

盾构废弃黏土泥浆真空脱水试验与理论研究

郜新军, 王磊, 王会杰, 刘忠玉, 苏庆辉

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对泥浆池中盾构废弃泥浆在上部真空脱水作用下倒渣及运渣受限等问题, 提出了一种废弃泥浆底部真空脱水方法。采用自行研制的废弃泥浆底部真空脱水装置开展了自重、自重+底部真空荷载、自重稳定+底部真空荷载、自重稳定+底部分级真空荷载 4 组不同脱水荷载工况下废弃黏土泥浆模型试验, 分析了废弃黏土泥浆的泥-水界面沉降量、孔隙水压力以及脱水后含水率和总脱水量等物理量的变化规律。结果表明, 先对废弃泥浆进行自重脱水处理, 再对其底部分级施加真空作用的脱水方式具有更好的脱水效果。采用该方法对初始含水率为 103.00% 的废弃黏土泥浆进行脱水处理后, 含水率分布范围为 37.10%~62.65%, 其内部孔隙水压力的最小值可达 -73.09 kPa, 接近底部真空作用值 -80.00 kPa; 且该工况相较于其余 3 种工况, 平均沉降量分别提高了 106.40%、2.91%、6.15%, 总脱水量分别提高了 122.0%、8.0%、5.1%。同时, 基于分段线性化有限差分(CS2)模型建立了废弃黏土泥浆真空脱水数值计算模型, 对废弃黏土泥浆在脱水过程中泥-水界面沉降量进行数值模拟, 验证了数值计算模型的有效性。

关键词: 盾构废弃黏土泥浆; 脱水处理; 真空荷载; 模型试验; 数值计算模型

中图分类号: TU44

文献标志码: A

Experimental and Theoretical Study on Vacuum Dewatering of Waste Shield Clay Slurry

GAO Xinjun, WANG Lei, WANG Huijie, LIU Zhongyu, SU Qinghui

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address issues such as slag dumping and limited slag transportation under the action of upper vacuum dewatering, a dewatering method of applying a vacuum load at the bottom of the waste slurry is proposed. A series of model tests were conducted on waste clay

slurry under four different dewatering loading conditions by using a self-developed dewatering device that can apply a vacuum load at the bottom of the waste slurry. The rule of physical quantities such as settlement at the interface between slurry and water, pore water pressure, water content, and the total amount of water discharged after dewatering are analyzed. The results show that the fourth dewatering loading method has the best dewatering performance. After the fourth dewatering loading method was used to dewater the waste clay slurry with an initial water content of 103.00%, the water content distribution range was 37.10%~62.65%, and the minimum internal pore water pressure was -73.09 kPa, which was close to the vacuum value of -80.00 kPa applied at the bottom. In addition, compared with the other three dewatering loading methods, the average settlement was increased by 106.40%, 2.91%, and 6.15%, respectively, and the total amount of dewatered water increased by 122.0%, 8.0%, and 5.1%, respectively. Meanwhile, a numerical calculation model for vacuum dewatering of waste clay slurry is provided based on piecewise-linear finite difference CS2 model. The sedimentation at the slurry-water interface during the dewatering process of waste clay slurry was numerically simulated, and the effectiveness of the numerical calculation model was verified.

Keywords: waste shield clay slurry; dewatering treatment; vacuum load; model test; numerical calculation model

目前在城市轨道交通建设中, 盾构法施工具有自动化程度高、掘进速度快、对地面环境影响小等优点, 但其施工过程中产生的大量废弃泥浆, 严重影响城市环境^[1-2]。对其进行有效的脱水处理, 是减少其在储存或运输过程中对环境污染的关键。

收稿日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(52078469, 41602297, 51578511)

第一作者: 郜新军, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为地下工程和盾构隧道工程。E-mail: gxjun@zzu.edu.cn

通信作者: 王会杰, 博士生, 主要研究方向为地下工程和隧道工程。E-mail: huijiefor@163.com



论文
拓展
介绍

诸多学者对废弃泥浆的脱水进行了研究,杨春英等^[3]、梁东正^[4]分别采用絮凝脱水法、电渗法对桩基工程废弃泥浆脱水效果进行试验研究。刘四进^[5]采用絮凝-带式压滤快速脱水减量技术,实现工程现场泥水盾构泥浆快速脱水的目标。孙晓辉等^[6]进行了絮凝-固化试验,指出絮凝、固化作用可以相互促进,提高泥浆脱水效率。王力等^[7]采用卧式螺旋卸料离心机对灌注桩废弃泥浆分离效果进行了现场试验研究。实际应用面临化学絮凝需要将废弃泥浆与絮凝剂进行充分拌合、电渗脱水方法具有较高的能耗、压滤脱水对设备和场地具有较高的要求等诸多问题。因此,亟需一种方便、高效的施工现场处理废弃泥浆方式。

近年来,诸多学者将真空预压法应用于废弃泥浆脱水处理。武亚军等^[8]将真空预压法与絮凝沉淀法相结合应用于工程废浆的固液分离,发现工程废浆脱水效果显著。魏雁冰等^[9]采用真空预压法对建筑废弃泥浆池进行现场试验,指出气管-滤管结合的真空抽吸排水方法效果最优。金志伟等^[10]指出采用真空-电渗联合泥水分离法可以有效解决隧道盾构泥浆泥水分离问题。Wu等^[11]将传统真空过滤与固化技术相结合应用于顶管废浆处理。桑松龄等^[12]采用絮凝联合真空预压法,研究了盾构泥浆脱水效果。Cui等^[13]提出了絮凝-真空预压-固化剂固化一体化处理钻孔灌注桩废浆的方法。詹良通等^[14]、江文豪^[15]采用底部真空-上部堆载预压技术,研究废弃工程泥浆回填废弃矿坑的处理效果。

