

DOI: 10.11779/CJGE201608002

药剂真空预压法处理工程废浆试验

武亚军, 陆逸天, 牛 坤, 孙德安

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 将适合于处理大面积高含水率淤泥的真空预压法与用于污水处理的絮凝沉淀法相结合(即药剂真空预压法)应用于工程废浆的固液分离。针对上海某桩基施工现场产生的废弃泥浆采用 4 种不同的絮凝剂进行了沉降柱试验, 并对各自的絮凝效果进行了对比。采用最佳絮凝效果时的絮凝剂和配比, 进行了室内药剂真空预压模型试验, 试验过程中对出水量和废浆浆面高度进行监测; 试验前后进行了含水率、颗粒分布、压汞和扫描电镜试验。试验发现: ①废浆含水率从絮凝前的 163%, 降低到絮凝后的 96%, 经过真空预压后再降低到 37%; ②加入絮凝剂后絮体中的黏粒含量减少、粉粒含量增多, 即絮凝会使小颗粒长大; ③处理后废浆的孔隙率明显下降, 沿径向向内逐渐减小。研究表明药剂真空预压法技术可行、效果显著, 值得大范围推广。

关键词: 药剂真空预压; 药剂; 废弃泥浆; 压汞试验; 扫描电镜

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)08 - 1365 - 09

作者简介: 武亚军(1973 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程中软地基处理、基坑边坡支护、地下建筑结构工程等方面的教学与科研工作。E-mail: wyjldz@163.com。

Experimental study on solid-liquid separation of construction waste slurry by additive agent-combined vacuum preloading

WU Ya-jun, LU Yi-tian, NIU Kun, SUN De-an

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The vacuum preloading method dealing with soils with high moisture content in large area and the flocculation precipitation method used in sewage treatment are combined to achieve solid-liquid separation of construction waste slurry. A series of sedimentation column tests are performed on the waste slurry of a pile foundation project in Shanghai by using four different kinds of flocculants, and an optimum flocculant is obtained. Vacuum preloading model tests are carried out on the optimum flocculant and the slurry proportioning. During testing, the water yield and the height of slurry surface are monitored. Furthermore, the tests on moisture content, particle size distribution, mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscopy are also carried out. It is found that: (1) After adding the flocculants, the moisture content of the waste slurry declines from 163% to 96%, and it is reduced to 37% by vacuum preloading. (2) After adding the flocculants, the clay content decreases, and the silt content increases. That is to say, flocculation will make small particles larger. (3) After the treatment, the porosity of waste slurry obviously decreases along the radial direction. The technology of solid-liquid separation by flocculants and vacuum preloading is feasible and effective, and is worthy to be used in engineering practice.

Key words: additive agent-combined vacuum preloading; flocculant; waste slurry; mercury intrusion porosimetry; scanning electron microscopy

0 引 言

盾构和钻孔灌注桩等地下工程施工中所产生的大量废弃泥浆如果处置不当会对环境造成严重污染, 随着人们环保意识的增强逐渐受到了社会各界的广泛关注, 关于废浆处置的固液分离机理及方法, 一些学者进行了相应研究^[1-2]。

目前, 工程废浆处置主要有外运排放、絮凝沉淀、机械压滤及真空过滤 4 种常见方式。①外运排放方式

是将工程中产生的废浆直接外运到郊外使其自然风干, 这种方式会造成原状土壤的板结失效; 若排放到河道、海洋则会造成所在水域的污染。②絮凝沉淀是由于废浆含水率高、细颗粒含量多, 自然沉淀方式无法满足要求时, 向废浆中添加絮凝剂促使其快速沉淀

基金项目: 国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目
(20123108120029)

收稿日期: 2015 - 06 - 28

的一种方式^[3-5],一般经过这种方式处理后废浆的含水率仍然比较高。③机械压滤方式能够在短时间内快速的将废浆中的水分排出,所产生的泥饼可作为为工程材料^[6],但是处理效率较低,难以广泛推广使用。④真空过滤技术是利用真空压滤机将废浆中的滤液吸走,固体颗粒截留在滤布表面的一种方式,由于该方法过滤推动力小,易造成滤孔堵塞,一般不适合处理粒径小于 100 μm 的浆液。除上述方式之外,还有离心脱水和固化剂等技术^[7-12],这些技术处理效率较低,也难以广泛应用于工程实践。因此,目前工程废弃泥浆的处理效果还无法令人满意。

基于目前工程废浆的处置现状,本研究将适合于处理大范围高含水率淤泥的真空预压法与絮凝沉淀法相结合,提出药剂真空预压法并应用于废浆的固液分离。这里的真空预压法与传统泥浆处理中真空过滤技术不同,在处理细小颗粒淤堵方面已有一定的经验^[13-18]。同时,添加絮凝剂会增大废浆颗粒粒径、减小土颗粒间的黏结力、增大渗透系数,二者结合能有效防止淤堵并获得很好的固液分离效果。

本文首先对添加 4 种不同絮凝剂的废浆试样进行了沉降柱试验,根据上清液浊度和浑液面选择出最合适的絮凝剂。然后对废浆进行药剂真空预压固液分离的室内模型试验,采用含水率试验、颗分试验、压汞试验(Mercury Intrusion Porosimetry,简称 MIP)和扫描电镜试验(Scanning Electron Microscopy,简称 SEM)等对试样的固液分离效果进行了研究,结果表明该方法用于工程废浆的固液分离是可行的。

