



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.201907154

中图分类号 X705

文献标识码 A

陈广, 武亚军, 林哲鑫. 暂存库填埋调质污泥的压缩与固结特性[J]. 环境工程学报, 2020, 14(4): 1059-1066.

CHEN Guang, WU Yajun, LIN Zhixin. Compression and consolidation characteristics of chemical conditioned sludge stored in the temporary library[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 1059-1066.

## 暂存库填埋调质污泥的压缩与固结特性

陈广<sup>1</sup>, 武亚军<sup>2,\*</sup>, 林哲鑫<sup>2</sup>

1. 上海城投污水处理有限公司, 上海 200120

2. 上海大学土木工程系, 上海 200444

第一作者: 陈广(1980—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 污水和污泥处理。E-mail: [chengguang@shwwt.com](mailto:chengguang@shwwt.com)

\*通信作者: 武亚军(1973—), 男, 博士, 教授。研究方向: 废弃物处理与资源化。E-mail: [wjyldz@shu.edu.cn](mailto:wjyldz@shu.edu.cn)

**摘要** 污泥暂存库区面临减量增容的严峻问题。由于暂存库中的污泥已经发生了较大程度的降解, 其固结性质与新鲜污泥相比已发生了较大的变化, 可直接影响到原位处理效果, 故选用  $\text{FeCl}_3$  和芬顿试剂对上海某污泥暂存库区的长期填埋污泥进行了调质改性, 并对调质后污泥的固结压缩特性进行了研究。结果表明: 经药剂调质后污泥的排水固结时间大大缩短, 在初始低固结应力水平时压缩量较大, 在后期高固结应力水平下沉降量较小; 在初始低固结应力水平下, 调质污泥的固结系数在  $10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  数量级范围内变化; 添加  $\text{FeCl}_3$  的实验组对应的  $C_{v,\max} = 2.91 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 芬顿调质实验组对应的  $C_{v,\max} = 9.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。渗透系数受固结应力影响较大, 当  $\text{FeCl}_3$  的掺量为 40% 时, 初级固结应力下样品的渗透系数  $k = 4.439 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 在 400 kPa 固结应力作用下, 渗透系数减小为  $3.796 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 经芬顿试剂调质的污泥在初级固结应力下, 渗透系数  $k = 6.48 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 在 400 kPa 下, 渗透系数  $k = 9.94 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上结果对现场污泥真空固结法处理有一定的指导意义。

**关键词** 暂存库污泥; 药剂调质; 压缩特性; 固结特性; 室内实验

污泥未经处理随意排放堆置, 会造成严重的环境污染问题。国际上污泥主要有土地利用、卫生填埋、焚烧和投海等 4 种处置方式<sup>[1]</sup>。其中, 填埋处置对技术指标要求相对宽松、运行成本低, 是现阶段我国污泥处置的主要方式, 且为简易的单独填埋, 即污泥经过脱水消化后, 直接倾倒在事先设置好的填埋坑中, 并采用膜或土覆盖进行封场。由于我国污水处理厂对污泥处理的重视度不高, 技术资金投入力度也不够, 导致污泥的含水率高、物理力学性质差, 不仅达不到市政污泥的填埋标准, 而且造成填埋场库容的日益紧张, 更严重的是会埋下安全隐患<sup>[2]</sup>, 如深圳下坪垃圾填埋场和山西太原垃圾填埋场均发生过填埋体的滑坡事故。为此, 在《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南》<sup>[3]</sup>的国家规范中对填埋污泥的各项指标做出了明确规定。与此同时, 我国的污泥产量也在逐年增加, 目前, 国内上海老港、成都长安、深圳下坪、杭州天子岭等填埋库区库容已经出现严重不足。因此, 污泥填埋场内坑体加固与库内污泥深度脱水减量成为目前多数填埋场所面临的问题。

现阶段常用机械压滤方式对污泥进行深度脱水。从机械脱水原理来看, 机械压滤的过程实质

收稿日期: 2019-07-24; 录用日期: 2019-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772303); 上海市自然科学基金资助项目(17ZR1410100)

