

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.016

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:张龙飞,胡再强,李宏儒,折海成,叶实拓,杨婷西. 纤维加筋黄土冻融循环后的工程力学特性研究[J]. 西安理工大学学报,2024,40(4):594-602.

ZHANG Longfei, HU Zaiqiang, LI Hongru, SHE Haicheng, YE Shituo, YANG Tingxi. Study on engineering mechanical properties of fiber reinforced loess after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 594-602.

# 纤维加筋黄土冻融循环后的工程力学特性研究

张龙飞<sup>1</sup>, 胡再强<sup>1</sup>, 李宏儒<sup>1</sup>, 折海成<sup>2</sup>, 叶实拓<sup>1</sup>, 杨婷西<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

**摘要:** 针对黄土高原季节性冻土区黄土的纤维加筋效果及其作用机制问题,对纤维加筋黄土开展了不同含水量、冻结温度、冻融循环次数条件下的三轴试验,并进行了电镜扫描。通过对比不同试验条件下的强度参数,对冻融劣化及加筋强化作用进行了探讨,揭示了冻结温度、冻融循环次数和加筋对于黄土强度影响机理。试验结果表明冻结温度越低,融化后强度下降越明显;冻融循环作用下前5次强度下降较为明显,后期逐渐趋于稳定;纤维加筋能够减少黄土中团粒破碎,进而有效抑制黄土冻融循环的劣化效应。最后建立了加筋黄土不同冻融循环次数下强度参数预测模型,为加筋黄土的工程应用和数值模拟提供了理论支撑。

**关键词:** 黄土; 纤维加筋; 冻融循环; 三轴试验; 电镜扫描; 强度参数

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)04-0594-09

## Study on engineering mechanical properties of fiber reinforced loess after freeze-thaw cycle

ZHANG Longfei<sup>1</sup>, HU Zaiqiang<sup>1</sup>, LI Hongru<sup>1</sup>, SHE Haicheng<sup>2</sup>, YE Shituo<sup>1</sup>, YANG Tingxi<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**Abstract:** In response to the issues of fiber reinforcement effect and its mechanism in the loess of the seasonal frozen soil regions of the Loess Plateau, this research conducts triaxial tests on fiber-reinforced loess under varying water content, freezing temperatures and freeze-thaw cycle conditions, and carries out the scanning electron microscopy (SEM). By comparing strength parameters under different testing conditions, it explores the deterioration from freeze-thaw cycles and the reinforcing effects of fiber addition, revealing the influence mechanisms of freezing temperature, freeze-thaw cycles and reinforcement on the strength of loess. The experimental results show that the lower the freezing temperature, the more significant the strength reduction after thawing. The strength decreases more noticeably within the first five freeze-thaw cycles and then gradually stabilizes. Fiber reinforcement helps to reduce the breakup of loess aggregates, thus effectively mitigating the deteriorative effects of freeze-thaw cycles on loess. Ultimately, a predictive model for the strength parameters of reinforced loess in various freeze-thaw cycles is developed, providing a theoretical support for the engineering application and numerical simulation of reinforced loess.

**Key words:** loess; fiber reinforcement; freeze-thaw cycle; triaxial test; scanning electron microscopy; strength parameters

收稿日期: 2023-01-16; 网络首发日期: 2023-06-01

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230531.1336.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274007); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JM5059); 陕西省黄土力学与工程重点实验室资助项目(13JS073); 西北旱区生态水利国家重点实验室资助项目(QNZX-2019-07)

第一作者: 张龙飞,男,博士生,研究方向为黄土力学与工程。E-mail: 1190711011@stu.xaut.edu.cn

通信作者: 胡再强,男,博士,教授,研究方向为黄土力学与工程。E-mail: huzq@xaut.edu.cn

黄土是一种以风力作用为主形成的疏松沉积物,主要形成于第四纪,呈褐黄色的粉质黏土。它具有均匀多孔的结构,主要由石英、长石颗粒组成。黄土主要分布在亚洲、欧洲、北美洲和南美洲的干旱和半干旱地区,根据统计全球黄土总面积达到  $1.3 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,占陆地面积的 9.3%,中国黄土高原是世界上黄土分布面积最广、地层最厚、最完整的区域。它位于中国西北部,东西长约 1 000 km,南北宽约 800 km,包括青海省以东,秦岭以北,太行山以西,长城以南的大部分地区。冬季黄土高原北部气温可降至  $-20^\circ\text{C}$ ,最大冻土深度达到 160 cm,高原上空空气稀薄,昼夜温差大。降雨自西北向东南逐渐增多,差异较大,最大年均降雨量可达到 750 mm,而最小年均降雨量不到 200 mm<sup>[1]</sup>。黄土高原很大一部分属于季节性冻土区,随着这些地区的经济发展,开展了大量的工程项目,在施工过程中出现了很多岩土工程问题,如边坡剥落破坏、地面沉降、水土流失等。