现有的真空预压法的真空作用多通过砂垫层和竖向排水板作用于土体深处,但由于盾构施工现场泥浆池中的废弃泥浆需要挖除外运,不具备在泥浆内部及上部施加真空作用的条件。在废弃泥浆池底部施加真空作用进行脱水的方式更容易实施,而对此工艺的相关研究较少。本文针对郑州地区的一种典型的废弃黏土泥浆设计若干组脱水试验,研究不同脱水加载方式下泥-水界面沉降量、孔隙水压力以及脱水后含水率和总脱水量等物理量的变化规律,分析探讨废弃泥浆真空脱水的数值计算模型,为后续废弃黏土泥浆真空脱水设备的设计、制作及工程化应用提供指导。

1 室内模型试验材料及装置

1.1 试验材料

本文采用的废弃黏土泥浆来自郑州某地铁隧道

施工现场,含有大量的膨润土及多种高分子分散剂、稳定剂。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[16]对其基本物理参数进行测定,比重为2.74,含水率为103.00%,液限为44.8%,塑限为24.6%,PH值为7.2,其粒径级配曲线如图1所示。

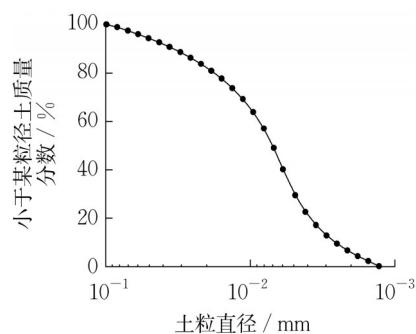
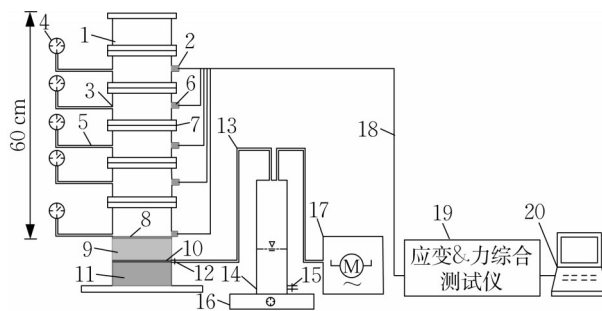


图1 废弃黏土泥浆粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution of waste clay slurry

1.2 模型试验设备的研制

图2所示为自行研制废弃泥浆真空脱水装置。主要由真空泵、模型桶、真空表、集水瓶、电子秤、孔隙水压力测量装置组成。放置泥浆的模型桶主要由1个上筒体4个中筒体和1个下筒体组成,模型桶的高度和直径分别为75 cm和10 cm,在中筒体两侧安装孔压计和真空表,在下筒体一侧设置抽水阀门,并在下筒体内铺设碎石层,将表面带有孔洞的真空管水平放置于碎石层顶面,采用土工布将真空管覆盖,并将砂垫层铺设于土工布之上,在砂垫层上表面铺设滤布和硅胶密封圈组成的反滤层。量测系统包括电子秤、孔压计及其读数仪等。



1. 模型桶;2. 凹槽;3. 快插接头;4. 真空表;5. 内径10 mm PU气管;6. 孔压计;7. 法兰;8. 反滤层;9. 砂垫层;10. 土工布及真空管;11. 碎石层;12. 抽水阀门;13. 内径6 mm PU气管;14. 集水瓶;15. 排水阀门;16. 电子秤;17. 真空泵;18. 数据传输线;19. 应变&力综合测试仪;20. 计算机。

图2 废弃泥浆真空脱水装置

Fig. 2 Waste slurry vacuum dewatering device

1.3 试验方案

对废弃黏土泥浆设置了4种脱水工况,分别为A1(自重)、A2(自重+真空)、A3(自重稳定+真空)、A4(自重稳定+分级真空);泥浆高度均为60 cm。其中A1类比废弃黏土泥浆在自重作用下的脱水效果,待泥-水界面基本不变时该工况试验结束;A2对废弃泥浆底部施加 -80.00 kPa的真空作用;A3首先对废弃泥浆进行自重脱水,待其泥-水界面沉降稳定后,抽取上层清液,然后对废弃泥浆底部施加 -80.00 kPa的真空作用;A4首先对废弃泥浆进行自重脱水处理,后对废弃泥浆底部施加如图3所示的分级真空作用。A2、A3、A4工况当真空作用无法施加于泥浆底部时,试验结束。试验过程中采集不同测点(图4)的泥-水界面的沉降量、孔隙水压力、含水率和总脱水量等数据。