上就是污泥的排水固结过程,即在外荷载作用下孔隙水不断被排出的过程。孙政等<sup>[4]</sup>对污水处理厂脱水污泥的固结特性进行了研究,发现污泥的固结规律与一般黏土差别较大,超孔隙水压力的消散较慢。朱婧等<sup>[5]</sup>对污泥、淤泥、粘土的压缩特性进行了对比研究,认为污泥与淤泥的固结不同,在外力荷载下其固结过程可以分多个阶段。王鹏等<sup>[6]</sup>采用纤维加筋技术,研究了不同掺量下加筋污泥的固结压缩特性。范惜辉等<sup>[7]</sup>选用普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥作为固化材料,研究了固化污泥在不同应力下的压缩、渗透规律。机械压滤技术一般是先采用化学药剂预调质,使污泥颗粒的结合水释放出来之后,再进行深度脱水,将湿基含水率降至60%以下。采用药剂真空预压法处理污泥也是如此,调质改性后的污泥与工程废浆类似,在真空预压过程中存在流固的两相转变,并在大部分时间里处于弹塑性状态,此时须采用土力学中的固结理论进行分析<sup>[8]</sup>。武亚军等<sup>[9-10]</sup>对于无机药剂调质过的新鲜污泥的真空固结特性进行了研究,由于暂存库区污泥与新鲜污泥性质不同,固结特性也必然有差异,而目前关于这方面的研究并未见报道。此外,FeCl<sub>3</sub>是比较常用的一种调质药剂,而芬顿试剂在污水处理中应用较多,但不常用于污泥调质,因此,一方面为了对新鲜污泥与暂存库污泥进行对比,另一方面为了对FeCl<sub>3</sub>和芬顿试剂的调质效果进行对比,本研究采用土力学中的固结实验对分别采用2种不同药剂调质过的填埋污泥的压缩固结特性进行了研究,研究结果可为机械压滤和真空预压处理填埋污泥的工程实践提供参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 试剂和仪器

实验选用的药剂分别为FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O、FeSO<sub>4</sub>、浓硫酸,以上药剂均为分析纯(AR)。实验所需H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>通过40%的双氧水颗粒(昌乐鑫富强商贸有限公司)按浓度比例添加。实验仪器主要包括中压固结仪和电子天平等。

### 1.2 污泥基本物理性质

对暂存库区填埋污泥与新鲜污泥的各项物理指标进行了测试。比重采用比重瓶法测试;密度采用环刀法测试;含水率采用低温烘干法测试;有机物采用灼失量法测试。结果表明,填埋污泥与新鲜污泥的含水率分别为74.1%和82.17%,有机质含量分别为40.9%和64.9%,比重(指污泥颗粒的密度与水密度的比值)分别为1.87和1.57,密度分别为1.2 g·cm<sup>-3</sup>和1.02 g·cm<sup>-3</sup>。由此可见,填埋污泥具有比新鲜污泥含水率低、有机物含量低、比重和密度大等特点。

### 1.3 实验方法

固结实验的药剂调质方案中氯化铁的添加量分别为0、10%、20%、30%和40%;芬顿试剂的添加方案如表1所示。装入烧杯中置于常温下放置24 h,待污泥与药剂充分反应后,再均匀装填入固结仪,每个实验组别设置2组平行实验。由于污泥含水率较高,初级固结应力较大时容易发生冒浆,选取初级固结应力为3.125 kPa,加荷比为1,将最大固结应力增加至400 kPa。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999),加载过程中按规定时间记录百分表读数,由于污泥稳定达到稳定标准时间较长,每级加载48 h。第1级固结应力 $p$ 设置为3.125 kPa,之后按6.25、12.5、25、50、100 kPa依次加载,以沉降量小于0.005 mm·h<sup>-1</sup>为沉降稳定的标准。

表1 污泥固结实验芬顿试剂调质方案

Table 1 Consolidation test plan of sludge conditioned by Fenton reagent

编号	Fe <sup>2+</sup> 质量分数%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 质量分数%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup>
1	4	4	1
2	4	6	1.5
3	4	8	2
4	8	8	1.5
5	8	12	2
6	8	16	3

