

# 三轴应力条件下粉土基泡沫轻质土压缩特性

王艺璇<sup>1\*</sup>, 密启亮<sup>2#</sup>, 陈宁<sup>2</sup>, 孙源<sup>3</sup>, 范作林<sup>4</sup>

<sup>1</sup>山东长兴路桥工程集团有限公司, 山东 新泰

<sup>2</sup>新泰市交通运输局公路事业发展中心, 山东 新泰

<sup>3</sup>云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

<sup>4</sup>山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘要

为探究粉土基泡沫轻质土在三轴应力条件下的压缩与剪切特性, 本文通过不固结不排水(UU)三轴试验, 系统研究了不同粉土掺量(0%, 25%, 50%)与围压(100 kPa, 300 kPa, 500 kPa)对材料应力-应变行为、抗剪强度及破坏模式的影响。结果表明: 粉土基泡沫轻质土的应力-应变曲线呈现典型的应变硬化或软化特征, 可分为弹性、硬化/软化和压密三个阶段; 围压升高显著提升峰值应力与残余强度, 而粉土掺量增加则导致黏聚力与内摩擦角显著下降, 掺量50%时黏聚力降幅达78.8%; 破坏模式随围压与掺量变化由剪切破坏向压密破坏过渡。抗剪强度参数远高于现行规范推荐值, 表明材料具有良好的工程适用性。研究结果可为粉土基轻质土在路基工程中的设计与应用提供理论依据。

## 关键词

粉土基泡沫轻质土, 三轴试验, 应力-应变, 抗剪强度, 破坏模式

# Compression Characteristics of Silt-Based Foam Lightweight Soil under Triaxial Stress Conditions

Yixuan Wang<sup>1\*</sup>, Qiliang Mi<sup>2#</sup>, Ning Chen<sup>2</sup>, Yuan Sun<sup>3</sup>, Zuolin Fan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Shandong Changxing Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Xintai Shandong

<sup>2</sup>Highway Development Center, Xintai Transportation Bureau, Xintai Shandong

<sup>3</sup>School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

<sup>4</sup>School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王艺璇, 密启亮, 陈宁, 孙源, 范作林. 三轴应力条件下粉土基泡沫轻质土压缩特性[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 322-332. DOI: 10.12677/ms.2026.165125

## Abstract

To explore the compressive and shear characteristics of silt-based foam lightweight soil under triaxial stress conditions, this paper conducts a non-consolidated and non-drained (UU) triaxial test. The effects of different silt dosages (0%, 25%, 50%) and confining pressures (100 kPa, 300 kPa, 500 kPa) on the stress-strain behavior, shear strength and failure mode of materials were systematically studied. The results show that the stress-strain curve of silt-based foamed lightweight soil presents typical strain hardening or softening characteristics, which can be divided into three stages: elastic, hardening/softening and compaction. The increase in confining pressure significantly enhances the peak stress and residual strength, while the increase in silt content leads to a significant decrease in cohesion and internal friction angle. When the content is 50%, the reduction in cohesion reaches 78.8%. The failure mode transitions from shear failure to compaction failure with the variation of confining pressure and dosage. The shear strength parameter is much higher than the recommended value in the current specification, indicating that the material has good engineering applicability. The research results can provide a theoretical basis for the design and application of lightweight soil based on silt in subgrade engineering.

## Keywords

Silt-Based Foam Lightweight Soil, Triaxial Test, Stress-Strain, Shear Strength, Failure Mode

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

泡沫轻质土是一种通过将预制泡沫引入水泥基浆体中形成的新型轻质工程材料，具有密度低、流动性好、施工便捷、抗震性能优良等特点，广泛应用于路基填筑、边坡支护、桥台背填、软基处理等工程中[1]-[3]。其良好的自立性和可调节的强度与密度，使其在解决“桥头跳车”、差异沉降及挡土结构土压力过大等问题中表现出显著优势[4][5]。然而，传统泡沫轻质土在生产过程中大量使用水泥，不仅成本较高，也与当前绿色建材和固废资源化利用的发展趋势不相适应。因此，近年来学者们积极探索以工业废料或地方性材料(如粉煤灰、矿渣、粉土等)部分替代水泥，以降低环境影响并提升经济性[6]-[8]。

山东省黄泛区广泛分布的粉土，因其工程性质较差，常被视为不良土质。若将其作为细集料掺入泡沫轻质土中，形成粉土基泡沫轻质土，既可实现粉土的资源化利用，又能减少水泥用量，具有显著的环境与经济效益。Zhang 等[9]的前期研究表明，粉土基泡沫轻质土在无侧限抗压强度、弯拉强度等方面均能满足路基填料要求，但其在三轴复杂应力状态下的力学行为尚未系统研究。