1 废浆的沉降柱试验

1.1 沉降柱试验

为对比不同絮凝剂、同种絮凝剂不同添加量的絮凝效果进行沉降柱试验。沉降柱如图 1 所示。先按照一定浓度配制絮凝剂溶液,取一定量倒入装有 200 mL 废浆的量筒中充分搅拌混合,静置 3 h,然后测定固液分离后上清液浊度及浑液面高度。

试验中所用的器材包括 500 mL 量筒、精度 0.01 g 的电子天平、玻璃棒、滴定管、20 mL 移液管、50 mL 烧杯和 SGZ-200AS 型浊度仪等。

1.2 废浆试样特性

试验中所用的废浆取自上海市闸北区某钻孔灌注桩施工工地,含水率为 163%,颗粒组成见图 2 所示的颗分曲线,从中可以看出颗分曲线比较平缓,说明其中各粒组分布比较均匀,粒径大于 0.075 mm 的砂粒约占 14%,0.005~0.075 mm 粉粒约占 56%,小于 0.005 mm 的黏粒含量约占 30%,故废浆中仅含少量砂

粒,以粉黏粒细小颗粒为主。

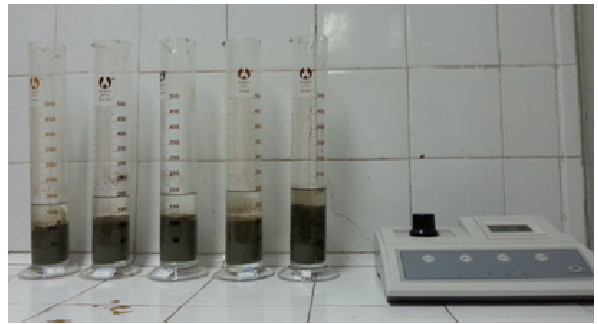


图 1 沉降柱试验图

Fig.1 Sedimentation column test

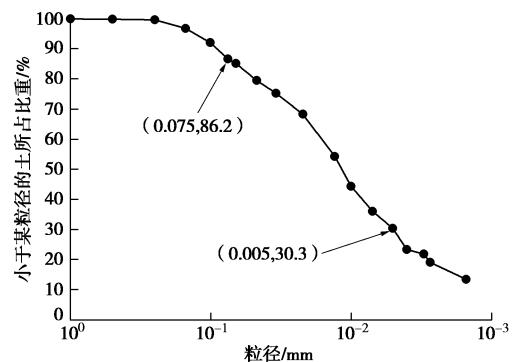


图 2 原状废浆颗粒分布曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of construction waste slurry

1.3 试验中使用的药剂

(1) 无机高分子絮凝剂

无机高分子絮凝剂的絮凝机理有 3 种:①通过压缩双电层厚度,减小颗粒相互间的距离,降低 ζ 电位,增加范德华力,使得颗粒相互吸引而凝聚^[19];②吸附电中和作用:土颗粒表面携带负电荷,加入阳离子后可以中和土颗粒表面的负电荷,减少静电斥力,从而使颗粒相互吸引而凝聚^[20];③网捕作用:加入金属盐后会水解产生络合物,这些络合物网捕水中的颗粒而沉淀^[21]。

本试验中采用的无机高分子絮凝剂为聚合氯化铝铁(Poly Aluminum-ferric Chloride 简称 PAFC),PAFC 中氧化铝含量为 27%,铁含量为 3%。

(2) 有机高分子絮凝剂

有机高分子絮凝剂的主要作用机理是“架桥”絮凝作用:颗粒表面存在空白部分,有机高分子长链就可以吸附此颗粒,同时长链吸附另一个颗粒,使得两个颗粒通过“架桥”的作用链接在一起,将小颗粒逐渐结合成大颗粒加速沉淀,但“架桥”的前提必须是颗粒上仍然有空白的表面存在。

本试验中采用 3 种有机高分子絮凝剂:阴离子型聚丙烯酰胺(Anionic Polyacrylamide,简称 APAM,

分子量为 2000 万)、阳离子型聚丙烯酰胺 (Cationic Polyacrylamide, 简称 CPAM, 分子量为 1500 万)、非离子型聚丙烯酰胺(Non-ionic Polyacrylamide, 简称 NPAM, 分子量为 800 万)。

1.4 沉降柱试验结果分析

本文采用废浆絮凝后上清液的浊度 (单位为 NTU, 1 NTU 相当于 1 L 的水中含有 1 mg 的福尔马肼聚合物时所产生的浑浊程度) 作为评价絮凝剂最佳用量的标准, 浊度可以反映水溶液中的微粒含量、大小和絮凝沉淀的程度。该值越小说明上清液浑浊度越小, 絮凝效果越好。

(1) 无机高分子絮凝剂试验结果

将 5 g 聚合氯化铝铁粉末溶于 100 mL 水中配置成 5% 的 PAFC 水溶液。用移液管依次取 4, 6, 8, 10, 12 mL 分别滴入装有 200 mL 废浆试样的 5 个量筒中, 并充分搅拌混合后静置 3 h, 然后测定各量筒内浆液固液分离后上清液的浊度, 得到 PAFC 添加量与浊度的关系, 如图 3 所示。