2 废弃黏土泥浆真空脱水试验结果

2.1 泥-水界面沉降量及沉降速率

废弃黏土泥浆在4种脱水工况下,3个测点的泥-水界面沉降量随时间变化的曲线如图5所示。

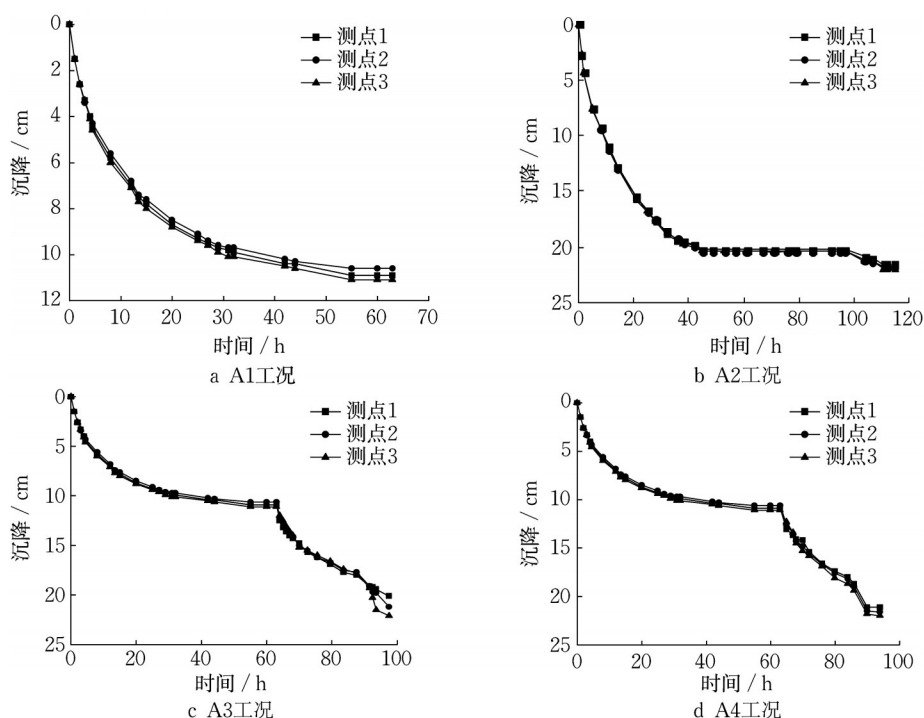


图5 脱水工况泥-水界面沉降曲线

Fig. 5 Sedimentation curve of interface between slurry and water under dewatering condition

A1工况下废弃黏土泥浆的泥-水界面在脱水前期下降较快,主要因为脱水早期颗粒间的絮凝作用而

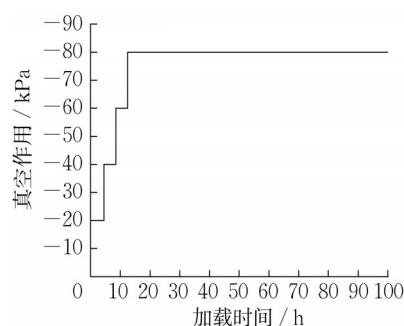


图3 A4脱水工况加载曲线

Fig. 3 Loading curve of A4 dewatering condition

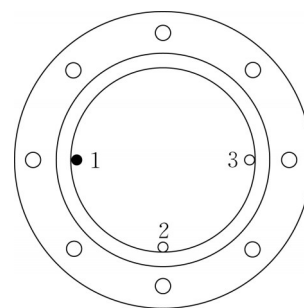


图4 泥-水界面沉降及含水率测点布置

Fig. 4 Sedimentation of mud-water interface and arrangement of moisture content measurement points

形成的“土团”之间发生相互影响而产生群体下沉;8 h时,泥-水界面的沉降速率逐渐放缓,3个测点间差

异沉降逐渐增加,最大差异沉降可达0.4 cm,原因是随着脱水过程的持续,模型桶内壁的润滑油逐渐脱离,导致不同观测点的废弃泥浆所受到的侧壁阻力大小不同。3个观测点的最终沉降量分别为10.9、10.6、11.1 cm。A2工况3个观测点的最终沉降量分别为21.6、21.8、22.0 cm,相较于A1工况,平均最终沉降量提高了99.92%,最终沉降量提高较为显著。同时,在脱水前期,泥-水界面沉降速率相较于同阶段A1工况有较大的提高。A2工况进行至97 h时,泥-水界面上部清液完全消失,3个观测点的沉降速率也有所提高,分析原因为废弃黏土泥浆在底部真空作用下,其内部自由水逐渐排出的同时,泥浆结构也在真空的作用下开始逐渐破坏,发生沉降变形。此时,开始在废弃黏土泥浆内部出现一系列裂缝。随着内部裂缝的扩展,不同位置的裂缝开始逐渐连通,废弃黏土泥浆的密封作用失效,本工况试验结束。

A3工况待自重沉降基本稳定后,在废弃泥浆底部施加-80.00 kPa真空作用,废弃黏土泥浆将继续发生沉降。相较于A2,相同真空加载时间,沉降量略小,这是由于废弃黏土泥浆经过自重脱水处理后,其

内部的自由水已大量排出,相较于处于初始状态的废弃黏土泥浆具有更小的压缩性。随着底部真空作用时间的增加,不同观测点间的差异沉降逐渐增大。3个观测点的最终沉降量分别为20.1、21.2、22.1 cm,相较于A1工况,平均最终沉降量提高了94.50%。A4工况泥-水界面沉降曲线变化规律与A3工况基本相同,在真空荷载加载前期,因真空值小于A3工况,3个观测点的沉降量数值略小于A3工况,但是在施加最后一级真空荷载(-80.00 kPa)后,3个观测点的沉降量在数值上要大于同时刻A3工况下对应观测点的沉降量,直至本组脱水试验结束,3个观测点的最终沉降量分别为22.4、22.2、22.7 cm,相较于A1、A2、A3工况,平均最终沉降量分别提高了106.40%、2.91%、6.15%。

