

化学絮凝与消泡材料对盾构渣土渗流性能的作用机理

陈 庆^{1,2}, 陈沈旻^{1,2}, 阳 栋³, 官林星⁴

(1. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南长沙 410004; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:为促进盾构渣土的资源化利用,针对土压平衡盾构渣土成分复杂、含水率高且渗透性差等问题,结合渗透试验、压汞测试和计算机断层扫描(CT)等方法,分析盾构渣土的多尺度渗流特征,探究掺入絮凝剂阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)和消泡剂有机硅氧烷对渣土渗流性能的影响和作用机理。结果表明:原状盾构渣土的水分渗流受土体内泡沫的影响,渗透系数最终稳定在 $7.72 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,土体孔隙率高且孔径小贯通性差。絮凝剂的掺入可以改善盾构渣土的渗流性能,这是因为CPAM的吸附架桥和电中和作用,但掺量过大则会抑制渗流;该试验中CPAM的最佳掺量为0.30%,渗透系数最高可达 $2.55 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。消泡剂有机硅氧烷的掺量越高,盾构渣土的渗透系数越大,消泡剂可以快速消破土体内部泡沫并提高渗流通道的连通性;本试验的最佳掺量为0.20%,渗透系数可达 $1.31 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 盾构渣土; 渗流; 絮凝剂; 消泡剂

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Mechanisms of Chemical Flocculation and Defoaming Materials on Seepage Characteristics of Shield Tunneling Residue

CHEN Qing^{1,2}, CHEN Shenyi^{1,2}, YANG Dong³, GUAN Linxing⁴

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Fifth Engineering Division Co., Ltd., China Construction, Changsha 410004, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: To promote the resource utilization of shield tunneling residue, this paper focuses on the complex

composition, high moisture content, and poor permeability of earth pressure balance (EPB) shield tunneling residue. In combination with penetration test, mercury injection test, and computed tomography (CT), the multi-scale seepage characteristics of shield tunneling residue were analyzed, and the effect and mechanism of flocculant cationic polyacrylamide (CPAM) and defoamer organosiloxane on the permeability of the residue were investigated. The results show that the permeability of shield tunneling residue is affected by the foam in residue, and the permeability coefficient is finally stable around $7.72 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. The residue has a high porosity, small pore size, and poor penetration. The addition of CPAM can improve the permeability of the residue due to the adsorption bridging and electric neutralization effects. However, excessive flocculant will inhibit the seepage. The optimal dosage of CPAM in this experiment is 0.30%, and the maximum permeability coefficient can reach $2.55 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. As the content of organosiloxane defoamer increases, the permeability coefficient of the residue increases, which can quickly eliminate the foam and improve the connectivity of seepage channel. The optimal dosage for this experiment is 0.20%, and the permeability coefficient can reach $1.31 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Keywords: shield tunneling residue; seepage; flocculant; defoamer

过去几十年间,中国轨道交通建设取得了飞速发展。目前,采用土压平衡盾构法是适用于我国内陆城市软土地层地铁隧道施工的主要方法^[1]。在盾构工程中为确保施工的顺利掘进,往往会在刀盘和土仓中加入泡沫剂、分散剂等改良渣土,导致盾构渣

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3803104); 国家自然科学基金(52078381, 51878496, 52122808, 51878480, 52078369, U22B2076, 51878481)。

第一作者: 陈 庆, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程材料。E-mail: 13585546170@163.com



论文
拓展
介绍

土具有含水量高且渗透性差的特点^[2]。然而这些未经处理的盾构渣土会引发诸如占用耕地、土壤水体污染、滑坡事故等环境问题和安全隐患^[3],严重制约了城市建设的可持续发展。因此,盾构渣土的渗流特征和作用机理将关系到其脱水处理效果,对盾构渣土的资源化利用具有重要意义。

通常学者们以宏观的渗透系数表征土壤的渗流性能^[4-5],而很少聚焦微观结构特性。孔隙作为软土的重要组成部分,其结构特点与土体内部的渗流通道密切相关,是研究盾构渣土渗流特征的重要维度。随着科学技术的进步,有学者开始尝试使用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、计算机断层扫描(CT)、汞孔隙率法(mercury intrusion porosimetry, MIP)等手段分析土体内孔隙特征,研究水分在土壤中的运移情况,建立微观与宏观之间的关系^[6-8]。

化学调质可以改变土体的渗流性能,进而提高土样的脱水效果,是一种较为高效经济的方法。Turchiuli等^[9]研究了明矾和铁絮凝剂结构特性对污泥渗透脱水性能的影响。丁光亚等^[10]对比阳离子型PAM、阴离子型PAM和非离子型PAM对废泥浆的渗透效果的影响,试验表明使用CPAM用量少且絮凝效果明显。有机硅消泡剂则被广泛应用于水处理、淤泥处理、纺织印染等行业,其化学性能稳定且环境污染小^[11]。但对于化学调质作用机理的研究较少,缺乏相关精细表征。