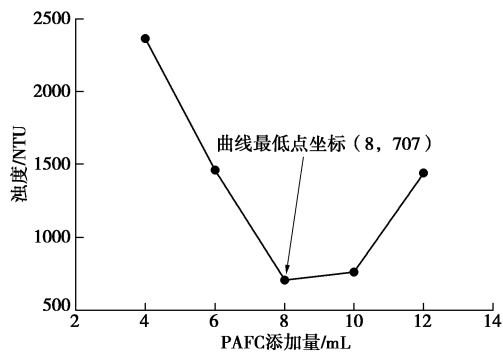


图 3 PAFC 溶液添加量与浊度关系

Fig. 3 Relation between addition of PAFC solution and turbidity

从图 3 中可以看出, PAFC 添加量与浊度的关系曲线近似为一条抛物线。在添加量为 8 mL 时浊度最低; 在 8 mL 之前随着添加量的增加, 浊度逐渐降低; 在 8 mL 之后, 随着添加量的增加, 浊度逐渐增加。其原因可能是由于在添加量小于 8 mL 时, 土颗粒表面的负电荷被 Fe^{3+} , Al^{3+} 等阳离子中和, 减少了静电斥力, 颗粒之间引力增加而发生凝聚沉淀, 且阳离子越多凝聚效果越显著。当添加量超过 8 mL 后, 土颗粒表面的负电已经被全部中和, 过量的 Fe^{3+} , Al^{3+} 等阳离子依附在了土颗粒表面使得土颗粒携带正电荷, 土颗粒之间的静电斥力变大, 凝聚的效果降低, 浊度上升。

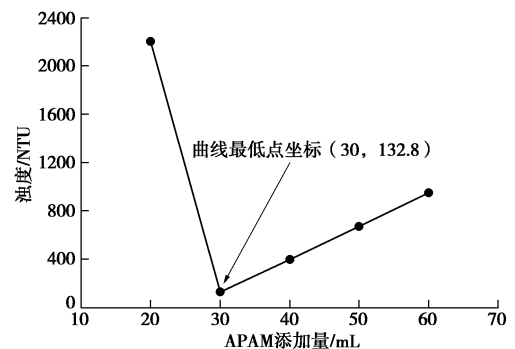
(2) 有机高分子絮凝剂试验结果

将 1 g 不同离子型的聚丙烯酰胺颗粒溶于 500 mL 水中配置成 0.2% 的水溶液。用移液管取不同量的有机絮凝剂水溶液滴入装有 200 mL 废浆试样量筒中, 并

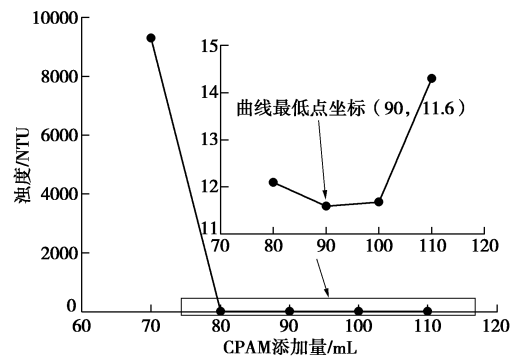
充分搅拌混合后静置 3 h, 然后测定各量筒内浆液固液分离后上清液的浊度。各种絮凝剂在试验中的添加量见表 1。试验所得的 APAM、CPAM 和 NPAM 添加量与浊度的关系, 如图 4 所示。

表 1 各种有机絮凝剂试验中的添加量

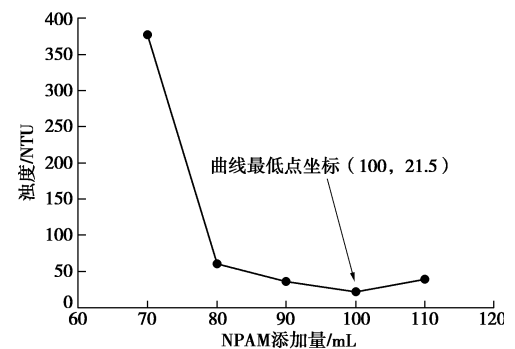
絮凝剂种类	添加量/mL				
APAM	20	30	40	50	60
CPAM	70	80	90	100	110
NPAM	70	80	90	100	110



(a) APAM 溶液添加量与浊度关系曲线



(b) CPAM 溶液添加量与浊度关系曲线



(c) NPAM 溶液添加量与浊度关系曲线

图 4 不同种类有机高分子絮凝剂添加量与浊度的关系曲线

Fig. 4 Relation between addition of various polymeric flocculants and turbidity

从图 4 可以看出, 添加 3 种有机高分子絮凝剂的泥浆上清液浊度随着添加量的增加先是逐渐降低, 当超过某一值后, 浊度会随着絮凝剂添加量的增加反而上升。这是因为随着絮凝剂添加量的增加, 小颗粒先

是由于架桥絮凝作用与其他小颗粒结合变成大颗粒而沉淀，上清液悬浮小颗粒逐渐变少，浊度逐渐下降。而当达到某一个值后，继续添加会使得浊度再一次升高，这是因为有机絮凝剂添加量过高后，过量的有机高分子会占据土颗粒表面的空白部分，当其表面没有空白部分时土颗粒就无法与其他颗粒形成架桥作用，此时胶体微粒处于再稳定状态^[22]，所以添加过量后反而会导致浊度升高，絮凝效果变差。故该拐点处的添加量可以认为是达到最佳絮凝效果时的最佳添加量。

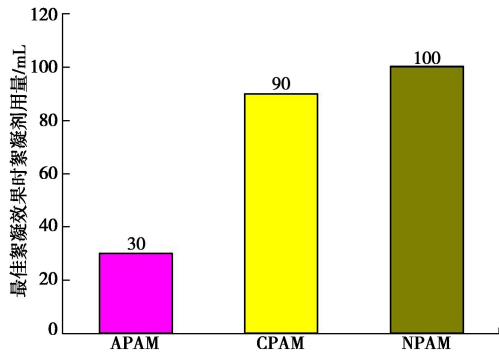


图5 不同种类有机高分子絮凝剂最佳絮凝用量

Fig. 5 Optimum addition of various polymeric flocculants

3种有机高分子絮凝剂达到最佳絮凝效果时的絮凝剂用量如图5所示。从图中可以看出，达到最佳絮凝效果时CPAM的用量是APAM的3倍，而NPAM用量为APAM的3.3倍。这主要是因为APAM分子量比CPAM和NPAM的分子量大造成的，分子量越大其分子链越长，可架桥吸附的土颗粒数量就越多，达到最佳絮凝状态时所用的量也就越少。

