

三轴压缩条件下发泡流态固化土抗剪特性研究

赵东升¹ 王 珺² 姚存存¹ 张宏博² 曹树鑫¹ 陶雨晨²

(1. 济商高速公路(菏泽)有限公司, 山东菏泽 274300; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250002)

【摘要】 发泡流态固化土(FFSS)已广泛应用于回填工程中,但其性能评价多基于无侧限抗压强度,缺乏对侧向约束作用的研究。本文通过不固结不排水(UU)三轴剪切试验,重点探究了湿密度、粉土掺量和围压等因素对 FFSS 力学特性的影响规律。结果表明:试样的应力-应变曲线具有明显的弹塑性特征,符合莫尔-库仑准则;围压和湿密度的增加均可提升材料的三轴压缩强度,当湿密度从 600 kg/m³ 提高至 1200 kg/m³ 时,黏聚力增长超 250%,内摩擦角随密度增加而降低;围压可延缓强度劣化,脆性指数降低 40%~60%;粉土掺量以 35% 为临界值,此时强度与变形性能最佳。此外,本文基于试验数据构建了抗剪强度的多元回归模型,可为 FFSS 的工程设计与性能预测提供支持。

【关键词】 发泡流态固化土;三轴试验;破坏模式;应力-应变特性;抗剪强度

【中图分类号】 TU411.3; TU447

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0199

Shear characteristics of foamed flowable stabilized soil under triaxial compression conditions

ZHAO Dongsheng¹ WANG Jun² YAO Cuncun¹ ZHANG Hongbo²
CAO Shuxin¹ TAO Yuchen²

(1. Jishang Expressway (Heze) Co., Ltd., Heze 274300, Shandong, China; 2. Qilu Institute of Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

【Abstract】 Foamed Flowable Stabilized Soil (FFSS) is widely used in backfill engineering. However, its performance evaluation is mostly based on unconfined compressive strength, with limited studies addressing the influence of lateral confinement. In this study, a series of Unconsolidated Undrained (UU) triaxial shear tests were conducted to systematically investigate the effects of wet density, silt content, and confining pressure on the mechanical behavior of FFSS. The results show that the stress-strain curves of the specimens exhibit distinct elastoplastic characteristics and conform to the Mohr-Coulomb failure criterion. Both increased confining pressure and wet density contribute to enhanced triaxial compressive strength. Specifically, when wet density increased from 600 kg/m³ to 1200 kg/m³, cohesion increased by over 250%, while the internal friction angle decreased with increasing density. Confining pressure was also found to delay post-peak strength degradation, reducing the brittleness index by 40%~60%. A critical silt content of 35% was identified, at which the material achieved optimal strength and deformation performance. Moreover, a multiple regression model for shear strength was developed based on the test data, offering valuable support for the engineering design and performance prediction of FFSS.

【Key words】 foamed flowable stabilized soil; triaxial test; failure mode; stress-strain characteristics; shear strength

0 引言

近年来,泡沫轻质土因具有密度与强度可调、流动性好、施工便捷等特征,在路基填筑、台背回填、地下空洞回填等工程中得到广泛应用^[1-3]。但受限于水泥用量大、价格不稳定等因素,研发更为经济适用的泡沫轻质土成为国内外学者关注的热点问题,并先后

提出了掺入粉煤灰、高炉矿渣等替代水泥的化学改性方法^[4-7]以及矿粉、疏浚土等替代水泥的物理改性方法^[8-10],其中前者主要作为胶凝材料,后者发挥骨架结构作用,两种方法在工程中均进行了可靠性验证及推广。

黄泛平原区由黄河历史改道冲淤积作用形成,

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2024ME078)

作者简介:赵东升,男,1988年生,工学学士,高级工程师,主要研究方向为工程管理。E-mail: 342769934@qq.com

通信作者:王 珺,女,1997年生,工学硕士,博士研究生,主要研究方向为绿色建筑材料。E-mail: 202135426@mail.sdu.edu.cn

其土质主要为粒度均匀的粉土与粉质黏土,具有土层深厚、压缩性大的特点^[11]。该地区台背路基普遍存在工后沉降过大的问题,因此对轻质填料的需求尤为迫切。大量研究表明^[12-13],粉土可作为外掺骨料替代水泥加入泡沫轻质土中,该复合材料具有良好的强度及耐久性能。在材料配比优化研究方面,Zhang 等^[14]系统揭示了粉土含量与粗颗粒组分对泡沫混凝土性能的影响机制:当材料处于高密度、粉土掺量($\leq 40\%$)与粗颗粒含量($\geq 40\%$)适宜配比时,可获得最优的力学性能。Wu 等^[15]开展的系列耐久性试验同样表明,当粉土掺入量为 20%~35% 时,可有效提升泡沫轻质土试件密实度及抗变形能力,且展现出优异的抗环境劣化能力。鉴于该材料兼具流态浇筑特性与土体固化优势,且其在组成与性能上不同于传统以水泥与泡沫为主的泡沫轻质土,本文将之定义为发泡流态固化土(Foamed Flowable Stabilized Soil,简称 FFSS),以突出其掺入粉土骨料后的结构致密性与力学性能提升特征。

目前,关于泡沫轻质土的材料性能评价多基于无侧限抗压强度,然而在实际工程中该材料多为大体积填筑体,必然承受侧向围压的约束效应。为深入探究侧向围压的约束效应,有必要开展三轴压缩试验。许江波等^[16]基于 GDS 三轴试验系统,系统研究了不同围压条件下聚丙烯纤维掺量对泡沫轻质土剪切强度特性的影响规律,发现材料的剪切强度与黏聚力参数随纤维添加量呈先增后减的非线性变化趋势,并在 0.75% 掺量时达到峰值强度状态。苏步云^[17]通过三轴试验发现,围压能有效抑制剪切裂缝扩展,使材料稳定阶段应力提升约 18%~25%。其研究进一步揭示,随着围压升高,试件破坏模式由脆性开裂破坏,转为典型剪切滑移破坏。严科等^[18]通过对湿重度 5.5 kN/m³ 的泡沫轻质土进行不固结不排水三轴剪切试验发现,随着围压的增大,材料竖向抗压屈服强度呈现递减趋势,并指出这一现象与泡沫轻质土内部微裂纹在围压作用下扩展引发的脆性破坏机制密切相关。因此,系统开展三轴压缩试验研究,精准揭示围压约束下泡沫轻质土的强度演化规律与破坏机理,对完善其大体积工程应用的理论体系及优化设计方法具有重要现实意义。