2.2 孔隙水压力

在废弃黏土泥浆脱水过程中,以废弃泥浆底部的反滤层作为基准面(0 cm)分析孔隙水压力变化规律(下同)。废弃黏土泥浆在4种工况下,不同高度孔隙水压力随时间变化的曲线如图6所示。

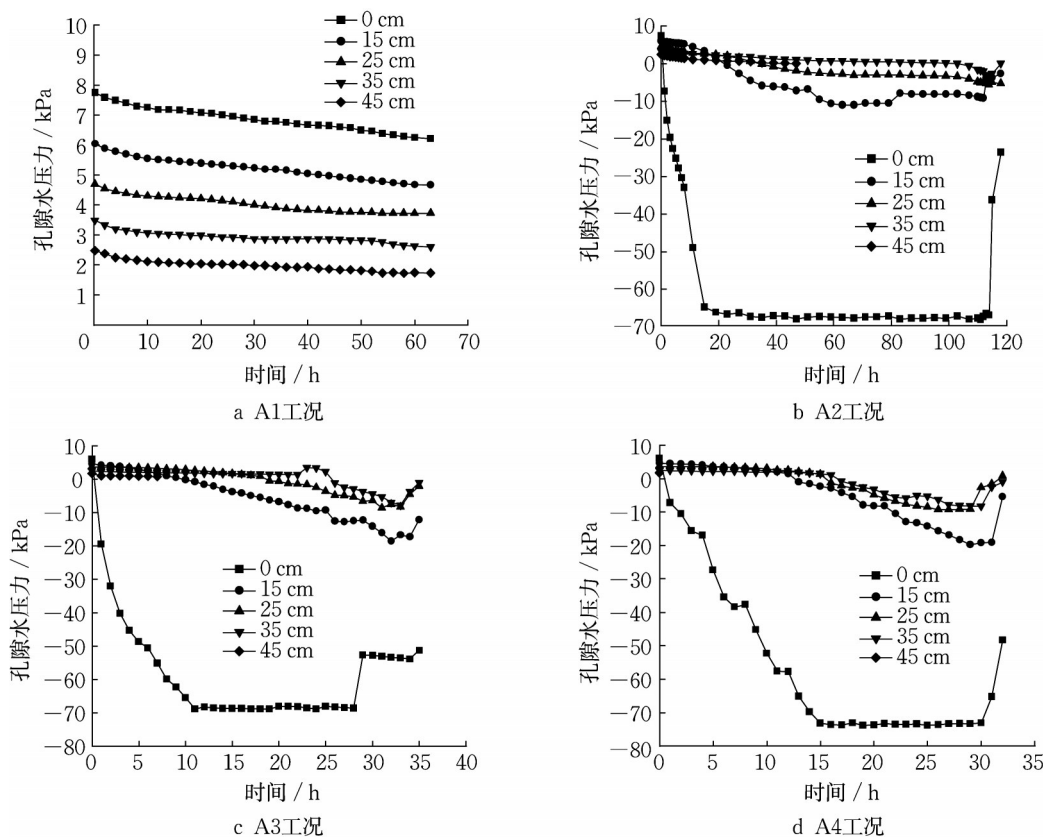


图6 脱水工况孔隙水压力变化曲线

Fig. 6 Variation of pore water pressure under dewatering condition

A1工况下,不同高度的孔隙水压力随脱水时间的增加而不断衰减。由A2工况下孔隙水压力随时间变化的曲线可知,0 cm高度的孔隙水压力衰减最为迅速,15、25、35 cm高度的孔隙水压力衰减量大幅减小,这是由于该位置距离真空源较远,并且黏土渗透性较小,不利于真空作用的向上传递。真空作用施加后期,不同高度处孔隙水压力又开始逐渐增大,这是因为废弃泥浆内部出现了诸多裂缝,对废弃泥浆的密封作用产生了影响。在45 cm高度处,随着自由水的逐渐排出,该处孔压计逐渐浸入上层清液之中,此时孔隙水压力为静水压力,随着上部清液逐渐向下渗出,孔压计逐渐露出液面,此时该孔压计数值失真。

A3工况下孔隙水压力随时间的变化趋势与工况A2相近,但相较于A2工况,同高度处孔隙水压力衰减效率更快。A3工况加载至11 h时,0 cm高度的孔隙水压力衰减至最小值 -68.97 kPa,而A2工况0 cm高度的孔隙水压力需31 h才能衰减至 -67.16 kPa。由此可知,经过自重作用进行初步脱水的废弃

黏土泥浆可以增加真空作用在废弃黏土泥浆中的传递效率,A3工况相较于A2工况更有利于真空作用的传递。

A3、A4工况相比,在真空荷载作用时间相同的时刻,A4工况分级加载前期,同一位置高度处的孔隙水压力均大于A3工况,但A4工况在施加最后一级真空作用后,同一位置高度处的孔隙水压力均小于A3工况,这是由于A4工况采用分级真空的加载方式,降低了废弃黏土泥浆中的细颗粒在反滤层附近淤积的可能性,延缓了试验模型底部致密土层的形成,更加有利于真空作用的向上传递。且A4工况底部的孔隙水压力值比A3工况减小6.9%,可达到 -73.09 kPa,接近底部真空作用值 -80.00 kPa,说明A4工况可以有效缓解废弃黏土泥浆底部反滤层的淤堵问题。