(3) 絮凝效果对比

各种絮凝剂达到最佳絮凝效果时的添加量、浊度对比见表2。

表2 各絮凝剂添加量及处理效果比较

Table 2 Comparison of economic benefits and treatment effects of various polymeric flocculants

絮凝剂种类	添加量/g	浊度/NTU
APAM	0.3	132.8
CPAM	0.9	12.1
NPAM	1.0	21.8
PAFC	2.0	707.0

注：添加量指达到最佳絮凝效果时每升废浆所用絮凝剂添加量。

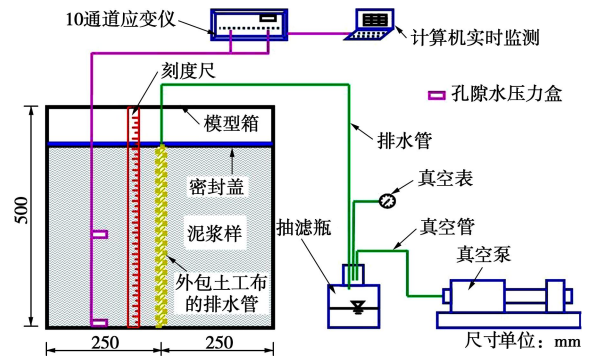
从表2可以看出，当达到最佳絮凝效果时，NPAM和CPAM的浊度可以达到20 NTU左右，但二者的添加量很高，约为APAM的2倍。PAFC添加量最高，且浊度也最高，约为APAM的6倍。APAM添加量最低，处理效果比其他两种有机高分子絮凝剂稍差，比

PAFC好。所以综合考虑添加量和处理效果这两方面后，选择APAM作为真空预压前絮凝阶段的外加剂。

2 药剂真空预压固液分离试验

2.1 试验器材

试验器材包括自制室内模型箱(见图6)、真空泵、抽滤瓶、孔压计、TST3822-10静态应变测试仪、SGZ-200AS浊度仪、TM85型土壤密度计、标准筛、烘箱、1L量筒、美国麦克AutoPore IV 9500压汞仪、SU1500型钨灯丝扫描电子显微镜、软式透水管(等效孔径为180 μm)和土工布。



(a) 模型试验装置简图



(b) 模型试验装置实物图

图6 模型试验装置图

Fig. 6 Testing devices

2.2 试验过程

采用软式透水管(等效孔径为180 μm,外直径为4.5 cm)作为排水管,模型箱底铺设一层土工布,土工布与排水管连接在一起,孔压计放在贴近排水管处。按前述絮凝剂试验配比,向62.4 L废浆中加入9.36 L的APAM絮凝剂,充分搅拌混合后将混合物倒入模型箱中。考虑到模型箱尺寸比量筒大,故选择静置24 h后,排空上清液(排空后的废浆含水率为96.88%,高度为24.2 cm),再进行真空预压试验。真空预压过程中保持试样底部真空度约85 kPa,并测试出水量和废浆压缩量随真空加载时间的变化。真空预压试验持续进行136 h,卸载后打开模型箱测试不同位置处试样的

颗粒分布、含水率和孔隙率。颗粒分试验、含水率试验、压汞试验测点的布置如图 7 所示。

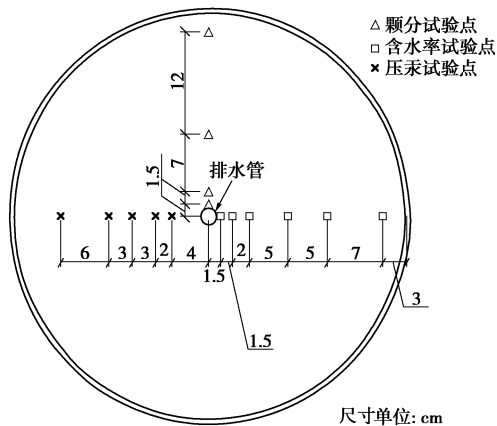


图 7 试验测点布置图

Fig. 7 Arrangement of measuring points

2.3 试验结果及分析

(1) 预压过程中的出水量

真空预压过程中出水量变化如图 8 所示, 从中可以看出, 初始抽真空阶段出水量比较大, 特别是 20 h 之内, 约占真空预压总出水量的 50%, 然后出水量缓慢减少。此外, 还可以看出: ①在试验初期出水量并不稳定, 这是因为在试验进行到 1 h 时模型箱出现漏气现象, 真空度减小, 试样内的水力梯度降低, 导致出水量减小, 采取密封措施堵漏措施后, 排水恢复正常。②曲线上每隔 12 h 左右出水量会出现一个峰值, 这主要与所采用的真空加载方式有关, 本试验中采用了间歇性真空加载方式, 即先连续抽真空 12 h, 然后停止, 间隔 12 h 后再重新抽真空排水。停抽真空期间试验内仍保持较小的真空度, 重新启动后真空度再次达到 85 kPa, 这相当于对废浆试样进行了反复的卸载再加载, 每次卸载后试样内的真空渗流仍会持续一段时间使靠近排水管处试样的含水量增加, 再加载时出水量就会出现短暂的增大。这说明真空预压过程中如果采用间歇性加载方式对于促进软土固结是有效的。