目前,土壤的渗流特征研究主要针对软土地层路基土、疏浚淤泥以及工程勘探、灌注桩施工过程中的废泥浆等^[12-13]。由于土压平衡盾构渣土在实际工程中掺加了泡沫剂等改良剂,导致土样渗透性差且成分和结构复杂,因而鲜有关于土压平衡盾构渣土渗流性能的研究和改善工作。本文从渗透系数、压汞测试和CT扫描多尺度研究原状盾构渣土的渗流特征,并分别采用絮凝剂阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)和消泡剂有机硅氧烷对重塑盾构渣土进行处理,研究不同试剂对土压平衡盾构渣土渗透性能的影响和作用机理,为实现渣土高效脱水和工程应用提供理论参考。

1 试验研究

1.1 试验材料

试验选用的土压平衡盾构渣土取自长沙市轨道交通1号线北延一期工程芙蓉北路段,取样地层为全风化板岩地层,属于粉质黏土。原状土样的天然

含水率、重度、液塑限等基本物理性能测试参数见表1。通过X射线衍射仪测试其矿物成分,分析结果见表2。

表1 土压平衡盾构渣土的基本物理性能参数

Tab. 1 Physical performance parameters of EPB shield tunneling residues

| 天然含水率/% | 重度 | 塑限/% | 液限/% | 塑性指数 |
|---------|-------|------|------|------|
| 42.2 | 2.765 | 21.3 | 36.2 | 14.9 |

表2 土压平衡盾构渣土的矿物成分

Tab. 2 Mineral composition of EPB shield tunneling residues

| 成分 | 化学式 | 质量分数/% |
|-----|--|--------|
| 白云母 | $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ | 39.9 |
| 石英 | SiO_2 | 37.9 |
| 高岭石 | $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 7.9 |
| 硬石膏 | CaSO_4 | 10.4 |
| 钠长石 | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 3.9 |

试验选用的泡沫剂取自施工现场,用以重塑工程中的盾构渣土。常温下为白色粉末状固体,易溶于水且呈无色透明溶液。使用时配制浓度3%的泡沫剂溶液,采用搅拌法($3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)对泡沫剂溶液进行发泡。

试验选用絮凝剂为阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM),由天津市致远化学试剂有限公司生产,常温下为白色晶体,pH值为5.0~7.0,相对分子质量为1 200万,水溶液粘度为80~120。试验选用消泡剂主要成分为有机硅氧烷,由济南兴飞隆化工有限公司生产,常温下为白色固体,易在水体系中分散溶解,pH值为6.0~8.0。

1.2 试验装置

渗透试验采用自制的常水头渗透试验装置,结构示意图如图1所示。该装置主要由储水箱、渗透仪(图2)和排水量筒三部分组成。其中,土样高度控制为4 cm,水头高度为120 cm,断面积 19.635 cm^2 。

1.3 试验方法

1.3.1 渗透试验

采用1.2中的试验装置开展室内常水头渗透试验,土的渗透系数的测量原理基于达西定律,渗透系数计算公式如下:

$$K = \frac{QL}{A\Delta Ht} \quad (1)$$

式中: K 为试样的渗透系数, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; Q 为渗透达到稳定后 t 时间段内的渗水量, cm^3 ; L 为渗径, cm ,即试样高度; A 为试样的断面积, cm^2 ; ΔH 为试样上下游的水头差, cm ; t 为渗透时间, s 。

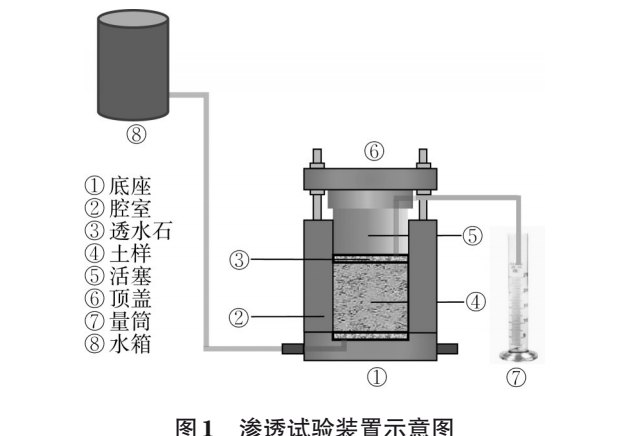


图1 渗透试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of penetration test device



图2 渗透仪实物图

Fig. 2 Physical image of penetrometer

试验分别研究原状土压平衡盾构渣土的渗透系数,以及掺加絮凝剂CPAM和消泡剂有机硅氧烷对重塑盾构渣土渗透系数的影响,试验方案设计如表3所示。其中,重塑土是将原状盾构渣土于105℃烘箱恒温烘干至恒重,经破碎过筛后,制备初始含水率为32.5%的重塑土样,密封静置8h以上,待土样均质稳定后加入泡沫,为避免消泡应尽快制样并开始测试。通过查阅文献^[14]以及前期对比试验,确定最贴近原状盾构渣土渗透系数的泡沫注入量(FIR),FIR为10%,以模拟实际工程中的土压平衡盾构渣土。