2.3 含水率

废弃黏土泥浆在4种工况下脱水处理后,不同观测点处含水率随高度变化曲线如图7所示。

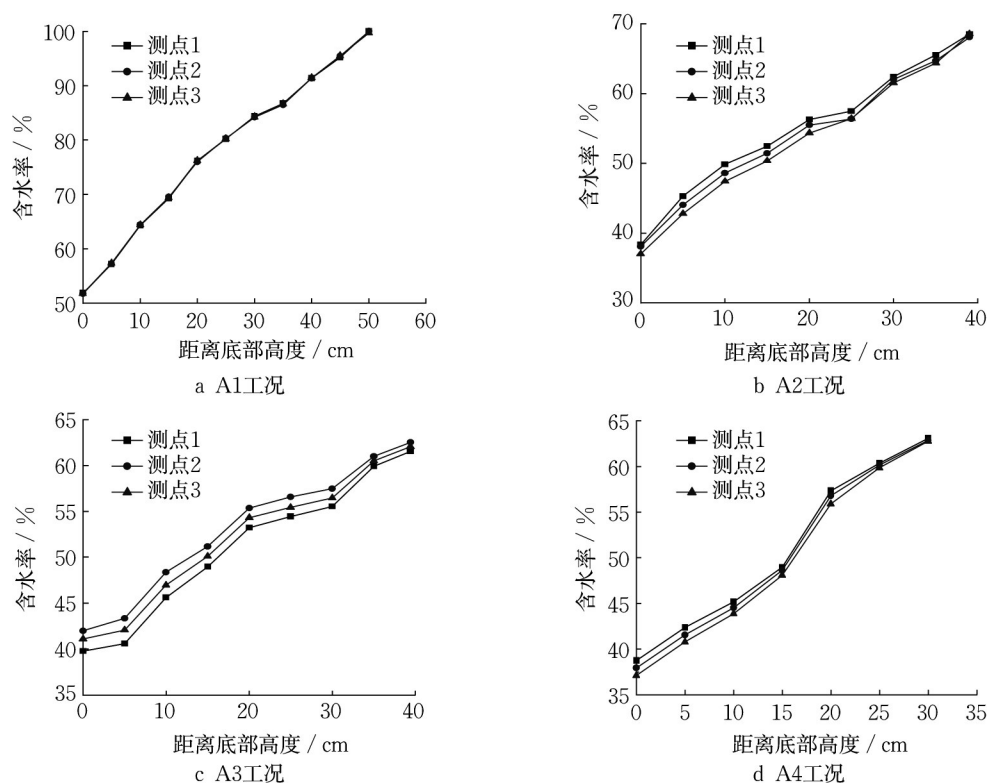


图7 脱水工况含水率分布

Fig. 7 Water content distribution under dewatering condition

从含水率分布曲线上看,废弃黏土泥浆经4种工况处理后,不同测点含水率基本随高度呈线性增加趋势。A1工况下,0 cm高度3个观测点的含水率分别为51.86%、51.75%、51.82%,顶部含水率稳定

于100.00%左右,废弃黏土泥浆含水率为51.75%~100.00%,整体含水率较高。A2工况下,0 cm高度3个观测点的含水率分别为37.39%、37.11%、36.73%,相较于A1工况平均含水率下降

了28.40%,经过本工况处理后的废弃黏土泥浆其含水率分布范围为37.11%~68.53%,含水率数值区间相较于A1工况有了较大程度的缩小。废弃黏土泥浆经A3、A4工况处理后含水率分别介于39.78%~62.51%、37.1%~62.65%之间,0 cm高度的平均含水率相较于A1工况分别减少了20.90%、26.80%,顶部平均含水率相较于A1工况分别减少了37.98%、37.52%,均能显著减少泥浆含水率。

从含水率分布可以看出,A2、A3、A4工况处理后,在废弃泥浆靠近底部的位置,各工况下同一位置高度处3个测点的含水率差异较大,分析原因是脱水过程后期,废弃黏土泥浆内部出现一系列裂缝,不同区域的裂缝发展程度不同,影响含水率的大小。同时也可以看出随着废弃黏土泥浆高度的增加,各工况下同一位置高度处3个测点的含水率差异逐渐减小,顶部3个观测点的含水率差异显著减少,这是由于废弃黏土泥浆顶面在脱水过程中直接与空气接触,在水分的蒸发作用下,造成不同测点间含水率差异减少。

2.4 脱水量

对废弃泥浆在不同工况下的脱水量进行定义。A1工况脱水量为泥-水界面之上的清液质量;A2工况脱水量为集水瓶中清液的质量;A3、A4工况脱水量为废弃泥浆自重稳定后所抽取上层清液质量与集水瓶中清液质量之和(上层清液的密度按照 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 计算)。

图8给出了废弃黏土泥浆在4种不同脱水工况下脱水量随时间变化曲线。废弃泥浆在A1工况下,脱水量随着脱水时间的增加而逐渐增加。初期,脱水量增长迅速,随着脱水时间的增加,脱水量增长逐渐趋于平缓。A1工况的最终脱水量为855.33 g。A2工况下,废弃黏土泥浆在初始阶段具有较快的脱水速率,之后脱水速率稍有减慢,直至脱水过程结束脱水速率基本保持不变,最终脱水量为1755.00 g,相较于A1工况增加了105.18%。A3、A4工况下的脱水曲线均可分为两个阶段。第一阶段为废弃黏土泥浆在自重脱水过程中的出水量随时间变化曲线,本阶段与工况A1相似;第二阶段为废弃黏土泥浆底部施加真空作用时出水量随时间变化曲线。A3工况最终出水量大于A2工况,达到1804.50 g,相较于A1工况增加了110.97%。A3工况初期存在自重脱水过程,造成土粒在竖直方向存在颗粒的分选,即废弃黏土泥浆中的大颗粒主要集中于模型的底部,相

