

DOI: 10.11779/CJGE2020S1007

# 工程泥浆自重固结及低位真空加载过程的大型模型 试验研究

詹良通<sup>1</sup>, 江文豪<sup>1</sup>, 王顺玉<sup>1</sup>, 杨策<sup>2</sup>, 庄涛<sup>2</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 杭州绿农环境工程有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 针对杭州某工地产生的高含水率工程泥浆, 以大型地基与边坡工程模型试验装置为实验平台, 对工程泥浆的自重固结及低位真空加载过程展开了大型模型试验研究, 探讨了该过程中泥面的沉降规律和孔压的发展规律, 以及低位真空加载后工程泥浆含水率的大小。结果表明: 经过自重固结及低位真空加载两阶段处理, 工程泥浆的平均沉降量达 314 cm, 平均含水率从 255.6%降低至 115.9%, 平均孔隙比从 6.72 降低至 3.04, 体积减量达 47.6%, 这表明低位真空加载处理工程泥浆具有一定的工程可行性; 在泥浆的低位真空加载过程中, 真空压力从土工布以下的砂垫层传递至泥浆层时出现“孔压突降”的情况; 低位真空加载方式可较好的加固底部泥浆, 后续应重点关注上部泥浆的脱水处理。  
**关键词:** 工程泥浆; 大型模型试验; 自重固结; 低位真空加载; 脱水处理

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0032-06

**作者简介:** 詹良通(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程等方面的研究。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

## Large-scale model test investigation on self-weight consolidation and low vacuum loading process of construction waste slurry

ZHAN Liang-tong<sup>1</sup>, JIANG Wen-hao<sup>1</sup>, WANG Shun-yu<sup>1</sup>, YANG Ce<sup>2</sup>, ZHUANG Tao<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Hangzhou Lünong Environment Engineering Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

**Abstract:** In view of the high water content of construction waste slurry produced by a site in Hangzhou, with large foundation and slope engineering model test apparatus for experimental platform, the self-weight consolidation and low vacuum loading process of construction waste slurry are investigated experimentally, the variation of slurry surface settlement and the development of pore water pressure in the this process are studied, and the water content of slurry after low vacuum loading is also discussed. The results show that after self-weight consolidation and the low vacuum loading process of slurry, the average settlement reaches 314 cm, the average water content decreases from 255.6% to 115.9%, the average void ratio decreases from 6.72 to 3.04, and the volume reduction reaches 47.6%. These results indicate that the low vacuum loading treatment of slurry has certain engineering feasibility. During low vacuum loading process of slurry, the “vacuum pressure drop” occurs when the vacuum pressure is transferred from the sand cushion under the geotextile to the slurry layer. The low vacuum loading method can strengthen the bottom slurry well, and the following step should focus on dewatering treatment of the upper slurry.

**Key words:** construction waste slurry; large-scale model test; self-weight consolidation; low vacuum loading; dewatering treatment

## 0 引言

随着中国城市化进程的加快, 各种土木工程建设也随之开展, 施工过程中产生了大量的工程渣土和工程泥浆<sup>[1]</sup>。目前, 工程泥浆的主要处置方法有外运排放法、机械压滤法、絮凝沉淀法等<sup>[2-5]</sup>。然而, 由于工程泥浆产量大, 含水率高, 外运排放过程极易产生二次污染, 且需占用大量堆场土地, 耗时长<sup>[2]</sup>。楼春晖

等<sup>[3]</sup>采用机械压滤技术对工程泥浆进行处理, 并分析了压滤压力、压滤时间以及压滤效果之间的关系。魏雁冰等<sup>[4]</sup>采用不同塑料排水板布置方式的真空预压法, 在泥浆池对工程泥浆开展了原位处理试验研究。

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03107)

收稿日期: 2020-06-02

武亚军等<sup>[5]</sup>将化学药剂处理与真空预压法相结合, 提出了用于工程泥浆处理的药剂真空预压法。然而, 上述处理方法或处理能力有限, 或处理时间长, 其工程适用性还需展开进一步探究。

