

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0026

废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究

詹良通^{1,2}, 张斌^{1,2}, 郭晓刚^{1,2}, 江文豪^{1,2}

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对工程泥浆回填废弃矿坑处置的安全问题, 开展底部真空和上部堆载预压处理废弃工程泥浆的模型试验, 探讨该技术在废弃矿坑回填处置工程应用的可行性。试验结果表明, 底部真空和上部堆载预压使得泥浆含水率显著降低及泥土的强度明显提高, 处理一个月后, 含水率从初始 450% 降低至 95%~105%, 体积减量达到 73.4%; 不排水强度由初始为 0 的状态提高至 9.8~13.4 kPa。在初始的静置阶段, 泥浆颗粒沉积存在重力分异现象, 粗颗粒在底部沉积有助于缓解真空预压过程中淤堵问题。底部真空作用下, 泥浆中孔隙水渗流方向并非完全一维向下, 在径向存在水力梯度。处理后泥土压缩性与软土相近, 渗透性优于软土。基于试验结果和大应变固结理论, 考虑泥浆的自重固结以及压缩性与渗透性的非线性变化, 利用有限差分法分析了单次回填厚度对泥浆层固结时间和减量效果的影响, 提出了现场实施的工艺参数建议。

关键词: 废弃工程泥浆; 底部真空预压; 模型试验; 固结; 泥浆减量

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 10-3245-10

Physical modeling study on treatment of waste slurry with vacuum preloading at bottom combined with upper surcharge loading

ZHAN Liang-tong^{1,2}, ZHANG Bin^{1,2}, GUO Xiao-gang^{1,2}, JIANG Wen-hao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: To solve the safety problem of using waste slurry to backfill discarded open pit mine, the treatment method of vacuum preloading at bottom combined with upper surcharge loading is implemented in the model test. The feasibility of using this method in the backfilling of discarded open pit mine is discussed. The test results show that the proposed method can significantly reduce the water content of the slurry and increase the shear strength of the soil. The water content of the slurry reduces from 450% to 95%–105%, and the reduction of volume reaches 73.4%. The undrained shear strength increases from zero to 9.8–13.4 kPa. In the initial self-weight consolidation stage, there is gravitational separation in the deposition of particles, and the deposition of coarse particles at the bottom is helpful to alleviate the clogging problem of vacuum preloading. During the stage of vacuum preloading, seepage direction of pore water in the slurry is not completely one-dimensional downward, and there is a hydraulic gradient in the radial direction. After the treatment, the compressibility of the soil is close to that of soft clay, while the permeability is greater than that of soft clay. Based on the experimental results and the large-strain consolidation theory, the effects of slurry thickness of a single disposal cycle on volume reduction and treatment time are analyzed using the finite difference method with consideration of the self-weight, nonlinear change of compressibility and permeability of the slurry. The process parameters for operation in site are recommended based on the results of numerical analysis.

Keywords: construction waste slurry; vacuum preloading at bottom; model test; consolidation; volume reduction of slurry

1 引言

我国城市化进程不断加快, 高层建筑、地下隧道、地铁等土木工程建设过程中产生了大量建筑垃圾, 处理不当会给环境带来严重威胁^[1-2], 废弃工程

泥浆是其中产量大、难以处置的建筑垃圾之一^[3]。废弃工程泥浆产生于钻孔桩基施工、地下连续墙施工、泥水盾构施工、水平定向钻及泥水顶管等施工过程^[4], 是一种由水、膨润土颗粒、黏性土颗粒以及外加剂(如增黏剂、分散剂)组成的悬浊体系^[5-6]。

收稿日期: 2020-01-10

修回日期: 2020-06-11

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (No. 2019C03107)。

This work was supported by the Key R & D program of Zhejiang Province (2019C03107).

第一作者简介: 詹良通, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事非饱和土力学与环境岩土工程的教学和科研。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn

其主要特征为:混入大量钻屑、黏土矿物和杂物,成分复杂^[7];土颗粒粒径小,主要处于 0.1~100 μm 之间^[8],自然沉淀分离耗时长;含水率高,强度极低,呈流体状态。

南方城市废弃工程泥浆产量大,如何进行安全环保处置是各城市面临的难题。机械压滤脱水处理可以将泥浆含水率降低至较低值^[9-10],但处置量和处置效率较低,经济性较差。外运排放仍是目前废弃泥浆最主要的处置方式,大量泥浆被运至城市周边洼地或废弃矿坑进行简易填埋。这种简易的处置方式浪费大量处置空间,且使处置场地成为沼泽地,不仅难以被再利用还会形成安全隐患。由于泥浆处置难题,偷排乱排泥浆的现象屡禁不止,造成水源污染,严重影响生态环境。