## 2 结果与讨论

### 2.1 孔隙比

添加药剂之后污泥的孔隙比 $e$  (指污泥中孔隙体积与固体体积的比值, 初始孔隙比 $e_0$ 采用含水率和比重进行换算, 压缩过程中的孔隙比根据压缩量测试) 会发生较大的变化, 不同种类的药剂添加量与初始孔隙比的关系如图1所示。由图1可知, 经过药剂调质改性后,  $e$ 均有不同程度的增大。采用 $\text{FeCl}_3$ 调质后(图1(a)), 污泥的初始孔隙比 $e_0$ 变化明显, 从原始污泥的4.098上升至6.681, 但随着药剂掺量的增加, 污泥的孔隙变化较为平缓, 最终达到7.244。采用芬顿改性后(图1(b)), 当 $\text{Fe}^{2+}$ 的掺量为4%时, 污泥孔隙比随着 $\text{H}_2\text{O}_2$ 掺量的增加变化明显, 由4.802上升至7.092; 当 $\text{Fe}^{2+}$ 的掺量为8%时, 污泥孔隙比随着 $\text{H}_2\text{O}_2$ 掺量的增加变化较为缓慢, 最终达到4.908。这是由于在药剂调质过程中产生了大量气体, 这些气体不能完全从污泥中排出, 而是积存分布在污泥内部, 导致污泥的空隙变多, 从而使得孔隙比增大。

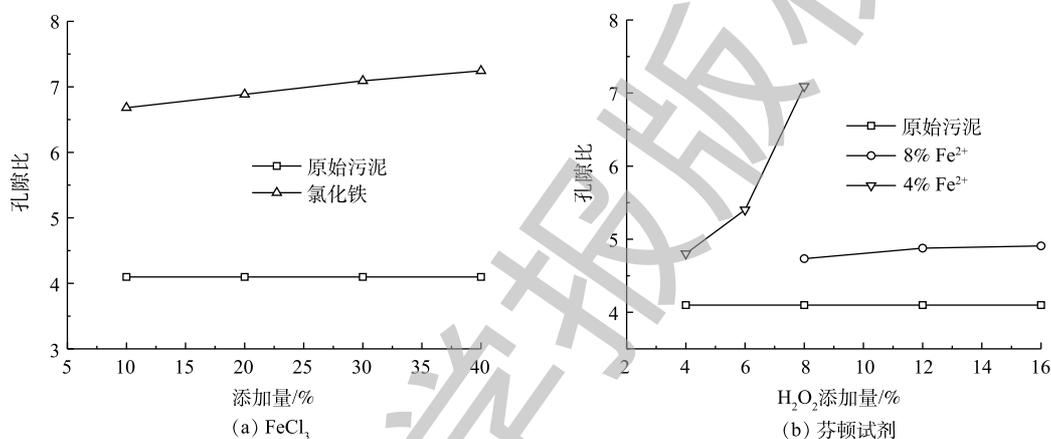


图1 不同药剂种类的添加量与初始孔隙比的关系

Fig. 1 Relationship between sludge initial porosity and the dosage of different agents

### 2.2 压缩特性

压缩实验每级荷载的加载周期为48 h, 不同 $\text{FeCl}_3$ 添加量下改性污泥的孔隙比 $e$ 与荷载 $p$ 的关系如图2(a)所示。污泥初始孔隙比为4.098, 略大于常规的软黏土, 经过药剂调质后, 污泥的初始孔隙比随着药剂添加量的增加逐渐变大, 当药剂添加量为40%时, 孔隙比达到7.244。不同芬顿配比掺量下改性污泥的 $e-p$ 关系如图2(b)所示。对比2种药剂调质后的污泥发现, 在初级荷载作用下, 样品的孔隙比迅速减小。通过对固结应力为100 kPa时的孔隙比变化量进行了分析, 发现调质污泥的压缩量基本均达到总压缩量的70%以上。这是因为在前期压缩过程中, 调质污泥较原始污泥颗粒间的空隙总量更多, 颗粒间没有形成骨架, 强度较低, 在较低应力作用下, 孔隙水排出顺畅, 压缩量大, 孔隙比减小幅度大。经过3.125、6.25、12.5、25、50 kPa荷载作用下, 芬顿改性污泥的沉降量较大, 孔隙被大幅压缩; 当荷载大于50 kPa时, 污泥沉降速率逐渐减慢, 沉降幅度逐渐减小, 污泥孔隙比被压缩幅度也逐渐减小。由于原始污泥中有机质含量较高, 存在大量具有一定承载力的微生物残体和胶结絮状有机物, 通过添加 $\text{FeCl}_3$ 与芬顿试剂可以一定程度上破坏微生物残体和胞外聚合物, 减少了有机物的含量, 样品更容易发生固结压缩。

