

# 基于界面形貌三维重构的高聚物-粉土剪切特性分析

张超<sup>1,2,3,4</sup>, 张磊<sup>1,2,3</sup>, 夏洋洋<sup>1,2,3</sup>, 王翠霞<sup>1,2,3</sup>, 刘铨鸿<sup>5</sup>,  
方宏远<sup>1,2,3,4</sup>, Timon Rabczuk<sup>6</sup>, 王复明<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 地下工程灾变防控省部共建协同创新中心, 河南 郑州 450001; 4. 黄河实验室(河南), 河南 郑州 450001; 5. 河南开放大学, 建筑工程与智能建造学院, 河南 郑州 450008; 6. Institute of Structural Mechanics, Bauhaus University Weimar, Weimar 99425, Germany)

**摘要:**为探究高聚物密度对高聚物-粉土界面接触形态及界面剪切特性的影响机制,采用界面无损分离与三维激光扫描相结合的方法,开展了高聚物-粉土三维界面形貌特征扫描试验,得到了不同密度下的界面粗糙度参数。结合界面直剪试验,研究了不同高聚物密度影响下高聚物-粉土界面粗糙度参数、界面剪应力-位移关系、界面剪切力学强度参数及界面粗糙度参数与界面剪切强度的变化规律。在此基础上,利用 COMSOL 软件建立了一种随机三维粗糙界面有限元模型,进一步探讨了不同界面粗糙度下高聚物-粉土界面剪切损伤机制。结果表明:基于三维界面重构的有限元数值模型可准确地预测不同密度下高聚物-粉土界面剪切应力-位移关系,且高聚物-粉土界面在直剪荷载下的主要损伤特征表现为界面凸起处形成的应力集中,密度越大凸起越多,应力集中越明显。高聚物-粉土界面粗糙度和剪切强度均随高聚物密度的增大而增大,且高聚物-粉土界面粗糙度和剪切强度满足线性关系。

**关键词:**高聚物-粉土; 界面剪切; 三维激光扫描; 界面形貌; 数值模拟

**中图分类号:** TU432 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.05.010

我国多数堤坝因年久失修而严重老化,存在一定的安全隐患,特别是渗透破坏<sup>[1]</sup>问题较为普遍。非水反应高聚物作为一种轻质、高膨胀率、耐用且防渗透能力强的注浆材料<sup>[2]</sup>被广泛应用于堤坝防渗和加固工程。由于高聚物膨胀性和微渗透性的影响,使其与土体界面处形成一层“根须状”结构的界面过渡层,该区域主要表现为高聚物对界面微裂隙的渗透胶结和挤密压实<sup>[3]</sup>。由于高聚物材料与土体材料属性的差异性,随着高聚物密度的改变其强度不断提升,在界面处易发生不协调变形,进而影响结构的整体稳定性<sup>[4]</sup>。因此,研究高聚物与土体触面在压剪作用下的界面形态特征和剪切力学性能,对高聚物注浆修复结构的安全稳定性评估具有重要的指导意义。

直接剪切试验是研究岩土-结构界面剪切行为

的常用方法之一,在高聚物与结构或土体界面性能的研究方面也不例外,一些学者从不同的角度研究了高聚物与土体复合结构界面的剪切力学性能。如 Li 等<sup>[5]</sup>通过大型直接剪切设备和数字图像相关(DIC)系统,研究了法向应力、含水率和高聚物密度对高聚物-膨润土界面剪切强度的影响,发现初始法向应力或高聚物密度的增加提高了界面的剪切强度,且膨润土含水量的增加则降低了界面的剪切强度。林沛元等<sup>[6]</sup>通过直剪试验研究了钢板、高聚物和土壤等不同介质界面的剪切特性,分析了土体含水率、法向应力、界面类型、高聚物密度和成型方式等因素对界面剪切强度的影响,发现界面的剪应力值随高聚物密度和法向应力的增大而逐渐增大,随含水率的增大而减小,钢板-聚合物界面的破坏模式与其他复合材料不同,表现出脆性破坏。Murali

收稿日期:2025-00-00;修订日期:2025-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178368);河南省重点研发专项项目(241111322700);河南省高校科技创新团队和人才培养计划项目(23IRTSTHN004, 23HASTIT007);中原英才计划—中原青年拔尖人才项目

作者简介:张超(1984—),男,山东烟台人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事工程修复材料多尺度物理力学性能及其提升、非开挖修复理论与技术方面的研究,E-mail:chao.zhang.zzu@outlook.com。

等<sup>[7]</sup>通过直剪与拉拔试验,研究了在干侧、最佳含水率和湿侧的环氧涂层与土壤之间界面粘结强度的机理,发现界面强度的主要贡献来自于聚合物穿透黏土表面孔隙的塑性变形,界面强度在最佳含水率时最低,而在干燥时最高。

除上述研究中提到的材料性质和试验条件外,界面形貌特征也是影响界面剪切特性的重要参数之一。但由于直接观察复合结构内部形态特征较为困难,因此一些学者引入了界面重构和数值模拟相结合的方法。王刚等<sup>[8]</sup>采用全局嵌入零厚度黏聚力单元的方法构建了带节理岩土压剪试验模型,研究了不同粗糙度节理岩体剪切过程及破坏类型。蒋宇静等<sup>[9]</sup>利用 PFC 软件建立了具有粗糙节理的剪切模型,并基于 FISH 语言二次开发进行循环剪切加载,研究了岩石节理的宏细观剪切特性以及循环载荷特征参数对节理剪切特性的影响。然而,上述研究剪切模型均为二维,没有充分考虑接触面的三维形貌特征。随着界面表征技术的发展,三维扫描重构技术被应用于界面剪切性能的研究。Badika 等<sup>[10]</sup>利用 3D 扫描技术获取混凝土-岩石界面形态,并建立具有自然粗糙界面的剪切模型,研究了粗糙度对混凝土-岩石界面剪切行为的影响。Liu 等<sup>[11]</sup>通过三维扫描点云数据,建立并分析了具有真实三维节理面的离散元(DEM)灌浆层理剪切模型,研究了灌浆节理岩体的剪切行为和破坏模式。Zhang 等<sup>[12]</sup>利用点云重构技术和黏聚力单元模型(CZM)对三维粗糙节理面进行数值模拟,探讨了法向刚度和粗糙度损伤特性对剪切行为的影响。尽管上述研究在界面重构方面取得了相应的进展,但专注于界面粗糙度及高聚物-粉土接触面数值模拟的研究鲜有报道。

