, 产生了大量气体, 体积膨胀, 产生的气体并不能完全从污泥中排出, 而是积存在污泥内部, 导致污泥中孔隙增多, 孔隙比增大. 由于 FeCl_3 的加入导致 pH 减小, 温度升高, 污泥胶体结构被破坏, 胞内水被释放, 污泥的黏度明显减小, 渗透系数增大, 渗透性提高. Fe^{3+} 的加入压缩了污泥胶粒双电层中的扩散层, 中和了部分污泥胶粒表面的负电荷, 降低了污泥胶粒间静电斥力和 ζ 电位, 胶粒之间开始发生凝聚, 污泥稳定的絮状胶体结构因失稳而破坏, 颗粒开始凝聚和絮凝, 固液分离发生, 脱水性能提高.

2.2 排水量

真空预压过程中排水量与排水速率随时间变化如图 8, 9 所示. 由图 8 可以看出, 原状污泥排水曲线十分平缓, 736 h 最终排水量只有 5 650 mL, 平均每小时排水量不足 8 mL, 由此可见真空预压法对原

状污泥进行深度脱水的效果十分有限. 经药剂调质的污泥脱水性能得到了明显提高, 经 FeCl_3 调理后的污泥深度脱水性能显著提升, 24 h 排水量达到 4 500 mL, 是原状污泥排水量的 7.5 倍. 调理污泥排水曲线 24 h 附近存在突变, 这是由于 24 h 后进行了真空荷载调整. 真空荷载的增加造成排水速率突增, 导致下一个计数期排水量增加较多, 反映到排水曲线上显示为突变. 经过 736 h 的真空预压, 调理污泥一共排水约 50 L, 相当于每吨污泥脱水 0.33m^3 .

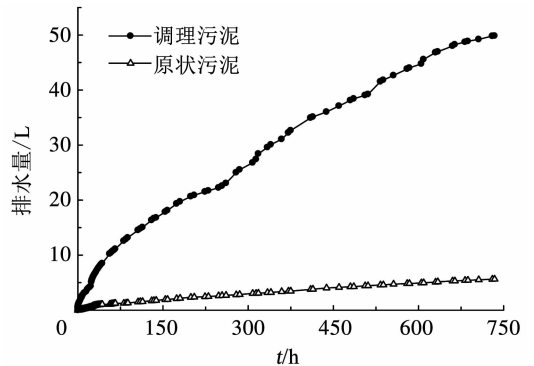


图 8 排水量随时间变化曲线

Fig. 8 Variation of drainage volume with time

从图 9 可以看出, 经 FeCl_3 调理的污泥排水速率不稳定, 上下波动较大, 这可能与真空度波动和污泥本身复杂的化学成分有关; 调理污泥排水速率明显大于原状污泥, 调理污泥前 24 h 的平均排水速率达到 180 mL/h 以上, 原状污泥仅为 20 ~ 30 mL/h, 调理后是调理前的 6 倍以上. 调理污泥排水速率在 24 h 突增, 这是因为真空度从 40 kPa 调整到 80 kPa. 24 ~ 400 h 排水速率约为 100 mL/h, 400 h 后排水速率降至约 45 mL/h, 说明 FeCl_3 的加入虽能大大改善污泥渗透性, 但并不能在污泥内部形成较强的骨架, 随着排水固结程度的加深, 孔隙比明显减小, 导致排水通道堵塞较多, 因此, 可进一步添加新的药剂构建具有较高强度结构的排水通道来增加其渗透性.

