

带压环境下泥浆-泡沫组合改良 级配不良砂剪切特性研究

王树英^{1,2}, 钟嘉政¹, 倪准林¹, 郑响凑¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 盾构穿越富水砂性地层时易出现排渣不畅或喷涌等风险, 仅采用泡沫改良往往无法有效改善级配不良渣土的流动性与抗渗性, 归因于泡沫易消散和流失, 故须引入膨润土泥浆进行组合改良。正确认识土舱压力环境泥浆-泡沫组合改良级配不良砂土的剪切大变形行为有助于优化满足盾构安全掘进的渣土组合改良方案。因此, 开展了泥浆-泡沫组合改良级配不良砂土的加压十字板剪切试验, 研究结果表明: 在土舱压力环境下, 组合改良砂土的初始孔隙比和饱和度随泥浆注入比 (bentonite injection ratio, 简称 BIR) 增加而增大, 有效应力降低, 进而导致峰值强度和残余强度降低; 然而剪切强度的剪切率相关性和有效内摩擦角对 BIR 的敏感性较弱; BIR 增加还使大变形后改良砂土的屈服应力有所降低。此外, 对比常压下流动性相似的 3 类不同改良砂土带压剪切大变形行为, 表明带压环境下提高 BIR 或泡沫注入比 (foam injection ratio, 简称 FIR) 均可提高孔隙比且减小有效应力, 但相较于纯泡沫改良砂土, 组合改良砂土具有更低的有效应力和剪切强度。该类级配不良砂土的合适组合改良参数为 FIR=20%、BIR=10%~15%。最后, 细观成像结果揭示了膨润土对改良砂土剪切强度的双重削弱作用: ①吸附砂土颗粒表面, 降低颗粒间摩擦力; ②延缓泡沫衰变, 使得小粒径气泡较均匀分布于孔隙中, 进而有效削弱土骨架强度。

关 键 词: 泥浆-泡沫组合改良砂土; 泥浆注入比; 加压十字板剪切试验; 剪切强度特性; 强度削弱机制

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 10-2879-10

Shear behavior of slurry-foam-conditioned poorly graded sand under pressure

WANG Shu-ying^{1,2}, ZHONG Jia-zheng¹, NI Zhun-lin¹, ZHENG Xiang-cou¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: During an earth pressure balance shield tunneling in water-rich coarse-grained stratum, muck spewing or discharge stagnation often occurs. Only foam conditioning cannot improve the fluidity and anti-permeability of poorly graded muck due to foam dissipation and loss. Therefore, bentonite slurry must be added. Understanding the large shear deformation of slurry-foam-conditioned poorly graded sand under chamber pressure can optimize the conditioning scheme to ensure safe tunneling. In this study, a series of pressurized vane shear tests on slurry-foam-conditioned poorly graded sand was conducted. The results show that increasing the bentonite injection ratio (BIR) raises the initial void ratio and saturation of conditioned sand under pressure, resulting in a decrease in effective stress, peak strength, and residual strength. However, the shear-rate dependence of shear strength and effective internal friction angle are found to be insensitive to BIR. Moreover, increasing BIR reduces the yield stress of the conditioned sand after large deformation. A comparison of the large shear deformation under pressure of three types of conditioned soils with similar workability at atmospheric pressure indicates that increasing the slurry or foam injection ratio can enlarge the void ratio and reduce the effective stress under pressure. Notably, slurry-foam-conditioned sand exhibits lower effective stress and shear strength than foam-conditioned sand. The suitable conditioning parameters for testing poorly graded sand are FIR=20% and BIR=10%–15%. Microscopic images reveal the dual weakening effect of bentonite on the shear strength, including the bentonite adsorption on the surface of sand particles to reduce inter-particle friction and the deceleration of foam degradation, leading to a

收稿日期: 2023-11-09

录用日期: 2024-02-18

基金项目: 中国博士后科学基金 (No.2023TQ0382)。

This work was supported by the China Postdoctoral Science Foundation (2023TQ0382).

第一作者简介: 王树英, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: swang24@szu.edu.cn

通讯作者: 钟嘉政, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事盾构隧道工程与渣土改良方面的研究工作。E-mail: jzzhong@foxmail.com

uniform distribution of small-size bubbles in pores and effectively weakening the soil skeleton strength.

Keywords: slurry-foam-conditioned sand; bentonite slurry injection ratio; pressurized vane shear test; shear strength characteristics; strength weakening mechanism

1 引言

土压平衡盾构掘进过程中,开挖渣土进入土舱后成为抵抗开挖面前方地层水土压力的支撑介质,而维持开挖面稳定往往需要进排渣量控制和渣土改良^[1]。渣土改良剂包括水、泡沫、膨润土泥浆、高分子聚合物等,应根据地质水文条件进行科学选型。进一步地,基于工程经验或试验分析得到的合适改良参数能使土舱渣土保持良好的塑性^[2],适中的压缩性^[3],较低的渗透性^[4]、剪切强度^[5]及黏附强度^[6],且减少刀具磨损^[7],确保盾构安全高效掘进。

泡沫是砂性渣土改良的首选,它填充于渣土孔隙中,增强了非黏性砂颗粒间的黏聚力,随着泡沫注入比的增加,渣土内土颗粒相互接触逐渐转变为颗粒与泡沫接触,宏观上导致渣土剪切强度降低,流动性增大^[8]。进一步地,已有大量研究通过坍落度试验、旋转剪切试验等^[9],探究了泡沫改良砂性渣土在常压或土舱压力下的剪切大变形行为或流变特性,揭示了泡沫注入比对改良砂土剪切强度的影响及机制^[10]。特别地,当盾构穿越富水级配不良砂土地层,砂性渣土细颗粒有限,孔隙较大,抗渗性差,泡沫在高含水率渣土中易因排水而衰变或流失,在土舱中表现为泡沫上浮至土舱上部积聚,由此形成的非满舱现象不利于开挖面稳定^[11];而且泡沫无法有效改良渣土,由此诱发的渣土滞排或喷涌风险在高水压作用下尤甚^[12]。王树英等^[13]基于坍落度试验,观察到高含水率砂土流动性过大,添加泡沫后易析出,表明纯泡沫改良难以改善塑性。为提升泡沫利用效率,改善低细颗粒含量渣土的塑流性和抗渗性等,Ling^[14]、万泽恩^[15]、朱碧堂^[16]等建议采用泡沫结合膨润土泥浆或高分子聚合物对渣土进行改良,并在工程应用中证明了组合改良能可靠地规避螺旋输送机喷涌风险。其中,膨润土能补充砂土中缺乏的细粒组分,遇水膨胀后能在渣土孔隙中形成致密的堵水结构,堵塞渗流通道,使泡沫更稳定地赋存于孔隙中。Jancsecz 等^[17]发现膨润土泥浆与泡沫组合改良能减少合适改良渣土所需的泡沫用量。Ling 等^[14]发现少量泥浆的注入可降低强塑性泡沫改良砂土的坍落度,并通过泡沫与膨润土颗粒的细观相互作用阐释了膨润土泥浆提高泡沫稳定性的机制。徐征杰等^[18]以渣土坍落度、渗透