为揭示发泡流态固化土(FFSS)在三轴压缩条件下的力学响应特性,本文采用粗粒土大三轴试验系统,综合考虑材料配比、湿密度及围压变化,进行了不固结不排水(UU)条件下的三轴剪切试验,重点分析了试样破坏模式、应力-应变关系及抗剪强度指标变

化规律,构建了基于围压约束效应的强度预估模型。研究结论可为 FFSS 的工程设计与推广应用提供理论支持。

1 试验方案

1.1 试验材料及制备

发泡流态固化土(FFSS)由水泥、粉土、水、泡沫组成。其中,水泥采用 P-O 42.5 普通硅酸盐水泥,其物理力学性能如表 1 所示。发泡剂采用复合型发泡剂,其主要性能指标见表 2,泡沫通过发泡机经压缩空气制得。为验证发泡流态固化土(FFSS)在不同区域粉土条件下的适用性,本文绘制了来自河南濮阳、山东菏泽及山东聊城三地粉土的颗粒级配曲线,如图 1 所示。由图可见,三地粉土颗粒组成整体以粉粒为主,差异主要体现在细颗粒比例及均匀系数(C_u)上:濮阳粉土 $C_u=2.82$, $C_c=1.06$; 菏泽粉土 $C_u=1.88$, $C_c=0.88$; 聊城粉土 $C_u=4.87$, $C_c=1.85$ 。本研究所选用的粉土样品取自山东聊城。

表 1 水泥的物理力学性能
Tab. 1 Physical and mechanical properties of cement

比表面积 ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准稠度/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
358	28.2	192	231	28.1	50.7	6.5	9.6

表 2 发泡剂性能指标
Tab. 2 Properties of the foaming agent

稀释倍数	发泡倍数	气泡群密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 h 泌水量/mL	1 h 沉降距/mm
60	20	51	22	2

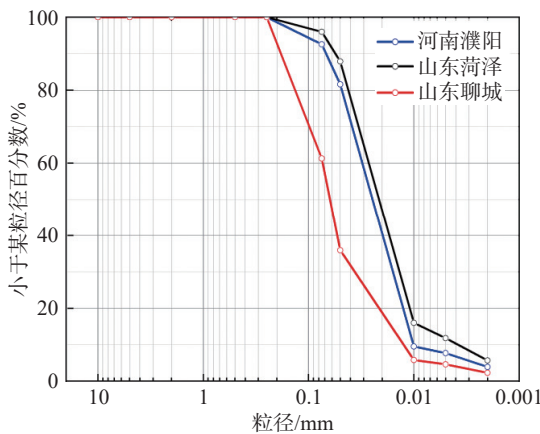


图 1 粉土级配曲线
Fig. 1 Particle-size distribution curve of silt

1.2 试样制备

本文 FFSS 的配比设计方法参考《公路路基设计规范》(JTG D 30—2015)及《泡沫混凝土应用技术规程》(JGJ/T 341—2014)。设计步骤如下:

(1)确定目标湿密度:根据设计要求和试验方案,确定湿密度为 600, 800, 1000, 1200 kg/m³。在每个湿密度下粉土掺量分别为 0%, 20%, 35%, 50%, 65%。

(2)按式(1)一式(5)计算水泥浆单方材料组成、湿密度:

$$M_c = \frac{1}{Y} \quad (1)$$

$$M_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot M_c \quad (2)$$

$$M_w = \frac{M_c}{b} \quad (3)$$

$$R_L = M_c + M_s + M_w \quad (4)$$

$$Y = \frac{1}{b \cdot (1-\alpha) \cdot 1000} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{\rho_s} \quad (5)$$

式中: M_c 为每方水泥浆体中水泥质量, kg/m³; M_s 为每方水泥浆体中粉土质量 kg/m³; M_w 为每方水泥浆体中水质量, kg/m³; R_L 为每方水泥净浆的质量, 即水泥浆的密度, kg/m³; α 为水泥浆中粉土占水泥质量的百分数; Y 为计算参数; b 为水灰质量比系数, 水灰质量比=1 : b ; ρ_c 为水泥的密度, kg/m³; ρ_s 为粉土的密度, kg/m³。

(3)按式(6)一式(9)计算 FFSS 配合比单方材料组成、气泡率:

$$\lambda = \frac{R_L - R_{fw}}{R_L - \rho_a} \quad (6)$$

$$m_w = M_w \cdot (1 - \lambda) \quad (7)$$

$$m_c = M_c \cdot (1 - \lambda) \quad (8)$$

$$m_s = M_s \cdot (1 - \lambda) \quad (9)$$

式中: λ 为每方 FFSS 气泡率; ρ_a 为泡沫的密度, kg/m³; R_{fw} 为 FFSS 湿密度, kg/m³; m_w 为每方 FFSS 中水的质量, kg/m³; m_c 为每方 FFSS 中水泥的质量, kg/m³; m_s 为每方 FFSS 中粉土的质量, kg/m³。

(4)为节约篇幅,下面以粉土掺量 20% 为例说明配比组成,如表 3 所示。其中,粉土掺量为粉土质量占混合料中固体质量的百分比。

表 3 FFSS 配合比
Tab. 3 Mix proportions of FFSS

湿密度 /(kg·m ⁻³)	固体质量 /(kg·m ⁻³)	水泥用量 /(kg·m ⁻³)	粉土用量 /(kg·m ⁻³)	用水量 /(kg·m ⁻³)	泡沫用量 /(kg·m ⁻³)
600	384.71	308.35	77.09	173.44	40.61
800	527.20	422.55	105.64	237.68	33.42
1000	669.69	536.75	134.19	301.92	26.24
1200	812.17	650.95	162.74	366.16	20.15

FFSS 的制备流程包括以下步骤:(1)称取相应质量的粉土、水泥、水和发泡剂等原材料,将发泡剂与水 1 : 50 进行混合;(2)通过发泡机将稀释后的发泡液通过压缩空气进行打发,生成密度 55 kg/m³ 的泡沫;(3)将粉土、水泥和水按顺序加入搅拌桶中搅拌,采用手持搅拌器以高速搅拌 90 s,形成均匀的水泥浆体;(4)将打发好的泡沫称重后加入搅拌好的浆体中,并以低速搅拌 60 s,以确保泡沫均匀分布;(5)将混合好的 FFSS 浆体倒入模具中,放入标准养护室内成型并养护,确保最终性能达到要求。