基于目前废弃工程泥浆的处置现状,研发工程泥浆的大批量、低能耗处置技术是迫切的现实需求。我国存在数量众多的废弃露天矿坑需要回填治理和生态修复,如能利用工程泥浆作为废弃矿坑的回填料,既能解决废弃泥浆出路难题,又能对矿坑进行回填修复。考虑到废弃泥浆的物理力学特点,简易矿坑回填方式存在以下问题:①工程泥浆呈流态化,承载能力低,在未充分排水固结的情况下进行上部回填极易造成地基失稳和泥浆管涌;②高含水率、低含固率的工程泥浆在自重条件下排水固结缓慢,会影响回填施工进度,并造成显著工后沉降而影响复垦土地的地形坡度。因此,需寻求新的矿坑回填方式,以实现工程泥浆排水固结减量和矿坑增容,保证处理后泥浆的强度和沉降满足回填要求。真空预压法广泛应用于软土地基、吹填淤泥地基处理工程中,取得了较好的地基加固效果^[11-12]。通常的做法是在软土中设置竖向塑料排水板或砂井,上铺砂层,再覆盖薄膜封闭,抽气使膜内排水板、砂层等处于部分真空状态,排除土中的水分,使土预先固结以减少地基后期沉降。魏雁冰等^[13]开展了泥浆池原位真空预压试验研究,在泥浆中插打塑料排水板,处理后含水率从 65.5%降低至 45%左右,地基承载力有所提升。其试验所用的泥浆已经过长期沉积晾晒,含水率较低,且泥浆表面产生硬壳层,已经存在一定的承载力,能够进行插板作业。而现场面临更多的问题是:废弃工程泥浆呈流动状态,几乎无承载力,且迫于快速处置需求无法进行长时间晾晒,难以在其表面进行插板和铺膜作业。为解决这一问题,需改进常规真空预压方法,使其适用于现场实际情况、便于现场施工操作。

笔者开展了底部真空-堆载预压处理废弃工程

泥浆的模型试验,研究了试验过程中的孔压变化规律、泥面沉降规律以及预压后含水率和强度变化,探讨了底部真空-堆载预压处理废弃工程泥浆的减量效果和预压后泥土再造地基的可行性,为废弃泥浆回填处置工程提供依据和指导。

2 模型试验材料及装置

2.1 试验材料

本文试验所用的泥浆取自杭州市谢村中转码头,产生于钻孔灌注桩施工过程,其基本物理化学性质如表 1 所示。泥浆中通常要加入 NaCO_3 作为分散剂,所以泥浆一般呈碱性且 Na^+ 含量较高,测试得到泥浆孔隙水中 Pb^{2+} 含量为 0.344 mg/L,低于《污水综合排放标准》(GB8978—1996)^[14]中第一类污染物最高允许排放浓度 1.0 mg/L 的要求。泥浆的颗粒分曲线如图 1 所示,泥浆中粉粒(0.005~0.075 mm)和黏粒(<0.005 mm)含量分别为 75.87%、22.69%。

表 1 工程泥浆的物理化学性质
Table 1 The physical and chemical properties of waste slurry

密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	土粒相 对密度	液限 /%	塑限 /%	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
1.12	450	2.72	59.8	23.3	1.44	75.87	22.69
电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{Pb}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
1.456	8.9	114.3	228	0.344			

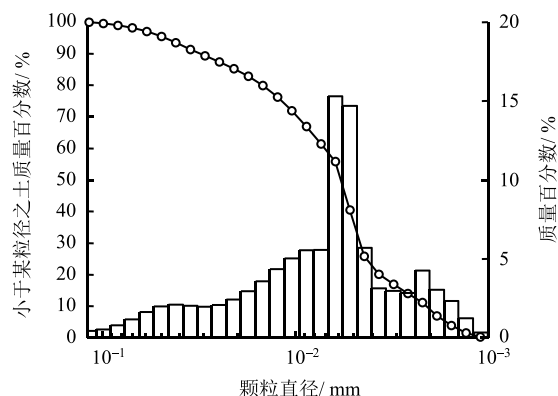


图 1 工程泥浆颗粒分曲线

Fig.1 Particle-size distribution curve of waste slurry

2.2 试验装置

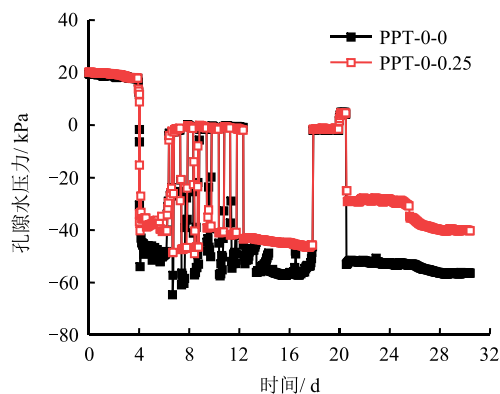
为了探讨底部真空-堆载预压处理泥浆的效果,采用如图 2 所示的浙江大学自主研制的一维地基处理模型试验装置。该装置主要包括模型筒、真空泵、水气分离罐、量测系统等部分。模型筒由上筒体、主筒体和下筒体组成,筒体之间通过螺栓和密封垫圈相连,模型筒高度和直径分别为 2.2 m 和 1.0 m。筒体内部抹有光滑涂层,减小内壁摩擦力对

壁黏接处出现漏气。采取措施后,真空度基本可以保持在 60 kPa 左右。试验进行到 19~20 d 时真空度降低的原因是:关闭真空泵进行含水率和十字板剪切强度的测试,测试完成后利用气缸进行加载同时恢复真空荷载。

