**文章编号:**1007-9629(2024)08-0744-13

# 高聚物-纤维复合改良砂土的强度特性与变形机理

黄庭伟, 刘 瑾\*, 朱旭芬, 车文越, 孙梦雅

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:为改善砂土的不良工程特性并可用于河道岸坡、地基与道路加固,本文提出了一种使用高聚物和纤维复合改良砂土的方法.通过无侧限抗压强度试验和数值模拟,分析了改良砂土的强度特性及 变形破坏模式.结果表明:复合使用高聚物和纤维能够有效提高砂土的抗压强度,且改良砂土的抗压 强度随着高聚物和纤维掺量的增加而提高;改良砂土的最大抗压强度为414.53 kPa,纤维和高娶物 最佳建议掺量分别为0.6%和4.0%;纤维加入后,在砂土中形成了力链网络,因此增加了应力传递的 路径,有效地延缓了砂土内部微裂纹的发育;高聚物加入后,形成的膜状物与纤维交织在一起,形成 一种新的网状结构,这显著提升了砂土的抗变形能力.

关键词:砂土改良;复合材料;破坏变形;数值模拟;改良机理

 doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.010

## Strength Characteristics and Deformation Mechanism of Modified Sand by Using Polymers and Fibers

HUANG Tingwei, LIU Jin<sup>\*</sup>, ZHU Xufen, CHE Wenyue, SUN Mengya (School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** To improve the unfavorable engineering performance of sand and make it applicable for riverbank slopes, foundation, and road reinforcement, a method for modifying sand using polymers and fibers is proposed. Through unconfined compressive strength tests and numerical simulations, the strength characteristics and deformation failure modes of the modified sand are analyzed. The results indicate that the combined use of polymers and fibers can effectively enhance the compressive strength of sand, and the compressive strength of the modified sand increases with the dosage of polymers and fibers. The maximum compressive strength of the modified sand is 414.53 kPa, with the optimal recommended dosages of fibers and polymers being 0.6% and 4.0%, respectively. The addition of fibers forms a force chain network in the sand, thereby increasing the stress transmission paths and effectively delaying the development of micro-cracks within the sand. The incorporation of polymers creates a membranous substance that intertwines with the fibers, forming a new network structure, which significantly improves the deformation resistance of the sand.

Key words: modified sand; polymer; failure deformation; numerical simulation; improvement mechanism

砂土作为常见的岩土工程材料,在工程建设中 广泛使用<sup>[1]</sup>.松散的天然砂土堆积体在荷载作用下极 易发生强度丧失,引发地基沉降、路面塌陷等不良现 象<sup>[24]</sup>.为改善砂土的不良工程特性,通常需使用固化 剂对天然砂土进行加固处理.传统砂土加固材料如水泥、石灰等因价格低廉而被广泛应用于地基加固<sup>[5-6]</sup>,但土体加固后易发生脆性破坏,且存在植被生长难、环境污染大等问题<sup>[7-9]</sup>.使用高分子聚合物加固

收稿日期:2023-10-05;修订日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42307189)

第一作者:黄庭伟(2001一),男,湖南邵阳人,河海大学硕士生.E-mail: huangtw728@163.com

通讯作者:刘 瑾(1983—),女,福建漳州人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail: jinliu920@163.com

土体是一种新兴的土体改良方法,具有反应简单、添 加量小、固化效果好、对生态坏境无污染等特点[10-11]. 近年来,有学者[12-13]对聚合物加固进行研究,发现聚 合物加固不仅效果好,而且具有绿色环保的优势.纤 维作为一种加筋材料在土体改良中广泛应用[14].研 究[15-16]发现,纤维能有效改善土体脆性破坏特征,提 高土体的抗剪强度.使用聚合物加固土体以提高土 体强度为主[17],而使用纤维给土体加筋以改善土体 抗变形能力为主[18].通过聚合物与纤维相结合对土体 进行复合改良,能够充分利用纤维和聚合物的各自 优势且避免单一使用存在的局限性[19].由于离散元法 对于散体材料及其破坏过程的模拟有较好适用 性[20-21],因此,倪雪倩等[22]利用离散元法对砂土液化 后液-固相变转进行模拟分析,建立了砂土液化后土 体应力-应变关系的经验模型.高广运等[23]进一步研 究了饱和砂土的液化判别和放大效应.叶斌等[24]则 利用数值模拟探讨了制样方法对砂土液化力学性质 的影响.周林禄等[25]对纤维加筋砂土的模拟参数进 行了标定.但上述研究以使用聚合物或纤维单一材 料模拟砂土力学行为为主,关于使用高聚物和纤维 复合改良土体的数值模拟研究鲜有报道.