在实际工程中，轻质土路基往往处于三维应力状态，承受自重、侧向土压力及交通荷载等多重作用。仅凭无侧限抗压强度难以全面评价其力学性能，尤其是抗剪强度和变形特性。三轴试验能更好地模拟实际应力状态，揭示材料在围压作用下的压缩与剪切行为。袁化强等[10]通过不固结不排水三轴试验，系统研究了传统泡沫轻质土在不同围压下的应力-应变关系、破坏形态及抗剪强度，发现其压缩过程可分为弹性、硬化和压密三个阶段，且抗剪强度远高于规范推荐值。然而，该研究未涉及粉土掺入对材料性能的影响。

目前，针对粉土基泡沫轻质土在三轴应力条件下的压缩与剪切特性的研究欠缺。粉土的掺入将改变

材料的孔隙结构、胶结性能及其破坏机制,进而影响其宏观力学响应。因此,系统开展粉土基泡沫轻质土的三轴试验研究,明确其不同围压、湿密度和粉土掺量下的应力-应变特性、峰值应力、抗剪强度参数及破坏模式,具有重要的理论意义与工程价值。

本文在前人研究的基础上,通过系统的三轴压缩试验,综合分析粉土掺量、湿密度和围压对粉土基泡沫轻质土力学行为的影响,揭示其压缩变形机制与破坏特征,建立适用于该材料的本构模型与强度准则,以期粉土基泡沫轻质土在路基工程中的设计与应用提供科学依据。

## 2. 三轴试验

### 2.1. 试验材料及配合比

本文试验所用粉土基泡沫轻质土以 P·O 42.5 水泥为胶凝材料,引入黄泛区粉土作为细集料,采用复合型发泡剂制备泡沫,水泥性能指标如表 1 所示。设置湿密度为  $700 \text{ kg/m}^3$ ,粉土掺量(粉土质量占固体总质量比)为 0%~50%。通过调整各组分配比,系统研究不同湿密度与粉土掺量对材料力学行为的影响,泡沫轻质土配合比如表 2 所示。新拌浆体流值控制在  $170 \text{ mm} \sim 190 \text{ mm}$ ,满足浇筑施工要求。试件标准养护 28 d 后进行三轴试验,以分析其压缩与剪切特性。

Table 1. Cement performance indicators

表 1. 水泥性能指标

项目	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	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
标准要求	$\geq 300$	25~35	>45	<600	$\geq 16$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$
检验结果	358	28.5	230	294	26.0	45.8	4.72	8.3

Table 2. Mix proportion of foam lightweight soil

表 2. 泡沫轻质土配合比

编号	湿密度/ $(\text{kg/m}^3)$	粉土掺量(%)	水固比	水泥/ $(\text{kg/m}^3)$	粉土/ $(\text{kg/m}^3)$	水/ $(\text{kg/m}^3)$	泡沫/ $(\text{kg/m}^3)$
F-0	700	0	0.55	432	0	237	31
F-1	700	25	0.50	335	112	223	30
F-2	700	50	0.45	231	231	208	29

### 2.2. 试样制备



Figure 1. Foam lightweight soil triaxial specimens

图 1. 泡沫轻质土三轴试件

试件制备采用  $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  圆柱体试件。首先将 P·O 42.5 水泥与黄泛区粉土按设计比例干拌 1 分钟，随后加入水搅拌 1.5 分钟形成水泥浆。之后掺入复合蛋白型发泡剂制备的泡沫(密度  $55 \text{ kg/m}^3$ )，快速搅拌 0.5 分钟。测定新拌浆体湿密度与流值(控制于  $170 \text{ mm} \sim 190 \text{ mm}$ )合格后，浇筑入模并振捣密实。试件在温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $\geq 95\%$  标准养护室中静置 24 小时后脱模，继续保湿养护至 28 天龄期，以确保材料强度充分发展。每组配合比制备 3 个平行试件以减小试验误差，制备好的试件如图 1 所示。

### 2.3. 试验仪器及方法

#### 2.3.1. 试验仪器

试验采用 DJSZ-100D 型 50T 动静三轴试验系统进行三轴压缩试验，试验仪器由成都东华卓越科技有限公司生产，试验仪器如图 2 所示。该系统主要参数：轴向激振频率范围为  $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ ，位移分辨率为  $0.001 \text{ mm}$ ，位移测量精度为  $\pm 0.3\% \text{ FS}$ ，应变式轴向加载速率为  $0.01 \sim 3 \text{ mm/min}$ 。

本次试验依据表 2 配合比制备试件，尺寸为  $\phi = 150 \text{ mm}$ 、 $h = 300 \text{ mm}$ ，试件外观如图 3 所示。为隔绝液压缸内水对试件的影响，并防止试件破坏后碎屑进入液压水，试验前已在试件外部包裹橡皮套，安装过程见图 4。具体试验步骤如下：