从图 8 中还可以发现在真空预压 136 h 后仍然有 60 mL 的排水量, 所以含水量实际上还能进一步下降。

(2) 预压过程中的废浆面高度变化量

废浆浆面高度下降是由于孔隙水被抽出、孔隙被压缩、废浆体积变小造成的, 根据浆面变化可间接反映真空预压的排水情况。图 9 为真空预压过程中废浆浆面高度变化曲线, 从图中可以发现真空预压导致废浆浆面的高度减小量约占总减小量的 42.4%, 这表明絮凝沉淀阶段上部清液出水量与真空预压阶段出水量比较接近。另外从中还可以看出随着时间的增加, 废浆面高度不断减小, 且曲线的斜率逐渐减小, 这是因为

随着土体不断固结, 废浆排水越来越慢, 高度变化也越来越小, 故曲线的斜率随着时间的增加而逐渐下降。

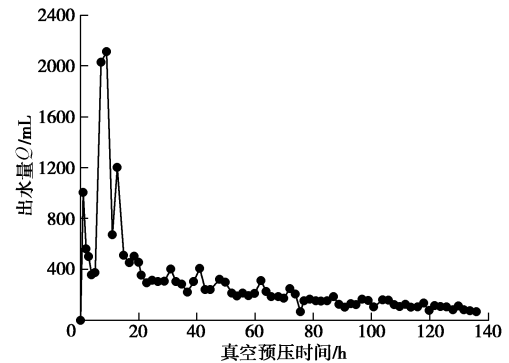


图 8 出水量及真空预压时间关系曲线

Fig. 8 Relation between water yield and vacuum preloading time

另外, 预压期间浆面变化曲线的斜率每隔 12 h 左右都会出现微小的类似阶梯状的增大, 这与每次卸载后再加载时出水量出现短暂的增大有关, 出水量越大浆面下降越大。

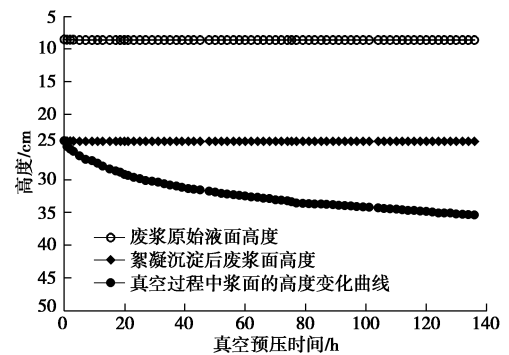
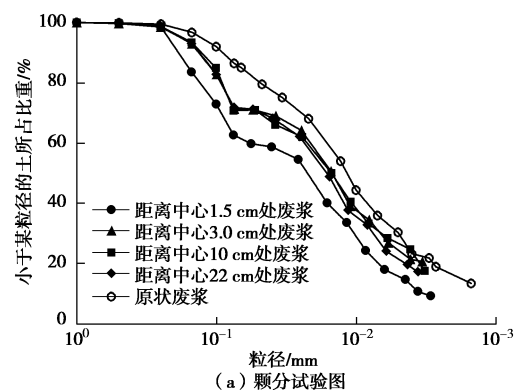


图 9 废浆面高度及真空预压时间关系

Fig. 9 Relation between height of waste slurry and vacuum preloading time

(3) 颗粒分试验

颗粒分试验结果如图 10 (a) 所示, 分别给出了原状废浆和经处理后模型箱内距中心径向距离分别为 1.5, 3, 10, 22 cm 处试样的 5 条颗粒分曲线。图 10 (b) 给出了 5 条颗粒分曲线相对应的粒组曲线。



(a) 颗粒分试验图

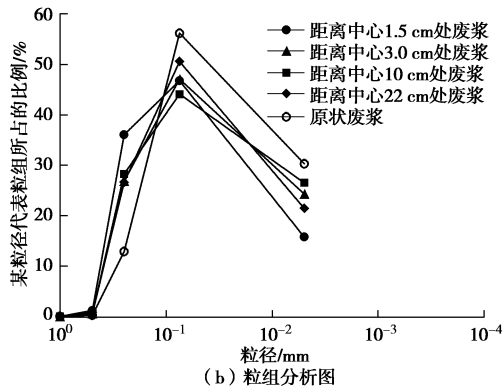


图 10 粒径分析图

Fig. 10 Analysis of particle sizes

由图 10 (a)、(b) 可以看出, 处理之前废浆中各个粒组的颗粒粒径最小且主要集中在 5~75 μm 范围内, 处理之后不同位置处废浆的颗粒粒径均有不同程度的增大, 粒径分布主要集中在 75~250 μm 内。这是因为: ①由于絮凝作用废浆中部分土颗粒粒径变大, 导致其小颗粒含量减少。②抽真空初期孔隙率较大, 废浆中部分小颗粒随土中水一起被排出。

处理后的废浆除了管壁处的废浆, 其他部位的废浆小于 5 μm 的黏土颗粒比未处理的废浆少了 4%~9%, 大于 75 μm 的大颗粒则多了 14%~16%。而管壁处的废浆小于 5 μm 的黏土颗粒比未处理的废浆少了近 24%, 大于 75 μm 的大颗粒多了 35%。在距中心 1.5 cm 处废浆的颗分曲线整体下降程度最大, 其原因可能与真空边界条件及抽真空过程中的废浆内部细颗粒移动有关, 管壁附近的水力梯度大, 小颗粒容易通过软式透水管的管壁被排出, 而距离较远处由于水力梯度小, 小颗粒不容易移动而排出。