1.3.2 泡沫性能试验

本试验通过测试不同絮凝剂和消泡剂掺量下泡沫的发泡倍率和半衰期,评价其对泡沫膨胀性和稳定性的影响,试验方案设计如表4所示。

(1) 泡沫发泡倍率测试

泡沫的发泡倍率(foam expansion ratio)是指单位体积泡沫剂溶液所生成泡沫体积与发泡剂溶液体积的比值,可反映泡沫的膨胀性。测试时配制浓度3%的泡沫剂溶液100 mL,通过搅拌法对泡沫剂溶

| 表3 渗透试验方案设计 | | | | |
|-----------------------------------|-----|---------|--------|---------|
| Tab. 3 Scheme of penetration test | | | | |
| 序号 | 土样 | 泡沫注入量/% | CPAM/% | 有机硅氧烷/% |
| A0 | 原状土 | 0 | 0 | 0 |
| A1 | 重塑土 | 10 | 0 | 0 |
| B1 | 重塑土 | 10 | 0.05 | 0 |
| B2 | 重塑土 | 10 | 0.15 | 0 |
| B3 | 重塑土 | 10 | 0.30 | 0 |
| B4 | 重塑土 | 10 | 0.50 | 0 |
| C1 | 重塑土 | 10 | 0 | 0.05 |
| C2 | 重塑土 | 10 | 0 | 0.10 |
| C3 | 重塑土 | 10 | 0 | 0.20 |
| C4 | 重塑土 | 10 | 0 | 0.30 |

| 表4 泡沫性能试验方案设计 | | | | |
|--|-----------|------------|----------|-----------|
| Tab. 4 Scheme of foam performance test | | | | |
| 序号 | 泡沫剂浓度 / % | 发泡液体积 / mL | CPAM / % | 有机硅氧烷 / % |
| P0 | 3 | 100 | 0 | 0 |
| P1 | 3 | 100 | 0.05 | 0 |
| P2 | 3 | 100 | 0.15 | 0 |
| P3 | 3 | 100 | 0.30 | 0 |
| P4 | 3 | 100 | 0.50 | 0 |
| P5 | 3 | 100 | 0 | 0.05 |
| P6 | 3 | 100 | 0 | 0.10 |
| P7 | 3 | 100 | 0 | 0.20 |
| P8 | 3 | 100 | 0 | 0.30 |

液进行发泡,搅拌速率3 000 r·min⁻¹,搅拌时间为60 s,将发泡的泡沫倒入量筒并测量体积,通过式(2)计算发泡倍率 R_{FE} :

$$R_{FE} = \frac{V_L}{V_T} \tag{2}$$

式中: R_{FE} 为发泡倍率; V_L 为所发泡沫体积,mL; V_T 为泡沫剂溶液体积,mL。

(2) 泡沫半衰期测试

泡沫的半衰期是指泡沫在消破后形成的液体体积为原发泡溶液体积一半时的所用时间,可反映泡沫消散的难易程度即泡沫的稳定性。测试时采用(1)中的方法发泡,将发泡的泡沫快速倒入量筒并同时开启秒表,观察泡沫体积和量筒底部泡沫排出液体体积,当排出液体体积为原发泡溶液体积一半时,记录该时间,即为泡沫的半衰期。

1.3.3 微观试验

(1) 试样制备

采用液氮对土样进行快速冷冻,使土样内的液态水变为非结晶态冰。然后置于真空冷冻式干燥机(图3)中抽真空冷冻干燥24 h,冷阱温度-75℃,使非结晶态冰升华排出。处理后的干燥土样如图4所示,真空冷冻干燥法可使土样的形貌和孔隙结构几乎不受改变。



图3 台式真空冷冻式干燥机
Fig. 3 Desktop vacuum freezing dryer



图4 冻干土样
Fig. 4 Freeze-dried soil sample

(2) CT扫描测试

本试验研究原状盾构渣土的孔隙结构和渗流特征,采用由德国通用电气公司生产的三维X射线检测系统 Nano CT,扫描土样为冻干的原状盾构渣土(图4),样品尺寸为约35 mm×35 mm×25 mm的长方体。土样置于X射线扫描平台上,逐层扫描后得到二维断层切片图像581张,图片格式为tif格式,分辨率为45 μm。

(3) 压汞测试

压汞测试基于瓦什伯恩(Washburn)方程,可反映大部分材料的孔隙结构状况。在压汞过程中,施加的外部压力越大,汞可以进入的孔隙越小,通过传感器将产生的电信号传输至计算机中进行处理,其中孔隙率通过式(3)计算。试验采用压汞仪型号为康塔poremaster 33,孔径测量范围7~200 000 nm,压力范围0~206 MPa。取体积小于1.2 cm³的冻干土样,除去表面浮土后置于样品管(图5),进行压汞测试。

$$n = \left(\frac{V_1}{V_2} + \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: n 为孔隙率; V_1 为注汞的总体积,cm³; V_2 为注汞稳定后的体积,cm³; V_3 为最大注汞压力对应的进汞体积,cm³。

(4) 扫描电子显微测试

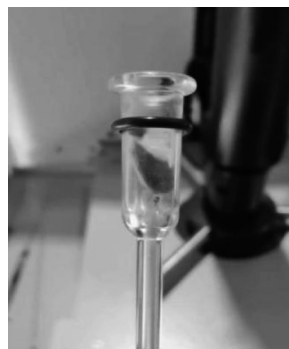


图5 样品管
Fig. 5 Sample tube

仪器型号为蔡司Sigma 300,取少量冻干土样粘至导电胶上,并使用Quorum SC7620 溅射镀膜仪喷金90 s,随后使用扫描电子显微镜拍摄样品形貌,形貌拍摄时加速电压为3 kV,放大倍数为1 000。

