

掺量对季冻区聚丙烯纤维加筋土力学特性影响试验研究

郭浩天^{1,2,3,4}, 郭 帅¹, 周 帅⁵, 赵鑫竹¹

(1. 吉林建筑大学 测绘与勘察工程学院, 吉林 长春 130118;

2. 吉林建筑大学 寒地建筑综合节能教育部重点实验室, 吉林 长春 130118;

3. 吉林建筑大学 季节性冻土工程灾变机理与探测防治技术创新基地, 吉林 长春 130118;

4. 东北农业大学 水利科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

5. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司长春分院, 吉林 长春 130028)

摘 要: 为探究聚丙烯纤维掺量对季冻区粉质黏土力学特性的改良效果, 开展三轴压缩、无侧限抗压及扫描电镜试验, 考虑冻融循环, 分析 0.1%、0.3%、0.5% 掺量下应力-应变、抗剪强度、无侧限抗压强度及微观结构变化。结果表明: 掺量 0.1% 时, 7 次冻融后偏应力增幅有限, 黏聚力减小、内摩擦角以及抗剪强度增大, 无侧限抗压强度下降。掺量 0.3% 时, 低围压增强最显著, 高围压呈应变硬化且峰后平缓, 强度和韧性综合提升; 黏聚力达最大, 抗剪强度及无侧限抗压强度最高, 增强最佳。掺量 0.5% 时, 偏应力增幅明显, 但高围压峰后衰减加快, 黏聚力减小、内摩擦角略增, 抗剪强度增大, 无侧限抗压强度下降, 增强效果次于 0.3%。微观观察显示, 0.3% 掺量下纤维形成稳定三维网状结构, 有效约束土体变形; 随冻融循环增加, 纤维-土接触面积减小、黏结力降低, 界面强度减弱。综上, 0.3% 为最优掺量, 可为季冻区粉质黏土路基改良提供依据。

关键词: 三轴压缩试验; 无侧限抗压试验; 掺量; 聚丙烯纤维; 力学特性; 扫描电镜试验

中图分类号: TU58

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)04-0089-09

Mechanical Properties of Fiber-reinforced Soil with Different Fiber Contents Under Freeze-thaw Cycles

GUO Haotian^{1,2,3,4}, GUO Shuai¹, ZHOU Shuai⁵, ZHAO Xinzhu¹

(1. School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

2. Key Laboratory of Comprehensive Energy Saving for Cold Region Buildings, Ministry of Education,

Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China; 3. Seasonal frozen soil engineering disaster mechanism and detection and prevention technology innovation base, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

4. School of Water Conservancy Science and Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

5. Beijing Urban Construction Survey and Design Institute Co., Ltd. Changchun Branch, Changchun, Jilin 130028, China)

Abstract: Freeze-thaw cycles induce soil strength deterioration and deformation in seasonal frozen regions can threaten the subgrade stability. Polypropylene fiber can effectively enhance the mechanical performance of silty clay. To investigate the effect of fiber content on the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced silty clay in seasonally frozen regions, triaxial compression, unconfined compression, and scanning electron microscopy (SEM) tests were conducted under freeze-thaw cycles. The variations in stress-strain curves, shear strength parameters, and unconfined compressive strength at fiber contents of 0.1%, 0.3%, and 0.5% were analyzed, along with the microstructural changes of fibers and soil after freeze-thaw cycles. Test results show that after 7 freeze-thaw cycles, at 0.1% polypro-

pylene fiber content, deviatoric stress increases under all confining pressures but by less than 0.3%, with evident strain hardening under high confining pressure; as cycles increase, cohesion decreases, friction angle increases, shear strength rises with confining pressure, unconfined compressive strength drops, and the reinforcement effect is weak. At 0.3% fiber content, the enhancement is most significant under low confining pressure; high confining pressure induces strain hardening with a gentle post-peak decline at 150 kPa, improving both strength and toughness; as cycles increase, cohesion peaks, friction angle slightly decreases, and shear strength and unconfined compressive strength reach maximum, yielding the best reinforcement. At 0.5% fiber content, deviatoric stress increases more notably with confining pressure, but post-peak decay accelerates under high confining pressure; as cycles increase to 7, cohesion decreases, friction angle slightly increases, shear strength rises with confining pressure, and unconfined compressive strength gradually declines, giving a good reinforcement effect. At 0.3% fiber content, fibers readily form a stable three-dimensional network structure, enhancing soil strength and toughness. Increased freeze-thaw cycles reduce the contact area and bonding capacity between fibers and soil particles, disrupt fiber-soil connections, and decrease the reinforcement-soil interface strength. In summary, 0.3% is the optimal polypropylene fiber content for improving seasonal-frozen silty clay under freeze-thaw cycles, providing theoretical and technical guidance for subgrade improvement.

Keywords: triaxial compression test; unconfined compression test; fiber content; polypropylene fiber; mechanical properties; scanning electron microscopy

由于季冻区土体具有随季节变化和昼夜更替经历冻融循环的特点,冬季温度降低,近地表部分的水冻结成冰,土中的水持续向冻结冰面迁移,使土体发生冻胀、冻裂,已有研究发现将纤维以一定的掺量均匀分撒在土体中,使纤维间交互形成“雀巢”式的三维网状结构,可以提高土颗粒和纤维间的接触面积及摩擦力,增强土体的整体性和强度^[1],但纤维掺量对土体的改良具有重要影响,故研究掺量对季冻区纤维加筋土力学特性的影响具有重要工程意义。