与此同时, 废弃矿坑的存在导致大面积的地表岩石裸露, 易造成水土流失和环境污染, 且存在发生滑坡等地质灾害的风险<sup>[1, 6]</sup>。随着土地资源的紧缺, 废弃矿坑作为一种潜在土地资源, 越来越受到关注。

探索工程化处理方法是解决工程泥浆处置难题的一个有效途径。真空预压法是加速软土地基排水固结的常用方法, 其在工程泥浆脱水处理中也得到了使用<sup>[4-5]</sup>。当采用真空预压法处理工程泥浆时, 其处理效果受黏粒含量的影响, 黏粒含量的越多, 真空预压下的固结过程越慢, 也越容易发生淤堵。低位真空预压联合上部堆载可用于工程泥浆的大规模脱水处理。以工程泥浆和工程渣土互层回填废弃矿坑, 既能实现工程渣土和工程泥浆的协同处置, 又能以渣土层作为上部堆载加速泥浆层的排水固结, 并提升回填后场地的承载力, 实现土地资源再利用。

基于此, 针对杭州某工地产生的高含水率工程泥浆, 以大型地基与边坡工程模型试验装置为实验平台, 对工程泥浆的自重固结及低位真空加载过程展开了大型模型试验研究, 探讨了低位真空处理工程泥浆的工程可行性, 为后期进行工程泥浆与工程渣土互层回填废弃矿坑再造地基提供参数指导。

## 1 试验步骤与设计

### 1.1 试验材料

本文所用试验材料主要包括工程泥浆、生石灰、碎石、细砂及土工布等。由于工程泥浆的体量较大(约 124 m<sup>3</sup>, 厚度 6.6 m), 模型槽内下部(0~4.4 m)和上部(4.4~6.6 m)工程泥浆的基本性质存在差异, 模型槽内上下部工程泥浆的各项基本性质, 如表 1 所示。上下部工程泥浆的颗粒分布曲线, 如图 1 所示。

根据表 1 和图 1 可知, 工程泥浆的黏性土颗粒较少, 主要以粉砂土颗粒为主。本文选用的生石灰产自江西, 其纯度在 95%以上, 呈细小颗粒状。生石灰能够与水反应生成氢氧化钙, 它可以与工程泥浆的土颗粒发生离子交换和火山灰反应, 形成渗水通道, 从而起到增渗作用。碎石、细砂材料主要用于形成底部垫层。试验所用土工布包括普通的热轧长丝土工布和无纺土工布, 热轧长丝土工布用于隔离和过滤泥浆中的水分和土颗粒, 其表观孔径为 75 μm; 无纺土工布主要用于分隔碎石层和砂垫层, 以及保护模型槽底部, 以免其被碎石棱角划破, 其表观孔径约为 200 μm。

表 1 工程泥浆的基本性质

Table 1 Basic properties of construction waste slurry

厚度 范围 /m	土粒 相对 密度	含水 率/%	有机 质含 量/%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
4.4~6.6	2.64	285.5	2.88	41.7	21.4	20.3	5.8	54.8	39.4
0~4.4	2.61	240.6	4.02	48.7	25.2	23.5	9.3	63.2	27.5

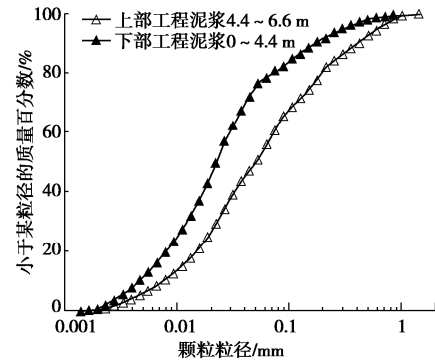


图 1 工程泥浆的颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of construction waste slurry