2 试验结果与分析

2.1 原状盾构渣土渗流特征

2.1.1 原状盾构渣土的渗透系数

渗透系数是评价渣土渗流特征最直接的指标,原状渣土的渗透系数随时间变化曲线如图6所示。在前40 min内其渗透系数快速增大,随时间的发展,渗透系数缓慢上升,并最终稳定在 7.72×10^{-6} cm·s⁻¹附近,渗透性能差。这可能是因为盾构渣土内的泡沫在前期不稳定,消破速率较快,削弱了其堵塞渗流通道的作用,使得渗透系数快速增大;而后期渣土的孔隙结构趋于稳定,渗透系数变化缓慢。

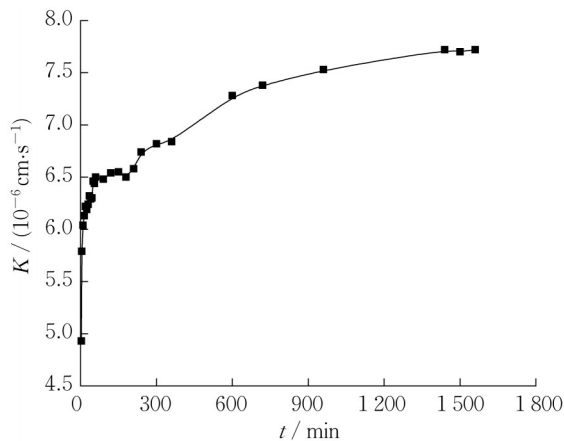


图6 原状盾构渣土渗透系数变化曲线
Fig. 6 Change of permeability coefficient of undisturbed shield tunneling residues

2.1.2 原状盾构渣土的孔隙特征

经压汞测试,原状盾构渣土总孔隙率为50.72%。图7a为原状盾构渣土的进汞曲线,可以看出随孔径的减小,在350~4 500 nm范围内压入汞量显著增大,说明孔隙主要集中在该尺寸范围内。图7b为原状盾构渣土的孔径分布曲线,峰值孔径为

1 366 nm,峰值点对应的孔隙分布密度为 $0.3585 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,土样中孔隙以小孔隙(300~3 000 nm)^[15]为主,根据Shear^[16]对土壤内部孔隙的划分,该孔径范围内主要为团粒内和颗粒间孔隙,减少和阻碍了渗流路径。

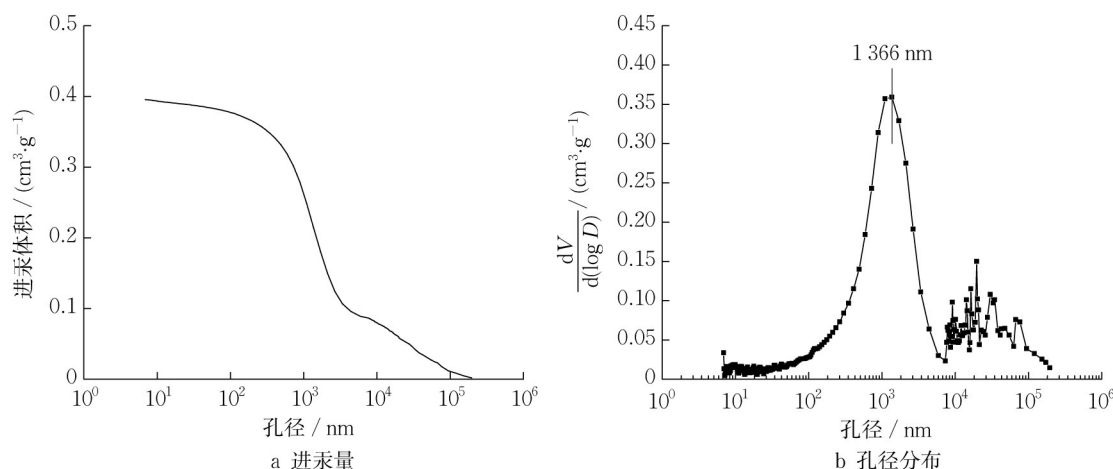


图7 原状盾构渣土压汞试验曲线

Fig. 7 MIP of undisturbed shield tunneling residues

2.1.3 原状盾构渣土三维重构

使用Avizo软件^[17]对CT扫描结果进行处理分析(图8)。由于CT图像边缘可能会出现扰动失真的情况,为消除干扰将土样的CT二维断层切片图像裁剪为30 mm×30 mm的规则方形区域,并选择合适的阈值识别图像中的深色区域提取孔隙部分(图8a和图8b)。对处理的581张切片图像进行三维重构,得到完整的原状盾构渣土三维重构模型和三维孔隙模型,孔隙表面表征见图8c和图8d。从图中可以看出孔隙杂乱地分布于土体内部,孔径大小不一且孔隙形貌不一,其中以封闭的小孔隙为主,鲜有连通孔隙,通过软件的Volume fraction模块可以分析土样的孔隙率,进一步使用Axis connectivity命令可以研究土样的连通性,该区间连通孔隙度经计算仅为5.9%,贯通性不佳。渗流模拟图像(图8e)也显示,由于存在大量封闭孔隙阻碍了渗流通道,仅有少量的大孔径处存在渗流通道。综上说明原状渣土的孔隙结构是导致其渗流性能差的重要原因。