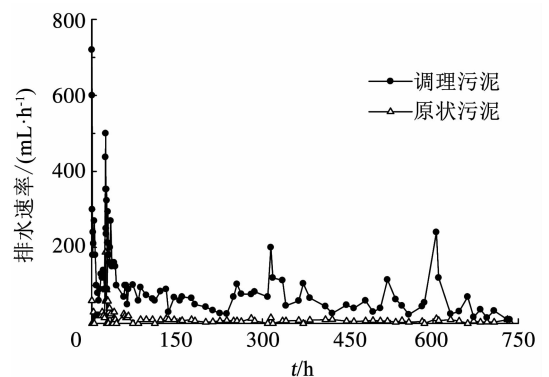


图 9 排水速率随时间变化曲线

Fig. 9 Variation of drainage rate with time

2.3 含水率

2.3.1 平均含水率

假定排水过程中固体小颗粒没有损失,根据排水量反算得到试验过程中的含水率变化,这里是指整桶污泥的平均含水率,如图10所示。可以看出,原状污泥含水率在抽真空过程中变化很小,24 h下降了不到0.2%,736 h下降了0.9%,这与排水量小有直接关系;经FeCl₃调理的污泥在前24 h下降了0.6%,在736 h内一共下降了9.3%,含水率最终降为66.6%,脱水效果较好,可进一步优化药剂配方和试验参数来提升效果。平均含水率的变化规律与排水量的规律相一致。

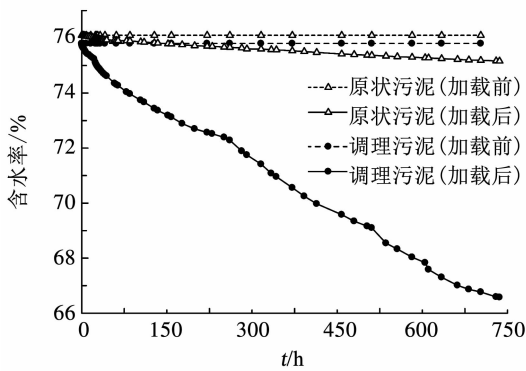


图10 平均含水率随时间变化曲线

Fig. 10 Variation of average moisture content with time

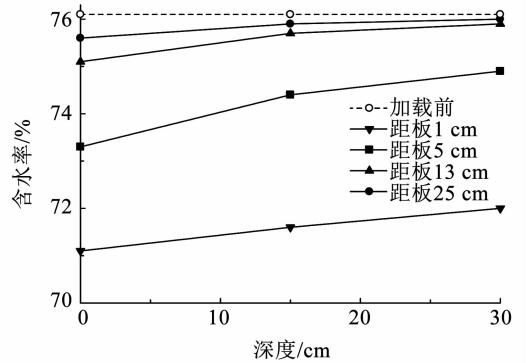
2.3.2 含水率分布规律

为了研究真空预压后污泥含水率的分布规律,分别在不同深度沿垂直排水板面方向取样测定其含水率,结果如图11所示。可以看出,深度越深,含水率越高,同一深度下,距离排水板越远,含水率越高,这可能与真空度递减有关,真空度沿半径方向和深度方向逐步衰减^[16];观察图11(b)可知,在表层,距离板1和25 cm两个位置处含水率差值为2.1%,在深度30 cm处,距板1和25 cm两位置处,含水率相差6%,这表明深度越深,沿着径向含水率分布差别越大,即含水率分布越不均匀;污泥表层含水率在57.1%~60.7%,深度30 cm处为60.7%~66.7%,Lin等^[13]真空现场试验得到的表层含水率分布范围为58.3%~63.1%,深度30 cm处为63.6%~70.6%,表层含水率二者相当接近且含水率沿径向和深度方向增加的规律一致,随着深度的加深,Lin等的含水率急剧增加至78.8%以上,与表层差距较大,整体性不如本次试验,这与坑体较深、中下部污泥与药剂混合不均、排水板弯折等因素有关。

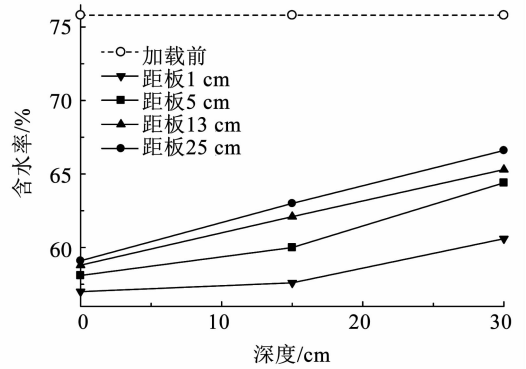
2.4 累计沉降量和减容比

试验过程中在某条垂直排水板的直径上选取8

个点位进行污泥沉降记录,将8个点位沉降值的平均值作为污泥的累计沉降值,得到原状污泥和调理污泥的累计沉降曲线如图12所示。可以看出,原状污泥在24 h内的沉降值基本达到了稳定,沉降量约1 cm,这与原状污泥渗透系数极低、排水量少有关;FeCl₃调理污泥在24 h内约沉降了4.5 cm,是原状污泥的2.25倍。调理污泥24 h后沉降量突增,这是由于24 h后的真空荷载调整,导致排水量在下一个计数期相比24 h之前增加较多所致。经过736 h的真空预压,调理污泥一共沉降了约17.4 cm,占其初始高度的24.8%。