系数和改良成本为响应值,通过响应面法试验获得泥浆浓度和掺入比的最优值。在环境压力作用下,Yang 等^[19]对比了泡沫改良砂土和膨润土泥浆改良砂土的压缩性和剪切强度。综上所述,既有研究多聚焦于泥浆注入比对渣土渗透性或常压下塑流性的影响,以及围压对组合改良渣土剪切强度的影响。然而,鲜有关于泥浆注入比对土舱压力下泡沫-膨润土泥浆组合改良砂土有效应力状态和剪切大变形力学行为影响的研究,组合改良带压渣土流动性的细观作用机制尚未明确。

因此,本文采用加压机十字板剪切仪对组合改良砂土开展了一系列剪切试验,研究泥浆注入比对竖向压力作用下组合改良砂土剪切前初始状态和剪切大变形力学特性的影响,并对比压力环境下泥浆-泡沫组合和纯泡沫的改良效果,揭示膨润土颗粒的作用机制。

2 试验方法

2.1 试验材料

2.1.1 试验土样

我国深圳、长沙、福州、南昌等城市的盾构工程会穿越富水级配不良的砂土地层^[20],掘进常采用泡沫和膨润土组合改良。为测试组合改良级配不良砂的带压剪切力学行为和确保试验可重复性,试验前将湘江流域河砂烘干并筛分为不同粒组,再按某类级配不良砂的级配配制试样,级配曲线如图 1 所示。土样的有效粒径 $d_{10}=0.17\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=3.13<5$,曲率系数 $C_c=1.15>1$ 。依据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[21],土样均被归类为级配不良砂(SP)。土样的颗粒密度 $\rho_s=2.66\text{ g/cm}^3$,

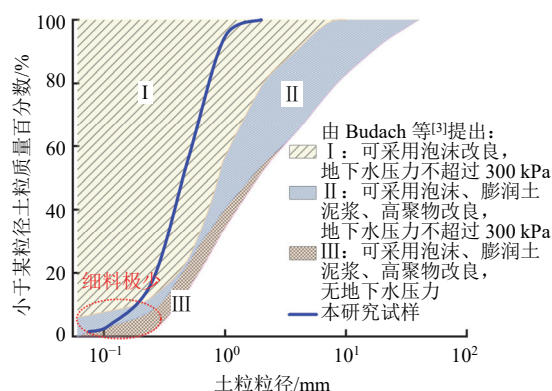


图 1 试验砂土级配曲线

Fig.1 Grading curve of tested sand

最大孔隙比 $e_{\max}=0.914$ 。土样级配不良且细颗粒十分有限 ($d<0.075$ mm 的细颗粒含量仅为 1.5%), 根据 Budach 等^[3]提出的不同类地层适用的改良剂类型示意图, 其级配曲线处于 I 区和 II 区, 当盾构在富水地层掘进, 此类渣土易引起喷涌, 因此采用泡沫和膨润土泥浆组合改良方案。

2.1.2 泡沫

泡沫是由许多彼此被液膜分隔的气泡组成的亚稳态聚集物, 由泡沫剂溶液和压缩空气在发泡系统中混合生成。试验用泡沫剂为来自盾构现场的阴-阳离子表面活性剂复合型泡沫剂。

一般情况下, 盾构隧道工程中表征注入泡沫数量和质量的代表性参数及其定义为

$$c_f = \frac{V_{fa}}{V_{fi}} \times 100\% \quad (1)$$

$$FIR = \frac{V_f}{V_s} \times 100\% \quad (2)$$

$$FER = \frac{V_{fi} + V_{fa}}{V_{fi}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: c_f 为泡沫剂溶液中泡沫剂的体积分数 (%); V_{fa} 为所用泡沫剂的体积 (L); V_{fi} 为泡沫剂溶液的体积 (L); FIR 为泡沫注入比 (%); V_f 为注入泡沫的体积 (L); V_s 为开挖渣土的体积 (L); FER 为发泡倍率, 反映泡沫的膨胀性; V_{fa} 为泡沫内的气相总体积 (L); V_{fi} 为泡沫的初始体积 (L)。

此外, 还需引入半衰期 $t_{50\%}$ 来评价泡沫的稳定性, 定义为泡沫质量消散至初始值 50% 时所需的时间。试验中 c_f 一般取 3%, 这是平衡泡沫剂最小消耗和泡沫性能最佳的最优值^[22]。生成泡沫的 $FER=12$, $t_{50\%}=8.5$ min, 满足盾构掘进的需求, 即 $c_f=0.5\% \sim 5\%$, $FER=5 \sim 30$, $t_{50\%}>5$ min^[22]。

2.1.3 膨润土泥浆

采用钠基膨润土制备泥浆, 将膨润土粉末与水混合后静置一段时间, 使其充分溶解和膨胀, 制备过程遵循 ISO13500^[23]。盾构隧道工程应用中反映膨润土注入量的代表性参数及其定义为

$$\omega_b = \frac{m_b}{m_w + m_b} \quad (4)$$

$$BIR = \frac{V_b}{V_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ω_b 为膨润土在泥浆中的质量分数 (%); m_b 、 m_w 分别为膨润土泥浆的溶质质量和溶剂质量 (kg); BIR 为膨润土泥浆注入比 (%); V_b 为注入膨润土泥浆的体积 (L)。

黏度是膨润土泥浆的关键特性, 黏度过大会使泥浆可泵性较差, 易堵塞注射管路, 而黏度过小会使泥浆难以留存于孔隙, 导致砂性土改良效果较差。膨润土泥浆的黏度可由马氏漏斗测试得到。试验选用钠基膨润土质量分数为 7% 的膨润土泥浆, 膨化时间为 18 h, 泥浆的马氏漏斗黏度为 45 s。

2.2 试验设备

采用加压式旋转剪切仪^[24]开展改良砂土的不排水十字板剪切试验, 仪器实物图和原理图如图 2 所示。加压式旋转剪切仪主要由试样腔、扭转剪切装置、竖向加载装置、传感器及数据采集系统组成。