2.2 絮凝剂和消泡剂对重塑土渗流性能的影响

2.2.1 渗透系数

图9a和图9b分别为依据表3试验所得的不同掺量CPAM和有机硅消泡剂的重塑土渗透系数变化曲线,表5为泡沫性能试验结果。对于掺量为

0.00%的空白土样(序号A1),其渗透系数发展规律与原状渣土相似。由于泡沫主要由空气组成,使土样中加入了大量封闭气体,在加入初期可以填充孔隙构成堵水结构,降低渣土的渗透性,但随时间发展泡沫逐渐消破,渗透系数最终稳定在 $9.96 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图9a可知,当CPAM掺量很小时,渣土的渗透系数无明显变化;随CPAM掺量的增大,渣土的渗透系数也逐渐增大,且当其掺量为0.30%时,渗透系数达到最大 $2.55 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近;但当CPAM掺量为0.50%时,渗流却受到明显抑制,渗透系数约为 $4.49 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由表5可知CPAM对发泡倍率和泡沫半衰期无显著影响且无明显规律。CPAM可以改变渣土的渗流性能一方面是因为CPAM带有大量正电荷,通过电中和作用可以压缩破坏黏土颗粒原有的双电层结构,使黏土颗粒表面的结合水膜厚度减少,大大降低了其与水的亲和力;另一方面CPAM在较低浓度时,高分子长链如-COO⁻、-NH⁺等可以通过“架桥”的方式吸附在多个颗粒表面上,通过吸附架桥作用使黏土颗粒聚集成絮体;与此同时CPAM分子的疏水基团向外分布,降低了絮体的水敏性^[18-20]。当CPAM掺入过少时,其电中和作用和吸附架桥作用微弱,导致其对渣土渗流特性无明显影响。而当CPAM掺入过量时,