纤维加筋土力学性质方面国内外学者已有研究。现有研究表明,聚丙烯纤维在冻融作用下会影响对土壤的加固行为,土体的抗压强度随纤维含量的增加而增加^[2]。根据对加入聚丙烯纤维的土体进行冻融循环,结果为纤维加筋土较素土的无侧限抗压强度提高了 8%~100%,且纤维掺入减小了冻融循环对土体强度的影响^[3]。通过以粉质黏土为研究对象分析冻融循环对加筋土抗剪强度的影响,证明冻融循环降低了聚丙烯筋土抗剪强度,其影响程度为:冻融次数>纤维掺比>纤维长度,并通过试验发现纤维长度 9 mm、掺量 0.2% 为最优掺量^[4]。通过对玻璃纤维加筋土和玄武岩纤维加筋土分别进行 0、2、5、10、15 次的冻融循环以及三轴压缩试验,研究发现土体强度随循环次数的增加而降低,加入纤维材料可提高土体的抗冻性能^[5]。通过对棉秸秆纤维进行冻融循环作用下的无侧限抗压试验和单纤维拉拔试验,及扫描电镜试验检测土体内部微观变化,发现加筋土的抗压强度随循环次数的增加而衰减^[6]。通过探究冻融循环作用下秸秆纤

维加筋土的力学性质,研究证明冻融循环会降低土体强度,但加入纤维依旧能提高土体稳定性^[7]。通过将不同含量的秸秆纤维掺入土体中研究其力学性能,表明纤维加筋土的抗冻性能明显高于素土,当秸秆纤维的含量为 0.3% 时效果最佳^[8]。通过研究冻融循环对聚丙烯纤维和水泥稳定黏土力学性能的影响,研究结果表明,聚丙烯纤维的加入改善了无侧限抗压强度,在纤维掺量为 0.20% 时表现出更高的无侧限抗压强度^[9]。通过试验发现一定范围内干密度和聚丙烯纤维含量可有效改良膨胀土抗剪强度,以干密度 1.75 g/cm³、聚丙烯纤维掺量 0.07% 时改良效果最佳^[10]。通过研究在干湿循环作用下纤维红黏土的抗剪强度特性,结果表明,掺入聚丙烯纤维可显著提升红黏土的抗剪强度,改善了红黏土的力学特性^[11]。通过研究不同长度和掺量的聚丙烯纤维对水泥稳定土力学性能的影响,结果显示,当纤维长 9 mm、掺量 0.5% 时,聚丙烯纤维能显著提高水泥稳定土的无侧限抗压、劈裂和弯拉强度,改善其力学性能^[12]。通过探讨纤维长度对加筋土剪切变形特性、抗剪强度指标的影响,结果表明,0.2% 掺量、纤维长度为 12 mm 时,聚丙烯纤维对土体抗剪强度指标的补强效果最好^[13]。通过探究冻融环境下寒区粉质黏土的力学特性,开展了单轴压缩、冻融循环及电镜扫描试验,结果表明,随着聚丙烯纤维掺量增加,改良土的单轴抗压强度与变形能力均显著提升;微观结构显示,纤维与水泥土结合紧密、未发生断裂,二者间形成了有效的相互作用^[14]。通过探究路基工程中聚丙烯纤维复合改良膨胀土的效果,研究

发现掺入聚丙烯纤维对复合改良土的抗剪强度明显大于素膨胀土^[15]。通过动三轴试验讨论围压、纤维长度、纤维掺量等因素对土体动强度的影响规律,指出纤维加筋土的动力学性能较素土明显增加^[16]。研究结果表明,玄武岩-聚丙烯混杂纤维的最佳掺量为0.2%,此时混凝土的力学性能和抗盐侵蚀性能均能达到最佳,能够有效延长混凝土在高含盐环境中的使用寿命^[17]。

通过与素固化土作比较,掺聚丙烯纤维可显著提高其破坏应变,破坏应变随纤维长度、掺量增加呈上升趋势;结合试件破坏形态可知,纤维加筋能有效提升固化土的抗破坏能力与韧性^[18]。在水泥土中加入0.3%掺量的聚丙烯纤维,形成了三维网络结构,通过桥接作用解决水泥土改良后抗裂性能差的问题,提升抗变形能力^[19]。玄武岩纤维掺量0.1%与聚丙烯纤维掺量0.3%为两者混杂加筋粉质黏土的最优掺量,对土体剪切强度的提升较好^[20]。纤维能显著增强黄土抗剪性能,随掺量增加,黏聚力呈“先增后降”趋势,最优掺量分别为聚丙烯纤维0.5%、聚酯纤维0.4%^[21]。最优改良方案为6%水泥+0.4%聚丙烯纤维复合掺入,其28 d抗压强度达2.81 MPa,较单掺方案分别提升50.3%和86.1%^[22]。试验表明,适量的聚丙烯纤维可以显著提升电石渣土的力学性能和稳定性,同时降低裂缝的产生风险,具有良好的工程应用前景^[23]。玄武岩-聚丙烯纤维复合掺配对混凝土开裂有明显的约束作用,掺入1.0%玄武岩短切纤维和1.0%聚丙烯纤维混凝土抗裂性能最佳^[24]。纤维掺量与长度对改良风积沙的无侧限抗压强度有显著性影响,聚丙烯纤维-水泥改良风积沙最优配比为7%,纤维长度为6 mm^[25]。5%稻壳灰固化效果最佳,7%聚丙烯纤维掺量下加筋土无侧限抗压强度和抗剪强度最大,且12 mm纤维的加筋效果优于9 mm纤维^[26]。通过增大纤维掺量与长度、减小纤维细度可显著提升黄土抗压强度,试验纤维长度10~40 mm范围内未出现临界长度,且掺量低于临界值时,长细纤维加固效果更优^[27]。聚丙烯纤维改良粉土剪切性能的最优掺量为0.5%,聚丙烯纤维通过增强土体之间的摩擦力,有效提高了土体的抗剪强度^[28]。随着掺入量的增加,混凝土抗压强度呈先升后降趋势,当聚丙烯纤维掺量为0.4%时,混凝土试件抗压强度的提升效果最好^[29]。聚丙烯细纤维在适宜掺量范围内(0.1%~0.3%体积掺量)能够有效提升胶砂的力学性能;当纤维掺量过量(达到0.4%)时则易导致纤