综上,本文利用高分子聚合物和聚丙烯纤维来 复合改良砂土,通过无侧限抗压强度试验,分析改 良砂土强度特性,再利用试验结果建立相应的离散 元平行黏结模型,借以分析改良砂土的变形破坏模 式,最后通过扫描电镜(SEM)对高聚物-纤维复合 改良砂土的微观结构和改良机理进行分析,为多种 材料复合改良砂土提供一定的理论支撑和实践 指导.

## 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

砂土取自于南京市江宁区,相对密度为2.66,有 效粒径 $D_{10}$ 、中值粒径 $D_{30}$ 、控制粒径 $D_{60}$ 分别为0.12、 0.22、0.36 mm,最小孔隙率为0.38,最大孔隙率为 0.59.高分子聚合物(SP)为一类含重复氨基甲酸酯 结构单元(-R-NH-CO-O-R')的有机高分子化合物 (图1(a)),其物理参数如表1所示.纤维(FP)为聚丙 烯纤维(图1(b)),具有弹性高、抗低(高)温性好、耐 酸碱性好、吸水性小等特点,其物理参数如表2所示.



Table 2 Basic physical parameters of polypropylene fiber								
Density/(g• cm <sup>-3</sup> )	Diameter/mm	Average length/ mm	Tensile strength/MPa	Modulus of elasticity/MPa	Elongation at break/%	Melting point/℃	Ignition point/°C	
0.91	0.04	18	≥400	≥3 500	30	165	580	

## 1.2 室内试验方法

根据预试验相关结果,试验所选用的纤维掺量 (以砂土质量计)分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%, 高分子聚合物含量(以砂土质量计)为1.0%、 2.0%、3.0%、4.0%.聚丙烯纤维具有极好的分散 性,利用工具在砂土中分散纤维,加入高聚物后再 次分散纤维,搅拌均匀的高分子聚合物-纤维-砂 土混合物放入 \$\phi39.1\times 80.0 mm的模具中,采用静 压法将其一次压实至设计高度(80 mm),制成干密 度1.50 g/cm<sup>3</sup> 的圆柱试样.设置3个平行样,脱模 试样置于室内条件下养护48 h.试验采用YYW-2 应变控制式无侧限压力仪并根据GB/T 50123— 2019《土工试验方法标准》测定纤维复合高聚物改 良试样的抗压强度.

## 1.3 数值试验方法

为进一步分析纤维掺量对改良砂土变形破坏的 影响,通过无侧限抗压试验应力应变曲线的对比验 证,建立高聚物掺量4.0%下不同纤维掺量的数值模 型.在建立的数值模型中,砂粒与纤维被简化为离散 的单元球颗粒,基于粒径曲线生成约10000个砂土 球颗粒,通过随机函数在试样内随机生成指定掺量 的纤维颗粒,根据砂土和纤维颗粒的不同接触附加 上相应的胶结模型(图2(a)).图2(b)为建立的数值 模型,砂颗粒与砂颗粒间、砂颗粒与纤维颗粒间所采 用的接触模型都是平行黏结模型,砂颗粒与加载板 间采用线性模型,具体力学组件如图2(a)所示.模型 初始参数选取如表3所示,用对比曲线来调整、确定 试样参数.



图2 接触布置和数值模型

Fig. 2 Contact placement and numerical model(size: mm)

Table 3   Initial parameters of the model						
Category	Parameter	Parameter value				
	Model height/cm	8.00				
	Model width/cm	3.91				
	Minimum grain size/mm	0.02				
Sand particle parameters	Maximum to minimum grain size ratio	30				
	Particle density( $kg \cdot m^{-3}$ )	1 500				
	Initial porosity/ %	0.1				
	Damping coefficient	0.7				
Tiken mentiale meneratore	Particle density(kg $\cdot$ m <sup>-3</sup> )	2 700				
r iber particle parameters	Grain size/mm	0.2				
Lincor model peremeters	Linear effective modulus/Pa	$4.0 \times 10^8 - 9.0 \times 10^8$				
Linear model parameters	Linear stiffness ratio	1.5				
	Effective modulus of parallel bond/Pa	$0.65 \times 10^{5} - 1.00 \times 10^{5}$				
	Parallel bond stiffness ratio	1.5				
Parallel bond model	Bonding activates the gap/m	$0.5 \times 10^{-4}$				
parameters	Tensile strength/Pa	$2.0 \times 10^{5}$ - $4.0 \times 10^{5}$				
	Cohesion/Pa	$2.0 \times 10^{4} - 8.0 \times 10^{4}$				
	Angle of internal friction/(°)	16-26				