较于A2工况,A3工况更有利于后期真空作用的向上传递。此外,A2工况虽然前期脱水速率较快,但由于脱水初期对废弃泥浆底部施加了数值较大的真空作用,使内部大量细颗粒在底部真空作用下不断向下迁移,导致后期底部反滤层淤堵,同时也导致模型底部区域的泥浆快速失水,形成致密的泥层,进而影响了A2工况后期脱水速率。

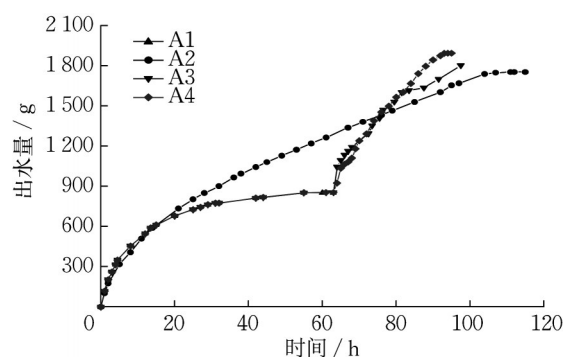


图8 脱水量变化曲线

Fig. 8 Variation of dewatering rate

A4工况最终出水量大于上述所有脱水工况,达到1896.00 g,相较于A1、A2、A3工况,最终出水量分别提高了122.0%、8.0%、5.1%。其主要原因是由于A4工况采用分级加载的方式对废弃黏土泥浆底部进行加载,由于在加载初始阶段所施加的真空作用数值较小,从而降低了废弃黏土泥浆中的细颗粒在反滤层附近淤积的可能性,进而延缓了试验模型底部致密土层的形成,故在加载后期对废弃黏土泥浆的脱水过程起到了一定程度的促进作用;同时由于A4工况在施加真空作用之前,泥浆经历了自重脱水过程,废弃泥浆中的大颗粒主要沉积于模型底部,进而导致模型底部相较于其他工况存在更加丰富的孔隙系统,进一步加速了废弃泥浆在A4工况下的脱水进程。

3 废弃泥浆脱水数值模型

3.1 脱水模型

废弃泥浆脱水数值模型基于分段线性化思想(CS2)模型建立^[17]。但CS2数值计算模型的计算目标主要为土体在外荷载作用下的固结,而废弃泥浆的脱水过程类似于土的一维固结,故本文中的废弃泥浆脱水数值模型主要用于废弃泥浆在不同脱水工况下脱水过程的计算分析。

在 $t=0$ 时刻,废弃泥浆的初始状态如图9a所

示,废弃泥浆的初始高度为 H_0 ,废弃泥浆中水位高度为 H_w ,初始孔隙比为 e_0 ;竖向坐标 z 以废弃泥浆底面(即固定的基准面)为坐标零点且竖直向上为坐标的正方向。将废弃泥浆竖向划分为 R_j 个单元,每个单元具有相同的截面面积和初始厚度 L_0 ,单元为 j 的节点所对应的节点高度为单元中心坐标 $z_{0,j}$ 。废弃泥浆在脱水过程中,每个单元的节点都始终位于单元中心。经过脱水时间 t 之后(如图9b),废弃泥浆的高度为 H_t ,且各单元的厚度及高度均随着废弃泥浆的排水过程而变化,当静水位下降至泥-水界面以下时,可假定水位高度与废弃泥浆的高度相同。

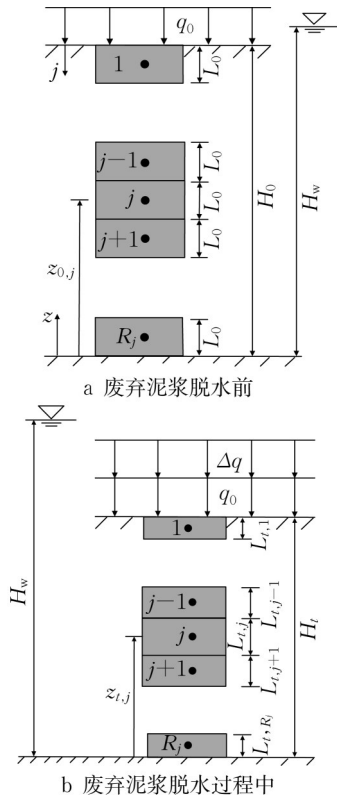


图9 废弃泥浆脱水前后的几何形态

Fig. 9 Geometry of waste slurry before and after dewatering

在废弃泥浆脱水模型中,废弃泥浆的压缩特性可以由孔隙比 e 与有效应力 σ' 采用 $e-\lg \sigma'$ 曲线来反映;同理,废弃泥浆的渗透性也可由孔隙比 e 与渗透系数 k 采用 $e-\lg k$ 曲线来反映^[18]。通过试验数据点拟合可以得到废弃黏土泥浆的初始孔隙比 e_0 为2.82、初始渗透系数 k_0 为 $3.2 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、初始有效应力 σ_0 为0.04 kPa、压缩指数 C_c 为0.45、 $e-\lg k$ 曲线斜率 C_k 为0.46。

3.2 沉降量

由于废弃泥浆脱水模型与CS2模型计算原理基本相同,故其渗流与沉降量的计算推导过程与CS2模型类似^[17]。但在本文脱水工况中,在废弃泥浆底部施加真空作用,其边界条件不同。