- (1) 将试件安置于制样筒中，固定底座及透水石；
- (2) 启动真空泵，打开底部“抽真空阀”，抽至孔隙压力为  $-70 \sim -90 \text{ kPa}$  后关闭阀门，监测压力稳定性；
- (3) 使用液压油缸吊装压力室，将试样推移至主机中心轴位置，缓慢下放压力室至底座并锁紧，随后注水填满压力室；
- (4) 检查围压、反压与轴压系统液位，确保充水/充油达到下限位置，不足时需手动补充；
- (5) 开启静态油泵，缓慢抬升油缸，待荷载传感器显示微小压力即停止上升，标识预接触状态完成；
- (6) 对压力室施加  $50 \sim 80 \text{ kPa}$  水压，打开“饱和进水阀”抽真空直至滤瓶内有水流出，关闭阀门后静置，观察体变管水位是否稳定；
- (7) 启动油泵，按预设加载速率施加轴向荷载，同步采集位移与压力数据，持续至试件破坏或满足试验终止条件。

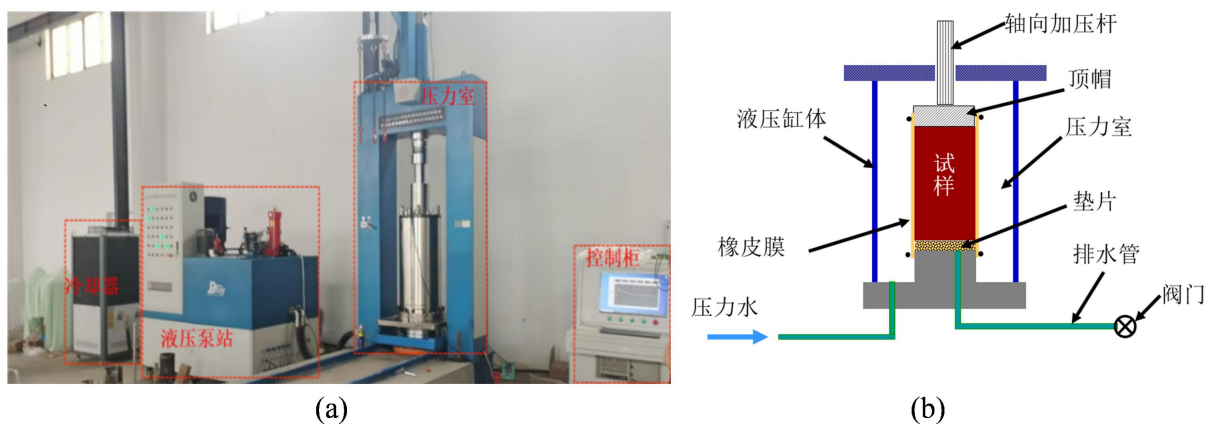


Figure 2. Schematic diagram of the 50T dynamic-static triaxial test system of DJSZ-100D type  
图 2. DJSZ-100D 型 50T 动静三轴试验系统示意图



Figure 3. Triaxial specimen  
图 3. 三轴试件



Figure 4. Installation of triaxial specimen  
图 4. 三轴试件安装

### 2.3.2. 试验方法

图 5 为三轴压缩试验过程中试件的应力状态分解示意图。作用于试件的总应力可视为静水应力(静水压缩阶段)与偏应力(轴向压缩阶段)两部分叠加而成。试验开始时, 首先向压力室注满水, 然后通过液压系统施加围压至预定值。达到指定围压  $\sigma_3$  后, 保持该围压恒定, 随后进入轴向压缩阶段, 以固定加载速率对试件进行轴向加载, 直至试验完成。

在设计试验方案时, 需首先确定所施加的围压大小。发泡流态固化土在实际作为路基材料应用时, 所受围压通常较低, 一般不超过 100 kPa [11]。综合考虑实际试验条件, 本研究设置了 100 kPa 和 300 kPa 两组低围压, 以及一组 500 kPa 的高围压, 具体工况见表 3。试验参照《土工试验方法标准》, 采用不固结不排水(UU)静三轴试验方法, 通过应变控制式加载直至试件破坏, 加载过程由系统自动完成。