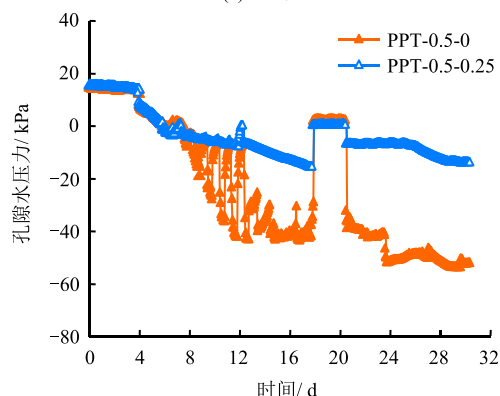
3.2 孔隙水压力

试验过程中不同高度处渗压计测得的孔压随时间变化如图 5 所示,沿高度方向孔压分布剖面如图 6 所示。自然静置阶段初始孔压均略高于静水压力(见图 6(c)),原因是泥浆处于欠固结状态,这与占鑫杰等^[15]进行的市政污泥模型试验结果相似。本试验所用泥浆初始含水率为 450%,泥浆在沉降过程中经历沉积沉降阶段后进入固结沉降阶段。因此,在自然静置阶段后期,随着自重沉积沉降和固结沉降的进行,不同深度处超孔压逐渐消散,4 d 后泥面沉降基本稳定,此时孔压基本等于静水压力。

在真空预压阶段(4~18 d)前期,距离泥浆底部 0、0.5 m 高度处孔压产生波动(如图 5 所示),原因是 3.1 节所述试验基地停电和密封膜漏气导致真空度降低。在真空预压阶段,底部抽真空产生负压,负压首先传递到底部砂垫层,然后传递到泥浆层,在压差作用下泥浆层中孔隙水逐步排出,负压

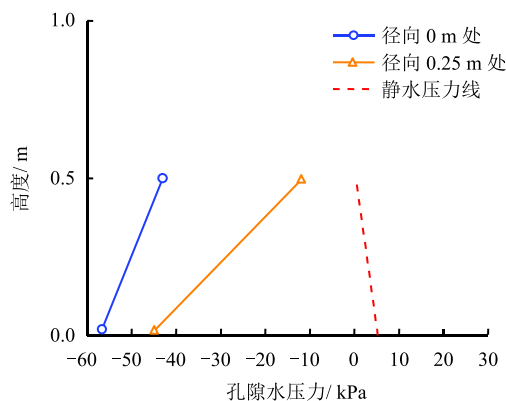


(a) 0 m 处

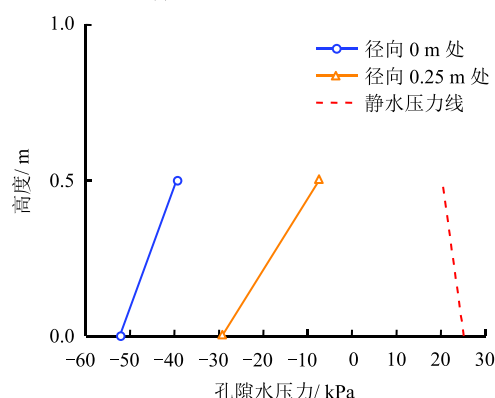


(b) 0.5 m 处

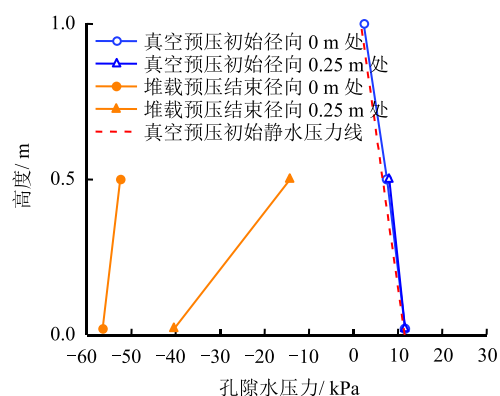
图 5 不同高度处孔隙水压力随时间变化曲线
Fig.5 Variation of pore water pressure with time at different heights



(a) 真空预压阶段(15 d)



(b) 堆载联合真空预压阶段(22 d)



(c) 真空预压初始(4 d)与堆载联合真空预压结束(31 d)

图 6 不同时刻不同剖面孔隙水压力变化曲线
Fig.6 Pore pressure profiles at different locations and times

逐渐向上传递,最后到达顶部密封膜,在排水过程中,泥浆中孔隙水压力 u 逐渐降低。图 6(a)显示了真空预压阶段 15 d 时孔压沿高度方向的变化,可见在泥浆体中轴线底部 0.01 m 处孔压接近所施加的真空压力,即 -60 kPa,0.5 m 高度处孔压约为 -40 kPa,表明沿着高度方向真空度有明显损失。在距离中轴线 0.25 m 处孔压明显高于中轴线上的,底部 0.01 m 处孔压 -45 kPa,0.5 m 高度处孔压约为 -10 kPa,表明沿着径向方向存在水力梯度。上述孔压数据表明,底部真空预压阶段泥浆中孔隙水向下和向中心方向渗流,并非完全一维向下渗流。根据

太沙基有效应力原理，在总应力不变的条件下，孔压 u 的降低导致泥浆中有效应力 σ' 增加，会造成泥浆发生固结沉降。

在堆载联合真空预压阶段（20~31 d），上部堆载作用造成总应力增大，有效应力 σ' 进一步增加，泥浆继续产生固结沉降。当 20 d 时利用气缸施加第一级荷载后，底部孔压很快消散，但后续由于气缸行程不够，后续荷载未能施加到泥浆表面，因此，孔压变化不明显。图 6(b)显示了底部真空-上部堆载联合预压阶段（22 d）孔压沿高度方向变化，可见在泥浆体中轴线上 0.5 m 高度处孔压比此前有明显降低，更接近于底部孔压。而在距离中轴线 0.25 m 处孔压有所上升，仍明显高于中轴线上的，表明沿着径向方向水力梯度依然存在。