#### 表 3 模型初始参数 Table 3 Initial parameters of the model

## 2 结果与分析

#### 2.1 不同纤维掺量下改良砂土的应力-应变特性

图 3 是不同高聚物或纤维掺量下改良砂土的应 力应变曲线,可以发现高聚物与纤维掺量对砂土的 应力-应变曲线有显著的积极影响,随着高聚物和纤 维掺量增加,改良砂土的应力应变曲线形态发生改 变,峰值应力明显增大.对比图 3(a)~(d)不同高聚物 掺量下纤维掺量变化的应力-应变曲线,发现纤维掺 量增加对初期曲线影响较小,应力初期增长速率接 近,曲线峰值应变和峰值应力有较高提升,峰后变化 明显变缓.在较高高聚物含量(3.0%、4.0%)下随着 纤维掺量增加,改良砂土曲线形态明显由应变软化 转变为应变硬化型,峰后曲线变化平稳,抗压强度 增大.

在不同高聚物和纤维掺量下,改良砂土的应力-应变曲线变化趋势具有同质性,大致分为4个阶段: 压密阶段(阶段II)、弹性变形阶段(阶段II)、塑性变 形阶段(阶段III)、峰后变形阶段(阶段IV).以图3(d) 应力-应变曲线为例,砂土应变0%~2.5%(压密阶 段)的应力增长逐渐加快,应变2.5%~7.0%(弹性变 形阶段)的应力呈线性增长,应变7.0%~10.0%(塑 性变形阶段)的曲线逐渐拉长,应力缓慢增大,应变 10.0%(峰后变形阶段)后的残余应力变化趋于稳定. 应变5.0%后的改良砂土曲线随纤维掺量增加有明 显提升,峰后稳定的应力明显增加.说明纤维在压 密阶段结束后开始发挥加筋作用,提升砂土抗压 强度.

#### 2.2 高聚物和纤维掺量对改良砂土的抗压强度影响

高聚物和纤维掺量对改良砂土的抗压强度影响 见图 4.图 4(a)表明,随着高聚物和纤维掺量增加,改 良砂土的抗压强度明显提高.纤维掺量从 0.2%增加 至 0.8%的改良砂土抗压强度提升了 11.72~ 85.95 kPa,增量为 20.55%~301.53%.高聚物掺量从 1.0%增加至 4.0%的改良砂土抗压强度提升了 46.61~136.54 kPa,增量为 48.13%~380.17%.图4 (b)表明,随着高聚物和纤维掺量增加,试样抗压强 度增量逐渐减小.说明较高掺量下高聚物和纤维对 改良砂土的抗压强度提升效果逐渐减弱,分析其原 因是砂土孔隙被纤维、高聚物充分填充,掺量增加后 部分纤维挤压至砂土外部,难以发挥作用(图5).

高聚物增强砂土抗压强度的提升机制主要是高 聚物与砂粒面的黏附作用.当高聚物与砂粒接触时, 高聚物可通过氢键及Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>化学键等化学黏附 和范德华力物理黏附作用吸附在砂粒表面<sup>[10-12]</sup>,改善 了砂土颗粒间的接触模式,由点-点接触转变为面-面接触.纤维对黏土物理力学性能的改善主要来自 于纤维表面与黏土颗粒间的黏结和摩擦作用<sup>[26]</sup>.对于 砂土,纤维增强砂土抗的压强度取决于纤维表面与 土颗粒之间的界面摩擦.高聚物和纤维复合改良砂 土是一个复杂多相材料,高聚物负责提供颗粒间黏 聚力,纤维借助高聚物的黏结作用与自身和砂粒间



Fig. 4 Influence of superpolymer and fiber dosage on compressive strength of modified sand

的界面摩擦作用形成网状结构,显著提高了改良砂 土的抗压强度与抗变形能力.