1.3 试验方案

三轴压缩试验步骤参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行,采用 DJSZ-100D 环境作用与疲劳载荷耦合下粗粒土材料结构性能变化行为试验系统进行不固结不排水(UU)试验,试样为 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆柱体,试验设备及试样见图 2。



(a) 试验设备



(b) 试样

图 2 DJSZ-100D 三轴试验系统及试验样品
Fig. 2 DJSZ-100D triaxial test system and specimens

本研究针对 FFSS 在不同湿密度、粉土掺量及围压条件下进行了静态三轴压缩试验, 试验参数如表 4 所示。为保证试验数据的准确性与可靠性, 每组工况均制备 3 个试件并取算术平均值。试验时先施加侧向围压, 达到目标值后立即进行轴向加载, 加载速率为 0.1 mm/s, 直至试样破坏。考虑 FFSS 成型后具有一定自立性, 实际工程侧限应力较低。结合公路工程三背回填、空洞填筑等典型工况下的土压力作用模式, 并参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) 关于三轴试验的相关要求, 本试验选取围压为 100, 200, 300 kPa, 分别对应低、中、高侧限应力工况, 可有效模拟实际工程受力特征。

表 4 试验方案设计
Tab. 4 Design of the test scheme

湿密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉土掺量/%	试验围压/kPa
600, 800, 1000, 1200	0, 20, 35, 50, 65	100, 200, 300

注: 为便于比较分析, FFSS-800-20-100 表示湿密度 800 kg/m^3 、粉土掺量 20%、围压为 100 kPa 时的试样, 其余试样命名类推。

2 试验结果及其分析

2.1 试样破坏形态

图 3 为不同围压、粉土掺量及湿密度条件下的 FFSS 试件的三轴剪切破坏形态, 图 4 为无侧限抗压强度后的试样破坏形态。通过对比发现: 无侧限抗压强度试样表现为典型的竖向劈裂张拉破坏, 形成贯穿的纵向裂缝; 而三轴试验中即使施加较低围压, 其破坏模式也已呈现出从张拉主导型向剪切主导型的转变。结合图 3(a) 可以看出: $\sigma_3=100 \text{ kPa}$ 时, 试样形成贯穿剪切斜裂缝, 但仍保留部分张拉破坏特征; $\sigma_3=200 \text{ kPa}$ 时, 试样发生纵向贯穿裂缝, 并伴随部分压缩破坏; $\sigma_3=300 \text{ kPa}$ 时, 则表现为整体鼓胀与孔结构粉碎性破坏。这一对比表明, 围压的引入显著改变了 FFSS 的破坏机制, 即使低围压条件也能有效抑制劈裂破坏, 促使其向剪切破坏模式发展。

图 3(b) 展示了不同粉土掺入比条件下湿密度为 800 kg/m^3 、围压为 100 kPa 的试样破坏形态。对比可知, 粉土掺入比为 20%, 35% 时, 试件破坏形式表现为少量纵向贯穿性裂缝; 而掺入比为 50% 时, 试件破坏表现为裂缝数量明显增多的贯穿性开裂; 掺入比为 65% 时则表现为试件整体压溃破坏。这是由于粉土作为惰性材料, 掺量增加虽增强了骨架填充效果, 但水泥用量随之减少, 颗粒间胶结力减弱, 导致结构整体稳定性下降。因此, 粉土掺入比以不超过 50% 为宜。



图 3 不同工况下的 FFSS 三轴压缩破坏形态
Fig. 3 Failure patterns of FFSS under triaxial compression



图 4 无侧限抗压强度下的 FFSS 破坏形态
Fig. 4 Failure modes of FFSS in the unconfined compressive strength test

选取不同湿密度条件下, 粉土掺入比为 20%、围压为 200 kPa 时的试件, 其破坏形态如图 3(c) 所示。对比可知, 在较低湿密度范围内 ($\leq 800 \text{ kg/m}^3$), 试件多表现为贯穿性剪切破坏, 如湿密度为 600 kg/m^3 时, 表现为整体压溃破坏。在较高密度范围内 ($\geq 1000 \text{ kg/m}^3$), 其抗剪能力明显增强, 试件仅表现为局部压缩变形, 未出现贯穿性剪切破坏。这是由于高密度下的水泥用量多、微孔结构数量少, 有效限制了裂缝的

产生与扩展。因此,FFSS可适当提高湿密度,以减轻剪切破坏。

2.2 FFSS 应力-应变关系

2.2.1 应力-应变曲线特征

根据 2.1 节分析结果,选取粉土掺入比为 35% 的 FFSS 作为分析对象,研究其在不同围压下的应力-应变曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出,湿密度为 800 kg/m^3 和 1000 kg/m^3 的试样的应力-应变关系存在明显差异,这是由于 800 kg/m^3 试样孔隙率较

高,孔隙压溃过程能够吸收能量,抑制裂缝扩展,因此表现为轻微应变软化并保持稳定残余强度。而 1000 kg/m^3 试样结构致密,孔隙率低,虽然刚度和强度较高,但塑性变形能力差,峰后弹性应变能快速释放导致应力急剧下降,呈现脆性破坏特征。此外,整个加载过程可划分为 4 个阶段:

(1)阶段一:弹性变形阶段。加载初期,偏应力 q 随轴向应变 ϵ_1 线性增大。同时随围压增大,其弹性模量也略有增大,具体模量变化范围如图 6 所示。

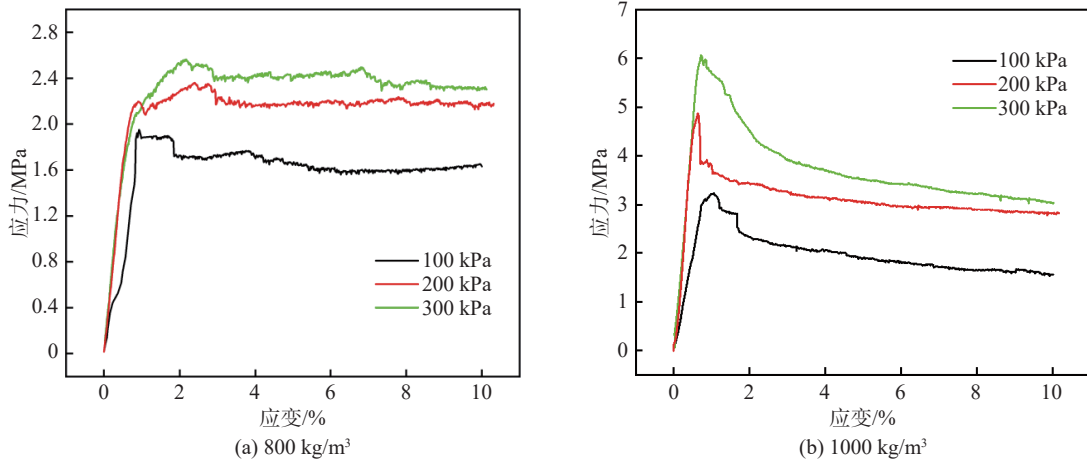


图 5 不同工况下试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of FFSS under different conditions