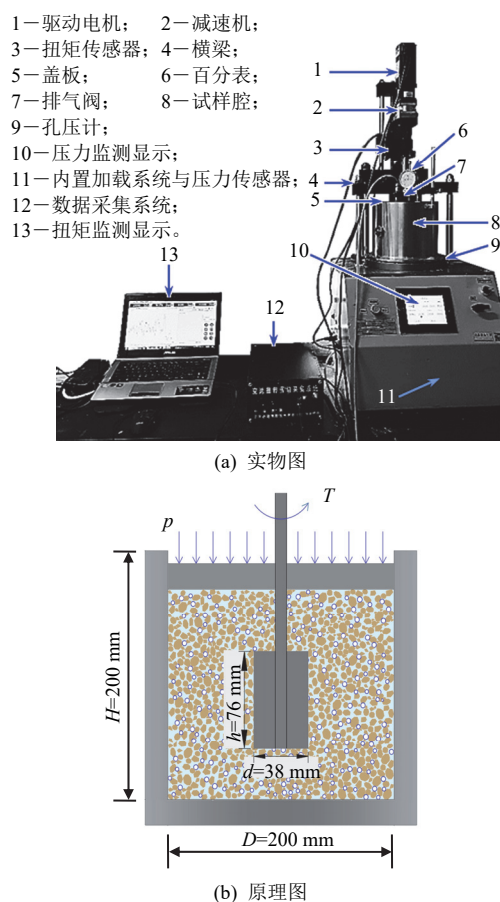


图 2 加压式十字板剪切仪

Fig.2 Pressurized vane shear apparatus

2.3 试验工况

为了研究泥浆注入量影响下组合改良砂土的剪切力学行为, 砂土的初始含水率 w_0 和 FIR 分别固定为 10% 和 20%, 对不同 BIR 的组合改良砂土开展加压十字板剪切试验。在此之前, 预先对组合改良砂土进行坍落度试验, 初步评价不同 BIR 的组合改良砂土在常压下的流动性。不同 BIR 下组合改良砂土的坍落度 s 和延展度 s_p 结果如图 3 所示。添加少量膨润土泥浆 ($BIR=5\%$) 后, 组合改良砂土坍

落度减小；随着 BIR 继续增加，坍落度迅速增大，当 $BIR > 10\%$ 时，坍落度略有增大，而延展度随 BIR 持续增大，表明改良砂土的流动性仍随 BIR 逐渐增强。注意到即便总含水率 w_t 较高，经泥浆改良后的砂土未发生析水析泡沫现象。表 1 展示了十字板剪切试验工况，选择未添加泥浆的 ($BIR=0\%$) 和塑性良好的组合改良砂土 ($BIR=10\%、15\%、20\%$)，以探究不同 BIR 下的带压剪切力学行为。此外，设置坍落度和延展度与组合改良砂土 FS3 类似而总含水率和泡沫注入比不同的纯泡沫改良砂土 F1 和 F2，对比三者讨论带压状态下组合改良与纯泡沫改良的差异。试验设置竖向压力 $p=50、200$ kPa，可探究改良砂土孔隙比在大于和小于最大孔隙比 $e_{\max}$ 时的剪切力学行为；设置十字板转速 $n=1/30、1/5、1、5$ r/min，可探究剪切速率对剪切强度的影响并揭示剪切大变形后组合改良砂土的流变行为。

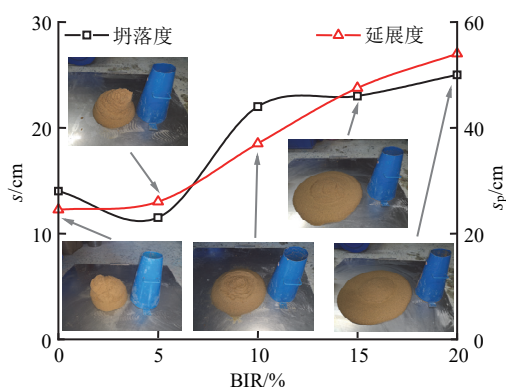


图 3 坍落度、延展度随 BIR 的变化

Fig.3 Variations of slump and expansion degree with BIR

表 1 十字板剪切试验工况
Table 1 Test conditions of vane shear test

试样	$w_0/\%$	FIR/%	BIR/%	$w_t/\%$	s/cm	s_p/cm	p/kPa	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
FS1			0	11.2	14.0	24.5		
FS2	10.0	20	10	17.9	22.0	37.0		
FS3			15	21.2	23.7	47.5		
FS4			20	24.6	25.1	54.0	50, 200	1/30, 1/5, 1, 5
F1	17.5	20	0	18.6	24.0	46.0		
F2	10.0	40	0	12.3	23.8	47.0		

2.4 试验步骤

每次加压十字板剪切试验均按以下步骤进行：

(1) 首先按初始含水率，将干砂和水充分混合 60 s，密封静置 12 h，充分润湿试样；然后按 BIR，将湿砂和泥浆充分混合 60 s；最后按 FIR，生成泡沫后迅速将其和泥浆-砂土混合物充分混合 60 s。

(2) 将质量相等的组合改良砂土试样分 3 层均匀地装入试样腔中，每层厚度约为 6 cm。

(3) 将十字板置于试样中心，十字板杆件穿过顶板中心孔与旋转驱动装置连接。安装顶板后，使顶板排气阀处于开启状态，预先施加 10 kPa 的竖向压力，以排出试样表面上方的空气，而后关闭排气阀，确保试验在不排水环境下进行，试验环境温度控制在大约 20 °C。

(4) 通过顶板向试样施加目标竖向压力，当监测顶板位置的位移计读数恒定时，十字板开始以恒定转速旋转剪切试样，单次试验的总旋转角度为 1 440°，以确保试样进入剪切残余状态。试验全程记录试样的竖向变形量、孔隙压力以及十字板扭矩。

根据剪切应力在十字板剪切失效面上均匀分布的假设，推导得到剪切应力 τ (Pa) 与十字板扭矩 T (N·m)、剪切速率 $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) 与十字板转速 n (r/min) 的计算方法，有关公式为

$$\tau = \frac{6T}{\pi(3D^2H + D^3)} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi n}{15} \times \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad (7)$$

式中： D 为试样腔内径 (mm)； d 、 H 分别为十字板直径和高度 (mm)。

3 结果分析

3.1 剪切前初始状态

由于泡沫具有高压缩性，改良砂土在不同竖向压力下呈现迥然不同的孔隙状态，这直接影响着其带压状态下的剪切大变形行为。图 4 展示了十字板剪切前组合改良砂土在不同竖向压力作用下初始状态参数随 BIR 的变化情况。