(a) 原状污泥的含水率分布



(b) 调理污泥含水率分布

图11 含水率分布

Fig. 11 Moisture content distribution

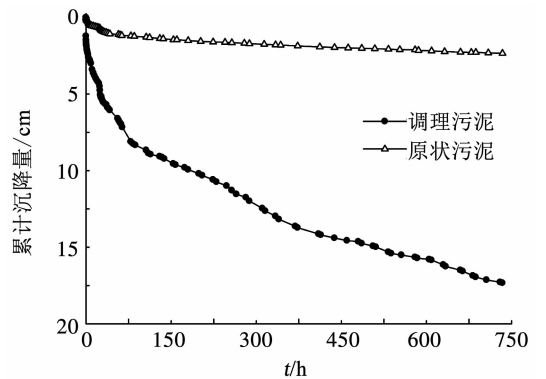


图12 累计沉降量随时间变化曲线

Fig. 12 Variation of accumulative settlement with time

图 13 为某条垂直排水板面直径上 8 个监测点的高度变化. 可以看出,在真空排水固结过程中,污泥表面沉降并不均匀,而是两边比中间沉降多,呈上凸状或拱型. 这可能与排水板和污泥沉降不同步以及排水板处形成的土桩有关,真空预压过程中排水板因为小颗粒的水平移动和竖向移动被土体紧密包围^[17],并在板处形成强度较高的土桩,难以随污泥一起下降,取出排水板时排水板上端在污泥表层之上也印证了这一点. 另外土桩的形成也影响了沉降速率,土桩强度高,压缩性低,沉降速率比远离土桩处慢,逐渐形成了图 14 的形状.

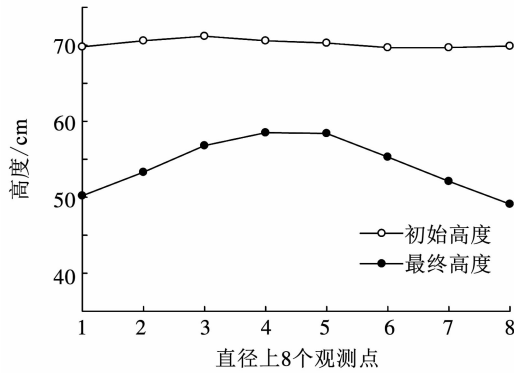


图 13 污泥高度变化曲线

Fig. 13 Variation of sludge height

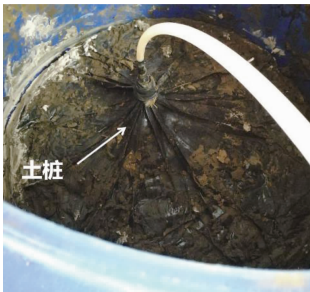


图 14 排水板处的土桩

Fig. 14 Soil pile at drainage board

在真空预压过程中,原状污泥仅发生竖向沉降,调理污泥有竖向沉降和径向收缩,无法直接通过沉降量计算体积改变量,故采用密度法. 为了尽可能准确测定整个试样的平均密度,采用环刀在图 7 所示位置从上往下间隔均匀地取 3 个试样,取 3 个试样的平均密度. 按照质量与密度的关系算出调理污泥真空预压后的体积,计算出减容比(减小的体积与原体积之比),调理污泥为 1 号,原状污泥为 2 号,结果如表 2 所示. 可以看出,2 号的减容比很小,为 4.6%,1 号相对调质污泥(加药后真空预压前)减容 36.2%,相对原状污泥(加药前)减容为 28.8%,减容效果较好. 减容比与排水量呈正相关,1 号和 2 号的减容比的比值约为排水量比值的 0.7 倍;体积变化量与 Lin 等^[13]真空预压现场试验得到的 47.5%

有一定差别,这主要与初始含水率不同有关,本文污泥初始含水率为 75%,明显低于 Lin 等的 89.6%.

