

DOI: 10.11779/CJGE201703017

# 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用

武亚军<sup>1</sup>, 陆逸天<sup>1</sup>, 骆嘉成<sup>2</sup>, 强小兵<sup>2</sup>, 段俊杰<sup>1</sup>, 王 栋<sup>1</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 温州浙南地质工程有限公司, 浙江 温州 325006)

**摘 要:** 为探讨药剂真空预压法的防淤堵作用, 对上海某场地的原始废浆和添加药剂的废浆均分别进行了沉降柱试验和真空预压试验。在沉降柱试验中研究了原始废浆和添加不同药剂后废浆的沉降和浊度特性, 结果显示添加 CPAM 的废浆固液分离最快, 上清液浊度最低; 添加 PAFC 的废浆固液分离最慢, 上清液浊度最高。在真空预压试验中研究了出水量、含水率、颗粒分布及孔隙变化, 颗分结果表明加药沉淀后废浆中的细颗粒会“生长”成粗颗粒; 压汞试验反映了原始泥浆、加药絮凝、真空预压各个阶段孔隙的变化过程; 出水量测试显示普通真空预压开始不久出水速率便迅速衰减, 而药剂真空预压的出水速率一直很大, 说明药剂真空预压法具有非常好的防淤堵作用。最后, 从废浆中的土颗粒生长、游离细颗粒流失和降低水流阻力三方面对药剂真空预压的防淤堵作用进行了解释。

**关键词:** 真空预压; 化学药剂; 工程废浆; 防淤堵; 颗粒生长

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0525-09

**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、固废处理等方面的教学与科研工作。E-mail: wyjdldz@163.com。

## Anti-clogging function of vacuum preloading with flocculants in solid-liquid separation of construction waste slurry

WU Ya-jun<sup>1</sup>, LU Yi-tian<sup>1</sup>, LUO Jia-cheng<sup>2</sup>, QIANG Xiao-bing<sup>2</sup>, DUAN Jun-jie<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Wenzhou Zhenan Geology Engineering Co., Ltd., Wenzhou 325006, China)

**Abstract:** The settling column tests and the vacuum preloading model tests are performed on the waste slurry of a construction site in Shanghai and the additive agent slurry. The sediment and turbidity characteristics of slurries with four different agents are studied. The test results show that the turbidity of supernatant decreases after adding agents. The waste slurry mixed with CPAM has the fastest speed in solid-liquid separation and the lowest turbidity of supernatant, and that mixed with PAFC has the slowest speed in solid-liquid separation and the highest turbidity of supernatant. The water yield, water content, particle-size distribution, void ratio and variation of pore-size distribution are studied in the vacuum preloading model tests. The test results show that the small-size particles become larger, and the particles with size larger than 75 mm increase by 13.01% after adding agents and increase to 23.68% after vacuum preloading. The results of mercury intrusion porosimetry tests show exactly the process of pore change during adding of agents and vacuum preloading. The water velocity of slurry with common vacuum preloading decreases quickly after starting of vacuum preloading, and drain channels are clogged by particles. The water velocity of slurry with additive agents combined with vacuum preloading decreases slowly and it exhibits great anti-clogging effect of additive agents. The water yield of slurry with additive agents combined with vacuum preloading is nine times larger than that with common vacuum preloading. Finally, the reasons for anti-clogging effect of additive agent combined with vacuum preloading are explained by the variation of particle size, loss of small particles, and reduction of flow resistance.

**Key words:** vacuum preloading; flocculant; construction waste slurry; anti-clogging function; particle increase

## 0 引 言

真空预压法在处理高含水率(高达到 160%~300%以上)工程废浆、吹填淤泥、疏浚淤泥等超软土时常常面临排水通道被淤堵的问题, 其中主要原因就是由于这些超软土中的细颗粒含量非常高<sup>[1-3]</sup>。排水通

道是否被淤堵直接关系到工程的成败, 许多专家学者关于真空预压中的防淤堵进行了大量研究工作, 经过

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: 2016-01-05

总结概括, 目前主要从以下4方面进行防淤堵研究:

(1) 改进加载方式以改善淤堵: 武亚军等<sup>[4-5]</sup>通过真空预压现场试验与室内试验表明分级加载比一次性加载方式能在一定程度上防淤堵。苑晓青等<sup>[6]</sup>采用分级加载方式进行了真空预压加固吹填土的室内试验, 表明分级加载方式能避免排水管淤堵。

(2) 增大土体渗透性能以改善淤堵: 刘松玉等<sup>[7]</sup>、章定文等<sup>[8]</sup>、韩文君等<sup>[9]</sup>、沈宇鹏等<sup>[10]</sup>通过在真空预压过程中向地基土中灌入高压空气, 使地基土内产生裂隙以增加土体渗透系数, 加快土体进一步固结。

(3) 优化排水板外包滤膜参数以改善淤堵: 周蓉等<sup>[11]</sup>、陈轮等<sup>[12]</sup>研究了土工织物上作用的压力与渗透系数之间的关系。袁铁超等<sup>[13]</sup>通过试验研究认为采用大孔径排水板滤膜作为滤层有利于防止淤堵。王军等<sup>[14]</sup>通过现场试验研究认为采用大等效孔径排水板滤膜的效果较好。

(4) 改变靠近滤膜土颗粒的排列特性以改善淤堵: 高玉峰等<sup>[15]</sup>提出了基于双向气流原理的透气真空快速脱水技术, 认为在加固高含水率土时, 透气真空快速脱水技术会促进细小颗粒流失, 使剩余大颗粒形成“拱架结构”而起到防淤堵作用。