### 1.2 试验装置

本次试验在大型地基与边坡工程模型试验装置中进行, 取其部分空间进行试验, 该空间表面贴有 HPDE 土工膜, 模型槽试验空间尺寸为 4.8 m×3.9 m×7.5 m。

大型模型槽外配备有低位真空加载系统, 其仪器设备包括真空泵、储能罐、真空表、水汽分离罐、水表等。真空泵为水环真空泵, 用于提供真空荷载; 储能罐主要用于储存真空能量, 用于真空泵停止工作时的真空加载; 真空表主要用于实时监测真空压力的大小; 水汽分离罐主要用于稳定真空压力; 水表用于监测真空加载过程抽水量的变化。低位真空加载系统与大型模型槽(预埋的真空管网)之间通过硬质水管连接, 水管直径为 4 cm。为测定试验过程泥浆中孔隙水压力的变化, 试验开始前, 模型槽内布设有孔隙水压力计。试验开始前, 试验装置及仪器布置的整体示意图见图 2, 图 2 中标出了试验开始前孔压计的位置和试验开始后泥面沉降测点的位置。

### 1.3 试验方案

在展开大型模型槽试验前, 利用抽滤试验研究表明, 生石灰可增大工程泥浆的渗透系数, 但渗透系数的增大会使得工程泥浆抽滤时更容易出现裂缝, 从而使得泥浆抽滤结束后的含水率较高。为提高工程泥浆的渗透性, 同时降低低位真空加载结束后工程泥浆的含水率。本次试验拟总共泵入 6.6 m 厚度的工程泥浆, 其中下部 4.4 m 厚度的工程泥浆按 6 kg/m<sup>3</sup> 比例加入生石灰, 上部 2.2 m 厚度的工程泥浆不添加生石灰。