因此,本文将利用融合界面无损分离、界面剪切试验和三维激光扫描的方法,对不同密度下高聚物-粉土界面粗糙度参数、界面的剪应力-剪切位移关系、界面剪切力学强度参数及界面粗糙度参数与界面剪切强度的变化规律进行研究。在此基础上,利用 COMSOL 软件建立一种随机三维粗糙接触面的有限元模型,进一步探讨不同界面粗糙度下自膨胀高聚物-粉土界面剪切损伤机制。

## 1 高聚物-粉土界面剪切和扫描试验

### 1.1 试验材料和试样制备

试验所用高聚物材料为非水反应类双组分发泡聚氨酯,由异氰酸酯(A组分)和多元醇及添加剂(B组分)组成,通过注浆设备以质量比 1:1 的比例

混合后迅速膨胀并固化,故该材料无需养护<sup>[5,13-14]</sup>。

高聚物密度可通过调整注浆量来控制,密度随注浆量增加而提高<sup>[15-16]</sup>。土体取自郑州某工地深基坑,取土深度 8~10 m,土体的基本物理性质参数均通过室内土工试验<sup>[17]</sup>得到,其比重为 2.70,液限为 27.06%,塑限为 10.36%,塑性指数为 16.70%,最大干密度为 1.76 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为 14.00%。图 1 给出了该土体的颗粒级配曲线,由图 1 可以看出土颗粒主要分布在 0.050~0.075 mm,粉粒含量超过 85%,因此可判定该土体为粉质黏土。

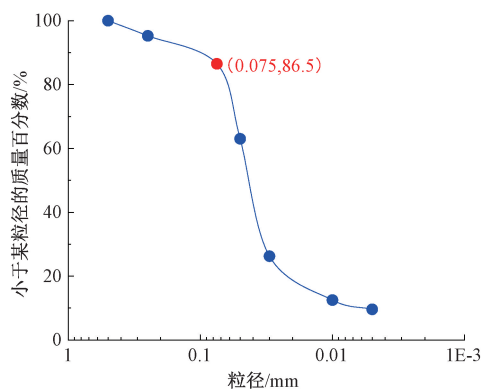


图 1 土体颗粒级配曲线

Figure 1 Silt particle grading curve

本文界面剪切试验试样采用尺寸为 100 mm(长)×100 mm(宽)×50 mm(高)的长方体,制样模具为×100 mm(长)×100 mm(宽)×100 mm(高)的立方体,界面剪切试验试样的制作过程如下。①根据模具体积与粉土密度确定好土样的总质量,将土样分成 5 份分层置于模具中并压实,每层压实后刮毛土样表面。土样压实后的总高度为模具高度的一半,即 50 mm。②在模具内壁均匀涂抹一层润滑油,盖上模具上盖,通过螺栓固紧密封好模具。③通过注浆设备将高聚物材料加热至设定温度,通过注浆枪将其注入模具内部,根据预设的高聚物密度控制注浆量,本研究中设定低、中、高 3 种高聚物的密度(0.249、0.490 和 0.731 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[5]</sup>。④待高聚物凝固(约 1 h)后拆除模具,取出固化后的高聚物-粉土复合试样,为防止试样在等待测试期间受到环境因素的影响,将其用密封袋密封保存至界面直剪试验前。3 种密度分别对应 3 个不同的法向应力(100、300 和 200 kPa),共 9 个工况,每个工况制备 3 个试样,共 27 个试样。

在制备界面扫描试样时,首先,选用聚酰亚胺层间隔膜(IIF)作为隔层<sup>[18]</sup>,两侧均匀涂抹润滑油,将其平铺在土样表面,然后进行高聚物注浆,其余步骤与界面剪切试样的制备过程一致。将制备完成的试样底部固定,然后沿试样中轴线位置将高聚物渐

渐提起,在界面处将粉土与高聚物分开后把隔离膜从高聚物表面撕下,每种密度制备3个试样,共9个,具体的分离过程如图2所示。

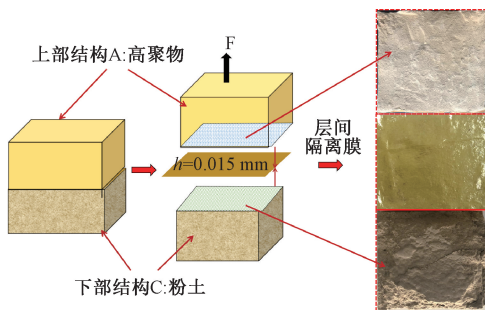


图2 高聚物-粉土复合试样层间无损分离

Figure 2 Non-destructive separation between layers of polymer-silt soil composite specimen

## 1.2 试验设备与方案

为研究高聚物-粉土界面的剪切特性及形貌特征,本文分别进行直剪试验和三维激光扫描试验。其中,直剪试验采用由TAW-2000微机控制电液伺服岩石三轴试验机改进的界面剪切装置进行,试验时取制备好的界面剪切试样置于剪切盒中,下剪切盒为土体,上剪切盒为高聚物,盖上上盖后,对试样施加一定的法向应力。剪切过程中,下剪切盒侧面受水平向约束,下部设有滚珠;上剪切盒侧向通过传力杆,以1 mm/min的速率施加与下剪切盒约束方向相反的水平剪切位移,试验过程中通过荷载传感器和位移传感器记录剪切荷载和位移。