综上所述, 这些措施是通过改变加载方式、滤膜特性、加高压气体等“外部手段”以达到增大渗透系数的目的, 属于“被动”的防淤堵措施, 能起到一定的防淤堵作用, 但防淤堵效果十分有限。事实上, 由于导致淤堵的一个重要原因是土本身中的细颗粒含量太高, 如果能将细颗粒的粒径增大, 则会大幅度增大废浆的渗透系数而减轻淤堵。关于添加化学药剂能增加颗粒粒径并改变其特性已被许多学者所证实: 杨春英等<sup>[16]</sup>认为阴离子型聚丙烯酰胺(简称PAM)的絮凝脱水效果最好。Besra等<sup>[17]</sup>、Nasser等<sup>[18]</sup>、Marek等<sup>[19]</sup>将聚丙烯酰胺(简称PAM)应用于高岭土浮液的絮凝与脱水处理, 取得了较好效果。李冲等<sup>[20]</sup>认为PAM分子量越大所形成的絮体颗粒粒径越大。

基于上述考虑, 本课题组提出了药剂真空预压法, 即首先在高含水率工程废浆中添加化学药剂, 使原始废浆中细颗粒的粒径增大之后再施加真空荷载的化学与物理相结合的一种固液分离方法。

在已发表的“药剂真空预压法处理工程废浆试验”一文中主要通过模型试验说明了药剂真空预压法处理工程废浆能取得很好的固液分离效果<sup>[21]</sup>, 但是没有与普通真空预压结果进行比较, 也没有解释其取得突出效果的原因, 研究不够深入, 为此, 在上篇论文的基础上, 本文对原始泥浆和添加化学药剂的泥浆均分别进行了沉降柱试验和真空预压试验, 根据浊度、出水量、颗分、含水率和压汞试验结果, 分析了普通真空

预压易造成淤堵的原因, 并对药剂真空预压具有“主动防淤堵”作用的初步机理进行了解释。

## 1 废浆与化学药剂

### 1.1 原始废浆特性

试验中所用的废浆来自于上海市闸北区某钻孔灌注桩施工工地(与文献[21]中的试样相同), 试验中废浆的含水率为163%, 比重为1.282, pH值为7.8, 颗粒组成中粒径大于0.075 mm的砂粒约占13.8%, 0.005~0.075 mm的粉粒约占56.2%, 小于0.005 mm的黏粒含量约占30%, 废浆中砂粒含量少, 主要以粉粒、黏粒等细小颗粒为主, 颗分曲线比较平缓, 说明其中各粒组分布比较均匀。

### 1.2 化学药剂

泥浆中加入合适的化学药剂后会改变土颗粒之间的接触状态, 使泥浆由稳定状态转变为不稳定状态而实现固液分离。在沉降柱试验中药剂的生产厂商均为巩义市恒润水处理材料有限公司, 分别为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(nonionic polyacrylamide, 简称NPAM, 分子量为800万)和聚合氯化铝铁(poly aluminum-ferrous chloride 简称PAFC)。聚丙烯酰胺(PAM)的主要成分是碳、氢、氧、氮, 固含量为88%, 常温时稳定性好, 超过120℃时才会分解, 常用于农业土壤改良剂, 对环境无污染。聚合氯化铝铁(PAFC)的主要成分是铁、铝(其中, 氧化铝含量为27%, 铁含量为3%), 对环境存在二次污染, 只有环境要求不高时才能使用。

## 2 沉降柱试验

沉降柱试验是取一定量已配制好的絮凝剂溶液, 加入到装有废浆的量筒中, 进行搅拌使二者充分混合, 然后静置让其自然沉淀, 在沉淀过程中研究废浆特性的试验方法。试验中所使用的仪器主要包括500 mL量筒(内径为50 mm)、精度0.01 g的电子天平、滴定管、20 mL移液管、50 mL烧杯、SGZ-200AS型浊度仪等。

沉降柱试验的具体步骤如下:

(1) 选择APAM、CPAM、NPAM、PAFC 4种絮凝剂, 并配制为絮凝剂溶液, 其中APAM、CPAM、NPAM 3种絮凝剂溶液的浓度均为0.2%; PAFC溶液的浓度为5%。在配制有机絮凝剂溶液过程中, 要采用低速搅拌, 搅拌时间在40 min左右。

(2) 每种絮凝剂溶液各取 5 种不同添加量分别加入到 5 个装有 200 mL 泥浆的量筒中 (高度约为 102 mm), 如图 1 所示, 各种絮凝剂溶液的添加量如表 1 所示, 包含原始泥浆, 沉降柱试验共计 21 组。

- a) 充分搅拌后静置, 静置过程中测量浑液面高度随时间的变化。
- b) 待浑液面稳定后取出上清液, 测定上清液浊度, 并对絮体 (包含原状泥浆沉淀物) 进行颗分试验。
- c) 通过各项指标的对比, 对絮体特征进行分析。



图 1 沉降柱试验

Fig.1 Settling column tests

上清液浑浊程度用浊度来表示, 它能反映浆液中的微粒含量、大小和絮凝沉淀程度, 单位为 NTU, 即 number of transfer unit, 1 NTU 相当于 1 L 水中含有 1 mg 福尔马肼聚合物时所导致的浑浊程度。该值越小说明上清液浑浊程度越小, 絮凝剂添加量不同, 浊度也不同, 根据浊度就可以确定絮凝剂的最佳用量。