考虑到篇幅, 本文仅对试验的前两个阶段的固结

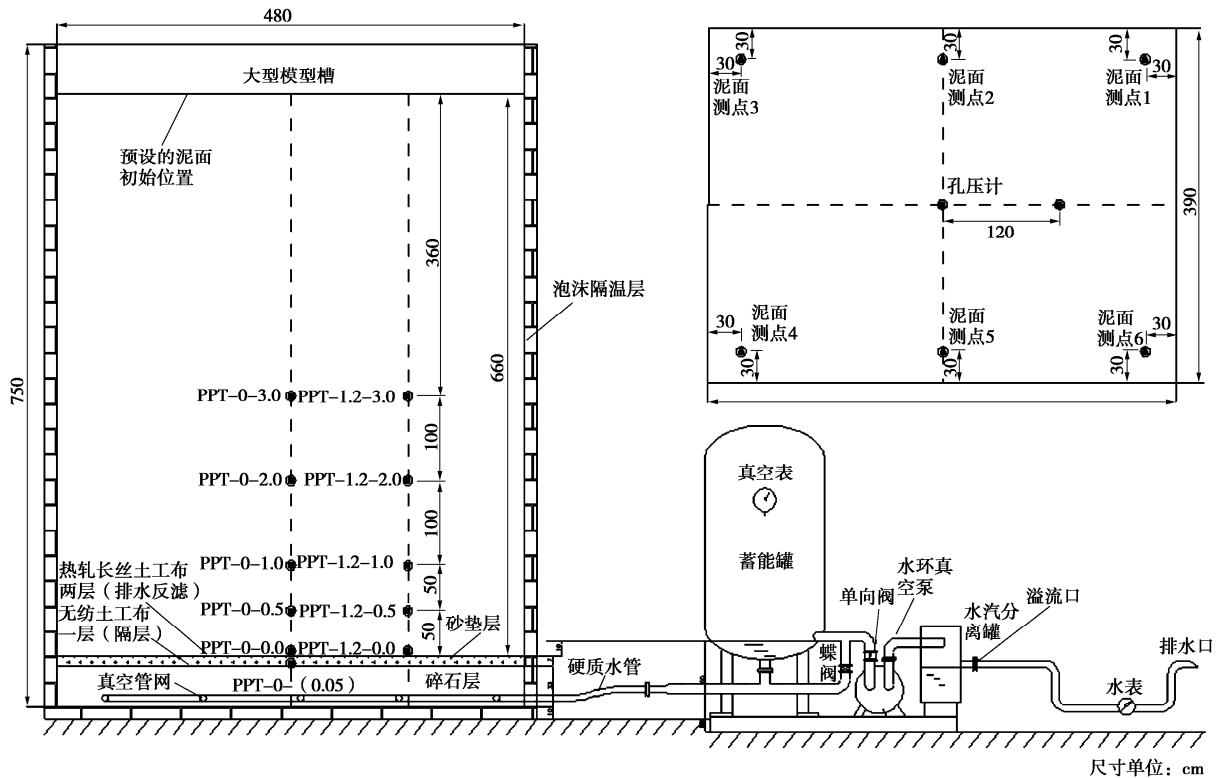


图2 模型槽试验装置及仪器布置的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model devices and instrument arrangement

过程展开分析,即自重固结阶段(0~26 d)及低位真空加载阶段(26~78 d),两个阶段的共持续78 d。试验步骤为:①在模型槽底部铺设两层无纺土工布,随后放置4 m×3 m的真空管网,并通过硬质水管将其与低位真空加载系统连接。②铺设厚度为33 cm的碎石层,随后铺设一层无纺土工布,铺设7 cm厚的砂垫层,铺设两层热轧长丝土工布。③以热轧长丝土工布顶面为基准面,在竖向高度0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m以及砂垫层中设置了11支Geokon孔压计(埋设前对孔压探头进行了饱和及标定,孔压计类型均为振弦式孔压计,其中2.0 m及3.0 m以上位置处孔压计量程为70 kPa,其余位置处的量程为350 kPa),其中6个设置在模型槽平面中心轴线上,其余5个设置在距模型槽平面中心轴线1.2 m处,其具体位置可参照图2;以PPT-1.2-3.0为例,图中孔压计标号的意义为:距离平面中心1.2 m,竖向高度为3.0 m处的孔压计。④向模型槽内泵入泥浆,泵入泥浆厚度达6.6 m,在泵入工程泥浆厚度达4.4 m前,按6 kg/m<sup>3</sup>比例倒入生石灰,达4.4 m厚度后,不再倒入生石灰。⑤工程泥浆于2019年8月28日全部泵入完毕,泵入后工程泥浆开始进行自重固结,自重固结阶段工程泥浆的表层状况如图3所示。当泥面沉降速率低于3.3 cm/d时,自重固结阶段结束。⑥自重固结达26 d后(2019年9月23日),利用上部液体的密封作用,对工程泥浆进行低位真空

加载,考虑到逐级加载有利于减轻底部工程泥浆的淤堵情况,因此对工程泥浆进行分级加载,低位真空加载过程如图4所示(考虑到试验时间较长,这里以日期作为横坐标),当真空荷载达80 kPa后,不再增加真空荷载。⑦在低位真空恒载下,当泥面的沉降速率低于0.66 cm/d时,低位真空加载过程结束。