#### 2.3 改性砂土破坏过程数值模拟

#### 2.3.1 模型验证

无侧限抗压强度测试模拟试验结果与室内试验 结果对比如图6所示.由图6(a)可见,随着纤维掺量的 增大,模型试样的无侧限抗压强度不断提高,与室内 试验变化趋势近似,各试样的无侧限抗压强度与室内 试验结果基本一致.由图6(b)可见,模拟试验中发展 的裂隙与室内试样的裂隙分布相近.说明模型与参数 标定的可靠性得到了充分验证,模拟结果适用于改良 砂土强度特性与变形破坏模式的进一步分析.

## 2.3.2 纤维对砂土颗粒接触力链的影响

图7给出了不同纤维掺量下试样的接触力链分 布图,线段方向与粗细分别代表了颗粒间的接触力 方向与大小.由图7可以看出,随着纤维掺量增加,试 样纤维掺量和分布对接触力链分布有显著的影响. 纤维掺量0.2%的改良砂土在纤维分布处,其纤维不



图 6 数值试验模型验证 6 Varification of the numerical simulation too

Fig. 6 Verification of the numerical simalation test

能充分缠绕砂土颗粒,颗粒易产生位移与旋转而发 生破坏,破坏处表现出明显的多径破坏,力链分布沿 破坏路径有明显分区,且颗粒间力链强弱较为明显. 试样纤维分布密集处力链分布与强度逐渐分散,破 坏范围和程度明显减小,说明纤维增多能够有效缠 绕砂土颗粒,有效限制砂粒进一步位移和旋转,抑制 了颗粒多向破坏路径的发展,同时纤维的掺入增加 了内部各组分间作用力的传递路径,局部应力集中 不明显.试样中横向纤维限制了上部区域颗粒继续 向下位移,横向纤维上侧颗粒力链增强,说明纤维有效限制了颗粒位移,增强颗粒间相互作用力.随着纤维掺量增加,纤维分散处的破坏延伸面有明显力链凹陷,纤维密集处区域无明显破坏,且没有出现明显的力链凹陷,试样整体破坏区域明显减少,破坏处两侧力链较强,破坏延伸方向上的力链较弱.说明纤维增多能够有效增强区域各组分间的联接,有效抵抗受压颗粒的位移和旋转.

进一步分析图7可知,纤维分散性对试样变形、



Fig. 7 Force chain distribution of samples with different fiber dosages

裂纹扩展有显著影响.纤维分散稀疏处试样呈多径 多向破坏,力链沿破坏路径形成分区,破坏区域变形 程度较为明显,多处颗粒位移产生较多裂纹,纤维发 生弯曲与断裂.纤维分散密集处试样破坏路径明显 减少,力链区域传递路径增多,减少应力集中,破坏 程度与范围明显减小,减缓了裂纹的进一步扩展,纤 维以弯曲变形为主.高掺量高聚物的黏结能够有效 增强纤维与砂粒的作用,随着纤维掺量增加,纤维分 散稀疏与密集处力链均匀度均显著提升,分散处破 坏张开程度明显减小,分散密集处无明显破坏,以变 形为主.

不同应变下各纤维掺量试样的力链数量及最大 力链强度参数变化如图8所示.由图8可见,当纤维 掺量较少(0.2%、0.4%)时,随着应变增加力链数量



图 8 不同纤维掺量下试样的接触力链参数变化

Fig. 8 Change of contact force chain parameters of samples with different fiber dosages

和最大力链强度的变化规律相似,先逐渐上升后快速下降.随着纤维掺量增加,各应变处接触力链数量与强度均一直增大,6%应变后的最大力链强度增大幅度较为明显.当纤维掺量较高(0.6%、0.8%)时,随着应变增大接触力链数量一直增加,最大力链强度在9%应变处达到峰值后逐渐稳定.说明纤维的加入增加了各组分间的接触点,使试样在较大应变处具有较强的抵抗力,有效提升试样抗压强度.随着应变增大,接触力链数量与最大力链强度的变化趋势与应力应变曲线变化相近,说明高聚物和纤维的加入通过提升力链数量与强度改善了试样的应力应变. 2.4.3 纤维对改良砂土破坏过程的影响

为深入研究纤维掺量对试样破坏的影响,对数值 模拟试验不同阶段的结果进行分析,得到不同纤维掺 量下试样的破坏模式,见图9.由图9可以观察到,不同 纤维掺量模拟试样最终裂隙两侧分布较多微裂纹.试 验开始后,试样受到上部加载板施加的荷载,颗粒受