维团聚、界面过渡区弱化,从而削弱胶砂力学性能^[30]。通过适量掺入纤维对再生骨料混凝土劈裂抗拉、抗折强度的提升效果远优于抗压强度,试验聚丙烯纤维最优配比为掺量1.2 kg/m³、长度12 mm^[31]。聚丙烯纤维构筑土体内部骨架以增韧稳土,玻璃粉填充孔隙提升密实度,二者最优掺量分别为0.5%~1%、20%^[32]。总体来说,现有研究主要集中在对于湿陷性黄土、膨胀土、混凝土及软土等土体的纤维加筋土改良,针对季节性冻土区域的粉质黏土研究甚少,并且纤维掺量对季冻区纤维加筋土的力学性能及微观机理的研究还存在不足。

因此,本文以典型季冻区长春地区广泛分布的粉质黏土为研究对象,探究不同掺量聚丙烯纤维改良土在冻融循环作用下的力学性质的变化规律。通过三轴压缩试验、无侧限抗压试验和扫描电镜试验分析纤维材料对土体力学指标影响及土体经过冻融循环后的微观结构变化规律,综合分析适合季冻区的纤维加筋土的最优掺量,可为季冻区路基建设提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土的粒度分析

土体粒度的大小是土体分类的判别的重要依据,土体颗粒大小及矿物质含量不同,土的工程性质也有所差别。本文采用LS-909型激光粒度分析仪,对所选取的6组粉质黏土进行土体分析。

将烘箱温度设置为105~110℃,每组取适量土体放入其中烘干8 h,烘干结束后取出土样碾成粉末放入激光粒度仪进行粒度分析。为避免偶然性并减小误差,每组土样进行三次试验,取平均值作为最终结果。对仪器得出的结果分析处理,绘制6组土样的颗粒级配曲线如图1所示。

土颗粒的级配曲线可以评定土颗粒的均匀程度,工程中常采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 定量分析颗粒的均匀程度,公式如下式所示:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{30}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (2)$$

式中: d_{60} 为小于某直径的土粒占总质量的60%; d_{30} 为小于某直径的土粒占总质量的30%; d_{10} 为小于某直径的土粒占总质量的10%。

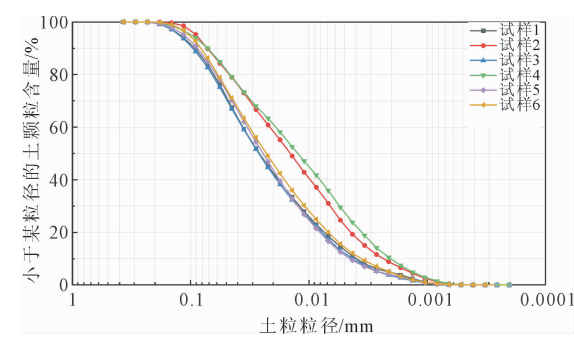


图1 土样的颗粒级配曲线

土样不均匀系数和曲率系数如图 2 所示。土样的不均匀系数 $C_u > 5$, 曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$, 表明该地区土样的颗粒级配良好。图 3 为粒组含量曲线, 其中 $d < 0.005\text{ mm}$ 的黏粒粒组含量的取值范围为 $12.48\% \sim 29.53\%$, 平均值为 19.89% ; $0.005\text{ mm} < d < 0.075\text{ mm}$ 的粉粒粒组含量的取值范围为 $41.51\% \sim 51.4\%$, 平均值为 48.08% 。可以看出, 土样中粉粒含量较高, 当土体中存在水分时, 毛细现象明显, 当温度处于负温时, 土体易发生冻胀。

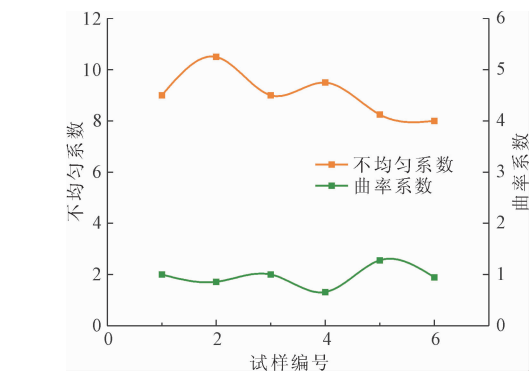


图2 土样不均匀系数和曲率系数

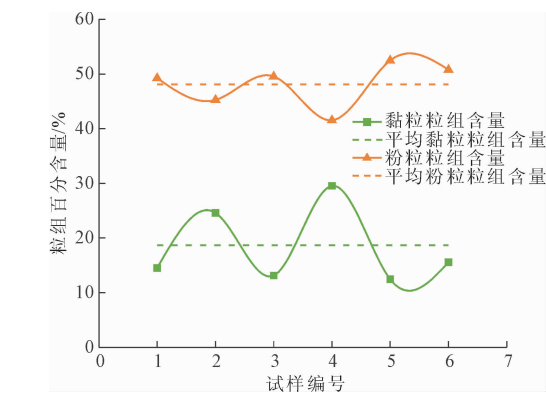


图3 粒组含量曲线

1.1.2 土样性质

土样取自吉林省长春市吉林建筑大学南侧空地, 本次勘查采用 DPP-100 型钻机, 根据《工程地质

钻探规程》^[33] (DZ/T 0017—2023) 对土样进行钻取、保存及运输。为避免冬季冻融及其他因素对土体性质产生影响, 本试验选取冻深以下 $4 \sim 5\text{ m}$ 处原状粉质黏土为研究对象, 按照《土工试验方法标准》^[34] (GB/T 50123—2019) 对所取土样进行基本物理性质的测定, 得到的土样的基本物理性质指数见表 1。

表1 原状粉质粘土的基本物理性质指数

液限指数	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	最大干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0.9	20.1	34.1	18.7	1.781