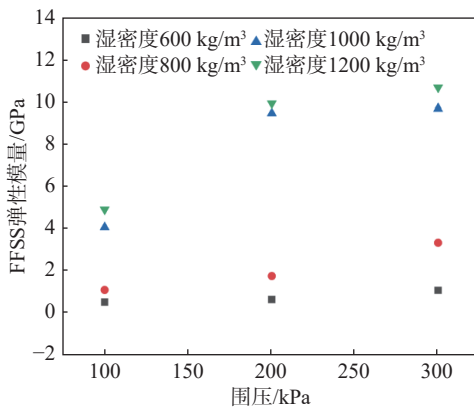


图 6 FFSS 弹性模量

Fig. 6 Elastic modulus of FFSS

(2)阶段二:塑性屈服阶段。此阶段偏应力 q 随轴向应变 ϵ_1 呈非线性增长关系,且增长速率减缓,表明材料内部微孔隙开始坍塌,产生塑性屈服。但该过程持续时间与湿密度呈负相关,即湿密度越大,该过程持续越短。

(3)阶段三:脆性破坏阶段。此阶段偏应力 q 达到峰值后迅速下降,且峰值与围压和湿密度均密切相关,具体数值对比如图 7 所示。由图 7 可知,FFSS 的峰值强度随围压和湿密度增加显著提升,高湿密度

材料在高压环境下表现出优异的抗破坏能力。

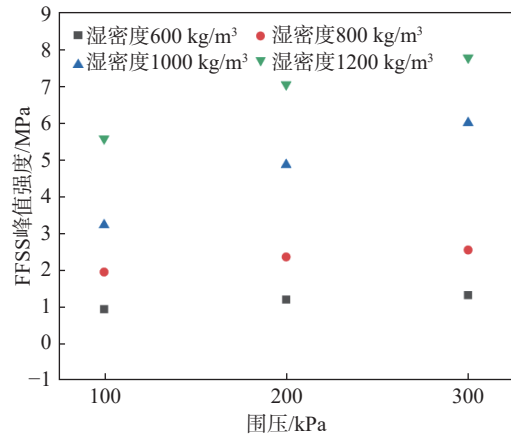


图 7 FFSS 峰值强度

Fig. 7 Peak strength of FFSS

(4)阶段四:FFSS 脆性破坏后,由于围压的存在,仍具有一定的承载能力。而随着轴向应变的持续增加,偏应力逐渐降低,并保持一定的残余强度,如图 8 所示。由图中数据可以得出,低湿密度试样降低幅度约为 12%,高湿密度试样降低幅度约 50%,说明低湿密度试样峰后强度衰减减缓,表现出良好的延性和残余承载能力。

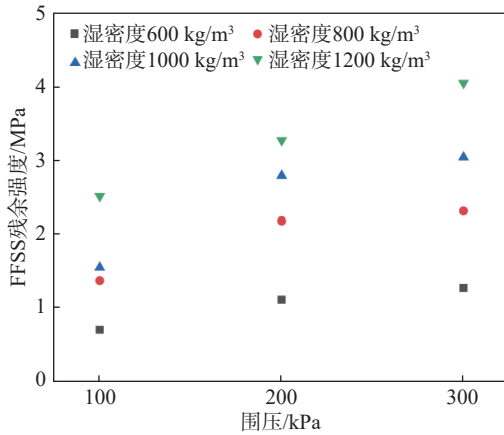


图 8 FFSS 残余强度

Fig. 8 Residual strength of FFSS

上述对应力-应变曲线的分析主要为定性描述。为定量评价湿密度、围压及粉土掺量等因素的影响,下文引入脆性指数进行深入分析。

2.2.2 湿密度的影响

本文引入评价土体破坏后强度下降程度的脆性指数 I_B 来评价土体材料破坏后的强度衰减程度,其定义见式(10)。

$$I_B = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ult}}} - 1 \quad (10)$$

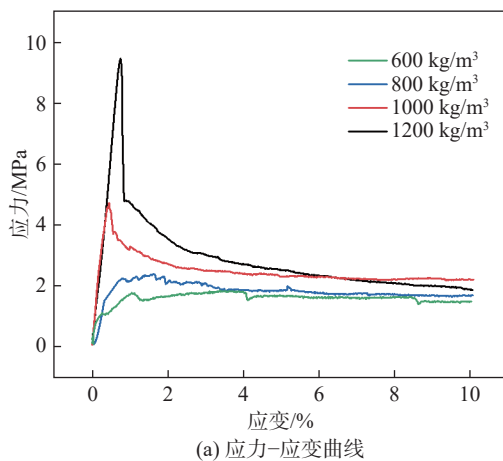
式中: I_B 为脆性指数; $\sigma_{\max}$ 为材料在受力过程中达到

的峰值强度(即最大应力值); σ_{ult} 为破坏后的残余强度。该指数通过量化峰值强度与残余强度的差异,能够直观反映材料的延性特征: I_B 值越小,表明材料破坏后强度损失越少,延性越优;反之, I_B 值越大,则材料表现为显著的脆性破坏特征,强度骤降明显。

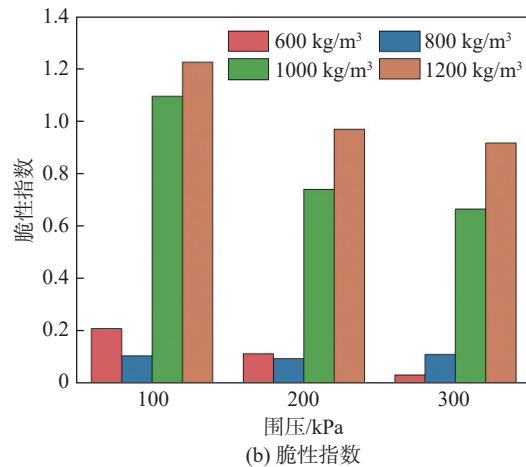
图 9 展示了围压为 100 kPa、粉土掺量为 35% 条件下,不同湿密度试样的应力-应变曲线及脆性指数。从图 9(a)可以看出,湿密度的增加显著提升了试样的峰值强度,但峰后应力下降的速率也随之加快。在图 9(b)中,围压为 300 kPa 时,1000 kg/m³ 和 1200 kg/m³ 试样的脆性指数分别达到 0.67 和 0.92,明显高于 800 kg/m³ 和 600 kg/m³ 试样。