力发生位移,虚线周边区域出现力链凹陷区,且部分 力链凹陷区旁出现强接触力链区.随着荷载应力增 加,强接触力链区颗粒超出受力极限被迫发生位移和 旋转,虚线区颗粒出现应力集中,力链凹陷区颗粒沿 虚线发生错动,虚线区力链发生断裂,颗粒位移后颗 粒间力链重构,虚线两头形成局部微裂纹,微裂纹不 断扩展、延伸、发展,最终导致了裂隙的形成.当纤维 掺量较低(0.2%、0.4%)时,试样破坏程度剧烈,鼓胀 后裂隙较大,力链区域有较多分支的形态,出现三个 应力凹陷区,主裂隙内部发育有多向路径的次裂隙. 当纤维掺量较高(0.6%、0.8%)时,试样以鼓胀破坏为 主,破环程度明显减弱,主裂隙上发育的较短次裂隙 明显减少,力链区域性不明显,应力凹陷减少至两个, 破环主要出现在试样内部,表面裂隙面积不大.说明 纤维对砂粒间的相互联接有显著提升,随着纤维掺量 增加,颗粒间的联接更为紧密,使受力后局部失稳的 现象得到改善,试样发生整体鼓胀破坏.



图 9 不同纤维掺量下砂土试样破坏模式 Fig. 9 Failure modes of sand samples with the different dosage

数值模拟试验结束后不同纤维掺量的试样微裂 纹热力分布情况如图 10 所示.由图 10 可以看出,试 样微裂纹分布密集的位置在试样内部,且随着纤维 掺量增加微裂纹分布逐渐分散,微裂纹数量逐渐减

![](_page_8_Figure_2.jpeg)

图 10 不同纤维掺量的试样微裂纹热力分布 Fig. 10 Thermal distribution of microcracks in samples with different fiber dosage

少.纤维掺量0.2%的试样破坏较为剧烈,发育的微裂纹形成大裂隙贯穿了整个试样,内部微裂纹多路径向外延伸.当纤维掺量较高(0.6%、0.8%)时,试样以局部鼓胀破坏为主,无明显大裂隙贯通试样.说明

纤维能够联通周边砂粒,分散荷载施加的应力,减缓 微裂纹发育,有效地降低了试样破坏程度.

图 11 展示了试样微裂纹数量与裂隙发育过程. 由图 11 可以观察到,数值模拟试验中不同纤维掺量 的试样微裂纹增量模式和裂隙发育有明显改变.纤 维掺量 0.2% 的试样微裂纹发育曲线总体呈"S"型, 可分为4个阶段:压密和弹性阶段(阶段 I)、缓慢发 展阶段(阶段 II)、快速发展阶段(阶段 II)和稳定阶 段(阶段 IV).从图7(a)中可以看出,在压密和弹性阶 段,改良砂土内部无微裂纹产生.随着应变增大,微 裂纹在试样内部逐渐缓慢扩展,增长速率逐渐加快, 试样处于缓慢发展阶段.应变进一步增大,试样进 入快速发展阶段,微裂纹数量迅速增加,增长速率不 断减小.当试样微裂纹数量达到峰值,试样内部结 构完全破坏,微裂纹的发育明显变缓并趋于稳定,各 处微裂纹延伸贯穿试样形成裂隙,试样处于稳定阶 段.不同纤维掺量下,剪切微裂纹数量始终占主导,

![](_page_8_Figure_7.jpeg)

Fig. 11 Number and development process of microcracks in samples with different fiber dosage

且远大于张拉微裂纹,说明试样破坏区域主要是由 颗粒间受剪,颗粒位移产生剪切微裂纹,剪切微裂纹 进一步扩展连通形成的.当纤维掺量较低(0.2%) 时,微裂纹数量发育明显呈4个阶段.随着纤维掺量 增加,微裂纹数量明显减少,发育阶段减少至3个阶 段.说明纤维增加降低了试样破坏程度,减缓了试 样微裂纹发育过程,使得稳定发育阶段消失.当纤 维掺量较高(0.8%)时,微裂纹数量有所增加,剪切 与张拉微裂纹的数量均出现增长.说明纤维掺量的 增加加强了颗粒间的联接,位移的颗粒带动了周围 颗粒移动,引发多处区域出现微裂纹.