(4) 含水率测定

处理后模型箱内距离中心不同位置处废浆的含水率如图 11 所示。

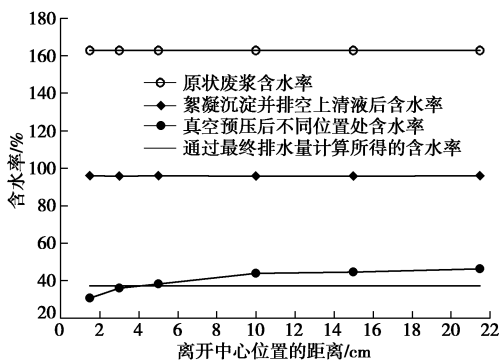


图 11 含水率与位置的关系曲线

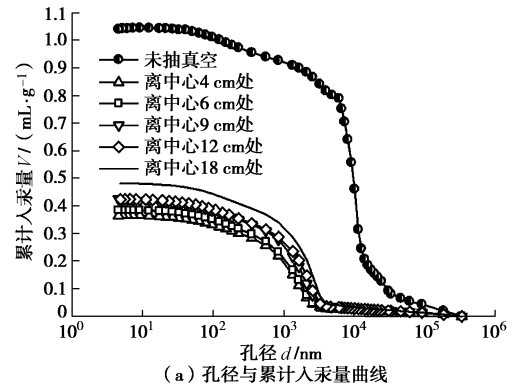
Fig. 11 Relation between moisture content and position

从图 11 中可以看出在经过 24 h 的絮凝沉降后排空上清液后其含水率从 163% 降到了 96%, 而在真空预压 136 h 后含水率从 96% 下降到 30%~46% (距离

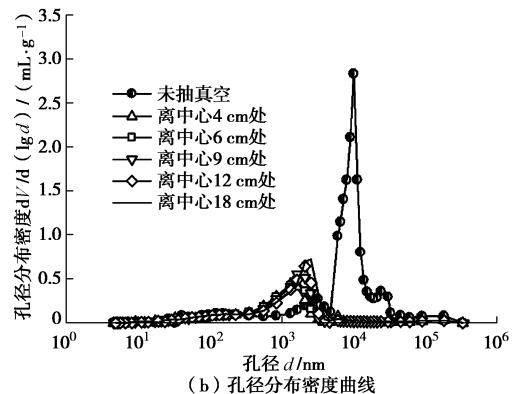
中心不同位置含水率不同)。通过最终排水量计算得到浆液的含水率为 37%, 介于 30%~46% 之间。从真空预压后含水率变化曲线可知, 在距离中心 10 cm 以外, 不同位置处含水率变化不大; 在距离中心 10 cm, 特别是 3 cm 以内, 含水率变化特别明显, 经分析, 这主要与水力梯度的大小有关, 管壁附近的水力梯度大, 水容易被排出, 距离较远处水力梯度小, 水不容易被排出。

(5) 压汞试验

为更直观的描述废浆的孔隙大小和孔隙率变化进行了压汞试验。压汞试验的原理是: 将液态汞压入孔中, 被汞侵入的孔径是所用压力的函数, 所以汞的侵入量可以用来反映对应孔径所占土体的体积。本文对于絮凝沉淀后和经真空预压处理后试样表面距离中心分别为 4, 6, 9, 12, 18 cm 位置处的废浆样进行了压汞试验, 试验结果如图 12 所示。



(a) 孔径与累计入汞量曲线



(b) 孔径分布密度曲线

图 12 压汞试验数据图

Fig. 12 Results of mercury intrusion porosimetry

其中, 图 12 (a)、(b) 分别为真空预压前后孔径与累计入汞量的关系曲线和孔径密度分布曲线。从图中可以看出, 抽真空前孔径主要集中在 8000~15000 nm 之间, 抽真空后孔径主要集中在 1000~3000 nm 之间, 总体上抽真空后废浆中的孔隙总量比抽真空前孔隙总量大大减少 (减少约 54%~65%)。这是由于经过真空预压作用后废浆中的水被排出, 其中的孔隙被压缩所致。

此外, 从图中还可以看出, 真空预压后离中心位置越远累计入汞量越多, 说明随着离开中心位置距离的增加, 孔隙率上升, 孔隙量增加。其原因是在径向真空作用下废浆的排水固结过程中, 中心位置附近的土体得到了较为充分的固结, 密实程度较高, 孔隙率和孔隙总量相对较低; 而离中心位置越远, 土体的固结越不充分, 密实程度也相对较低, 相应的孔隙率和孔隙总量也相对较高。

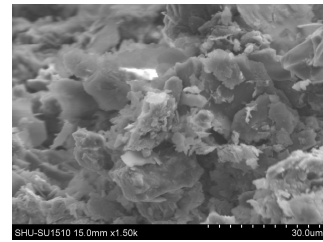
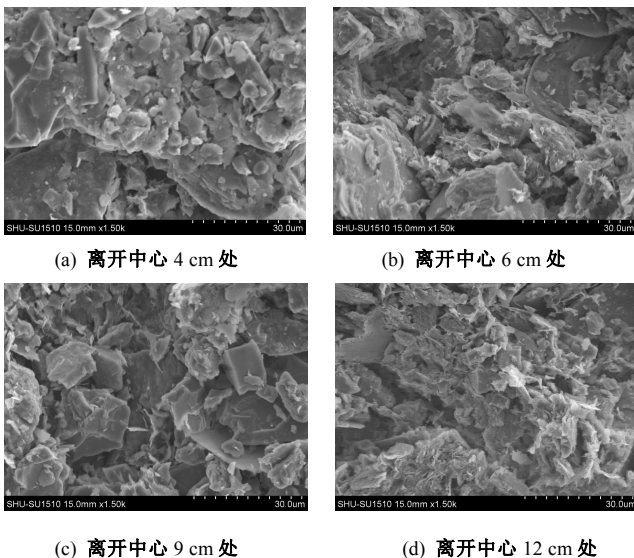
(6) 扫描电镜试验