图3 自重固结阶段工程泥浆的表层状况

Fig. 3 Surface condition in self-weight consolidation

## 2 自重固结阶段

### 2.1 泥面的沉降规律

不同泥面测点的位置如图2所示。图5给出了模型试验自重固结阶段几个典型测点处泥面的沉降规律。

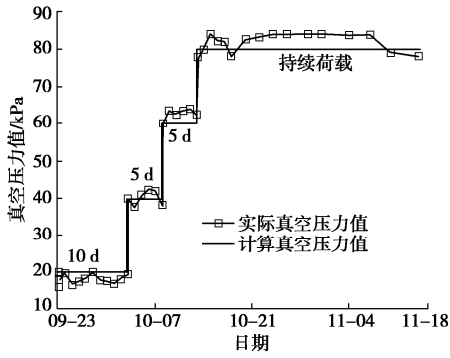
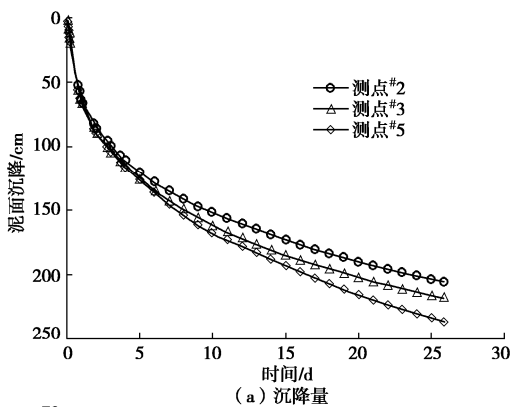


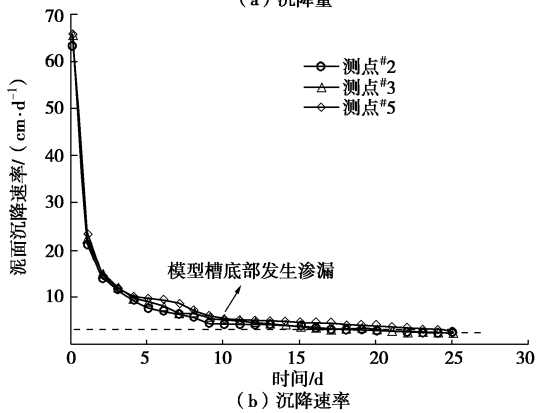
图 4 真空压力值随时间的变化

Fig. 4 Variation of low vacuum loading with time

从图 5 中可以看出, 在自重固结阶段, 工程泥浆的沉降量逐渐增大, 沉降速率呈现先快后慢的特点, 不同测点处工程泥浆的沉降速率存在一些差异。需说明的是, 尽管试验前对模型槽的密闭性进行了测试, 但自重固结过程中模型槽底部发生了渗漏 (槽外有水体渗出)。从图 5 (b) 中可以看出, 尽管槽底发生渗漏后泥面的沉降速率未明显增大, 但渗漏后泥面的沉降速率在较长时间内基本趋于平缓。在整个自重固结阶段, 泥浆表面的平均沉降量达 2.22 m, 平均沉降速率为 8.5 cm/d, 不同位置的沉降差最大达 35 cm。