表 1 不同种类絮凝剂的添加量

Table 1 Additive amounts of various types of flocculants					
絮凝剂	添加量/mL				
APAM	20	30	40	50	60
CPAM	70	80	90	100	110
NPAM	70	80	90	100	110
PAFC	4	6	8	10	12

3 真空预压试验

为了方便对比, 分别在两个模型箱内进行了普通真空预压 (general vacuum preloading, 简称 GVP) 与药剂真空预压 (vacuum preloading with flocculant, 简称 VPF), 真空预压室内模型试验装置实物如图 2 所示 (示意图如图 3 所示)。试验设备包括模型箱、真空泵、抽滤瓶、SGZ-200AS 浊度仪、微型孔隙水压计、排水滤管等。压汞试验 (mercury intrusion porosimetry, 简称 MIP) 采用美国生产的麦克 AutoPore IV 9500 压

汞仪进行。



图 2 模型试验装置实物图

Fig. 2 Picture of model tests

普通真空预压模型试验采用如下步骤:

- (1) 在模型箱内底部铺设一层无纺土工布 (规格为 200 g/m<sup>2</sup>), 排水滤管芯管为钢丝弹簧 (直径为 5 cm), 可压缩性好, 外包无纺土工布 (等效孔径为 180 μm), 排水滤管底部与无纺土工布相连, 高度同泥浆厚度。
- (2) 将搅拌均匀的废浆 (这里废浆的含水率为 204%, 比药剂真空中的废浆含水率高, 对比效果应该更加明显) 缓慢倒入模型箱内到设计高度 (体积为 62.4L), 布置孔压计, 记下浆面高度。
- (3) 排除上清液, 安装有机玻璃密封盖, 排水滤管顶部与直径为 1 cm 的硬塑料管相连, 并从密封盖中心的小孔穿出与抽滤瓶相连; 孔压计的数据线从密封盖上的小孔穿出后与 10 通道应变仪相连。
- (4) 连接真空泵、真空表进行抽真空, 保持抽滤瓶内的真空度为 85 kPa, 抽真空期间测试排出水量、泥面刻度、真空度及孔隙水压力随时间变化的数据。
- (5) 当出水速率趋于稳定后停止抽真空, 并整理测试数据 (为了深入研究药剂真空预压的最终效果, 抽真空时间适当延长了一些)。

药剂真空预压试验步骤与普通真空预压稍有不同: 废浆用量为 62.4 L, 其中加入 9.36 L 的 APAM 絮凝剂 (添加量为 0.35 g/L), 充分搅拌混合后将混合物缓慢倒入模型箱中。静置 24 h 让其自然沉降稳定, 排除上清液后再进行真空预压试验。

在真空预压过程中保持抽滤瓶内真空度 85 kPa, 记录出水量和压缩量随时间的变化。普通真空预压进行 15 h, 药剂真空预压试验进行 136 h, 卸载后打开模型箱取土样, 对颗粒分布、含水率和孔隙率进行测试。

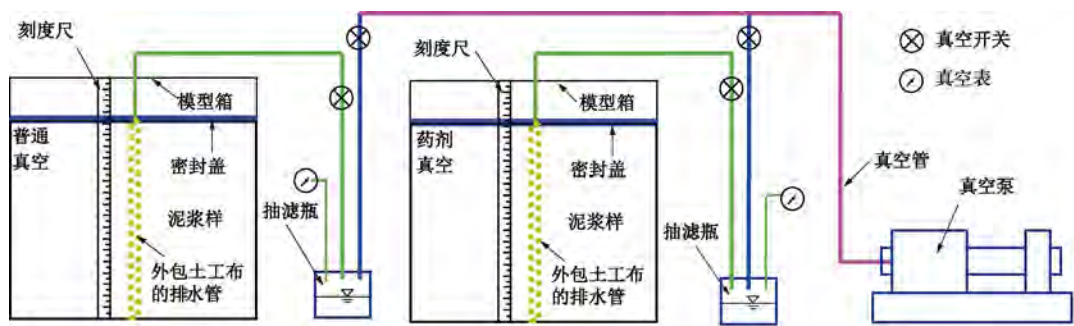


图 3 模型试验装置示意图  
Fig. 3 Sketch of model tests

4 试验结果分析

4.1 浊度

图 4 为分别加入 4 种不同药剂废浆的上清液浊度与添加量之间的变化关系。从图 4 中可以看出，每种药剂都存在一个与最小浊度值对应的添加量，大于或小于该添加量浊度都会升高。4 种药剂达到最小浊度时对应的添加量分别为 30 mL (APAM、浊度 132.8NTU)、90 mL (CPAM、浊度 11.6NTU)、100 mL (CPAM、浊度 21.5NTU) 和 8 mL (PAFC、浊度 707NTU)。

从中可以看出，达到最低浊度时，NPAM 和 CPAM 的添加量要比 APAM 多，这是由于 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。PAFC 的添加量最多，而且浊度也比 3 种 PAM 絮凝剂的高太多。总的来看，阴离子絮凝剂 APAM 比较理想，因此在药剂真空预压试验中选择 APAM。