在本文试验工况中,废弃泥浆的上边界始终为透水边界,则上边界的边界条件表达式为

$$v_{t,rf,0} = -k_{t,R_j} \frac{H_w - h_{t,R_j}}{H_t - Z_{t,R_j}} \quad (1)$$

式中: $v_{t,rf,0}$ 为废弃泥浆顶部边界的渗流速度; k_{t,R_j} 为 t 时刻废弃泥浆底部单元的渗透系数; h_{t,R_j} 为 t 时刻废弃泥浆底部单元的总水头; Z_{t,R_j} 为 t 时刻废弃泥浆底部单元的节点高度。

废弃泥浆在自重脱水过程中,其底部为不透水边界,废弃泥浆底部水力坡降 i_b 为0,此时,废弃泥浆底部边界的渗流速度 $v_{t,rf,R_j} = 0$;根据试验工况,当废弃泥浆底部施加真空作用时,其底部的边界条件为

$$v_{t,rf,R_j} = -k_{t,R_j} \frac{H_w - p_t - h_{t,R_j}}{H_t - Z_{t,R_j}} \quad (2)$$

式中: p_t 为 t 时刻废弃泥浆底部所施加的真空作用。

废弃泥浆经过时间增量 Δt 后,任意单元 j 的厚度为

$$L_{t+\Delta t,j} = L_{t,j} - (v_{t,rf,j} - v_{t,rf,j+1}) \Delta t, j = 1, 2, \dots, R_j \quad (3)$$

式中: $v_{t,rf,j}$ 、 $v_{t,rf,j+1}$ 为 t 时刻相邻单元 $j-1$ 、 $j+1$ 之间的相对渗流速度。

此时,废弃泥浆的沉降量的计算公式为

$$H_{t+\Delta t} = \sum_{j=1}^{R_j} L_{t+\Delta t,j}, j = 1, 2, \dots, R_j \quad (4)$$

$$S_{t+\Delta t} = \frac{S_t}{H_0} = 1 - H_{t+\Delta t} \quad (5)$$

3.3 泥-水界面实测沉降曲线与模拟曲线对比

根据以上废弃黏土泥浆自重脱水模型和真空脱水模型对废弃黏土泥浆脱水过程进行模拟,各种脱水工况下泥-水界面实测沉降曲线与模拟曲线结果如图10所示。

由图10可知,数值模拟与试验观测结果较为一致,证明了模型的可靠性。产生误差的主要原因为:在废弃黏土泥浆脱水试验过程中,试验模型侧壁对废弃黏土泥浆存在摩擦力;同时,在试验后期,废弃泥浆的结构在真空作用下逐渐被破坏,而在数值模拟过程当中无法考虑由于废弃泥浆内部结构破坏对沉降造成的影响。

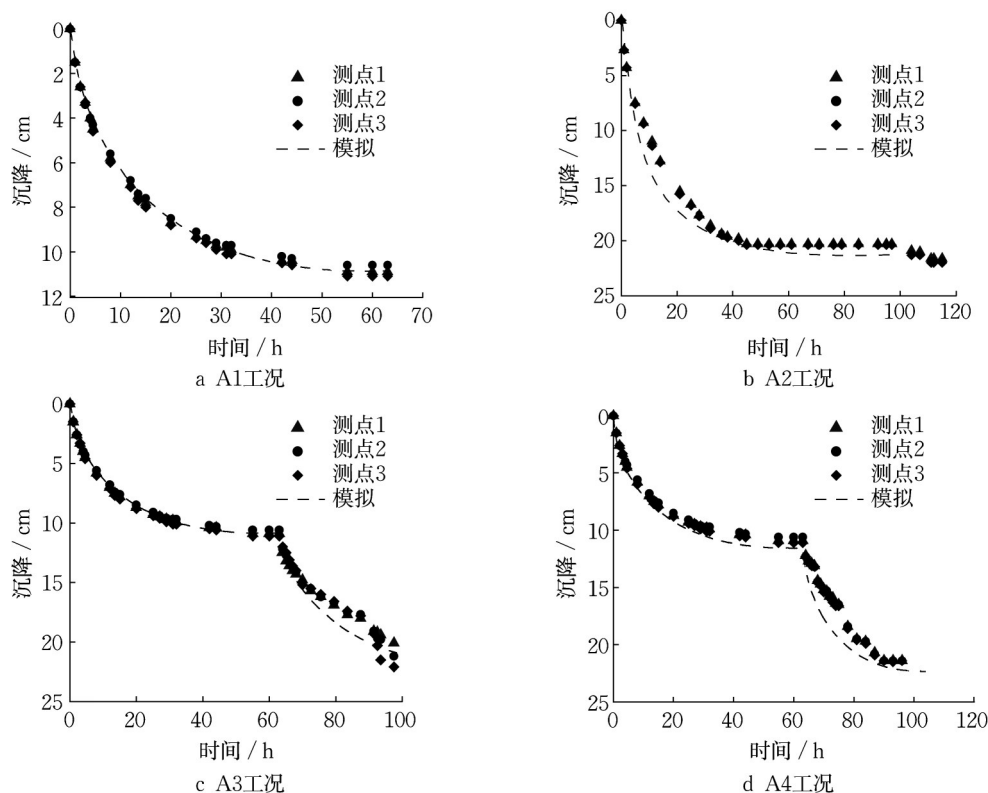


图10 脱水工况实测沉降曲线与模拟曲线对比

Fig. 10 Comparison of measured settlement curve and simulated curve under dewatering condition