(a) 沉降量



(b) 沉降速率

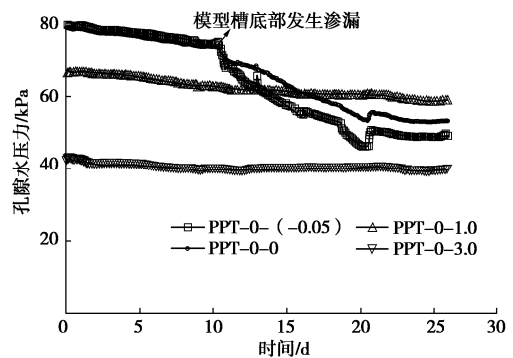
图 5 自重固结阶段泥面的沉降规律

Fig. 5 Variation of surface settlement in self-weight consolidation

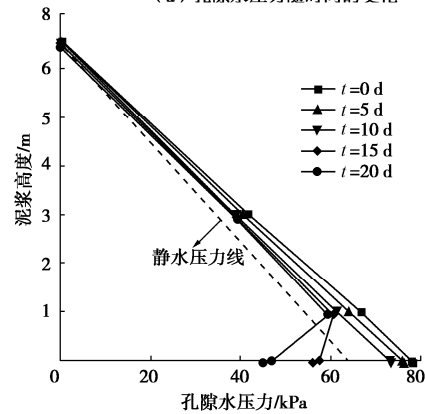
## 2.2 孔隙水压力的发展规律

图 6 给出了自重沉降阶段距中心线 1.2 m 处孔隙

水压力随时间和泥浆高度的发展规律。从图 6 (a) 中可以看出, 随着自重固结过程的进行, 不同位置处工程泥浆的孔隙水压力均发生一定的下降, 且泥浆高度越低, 孔压的变化量也越大。当模型槽底部发生渗漏后, 底部工程泥浆的孔隙水压力明显降低, 但 1.0 m 以上高度工程泥浆的孔压变化受模型槽渗漏的影响较小。从图 6 (b) 中可以发现, 在初始阶段, 孔隙水压力值随深度几乎呈线性分布, 这说明工程泥浆初始时较为均匀, 在自重固结过程中, 孔压值逐渐静水压力线移动, 这反映了工程泥浆的自重固结过程。



(a) 孔隙水压力随时间的变化



(b) 孔隙水压力随时间和泥浆高度的变化

图 6 自重固结阶段孔隙水压力的发展规律

Fig. 6 Variation of pore water pressure in self-weight consolidation

## 2.3 讨论与分析

在本试验中, 自重固结达 26 d 时, 不同位置处工程泥浆的沉降差值达 35 cm, 在实际工程中, 泥浆固结过程存在的沉降差异应引起重视。从图 6 中可看出, 模型槽发生渗漏后, 底部泥浆的孔压值位于静水压力线的左侧, 这说明模型槽渗漏后, 泥浆的自重固结状态由单面排水状态变为部分双面排水状态 (其中底面为不完全排水边界), 这增大了工程泥浆的沉降速率。同时, 当底面的孔压值低于同位置下的静水压力值时, 根据有效应力原理可知, 此时底部泥浆的有效应力值已大于自重固结完成后的有效应力值, 这说明模型槽发生渗漏还增大了工程泥浆自重固结的最终沉降值。

### 3 低位真空加载阶段

#### 3.1 泥面沉降量的变化规律

在低位真空加载阶段, 典型测点处泥面沉降量的变化规律见图7(图中沉降量该阶段的相对沉降值)。

从图7中可以看出, 在分级加载阶段(9月23日—10月13日), 泥浆的沉降量随时间几乎呈线性降低; 在恒载阶段(10月13日—11月14日), 泥浆的沉降量随时间呈抛物线形式降低, 这与自重阶段的沉降曲线相似。在低位真空加载阶段, 不同测点位置处的沉降值仍有较大差异, 不同位置的沉降差达14.4 cm, 但最大沉降差的测点位置发生了变化。在低位真空加载阶段, 泥面的平均沉降量为92 cm, 该阶段的沉降量为自重固结阶段沉降量的41.1%。

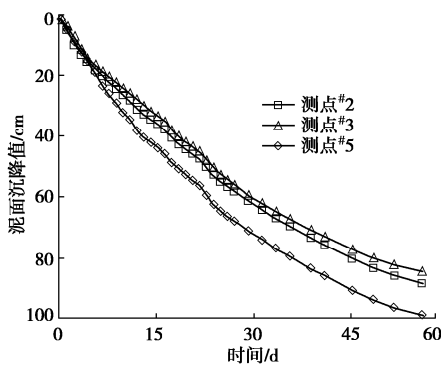


图7 低位真空加载阶段泥面沉降量的变化规律

Fig. 7 Variation of surface settlement in low vacuum loading

#### 3.2 孔隙水压力的发展规律

在低位真空加载阶段, 由于孔隙计 PPT-0-1.0 出现损坏, 为便于比较, 这里给出了距中心线 1.2 m 处孔隙水压力随时间和泥浆高度的发展规律, 如图8。