## 3 讨论

高聚物-纤维复合改良砂土的改良机理如图12 所示.图12(a)中高聚物加水反应形成高聚物乳液, 乳液与砂土、纤维混合均匀后,高聚物形成的膜状结构附着、包裹或黏合在纤维与砂土颗粒的表面,同时 纤维穿插填充在砂土颗粒的间隙中,构成了较稳定 的团状体.其中纤维与高聚物膜之间为物理黏附,砂 粒与高聚物膜间部分能够形成氢键,以物理黏附为 主<sup>[27-28]</sup>.纤维受到周围砂粒挤压发生变形,与周边纤 维交织协同锚固砂粒<sup>[26]</sup>.嵌入砂粒间隙的纤维锚固 住接触的砂土颗粒(图12(b)),通过高聚物膜联接 周边砂土颗粒,延展性好的纤维与韧性强的高聚物 膜能够有效地阻碍砂粒受力发生较大位移,减缓了 改良砂土的破坏.从图12(c)中可以看到,纤维掺量 较少时(0.2%),纤维零星地嵌入砂土颗粒间隙中, 起到锚固土体的作用.纤维掺量较多时(0.8%),部 分区域纤维出现交织穿插现象,相互桥搭并借助高 聚物膜形成网状结构,限制结构内部砂土颗粒的位

1 mm

![](_page_9_Figure_6.jpeg)

(c) SEM image 图 12 高聚物-纤维复合改良砂土的改良机理 Fig. 12 Improvement mechanism of sand modified composilely by fiber and polymer

1 mm

移,纤维良好的延展性与高聚物膜的弹性使得网状 结构稳定性较好,有效增强试样的抗变形能力.

分析改良砂土的微观结构发现,松散的天然砂 土在掺入纤维和高聚物后形成了较稳定的结构.纤 维与高聚物膜共同作为砂粒间的桥梁,在外界能量 输入后进行能量传递和吸收,减少外力作用后的试 样破坏.

图 13 为改良砂土的破坏过程示意图.由图 13 可见,纤维较少时纤维零星地分布在试样内部,主要起到加筋作用.纤维掺量增加时,纤维在砂粒间隙相互

搭接组成网格,高聚物膜覆盖在纤维和砂粒表面,形 成稳定的网状结构.加载后,砂粒和纤维被逐渐压 密,高聚物膜受压被拉伸,纤维与砂粒受到牵动发生 位移.应力进一步增大,高聚物膜承受不住过大应力 出现破裂,破裂面上的纤维发挥桥接作用,通过纤维 与破裂面两侧高聚物膜的黏结力以及纤维与界面的 摩擦力共同抵抗试样进一步破坏.随着破坏加剧,纤 维逐渐被拉长变细,在牵动砂粒的同时会出现滑脱、 拔出和断裂现象,纤维作用失效,微裂纹延伸形成了 贯通的破裂面,最终导致试样破坏.

![](_page_10_Figure_7.jpeg)

Fig. 13 Failure process of sand improved compositely by polymer and fiber

## 4 结论

(1)高聚物和纤维能显著提升砂土的强度特性. 随着高聚物和纤维掺量增加,改良砂土无侧限抗压强度逐渐提升.随着高聚物和纤维掺量增大,试样峰后应力-应变曲线变化明显平缓,呈现出延性破坏形式.考虑纤维分散与高聚物胶结作用,纤维和高聚物的最佳掺量分别为0.6%和4.0%.

(2)纤维分布密度及掺量对改良砂土的力链、变 形有显著影响.在纤维分布位置砂土易破坏出现裂 纹,力链分布沿裂纹破坏处出现明显分区,随着纤维 分布密度增大,纤维分布密集位置砂土颗粒力链逐渐 增强,破坏明显减弱,说明纤维与砂粒间有较强的作 用,增强了纤维分布密集区域联接.纤维掺量增加,力链 数量与最大力链强度明显增大,提高了试样抗压强度.

(3)纤维掺量对改良砂土的破坏模式、微裂纹变 化有显著影响.试样破坏的虚线区域有明显力链凹 陷,且力链凹陷旁出现强接触力链区.随着纤维掺量 增加,力链区域性、破坏程度逐渐减弱,无明显强接 触力链区,微裂纹数量逐渐减少,延缓了微裂纹发育,说明纤维增强了试样内部颗粒联接,减缓了裂纹 发育及试样破坏.

(4)纤维高聚物的加入显著改善了天然砂土的 内部结构.纤维交织穿插在砂粒孔隙中,有效地缠绕 住砂粒;高聚物在砂粒和纤维表面形成膜状物,对砂 粒具有黏结作用;纤维和高聚物膜共同形成了稳定 的网状结构,起到限制砂土变形的作用,增强了改良 砂土的抗变形能力.