将调质污泥的孔隙比 $e$ 与固结应力 $p$ 之间的关系可以绘制成半对数坐标曲线( $e-\lg p$ ), 如图3所示。由图3(a)可知, 孔隙比 $e$ 与固结压力 $\lg p$ 之间呈明显的线性关系, 这一结果与常规淤泥类似。填埋污泥的压缩指数为0.64, 调质污泥的压缩指数在0.776~0.795, 跟新鲜脱水污泥差别较大, 且

与常规淤泥在数值上也较为接近<sup>[1,5]</sup>。由图3(a)可知,污泥初始孔隙比的拟合值要略大于实验实测值。这是由于污泥的机械脱水和长期填埋类似于加卸载过程,压缩之后不仅存在塑形变形,而且也会发生一定程度的回弹。污泥的实际孔隙比和理论孔隙比的差值在一定程度上反映了不可恢复的塑形变形。同时,重塑制样及拟合精度也会对该结果产生一定影响。由于污泥中含有凝胶状结构,颗粒接触点处有一定的胶结力,能承受一定的压力而变形较小,使得在初期加荷阶段曲线平缓。此外,一般的原状土由于前期固结应力的存在会发生自重应力下的固结。其压缩曲线会出现屈服应力的折点,污泥的 $e$ - $\lg p$ 曲线近似为一条直线,由此可知,调质污泥不存在应力屈服点,属于欠固结土。不同芬顿配比掺量下改性污泥的 $e$ - $\lg p$ 曲线如图3(b)所示。污泥孔隙比随固结应力增大基本呈线性减小,压缩指数 $C_c$ 为0.444~0.591,整体上小于原始污泥和经 $\text{FeCl}_3$ 调质后的污泥,和常规淤泥土较为接近,但仍属于高压缩性土。