如图 4(a)所示，当 $p=50$ kPa 时，初始孔隙比 e_0 随 BIR 增加而增大，且均大于 $e_{\max}$ ，究其原因是膨化后的泥浆起填充原孔隙甚至抬升土骨架的作用；而当 $p=200$ kPa 时，因泡沫和泥浆被进一步压缩，初始孔隙比降低至 $e_{\max}$ 以下，对 BIR 的变化不敏感。如图 4(b)所示，由于泥浆添加提高了试样的总含水率（见表 1），初始饱和度 S_r 随 BIR 增加而增大。如图 4(c)所示，利用总应力 σ_0 对初始有效应力 σ'_{v0} 进行无量纲化，以表征颗粒骨架承担外荷载的应力情况。无量纲有效应力随 BIR 增大而减小，当 $p=50$ kPa 时，无量纲有效应力在 $BIR \geq 15\%$ 时几乎为 0，表明颗粒间未建立有效接触，竖向压力荷载几乎全由孔隙压力承担，可估计有效应力产生的孔隙比临界值 e_{th} 为 $1.1e_{\max}$ （见图 4(a)）。图 4(c)

亦反映了试样的孔隙压力随 BIR 增加而增大, 进而促进泡沫压缩变形^[25], 因此, 在 $p = 200 \text{ kPa}$ 下, 初始孔隙比因泡沫压缩而减小的负效应和因泥浆用量增加而增大的正效应相抵消, 解释了图 4(a)中 $p = 200 \text{ kPa}$ 时初始孔隙比不随 BIR 变化。此外, 随着 BIR 增加, 孔隙压力增大, 泡沫压缩使孔隙内气相体积减小, 是初始饱和度增大的另一个原因。

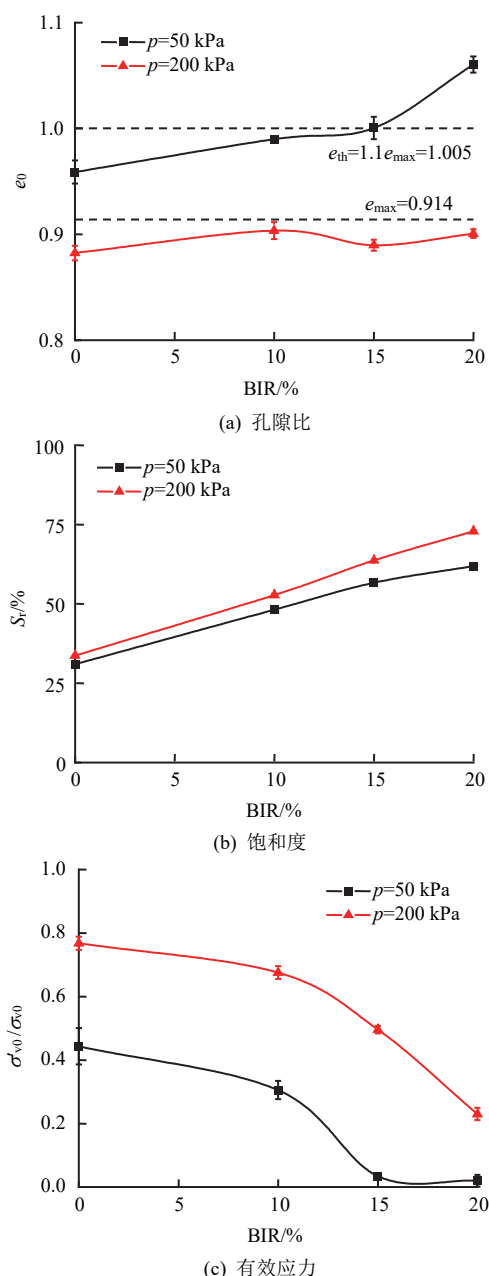


图 4 带压组合改良砂土剪切前初始状态参数

Fig.4 Initial parameters of pressurized conditioned sand before shearing

3.2 剪切大变形特征

图 5 展示了不同 BIR 下组合改良砂土的剪切应力-位移曲线。剪切应力曲线分为两类：第 1 类是随着剪切位移增大, 剪切应力先增大至峰值, 在剪

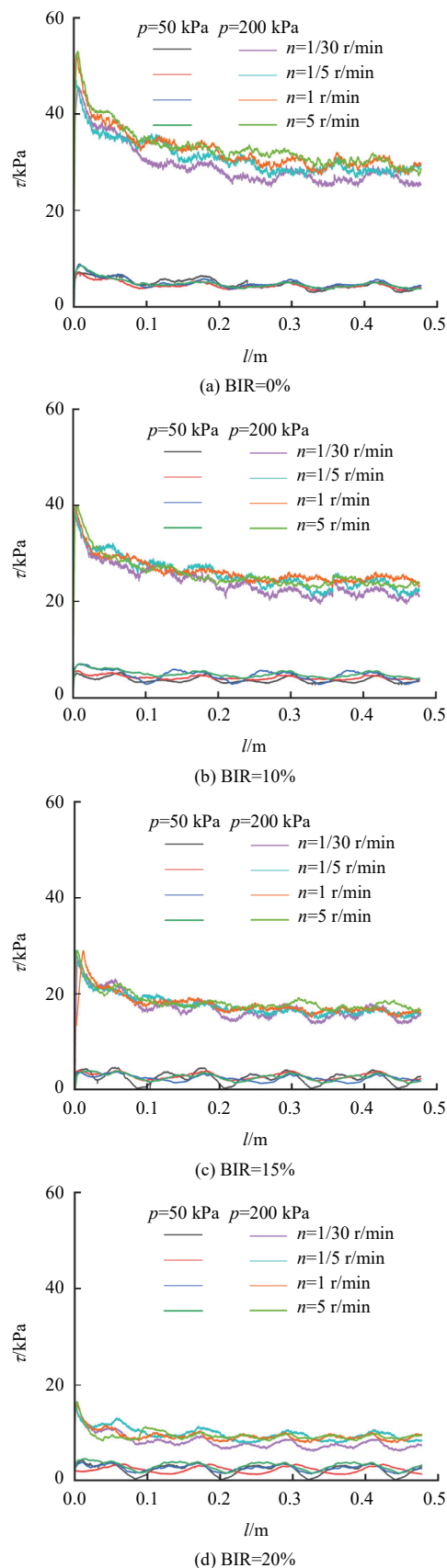


图 5 带压组合改良砂土剪切应力-位移曲线

Fig.5 Shear stress-displacement curves of pressurized conditioned sand

切大变形后下降至趋于恒定的残余值, 然而应力频繁波动, 这归因于试样内的天然砂颗粒具有较大的

尺寸不均匀性和表面不平整度,剪切过程中会伴随明显的应力滞滑行为,即颗粒相对位移导致用于平衡外荷载的颗粒系统力链网络中强力链的反复断裂与重构,该过程中应变能频繁的释放和积累引起剪切应力降低和提高^[26]。第2类是随着剪切位移增大,剪切应力保持在某较小值附近规律性波动。两类剪切应力曲线与 Zhong 等^[27]根据泡沫改良砂土剪切试验观察得到的结果一致。对比图 5(a)~5(d)可初步判断在较高压力环境($p=200$ kPa)下,改良砂土剪切行为对 BIR 的敏感性远高于十字板转速。