表 2 试验结束后减容比

Tab. 2 Volume reduction ratio after the test %

| 编号 | 相对调质污泥减容比 | 相对原状污泥减容比 |
|----|-----------|-----------|
| 1 | 36.2 | 28.8 |
| 2 | — | 4.6 |

2.5 污泥强度

为研究真空预压结束后不同深度、距排水板不同距离位置处污泥强度,对 15,30 cm 深度,距排水板 3,13,24 cm 处的污泥分别进行了原状污泥和重塑污泥的十字板剪切强度试验,具体结果如表 3 所示. 可以看出,深度 15 cm 处原状污泥十字板抗剪强度平均为 1.1 kPa,FeCl₃ 调理污泥的抗剪强度最大达 18.9 kPa,平均为 11.7 kPa;随着排水固结过程的不断深入,孔隙水压力减小,有效应力增加,强度逐渐增大;沿径向距排水板越远,污泥强度越低,深度越深,强度越低,排水板处污泥强度最高,这与含水率分布规律一致;此外,强度越高,灵敏度越高,结构性越强,受扰动影响越大.

表 3 不同位置处原状和重塑污泥强度

Tab. 3 Strength of raw sludge and remolded sludge at different locations

| 深度/ cm | 测点距板 距离/cm | 污泥强度/ kPa | | 重塑污泥 强度/kPa | | 灵敏度 ST | |
|-----------|---------------|--------------|-----|----------------|-----|-----------|-----|
| | | 1 号 | 2 号 | 1 号 | 2 号 | 1 号 | 2 号 |
| 15 | 3 | 18.6 | 1.3 | 5.0 | 1.0 | 3.7 | 1.3 |
| | 13 | 9.9 | 1.2 | 5.5 | 1.0 | 1.8 | 1.2 |
| | 24 | 6.5 | 0.8 | 4.1 | 0.5 | 1.6 | 1.4 |
| 30 | 3 | 12.3 | — | 4.8 | — | 2.6 | — |
| | 13 | 5.7 | — | 3.0 | — | 1.9 | — |
| | 24 | 4.4 | — | 2.4 | — | 1.8 | — |

污泥强度呈现上述规律可能是因为真空压力沿径向和深度方向的损失,导致不同位置处排水固结程度不同. 且由图 13,14 可知,以排水板为中心形成了土桩,土桩一般呈倒锥形^[18],是由较细颗粒在渗透力作用下向排水板移动并聚集形成,土桩的强度一般较周围土体偏大^[17],结构性较强,土体强度呈现出以排水板为中心向四周逐渐减小,且随着深度逐渐减小的规律.

2.6 孔隙分布特征

为研究真空预压后的孔隙大小以及孔径分布规律,试验结束后在污泥表层垂直排水板面方向距板 1,5,13,22 cm 位置处取样,采用液氮冷冻真空干燥

升华法对试样处理后,采用压汞仪(如图 15 所示)进行了压汞试验(mercury intrusion porosimetry,简称 MIP).压汞试验的原理是:通过压汞仪施加一定的汞压力,克服汞的表面张力,从而使汞被压入试样孔隙中,所压进汞的体积即为孔隙体积.由于 2 号含水率过高、强度过低,无法取出成形试样,只对 1 号的孔隙分布特征进行研究.



图 15 压汞仪

Fig. 15 Mercury porosimetry

2.6.1 孔隙率与累计孔体积

距排水板不同距离的孔隙指标和累计入汞量与孔径关系如表 4 和图 16 所示.由表 4 可知,沿径向孔隙比最小为 0.5,最大为 1.2,平均为 0.85,试验结束后的孔隙比相比试验前下降了 82.4% 以上,表明在真空预压过程中,随着孔隙水的不断排出,孔隙体积显著缩小,孔隙比的显著减小也从侧面解释了在真空预压中后期排水速率减慢的原因;从距板 1 cm 到 5 cm 处,4 cm 的跨度,孔隙率增加了 11.7%,孔隙比增加了 0.33,从距板 5 cm 到 22 cm 处,17 cm 的跨度,孔隙率增加了 8.9%,孔隙比增加了 0.36,表明距离排水板越远,其孔隙率和孔隙比越大,且距板越近,孔隙变化越明显.由图 16 可知,距板越远,累计入汞量越大,即孔隙体积越大,4 个试样的累计孔隙体积差距较小,最大差值仅为 0.17 mL/g;4 个试样的孔径均集中在 200 ~ 100 000 nm,沿径向孔隙的主要分布范围差别不大.