#### 参考文献:

 [1] 陆加越,白坤,张成君,等.氧化镁矿粉复配加固砂土的强度特性[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),2023:1-5[2023-08-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230404.0934.002. html.

LU Jiayue, BAI Kun, ZHANG Chengjun, et al. Strength characteristics of sand treated by magnesium oxide actived granulated blast furnace [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023;1-5[2023-08-22]. http://kns. cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230404.0934.002.html. (in

Chinese)

- LIU J, FENG Q, WANG Y, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of organic polymer reinforced sand[J]. International Journal of Polymer Science, 2018, 2018(1): 1-18.
- [3] 李玉根,张慧梅,刘光秀,等.风积砂混凝土基本力学性能及影响机理[J].建筑材料学报,2020,23(5):1212-1221.
  LI Yugen, ZHANG Huimei, LIU Guangxiu, et al. Mechanical properties and influence mechanism of a eolian sand concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1212-1221. (in Chinese)
- [4] 潘霞,许成顺,徐佳琳,等.饱和砂土循环液化模式影响因素试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):635-642.
   PAN Xia, XU Chengshun, XU Jialin, et al. Experimental study on influencing factors of circulating liquefaction model of saturated sand soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2021,41(3):635-642. (in Chinese)
- [5] 刘云霄, 茌引引, 田威, 等. 不同膨胀剂对水泥基灌浆料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):307-313.
   LIU Yunxiao, CHI Yinyin, TIAN Wei, et al. Effect of different expanders on properties of cement based grouting material[J].
   Journal of Building Materials, 2022, 25(3):307-313. (in Chinese)
- [6] 李新明,路广远,张浩扬,等.石灰偏高岭土改良粉砂土强度特性与微观机理[J].建筑材料学报,2021,24(3):648-655.
  LI Xinming, LU Guangyuan, ZHANG Haoyang, et al. Strength characteristics and micro-mechanism of lime-metakaolin modified silty soil [J]. Journal of Building Materials, 2021,24(3):648-655. (in Chinese)
- [7] 李丽华,岳雨薇,肖衡林,等.稻壳灰-水泥固化镉污染土性能及影响机制[J].岩土工程学报,2023,45(2):252-261.
   LI Lihua,YUE Yuwei,XIAO Henglin, et al.Performance and influence mechanism of Cd-contaminated soil solidified by rice husk ash-cement[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023,45(2):252-261.(in Chinese)
- [8] 周海龙,申向东.土壤固化剂的应用研究现状与展望[J].材料 导报,2014,28(9):134-138.
  ZHOU Hailong, SHEN Xiangdong. Research status and prospect of soil curing agent application [J]. Materials Review, 2014,28 (9):134-138. (in Chinese)
- [9] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北 农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-146,152.
  FAN Henghui, GAO Jian'en, WU Pute. Research status and prospect of soil curing agent [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science),2006,34(2):141-146,152. (in Chinese)
- [10] 倪静,王子腾,耿雪玉.植物-生物聚合物联合法固土的试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(11):2131-2137.
  NI Jing, WANG Ziteng, GENG Xueyu. Experimental study on soil consolidation by plant-biopolymer method [J]. Journal of Rock and Soil Engineering, 2020, 42(11): 2131-2137. (in Chinese)
- [11] 李明阳,刘瑾,梅红,等.有机复合客土基材接触面剪切力学特

性试验[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):134-142.

LI Mingyang, LIU Jin, MEI Hong, et al. Shear mechanical properties of contact surface of organic composite clay substrates [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 134-142. (in Chinese)