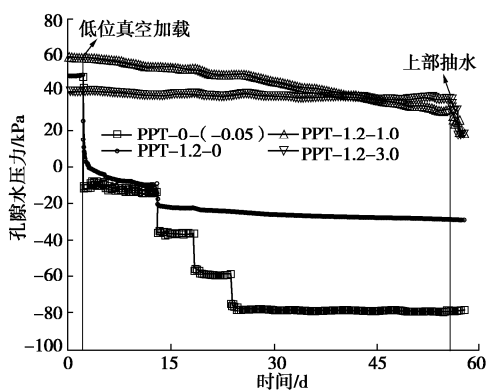


图8 低位真空加载阶段孔隙水压力的发展规律

Fig. 8 Variation of pore water pressure in low vacuum loading

从图8中可以看出, 施加真空荷载后, 砂垫层中的孔压值迅速降低, 且与真空压力值相近, 这说明真空荷载已较为均匀的传递至模型槽底部。在泥浆中,

泥浆底面孔压值的下降较为明显, 但下降量低于砂垫层的下降量, 且在后两级加载过程中, 孔压值无明显降低; 高度 1.0 m 处的孔压值在真空加载后出现“渐进式”下降, 加载达 50 d 时, 孔压值从 59.5 kPa 降至 29.6 kPa, 下降量约 30 kPa; 1.0 m 高度以上的孔压变化几乎不受真空加载影响, 加载过程的下降量很小。

#### 3.3 讨论与分析

由于上部液体的存在, 无需密封即可对工程泥浆进行低位真空加载处理。经过自重固结及低位真空加载两阶段处理, 工程泥浆的平均沉降量达 314 cm, 平均含水率从 255.6% 降低至 115.9%, 平均孔隙比从 6.72 降低至 3.04, 体积减量达 47.6%, 这说明低位真空加载处理工程泥浆具有一定的工程可行性。在低位真空加载阶段, 从孔压的变化规律中可看出, 真空压力从土工布以下的砂垫层传递至泥浆层时出现“孔压突降”情况。当真空荷载为 80 kPa 时, 该“孔压突降”值约为 50 kPa, 这可能是在长时间真空加载过程中, 土颗粒进入土工布中造成土工布淤堵, 有关产生“孔压突降”的原因还需结合试验展开进一步的研究。

### 4 结 论

本文通过展开大型模型槽试验, 对高含水率工程泥浆的自重固结及低位真空加载过程进行了试验研究, 研究得到了以下 3 点结论。

(1) 经过自重固结及低位真空加载两阶段处理, 工程泥浆的平均沉降量达 314 cm, 平均含水率从 255.6% 降低至 115.9%, 平均孔隙比从 6.72 降低至 3.04, 体积减量达 47.6%, 这表明低位真空加载处理工程泥浆具有一定的工程可行性。

(2) 低位真空加载处理工程泥浆的过程中, 真空压力从土工布以下的砂垫层传递至泥浆层时出现“孔压突降”情况, 有关产生“孔压突降”的原因还需进一步的研究。

(3) 根据工程泥浆中不同位置处孔隙水压力随时间的发展规律可知, 低位真空加载方式可较好的加固底部泥浆, 但上部泥浆无法得到较好的处理, 后续应重点关注上部泥浆的脱水处理。

#### 参考文献:

- [1] 张 振. 深圳光明新区渣土场滑坡离心模型试验及机理分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (ZHANG Zhen. Centrifuge Modeling and Failure Mechanism Analysis of Shenzhen 12·20 Catastrophic Landslide[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))
- [2] 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**(S1): 40 - 45. (in Chinese))
- [3] 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 and Environmental Engineering, 2012, **34**(6): 57 - 61. (in Chinese))
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] ZHAN L T, ZHANG Z, CHEN Y M, et al. The 2015 Shenzhen catastrophic landslide in a construction waste dump: Reconstitution of dump structure and failure mechanisms via geotechnical investigations[J]. Engineering Geology, 2018, **238**: 15 - 26.

(编校: 孙振远)