界面形貌扫描试验采用Creaform公司制造的Handy SCAN 700三维激光扫描仪进行,试验中为防止扫描激光在扫描过程中被试样表面吸收,首先对试样表面区域喷涂白色哑光涂料以着色。然后,使用三维激光扫描仪对试样表面区域进行三维扫描,以获取界面的三维点云数据,具体流程见图3。扫描结束后采用专业的计算机处理软件对界面的三维点云数据进行处理和分析。根据ISO 25178标准<sup>[19]</sup>,采用表面粗糙度参数 $S_a$ (表面算术平均高度)和 $S_q$ (表面均方根高度)来定量描述界面形态特征,二者主要基于坐标系上的高程值进行定义。在此系统中,A表示界面面积, $\text{mm}^2$ ;  $z(x, y)$ 表示三维界面形貌在 $(x, y)$ 位置处的点云数据高度,mm。具体公式如下。

$S_a$ :表面算术平均高度,表示相对于表面的平均面,各点高度差绝对值的平均值。通常用来描述表面粗糙度。

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| dx dy. \quad (1)$$

$S_q$ :测量表面的均方根高度,定义为采样区域中各点高度的均方根,相当于高度的标准偏差。

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}. \quad (2)$$

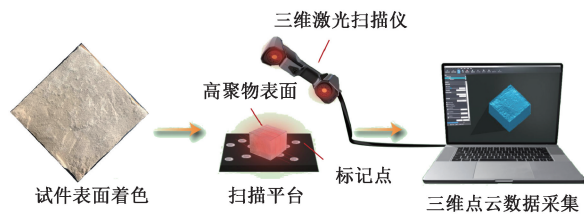


图3 界面形貌三维激光扫描与重构

Figure 3 Three-dimensional laser scanning and reconstruction of interface morphology

## 2 试验结果与分析

### 2.1 高聚物-粉土界面剪切应力-应变曲线分析

图4为直剪试验获得的高聚物-粉土界面剪应力-剪切位移曲线,以法向应力200 kPa时为例。从图4中可以看出,剪应力-剪切位移曲线的变化可分为4个阶段:①初始压实阶段,剪切位移较小时土体受法向应力作用而压实,曲线斜率较小。②线弹性阶段(AB段),③界面破坏阶段(BC段),随着剪切位移的增加(AB代表线弹性阶段),应力呈直线上升,曲线斜率变大,峰值处的剪应力为抗剪强度。随着剪切位移的持续增加,高聚物-粉土界面发生破坏,此时抗剪强度主要由高聚物材料与土体界面间的粘结作用提供。④剪切断面摩擦阶段(CD段),当剪切位移超过界面最大粘结力后(CD代表剪切断面摩擦阶段),高聚物与土体界面脱粘并产生相对滑动,此时抗剪强度主要由高聚物材料与土体界面处的摩擦力提供。此外,从图4也可以看出,高聚物密度从 $0.249 \text{ g/cm}^3$ 增加至 $0.731 \text{ g/cm}^3$ 时,界面剪切强度与残余应力提高了约2倍。同时,水平位移随剪切强度的增大而增大。这与Li等<sup>[5]</sup>的研究结果一致,表明较高密度的高聚物材料在提高界面剪切强度的同时也增强了剪切破坏时的水平位移和残余剪切强度。这主要因为高聚物材料的粘结强度随着密度增大而线性增加<sup>[20]</sup>,粘结强度增加使界面之间的结合更加紧密,从而提高了界面的抗剪强度。同时,随着高聚物密度的增大,泡孔由于挤压体积变小而形成晶体,泡孔壁加厚,提高了高聚物材料的抗剪强度与土体间的摩擦力<sup>[5]</sup>。因此,随着高聚物密度的增大,高聚物与粉土界面的粘结力与机械互锁均增强,界面剪切强度增大。

为了定量分析高聚物密度对界面剪切强度的影响,将高聚物-粉土的界面剪切强度随法向应力的变

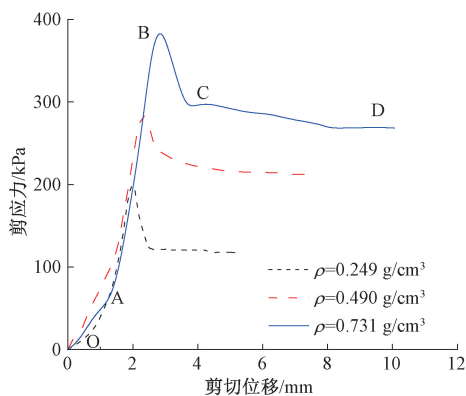


图4 高聚物-粉土界面剪切应力-位移曲线

Figure 4 Polymer-silt soil interface shear and morphology extraction device

化关系绘制成散点图,并进行拟合,如图5所示。同时采用 Mohr-Coulomb 破坏准则来确定界面的抗剪强度指标(方程如式(3)所示),如表1所示。由表1可知,高聚物的密度从 0.249 增加至 0.731 g/cm<sup>3</sup> 时,内摩擦角分别增加了 55.24%和 6.70%,对应的黏聚力分别增加 27.25%和 64.83%。高聚物-粉土复合结构界面间的内摩擦角和黏聚力均随着高聚物密度的增大而增大。这主要因为随着高聚物密度的增加,高聚物材料的剪切强度和粘结强度增强。另一方面,随着注浆量的增大,高聚物对土体渗透和挤密作用更显著,进而提高了界面处土体密实度和界面粗糙度,界面剪切方式由滑动变为剪切,界面内摩擦角和黏聚力增大。

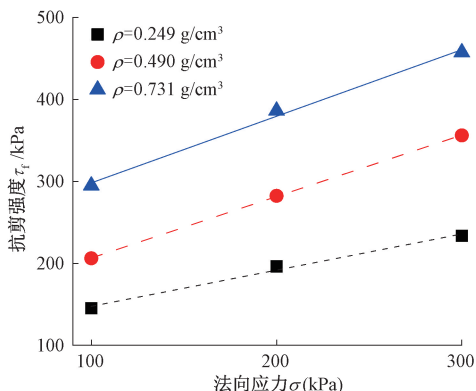


图5 不同密度下界面抗剪强度与法向应力关系

Figure 5 Relationship between interface shear strength and normal stress at different densities