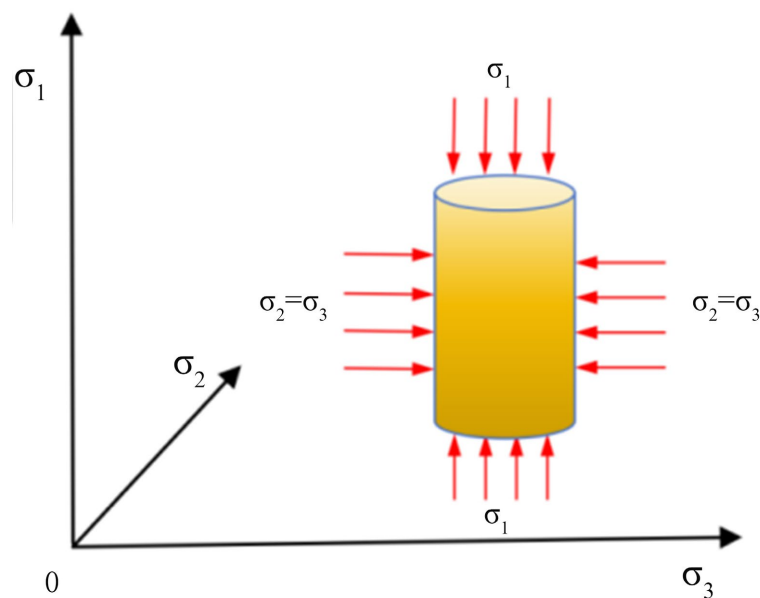


Figure 5. Loading path of triaxial shear test  
图 5. 三轴剪切试验加载路径

Table 3. Static triaxial test conditions  
表 3. 静三轴试验工况

编号	湿密度(kg/m <sup>3</sup> )	粉土掺量%	试验围压
1		0	100/300/500
2	700	25%	100/300/500
3		50%	100/300/500

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 应力 - 应变特性

在三轴试验中, 应力 - 应变关系曲线主要呈现两种形态, 如图 6 所示。其一为应变硬化型曲线, 通常出现在较高围压条件下, 可分为线弹性阶段、硬化阶段和应力平台阶段三个部分。在此过程中, 材料在应力作用下逐渐形成局部致密化结构, 使其承载能力随变形增大而增强, 轻质土最终趋于稳定并进入应力平台阶段。其二为应变软化型曲线, 多发生于较低围压情况下, 包括线弹性阶段、非线性强化阶段、软化阶段及应力平台阶段四个阶段。该类曲线在应力达到峰值后发生破坏, 出现应力急剧下降的软化现象。

由图 7 所示的应力 - 应变曲线可知, 围压对粉土基泡沫轻质土的力学行为具有显著影响。在弹性阶段, 随着围压的提高, 材料刚度明显增强。以未掺粉土的试件为例, 围压为 500 kPa 时的初始弹性模量较 100 kPa 时提高了约 30%。这一现象可归因于围压对材料横向变形的约束作用, 增强了颗粒间的接触力, 从而提升了整体刚度。在应变硬化阶段, 高围压延长了硬化过程, 并显著提高了峰值应力。例如, 未掺粉土时, 500 kPa 围压下的峰值应力(约 3.5 MPa)较 100 kPa (约 2 MPa)提高了 75%, 说明围压有效抑制了裂缝扩展, 延缓了塑性区发展。进入压密破坏阶段后, 高围压条件下材料仍能维持较高的残余强度, 如 500 kPa 围压时的残余应力可达峰值应力的 1.5 倍, 体现了围压通过增强侧向约束和颗粒间摩擦, 显著提高了材料的延性和抗破坏能力。

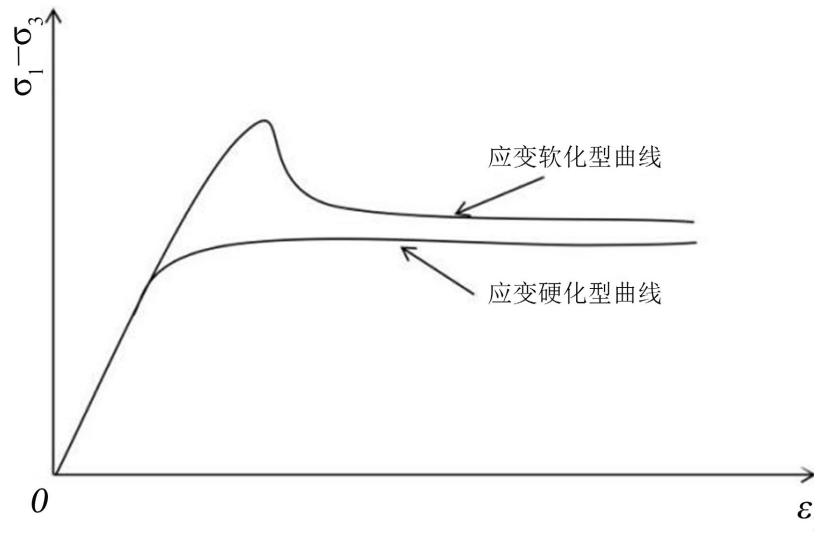


Figure 6. Typical hardening strain curves and softening strain curves  
图 6. 典型的应变硬化型曲线与应变软化型曲线