2.2.3 围压的影响

图 10 展示了 FFSS 在不同围压作用下的应力-应变特性及其脆性指数演化规律。从图 10(b)的脆性指数曲线可以看出,在试样湿密度相同的条件下,随着围压的增大,材料的脆性指数呈现显著下降趋势,且湿密度越高的试样脆性指数降幅越大。具体而言,当围压从 100 kPa 提升至 300 kPa 时,湿密度为 1000 kg/m³ 的试样脆性指数由 1.1 降至 0.67,降幅达 0.43;而湿密度为 600 kg/m³ 的试样在同等围压变化范围内,脆性指数仅降低 0.18,表明高密度材料对围压变化更为敏感。



(a) 应力-应变曲线



(b) 脆性指数

图 9 不同湿密度下 FFSS 的力学响应

Fig. 9 Mechanical response of FFSS under different wet densities

2.2.4 粉土掺量的影响

图 11 揭示了湿密度 1000 kg/m³ 条件下,不同粉土掺量对 FFSS 力学行为的影响规律。图 11(a)显示:粉土掺量 0% 和 20% 的试样在达到峰值应力后,应力迅速下降,表现出典型的脆性破坏特征;而掺量增至 50% 或 65% 时,材料在峰值后转为平缓的应变软化阶段。该现象与文献 [19] 观察到的规律一致。

图 11(b)的脆性指数曲线显示:在各湿密度水平下,粉土掺量为 0~35% 时,脆性指数逐渐升高,并在粉土掺量 35% 左右时达到峰值;当粉土掺量进一步提高至 50% 及 65% 时,脆性指数出现下降趋势。这表明粉土掺量能够通过改变材料微观结构特征,显著调控其宏观脆-韧性能。当粉土掺量达 35% 时,对应最优力学性能平衡点。

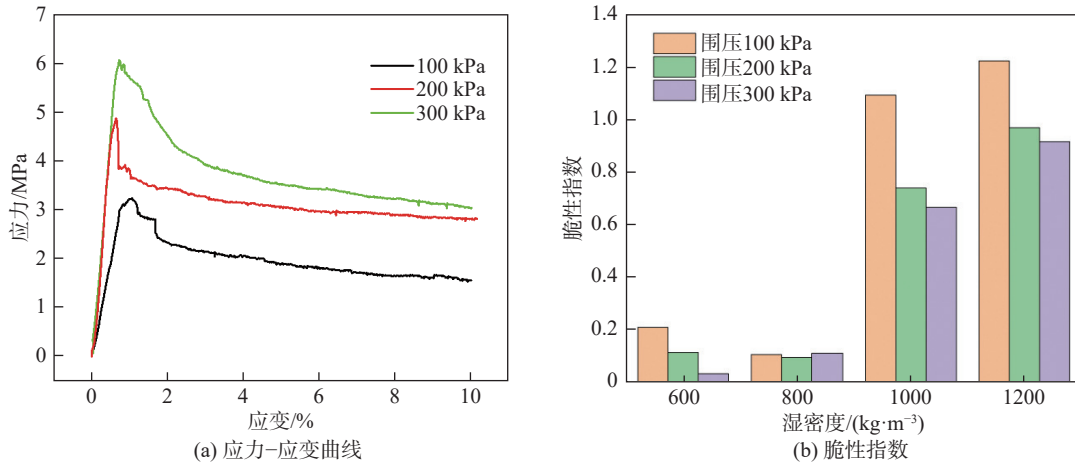


图 10 不同围压下 FFSS 的力学响应

Fig. 10 Mechanical response of FFSS under different confining pressures

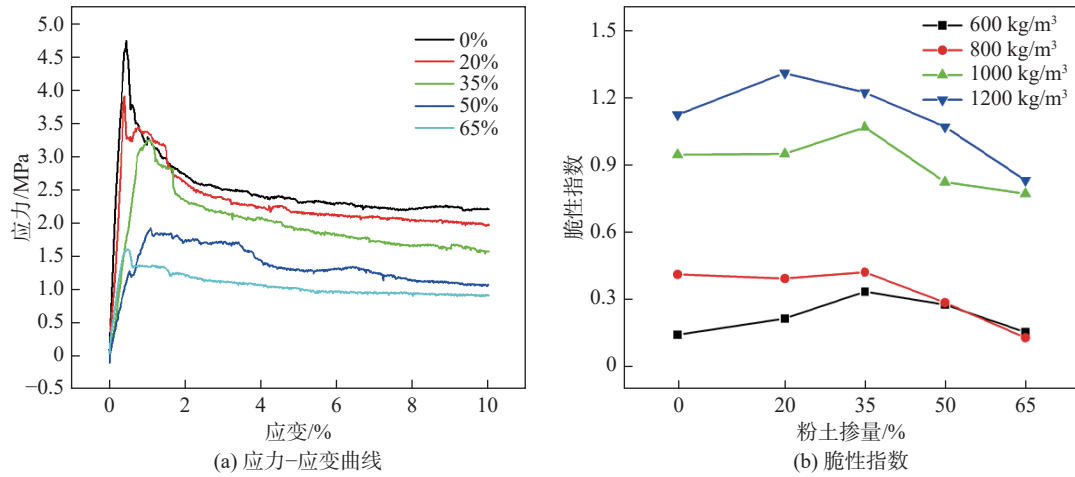


图 11 不同粉土掺量 FFSS 的力学响应

Fig. 11 Mechanical response of FFSS with different silt contents

为进一步揭示粉土掺量调控下 FFSS 材料强度演化的微观机理,本文选取湿密度 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,粉土掺量分别为 0%, 35%, 65% 的试样进行扫描电子显微镜(SEM)观察,结果见图 12。