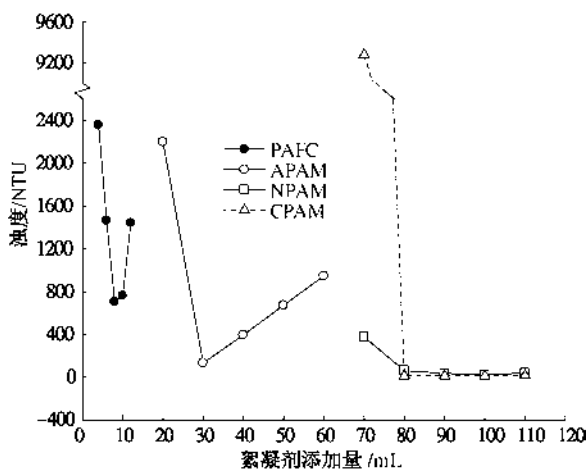


图 4 不同絮凝剂添加量与浊度之间的关系

Fig. 4 Relation between addition of various flocculants and turbidity

4.2 浑液面变化

絮凝剂种类不同、添加量不同，泥浆沉降过程中

浑液面的变化规律也不同，图 5 为沉降柱试验中分别添加 4 种不同絮凝剂和不加任何絮凝剂原始泥浆时浑液面的 5 条沉降曲线，从图 5 中可以看出，原始泥浆的沉降最慢，经历 5400 min 后最终沉降量只有 9.9 mm；沉降最快的为 NPAM，前 5 min 的沉降量达到 32 mm，295min 的沉降量为 49.6 mm，之后基本稳定，最终沉降量为 52.5 mm；CPAM 开始沉速比 APAM 稍小，在 1300 min 时二者比较接近，之后 CPAM 的沉速超过 APAM，最终沉降量也比 APAM 大。在 4 种添加药剂沉降柱试验中，添加 PAFC 的浑液面沉降量最小，达到稳定后的沉降为 18.6 mm，仅比原始泥浆稍大。

添加不同药剂后，不仅浑液面沉降特性不同，且浆液与量筒之间的黏结力也不同，原始废浆和加入 PAFC 的废浆挂壁现象特别严重，而加入 PAM 的废浆与量筒很容易分离，这一现象说明加入 PAM 后废浆的黏度大大减小。

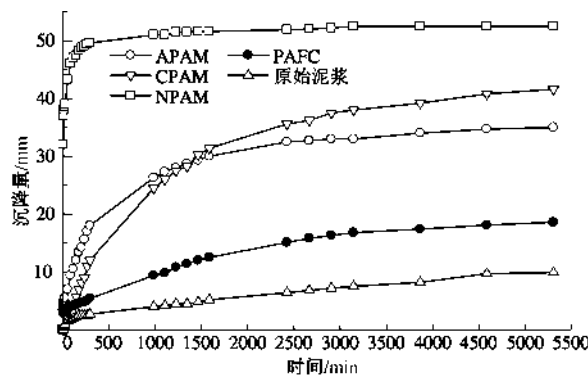


图 5 不同药剂沉降柱试验中浑液面沉降曲线

Fig. 5 Batch sediment curves under different flocculants

4.3 颗粒粒径分布

由于废浆含水率高，且烘干容易破坏絮体结构，因此，对粒径大于 0.075 mm 的颗粒采用湿筛法，粒径小于 0.075 mm 颗粒采用比重计法。

图 6 (a) 中的 3 条曲线分别为原始废浆、加入 APAM 废浆并经过 3 h 自然沉淀和经药剂真空处理后的土样（距离中心 1.5 cm 处，能取到该处的试样是因



为排水管压缩过程中会内缩)的颗粒累积分布曲线, 从中可以看出, 原状废浆中大于 0.075 mm 的砂粒, 原来只占 13.8%, 加入 30 mL APAM 后增加到 26.81%, 增加幅度为 13.01%; 经药剂真空后颗粒继续增加到了 37.48%, 增加幅度为 10.67%。即原始废浆经药剂真空预压后, 砂粒约增加了 23.68%。

小于 0.005 mm 的黏粒, 原来约占 30.3%, 加入 30 mL APAM 后减小到 25.4% (由于没有正好 0.005 mm 处的数据, 因此通过相邻直径 0.0067 mm 与 0.0035 mm 两处数据进行了线性插值, 以下 14.47% 也是如此), 降低幅度为 4.9%; 经过药剂真空后继续减少到了 14.47%, 降低了 10.39%, 总的降低了 15.29%。

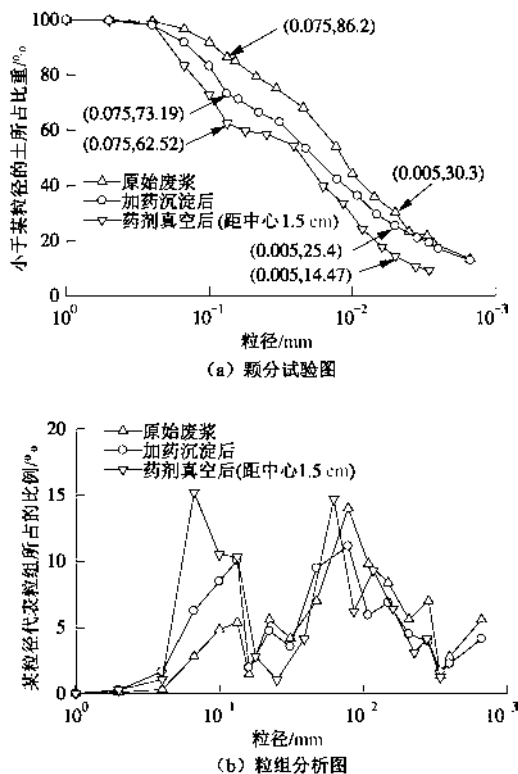


图6 颗粒组成分析图

Fig. 6 Particle composition analysis

两个阶段中大颗粒含量增加和小颗粒含量减少的机理不同。对于加入 APAM 后的絮凝阶段, 泥浆中原来部分细小颗粒生长成了大颗粒, 从 0.004 mm 到 0.3 mm 整个范围内颗粒粒径均有所增大, 经分析, 这是由于有机高分子药剂 APAM 的长链吸附、网捕了多个土颗粒组成了一个絮团导致的土颗粒粒径增大。对于药剂真空阶段, 从 0.004 mm 到 0.3 mm 范围内颗粒的粒径再一次整体增加, 这次的增加不再与药剂本身作用有关, 而是因为真空预压过程中未被 APAM 高分子链吸附、网捕或吸附、网捕后粒径仍然较小的一部分土颗粒, 在真空荷载作用下随着真空渗流流失, 导致小颗粒减少则大颗粒相对增加所造成的。