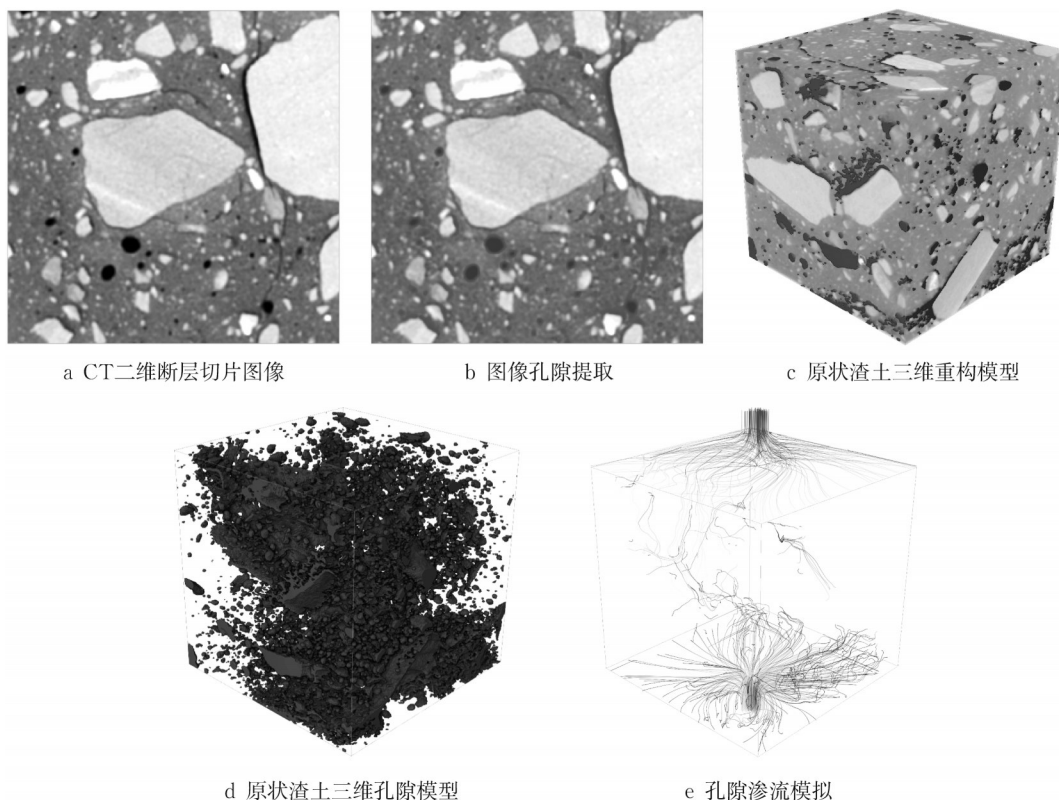


图8 CT试验处理结果

Fig. 8 Processing results of CT test

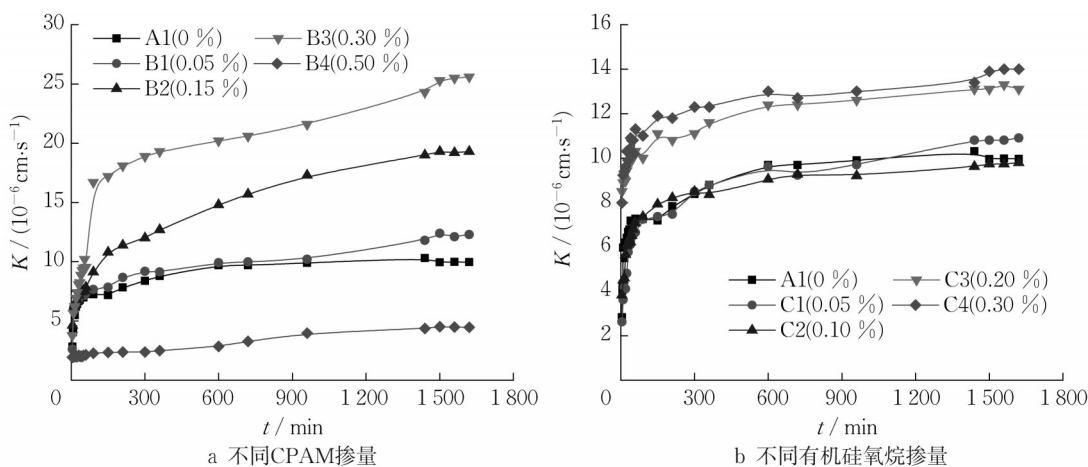


图9 重塑渣土渗透系数变化曲线

Fig. 9 Change of permeability coefficient of remolded soil

黏土颗粒因吸附过多高分子聚合物,使颗粒表面带正电荷产生静电排斥,且过多的高分子聚合物使土粒粘度增大并填充土内孔隙^[19],大幅降低了渣土渗流通道的连通性和稳定性。在本次试验中,絮凝剂CPAM的最优掺量为0.30%。

由图9b可知,当消泡剂有机硅氧烷掺量在0.05%和0.10%时,渣土渗透系数无明显变化;当其掺量在0.20%和0.30%时,渣土渗透系数有显著

增大,且在渗透初期其渗透系数便高于空白土样,后期发展较为平稳。两者最终渗透系数相近,达到 $1.31 \times 10^{-5} \sim 1.40 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。出于经济考虑,选择0.20%的掺量较佳。有机硅氧烷的疏水基团Si-Si和Si-O会使有机硅链表面活性较高,并在液体表面形成疏水薄膜,从而降低了液体的表面张力,加快了土体内气泡合并、破裂以及释放至空气的速度^[21]。由表5可知,当消泡剂掺量增大时泡沫稳定性变差,其

| 表 5 泡沫性能试验结果 | | | | |
|---|---------|----------|------|--------|
| Tab. 5 Test results of foam performance | | | | |
| 序号 | CPAM /% | 有机硅氧烷 /% | 发泡倍率 | 半衰期 /s |
| P0 | 0 | 0 | 6.96 | 414 |
| P1 | 0.05 | 0 | 5.90 | 347 |
| P2 | 0.15 | 0 | 5.80 | 376 |
| P3 | 0.30 | 0 | 5.82 | 361 |
| P4 | 0.50 | 0 | 5.74 | 387 |
| P5 | 0 | 0.05 | 4.90 | 324 |
| P6 | 0 | 0.10 | 4.76 | 148 |
| P7 | 0 | 0.20 | 3.70 | 56 |
| P8 | 0 | 0.30 | 3.62 | 49 |

半衰期显著降低。尤其当掺量达 0.20 %和 0.30 % 时,泡沫半衰期已小于 60 s,在前期泡沫快速破裂释放,这可能是导致渣土在渗透初期其渗透系数就显著高于其他试验组的主要原因。

2.2.2 孔隙特征

针对 2.2.1 节的渗透情况,选取渗透系数改善最为明显的试验组,进一步探究试剂掺量 0 %空白土样(序号 A1)、CPAM 掺量 0.30 %土样(序号 B3)和有机硅氧烷掺量 0.30 %土样(序号 C4)的孔隙特征。图 10 a和图 10 b分别为三组土样的进汞曲线和孔径分布曲线。

经压汞测试得到空白土样总孔隙率为

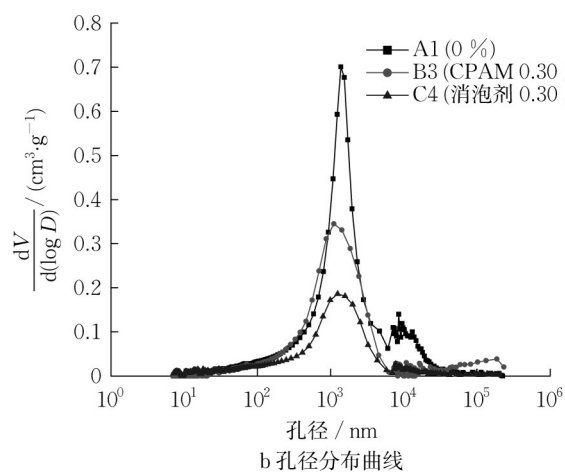
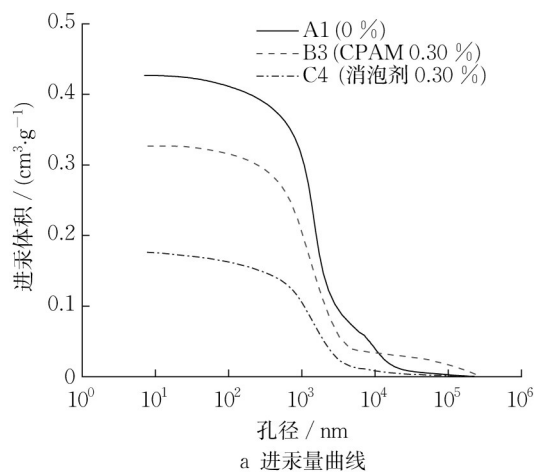