1.1.3 加筋材料的特点

聚丙烯纤维 (Polypropylene fiber) 是一种以聚丙烯为原料纺织而成的合成纤维, 其质轻具有较好的电绝缘性、耐磨、耐腐蚀, 且具有良好的强度和耐久性能有效增强土体的稳定性和承载能力。本试验所用到的聚丙烯纤维为白色束状单丝, 其物理力学参数如表 2 所示。

表2 聚丙烯纤维的物理力学参数

聚丙烯纤维	纤维直径/ μm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	断裂延伸率/%
	18 ~ 48	500	3500	0.91	15.0

1.2 试验方案

1.2.1 土样的制备

将现场取回的原状土样碾碎并过筛, 装入托盘后放入烘箱中烘干 12 h 以上, 保证水分全部烘干。将烘干后土体转移到室内, 放置至常温后使用 2 mm 筛网过筛, 将过筛后土体密封保存待用。

称取一定质量的土体放入盘中, 按照不同的纤维掺量称取一定质量的纤维加入土体, 并使用铲子进行搅拌均匀。所有试样按照计算所得的最优含水率配置, 使用喷雾式喷壶将水均匀加入到土样中, 一边喷洒一边搅拌, 防止其粘结成团。当肉眼观察没有明显纤维团后, 从混合土体中随机选择三个点进行采样, 将纤维与土体分离, 分别测量质量后计算掺量, 纤维分布偏差小于 5% 即为搅拌均匀。配置完成后的土体为保证其含水量稳定, 使用保鲜膜封闭后养护 24 h , 重复测量含水率, 要求其误差在正负重复内即可进行后续制样。

本试验分别需要制备三轴试样, 如图 4 所示。

其中三轴试样的尺寸是内径为 39.1 mm。其中三轴,高度 80 mm。将土样制备模具内部涂抹凡士林,分三次将配置好的土样放入其中并击实,注意每层击实完成后需进行刨毛处理,以免发生分层。制作完成后的土样使用保鲜膜裹紧,防止水分蒸发。



图 4 试验土样

1.2.2 试验过程

冻融循环试验采用不补充水分的封闭式试验,试验过程中使用保鲜膜将土样包裹,保证在冻融循环过程中含水率恒定不变。

冻融循环作用多发生在土体表层,由于压实过程中的超固结应力历史与上部荷载的瞬时性,粉质黏土一般不发生排水固结过程^[35]。在路基填筑和建筑物的建设过程中,土体沉降主要由气体的压缩与释放产生,排水固结作用很小。故本三轴试验采用室内不固结不排水试验。

本次无侧限抗压试验和不固结不排水试验均采用 TSZ 全自动三轴仪器,结合长春地区及全国季冻区气温情况并查阅了以东北地区季冻区为主等大量文献,综合分析得出设置如下变量:冻融循环次数为 7 次,冻结温度设定为 -20℃,融化温度为 20℃,冻结与融化的时间均设置为 10 h;本次试验的土体分别为 0.1%、0.3%、0.5% 掺量的聚丙烯纤维加筋土。无侧限抗压试验的剪切速率设置为 0.08 mm/min,采样步长 0.8 mm,试样的高度为 80 mm,试样的直径为 39.1 mm,当轴向应变达到 15% 时视为试验结束。三轴压缩试验的每种工况分别在 50、100、150 kPa 围压下进行,剪切速率设置为 0.08 mm/min,当轴向应变达到 15% 时视为试验结束。同时采用 S-3400N 扫描电子显微镜,探究最优掺量时冻融循环次数对纤维加筋土微观结构的影响规律。

2 试验结果与分析

2.1 材料掺量对聚丙烯纤维应力-应变曲线的影响

图 5 为 7 次冻融循环后不同围压(50、100、150 kPa)下,聚丙烯纤维掺量对加筋土应力-应变曲线的影响规律。随着围压增加,各掺量对应的峰值强度与轴向应变均相应提高。在 50 kPa 围压下,素土峰值强度为 38 kPa(应变 12%);掺入 0.1%、0.3% 和 0.5% 纤维后,峰值强度分别提高至 47、53 和 49 kPa,对应应变分别为 7.6%、10% 和 9.2%,0.3% 掺量表现最优。在 100 kPa 围压下,素土峰值强度为 57.5 kPa(应变 3.6%);三种掺量(0.1%、0.3%、0.5%)对应的峰值强度依次为 75、71 和 78 kPa,对应应变分别为 8%、15% 和 10%,0.3% 掺量峰值强度提升相对最低,但其呈上升趋势。在 150 kPa 围压下,素土的峰值强度为 80 kPa(应变 10.2%);纤维掺量为 0.1%、0.3% 和 0.5% 时,峰值强度分别增至 89、89.1 和 90 kPa,应变达到 10.2%、11% 和 6.5%,0.3% 掺量相对 0.5% 掺量的峰值强度呈上升趋势。

基于 50、100 和 150 kPa 三种围压下的试验结果可知,聚丙烯纤维掺量对加筋土力学性能具有规律性影响:0.3% 的纤维掺量在各项围压下均表现出相对最优的增强效果,其峰值强度相比素土分别提高约 39.5%、23.5% 和 11.4%,对应的轴向应变亦达到最大(分别为 10%、15% 和 11%),且围压 150 kPa 时才出现峰后曲线平缓下降,表明其强度与韧性得到综合改善;而当掺量增至 0.5% 时,低围压的峰值强度均较 0.3% 掺量小,高围压时峰后衰减加快,说明过量纤维可能因影响土体均匀性而削弱增强效果。此外,纤维的掺入有效延缓了峰后强度丧失,使应力-应变曲线趋于平缓,推动土体从脆性破坏向延性破坏模式转变。综上,聚丙烯纤维可显著提升土体在不同围压下的力学性能,其中 0.3% 为强化与增韧效果最佳掺量,对工程中的纤维加筋土设计具有参考价值。