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

式中: $\tau_f$ 为界面剪切强度; $\sigma$ 为施加在界面上的法向应力; $c$ 为黏聚力,即法向应力对剪切强度曲线的垂直截距; $\phi$ 为内摩擦角,即抗剪强度线的倾斜角。

## 2.2 高聚物-粉土界面形态变化特征及其对剪切特性的影响

图6给出了界面粗糙度参数随高聚物密度变化

表1 不同高聚物密度时界面抗剪强度指标

Table 1 Shear strength indexes of different densities			
高聚物密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi$ /(°)	拟合优度 R <sup>2</sup>
0.249	103.47±5.42	23.75±0.89	0.992
0.490	131.66±10.32	36.87±1.24	0.999
0.731	217.01±12.34	39.35±1.05	0.995

的情况,从图6中可以观察到界面粗糙度参数  $S_a$  和  $S_q$  的变化趋势与高聚物密度的关联性。随着高聚物密度的增加,  $S_a$  和  $S_q$  呈现出递增的趋势,即  $S_a(0.249) < S_a(0.490) < S_a(0.731)$  和  $S_q(0.249) < S_q(0.490) < S_q(0.731)$ 。造成这一趋势的原因在于有限空间内高聚物密度随注浆量增大而增大。并且,随着注浆量的增加,高聚物的膨胀力也随之增大<sup>[5,13]</sup>,使得高聚物材料被挤压进入土体表面微孔隙中,形成根状结构。这一过程增加了高聚物-土体界面的凹凸形态,从而增加了界面的粗糙度。 $S_a$  和  $S_q$  值的增加也间接反映了随着密度的上升高聚物与土体之间的粘结关系变得更加密切。这是因为膨胀力使得更多的高聚物材料被挤压渗入土体的孔隙中,增加了高聚物与土体界面的接触面积,从而增强了高聚物与土体之间的结合力。因此,  $S_a$  和  $S_q$  值的变化既体现了界面粗糙度的变化情况,还揭示了高聚物与土体之间粘结机理的复杂性。

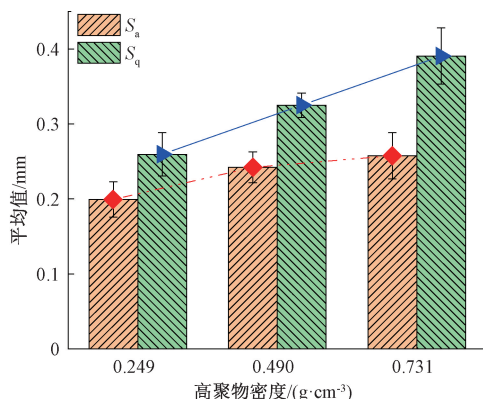
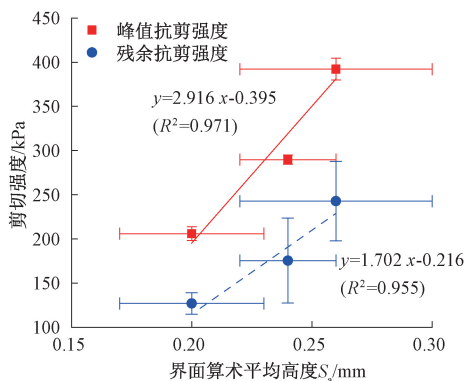


图6 不同密度下表面粗糙度参数的分布特征

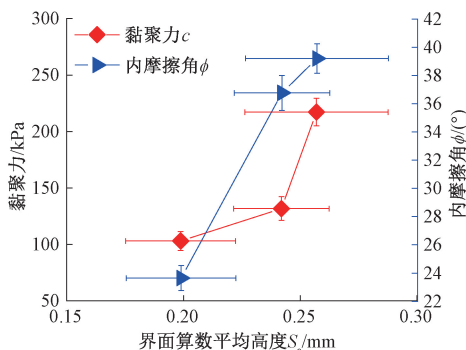
Figure 6 Distribution of surface roughness parameters at different densities

图7展示了在 200 kPa 法向应力条件下,表面粗糙度参数  $S_a$  与界面剪切强度之间的关系。从图7(a)可以看出,  $S_a$  值的增加使得剪切峰值强度和残余应力均呈现增加趋势,这表明界面粗糙度的提高增强了界面间的抗剪强度。例如,当  $S_a$  从 0.199 增至 0.260 mm 时,剪切峰值强度和残余应力分别提高了 89.23%和 129.41%。图7(b)展示了  $S_a$  对黏聚力和内摩擦角的影响,随着  $S_a$  的增加,黏聚力和内摩擦角也相应增加,这表明界面粗糙度的提高增

强了高聚物与粉土界面的粘结和互锁作用,从而提升了界面的抗剪强度。



(a) 粗糙度参数与剪切强度的关系



(b) 粗糙度参数与抗剪强度指标的关系

图7 不同密度下表面粗糙度参数与剪切强度的关系

Figure 7 Relationship between surface roughness parameters and shear strength at different densities

### 3 高聚物-粉土界面剪切数值模拟

#### 3.1 三维精细化界面剪切的建立

为进一步研究高聚物与粉土的界面剪切损伤特征,以表面均方根粗糙度值  $S_q$  作为参考标准,采用 COMSOL 软件中随机粗糙曲面模拟方法生成了具有不同粗糙度的界面模型,并将生成的界面模型导入有限元软件 Abaqus 中,建立高聚物-粉土界面剪切有限元模型(如图8所示)。具体建模过程如下。

①模型尺寸:模型的高度和尺寸均与实际的界面直剪试验保持一致。模型的上部分由高聚物构成,尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ;下部分为均匀土体,尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。②材料属性:假定高聚物材料本构遵循线弹性模型,粉土本构遵循 Mohr-Coulomb 模型。相关模型参数如表2和表3所示,其中,高聚物材料力学参数通过单轴压缩试验<sup>[5,21]</sup>得到,粉土力学参数则通过环刀试验(密度)、循环三轴试验(弹性模量、泊松比)和直剪试验(黏聚力、内摩擦角)获得。③界面接触:由于模型涉及接触黏性行为(用于模拟高聚物-粉土粘结)和摩擦行为(用于模拟界面处的摩擦),因此采用库仑