图 6 (b) 中的 3 条曲线分别为原始废浆、加入药剂 APAM 并经过 3 h 自然沉淀的废浆和经过药剂真空处理后的土样 (距离中心 1.5 cm) 三者的颗粒粒组分布曲线, 从中可以看出如下规律:

(1) 3 条粒组分布曲线均具“双峰”特点, 即大致由 0.05~0.3 mm 和 0.002~0.03 mm 两个粒组组成, 原状泥浆以 0.002~0.03 mm 粒组为主, 加药沉淀和经药剂真空后两个粒组的颗粒分布趋于接近。

(2) 加药沉淀后 0.05~0.3 mm 粒组的颗粒增多, 经药剂真空后该粒组颗粒再进一步增多 (曲线峰向左移动), 且增加幅度比较大。

加药沉淀后, 0.002~0.03 mm 粒组的颗粒减少, 经药剂真空后, 该粒组的峰变窄, 即该粒组内的颗粒出现减少。

#### 4.4 出水量

图 7 (a) 中的两条曲线分别为普通真空预压与药剂真空预压过程中的出水速率曲线, 普通真空预压法开始出水速率就比较低, 前 4 h 的平均出水速率为 275 mL/h, 4 h 后迅速下降变缓, 11 h 以后已经基本不变, 只有约 70 mL/h; 药剂真空预压法前 4 h 的平均出水率为 600 mL/h, 23 h 之后才逐渐变缓, 但平均出水速率仍有 150 mL/h, 到 89 h 时出水速率才降低到 70 mL/h。图 7 (b) 中的两条曲线分别为普通真空预压与药剂真空预压过程中的出水量累积曲线, 从中可以看出, 药剂真空预压的出水量从开始就远远超过普通真空预压, 经过 15 h 后, 药剂真空预压法和普通真空预压法两者的出水量分别为 6280 mL 和 2080 mL (相差约 3 倍), 二者抽真空效果的差别十分非常明显。

如果二者终止时间均以出水速率小于 70 mL/h 为标准的话, 普通真空预压终止时的出水量为 2080 mL, 药剂真空预压终止时的出水量为 17960 mL, 普通真空预压在排水速率明显变缓时 (4 h) 的出水量 1100 mL 占终止出水量的 53%; 药剂真空预压在排水速率明显变缓时 (23 h) 的出水量 11320 mL 占终止出水量的 63%。说明普通真空预压与药剂真空预压法二者的出水量均主要均集中在前期。

由出水速率及出水量的不同特性可以认为: ①尽管普通真空预压法所采用的废浆含水率要高, 但是其渗透系数却比药剂真空预压中废浆的要低得多; ②加入药剂后的工程废浆不仅渗透系数会大大提高, 且高出水速率的持续时间也大幅度延长; ③普通真空预压中废浆虽说并未完全淤堵, 但其排水通道受阻是显然的; 相反, 加入药剂起到了增渗作用, 在一定程度上能够防止淤堵, 其排水速率后期逐渐变慢是由于废浆含水率降低、土体密实而发生的正常现象。

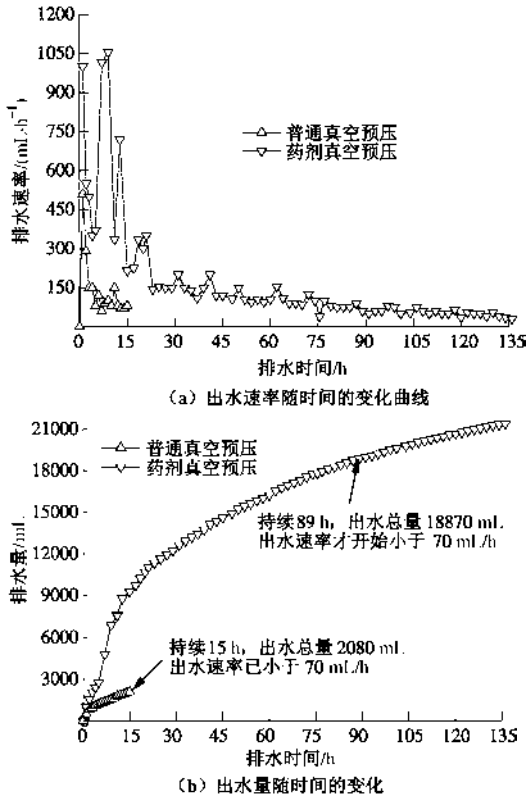


图 7 出水速率及出水量随真空预压时间关系曲线

Fig. 7 Relation between water yield and vacuum preloading time

4.5 含水率

图 8 列出了两组试验不同阶段废浆含水率的变化, 普通真空预压中的废浆初始为含水率为 204%, 经过 15 h 的预压后, 含水率降为 195%, 仅仅降低了 9%, 且如 4.3 节所述, 这时出水量降低得很快, 这时的出水速率已降低至 70 mL/h (如果采用较低含水率 163% 的话, 预计淤堵得会更快), 推测这时排水通道可能已经被淤堵, 故终止试验。而在药剂真空预压中, 经过 24 h 的加药沉淀、排空上清液后其含水率从 163% 降到了 96%, 到 89 h 时的出水速率小于 70 mL/h (与原状泥浆停止抽真空时的出水速度相同), 相应的含水率为 49% (根据出水量反算的平均含水率)。由于出水速率还比较稳定, 故继续抽真空到 136 h, 相应的含水率为 37%。从两组试验含水率变化可以看出, 加药起到了非常好的防淤堵作用, 大大促进了废浆中水的排出。