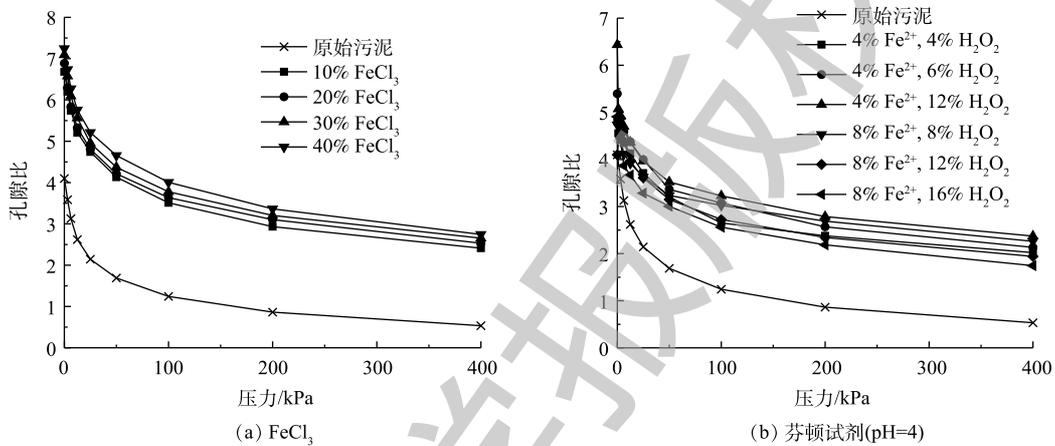


图2 调质污泥的  $e$ - $p$  曲线

Fig. 2  $e$ - $p$  curve of conditioned sludge

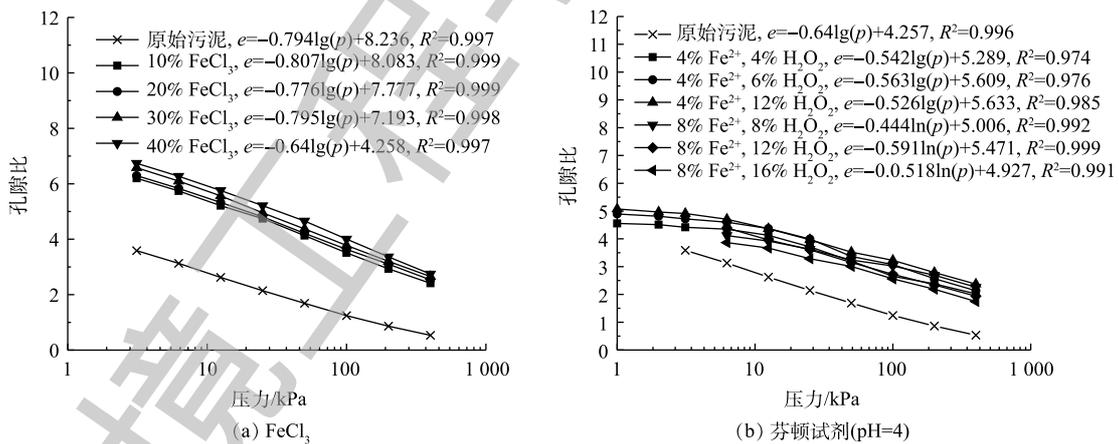


图3 调质污泥的  $e$ - $\lg p$  曲线

Fig. 3  $e$ - $\lg p$  curve of conditioned sludge

### 2.3 固结特性

固结系数 $C_v$ 是表示孔隙水压力消散快慢的物理量,固结系数越大,固结速度越快,反之越慢。采用时间平方根法可得到调质污泥固结系数 $C_v$ 与固结应力 $p$ 之间的关系。图4(a)为采用 $\text{FeCl}_3$ 在各级压力下的固结系数变化结果。由图4(a)可知,在初级压力下,调质污泥的固结系数在 $10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级变化,随着固结应力的增大,污泥的固结系数逐渐减小。此外,随着 $\text{FeCl}_3$ 掺量

的增大, 固结系数也越大, 且在前几级固结应力下固结系数的减小幅度也越来越明显。由各条固结系数曲线关系可以说明在每一级固结应力下, 随着  $\text{FeCl}_3$  添加量的增加, 污泥的固结系数增大, 即  $\text{FeCl}_3$  掺量越多, 固结过程中孔隙水压力消散越快, 这一点与新鲜脱水污泥固结系数的变化规律<sup>[9]</sup>一致。

对比芬顿调质的实验结果(图4(b))可知: 当  $\text{Fe}^{2+}$  的添加量为 4% 时, 样品的固结系数随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  添加量的增加而增大, 当  $\text{H}_2\text{O}_2$  的掺量为 8% 时达到最大; 当  $\text{Fe}^{2+}$  的添加量为 8% 时, 样品的固结系数随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  掺量的增大呈现先增大后减小的趋势。这是由于当  $\text{H}_2\text{O}_2$  添加量过多时, 不仅不能分解产生更多的羟基自由基, 反而会使最初产生的羟基自由基发生泯灭<sup>[11]</sup>。就初级固结应力下的固结系数而言, 芬顿试剂改性后初级固结应力下  $C_{v\max}=9.88\times 10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , 当固结应力增大到 400 kPa 时,  $C_v=1.85\times 10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ; 经过 40% 的  $\text{FeCl}_3$  调质后  $C_{v\max}=2.91\times 10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , 随着固结应力的增大,  $C_v$  减小至  $4.98\times 10^{-4}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此, 当  $\text{Fe}^{2+}$  添加量为 4%、 $\text{H}_2\text{O}_2$  掺量为 8% 时, 在固结应力作用下污泥的孔压消散最快。

污泥与淤泥、黏土最大的区别是污泥的固体物质中存在 40%~60% 的有机物, 这些有机物大多数是生物处理过程中的微生物残体<sup>[12]</sup>。因此, 污泥中的水分赋存状态非常特殊, 除了具有孔隙水、表面结合水以外, 存在絮凝体内部的结合水和细胞颗粒内部的细胞水(或称为生物水)<sup>[13]</sup>。这些水赋存于可以承载一定压力的有机物絮体中, 这使污泥中水分难以快速排出, 因此, 孔隙水压力消散时间非常漫长<sup>[14]</sup>。添加药剂在一定程度上使得微生物残体胞内水以及有机絮体中的结合水释放, 从而大大缩短了固结时间。