摩擦模型与黏聚力模型的联合构造,形成黏聚力摩擦接触面模型。④边界条件:模型的边界条件设置根据直剪试验的实际工况进行,其中高聚物部分的上边按照试验条件施加法向荷载(100 kPa、300 kPa和200 kPa),并在左侧设置参考点与高聚物的左边界耦合,以便于施加位移荷载并输出反力数据,剪切位移为10 mm,采用动力显示分析步,位移加载速率为1 mm/min。在粉土部分,底边限制垂直剪切方向的位移,而四侧立面限制平面剪切与垂直剪切方向的位移。⑤网格划分:模型的网格划分采用自由(Free)网格划分技术,该技术能够根据模型的复杂性和不规则性自动调整网格密度,特别适合于具有复杂几何形状和不规则边界的分析。通过将模型划分为四面体网格,确保了网格能够精确覆盖高聚物和粉土的接触界面,从而捕捉关键区域的细微变化。

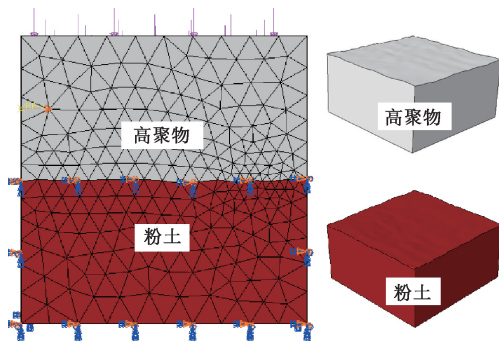


图8 界面剪切数值模型

Figure 8 Numerical modeling of interface shear

表2 高聚物材料力学参数<sup>[5, 21]</sup>

Table 2 Mechanical parameters of polymer materials<sup>[5,21]</sup>

密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
0.249	100.57	0.2
0.490	291.04	0.2
0.731	448.03	0.2

表3 粉土材料力学参数

Table 3 Mechanical parameters of silt materials

密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
1.76	37.2	0.35	22.2	11.3

#### 3.2 界面剪切试验与模拟结果对比分析

为了验证基于三维激光扫描和界面三维重构技术在模拟高聚物-粉土界面剪切行为方面的准确性,本文在法向应力为200 kPa的条件下,对比了不同密度条件下粗糙界面的数值模拟结果与直剪试验结果。具体对比结果见图9。图9的结果表明,有限元数值模拟可以有效预测高聚物-粉土接触界面在剪切过程中的各阶段变化。在模拟的初始阶段(即

OA段),剪切位移随剪切应力的增加而线性增长,表明此时界面处于粘结状态,主要受到黏聚力模型的支配。随后进入第二阶段(AB段),随着剪切应力的进一步增加,黏聚力开始失效,界面间的粘结力随位移的增加而减小。到了第三阶段(BC段),剪切位移对剪切应力的响应变得不那么明显,这一阶段主要由库伦摩擦模型控制,界面间的相互作用力保持相对稳定。这一结果表明,选定的接触面模型能够精确地描述剪切过程中界面的相互作用。此外,从图9还可以看出,模拟与试验得到的剪切强度之间的近似误差范围在2.11%~5.94%,这证实了该模型在预测峰值剪切强度方面的有效性。综上所述,模拟结果有效地验证了黏聚力摩擦模型在捕捉界面粗糙度对剪切强度影响,特别是在摩擦方面的作用,从而能够较为准确地模拟高聚物-粉土接触面的直剪试验结果。

### 3.3 剪切过程界面应力变化分析

在剪切过程中,接触面上的应力变化直观地反映了内部抗剪强度的动态规律。因此,本文通过输

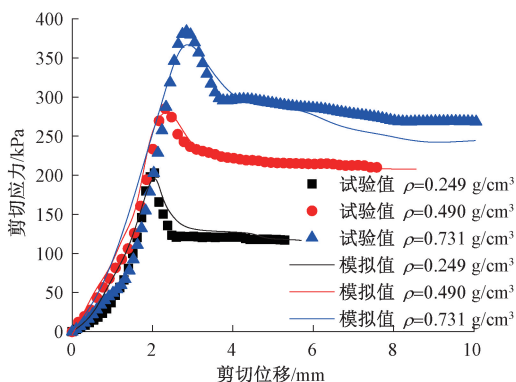


图9 数值模拟与试验结果对比

Figure 9 Comparison of numerical simulation and experimental results

出并分析数值模型中的应力变化云图进行研究,以归纳和总结其应力变化的规律。结合图10分析了接触面在剪切各阶段的应力变化况,图中S表示 von Mises 应力,单位为 MPa。从图10(a)可见,在剪切初期,试样上部由于受剪切力和界面粗糙度的共同作用,在左侧首先产生应力并发生变形。在这一阶段,界面剪应力从左至右、从上至下传递。随着位