然后,提取剪切应力曲线的峰值点为峰值强度;根据试验结果,以剪切位移 $0.24\sim 0.48$ m (即十字板旋转总角度 $720^\circ\sim 1\ 440^\circ$) 作为残余段,计算残余段的剪切应力平均值为残余强度。图 6 展示了组合改良砂土剪切强度随 BIR 的变化规律。随着 BIR 增加,峰值强度 τ_p 和残余强度 τ_r 均减小,在 $p=200$ kPa 下 BIR 对剪切强度的折减效果尤其明显,究其原因是 BIR 增加使试样有效应力减小(见图 4(c)),颗粒间接触减弱,剪切过程中颗粒相对滑移需克服的阻抗减小,宏观表现为剪切强度降低。在 $p=50$ kPa 下,试样有效应力和剪切强度较小,随

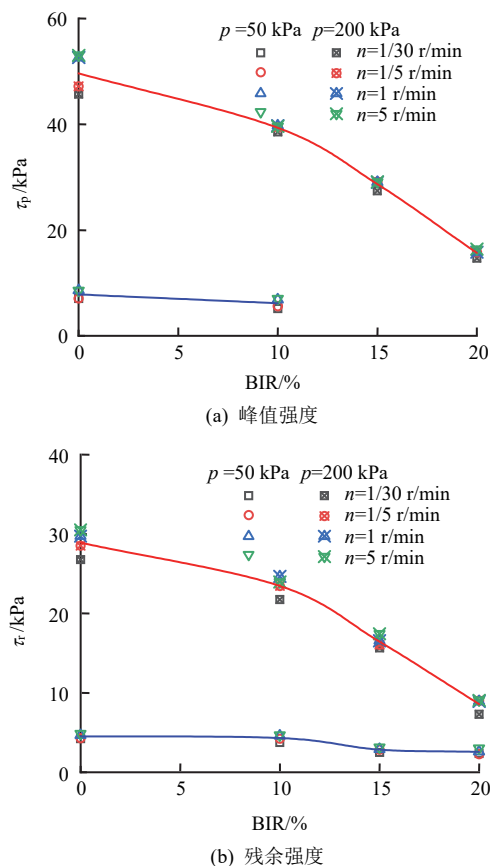


图6 带压改良砂土剪切强度随 BIR 的变化
Fig.6 Variation of shear strength of pressurized conditioned sand with BIR

BIR 的变化不明显,当 $BIR \geq 15\%$ 时,有效应力几乎为 0 (见图 4(c)),剪切过程中呈类流体特征,不存在峰值强度(见图 6(a))。

为了进一步阐明 BIR 对剪切强度的折减作用,图 7 展示了峰值强度 τ_p 与初始有效应力 σ'_{v0} 、残余强度 τ_r 与残余阶段有效应力 σ'_{vr} 的相关性。剪切过程中颗粒迁移引起的泡沫变形会改变孔隙比和产生少量超孔隙压力,直至试样进入残余状态后有效应力才趋于不变^[28],因此,残余阶段的有效应力略小于初始值。剪切强度和有效应力的近似线性关系表明组合改良砂土的剪切行为仍服从 Mohr-Coulomb 准则^[24],BIR 增加只减小有效应力,从而降低剪切强度,而几乎不影响反映有效内摩擦角特性的剪切强度-有效应力的曲线倾斜度。对比图 7(a)、7(b)还可知,试样进入残余阶段后有效内摩擦角减小,这是因为试样剪切大变形后,颗粒沿剪切破坏面趋于有序排列,颗粒相对滑移需克服的摩擦阻抗大大降低。

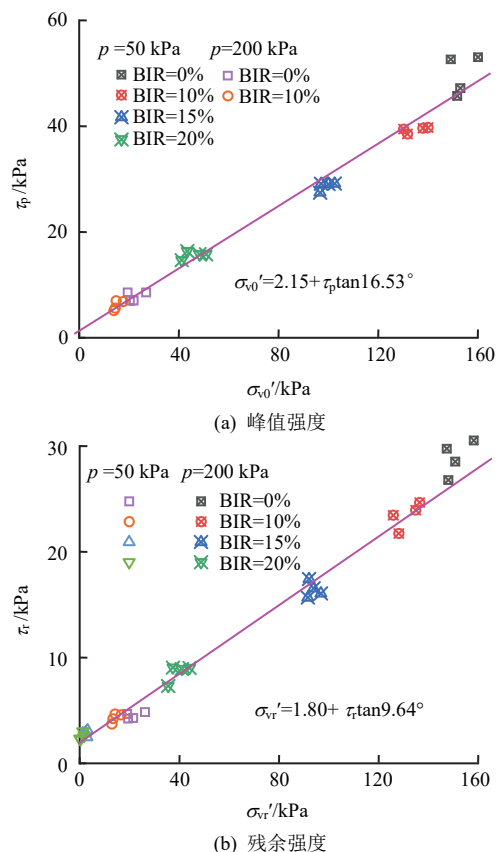


图7 剪切强度与有效应力的相关性

Fig.7 Relationship between shear strength and effective stress

3.3 剪切大变形后流变行为

由图 5 可知,组合改良砂土在大变形后进入残余阶段,其剪切应力随剪切位移增加而趋于恒定值,除了由于应力滞滑行为出现的少量规律性波

动。进一步探究大变形后组合改良砂土剪切应力均值（即残余强度）与剪切速率的相关性，其流变行为如图 8 所示。由图 8(a)可知，不管 BIR 和竖向压力的大小，残余强度随剪切速率增加而略有增大。残余强度与剪切速率关系曲线的截距值可认为是表征残余阶段组合改良砂土流固转换点的屈服应力，由图 8(b)可知，BIR 增加能降低屈服应力 τ_0 ，即试样剪切变形时更容易从固态转换为流态；在较高压力（ $p = 200 \text{ kPa}$ ）下，BIR 提高大变形组合改良砂土流动性的作用更显著。