图 10 重塑渣土压汞试验曲线
Fig. 10 MIP of remolded soil

图 11 为三组土样的扫描电镜图像,可以清晰地观察到土样的空间架构。

由图 11 a可知渣土呈片状结构,孔隙分布不均且孔径大小不一,有大量颗粒间孔隙、团粒内孔隙和一部分团粒间孔隙^[16],孔隙间贯通性不佳。

由图 11 b可知,絮凝剂 CPAM 的高分子长链通

53.24 %,掺 CPAM 土样总孔隙率为 46.09 %,掺有机硅氧烷土样总孔隙率为 31.69 %。通过分析图 10 a,空白土样在 250~7 000 nm 范围内压入汞量有显著增大,掺 CPAM 土样在 300~4 550 nm 范围内压入汞量显著增大,掺有机硅氧烷土样在 350~4 000 nm 范围内压入汞量显著增大,说明孔隙主要集中在该尺寸范围内。

通过分析图 10 b,峰值孔径均在 1 000 nm 附近,为小孔隙。其中空白土样的主峰最为显著,峰值孔径为 1 386 nm,峰值点对应的孔隙分布密度为 0.700 8 cm³·g⁻¹且在 10 000 nm 孔径附近出现次峰,该范围孔径为中大孔隙^[15]。其小孔峰与中大孔峰的峰谷明显,说明小孔与中大孔的连通性差。掺 CPAM 土样的峰值孔径为 1 112 nm,峰值点对应的孔隙分布密度为 0.344 5 cm³·g⁻¹,且 100 000 nm 附近的大孔含量大于空白土样,这可能是 CPAM 使分散的黏土颗粒团聚,土团之间产生大孔隙,大孔隙的发育为渗流提供有利通道。掺有机硅氧烷土样对应曲线的峰值较小,峰值孔径为 1 251 nm,峰值点对应的孔隙分布密度为 0.185 5 cm³·g⁻¹,小孔隙含量显著小于空白土样。小孔隙的减少使渗流通道相对更为贯通,增大了渣土的渗透系数。

过交联接枝等方式使细小的黏土颗粒被吸附成团,土样内的孔隙重新排列,并有利于发育大孔隙,同时高分子的疏水基团也可以降低土粒的亲水性。

由图 11 c可知,消泡剂有机硅氧烷作用后,土样中的孔隙数量有所减少,且以团粒间孔隙为主,使土体结构更为稳定,可为水分提供渗流通道。

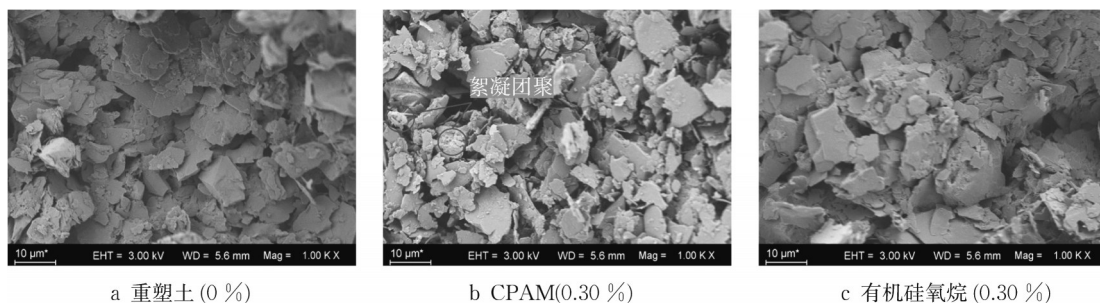


图11 土样SEM图像

Fig. 11 SEM images of remolded soil samples

3 结论

本文通过渗透试验、压汞测试、CT断层扫描、扫描电镜成像等多维度测试手段研究原状盾构渣土的渗流特征,在此基础上分析絮凝剂和消泡剂对盾构渣土渗流性能的作用机理,主要得出以下结论:

(1)原状盾构渣土渗透系数随土体内泡沫的破坏而变大,最终稳定在 $7.72 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,渗透系数极低。土体内孔隙以封闭小孔为主,贯通性不佳,阻碍了土体内部的渗流通道,这可能是导致原状盾构渣土渗透性差的主要原因。