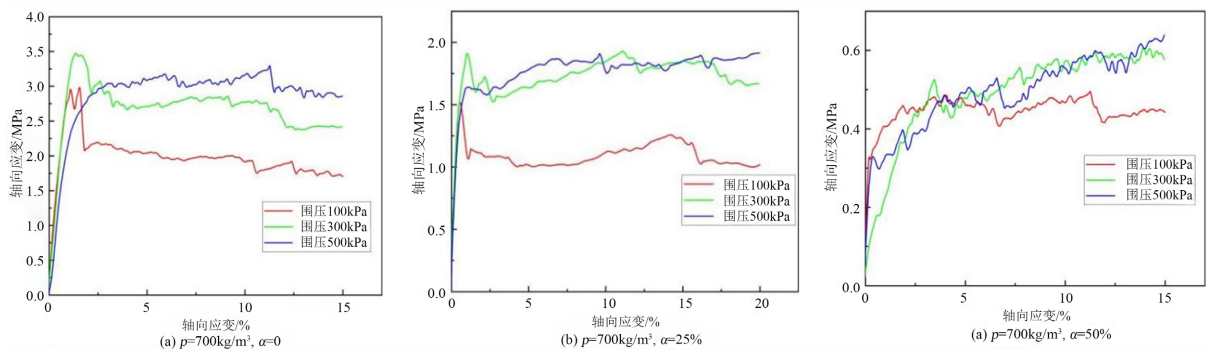


Figure 7. Stress-strain curves under different confining pressures  
图 7. 不同围压下的应力 - 应变曲线

与此同时，粉土掺入比的变化也对材料的力学响应产生重要影响。随着粉土掺量的增加，试件的应力 - 应变曲线表现出整体刚度减弱、峰值应力下降的趋势。在高粉土掺量条件下，弹性阶段虽表现更为明显，但弹性模量显著降低；应变硬化阶段则呈现出更强烈的非线性和更显著的塑性变形；至压密破坏阶段，掺粉土试件虽表现出更大的应变能力，但其应力水平明显下降，说明粉土的引入虽在一定程度上增强了材料的变形能力，却显著劣化了其力学强度。总体而言，围压的提升可有效改善材料的抗压与压密性能，而粉土掺量的增加则导致弹性模量、峰值应力及残余强度显著降低，破坏模式逐渐向脆性发展。

### 3.2. 抗剪强度特性

摩尔 - 库伦强度准则通常用于描述土壤和岩石等材料的抗剪强度。在三轴试验中，通过施加围压和轴向压力来确定材料的抗剪强度参数。在三轴试验中， $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  等于施加的围压  $\sigma_h$ ，而  $\sigma_1$  则是围压和峰值偏应力  $\Delta\sigma$  的总和。由此可以得到平均主应力  $p$  和广义剪应力  $q$  的表达式[11]：

平均主应力：

$$p = \frac{1}{3}I_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_h + \frac{1}{3}\Delta\sigma \quad (1)$$

广义剪应力:

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \Delta\sigma \quad (2)$$

摩尔 - 库伦强度准则在空间应力状态下的表达式为:

$$\frac{1}{2}I_1 \cdot \sin\phi - \left( \cos\theta_\sigma + \frac{\sin\phi \cdot \sin\theta_\sigma}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{J_2} + c \cdot \cos\phi = 0 \quad (3)$$

其中,  $I_1$  为第一应力不变量;  $J_2$  为第二偏应力不变量;  $\theta_\sigma$  为应力洛德角, 在三轴压缩试验中为  $-\pi/6$ 。

通过转换和简化, 该准则在  $p$ - $q$  应力空间的表达式为:

$$q = \frac{6\sin\phi}{3-\sin\phi}p + \frac{6c \cdot \cos\phi}{3-\sin\phi} \quad (4)$$

在实验中, 取三轴剪切试验的应力 - 应变曲线的最高点作为计算点。通过计算各个试验工况下的  $p$ 、 $q$  值, 如图 8 所示, 然后采用直线的方式对试验数据进行拟合。拟合直线的形式为:

$$q = kp + b \quad (5)$$

式中:  $k$  和  $b$  分别为拟合直线的斜率与截距, 拟合结果见图 8。

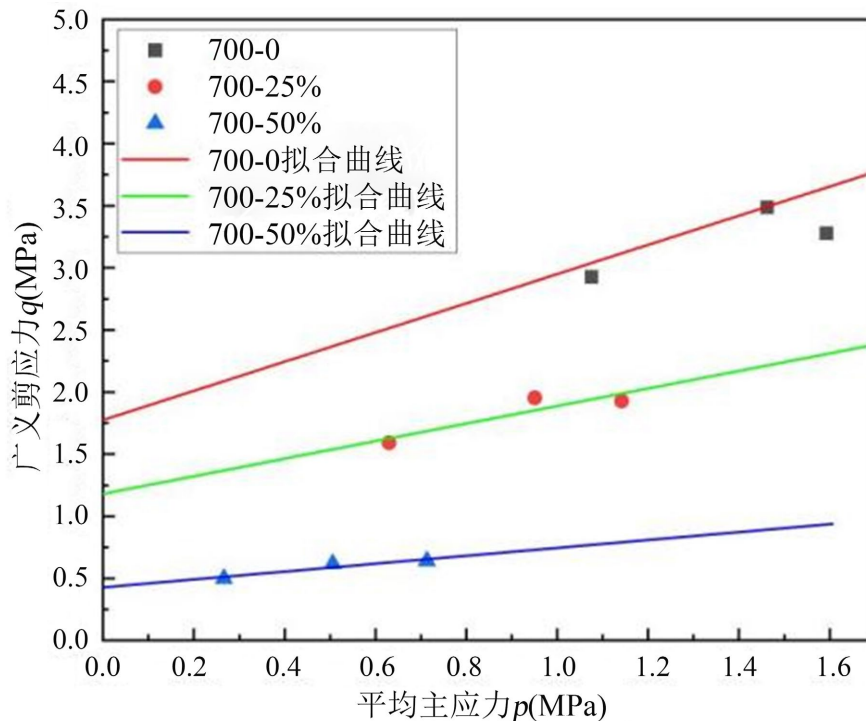


Figure 8.  $p$  and  $q$  values under different operating conditions and the fitted curves  
图 8. 不同工况下的  $p$ 、 $q$  值及拟合曲线