从图 12 可以看出:未掺入粉土时,试样内部以水泥水化产物为主,孔隙结构较为发育,但颗粒间胶结较弱,界面结合松散;而在掺入 35% 粉土后,粉土颗粒有效填充了原始孔隙,浆体分布更为均匀,结构显著致密,颗粒间形成较强的胶结桥梁,表现出良好的结构完整性;当掺量增至 65% 时,虽然填充作用进一步增强,但由于水泥用量相对减少,颗粒表面水化产物明显减少,胶结体系变稀疏,导致颗粒间结合力下降,整体结构趋于疏松,出现大量微裂缝。

上述微观分析结果表明,添加适量粉土有助于形成致密结构,增强水泥基胶结网络的完整性,从而提升宏观抗剪强度。而掺量过高则破坏了水泥浆体的连续性,削弱颗粒间连接强度,导致材料强度下降。

2.3 FFSS 抗剪强度

2.3.1 抗剪强度的确定

基于莫尔-库仑破坏准则,本文绘制了不同湿密度及不同粉土掺量下的 FFSS 摩尔应力圆,并得到应力圆的抗剪强度包络线,如图 13 所示。抗剪强度包络线与纵坐标截距即为黏聚力 c ,与水平轴的夹角为内摩擦角 φ ^[20]。

图 14 通过抗剪强度包络线分析揭示了 FFSS 黏聚力与内摩擦角对材料参数的响应规律。图 14(a)显示,当湿密度一定时,内摩擦角随粉土掺量增加呈持续递减趋势。以湿密度 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 为例,粉土掺量从 0% 增至 60% 时,内摩擦角由 30° 降至 20° ,降幅达 33.3%;而当湿密度提升至 800, 1000, $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,内摩擦角降幅分别为 19.44%, 18.18% 和 14%。这种变化表明,高湿密度形成的致密结构可部分抵消粉土掺量增加引起的摩擦性能劣化。

与之相反,图 14(b)显示黏聚力参数与湿密度增

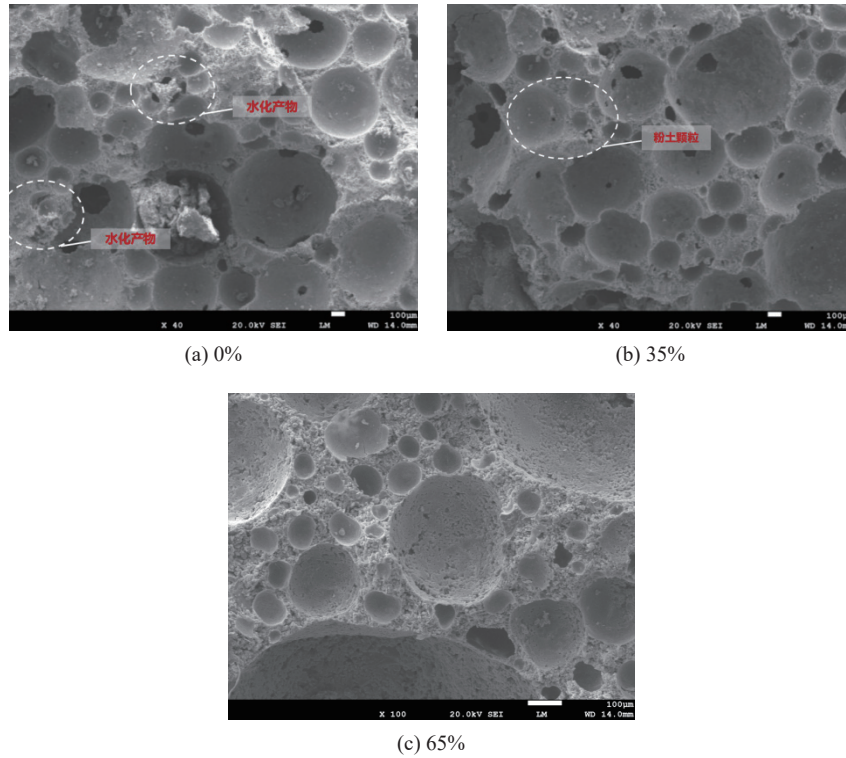


图 12 不同粉土掺量 FFSS 的微观结构图

Fig. 12 Microstructure images of FFSS with different silt contents

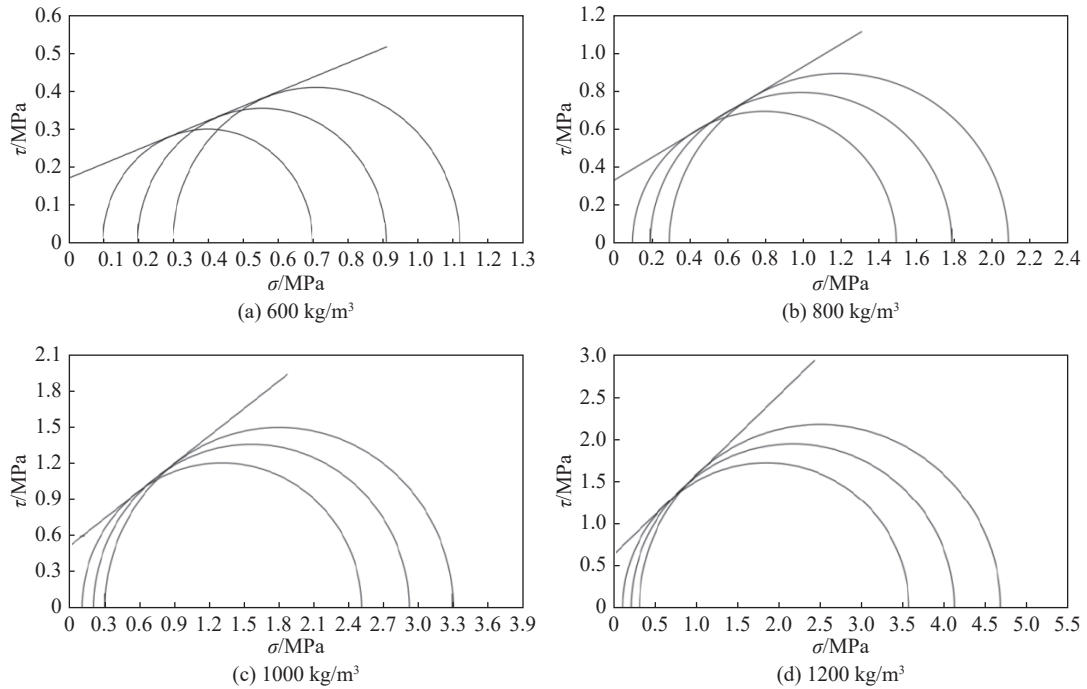


图 13 FFSS 应力莫尔圆

Fig. 13 Mohr's circles of FFSS stress

长呈正比。当湿密度从 600 kg/m^3 增加到 1200 kg/m^3 时,不同粉土掺量(0%, 20%, 35%, 50%, 65%)试样的黏聚力分别提升了 257.74%, 306.36%, 277.7%, 280.67% 和 339.4%。这一结果进一步表明,高湿密度能够有效强化材料的胶结性能。此外,在固定湿密