表 4 不同位置处的孔隙率与孔隙比

Tab. 4 Porosity and porosity ratio at different locations

| 编号 | 距板距离/cm | 孔隙率/% | 孔隙比 |
|-----|---------|-------|------|
| 1-1 | 1 | 34.2 | 0.52 |
| 1-2 | 5 | 45.9 | 0.85 |
| 1-3 | 13 | 48.3 | 0.93 |
| 1-4 | 22 | 54.8 | 1.21 |

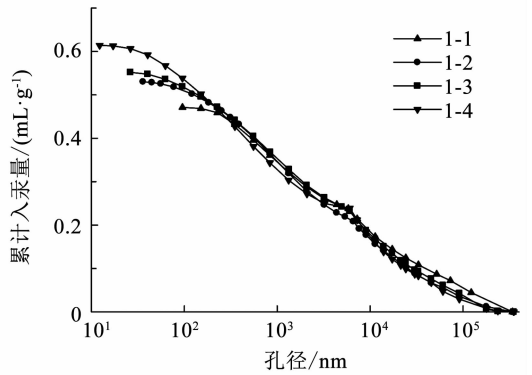


图 16 累计入汞量与孔径关系曲线

Fig. 16 Relation between accumulative mercury intrusion and pore size

2.6.2 孔径分布规律

孔径分布密度曲线如图 17 所示.可以看出,4 个试样的孔径分布密度峰值对应孔径在 6 000 nm 附近,距排水板距离不同,孔径分布密度曲线峰值并未发生移动.观察曲线的左半部分可得,距离排水板越远,孔径分布范围越广且微孔越多;10 ~ 500 nm 的孔径,距板越远反而越多.

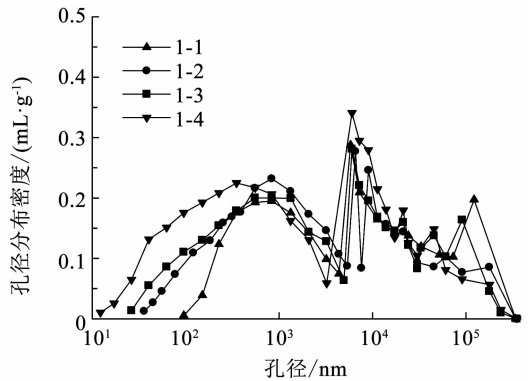


图 17 孔径分布密度曲线

Fig. 17 Pore size distribution density curve

为进一步研究孔径分布的规律,定量描述大中小孔径相对百分比的变化情况,需要对孔径进行分类.然而,目前对于软黏土孔径划分的具体界限值没有统一的标准. Shear 等^[19]根据原状和重塑的饱和灰色软弱冲击性黏土进行了大量的试验,将粘土内的孔隙分为以下 4 种,并定量地给出各类孔隙的界定标准,如表 5 所示.

表 5 孔隙类型划分

Tab. 5 Classification of pore types

| 孔隙类型 | 孔径范围/nm | 孔隙类型 |
|------|----------------------|---------------|
| 大孔 | 100 000 < d | 团粒间孔隙与部分团粒内孔隙 |
| 中孔 | 10 000 < d ≤ 100 000 | 团粒内孔隙 |
| 小孔 | 200 < d ≤ 10 000 | 团粒内孔隙和部分颗粒间孔隙 |
| 微孔 | d ≤ 200 | 颗粒间孔隙 |