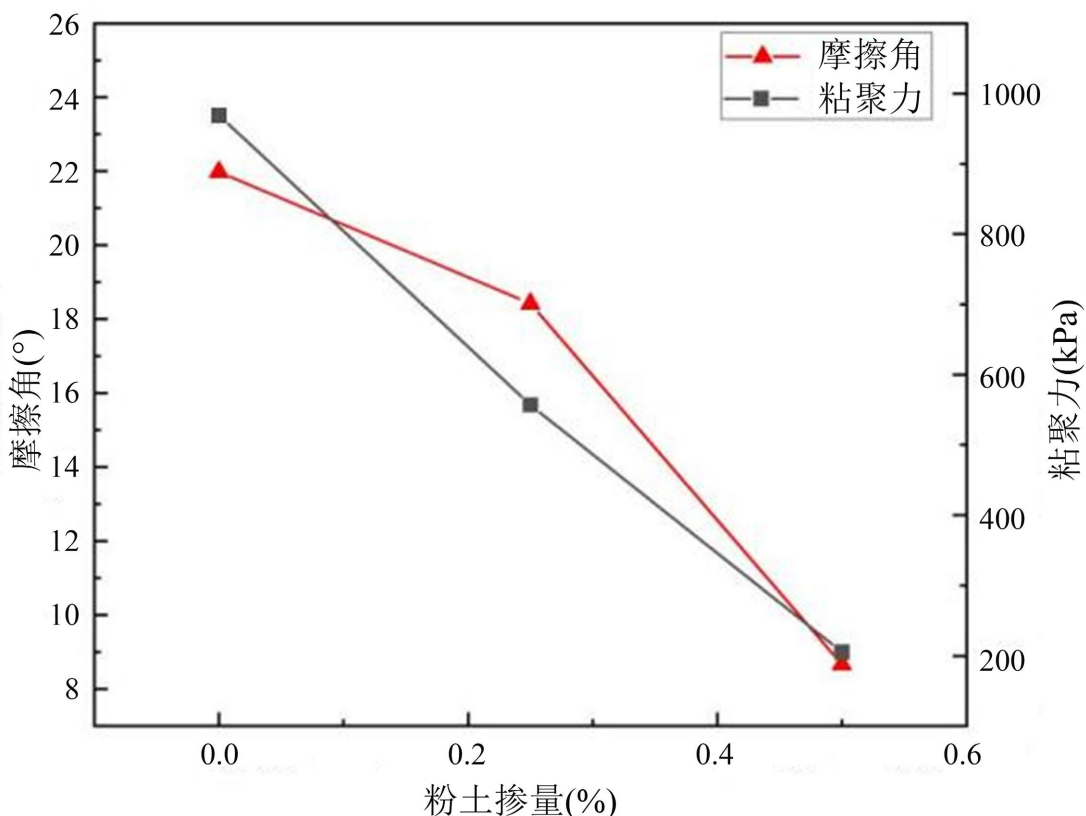
结合方程(4)与(5)可以计算内摩擦角  $\phi$ 、黏聚力  $c$ , 计算结果见表 4。对于泡沫轻质土而言, 抗剪强度主要表现为黏聚力。

**Table 4.**  $c$  and  $\varphi$  under different operating conditions

**表 4.** 不同工况下的  $c$ 、 $\varphi$

编号	配合比	围压	抗剪强度(kPa)	
			$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$
1	$\rho = 700 \text{ kg/m}^3, \alpha = 0$	100 kPa、300 kPa、500 kPa	21.98	968.7
2	$\rho = 700 \text{ kg/m}^3, \alpha = 25\%$	100 kPa、300 kPa、500 kPa	18.42	556.9
3	$\rho = 700 \text{ kg/m}^3, \alpha = 50\%$	100 kPa、300 kPa、500 kPa	8.67	205.3

图 9 展示了摩擦角与黏聚力随粉土掺量增加的变化趋势。随着粉土掺量提高,两者均呈现明显下降,其中黏聚力的降低尤为显著。当粉土掺量从 0%增至 50%时,黏聚力由 968.7 kPa 下降至 205.3 kPa,降幅达 78.8%,表明其对粉土掺量更为敏感。这主要是由于粉土替代部分水泥后,水化产物减少,而粉土本身对黏聚力的形成贡献较弱,因此引起黏聚力大幅降低。同样,摩擦角随粉土掺量增加而下降的原因也在于水泥被粉土部分取代后,胶凝物质总量减少,颗粒间胶结作用减弱,导致摩擦阻力降低。