- [12] 刘瑾,白玉霞,宋泽卓,等.OPS型固化剂改良砂土工程特性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(3):495-501.
  LIU Jin, BAI Yuxia, SONG Zezhuo, et al. Experimental study on engineering characteristics of sand improved by OPS curing agent [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2019,49(3):495-501. (in Chinese)
- [13] LIU J, QI X H, ZHANG D, et al. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering ,2017, (3):1-14.
- [14] 姚淇耀,陆宸宇,罗月静,等.PE/PVA纤维海砂ECC的拉伸 性能与本构模型[J].建筑材料学报,2022,25(9):976-983.
  YAO Qiyao, LU Chenyu, LUO Yuejing, et al. Tensile properties and constitutive model of PE/PVA fiber marine sand with ECC [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9): 976-983. (in Chinese)
- [15] 郝建斌,魏兴梅,姚婕,等.麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):764-768,831.
  HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and microstructure analysis of wheat straw reinforced soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019,47(6):764-768,831. (in Chinese)
- SILVEIRA M V, CASAGRANDE M D T.Effects of degradation of vegetal fibers on the mechanical behavior of reinforced sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39 (12) : 3875-3887.
- [17] 郑少鹏,牛开民,田波,等.聚合物乳液对水泥砂浆流变性能的 影响[J].建筑材料学报,2017,20(6):962-969.
  ZHENG Shaopeng, NIU Kaimin, TIAN Bo, et al. Effect of polymer emulsion on rheological properties of cement mortar [J]. Journal of Building Materials,2017,20(6):962-969. (in Chinese)
- [18] 芦苇, 骆望, 李东波,等. 椰壳纤维加筋土遗址生态注浆材料性能研究[J].建筑材料学报,2024,27(1):90-98.
  LU Wei, LUO Wang, LI Dongbo, et al. Performance of coir fiber reinforced eco-grouting material used in earthen sites [J]. Journal of Building Materials,2024,27(1):90-98. (in Chinese)
- [19] 谢明君,温宇彤,徐玲琳等.木质素/玻璃纤维复合改性沥青混 凝土路用性能提升效果研究[J].建筑材料学报,2023,26(11): 1200-1206.

XIE Mingjun, WEN Yutong, XU Linglin, et al. Composite modification with Cellulose fiber/glass fiber to enhance the pavement performance of asphalt concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1200-1206. (in Chinese)

 [20] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵.结构性黄土-维湿陷特性的离散元数 值模拟[J].岩土力学,2013,34(4):1121-1130.
 JIANG Mingjing, HU Haijun, PENG Jianbing. Discrete element numerical simulation of one-dimensional collapsibility of structural loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(4):1121-1130. (in Chinese)

- [21] 张程林,周小文.砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(增刊1):115-119.
  ZHANG Chenglin, ZHOU Xiaowen. Research on discrete element algorithm for three-dimensional shape simulation of sand particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015, 37(Suppl 1):115-119. (in Chinese)
- [22] 倪雪倩,叶斌.砂土液化后液-固相变机理的单元试验与模拟
  [J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(1):16-22.
  NI Xueqian, YE Bin. Unit test and simulation of liquid-solid phase transition mechanism of sand after liquefaction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023,51(1):16-22. (in Chinese)
- [23] 高广运,洪洋,耿建龙,等.饱和砂土液化判别与放大效应数值 模拟研究[J].工程地质学报,2022,30(6):1874-1881.
  GAO Guangyun, HONG Yang, GENG Jianlong, et al.
  Numerical simulation of liquefaction discrimination and amplification effect of saturated sand [J]. Journal of Engineering Geology,2022,30(6):1874-1881. (in Chinese)
- [24] 叶斌,宋思聪,倪雪倩.制样方法对砂土液化力学性质影响的 离散元模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(7): 998-1008.

YE Bin, SONG Sicong, NI Xueqian. Discrete element simulation of effects of sample preparation methods on mechanical properties

of sand liquefaction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2022,50(7):998-1008. (in Chinese)

- [25] 周林禄,苏雷,凌贤长,等.纤维加筋砂土抗液化试验与数值模 拟[J].工程地质学报,2021,29(5):1567-1576.
  ZHOU Linlu, SU Lei, LING Xianchang, et al. Test and numerical simulation of resistance to liquefaction of fiber-reinforced sand [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5):1567-1576. (in Chinese)
- [26] 唐朝生,顾凯.聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J].土 木工程学报,2011,44(增刊2):5-8.
  TANG Chaosheng, GU Kai. Strength characteristics of soft soil reinforced by polypropylene fiber and cement [J]. Journal of Civil Engineering,2011,44(Suppl 2):5-8. (in Chinese)
  [27] 白玉霞,刘瑾,宋泽卓,等.高聚物改良砂土强度特性和变形
- 特征试验研究[J/OL].复合材料学报,2024:1-17[2024-05-14].
  https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.003.
  BAI Yuxia, LIU Jin, SONG Zetzhuo, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of sand improved by high polymer [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024:1-17[2024-05-14].https://doi.org/10.13801/j. cnki.fhclxb.20231129.003. (in Chinese)
- [28] BAI Y X, LIU J, CUI Y J, et al. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 290:123237.