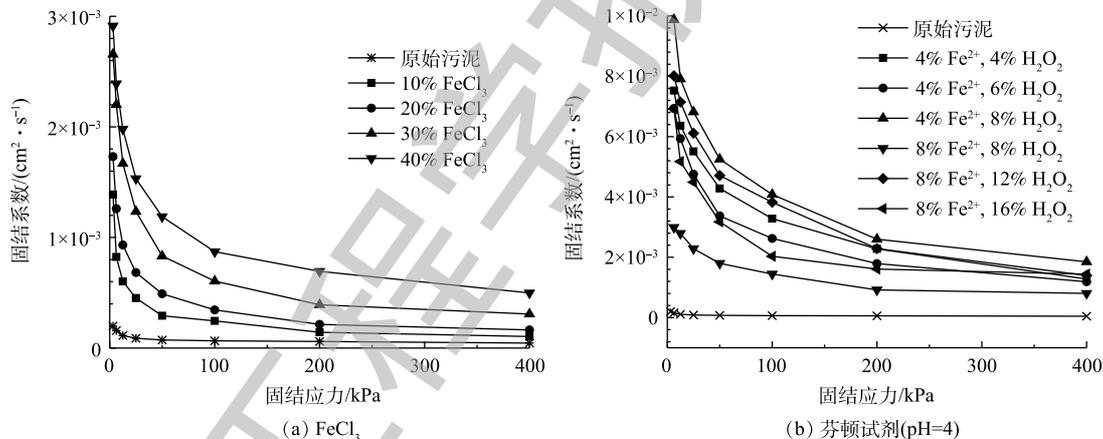


图4 调质污泥固结系数与固结应力的关系

Fig. 4 Relation between consolidation coefficient and consolidation stress of conditioned sludge

#### 2.4 渗透特性

如图5所示, 通过固结系数可以推演出污泥在各级固结压力下的渗透系数  $k$ 。由图5(a)可知:  $k$  和固结应力的规律与固结系数  $C_v$  和固结应力的规律相似, 受固结应力影响较大; 在 0~25 kPa 阶段, 污泥的渗透系数下降明显, 渗透性变差, 这是因为大孔隙被压缩成小孔隙或密闭孔隙, 孔隙比迅速减小导致排水困难。经过试剂调质后, 长期填埋污泥的渗透系数增大, 初级固结应力下的  $k$  从  $10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  数量级增大到  $10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  数量级, 随着压力的增大,  $k$  减小为  $10^{-8}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  数量级; 当  $\text{FeCl}_3$  的掺量为 40% 时, 样品在初级固结应力下的  $k=4.439\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 随着固结应力的增加,  $k$  减小至  $3.796\times 10^{-8}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 采用芬顿试剂调质的污泥在初级固结应力下的  $k=6.48\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5(b)), 随着固结应力的增大,  $k$  则下降至  $9.94\times 10^{-8}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。若以固结系数和渗透系数作为污泥固结效果好坏的指标, 芬顿试剂的效果更佳。