3.3 固结排水量和泥面沉降

试验过程中泥浆表面沉降及固结排水量随时间的变化如图 7 所示。整个试验过程中累计固结排水量为 955 L，其中自然静置阶段抽出上层清液体积约为 440 L，其含固率为 0.3%；真空预压及堆载联合真空预压阶段固结排水量为 515 L，其含固率为 0.07%。

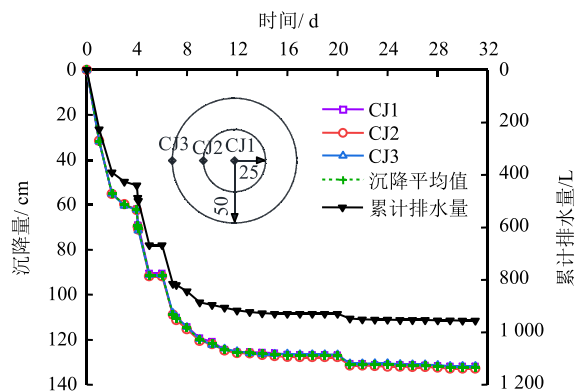


图 7 固结排水量及泥面沉降随时间变化
Fig.7 Variations of amount of discharged water and settlement with time

从图 7 可以看出，设置在不同位置的 3 个沉降板测得的沉降量很接近。经过 31 d 试验，泥面总沉降为 132.1 cm，泥面最终高度为 47.9 cm，体积减量率（泥面沉降量与泥浆初始厚度百分比）达到 73.4%。其中，自然静置阶段泥面沉降约为 62.2 cm，在自然静置阶段前期，泥面沉降基本呈线性增长，沉降速率为 22.9 mm/h，随着泥浆自重固结的进行，后期沉降速度放缓。在真空预压前期，沉降速率可以达到 7 mm/h，5~6 d 沉降曲线出现平台期，是因为模型试验基地停电。真空预压后期沉降速率逐渐放缓，最后趋于一个稳定值，约为 2~3 mm/d，真

空预压阶段泥面沉降为 65.0 cm。施加第 1 级上部荷载后，泥面沉降了 5.0 cm。试验过程中可以发现，泥浆表面沉降较为均匀，整个试验过程中最大差异沉降仅为 1.9 cm，出现在真空预压阶段前期。

忽略蒸发作用的影响，分别根据平均沉降量和固结排水量计算泥浆平均孔隙比随时间变化，如图 8 所示。可见，在自然静置阶段前期和真空预压前期泥浆孔隙比降低较快，随着固结的进行，有效应力的增长，泥浆渗透性和压缩性降低，试验后期孔隙比降低较为缓慢，经过 31 d 的试验，泥浆孔隙比从 12.24 降低至 2.52。

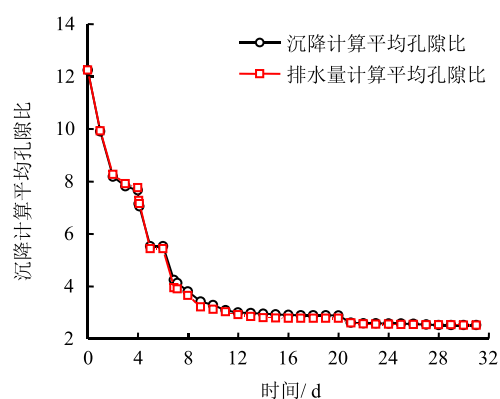


图 8 平均孔隙比随时间变化曲线
Fig.8 Variation of average void ratio with time

3.4 含水率及不排水强度

真空预压后取样测试不同位置泥浆的含水率，方式是沿深度方向每 5 cm 测试含水率，取样点布置及测试结果如图 9 所示。泥浆的初始含水率为 450%，根据上层清液体积计算自然静置阶段泥浆含水率降为 282%。经过真空预压后，泥浆实测的含水率降低至 100%~116%左右，含水率整体分布较为均匀。上部泥浆含水率略高于下部，原因是下部泥浆靠近排水面，排水路径相对较短，水容易排出。而上部泥浆远离排水面，且真空负压向上传递会有损失，水力梯度相对较小，水分较难排出。其中，模型筒底部靠近筒壁处取样点测得泥浆含水率仅为 85.8%，考虑是因为该位置靠近排水阀门处，水力梯度最大，真空预压效果最好。在堆载联合真空预压阶段，在上部堆载作用下，泥浆含水率进一步降低，约为 95%~105%左右。同样，模型筒底部靠近筒壁处取样点测得泥浆含水率较低，为 84.9%。

在真空预压阶段及堆载联合真空预压阶段结束后分别选取筒中心、径向 0.25 m 以及靠近筒壁 3 个区域进行泥浆的十字板剪切试验，每个区域布置 3 个测试点，取平均值作为强度，测试点布置及测试结果如图 10 所示。从测试结果可以看出，试验结束

后泥浆强度分布规律为筒中心区域强度>径向 0.25 m 区域强度>筒壁区域强度。真空预压阶段结束后, 泥浆强度约为 6.0~8.9 kPa。泥浆底部强度高于中部和表面强度, 不同位置泥浆强度变化规律与含水率测试结果相对应。堆载联合真空预压结束后, 泥浆强度进一步增长至 9.8~13.4 kPa。泥浆表面强度增加最明显, 原因是施加上部荷载之前(19~20 d) 进行相关测试, 泥浆表面含水率在阳光照射下有所减少。