本次试验的对象是调理改性污泥,由于没有污泥孔径的统一划分标准,根据 Shear 的标准,结合污泥的微观孔径特性,将孔径划分为 4 类. 根据表 5 的划分方法,做出孔隙体积百分比分布曲线,如图 18 所示. 可以看出,4 类孔隙小孔占比最高,最高可达 65.13%,其次是中孔,大孔最少,孔隙分布主要以小孔和中孔为主,即以团粒内孔隙和颗粒间孔隙为主. 沿径向小孔和中孔合占的比例从 92.92% 下降到 79.35%,说明距离排水板越远,孔隙分布越均匀. 距离排水板越近,小孔占比越多,中孔占比差别不大,这可能是由于距离排水板越近,真空吸力越大,颗粒之间排列更紧密,小孔隙越多. 距排水板越远,微孔占比逐渐增加,大孔占比逐渐减少,这可能是由于距排水板越近,小颗粒流失越多,导致微孔数量下降且大孔数量比远处略高.

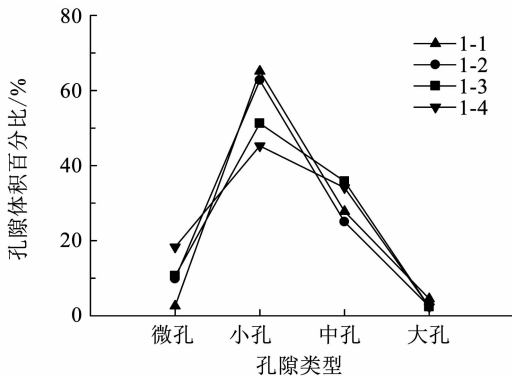


图 18 孔隙体积百分比分布曲线

Fig. 18 Pore volume percentage distribution curve

3 讨论

本次试验采用高 98 cm, 直径 58 cm 的圆柱型模型桶进行径向真空固结模型试验,污泥处理深度为 70 cm, 搅拌较均匀,排水板未发生明显弯折,处理结果较为理想,结论对于处理浅层泥坑较为适用. 然而工程实际中,真空预压原位处理的深度常在数米到数十米,规模和深度的不同会造成结果的差异. 从以下 3 点对可能涉及的问题展开讨论:1) 现场使用的排水板长达数米以上,其内部的井阻效应会被明显放大,影响正常排水造成处理效果的下降. 2) 坑体较深时污泥与药剂均匀混合较困难,导致药剂浓度分布不均,造成反应不充分,同样影响处理效果. 3) 处理深度较深时,排水板易发生 Z 型或 S 型等不同形式的弯折现象,真空度向下传递更为困难^[20],下部真空度的显著下降造成污泥排水困难.

以上问题使得真空预压原位处理效果以及处理的整体性显著降低,含水率、体积变化量、污泥强度等结果将与本次试验产生较大差别.

4 结论

1) 原状污泥颗粒细小且渗透系数极低,在真空预压过程中易在排水板滤膜上形成致密泥层堵塞排水通道,故原状污泥采用真空预压进行排水加固的效果十分有限.

2) 经 FeCl_3 调理后污泥,性质发生较大变化,排水速率大幅提升. FeCl_3 的加入能大大改善污泥渗透性且不易发生淤堵,但未能在污泥内部形成较强的骨架结构,后期排水速率下降明显.

3) 原状污泥的抗剪强度极低,在 1.1 kPa 左右,调理污泥抗剪强度最大达 18.9 kPa,接近 25 kPa 的填埋标准;真空预压后的含水率和抗剪强度分布不均,沿径向和深度方向含水率逐渐增大,抗剪强度逐渐减小.

4) 调理污泥真空预压后,孔径主要分布在 200 ~ 100 000 nm,孔径分布密度峰值对应孔径在 6 000 nm 左右;4 类孔隙小孔占比最高,其次是中孔,且离排水板越近,大孔越多,微孔越少.

5) 调理污泥平均含水率降至 66.6%,体积相对原状污泥减小了 28.8%,表明铁盐联合真空预压对污泥进行加固是一种有效的方法,可优化药剂组合和真空预压工艺参数来进一步提升效果,以期尽早应用于工程实践.