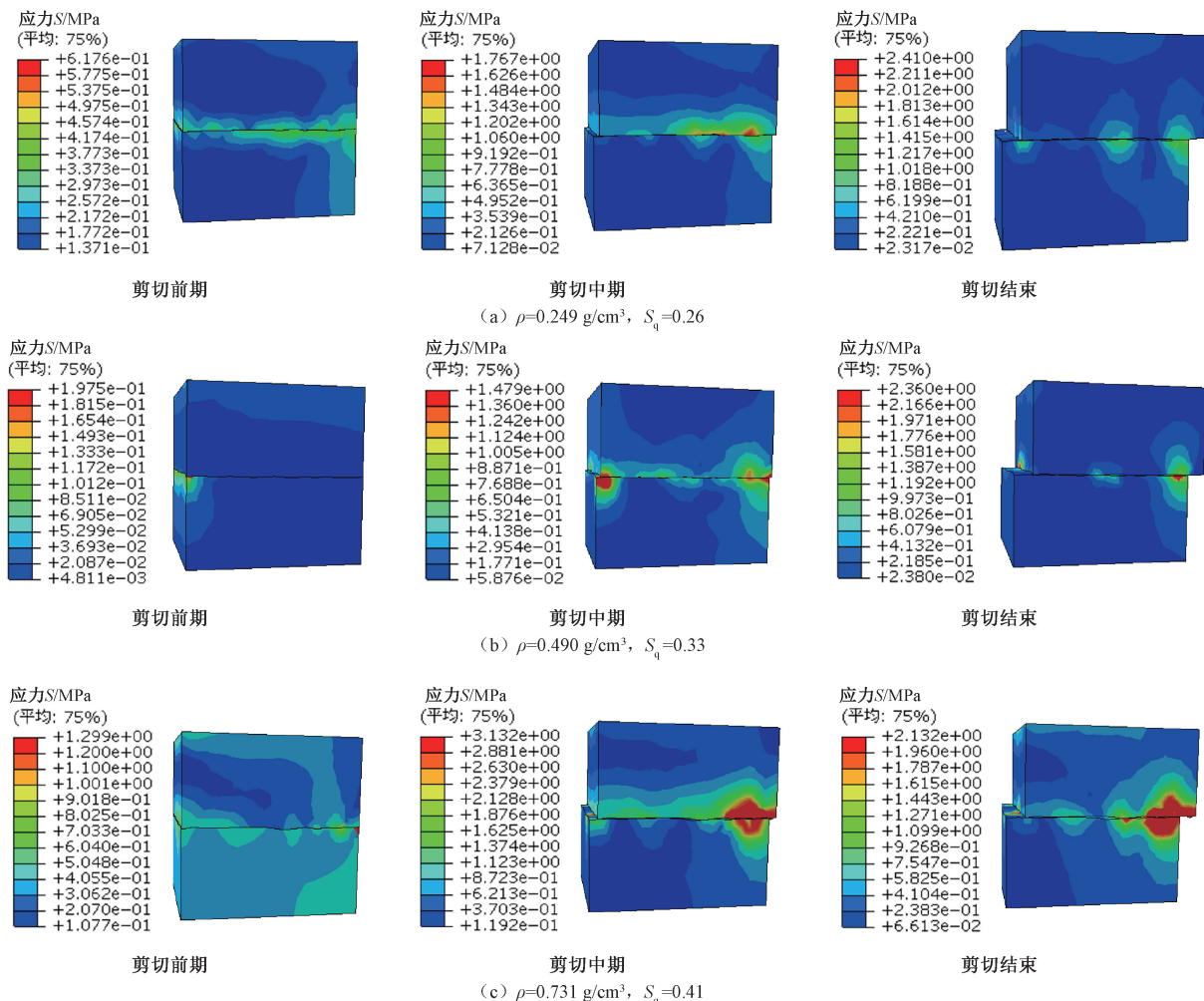


图10 剪切过程中界面应力分布图(上部为高聚物,下部为粉土)

Figure 10 Stress distribution at the interface during the shear process (polymers in the upper part and silt in the lower part)

移增加,剪切方向上,右侧接触界面的剪应力逐渐增强。进入剪切试验中期,由于接触界面存在一定粗糙度,界面突起阻碍剪切位移的进一步发展,导致界面突起部位产生应力集中,此时界面上的剪应力显著增大。随着位移持续增加,突起部位发生剪切破坏,致使界面剪切位移突然增大。随后,上下两部分试件间的剪应力逐渐降低,此时界面剪应力的传递主要依赖于界面间的摩擦力。最终,界面剪应力逐渐减少并稳定<sup>[8]</sup>。图 10(b)和 10(c)展示了其他粗糙度界面( $S_q$  为 0.33 mm 和 0.41 mm)的应力分布情况。可以明显观察到,随着粗糙度的增加,复合试样表面的应力分布逐渐变得不均匀。在低粗糙度试样中,应力主要以倒三角形均匀分布于中部和界面凸起处;而高粗糙度试样的应力则更多集中于界面上表面凸起处,应力集中现象更为明显。特别地,高粗糙度试样在右端产生了更显著的应力集中,这归因于低粗糙度下,大部分凸起在剪切结束时已破坏,

不再影响剪切运动,使得应力分布较为均匀<sup>[9]</sup>,相反,高粗糙度试样的右端仍有部分未被完全破坏的凸起,这些凸起继续影响应力分布和传递。通过对数值模拟的云图和数据曲线结果的分析,可以发现数值模型的界面剪切过程与直剪试验的各个阶段相对应。具体剪切过程可大致分为 3 个阶段:线弹性阶段、界面破坏阶段以及剪切界面摩擦阶段。

### 3.4 接触界面应力分布特征

从图 11(a)可以看出,表面粗糙度引起了接触面剪应力分布的不均匀性。在剪切前期,由于表面粗糙,接触主要在突起的顶端发生,此时只有少数凸起参与剪切,并在该处形成显著的应力集中。随着剪切位移的增加,在剪切中期最初的接触点发生形变,形成新的接触点,应力传递至新的接触点,并向内部及周围区域传播,最终呈环状分布。最后,由于凸起部分在剪切过程中被破坏,表面的粗糙度有所减少,从而使得接触面上的应力分布变得更加均匀。