2.2 材料掺量对土体抗剪强度的影响

土体的抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限能力,其值大小由土体的黏聚力与内摩擦角决定,按照莫尔-库仑公式($\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$)进行计算。通过三轴试验,得到三种围压下的莫尔应力圆,其与抗剪强度包线相切,在纵轴的截距为土体的黏聚力(c),包线的倾斜角为土体的内摩擦角(φ)。不同掺量下的聚丙烯纤维加筋土的黏聚力及内摩擦角的具体数据如表 3 所示。

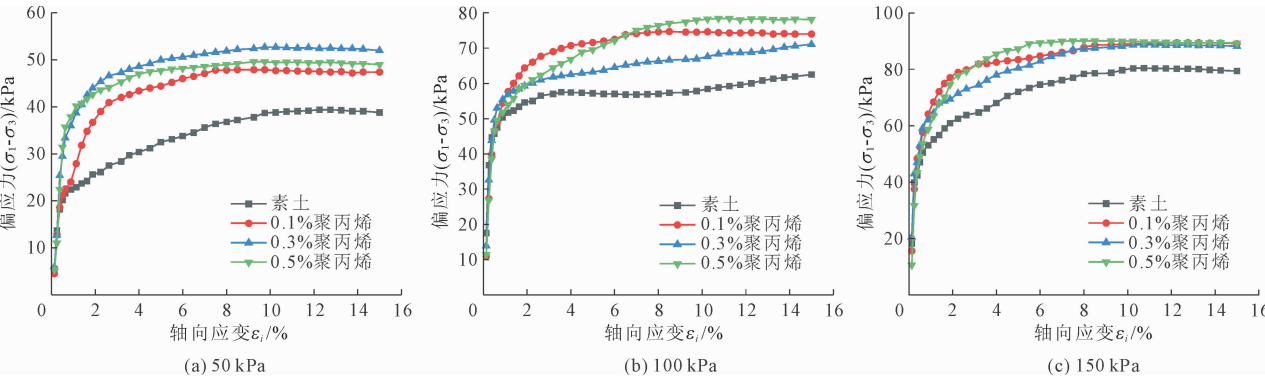


图5 冻融循环7次后不同围压下的聚丙烯纤维的偏应力-轴向应变关系

表3 聚丙烯纤维加筋土的黏聚力以及内摩擦角(0次、7次)

项目	冻融循环0次		冻融循环7次	
	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
素土	17.46	9.89	8.41	10.40
0.1%聚丙烯纤维	21.47	9.94	12.17	11.05
0.3%聚丙烯纤维	23.42	9.24	14.97	11.05
0.5%聚丙烯纤维	20.10	9.94	13.14	11.46

图6为经过冻融循环0次、7次下不同掺量的聚丙烯纤维加筋土内摩擦角及黏聚力的变化曲线。由图6可知,纤维加筋土黏聚力和内摩擦角的变化趋势相反,每种掺量的纤维均能提升土体黏聚力,随纤维掺量的增加黏聚力呈先增加后减小趋势。聚丙烯纤维在掺量为0.3%时达到最大黏聚力,在0次、7次冻融循环时的黏聚力分别为23.42、14.97 kPa。随着纤维掺量的不断增加,黏聚力不断下降。

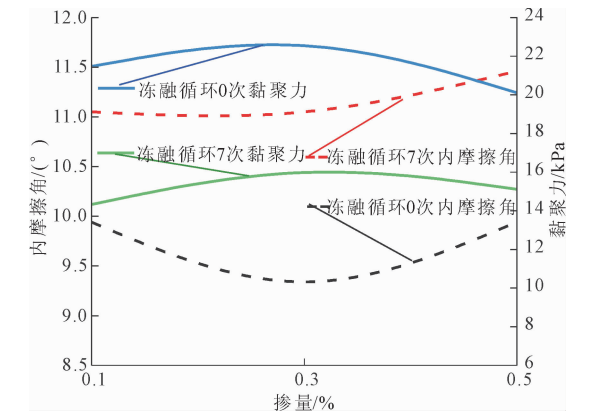


图6 冻融循环0、7次的聚丙烯纤维加筋土黏聚力及内摩擦角变化曲线

随着纤维掺量的增加,聚丙烯纤维加筋土的内摩擦角呈先减小后增大趋势,在0.3%掺量处达到内摩擦角的最小值,相对于素土0次冻融循环变化范围为0.05~0.65°,7次冻融循环变化范围为0.65

~1.06°。聚丙烯纤维具有低吸湿性,几乎不吸收水分,在冻融循环过程中依旧能保持原有物理性能。

图7为0次、7次冻融循环下纤维的抗剪强度曲线,由图7可知,在土体抗剪强度随纤维掺量的增加呈先增加后减小趋势,在掺量0.3%聚丙烯纤维处达到最大值。在冻融循环次数0次、围压的不断增加的条件下,抗剪强度随纤维掺量的增加先增大后减小,在掺量为0.3%处达到最大值,对土体的抗剪强度作用效果最强。在冻融循环7次、围压不断增大的条件下,抗剪强度随纤维掺量的增加先增大后减小,在围压150 kPa下,掺量为0.3%和0.5%处,抗剪强度达到最大值,对土体的抗剪强度作用效果最强。

当掺量较小时,纤维分散在土体中形成较少的三维网状结构,纤维依靠自身的一维黏结作用和摩擦作用加固土颗粒。随着纤维掺量的增加,纤维间形成稳定的三维网状结构通过缠绕固定土体,纤维与土颗粒间接触面积的较大,加强土体的黏聚力与摩擦作用。总体而言,聚丙烯纤维材料的加入能增加土体抗剪强度,0.3%掺量聚丙烯纤维最优,0.5%、0.1%掺量的聚丙烯纤维的作用效果次之。