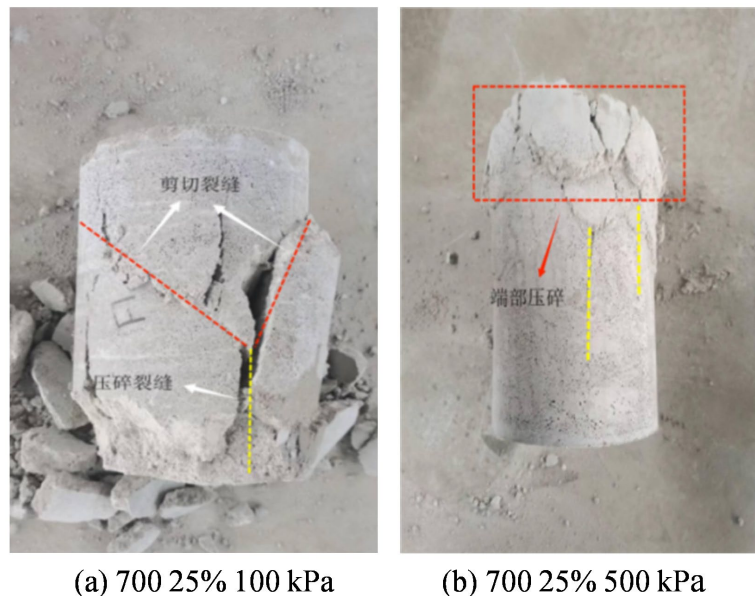


**Figure 9.** Variation of friction angle and cohesion with the content of silt ( $p = 700 \text{ kg/m}^3$ )

**图 9.** 摩擦角与黏聚力随粉土掺量的变化( $p = 700 \text{ kg/m}^3$ )

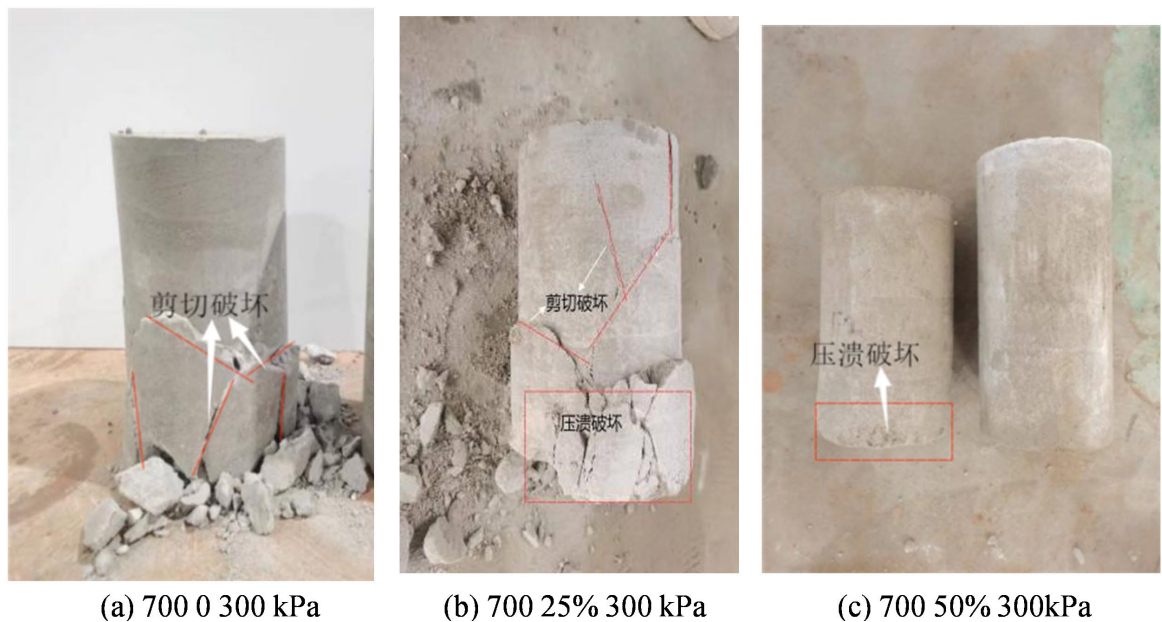
### 3.3. 试件破坏形态

图 10 与图 11 分别为不同围压与不同粉土掺量条件下发泡流态固化土试件的破坏形态。试验结果表明,围压与粉土掺量均对材料的破坏行为具有显著影响。



**Figure 10.** Failure patterns of foam lightweight soil specimens under different confining pressures  
**图 10.** 不同围压条件下泡沫轻质土试件的破坏形态