扫描电镜可以拍摄一系列土样微观表面的照片, 通过对照片进行统计分析并采用三维孔隙计算方法可以得到土样的表观孔隙率^[23]和表观孔隙比。

为了避免土工刀对试样微观结构的影响, 扫描电镜试验中制样常采用掰断的方法, 然而这种制样方法得到的土样表面一般是凹凸不平的, 虽然不会破坏土样结构, 但由于观察面不在一个平面, 计算所得到的孔隙比一般会偏大。为此, 本文对常规三维孔隙计算方法进行了改进, 在统计图像各灰度值所对应的像素点个数后, 设定了一个像素点个数最小值, 此值所对应的较大的那个灰度值作为上限值来计算孔隙比, 以消除制样过程中所带来的误差。本文中最小值选取是使得在 4 cm 处 SEM 图像计算的孔隙比与压汞试验所得的孔隙比相等为依据, 然后计算其他各点 SEM 图像的孔隙比。

需说明的是有文献指出对于黏性土进行常规的微观结构研究放大倍数宜在 1500±300 范围内选取为佳^[24], 故本文采用 1500 倍的放大倍数对土样进行分析及孔隙比的计算。

如图 13 (a) ~ (e) 所示为离开中心不同距离处的土样放大 1500 倍后的图像, 从图像中可以发现, 随着离开中心距离的变大孔隙尺寸逐渐增大, 且土体骨架更加松散, 土颗粒更多呈现出立体形状, 这就说明了距离中心越远土的密实程度越低。



(e) 离开中心 18 cm 处

图 13 不同位置处放大 1500 倍 SEM 图像

Fig. 13 SEM images of different positions with magnification of 1500 times

图 14 为真空预压前后通过压汞、含水率 (土粒比重取 2.7、饱和度取 100%) 和扫描电镜 3 种试验方法计算得到的孔隙比变化曲线。在絮凝之后、药剂真空预压之前压汞试验和含水率反算得到的废浆的孔隙比分别为 2.12 和 2.59。在药剂真空预压之后, 在 4~18 cm 范围内压汞试验得到的孔隙比变化范围为 99%~126%, 含水率反算得到的孔隙比变化范围为 99%~122.5%, 扫描电镜试验计算得到的孔隙比为 98.4%~107.4%, 模型箱内的平均孔隙比约为 1.0 (含水率按 37%计算)。

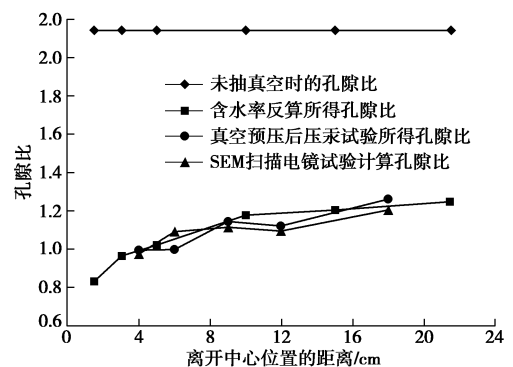


图 14 不同方法计算得到的孔隙比

Fig. 14 Void ratios computed by different methods

3 种方法得到的不同位置处的孔隙比变化曲线总体上均呈现出越靠近透水管, 孔隙比越小的规律, 其原因是由于真空预压过程中越靠近中心位置废浆样的径向固结程度越高、孔隙比越小所致。

3 种方法得到的孔隙比有一定差异, 这可能与试验取样及分析方法有关, 含水率试验中所取土样是对应位置竖向的整根土条 (高度约 13 cm), 相当于该位置的含水率平均值; 而压汞试验只取了对应位置处的表层土样 (高度约 1 cm), 得到的是一点的孔隙比, 与整根土条的孔隙比有所不同; SEM 图像只能够计算土样的表观孔隙比而无法对整个土样进行分析计算。

3 结 论

通过沉降柱试验与药剂真空预压法模型试验, 研

究了废浆的固液分离特性，并得到了如下结论：

(1) 每种絮凝剂固液分离废浆时均存在一个最佳添加量：开始时上清液的浊度会随着添加量的增加而下降，当达到最佳絮凝效果时，再向废浆中添加絮凝剂会使得上清液浊度变大，试验表明，APAM 比 CPAM、NAPM 和 PAFC 具有更好的适用价值。

(2) 药剂真空预压法能更好的对废浆进行固液分离：试验中药剂真空预压时间约 160 h，废浆的含水量由开始的 163% 降低到了约 37%；孔隙比由 2.59 降低到了约 1.0，固液分离效果十分明显。

(3) 添加絮凝剂后废浆中土颗粒粒径整体上变大：颗分试验表明絮凝前大部分颗粒粒径集中在 5~75 μm ；絮凝后大部分颗粒粒径集中在 75~250 μm ，增加幅度较大。同时真空作用也会影响废浆颗粒组成，特别是在靠近透水管的位置，大颗粒相对更多。

(4) 压汞试验能精确的反映出废浆内孔隙的大小及其数量特征：处理之前废浆中以直径为 8000~15000 nm 的大孔隙为主，处理后大部分孔隙直径减小到 1000~3000 nm，总的孔隙体积减少了约 54%~65%。