2.3 材料掺量对土体无侧限抗压强度的影响

图8为0次及7次冻融循环作用下聚丙烯纤维加筋土的无侧限抗压强度曲线。分析可知,在经历0次冻融循环作用下素土的无侧限抗压强度为90.4 kPa,聚丙烯纤维的加入影响无侧限抗压强度的大小,掺量从0.1%添加至0.3%的过程中土体无侧限抗压强度逐渐增加,当聚丙烯纤维掺量为0.3%时提升效果最好,纤维含量持续增加至0.5%抗压强度逐渐减小。在7次冻融循环作用下素土的无侧限抗压强度为68.9 kPa,加入0.1%、0.3%及0.5%掺量的聚丙烯纤维后分别为85、89.3及84 kPa,通过分析对比可知当聚丙烯纤维掺量为0.3%时对土体的改良效果最好。

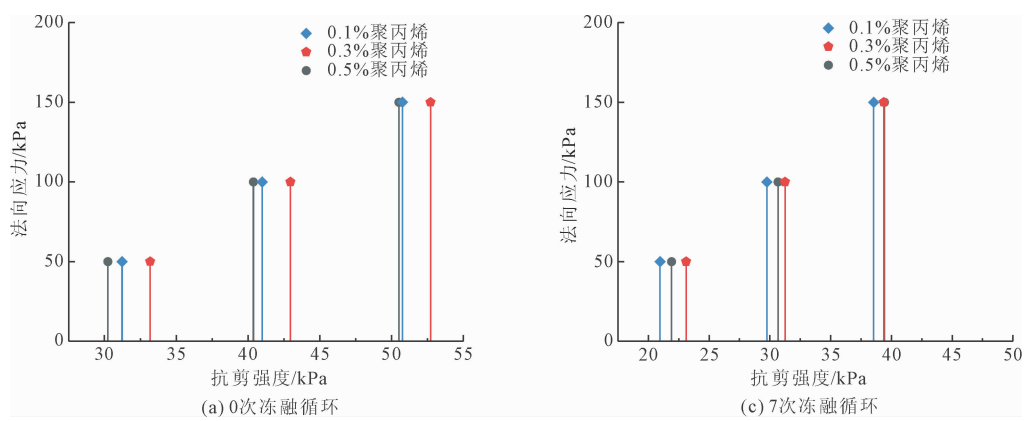


图 7 不同冻融循环下聚丙烯纤维加筋土抗剪强度变化曲线

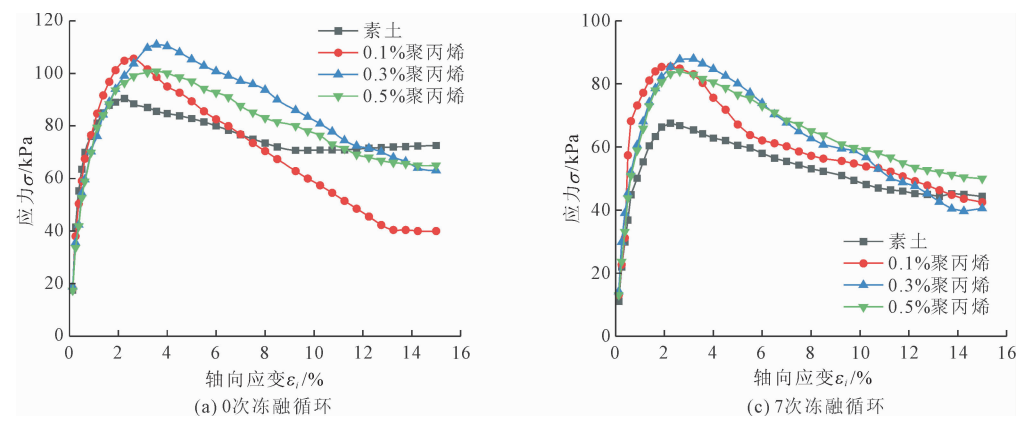


图 8 0 次、7 次冻融循环作用下土体的无侧限抗压强度曲线

当纤维掺量从小含量 0.1% 逐渐增加至 0.3% 的过程中,纤维加筋土的无侧限抗压强度逐渐增。其原因主要是随着纤维含量的增加,纤维在土体中起到桥接的作用,使土体间纤维的锚固间距减小,有效的发挥自身的拉力连接土体颗粒,防止土颗粒发生限度滑移;当土体受到外部荷载时,纤维起到分散应力的作用,防止应力集中从而延缓或阻止裂隙的发生和发展。同时,纤维含量的增加,使土体单位体积内的含量增加,改变了土颗粒与纤维间的排列方式,使其内部形成三维网状结构,增强土体整体的稳定性。

当纤维含量由 0.3% 增加至 0.5% 纤维掺量,加筋土的无侧限抗压强度逐渐减小。当纤维掺量过大时,纤维在土体中的分布会变得不均匀,形成过度加固,导致局部应力集中,从而降低整体的抗剪强度。同时过多的纤维反而不利于土颗粒与纤维的黏连,使两者之间的结合强度不足,无法有效的传递应力,反而可能在受到外荷载时形成薄弱位置,容易开裂,继而导致抗压强度减小。因此,适当掺量的纤维加入可以有效对土体无侧限抗压强度进行加强,聚丙

烯纤维的最优掺量为 0.3%,0.1%、0.5% 的聚丙烯纤维次之。

2.4 不同材料掺量纤维加筋土微观加固机理分析

不同掺量聚丙烯纤维加筋土示意图如图 9 所示。纤维掺量为 0.1% 时,纤维分散稀疏,与土颗粒接触面积有限,难以形成连续三维网状结构,加筋作用主要依赖有限的界面摩擦与粘结,加固效果较弱。纤维掺量为 0.3% 时,纤维均匀分布并形成稳定三维网络,显著增加与土颗粒的接触面积,通过摩擦、咬合与桥联作用有效传递与分散应力,抑制裂隙扩展,提升土体整体强度与韧性。纤维掺量为 0.5% 时,纤维易团聚,分布不均,导致局部应力集中、有效接触点减少,削弱纤维网络整体性与应力传递效率,反而降低加筋效果。总的来说,纤维掺量为 0.3% 时为纤维的最优掺量,对土体强度的提升最好。