在围压方面，低围压(100 kPa)条件下，试件主要表现为剪切破坏，可见斜向剪切裂缝与竖向压碎裂缝共存，局部出现剥落，并呈现典型的“压实锥”特征(图 10(a))。这是由于低围压对试件的侧向约束较弱，最大剪应力发生在与主应力成  $45^\circ$  的截面，导致材料沿薄弱面发生剪切滑移。而在高围压(500 kPa)条件下，破坏模式转为以端部压碎为主，试件周围出现横向与纵向裂纹，整体仍保持较好完整性，表面剥落较少(图 10(b))。高围压显著增强了侧向约束，抑制了剪切裂缝的发展，同时使应力集中于试件端部，从而导致压碎破坏。



**Figure 11.** Failure patterns of foam lightweight soil specimens under different silt contents conditions  
**图 11.** 不同粉土掺量条件下泡沫轻质土试件的破坏形态

在粉土掺量方面,随着掺量的提高,试件的破坏形态由剪切破坏向压碎破坏过渡。未掺粉土(0%)时,试件以均匀分布的剪切裂缝为主,破坏面较平整,表现出明显的脆性断裂特征(图 11(a))。当粉土掺量为 25%时,破坏模式呈现剪切与压碎共存的过渡状态(图 11(b))。粉土填充了部分孔隙,提高了孔壁厚度与整体性,增强了材料的抗剪能力。当粉土掺量增至 50%时,试件主要表现为压碎破坏,裂缝多为纵向,表面剥落减少,整体压实性提高(图 11(c))。粉土的掺入显著降低了材料的孔隙率,增大了孔壁厚度,从而提高了抗压强度,促使破坏模式从剪切破坏转向压密压实破坏。

综合来看,围压通过提供侧向约束影响应力分布与破坏机制,而粉土掺量则通过改变孔隙结构与基体组成影响材料的抗剪与抗压性能,二者共同决定了发泡流态固化土的最终破坏形态。

#### 4. 结论

通过对粉土基泡沫轻质土的三轴试验研究,并与既有文献进行对比分析,得出以下结论:

(1) 应力-应变行为具有典型三阶段特征,包括线弹性、硬化/软化和压密阶段。围压显著影响变形模式:低围压( $\leq 100$  kPa)下易发生应变软化,高围压( $\geq 500$  kPa)下则以应变硬化为主。

(2) 粉土掺量是控制力学性能的关键因素。掺量从 0%增至 50%时,黏聚力下降 78.8%,内摩擦角降低 60.5%,峰值应力降幅超 40%。但当掺量控制在 25%以内时,强度损失较小(黏聚力仍 $>550$  kPa),建议作为工程适用掺量区间。

(3) 破坏模式由剪切主导转向压密主导。低围压、低粉土掺量时以斜向剪切裂缝为主;高围压、高粉土掺量时则表现为端部压碎和纵向裂纹。

(4) 抗剪强度远高于规范推荐值。即使掺入 50%粉土,黏聚力(205.3 kPa)和内摩擦角( $8.67^\circ$ )仍显著高于《现浇泡沫轻质土路基设计施工技术规程》的保守取值( $c = 120$  kPa,  $\varphi = 2^\circ$ )。

#### 参考文献

- [1] 龙伟, 苟珈源, 熊模友. 高速公路建设期低碳实施路径研究[J]. 价值工程, 2024, 43(30): 32-34.
- [2] 范桂细. 泡沫混凝土的生产与应用技术[J]. 广东建材, 2005, 28(9): 21-22.
- [3] 庄伟, 谭奎. 泡沫轻质土的应用和技术改进[J]. 江西建材, 2016(10): 100, 102.
- [4] 陈忠平, 孙仲均, 钱争晖. 泡沫轻质土充填技术及应用[J]. 施工技术, 2011, 40(10): 74-76.
- [5] Zhang, H., Zhang, X., Qi, X., Zhang, S., Bi, Y., Wu, J., et al. (2021) Effect of Ambient Temperature on the Properties and Action Mechanism of Silt-Based Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, **312**, Article ID: 125379. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125379>
- [6] 万立尧. 水泥基粉土气泡混合轻质土力学特性及在路基中的应用层位研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [7] Krishnan, G. and Anand, K.B. (2018) Industrial Waste Utilization for Foam Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **310**, Article ID: 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/310/1/012062>
- [8] Hilal, A.A., Thom, N.H. and R. Dawson, A. (2015) The Use of Additives to Enhance Properties of Pre- Formed Foamed Concrete. *International Journal of Engineering and Technology*, **7**, 286-293. <https://doi.org/10.7763/ijet.2015.v7.806>
- [9] Zhang, H., Qi, X., Wan, L., Zuo, Z., Ge, Z., Wu, J., et al. (2020) Properties of Silt-Based Foamed Concrete: A Type of Material for Use in Backfill behind an Abutment. *Construction and Building Materials*, **261**, Article ID: 119966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119966>
- [10] 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.
- [11] 刘明朋. 泡沫轻质土力学特性及弹塑性本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.