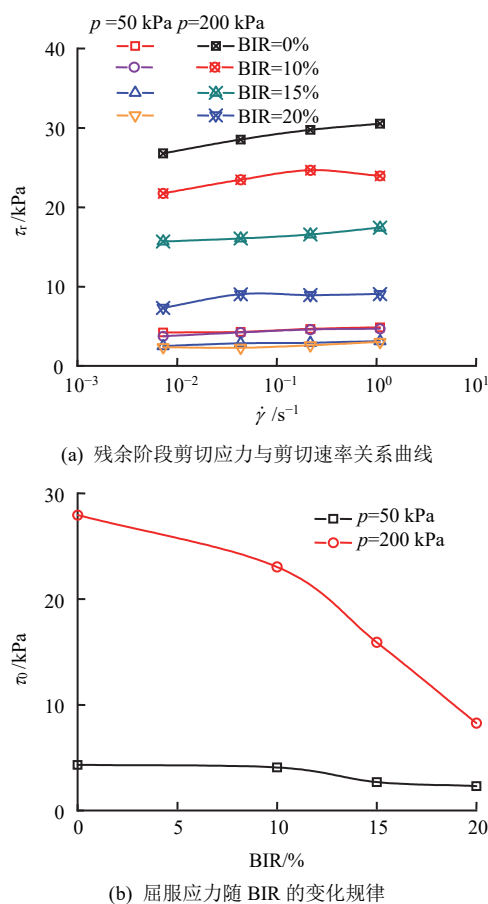


图 8 大变形组合改良砂土流变行为

Fig.8 Rheological behavior of conditioned sand after large deformation

4 讨 论

4.1 压力环境下泥浆-泡沫组合改良的优势

为了阐释土舱压力环境下膨润土泥浆-泡沫组合改良相较于纯泡沫改良的优势，对比常压下流动性相似的 3 类不同改良工况的砂土带压剪切行为。其中 FS3 为泥浆-泡沫组合改良砂土，F1 和 F2 为 FIR 不同的纯泡沫改良砂土，如表 1 所示，3 类改良土的坍塌度和延展度相似。图 9 对比了 FS3、F1 和 F2 在剪切前的初始孔隙比和有效应力。由图 9(a)

可知，由于泡沫注入比更大，F2 ($w_0=10\%$, $\text{FIR}=40\%$) 的初始孔隙比大于 F1 ($w_0=17.5\%$, $\text{FIR}=20\%$)；而经泥浆和泡沫组合改良的 FS3 ($w_0=10\%$, $\text{FIR}=20\%$, $\text{BIR}=15\%$) 在 $p = 50 \text{ kPa}$ 下的初始孔隙比大于与其泡沫注入比相同的 F1，而在 $p = 200 \text{ kPa}$ 下两类土初始孔隙比相近，表明 FS3 的压缩性更强。由图 9(b)可知，无论是增加泥浆注入比（对比 FS3 与 F1），还是增加泡沫注入比（对比 F1 与 F2），有效应力均大幅降低，注意到在较高压力（ $p = 200 \text{ kPa}$ ）下，组合改良砂土（FS3）的有效应力最小。

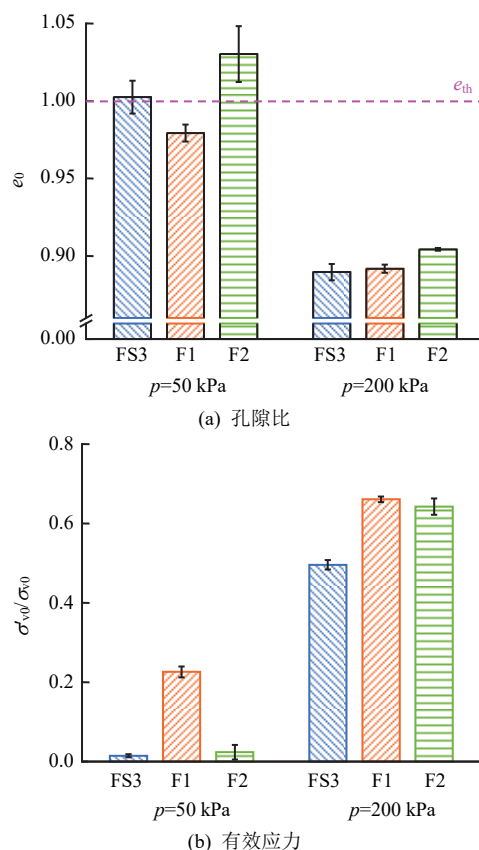


图 9 不同改良砂土的初始状态参数对比

Fig.9 Comparison of initial parameters of different conditioned sands

图 10 展示了 FS3、F1 和 F2 的峰值强度、残余强度与剪切速率的相关性。FS3 和 F2 在 $p = 50 \text{ kPa}$ 下初始孔隙比仍大于临界值（见图 9(a)），不存在峰值强度。如图 10 所示，不同竖向压力下 3 类试样的峰值强度与残余强度整体上随剪切速率略有增大，只有 F1 在剪切速率大于 0.3 s^{-1} 时峰值强度降低。砂土几乎无黏性，且孔隙中的泡沫和泥浆黏度较低^[28]，所以剪切强度对剪切速率不敏感；然而，F1 含水率较高，在细颗粒较少情况下砂土-水结合能力差，因此，当十字板转速增加到较大值时试样邻近十字板处出现局部液化，导致峰值强度较低。此外，图 10

表明, 常压下具有相似流动性的 3 类试样在压力环境下呈现不同的剪切强度。对比 F1 和 F2 可知, 泡沫注入比越大, 峰值强度与残余强度越小, 而组合改良砂土 (FS3) 在较高压力 ($p=200 \text{ kPa}$) 下的峰值强度与残余强度显然小于泡沫改良砂土 (F1 和 F2)。这意味着在土舱压力作用下, 被压缩的泡沫在某种程度上仍能扩大试样孔隙比, 使剪切强度略有降低, 而组合改良中膨润土细颗粒亦不利于传递粗颗粒应力的力链网络的形成, 从而削弱颗粒骨架强度, 显著减小有效应力和剪切强度。因此, 相较于纯泡沫改良, 在压力环境下组合改良方案在提高流动性方面表现出更优的改良效果。