通过上述试验得出掺量为 0.3% 的聚丙烯纤维对土体的改良效果最好,故基于此掺量,分析冻融循环次数对纤维加筋土的影响。不同冻融循环次数下 0.3% 的聚丙烯纤维微观结构如图 10 所示。

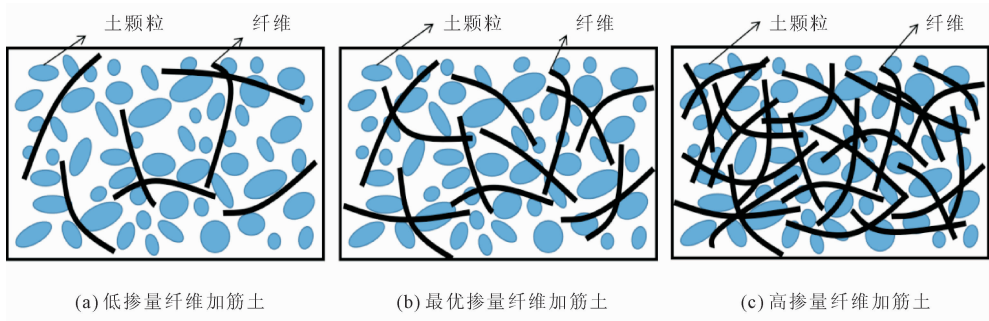


图 9 不同掺量下的聚丙烯纤维加筋土示意图

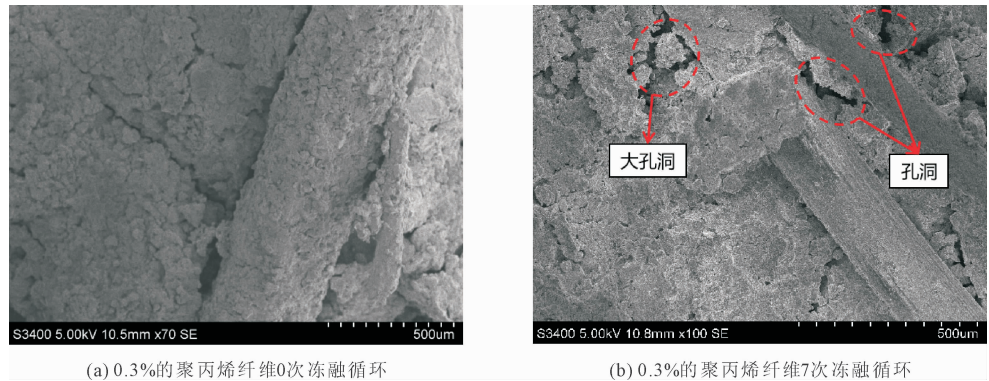


图 10 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维-土微观结构

由图 10(a) 与图 10(b) 可知,冻融循环次数显著影响纤维加筋土的微观结构与力学性能。未经历冻融时,纤维在土体中随机分布并形成有效加筋网络,土颗粒密实、裂隙极少。这是由于聚丙烯纤维纤维表面较为光滑,加入到土体中后形成了稳定的三维结构,因其具有优良的延展性和韧性,使纤维加筋土在经受因冻融循环引起的温度变化时,依旧能适应体积变化,有效阻止裂隙的扩展。冻融过程中,水分冻结与融化反复破坏土体结构,导致颗粒迁移、稳定性下降。纤维通过跨越裂隙并承受拉应力,能延缓裂缝扩展,并减缓水分迁移与冻胀压力。当冻融循环达到 7 次时,纤维与土颗粒间孔隙明显扩大并趋于连通,形成较大孔洞与裂隙,削弱了纤维-土界面粘结作用,导致加筋效果下降,土体强度降低。虽然冻融削弱了纤维-土界面粘结作用,但相对于素土土体的强度仍是增强的。

3 结 论

(1) 掺量 0.1% 时,冻融循环 7 次不同围压时,土体的偏应力均有所提高,但增幅低于 0.3% 掺量且高围压下应变硬化特征明显;掺量 0.3% 时,冻融循环 7 次低围压(50 kPa)下的改良效果最好,在高围压(100、150 kPa)时表现为应变硬化,能相对持续提升土的强度、延展性与韧性;掺量 0.5% 时,冻融循环 7 次低围压下的峰值强度较 0.3% 掺量小,高

围压时峰后衰减加快。

(2) 随冻融循环次数、纤维含量的增加,土体的黏聚力及抗剪强度先增加后减小,内摩擦角呈先减小后增加趋势,变化范围较小。掺量 0.1% 时,冻融循环增加至 7 次,土体的抗剪强度随着围压的升高呈增大趋势;掺量为 0.3% 时,在 0 次、7 次冻融下,抗剪强度达到最大值,对土体的抗剪强度作用效果最优;掺量为 0.5% 时,随着冻融循环次数增加、围压的不断升高下,抗剪强度不断增大,土体的抗剪强度作用效果较优。

(3) 掺量 0.1% 时,冻融循环增加至 7 次,无侧限抗压强度呈减小趋势;掺量 0.3% 时,在 0 次、7 次冻融循环下,土体的无侧限抗压强度最大,对增强土体整体的稳定性更佳;掺量 0.5% 时,冻融循环增加至 7 次,土体的无侧限抗压强度相较于 0.3% 掺量降低,对土体的加强效果次之。

(4) 纤维掺量为 0.1% 时,纤维分散稀疏,接触面积有限,加固效果较弱;纤维掺量为 0.3% 时,纤维易于形成稳定的三维网状结构,提升土体的强度与韧性;纤维掺量为 0.5% 时,纤维易团聚,纤维的分布不均削弱纤维网络的整体性,降低了加筋效果。冻融循环次数的增加使纤维与土颗粒间的接触面积减小、粘结能力降低,土体的孔隙数量增加,裂隙长度也在增长,纤维-土间的连接作用被破坏,筋-土界面强度降低。