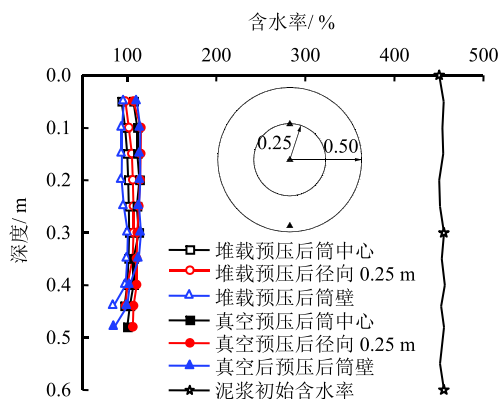


图 9 不同位置泥浆含水率随深度变化曲线

Fig.9 Variation of water content with depth at different locations

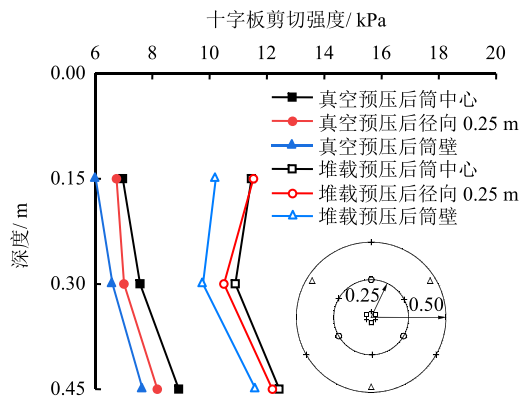


图 10 真空预压、堆载联合真空预压后不同位置剪切强度
Fig.10 Shear strength distribution at different depths after vacuum preloading and upper surcharge loading

3.5 泥浆沉积过程重力分异对颗粒级配的影响

试验结束后在模型筒中心处钻取不同深度土样, 利用激光粒度仪测试颗粒分布情况, 得到颗粒分布在深度方向上的变化规律。从图 11 中可以看出, 随着深度的增加, 颗粒曲线整体向右移动, d_{90} 逐渐增大, 即模型筒底部泥浆中粒径较大颗粒占比大于顶部。Stokes 沉速公式表明颗粒沉降速度与颗粒直径的平方成正比。在泥浆自然静置阶段, 直径较大颗粒首先沉降, 直径较小颗粒随之沉降。但考虑到泥浆中添加剂的存在会干扰泥浆颗粒的沉降, 颗粒沉降速度并不完全符合 Stokes 沉速公式, 因此,

在泥浆上部也会有直径较大颗粒的存在。本次试验没有出现明显淤堵现象^[16], 原因是: 泥浆自然静置阶段, 直径较大颗粒在土工布表面形成了拱架结构, 构成排水通道, 因此, 在后续真空预压阶段泥浆中水分可以顺利排出。可见, 自然静置重力分异有利于减轻泥浆真空预压过程中的淤堵。

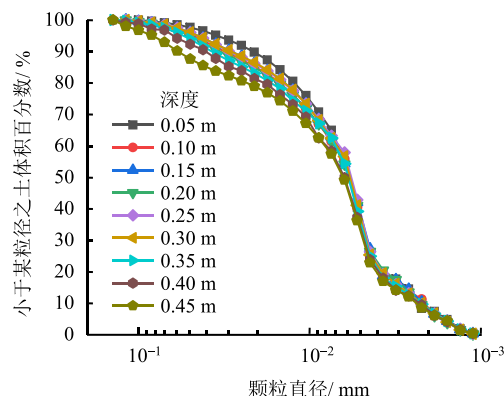


图 11 筒中心处沿深度方向颗粒分布规律

Fig.11 Particle size distribution at different depths along the central axis

3.6 泥浆固结特性

试样的基本参数及压缩性指标如表 2 所示, 从中可以看出, 真空预压处理后的泥浆压缩指数为 1.04~1.54, 压缩指数存在差异可能与不同深度处土样含水率及颗粒级配不同有关。图 12 为不同深度土样固结试验得到的孔隙比与有效应力的关系曲线。图 13 为土样渗透系数与有效应力的关系曲线, 渗透系数与有效应力之间具有明显的非线性关系。与萧山软土试验数据^[17]对比可见: 真空预压处理后的泥浆压缩性与萧山软土相近, 具有软土的高压缩性特性; 有效固结应力为 100 kPa 时, 泥浆渗透系数为 $1.48 \times 10^{-8} \sim 1.80 \times 10^{-8}$ m/s, 渗透性好于萧山软土。同时需要注意的是, 经真空预压处理后的泥浆的压缩性和渗透性随压力变化具有明显的非线性, 表明其具有非线性固结特性, 在进行地基固结分析时应采用考虑压缩性和渗透性非线性变化的固结理论。

表 2 固结试验试样基本参数与压缩性指标

Table 2 Basic parameters and compressibility indexes of the specimens in the consolidation tests

编号	取样深度 / cm	含水率 / %	孔隙比	密度 / (g · cm ⁻³)	压缩系数 a_{1-2} / MPa ⁻¹	压缩指数
CS-1	0~5	90.82	2.47	1.458	1.20	1.04
CS-2	5~10	99.52	2.71	1.418	1.42	1.54
CS-3	10~15	100.52	2.73	1.429	1.89	1.28
CS-4	15~20	97.50	2.65	1.455	1.65	1.16
CS-5	20~25	99.52	2.71	1.409	1.26	1.27
CS-6	25~30	98.80	2.69	1.435	1.11	1.48
CS-7	30~35	95.80	2.61	1.474	0.91	1.38
CS-8	35~40	88.47	2.41	1.462	0.90	1.13