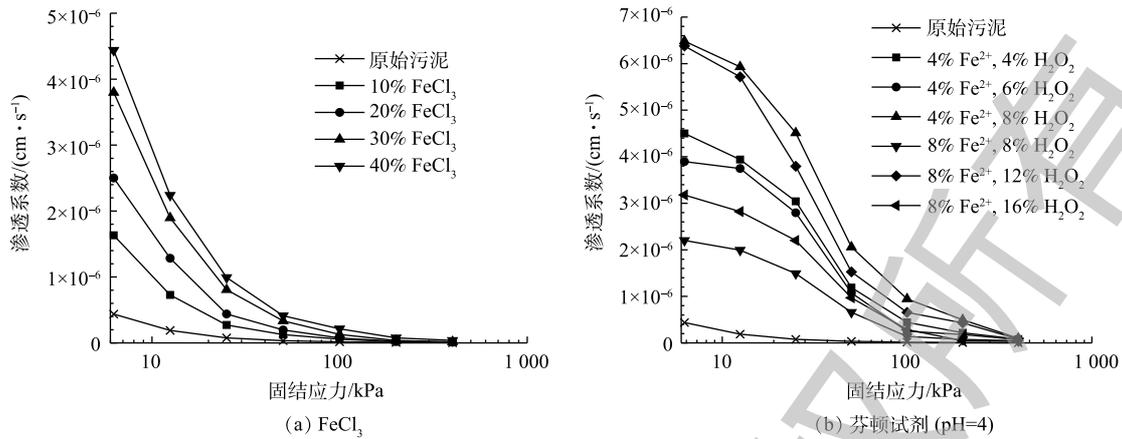
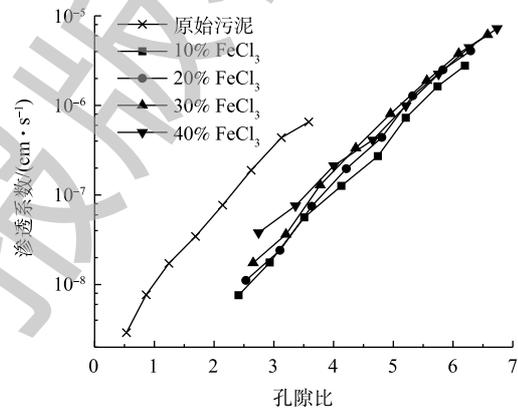


图5 调质污泥渗透系数和固结应力的关系

Fig. 5 Relation between permeability coefficient and consolidation stress of conditioned sludge

此外, 土体渗透性与其孔隙比密切相关。有研究<sup>[5]</sup>表明, 土体孔隙比  $e$  与  $\lg k$  存在一定的关系。图6为在不同  $\text{FeCl}_3$  掺量下调质污泥渗透系数与孔隙比关系曲线。由图6可知, 随着孔隙比的减小, 渗透系数也逐渐减小, 反之, 渗透性增大,  $e$  与  $\lg k$  之间的线性关系近似成立。在一定孔隙比范围内, 相同孔隙比下10%添加量的污泥渗透系数一直小于同样孔隙比的其他掺量污泥, 20%、30%和40%添加量下的污泥在孔隙比为5~7时渗透系数较为接近, 但是随着孔隙比减小, 实验组污泥的渗透系数出现差异, 且随着药剂掺量减小而递减, 添加量为20%的实验组渗透系数接近于10%添加量的实验组。

图6 经  $\text{FeCl}_3$  调质污泥渗透系数与孔隙比关系Fig. 6 Relation between permeability coefficient and porosity of sludge conditioned by  $\text{FeCl}_3$ 

对比调质污泥和原始污泥可以发现, 在重合的孔隙比区间内, 相同孔隙比下对照组的渗透系数要大于添加药剂的实验组。这是因为与天然细粒土一样, 污泥由于初期的加药絮凝和板框压滤, 其初始状态的结构也很复杂, 一旦扰动, 原有的过水通道的形状、大小及其分布都会改变, 故渗透系数也不同。这一点与普通的性质相近, 相同孔隙比时扰动土样的渗透系数通常小于原状土样<sup>[15]</sup>。实际加药时, 搅拌分散以及药剂的作用导致污泥颗粒分散变小, 絮状结构一定程度上被破坏, 使得调质后的污泥在相同孔隙比下的  $k$  小于原始污泥。

### 3 结论

1) 污泥经试剂调质后能在较短时间内排水固结稳定; 调质污泥在低荷载水平下沉降量较大, 在高荷载水平下沉降逐渐平稳, 孔隙变化不大; 经过  $\text{FeCl}_3$  调质后的污泥压缩性增大, 压缩指数由0.64增大至0.776~0.795。

2) 在初级固结应力下, 调质污泥的固结系数在  $10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  数量级内变化。添加  $\text{FeCl}_3$  的实验组  $C_{v,\max} = 2.91 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 芬顿调质实验组  $C_{v,\max} = 9.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。比阻和固结系数并不是简单地呈负相关性, 两者之间的定量关系还须进一步研究。