参考文献:

- [1] 唐 皓,李华华,刘驰洋,等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程,2020,20(19): 7832-7837.
- [2] Zaimoglu A S. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers [J]. Cold regions science and technology, 2010,60(01):63-65.
- [3] Chad uvula U, Desai A K, Solanki C H. Application of triangular polypropylene fibers on soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Indian Geotechnical Journal, 2014,44: 351-356.
- [4] 韩春鹏,唐浩桐,程培峰,等. 冻融作用下纤维加筋土的抗剪强度试验研究[J]. 公路,2015,60(05):166-170.
- [5] Orakoglu M E, Liu J. Effect of freeze-thaw cycles on tri-axial strength properties of fiber-reinforced clayey soil [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017,21(06): 2128-2140.
- [6] Liu Chao, Lv Yaru, Yu Xiaojuan, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020,48(04):581-590.
- [7] 刘 鹭. 冻融作用下秸秆纤维加筋土力学特性研究[J]. 岩土工程技术,2022,36(03):243-247.
- [8] 李 骞,罗 璟,裴向军,等. 秸秆纤维加筋固化土物理力学特性与抗冻融性能试验研究[J]. 长江科学院院报,2024,41(01):128-135.
- [9] 张洋铭. 冻融循环对聚丙烯纤维和水泥稳定黏土力学性能的影响分析[J]. 安徽建筑,2024,31(07):90-92.
- [10] 张紫怡,党 芳,郝晨曦,等. 聚丙烯纤维改良膨胀土抗剪强度试验研究[J]. 安徽建筑,2024,31(02):65-66,76.
- [11] 马宏岩,翁明胜,黄仁杰,等. 干湿循环下聚丙烯纤维改良红黏土抗剪强度特性及预测模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(03):33-39.
- [12] 郑瑞峰. 聚丙烯纤维对水泥稳定土力学性能的影响[J]. 当代化工,2024,53(11):2656-2659.
- [13] 吴瑞潜,项祺辰,杨 光,等. 聚丙烯纤维加筋绍兴非饱和黏土的剪切特性研究[J]. 力学季刊,2023,44(01):172-180.
- [14] 孙海军. 水泥-纤维改良粉质黏土冻融循环力学特性研究[J]. 粉煤灰综合利用,2022,38(04):106-110,127.
- [15] 肖桂元,王浩鹏,邓 杰,等. 水玻璃-聚丙烯纤维改良膨胀土的强度及裂隙特性[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(03):1074-1086.
- [16] 张艳美,阮东华,程志良. 土工合成纤维土动力特性试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(02):119-123.
- [17] 周兆环,黄道斌. 玄武岩-聚丙烯纤维混凝土力学性能及抗盐侵蚀性能研究[J]. 盐科学与化工,2025,54(10):40-44.
- [18] 宋 军,贾卫东,王晓强,等. 纤维加筋水泥固化淤泥土力学性能试验研究[J]. 公路,2026,71(06):83-90.
- [19] 高欣欣,李修磊,杨春伟,等. 聚丙烯纤维增强水泥土的力学特性试验研究[J]. 工程勘察,2026,54(05):8-13,22.
- [20] 陈婉婷,曹海莹,李朝阳,等. 混杂纤维加筋粉质黏土剪切特性及机理分析[J]. 工程地质学报,2026,34(02):529-541.
- [21] 马 陈,谢婉丽,霍开桂,等. 聚合物纤维改性水泥黄土的抗剪强度特性[J]. 高校地质学报,2026,32(02):170-178.
- [22] 刘昌雨,刘文牛,陈星璋. 水泥-聚丙烯纤维复合改良高液限黏土的力学性能与微观机理[J]. 交通世界,2026(11):30-33.
- [23] 李贻飞,李浩增,孔令号,等. 聚丙烯纤维改良电石渣土应用研究[J]. 科技创新与应用,2026,16(10):69-72,77.
- [24] 王 磊,邓美林,申铁军. 玄武岩-聚丙烯纤维混凝土抗裂性能研究[J]. 山东交通科技,2026(01):68-69,75.
- [25] 马学宁,刘晨阳,赵文杰,等. 纤维长度与掺量对水泥改良风积沙宏观特性的试验影响研究[J]. 铁道学报,2026,48(02):137-145.
- [26] 李丽华,陈雪岭,肖衡林,等. 聚丙烯纤维加筋稻壳灰土力学性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2025,53(08):154-160.
- [27] 褚 峰,祝瑜光,邵生俊,等. 纤维加筋黄土抗压强度试验及估测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2025,44(04):1040-1052.
- [28] 李儒潼. 聚丙烯纤维改良粉土剪切性能的研究[J]. 低温建筑技术,2025,47(01):126-128,137.
- [29] 陈智和,崔守臣,邹李胜. 聚丙烯纤维掺量对不同饱和度水工混凝土强度特性的影响[J]. 浙江水利科技,2026,54(01):22-26.
- [30] 普如敏,仕明刚,王志清,等. 聚丙烯细纤维对粉煤灰胶砂力学性能影响试验研究[J]. 聚酯工业,2026,39(01):46-48.
- [31] 韩 珂,武文超,韩小雷. 聚丙烯纤维对再生骨料混凝土力学性能及抗裂性能的影响[J]. 合成纤维,2026,55(06):83-92.
- [32] 王苗苗,张振宇. 玻璃粉聚丙烯纤维对膨胀土基础改性处理研究[J]. 西部交通科技,2025(11):79-82.
- [33] DZ/T 0017—2023 工程地质钻探规程[S]. 北京:中国标准出版社,2023.
- [34] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [35] 胡田飞,刘建坤,房建宏,等. 冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):123-130.