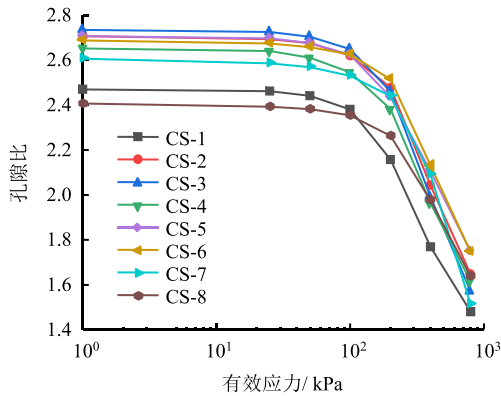


图 12 孔隙比与有效应力曲线

Fig.12 Relationship between void ratio and effective stress

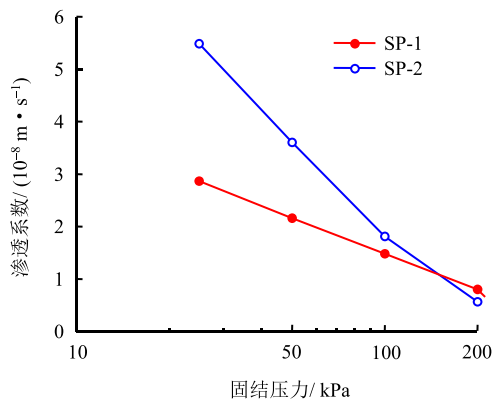


图 13 渗透系数与有效应力曲线

Fig.13 Relationship between coefficient of permeability and effective stress

4 讨论与分析

我国存在数量众多的废弃露天矿坑，大量废弃露天矿坑的安全隐患风险不容忽视，有待于回填修复。对于深度较大的废弃矿坑，泥浆一次全部回填难以保证其排水固结效果，需要分次回填并对泥浆进行排水固结处理，使排水固结处理后的泥浆能够承载上部泥浆层荷载。根据模型试验结果，底部真空-堆载预压可实现泥浆减量并增加泥浆强度。在现场回填施工时可以参考以下流程：①平整矿坑底部；②铺设真空滤管；③铺设砂垫层覆盖真空滤管；④真空滤管连接吸水管，吸水管连接集水器和真空泵；⑤铺设一层土工布，土工布有效孔径根据待处理泥浆颗分曲线确定；⑥向矿坑内注入一定厚度工程泥浆；⑦铺设密封膜；⑧待自重沉积结束进行真空预压；⑨测试固结泥浆不排水强度，判断下一层泥浆回填时机，回填时机可根据不排水强度测试结果验算其地基承载力。在现场进行底部真空上部堆载预压处理泥浆回填矿坑工程的关键技术是确定工艺参数。其中，泥浆层初始厚度和泥浆处理时间对现场施工质量和进度控制具有重要意义。

根据模型试验结果，基于 Gibson 大应变固结理论^[18]，考虑泥浆的自重特性以及压缩性与渗透性的非线性变化，采用龚文惠等^[19]提出的方法对回填泥浆自重固结和真空预压固结过程进行反分析。假设自重固结为单面排水条件，真空预压固结为双面排水条件。有效应力与孔隙比的关系为

$$e = e_0 - C_c \lg \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (1)$$

渗透系数与孔隙比的关系为

$$k = k_0 (10)^{(e-e_0)/C_k} \quad (2)$$

式中： σ'_0 和 k_0 分别为初始时刻泥浆上边界的有效应力和渗透系数， σ'_0 和 k_0 与初始孔隙比 e_0 有关， σ'_0 取值范围一般为 $0 \sim 1$ kPa； C_c 、 C_k 分别为压缩指数和渗透指数， C_c/C_k 比值在 $0.5 \sim 2.0$ 之间^[20]。

对上述模型试验结果反分析过程中，自重固结阶段的 e_0 取实测结果， k_0 根据文献^[21]报道的范围取初始值，假设 C_c 与 C_k 值相等，通过对自重固结阶段沉降数据反分析得到如表3所示的参数取值。对于真空预压阶段，将自重固结结束时的孔隙比代入式(1)、(2)可以得到真空预压固结阶段的 σ'_0 和 k_0 ；对图13中渗透系数与有效应力的关系曲线进行拟合可得到真空预压固结结束时泥浆上边界的渗透系数，代入式(2)求得 C_k 值；最后对真空预压阶段沉降数据反分析得到表3所示参数取值。图14是对模型试验泥面沉降量反分析结果与实测数据的对比。由图可以看到，在自重固结阶段以及真空预压阶段后期，差分解与实测数据吻合较好；而在真空预压阶段前期，差分解与实测数据偏差较大，最大偏差为实测值的15%，该偏差可能是由于理论分析中无法考虑试验过程中真空度出现的振荡变化。对比分析表明，上述有限差分法的模拟精度能满足实际工程需要。