(2)絮凝剂CPAM的掺入可以改善渣土的渗透系数,当CPAM掺量达0.50%,则会抑制渗流。本试验中CPAM的最佳掺量为0.30%,渗透系数可达 $2.55 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这可能是因为CPAM的电中和作用和吸附架桥作用使分散的黏土颗粒团聚并降低其亲水性;掺量过高则会使土体内重新产生静电排斥,并且过量的高分子聚合物会阻塞渗流通道。

(3)消泡剂有机硅氧烷的掺量越大,盾构渣土的渗透系数越高。当其掺量达0.20%~0.30%时,渣土在渗流初期渗透系数便得到显著上升,并最终稳定在 $1.31 \times 10^{-5} \sim 1.40 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这可能是因为消泡剂可以有效破裂土体内部小孔隙,使渗流通道较为连通。但絮凝剂与消泡剂两者复配的作用效果以及物化作用机理较为复杂,尚需进一步试验研究。

作者贡献声明:

陈 庆:研究命题的提出,论文修改。
陈沈旸:实验及数据分析,论文起草。
阳 栋:实验设计,研究方案制定。
官林星:实验设计,论文修改。

参考文献:

- [1] 蔡黄河. 地铁施工方法技术的应用与展望[J]. 科技展望, 2016, 26(9): 144.
CAI Huanghe. Application and prospect of subway construction methods and technologies[J]. Science and Technology, 2016, 26(9): 144.
- [2] ZHENG D Z, ADAM B, MARKUS T. An experimental study on foam infiltration into saturated sand and its consequence for EPB shield tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021(10): 111.
- [3] 朱考飞, 张云毅, 薛子斌, 等. 盾构渣土的环境问题与绿色处理[J]. 城市建筑, 2018(29): 3.
ZHU Kaofei, ZHANG Yunyi, XUE Ziyi, *et al.* Environmental issues and green treatment of shield residues [J]. Urbanism and Architecture, 2018(29): 3.
- [4] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(8): 296.
- [5] 王树英, 胡钦鑫, 王海波, 等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 94.
WANG Shuying, HU Qinxin, WANG Haibo, *et al.* Study on permeability characteristics of the shield foam conditioned sand under influences of flow plasticity and water pressure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 94.
- [6] ZHAO Y, HAN Q, ZHAO Y, *et al.* Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images[J]. Forestry Research, 2019, 30(3): 10.
- [7] FERRO N D, DELMAS P, DUWIG C, *et al.* Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 119: 13.
- [8] LI J S, XUE Q, WANG P, *et al.* Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay[J]. Applied Clay Science, 2015, 105: 192.
- [9] TURCHIULI C, FARGUES C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 103(1): 123.

- [10] 丁光亚, 孙林柱, 张波, 等. 废泥浆脱水的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(1): 53.
DIN Guangya, SUN Linzhu, Zhang Bo, *et al.* Experimental study on dehydration of waste mud[J]. Drilling Engineering, 2013, 40(1): 53.
- [11] 王敏, 郭睿, 张凯峰, 等. 有机硅消泡剂的合成与应用[J]. 精细化工, 2017, 34(3): 274.
WANG Min, GUO Rui, ZHANG Kaifeng, *et al.* Synthesis and application of organosilicone defoamer[J]. Fine Chemicals, 2017, 34(3): 274.
- [12] 王旭升. 渗流固结问题的数值分析及粘性土-砂井地基固结模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
WANG Xusheng. Numerical analysis for consolidation and modeling of vertical drains beneath embankments on foundations with cohesive soil layers [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2006.
- [13] 王曦, 浩婷, 周颜, 等. 真空负载下疏浚淤泥脱水过程中渗流规律的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 120.
WANG Xi, HAO Ting, ZHOU Yan, *et al.* Research on seepage law of dredged sludge in dewatering process under vacuum loading[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 120.
- [14] 陈冬, 相龙胜, 廖赵胜, 等. 富水粉细砂地层盾构施工泡沫改良渣土试验研究[J]. 公路, 2023, 68(2): 327.
CHEN Dong, XIANG Longsheng, LIAO Zhaosheng, *et al.* Research on soil conditioning by foam for EPB shield in watery silt fine sand stratum[J]. Highway, 2023, 68(2): 327.
- [15] 曲兆昆, 王华敬, 寻万福, 等. 基于压汞法的改良土渗透特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 172.
QU Zhaokun, WANG Huajing, XUN Wanfu, *et al.* Study on permeability characteristics of modified soil based on mercury intrusion [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 172.
- [16] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay [R]. Washington D C: National Academy Press, 1993.
- [17] LIU Y Y, ZHU H. Simulation of three dimensional pore model of berea sandstone core by CT scanning method based on AVIZO software [J]. Resource and Ecology, 2022, 6(6): 3.
- [18] LIN C F, SHIEN Y. Sludge dewatering using centrifuge with thermal/polymer conditioning [J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 321.
- [19] LEI H, XU Y, LI X, *et al.* Effect of polyacrylamide on improvement of dredger fill with vacuum preloading method[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019193.
- [20] 冯齐云. 聚硅酸盐与阳离子聚丙烯酰胺复配用于污泥脱水处理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
FENG Qiyun. Study on the combination of polysilicate and cationic polyacrylamide for sludge dewatering [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [21] ENINKE Q. Encyclopedia of chemistry technology [M]. New York: Marcel Dekker Incorporation, 1963.