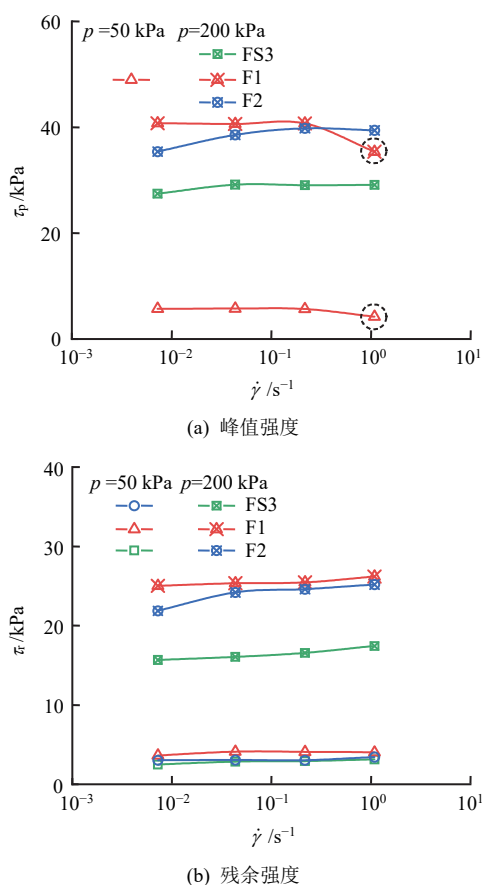


图 10 不同改良砂土的剪切强度与剪切速率相关性
Fig.10 Relationship between shear strength and rate of different conditioned sands

由于城市地铁盾构埋深一般不超过 30 m, 土舱压力设置不大于 200 kPa ^[25], 因此, 将砂土合适改良目标设为坍塌度为 $20 \sim 25 \text{ cm}$ ^[17]和 200 kPa 下屈服应力为 $10 \sim 25 \text{ kPa}$ ^[1]。由图 3 和图 8(b)可知, 该类砂土的合适改良参数为 $\text{FIR}=20\%$ 、 $\text{BIR}=10\% \sim 15\%$ 。

4.2 膨润土颗粒在改良砂土中的作用

为了进一步探明膨润土颗粒在改善改良砂土剪切行为中所起的作用, 利用光学显微镜分别获取

改良剂溶液和改良砂土的细观图像, 并在 Wang 等^[28]的研究基础上, 给出各组分微观机制示意图, 如图 11 所示。图 11(a)、11(b)分别为静置 1 min 后纯泡沫和泡沫-泥浆混合物的细观图像, 发现纯泡沫迅速衰变, 部分气泡粒径因粗化和兼并效应而较大; 至于泡沫-泥浆混合物, 由于膨润土颗粒赋存于液膜内, 液膜排液受黏性力而非惯性力控制, 排液时间延长^[28], 因而泡沫稳定性提高, 气泡平均粒径较小且尺寸差异相对较小。对比图 11(c)、11(d), 纯泡沫改良砂土中气泡平均粒径较大, 较集中地赋存于部分大孔隙中; 而泥浆-泡沫组合改良砂土中气泡平均粒径较小, 能更均匀地分布于各孔隙中, 由此可知, 与纯泡沫相比, 泡沫-泥浆混合物能更有效充当地分散砂土颗粒的“空间屏障”, 削弱颗粒骨架的强度。此外, 膨润土颗粒还吸附于砂土颗粒表面并起润滑作用, 减少颗粒间摩擦力。综上所述, 膨润土颗粒能在发挥自身降低砂土剪切强度的同时, 提高泡沫稳定性并提升了泡沫改善砂土流动性的能力。

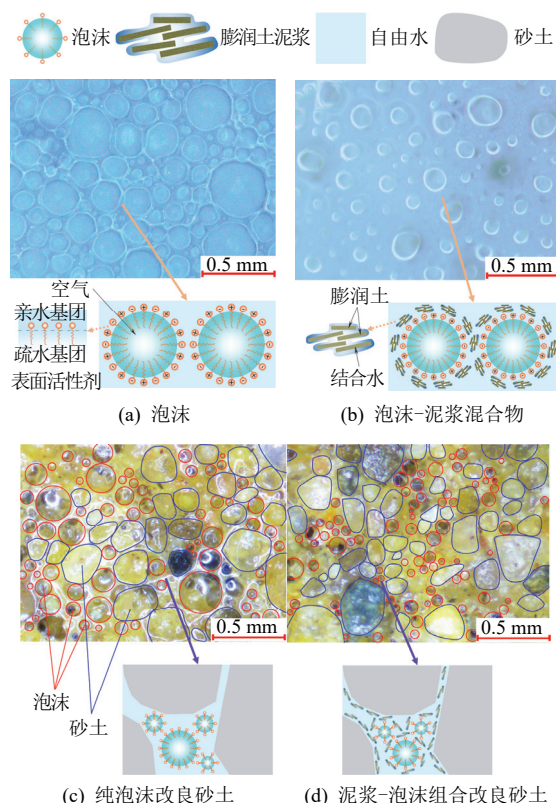


图 11 改良剂与改良砂土细观尺度成像图及微观机制示意
Fig.11 Mesoscale image and schematic diagram of conditioning agents and conditioned sands

5 结 论

为满足盾构在富水级配不良砂土地层安全掘

进的需要, 本文探究了 BIR 对改良砂土带压剪切大变形行为的影响, 阐明了土舱压力环境下泥浆-泡沫组合改良相较于纯泡沫改良的优势, 揭示了膨润土降低组合改良砂土剪切强度的细观机制。得出主要结论如下:

(1) 组合改良砂土在 $p = 50 \text{ kPa}$ 下初始孔隙比随 BIR 增大而增加, 在 $p = 200 \text{ kPa}$ 下因泥浆添加和泡沫收缩对扩大孔隙比的正负效应抵消而使初始孔隙比不随 BIR 变化; BIR 增加还提高组合改良砂土的初始饱和度, 降低其初始有效应力。

(2) 随着 BIR 增加, 组合改良砂土峰值强度和残余强度显著降低; 在 $p = 50 \text{ kPa}$ 下, 当 $\text{BIR} \geq 15\%$ 时, 有效应力和剪切强度很小, 组合改良砂土呈类流体状态。峰值强度、残余强度与有效应力的相关性均服从 Mohr-Coulomb 准则, 而有效内摩擦角对 BIR 不敏感。此外, BIR 增加使大变形后组合改良砂土的屈服应力降低, 剪切变形时固态更易转变为流态, 该现象在较高压力 ($p = 200 \text{ kPa}$) 下尤为显著。

(3) 对比常压下流动性相近的 3 类改良砂土, 发现在压力环境下, 较大的泥浆注入比或泡沫注入比均可提高孔隙比, 减小有效应力。然而, 因泡沫受压收缩, 提高泡沫注入比来降低带压改良砂土剪切强度的效果不佳, 而补充泥浆的带压组合改良砂土具有更小的剪切强度, 表明土舱压力环境下组合改良对流动性的增强效果优于纯泡沫改良。针对该类级配不良砂土, 合适组合改良参数为 $\text{FIR} = 20\%$ 、 $\text{BIR} = 10\% \sim 15\%$ 。