利用上述有限差分法分析了不同初始厚度泥浆自重固结和真空预压固结过程，分析时自重固结时间均设置为4 d，真空预压固结时间为50 d，预测得到的沉降曲线如图15所示。由图可见，对于初始厚度大于1.8 m的工况，4 d后自重固结尚未完成。随着泥浆厚度的增加，泥面沉降速率和最终沉降量增加，但泥浆固结所需时间增加。当泥浆初始厚度超过5.4 m时，泥浆固结所需时间显著增加。图16为分析得到的泥浆初始厚度对体积减量率及处理时间的影响。由图可以看出，随着泥浆初始厚度的增加，达到90%和95%固结度所需时间显著增加，当泥浆厚度大于3.6 m时，固结时间增长斜率明显增大。

泥面初始厚度为 7.2 m 时, 达到 95%固结度需要 47.4 d 时间, 处理过程过长。随着泥浆初始厚度的增加, 相同处理时间下泥浆体积减量率减小。需要注意的是, 这里分析中所用到的固结参数取值于模型试验结果反分析得到的参数。考虑到泥浆固结参数与应力水平有关, 对于泥浆初始厚度大于 1.8 m 的工况, 有限差分分析得到的泥面沉降值会偏大。根据以上分析结果, 工程现场对泥浆进行底部真空预压处理时, 考虑到处理效率问题, 泥浆分层厚度不宜过大, 建议为 3.6~5.4 m 左右, 达到 90%固结度所需时间为 10~20 d, 也可以根据实际工期需要适当调整泥浆初始厚度。

表 3 反分析得到的参数取值
Table 3 Parameters from back analysis

参数	压缩指数 C_c	渗透指数 C_k	初始有效应力 σ'_0 /kPa	初始渗透系数 k_0 /(m · s ⁻¹)
自重固结	5.450	5.450	0.132	3.2×10^{-5}
真空预压	2.854	2.178	0.910	4.5×10^{-6}

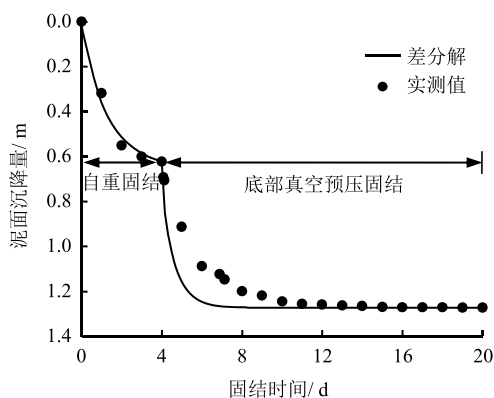


图 14 泥浆自重沉积与真空预压阶段沉降曲线
Fig.14 Settlement curve of self-weight consolidation and vacuum preloading stage

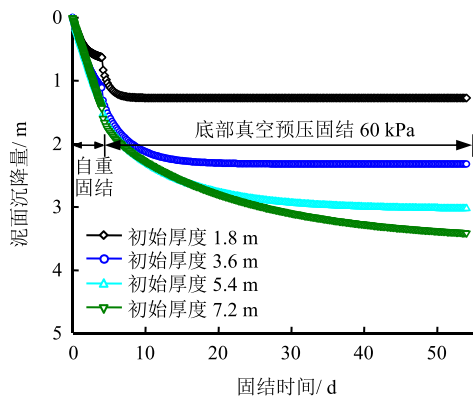


图 15 不同初始厚度泥浆自重固结与真空预压固结沉降曲线

Fig.15 Settlement curves of self-weight consolidation and vacuum preloading for slurry with different initial thicknesses

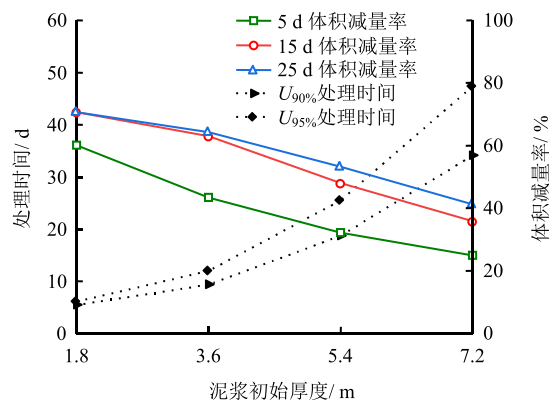


图 16 泥浆初始厚度对体积减量率及处理时间的影响
Fig.16 Effect of initial height on volume reduction ratio and treatment time

5 结论

(1) 在自然静置阶段, 泥浆在重力作用下由沉积沉降进入固结沉降。随着自重固结的进行, 孔压由欠固结状态下高于静水压力逐渐降低至等于静水压力。在重力分异作用下, 较多粗颗粒沉积于底部, 有利于缓解淤堵现象发生。

(2) 在真空预压阶段, 泥浆底部孔压迅速降至负压, 随着真空负压向上传递, 泥浆中孔隙水向下和向中心渗流, 并非完全一维向下渗流。真空预压阶段泥面沉降量达初始厚度的 36.1%, 不排水强度从 0 提高至 6.0~8.9 kPa。

(3) 在堆载联合真空预压阶段, 泥浆体内真空负压基本保持恒定。在上部堆载作用下, 排水固结继续发展, 泥面沉降较小, 但强度增加显著, 不排水强度增加了 3.2~4.8 kPa。

(4) 底部真空-上部堆载预压技术无需在泥浆表面进行插设排水体作业, 适用于无强度工程泥浆的脱水加固处理, 可以显著降低泥浆含水率及提高强度: 初始含水率 450%可降低至 95%~105%, 体积减量达到 73.4%; 不排水强度由初始为零的状态提高至 9.8~13.4 kPa。处理后泥浆的压缩性与萧山软土相近, 渗透性好于萧山软土。