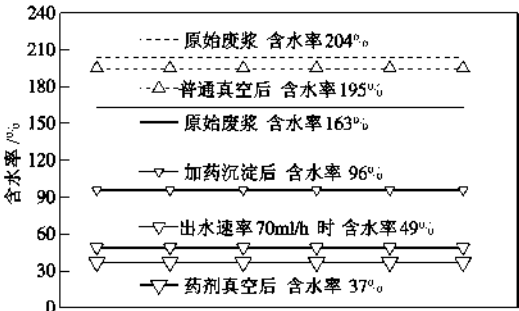


图 8 不同阶段的含水率

Fig. 8 Water contents at different stages

4.6 孔隙变化

为了研究药剂真空预压过程中引起的孔隙变化规律进行了压汞试验<sup>[22]</sup>。压汞试验是将液态汞压入土体的孔隙中, 根据不同压力能够压入不同孔径的孔隙中, 孔径越小需要的压力越大; 压入的汞量越多, 土体中的孔隙就越多, 可以用压力推算孔隙孔径, 用汞量推算土体孔隙比的试验方法。本文分别对原始的、加药沉淀后的和经药剂真空预压处理后 (距中心 4 cm 处) 3 种状态下的废浆进行了压汞试验。

图 9 (a) 为 3 条累计入汞量的变化曲线, 即每 mL 土样中的入汞量与对应孔隙直径之间的关系曲线。采用不同压力时得到的孔隙比。通过累计入汞量反算可以得出原始废浆的孔隙比为 2.47, 经过加药沉淀后孔隙比减少到 2.14, 再经过药剂真空后孔隙比进一步减少到 0.99, 约为原始废浆的 2/5。而经过普通真空预压后孔隙比仍然高达 2.36 (该值通过含水率与孔隙比的正比关系反算得到)。

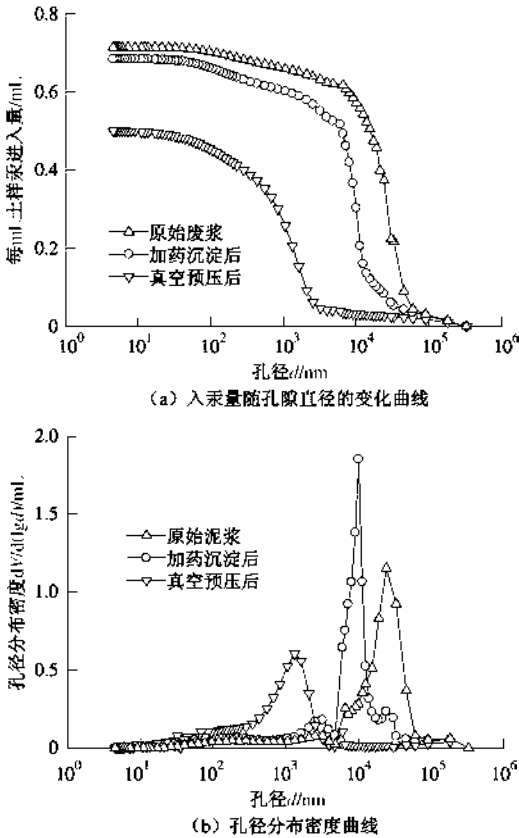


图 9 压汞试验结果

Fig. 9 Results of mercury intrusion porosimetry tests

图 9 (b) 为 3 条所压入的孔径与孔径分布密度曲线, 也即与不同压力 (即土中孔隙孔径) 所对应的孔隙数量分布。从图中可以看出, 原状废浆的孔径主要集中在 6~45  $\mu\text{m}$  之间, 峰值在 24  $\mu\text{m}$  附近, 加药沉淀后的孔径主要集中在抽真空后孔径主要集中在 6~30  $\mu\text{m}$  之间, 峰值在 10  $\mu\text{m}$  附近, 即加药沉淀后废浆

中孔隙的孔径在减小。再经过加药真空预压后的孔隙孔径主要集中在  $0.3\sim4\text{ }\mu\text{m}$  之间,峰值在  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  附近,即加药真空对于孔隙的压缩作用更大,大部分孔隙被压缩得很小。3 种曲线入汞量峰值处对应的孔隙直径呈  $24\text{ }\mu\text{m}\rightarrow10\text{ }\mu\text{m}\rightarrow1.3\text{ }\mu\text{m}$  过渡,孔隙逐步被压缩。

5 主动防淤堵作用分析

从普通真空预压与药剂真空预压法处理工程废浆的试验结果对比来看,二者过滤膜等效孔径均为  $180\text{ }\mu\text{m}$  的无纺土工布,但药剂真空预压法得到的效果要远远的优于普通真空预压法,显然,孔径并非是影响淤堵的主要因素,加入药剂在其中起了关键性作用。加入药剂改善废浆的颗粒特性及其组成,而不是通过对滤布参数、真空荷载和施加高压空气等外因进行改良,因此,是一种直接针对土体的“主动防淤堵”作用,下面从 3 方面进行分析。