4 结论

(1)废弃黏土泥浆在自重、自重+底部真空荷载、自重稳定+底部真空荷载、自重稳定+底部分级真空荷载4种脱水工况下的试验结果表明,盾构废弃黏土泥浆首先自重脱水稳定并抽取泥浆上部清液后,再对其底部分级施加真空作用的脱水方式更有利于自由水的排出和真空作用的传递。

(2)采用上述更有利于自由水排出和真空作用传递的加载方式对初始含水率为103.00%的废弃黏土泥浆进行脱水处理后,废弃黏土泥浆的含水率分布范围为37.10%~62.65%,其内部孔隙水压力的最小值可达-73.09 kPa,接近底部真空作用值-80.00 kPa。且该工况相较于其他3种工况,平均沉降量分别提高了106.40%、2.91%、6.15%;总脱水量分别提高了122.0%、8.0%、5.1%。

(3)基于分段线性化的思想建立了废弃黏土泥浆真空脱水数值计算模型,并对废弃泥浆在不同工况下沉降量变化进行数值模拟,结果表明数值模拟结果与实测值整体具有较好的拟合度,证明了数值计算模型的有效性。

作者贡献声明:

邵新军:提供论文选题,设计论文框架,论文撰写、审阅及修订。

王 磊:试验实施,数据分析,数值计算。

王会杰:研究方法,数据分析,论文撰写及修订。

刘忠玉:研究方法,参与研究选题,对论文提供指导。

苏庆辉:协助试验,参与研究选题,对论文提供指导。

参考文献:

- [1] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J]. 隧道建设, 2020, 40(8): 1101.
GUO Weishe, WANG Baiquan, LI Yanzong, *et al.* Status quo and prospect of harmless disposal and reclamation of shield muck in China[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1101.
- [2] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 盾构隧道渣土与泥浆的分类与处理利用技术及主要问题[J]. 隧道建设, 2021, 41(S2): 1.
ZHU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, *et al.* Classification, treatment, and utilization techniques of shield tunnel abandoned soil and related issues [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (S2): 1.
- [3] 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.
YANG Chunying, XU Wei, BAI Chenguang. The mud flocculation dehydration test and mechanism analysis [J].

- Environmental Science and Technology, 2013, 26(5): 15.
- [4] 梁东正. 泥浆电渗脱水的室内模型试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- LIANG Dongzheng. Indoor model test study of electroosmotic dewatering mud[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [5] 刘四进. 絮凝-带式压滤技术在泥水盾构隧道泥浆处理中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2019(6): 118.
- LIU Sijin. Application of flocculation belt filtering technology in treatment of slurry shield tunnel waste material [J]. Railway Construction Technology, 2019(6): 118.
- [6] 孙晓辉, 郭柯雨, 姬凤玲, 等. 盾构泥浆絮凝-固化联合作用试验研究及宏观探析[J]. 隧道建设, 2022, 42(4): 602.
- SUN Xiaohui, GUO Keyu, JI Fengling, *et al.* Macro- and micro-coupling effect of flocculation-solidification of waste shield slurry[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 602.
- [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.
- WANG Li, SUN Weiming, XIE Linjun, *et al.* Study of separation test on pile mud by using decanter centrifuge [J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 20.
- [8] 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.
- WU Yajun, LU Yitian, 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.
- [9] 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.
- WEI Yanbing, FAN Mingqiao, LIN Shengfa, *et al.* Experimental study on construction waste slurry treatment by vacuum preloading [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(1): 65.
- [10] 金志伟, 阎长虹, 李良伟, 等. 低含水率盾构泥浆的真空-电渗联合泥水分离技术试验研究[J]. 水文地质与工程地质, 2020, 47(1): 103.
- JIN Zhiwei, YAN Changhong, LI Liangwei, *et al.* An experimental study of vacuum negative pressure incorporated with electro-osmosis in mud-water dehydration for shield slurry with low water content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 103.
- [11] WU Silin, LI Xiaodao, JIANG Pengming, *et al.* Dewatering characteristics of waste slurry from pipe jacking based on improved vacuum filtration method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130, 104727.
- [12] 桑松龄, 张晨光, 陈敬轩, 等. 絮凝剂对盾构泥浆真空预压效果影响研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(4): 444.
- SANG Songling, ZHANG Chenguang, CHEN Jingxuan, *et al.* Study on effect of flocculant on vacuum preloading of shield mud [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(4): 444.
- [13] CUI Yunliang, PAN Fangran, ZHANG Bingbing, *et al.* Laboratory test of waste mud treated by the flocculation-vacuum-curing integrated method [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127086.
- [14] 詹良通, 张斌, 郭晓刚, 等. 废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 41(10): 3245.
- ZHAN Liangtong, ZHANG Bin, GUO Xiaogang, *et al.* Physical modeling study on treatment of waste slurry with vacuum preloading at bottom combined with upper surcharge loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 41(10): 3245.
- [15] 江文豪. 自重及底部真空作用下工程泥浆的大变形固结特性及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- JIANG Wenhao. Large deformation consolidation characteristics and application of construction waste slurry under self-weight and vacuum preloading at bottom [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123—2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] FOX P J, BERLES J D. CS2: a piecewise-liner model for large strain consolidation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21 (7): 453.
- [18] 江辉煌, 刘国楠, 赵有明. Gibson一维固结方程的一种求解方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 745.
- JIANG Huihuang, LIU Guonan, ZHAO Youpeng. A solution of Gibson's governing equation of one-dimensional consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 745.