(4) 细观成像测试发现膨润土的存在能提高泡沫稳定性, 使气泡维持较小的粒径并较均匀地分布于改良砂土孔隙中, 从而更有效地削弱颗粒骨架强度; 再者, 膨润土吸附于砂土颗粒表面以降低颗粒间摩擦力, 双重作用降低组合改良砂土的剪切强度。

参 考 文 献

- [1] 王树英, 刘朋飞, 胡钦鑫, 等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 8-34.
WANG Shu-ying, LIU Peng-fei, HU Qin-xin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(5): 8-34.
- [2] 彭磊, 何文敏, 畅亚文, 等. 土压平衡盾构施工中泡沫改良砾砂土的试验研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 571-577.
PENG Lei, HE Wen-min, CHANG Ya-wen, et al. Experimental study of soil modifying by foam of earth pressure balance shield in sandy gravel strata[J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37(5): 571-577.
- [3] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50: 296-304.
- [4] 王树英, 令凡琳, 黄硕. 泡沫改良粗粒渣土渗透性计算模型及适用性对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2357-2365.
WANG Shu-ying, LING Fan-lin, HUANG Shuo. A permeability calculation model of foam-conditioned coarse-grained soil and its applicability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(11): 2357-2365.
- [5] 董金玉, 王闯, 周建军, 等. 泡沫改良砂卵石土的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 140-148.
DONG Jin-yu, WANG Chuang, ZHOU Jian-jun, et al. Experimental study of foam-improved sandy gravel soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(Suppl.1): 140-148.
- [6] WANG S, LIU P, HU Q, et al. Effect of dispersant on the tangential adhesion strength between clay and metal for EPB shield tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103144.
- [7] 陈焱, 王宇皓, 方勇, 等. 砂性地层土压平衡盾构切刀磨损室内试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 159-166.
CHEN Yan, WANG Yu-hao, FANG Yong, et al. Laboratory experimental study on the wear of EPB shield cutting tools in sandy stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(5): 159-166.
- [8] WANG S, NI Z, QU T, et al. A novel index to evaluate the workability of conditioned coarse-grained soil for EPB shield tunnelling[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2022, 148(6): 04022028.
- [9] 孟庆琳, 屈福政, 李守巨. 土体旋转流变仪开发与土压平衡盾构改性土体塑性流动特性实验[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1642-1648.
MENG Qing-lin, QU Fu-zheng, LI Shou-ju. Development of soil rotational rheometer and experiment on plastic flow characteristics of conditioned soil in earth pressure balance shield[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1642-1648.
- [10] WANG S, ZHONG J, PAN Q, et al. Shear behavior of foam-conditioned gravelly sands: insights from pressurized vane shear tests[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2023, 34(6): 637-648.
- [11] MORI L, ALAVI E, MOONEY M. Apparent density evaluation methods to assess the effectiveness of soil conditioning[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 67: 175-186.

- [12] 余俊, 郑靖凡, 杨鑫歆, 等. 土压平衡盾构渗流场解析解及喷涌判别研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 572-580.
- YU Jun, ZHENG Jing-fan, YANG Xin-xin, et al. Analytical solution of seepage field and identification of spewing in earth pressure balance shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.1): 572-580.
- [13] 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): 94-102.
- WANG Shu-ying, HU Qin-xin, WANG Hai-bo, 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): 94-102.
- [14] LING F, WANG S, HU Q, et al. Effect of bentonite slurry on the function of foam for changing the permeability characteristics of sand under high hydraulic gradients[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2022, 59(7): 1061-1070.
- [15] 万泽恩, 李树忱, 赵世森, 等. 富水砂性地层盾构渣土改良试验与喷涌防治技术[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 83-93.
- WAN Ze-en, LI Shu-chen, ZHAO Shi-sen, et al. Soil conditioning tests and screw conveyor spewing prevention technology of earth balance pressure shield tunneling in water-rich sandy stratum[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2022, 55(3): 83-93.
- [16] 朱碧堂, 余金, 王凌, 等. 富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 29-37.
- ZHU Bi-tang, YU Jin, WANG Ling, et al. Experimental study on soil conditioning with water bearing gravelly sand-argillaceous siltstone composite stratum[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2022, 44(5): 29-37.
- [17] JANCSECZ S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of soil conditioning in shield tunnelling experiences of LRTS Izmir[C]//Challenges for the 21st Century. Oslo: [s. n.], 1999: 865-875.
- [18] 徐征杰, 郭晓阳. 基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 194-200.
- XU Zheng-jie, GUO Xiao-yang. Optimization of bentonite parameters for shield tunneling based on response surface method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(1): 194-200.
- [19] YANG Y, LI X G, LI X C. Shear strength and compression coefficient for conditioned sand subjected to earth chamber stress levels[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2018, 2018: 1-11.
- [20] 邱龔, 杨新安, 唐卓华, 等. 富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1703-1708.
- QIU Yan, YANG Xin-an, TANG Zhuo-hua, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2015, 43(11): 1703-1708.
- [21] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145 — 2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [22] LI S, WAN Z, ZHAO S, et al. Soil conditioning tests on sandy soil for earth pressure balance shield tunneling and field applications[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2022, 120: 104271.
- [23] International Organization for Standardization. ISO13500 Petroleum and natural gas industries—drilling fluid materials—specifications and test[S]. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2008.
- [24] 钟嘉政, 王树英, 冯志耀, 等. 基于有效应力原理的泡沫改良粗粒土不排水残余剪切强度计算模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2614-2623.
- ZHONG Jia-zheng, WANG Shu-ying, FENG Zhi-yao, et al. Analytical model for undrained residual shear strength of foam-conditioned coarse-grained soils in large deformation based on effective stress principle[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(12): 2614-2623.
- [25] WANG H, WANG S, ZHONG J, et al. Undrained compressibility characteristics and pore pressure calculation model of foam-conditioned sand[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2021, 118: 104161.
- [26] QU T, FENG Y T, WANG Y, et al. Discrete element modelling of flexible membrane boundaries for triaxial tests[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 115: 103154.
- [27] ZHONG J, WANG S, QU T. Undrained vane shear strength of sand-foam mixtures subjected to different shear rates[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(6): 1591-1602.
- [28] WANG L, ZHU W, QIAN Y, et al. The new bubble-slurry for sand conditioning during EPB shield tunnelling: a laboratory scale study[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2023, 27: 2191-2201.