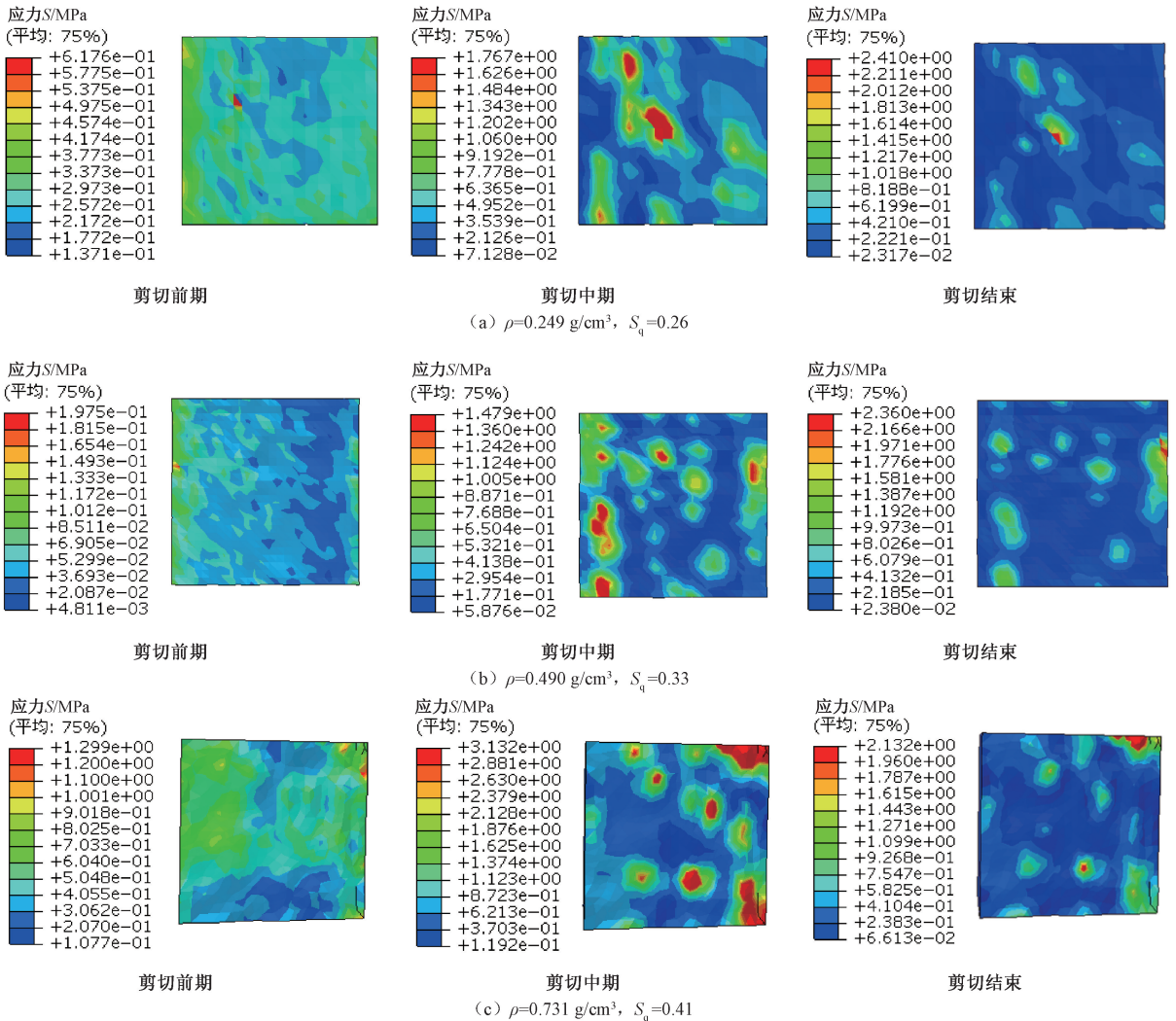


图 11 接触界面应力分布图 (高聚物表面)

Figure 11 Stress distribution at the contact interface (polymer surface)

图 11(b) 和 11(c) 展示了在相同的法向应力和位移条件下,具有不同表面粗糙度( $S_q = 0.33 \text{ mm}$  和  $S_q = 0.41 \text{ mm}$ )的界面试件剪应力分布情况。可以发现,随着表面粗糙度的增大,不仅界面剪应力随之增大,而且应力集中现象也更为突出。在  $S_q = 0.33 \text{ mm}$  的情况下,由于表面凸起幅度较小,剪应力较为均匀地分布于突起及其周边区域。然而,当粗糙度提升至  $S_q = 0.41 \text{ mm}$  时,更多且更高的突起导致剪应力主要集中于这些顶端,从而显著加剧了应力集中的现象。这进一步证实在相同加载条件下,具有更高表面粗糙度的界面将承受更大的应力,导致接触面剪应力相应增大,并提高了界面剪切强度。

## 4 结论

(1) 在高聚物密度和法向应力的共同作用下,高聚物-粉土界面剪切破坏过程表现出明显的应变软化特征,其主要可分为 4 个阶段:压实阶段、线弹性阶段、界面破坏阶段以及剪切断面摩擦阶段。随着高聚物密度的增加,界面的抗剪强度、对应的剪切位移以及破坏后残余应力均呈现增大趋势。

(2) 通过结合无损分离技术和三维激光扫描技术,可以有效地捕获界面的完整形态。随着高聚物密度的提高,界面粗糙度参数  $S_a$  和  $S_q$  相应增加,导致界面粗糙度显著提升。这一变化增强了界面间的机械互锁效应和摩擦力,从而有效提升了界面的抗剪强度。

(3) 通过使用黏聚力摩擦模型进行直剪试验仿真,能够有效反映剪切过程中界面应力变化情况。剪切过程可以大致划分为 3 个阶段:线性弹性阶段、界面破坏阶段以及剪切断面摩擦阶段。

(4) 在剪切过程中,接触面的应力分布及剪切强度与接触表面的粗糙度相关。界面剪应力主要集中在界面突起的顶端及其周边区域,随着剪切的进行,这些表面突起逐渐遭到破坏,导致表面粗糙度降低,进而促进接触面上的应力分布趋向均匀。此外,具有较高粗糙度的界面在承受更大剪应力的同时,增强了接触面的机械互锁作用,从而有效提高了接触面的抗剪强度。

## 参考文献:

[1] 许传桂. 我国病险水库的现状[J]. 大坝与安全, 2000, 14(3): 52-53.  
XU C G. The current situation of diseased dams in China [J]. Large dam & safety, 2000, 14(3): 52-53.  
[2] 王复明, 徐建国, 杨柳, 等. 堤坝高聚物防渗墙静力