度条件下,黏聚力随粉土掺量增加持续衰减,这与过量粉土削弱水泥基胶结网络完整性的机理相符。

2.3.2 抗剪强度回归预估模型

基于前文对抗剪强度参数与关键变量关联规律的试验研究,已明确材料强度特性受多因素耦合作用

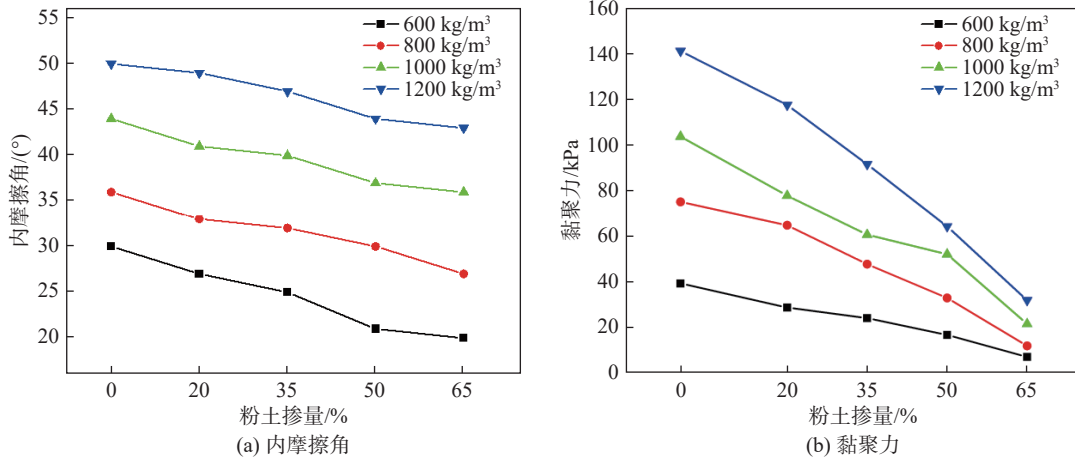


图 14 抗剪强度参数随粉土掺量的变化规律

Fig. 14 Variation of shear strength parameters with silt content

的影响。然而,单一参数分析难以全面量化各变量对抗剪强度的交互效应。为此,本节拟通过多元回归分析方法,构建湿密度、粉土掺量为自变量的抗剪强度参数预测方程。鉴于 FFSS 填筑体具有低侧限应力特征,因此本模型基于围压为 100 kPa 建立。

为确保参数量纲统一性,选取湿密度为 600 kg/m³、粉土掺量为 0% 作为基准条件,将内摩擦角和黏聚力分别除以基准值(30°和 39.47 kPa),转化为无量纲参数 $\varphi_{\text{normalized}}$ 和 $c_{\text{normalized}}$ 。基于 2.3.1 节的试验数据,构建了湿密度(ρ)和粉土掺量(P)对抗剪强度参数的影响模型,其数学表达式如式(11)与式(12)所示。图 15 的拟合曲线显示,模型预测值与试验数据高度吻合:内摩擦角回归模型(式(11))拟合度

$R^2=0.99$,黏聚力模型(式(12))拟合度 $R^2=0.98$,表明两个模型均具备较高的预测精度。

$$\varphi_{\text{normalized}} = 1.23 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho}{\rho_w} \right) - 4.49 \times 10^{-3} P + 0.23 \quad (11)$$

$$c_{\text{normalized}} = 4.4 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho}{\rho_w} \right) - 1.49 \times 10^{-4} P^2 + 0.024 P - 4.61 \times 10^{-5} \left(\frac{\rho}{\rho_w} \right) P - 1.68 \quad (12)$$

式中: $\varphi_{\text{normalized}}$ 为无量纲化内摩擦角; $c_{\text{normalized}}$ 为无量纲黏聚力; ρ 为 FFSS 单位湿密度, kg/m³; ρ_w 为单位水密度, kg/m³; P 为粉土掺量, %。

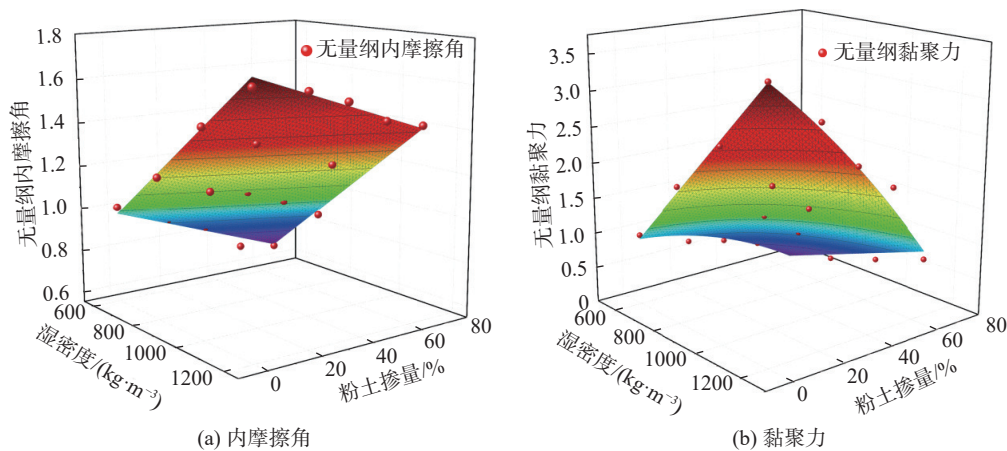


图 15 抗剪强度预测模型

Fig. 15 Prediction model for shear strength of FFSS

3 结论

本文通过三轴剪切试验系统地研究了 FFSS 在不同围压、湿密度及粉土掺量条件下的力学行为与破坏特性。结合应力-应变曲线分析、脆性指数评价

及抗剪强度回归分析,揭示了各影响因素对材料强度与延性的作用规律,得到主要结论如下:

(1) 围压的约束效应可显著改变 FFSS 的破坏形态,材料由剪切断裂转变为塑性压密破坏,同时脆性

指数明显降低,表现出更强的残余强度和延性。

(2)试样的峰值强度随湿密度增加而显著提高,这源于材料内部结构的致密化。当湿密度升至 1200 kg/m^3 时,脆性指数最高达 0.92,表现为高强度、低延展性的脆性材料特征。

(3)随着粉土掺量的增加,发泡流态固化土由脆性破坏逐渐转变为应变软化破坏,其脆性指数先升高后降低,在掺量为 35% 左右达到峰值。粉土掺量过高会削弱颗粒间胶结力,建议掺入比不超过 50%。

(4)基于试验数据分析,构建了多元回归预估模型,可由 FFSS 湿密度和粉土掺入比预测 FFSS 抗剪强度参数,为工程配比设计与性能调控提供依据。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H B, WANG J, LIU Z K, et al. Strength characteristics of foamed concrete under coupling effect of constant compressive loading and freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134565.
- [2] 李 硕, 杨军宏. 泡沫轻质土在高速公路改扩建工程中的应用 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(S1): 1-6. (LI S, YANG J H. Application of foamed lightweight soil in expressway reconstruction and extension project[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(S1): 1-6. (in Chinese))
- [3] ZHANG H B, WANG J, WANG C, et al. Using foamed concrete layer to optimize the design of pavement and subgrade structures: from the perspectives economy and durability[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(10): 12859-12874.
- [4] 张彩利, 王 犇, 于焱龙, 等. 大掺量钢渣微粉-水泥泡沫轻质土的性能 [J]. 中国粉体技术, 2024, 30(3): 51-63. (ZHANG C L, WANG B, YU Y L, et al. Performance of foam lightweight soil with large amount of steel slag powder-cement[J]. *China Powder Science and Technology*, 2024, 30(3): 51-63. (in Chinese))
- [5] HASHEMMONIRI S, FATEMI A. Optimization of lightweight foamed concrete using fly ash based on mechanical properties[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, 8(1): 59.
- [6] GUAN L L, CHEN Y G, YE W M, et al. Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling: physical properties, mechanical properties, and microstructure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 134: 104995.
- [7] 金瑾秋, 马千越, 康星亮, 等. 细砂及粉煤灰基泡沫轻质土应力与应变特性试验研究 [J]. 江苏建筑, 2024(1): 138-140, 144. (JIN J Q, MA Q Y, KANG X L, et al. Stress and strain characteristics of foam lightweight soil composited with fly ash and fine sand[J]. *Jiangsu Construction*, 2024(1): 138-140, 144. (in Chinese))
- [8] 陈红卫, 严 平, 刘景禹, 等. 基于疏浚土的泡沫混凝土配合比研究 [J]. 水道港口, 2025, 46(1): 120-126. (CHEN H W, YAN P, LIU J Y, et al. Study on the mix proportion of foamed concrete based on dredged soil[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2025, 46(1): 120-126. (in Chinese))
- [9] 丁 慧, 孙秀丽, 刘文化, 等. 固化疏浚淤泥作路基材料工程特性试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 11-18. (DING H, SUN X L, LIU W H, et al. Experimental analysis of engineering properties of solidified sludge as roadbed filling material[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(2): 11-18. (in Chinese))
- [10] 赵正峰, 王国栋, 王笑风, 等. 掺加黏土的固废基泡沫轻质土强度和耐久性研究 [J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 45-51, 59. (ZHAO Z F, WANG G D, WANG X F, et al. Preparation and properties of solid waste foam lightweight soil containing clay[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2024, 40(1): 45-51, 59. (in Chinese))
- [11] 宋修广, 张宏博, 王松根, 等. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1594-1602. (SONG X G, ZHANG H B, WANG S G, et al. Hydrophilic characteristics and strength decay of silt roadbed in Yellow River alluvial plain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(10): 1594-1602. (in Chinese))
- [12] WU J Q, WANG J, LIU M P, et al. Dynamic properties of silt-based foamed concrete as filler in subgrade[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(10): 04022241.
- [13] ZHANG H B, ZHANG X Y, QI X L, et al. Effect of ambient temperature on the properties and action mechanism of silt-based foamed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: 125379.
- [14] ZHANG H B, QI X L, MA C Y, et al. Effect analysis of soil type and silt content on silt-based foamed concrete with different density[J]. *Materials*, 2020, 13(17): 3866.
- [15] WU J Q, LV C, PI R D, et al. The stability and durability of silt-based foamed concrete: a new type of road engineering material[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124674.
- [16] 许江波, 王元直, 骆永震, 等. 加筋泡沫轻质土三轴剪力学特性 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 120-133. (XU J B, WANG Y Z, LUO Y Z, et al. Triaxial

- shear mechanical properties of reinforced foam lightweight soil[J]. [Journal of Traffic and Transportation Engineering](#), 2020, 20(4): 120-133. (in Chinese))
- [17] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017. (SU B Y. Mechanical properties and elastoplastic damage constitutive model for foamed concrete[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [18] 严科, 赵军涛, 李晓涵, 等. 不同加载条件下泡沫轻质土力学特性试验研究 [J]. [市政技术](#), 2022, 40(10): 6-12. (YAN K, ZHAO J T, LI X H, et al. Experimental study on mechanical properties of foamed lightweight soil under different loading[J]. [Journal of Municipal Technology](#), 2022, 40(10): 6-12. (in Chinese))
- [19] 张宏博, 刘明朋, 孙玉海, 等. 粉土基泡沫轻质土三轴力学特性 [J]. [山东大学学报 \(工学版\)](#), 2022, 52(1): 39-46,57. (ZHANG H B, LIU M P, SUN Y H, et al. Triaxial mechanical characteristic of the silt-based foamed Concrete[J]. [Journal of Shandong University \(Engineering Science\)](#), 2022, 52(1): 39-46,57. (in Chinese))
- [20] 袁化强, 朱登元, 张宏庆, 等. 三轴应力条件下泡沫轻质土压缩特性 [J]. [硅酸盐通报](#), 2020, 39(10): 3379-3385. (YUAN H Q, ZHU D Y, ZHANG H Q, et al. Compression characteristics of foamed lightweight soil under triaxial stress[J]. [Bulletin of the Chinese Ceramic Society](#), 2020, 39(10): 3379-3385. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-30