(5) 根据有限差分法计算结果, 随着初始回填厚度的增加, 泥浆达到 90%固结度所需时间逐渐增加, 大于 5 m 时处理时长显著增大, 相同固结时间下的体积减量率明显减小。工程现场进行泥浆底部真空预压处理时, 单次处理泥浆层厚建议为 3.6~5.4 m 左右。

底部真空预压作为一种现场处理泥浆的方法, 施工方法简单, 可以满足泥浆减量化和增加强度的

需求, 为后续上部堆载作业提供条件。若要满足后续再造地基的要求, 减量后还可通过其他原位处理方法进一步提高泥浆强度。本次模型试验研究仅进行一组试验, 而泥浆减量处理效果与泥浆构成有一定关系。建议今后进行多组不同构成泥浆的相关试验研究, 并开展现场试验研究, 进一步优化处理工艺。

参 考 文 献

- [1] 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. 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.
- [2] ZHU H, SUN H, WANG F, 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.
- [3] 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(Suppl.2): 238-241.
- [4] 上海市环境工程设计科学研究院有限公司. CJJ/T134—2019 建筑垃圾处理技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Shanghai Institute for Design & Research on Environmental Engineering Co., Ltd. CJJ/T134—2019 Technical standard for construction and demolition waste treatment[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [5] 万玉纲, 余学海. 桩基工程泥浆水处理技术[J]. 环境工程, 1999, 17(1): 14-15.
WAN Yu-gang, YU Xue-hai. Treating technology of waste slurry from pile foundation engineering[J]. **Environmental Engineering**, 1999, 17(1): 14-15.
- [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.
- [7] 张钦喜, 陶韬, 王晓杰, 等. 钻孔灌注桩废弃泥浆处理的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊 1): 40-45.
ZHANG Qin-xi, TAO Tao, WANG Xiao-jie, et al. Experimental study on treatment of waste slurry in cast-in-situ bored pile[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2015, 46(Suppl. 1): 40-45.
- [8] 梁止水, 杨才千, 高海鹰, 等. 建筑工程废弃泥浆快速泥水分离试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 427-433.
LIANG Zhi-shui, YANG Cai-qian, GAO Hai-ying, et al. Experimental study on rapid separation between water and slurry from construction engineering[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2016, 46(2): 427-433.
- [9] 耿朋飞, 孙林柱. 泥浆压滤脱水复合絮凝剂的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 118-122.
GENG Peng-fei, SUN Lin-zhu. Experimental study on construction waste slurry dehydration composite flocculants[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2014, 36(5): 118-122.
- [10] 楼春晖, 张忠苗, 房凯. 泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 57-61.
LOU Chun-hui, ZHANG Zhong-miao, FANG Kai. Theoretical and experimental analysis on the pressure filtration technology in slurries treatment[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2012, 34(6): 57-61.
- [11] 秦玉生, 李智毅, 曹大正, 等. 低位真空预压法加固软土地基技术研究[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 471-476.
QIN Yu-sheng, LI Zhi-yi, CAO Da-zheng, et al. Consolidation of soft soil foundation by vacuum-pumping in low level position[J]. **Geoscience**, 1999, 13(4): 471-476.
- [12] 杨爱武, 潘亚轩, 曹宇, 等. 吹填软土低位真空预压室内试验及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 1456-1461.

- 539-548.
- YANG Ai-wu, PAN Ya-xuan, CAO Yu, et al. Laboratory experiment and numerical simulation of soft dredger fill with low vacuum pre-compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 539-548.
- [13] 魏雁冰, 范明桥, 林生法, 等. 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 65-69.
- WEI Yan-bing, FAN Ming-qiao, LIN Sheng-fa, et al. Experimental study on construction waste slurry treatment by vacuum preloading[J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2016, 37(1): 65-69.
- [14] 国家技术监督局. GB8978—1996 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB8978 — 1996 Integrated wastewater discharge standard[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [15] 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): 88-96.
- ZHAN Xin-jie, LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, et al. Model test study of vacuum preloading on municipal sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl. 1): 88-96.
- [16] 吴思麟, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥浆真空抽滤泥水分离中堵塞机理及规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1530-1537.
- WU Si-lin, ZHU Wei, MIN Fan-lu, et al. Clogging mechanism and effect of cake permeability in soil-water separation using vacuum filtration[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(8): 1530-1537.
- [17] 齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- QI Tian. Theoretical and experimental studies on one-dimensional nonlinear consolidation of soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] GIBSON R E, ENGLAND G L, HUSSEY M J L. The theory of one-dimensional soil consolidation of saturated clays[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(3): 261-273
- [19] 龚文惠, 赵旭东, 邱金伟, 等. 饱和软土大应变自重固结非线性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2099-2107, 2118.
- GONG Wen-hui, ZHAO Xu-dong, QIU Jin-wei, et al. Nonlinear analysis of one-dimensional consolidation of saturated cohesive soil including self-weight effects and large strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2099-2107, 2118.
- [20] BERRY P L, WILKINSON W B. The radial consolidation of clay soils[J]. **Geotechnique**, 1969, 19(2): 253-284.
- [21] 蒲诃夫, 宋丁豹, 郑俊杰, 等. 饱和软土大变形非线性自重固结模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1683-1692, 1703.
- PU He-fu, SONG Ding-bao, ZHENG Jun-jie, et al. Model for large-strain nonlinear self-weight consolidation of saturated soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1683-1692, 1703.