荷载试验与数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 27-34.  
WANG F M, XU J G, YANG L, et al. Static load experiment and numerical analysis of polymer diaphragm wall of dam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 27-34.  
[3] LI J, LI J, ZHANG J W, et al. Static and dynamic properties study on interface between new polymer materials and silty clay based on ring shear tests[J]. Polymers, 2023, 15(3): 634.  
[4] 徐建国, 王复明, 钟燕辉, 等. 静动力荷载下土石坝高聚物防渗墙受力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1699-1704.  
XU J G, WANG F M, ZHONG Y H, et al. Stress analysis of polymer diaphragm wall for earth-rock dams under static and dynamic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1699-1704.  
[5] LI M J, FANG H Y, DU M R, et al. The behavior of polymer-bentonite interface under shear stress[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118680.  
[6] 林沛元, 郭潘峰, 郭成超, 等. 钢板、高聚物、土不同材料界面剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 85-93.  
LIN P Y, GUO P F, GUO C C, et al. Experimental study on interfacial shear properties of steel plate, polymer and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 85-93.  
[7] MURALI N, GUJAR P, GHOSH P. Performance of clay-epoxy interface at different points on proctor curve[J]. Applied Clay Science, 2022, 226: 106553.  
[8] 王刚, 张书博, 连莲, 等. 基于零厚度黏聚力单元节理面剪切破坏机理宏观细观研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2224-2232.  
WANG G, ZHANG S B, LIAN L, et al. Macro-micro study on shear failure mechanism of rock joint based on zero-thickness cohesive element[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2224-2232.  
[9] 蒋宇静, 张孙豪, 栾恒杰, 等. 循环载荷对岩石节理宏观细观剪切特性影响的模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 199-211.  
JIANG Y J, ZHANG S H, LUAN H J, et al. Numerical investigation on the effect of cyclic loading on macro-meso shear characteristics of rock joints[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 199-211.  
[10] BADIKA M, EL MERABI B, CAPDEVIELLE S, et al. Influence of concrete-rock bonds and roughness on the shear behavior of concrete-rock interfaces under low normal loading, experimental and numerical analysis[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5643.

- [11] LIU X W, DENG W, LIU B, et al. Influence analysis on the shear behaviour and failure mode of grout-filled jointed rock using 3D DEM coupled with the cohesive zone model [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 155: 105165.
- [12] ZHANG S B, ZHENG X, WANG C S, et al. Shear behavior and asperity damage of 3D rough joints under CNS boundary conditions based on CZM simulation[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5064.
- [13] QIN L, GUO C C, SUN W, et al. Experimental investigation on the interfacial shear bond performance of non-water reacting polymer and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 331: 127351.
- [14] PAN W, ZHANG C, WANG C X, et al. Compressive fatigue resistance and related microscopic mechanisms in foamed polyurethane grouting materials for roadbed rehabilitation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 171: 107593.
- [15] 王娟, 方宏远, 余自森, 等. 高聚物碎石混合料单轴受压性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 320-326.  
WANG J, FANG H Y, YU Z S, et al. Experimental study on uniaxial compressive properties of polymer gravel mixtures[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(2): 320-326.
- [16] 石明生. 高聚物注浆材料特性与堤坝定向劈裂注浆机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
SHI M S. Research on polymer grouting material properties and directional fracturing grouting mechanism for dykes and dams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[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.
- [18] HUANG H W, ZHAN Y, TAO Y L, et al. Three-dimensional characterization of bonding features for asphalt pavement interface using a novel interlayer isolation film [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 311: 125301.
- [19] Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal-Part 1: Indication of surface texture: ISO25178-1-2016[S]. Geneva, Switzerland; International Organization for Standardization, 2016, 15. <https://www.iso.org/standard/46065.html>.
- [20] LI X X, WANG F M, FANG H Y, et al. Bond behavior between concrete and self-expansion polymer material under normal pressures[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6675102.
- [21] 李斌, 方宏远, 王复明. 脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(1): 62-66.  
LI B, FANG H Y, WANG F M. Analysis of the mechanical characteristics of disengaging drainage pipe before and after polymer repairing[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2019, 40(1): 62-66.

## Analysis of Polymer-silt Soil Shear Properties Based on Three-dimensional Reconstruction of Interfacial Morphology

ZHANG Chao<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2,3</sup>, XIA Yangyang<sup>1,2,3</sup>, WANG Cuixia<sup>1,2,3</sup>,

LIU Quanhong<sup>5</sup>, FANG Hongyuan<sup>1,2,3,4</sup>, Timon Rabczuk<sup>6</sup>, WANG Fuming<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Collaborative Innovation Center for disaster prevention and control of Underground Engineering Jointly Built by Provinces and Ministries, Zhengzhou 450001, China; 4. Yellow River Laboratory (Henan), Zhengzhou 450001, China; 5. School of Building Engineering and Intelligent Construction, Henan Open University, Zhengzhou 450008, China; 6. Institute of Structural Mechanics, Bauhaus University Weimar, Weimar 99425, Germany)

**Abstract:** To investigate the influence mechanism of polymer density on the contact morphology and interfacial shear properties of polymer-silt soil interface. Using a non-destructive method for separating interfaces, combined with three-dimensional laser scanning, the scanning test of three-dimensional interfacial topographic features of polymer-silt was carried out, and the interfacial roughness parameters were obtained under different densities. Com-

combined with the interfacial direct shear test, investigated under the influence of different polymer density, polymer-silt interface roughness parameters, interfacial shear stress-displacement relationship, interfacial shear mechanical strength parameters, and the change laws of interfacial roughness parameters and interfacial shear strength. Based on this, a finite element model of a random three-dimensional rough interfacial was established by using COMSOL software to further explore the shear damage mechanism of polymer-silt soil interface under different interfacial roughness. The results show that the finite element numerical model based on three-dimensional interface reconstruction can accurately predict the shear stress-displacement relationship of polymer-silt soil interface under different densities, and the main damage feature of polymer-silt soil interface under direct shear load is the stress concentration formed at the interface bumps, and the greater the density, the more the bumps, and the more obvious the stress concentration. The roughness and shear strength of the polymer-silt soil interface increase with the increase of polymer density, and the roughness and shear strength of the polymer-silt soil interface satisfy the linear relationship.

**Keywords:** polymer-silt soil; interfacial shear; three-dimensional laser scanning; interfacial morphology; numerical simulation