参考文献

- [1] ZHAO Y Q, BACHE D H. Conditioning of alum sludge with polymer and gypsum [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 194 (1/2/3): 213. DOI: 10.1016/S0927-7757(01)00788-9
- [2] MA W, ZHAO Y Q, KEARNEY P. A study of dual polymer conditioning of aluminum-based drinking water treatment residual [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2007, 42 (7): 961. DOI: 10.1080/10934520701370261
- [3] 王雅婷. 城市污水厂污泥的处理处置与综合利用[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(1): 90
WANG Yating. Municipal sewage sludge treatment and disposal and comprehensive utilization [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36 (1): 90. DOI: 10.3969/j. issn. 1673 - 1212. 2011. 01. 024
- [4] 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
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. DOI: 10.11779/CJGE201608002
- [5] 刘松玉, 韩文君, 章定文. 气压劈裂真空预压法室内模型试验装置及试验方法: CN 102707034 A [P]. 2012-10-03
LIU Songyu, HAN Wenjun, ZHANG Dingwen. Indoor model test

- device and test method for vacuum preloading and pneumatic fracturing combined method; CN 102707034 A[P]. 2012-10-03
- [6] PENG Jie, XIONG Xiong, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electroosmotic strengthening of ultra-soft soil [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3282. DOI: 10.1007/s11771-013-1852-9
- [7] 占鑫杰, 林伟岸, 詹良通, 等. 市政污泥真空预压模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 88
ZHAN Xinjie, LIN Weian, ZHAN Liangtong, et al. Model test study of vacuum preloading on municipal sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 88. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s1.064
- [8] 冯源, 罗小勇, 林伟岸, 等. 处置库污泥工程特性测试研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 115
FENG Yuan, LUO Xiaoyong, LIN Weian, et al. Geotechnical properties measurement of sewage sludge at a disposal site [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 115
- [9] AARNEVESILIND P. The role of water in sludge dewatering [J]. Water Environment Research, 1994, 66(1): 4. DOI: 10.2175/WER.66.1.2
- [10] 姚萌, 程国淡, 谢小青, 等. 城市污水厂污泥化学调理深度脱水机理 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2787
YAO Meng, CHENG Guodan, XIE Xiaoqing, et al. Mechanism of chemical conditioning for sludge dewatering in a municipal wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(8): 2787
- [11] 牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 不同混凝剂对污泥脱水性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2126
NIU Meiqing, ZHANG Weijun, WANG Dongsheng, et al. Study on effect of chemical conditioning using different coagulants on sludge dewatering performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2126
- [12] 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 等. 铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2274
WANG Xiaomeng, WANG Xin, YANG Minghui, et al. Sludge conditioning performance of polyaluminum, polyferric, and titanium xerogel coagulants [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2274. DOI: 10.13227/j.hjlx.201710205
- [13] LIN Weian, ZHAN Xinjie, ZHAN T L, et al. Effect of $FeCl_3$ -conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan landfill, China [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(3): 181. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2013.12.008
- [14] 武亚军, 唐欣, 崔春义, 等. 城市生活污泥真空固结特性试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 772
WU Yajun, TANG Xin, CUI Chunyi, et al. Experimental study on characteristics of vacuum consolidation of municipal sludge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 772. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2018.04.026
- [15] 谢敏, 施周, 李淑展. 污泥脱水性能参数——比阻检测的若干问题研讨 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 15
XIE Min, SHI Zhou, LI Shuzhan. Measuring specific resistance to filtration (SRF) of sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(3): 15. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2006.03.007
- [16] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1429
ZHU Qunfeng, GAO Changsheng, YANG Shouhua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1429
- [17] 姜海波, 武亚军, 孔纲强, 等. 超软土真空预压透明土模型试验及土桩形成机理 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 33
JIANG Haibo, WU Yajun, KONG Gangqiang, et al. Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and formation mechanism of "soil pile" [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 33. DOI: 10.11918/201809039
- [18] 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(1): 158
CHEN Pingshan, DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin. Mechanism and numerical simulation of the "soil piles" in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique [J]. Port and Waterway Engineering, 2012(1): 158. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2012.01.032
- [19] 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]// Advances in Geotechnical Engineering. Washington DC: Transportation Research Record, 1992
- [20] CAI Yuanqiang, QIAO Huanhuan, WANG Jun, et al. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading [J]. Engineering Geology, 2017, 222: 10. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.020

(编辑 刘 彤)