参考文献：

- [1] 房凯, 张忠苗, 刘兴旺, 等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 238 - 241. (FANG Kai, ZHANG Zhong-miao, LIU Xing-wang, et al. Pollution of construction waste slurry and prevention measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 238 - 241. (in Chinese))
- [2] WAKEMAN R J. Separation technologies for sludge dewatering[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **144**(3): 614 - 619.
- [3] 李冲, 吕志刚, 陈洪龄, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺在废弃桩基泥浆处理中的应用[J]. 环境科技, 2012, **25**(1): 33 - 37. (LI Chong, LÜ Zhi-gang, CHENG Hong-ling, et al. Application of anionic polyacrylamide in treating waste slurry from pile foundation engineering[J]. Environmental Science and Technology, 2012, **25**(1): 33 - 37. (in Chinese))
- [4] 杨春英, 徐薇, 白晨光. 施工废弃泥浆絮凝脱水试验及机理分析[J]. 环境科技, 2013, **26**(5): 15 - 17, 21. (YANG Chun-ying, XU Wei, BAI Chen-guang. The mud flocculation dehydration test and mechanism analysis[J]. Environmental Science and Technology, 2013, **26**(5): 15 - 17, 21. (in Chinese))
- [5] ZHU Hong, SUN Hai-yun, WANG Fang-hui, et al. Preparation of chitosan-based flocculant for high density waste drilling mud solid-liquid separation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, **125**(4): 2646 - 2651.
- [6] 张忠苗, 房凯, 王智杰, 等. 泥浆零排放处理技术及分离土的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1456 - 1461. (ZHANG Zhong-miao, FANG Kai, WANG Zhi-jie, et al. Zero discharge treatment technology for slurry and engineering properties of separated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1456 - 1461. (in Chinese))
- [7] 王力, 孙伟明, 谢林君, 等. 卧螺离心机的灌注桩泥浆分离试验研究[J]. 轻工机械, 2013, **31**(3): 20 - 22, 27. (WANG Li, SUN Wei-ming, XIE Lin-jun, et al. Study of separation test on pile mud by using decanter centrifuge[J]. Light Industry Machinery, 2013, **31**(3): 20 - 22, 27. (in Chinese))
- [8] KINNARINEN T, HÄKKINEN A. Experimental Study on the influence of selected process variables on the separation of a fine particle suspension with a pilot scale decanter centrifuge[J]. Particulate Science and Technology: An International Journal, 2013, **31**(6): 603 - 611.
- [9] YANG X Y, LIU W B, WANG J J, et al. The research on the mechanical properties of the same curing agent of different soil dredged mud[J]. Advanced Materials Research, 2013, **800**: 181 - 188.
- [10] 冯源, 詹良通, 陈云敏. 城市污泥电渗脱水实验研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1081 - 1087. (FENG Yuan, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Laboratory study on electroosmosis dewatering of sewage sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(5): 1081 - 1087. (in Chinese))
- [11] LOGINOV M, CITEAU M, LÉBOVK N a, et al. Electro-dewatering of drilling sludge with liming and electrode heating[J]. Separation and Purification Technology, 2013, **104**(4): 89 - 99.
- [12] AKRAMA M, OLIVIER J, VAXELAIRE J, et al. Hoadley Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects[J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2795 - 2810.
- [13] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1257 - 1268. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, FU Hong-tao, et al. Indoor and field experiment on vacuum preloading with new anti-clogging measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1257 - 1268. (in Chinese))

- Chinese))
- [14] 周源, 高玉峰, 陶辉, 等. 透气真空快速泥水分离技术对淤泥水分的促排作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3064 - 3070. (ZHOU Yuan, GAO Yu-feng, TAO Hui, et al. Drainage-promotion effect of aeration vacuum rapid mud-water separating technique on dredged sludge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3064 - 3070. (in Chinese))
- [15] 邓东升, 洪振舜, 刘传俊, 等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 250 - 253. (DENG Dong-sheng, HONG Zhen-shun, LIU Chuan-jun, et al. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 250 - 253. (in Chinese))
- [16] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 劈裂真空法加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 591 - 599. (LIU Song-yu, HAN Wen-jun, ZHANG Ding-wen, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 591 - 599. (in Chinese))
- [17] JOHN D Quaranta, RAJESH Tolikonda. Design of non-woven geotextiles for coal refuse filtration[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(6): 557 - 566.
- [18] CRAIG H, BENSON I, EMRE Kucukkirca, et al. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(6): 536 - 546.
- [19] 王晓敏, 王亮, 李凤婷, 等. 混凝剂对胶体电动电位的
影响研究[J]. 工业安全与环保, 2006, **32**(2): 7 - 9. (WANG Xiao-min, WANG Liang, LI Feng-ting, et al. Study on the changes of zeta potential of colloids by coagulations[J]. Industrial safety and Environmental Protection, 2006, **32**(2): 7 - 9. (in Chinese))
- [20] PATRICK Johnson N, AMIRTHARAJAH A. Ferric chloride and alum as single and dual coagulants[J]. American Water Works Association, 1983, **75**(5): 232 - 239.
- [21] DENTEL Steven K, GOSSETT James M. Mechanisms of coagulation with aluminum salts[J]. American Water Works Association, 1988, **80**(4): 187 - 198.
- [22] 栾兆坤, 宇振东. 高分子絮凝剂的机理及其应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 1981, **2**(3): 50 - 53. (LUAN Zhao-kun, YU Zhen-Dong. Mechanism and application of polymer flocculents[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 1981, **2**(3): 50 - 53. (in Chinese))
- [23] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 406 - 412. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on sem and mip test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 406 - 412. (in Chinese))
- [24] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 560 - 565. (TANG Chao-sheng, SHI Bing, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 560 - 565. (in Chinese))