5.1 颗粒长大防淤堵

大量研究表明,土中黏粒含量越多,在真空预压处理软土过程中就越容易堵塞排水通道,试验中所采用的工程废浆黏粒含量很高(约 30.3%),因此,直接采用普通真空预压法不可避免要发生淤堵,这一点从出水速率和含水率变化已经清楚看出。

对于药剂真空预压法,从颗粒分布曲线可以看出,加药沉淀后测得泥浆中的黏粒含量减少了 4.9%,砂粒增加了 13.01%,泥浆中土粒的粒径整体上发生了增加,这是由于加入药剂使废浆发生了絮凝沉淀(图 10 (a)),APAM 高分子长链上吸附了许多土颗粒,单个

或几个高分子长链缠绕在一起组成一个絮团,使得絮团的粒径比单个土颗粒的粒径要大,滤膜过滤孔内无小颗粒,或者个别游离的土颗粒也很容易流失,大大减弱了发生淤堵的可能。

5.2 细颗粒流失防淤堵

加药剂沉淀后,  $0.002\sim0.03\text{ mm}$  范围内小粒径的颗粒减少,而  $0.05\sim0.3\text{ mm}$  范围内大粒径的颗粒增加,本试验中滤膜的等效孔径为  $180\text{ }\mu\text{m}$  ( $0.18\text{ mm}$ ),即絮凝后的絮团粒径与滤布等效孔径比较接近,即加药沉淀后废浆具有良好的保土性。但是,同时也不排除部分未被吸附的细小颗粒由于与絮团之间的吸附力很弱而游离于絮团之间,废浆中的水在真空荷载作用下被排出的过程中,这些游离的细小颗粒很容易随水流被一起携带走,从而造成细小颗粒流失,本试验中药剂真空后进行颗分试验的土样正是位于距离中心  $1.5\text{ cm}$  的位置,颗分结果显示该处小于  $0.005\text{ mm}$  的黏粒从 25.4%减少到 14.47%,流失的黏粒接近一半(如图 9 (b))。细颗粒的流失使絮团之间的孔隙增大使得絮体的渗透系数增大,起到一定的防淤堵作用。

在后续真空荷载作用下,絮团发生聚积、错动及微弱移动而重新排列,并压缩它们之间的孔隙而趋于密实,随着水的排出,孔隙减小,废浆的体积被压缩,最终趋于稳定。

对于普通真空预压来说,由于黏粒含量高,颗粒之间的孔隙小,在不受外力作用时浆液中的颗粒呈分散状,一旦受到真空作用后,相邻颗粒会随着水流相互靠近,孔隙比大大减少,甚至聚积在一起,特别是在滤膜附近很容易形成低渗透性的“泥皮”而发生淤堵(如图 9 (c))。

此外,普通真空预压过程中也可能存在颗粒流失和重新排列<sup>[15]</sup>,在滤膜开孔处形成“微小拱”,但是这些“微小拱”本身由“泥皮”组成,透水性很差,会阻碍外围浆液中水的排出,故“微小拱”也起不到决定性作用。另外,滤膜内部与“泥皮”外围浆液之间的水力梯度越大,通道堵塞的程度就越高。

5.3 降阻作用防淤堵

聚丙烯酰胺不仅具有促使土颗粒絮凝沉淀的作用,同时还具有降低水流动时的摩擦阻力的作用<sup>[23]</sup>。这是由于,其一,聚丙烯酰胺吸附土颗粒时,带负电的黏土颗粒外的水化膜也同时被吸附,这部分水中同时含有弱结合水和自由水;其二,絮体在形成架桥而沉淀过程中,不仅会网捕其他颗粒及其扩散双电层中的水,而且还有部分自由水被包裹在絮体内同时沉淀。絮体内或絮体间充满水,使原来固体之间的摩擦转变为液体之间或液体与固体之间的摩擦,使得团絮体之间、团絮体与滤膜之间的摩擦阻力大为减小,在真空

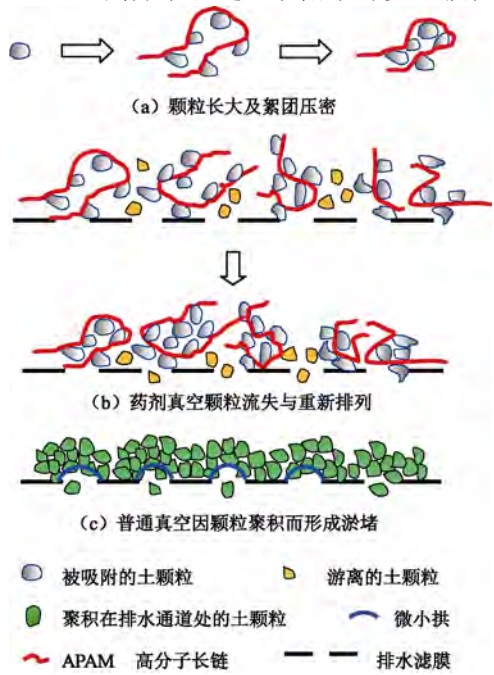


图 10 药剂真空预压的防淤堵作用

Fig. 10 Anti-clogging function of vacuum preloading with flocculants

作用下的渗透阻力减小, 渗透系数增大, 故在真空渗流过程中不易淤堵。

## 6 结 论

通过对加药剂与不加药剂的工程废浆进行沉降柱试验和真空预压试验, 研究了药剂的防淤堵作用, 得到了以下结论:

(1) 黏粒含量对淤堵的影响非常重要, 药剂真空预压法通过添加药剂使废浆中的土颗粒粒径“生长”而起到“主动防淤堵”作用。选择合适的药剂可以使土颗粒生长到足够大, 以获得最佳防淤堵效果。

(2) 药剂真空预压过程中未被高分子长链所吸附的游离小颗粒会流失, 导致团絮体之间的孔隙增大, 增加了渗透系数, 有利于防淤堵。

(3) 加入 APAM 形成团絮体之后, 团絮体内包裹着的大量水, 使絮体之间、絮体与滤膜之间的黏结力大为降低, 这是药剂真空预压过程中保持较高出水量而不淤堵的另一个重要原因。

(4) 通过对普通真空预压与药剂真空预压处理工程废弃泥浆的比较, 说明药剂真空预压法具有非常好的防淤堵作用, 但是更具体的防淤堵机理还有待进一步深入研究。

## 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] 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))
- [3] 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 Zhi-liang, ZHANG Gong-xin, 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))
- [4] 武亚军, 邹道敏, 唐军武, 等. 吹填软土植物垫层真空预压现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 2): 3574 - 3583. (WU Ya-jun, ZOU Dao-min, TANG Jun-wu, et al. Study of ground treatment of dredger fill in-situ test with stalk cushion using vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3574 - 3583. (in Chinese))
- [5] 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 Ya-jun, YANG Jian-bo, ZHANG Meng-xi. 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))
- [6] 苑晓青, 王 清, 孙 铁, 等. 分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(1): 169 - 176. (YUAN Xiao-qing, WANG Qing, SUN Tie, et al. Pore distribution characteristics of dredger fill during hierarchical vacuum preloading[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, **42**(1): 169 - 176. (in Chinese))
- [7] 刘松玉, 洪振舜, 章定文. 气压劈裂真空预压法加固软土地基操作方法[P]. 中国专利: ZL200510038644.0, 2007, 10. (LIU Song-yu, HONG Zhen-shun, ZHANG Ding-wen. The operation method of reinforcing soil foundation by combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing[P]. China Patent: ZL200510038644.0, 2007, 10. (in Chinese))
- [8] 章定文, 刘松玉, 顾沉颖, 等. 土体气压劈裂的室内模型试验[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1925 - 1929. (ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu, GU Chen-ying, et al. Model tests on pneumatic fracturing in soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1925 - 1929. (in Chinese))
- [9] 韩文君, 刘松玉, 章定文. 土体气压劈裂裂隙扩展特性及影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(9): 87 - 93. (HAN Wen-jun, LIU Song-yu, ZHANG Ding-wen. Characteristics and influencing factors analysis of propagation of pneumatic fracturing in soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(9): 87 - 93. (in Chinese))
- [10] 沈宇鹏, 冯瑞玲, 余 江, 等. 增压式真空预压处理软基的加固机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(3): 792 - 797. (SHEN Yu-peng, FENG Rui-ling, YU Jiang, et al. Reinforcement of vacuum preloading with air pressure boosted for soft ground treatment[J]. Journal of Jilin



- University(Earth Science Edition), 2012, **42**(3): 792 - 797. (in Chinese))
- [11] 周 蓉, 张洪弟. 土工织物渗透性能评价及其工程意义[J]. 纺织学报, 2000, **21**(3): 180 - 183. (ZHOU Rong, ZHANG Hong-di. Assessment and engineering significance of geotextiles permeability[J]. Journal of Textile Research, 2000, **21**(3): 180 - 183. (in Chinese))
- [12] 陈 轮, 童朝霞. 拉应变对土工织物—非连续级配土淤堵特性的影响[J]. 水力发电学报, 2003(2): 97 - 102. (CHEN Lun, TONG Zhao-xia. Effects of tensile strain of the geotextile on clogging behavior in geotextile-gap graded soil filtering systems[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(2): 97 - 102. (in Chinese))
- [13] 袁轶超. 土工织物对软土真空固结效果的影响研究[D]. 上海: 上海大学, 2012. (YUAN Yi-chao. Effect of geotextile on vacuum consolidation of soft soil[D]. Shanghai: Shanghai University, 2012. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] GAO Y F, ZHOU Y. Effect of vacuum degree and aeration rate on sludge dewatering behavior with the aeration-vacuum method[J]. Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering), 2010, **11**(9): 638 - 655.
- [16] 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))
- [17] BESRA L, SENGUPTA D K. Influence of polymer adsorption and conformation on flocculation and dewatering of kaolin suspension[J]. Separation and Purification Technology, 2004, **37**: 231 - 246.
- [18] NASSER M S, JAMES A E. The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions[J]. Separation and Purification Technology, 2006, **52**: 241 - 252.
- [19] MAREK S Z, ROGER S C S, GAYLE E M. Kaolinite flocculation structure[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, **328**: 73 - 80.
- [20] 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, CHEN 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))
- [21] 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 Ya-jun, LU Yi-tian, NIU Kun, et al. Experiment 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))
- [22] 吕海波, 赵艳林, 孔令伟, 等. 利用压汞试验确定软土结构性损伤模型参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 854 - 858. (LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, KONG Ling-wei, et al. Determining parameters of damage model of soft soils using mercury intrusion porosimetry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 854 - 858. (in Chinese))
- [23] 王树芹, 罗松涛, 李国忠, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺相对分子质量和水解度对污泥脱水性能影响的研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1706 - 1713. (WANG Shu-qin, LUO Song-tao, LI Guo-zhong, et al. Effect of anionic polyacrylamide on settleability and dewaterability of sewage sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(8): 1706 - 1713. (in Chinese))