3) 渗透系数受固结应力影响较大。当  $\text{FeCl}_3$  的掺量为 40% 时, 样品在初级固结应力下的渗透系数为  $4.439 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 在 400 kPa 下, 渗透系数减小为  $3.796 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 采用芬顿试剂调质的污泥在初级固结应力下,  $k=6.48 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 在 400 kPa 下,  $k=9.94 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4) 在芬顿试剂最小添加量时 (4%  $\text{Fe}^{2+}$ +4%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 的调质效果均比  $\text{FeCl}_3$  最大添加量 40% 时的调质效果要好, 因此, 建议在工程实践中采用芬顿试剂进行调质污泥。

## 参考文献

- [1] 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): 90-94.
- [2] 郭清嵩, 顾潇, 武博然, 等. 真空预压处理非规范填埋污泥的中试[J]. *环境工程*, 2017, 35(12): 124-128.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 孙政, 朱伟, 贺敏杰. 污水厂污泥固结特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(11): 3146-3150.
- [5] 朱婧, 洪宝宁, 刘鑫. 污泥、淤泥和黏性土的压缩特性对比试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 328-332.
- [6] 王鹏, 唐朝生, 孙凯强, 等. 纤维加筋市政污泥固结特性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(4): 687-694.
- [7] 范惜辉, 朱伟, 王升位, 等. 固化污泥固结渗透特性及孔隙变化试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(s1): 20-24.
- [8] 武亚军, 顾赛帅, 骆嘉成, 等. 无机药剂对工程废浆药剂真空预压的影响[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(9): 38-46.
- [9] 武亚军, 唐欣, 崔春义, 等. 城市生活污水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): 193-201.
- [10] WU Y J, LIN Z X, KONG G Q, et al. Treatment of municipal sludge by Fenton oxidation combined vacuum preloading[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(16): 15990-15997.
- [11] 潘胜, 黄光团, 谭学军, 等. Fenton试剂对剩余污泥脱水性能的改善[J]. *净水技术*, 2012, 31(3): 26-31.
- [12] 朱伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3041-3054.
- [13] TSANG K R, VESILIND P A. Moisture distribution in sludges[J]. *Waterence & Technology*, 1990, 22(12): 135-142.
- [14] LIN W A, ZHAN X J, ZHAN L T, et al. Effect of  $\text{FeCl}_3$ -conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan Landfill, China[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2014, 42(3): 181-190.
- [15] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

## Compression and consolidation characteristics of chemical conditioned sludge stored in the temporary library

CHEN Guang<sup>1</sup>, WU Yajun<sup>2\*</sup>, LIN Zhixin<sup>2</sup>

1. Shanghai Chengtuo Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 200120, China

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

\*Corresponding author, E-mail: wyjldz@shu.edu.cn

**Abstract** Owing to the high level degradation of stored sludge and great change in its consolidation characteristic compared with fresh sludge, the severe problems of volume reduction of stored sludge and capacity increase will be faced by the sludge temporary library, which can directly affect the in situ treatment effect of stored sludge. In this study,  $\text{FeCl}_3$  and Fenton reagent were used to condition the long-term landfill sludge in a sludge storage library in Shanghai, and the consolidation and compression characteristics of the conditioned sludge were studied. The results showed that the time for drainage and consolidation was significantly reduced for the conditioned sludge. The compression was large under the initial low load level, and the settlement was little under the latter high load level. Under the initial low load level, the consolidation coefficient of the conditioned sludge changed within the order of magnitude of  $10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . The  $C_{v,\max}$  for the test group with  $\text{FeCl}_3$  addition was  $2.91 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , and for the test group with Fenton conditioning was  $C_{v,\max} = 9.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . The permeability coefficient was greatly affected by the consolidation stress. When the  $\text{FeCl}_3$  dosage was 40%, the permeability coefficient  $k$  under the primary load was  $4.439 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . At the load of 400 kPa, the permeability coefficient decreased to  $3.796 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . For the sludge conditioned with Fenton reagent, its  $k$  value was  $6.48 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  under primary load, and was  $9.94 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  at the load of 400 kPa. The above results provide certain guidance significance for sludge field treatment by the vacuum consolidation method.

**Keywords** sludge stored in a temporary library; chemical conditioning; compression characteristics; consolidation characteristics; laboratory test