当前关于冻融作用对土体力学特性影响的研究主要集中在宏观、微观两个方向。在宏观方向主要研究其广义固体力学特性,如沈珠江、胡再强等<sup>[2-4]</sup>将原状黄土简化成由胶结物质和软弱带组成的二元介质模型,根据两种组合材料的应力-应变关系建立了相应的破损演化模型。谢定义、邵生俊等<sup>[5-6]</sup>在压缩试验、三轴剪切试验的基础上引入结构性参数的量化指标,可以反映黄土胶结结构特性。郑勋、马巍等<sup>[7-9]</sup>研究了冻融循环对黏土、冰渍土结构性的影响,提出将冻融结构势作为冻融作用的定量参数。董晓宏等<sup>[10]</sup>通过控制初始含水率、冻融循环次数,建立了一种可以考虑冻融影响的黄土强度劣化模型。在微观方向主要运用电镜扫描技术研究土样颗粒的排列特征以及运用 CT 技术研究剪切带变化规律,如齐吉琳、胡瑞林等<sup>[10-16]</sup>分别通过电镜扫描技术研究了黄土微结构在动荷载、冻融条件下的变化,并与压缩性、抗剪强度、结构性参数、渗透系数变化规律相联系。穆彦虎、吕擎峰等<sup>[17-18]</sup>对比石灰、粉煤灰改良黄土在冻融循环后的微观结构变化并分析了改良机理。叶万军、杨更社等<sup>[19-20]</sup>通过 CT 扫描技术研究了结构性黄土在冻融循环作用下孔隙的发展规律及其结构损伤的尺度效应。

加筋土相关研究起始于 20 世纪 60 年代,由于法国工程师 Vidal 将加筋构筑物应用于加固支护,并取得显著效益,加筋技术进而引起人们的重视,开始大范围应用于边坡、堤坝、挡墙等工程中。发展至今已经出现了土工格栅、土工织物多种加筋技术,然而这些加筋材料是按照一定方向分层布置,会形成

潜在的滑移面。纤维加筋技术通过将纤维随机均匀的拌入土中制成一种各向同性材料,可以有效解决这一问题<sup>[21-22]</sup>。

上述研究成果揭示了冻融循环作用下土体的力学演化特性及机制,然而针对冻融作用下纤维加筋黄土的工程力学性能及纤维对提高黄土的冻融耐久性的作用机制等研究成果较少。本文以结构性黄土为研究对象,聚丙烯纤维作为加筋材料,探究加筋黄土在不同初始含水率、不同冻结温度以及冻融循环次数下的力学特性,为季节性冻土区的相关工程建设提供一种新的施工方案。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验用土

试验用土为西安市未央区某建筑施工基坑的 Q<sub>3</sub> 马兰黄土,取土深度 6~7 m,颜色为褐黄色,无明显层理,质地均匀,质感较为坚硬,土样内不存在钙质结核,有少许虫洞、贝壳以及树根。其基本物理参数见表 1,根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)规定,塑性指数介于 10~17 且具有一定黏粒含量的土,为粉质黏土。制样前将土样碾碎并使用 2 mm 孔径筛子除去土样内的杂质。

表 1 试验用土基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of test soil

土粒 比重 $G_s$	天然 干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最大 干密度 $\rho_{d0} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最优 含水率 $\omega / \%$	塑限 $\omega_p / \%$	液限 $\omega_L / \%$	塑性 指数 $I_p$
2.70	1.32	1.60	17.8	15.3	26.6	11.3

### 1.2 加筋纤维

试验中选取聚丙烯纤维作为加筋材料,这种纤维成本低廉,且具有良好的化学稳定性,不易被腐蚀,对环境影响较小,抗拉强度较高,适合加入黄土中,改善其抗冻融特性。其主要物理特性指标见表 2,实物见图 1。

表 2 聚丙烯纤维物理参数

Tab. 2 Physical parameters of polypropylene fiber

类型	直径/ $\mu\text{m}$	弹性 模量 $E/\text{GPa}$	抗拉 强度 $f/\text{MPa}$	分散性	耐酸 碱性
束状 单丝	20~50	>3.5	>480	较好	极高



图1 加筋纤维材料

Fig.1 Reinforced fiber material

### 1.3 试验方案

试验选取 17.8%、22% 和饱和三组含水量,干密度按照 95% 的压实度取  $1.52\text{g}/\text{cm}^3$ , 尺寸为  $\text{O}39.1 \times 80\text{ mm}$ , 参考朱敏等<sup>[23]</sup> 的试验结果选择纤维长度 12 mm、掺入比 0.5% 进行试验。首先将土料通过喷壶加湿至 10% 的含水量,该含水率下土料用手握时不会黏在一起,将纤维分散并均匀掺入土料中,然后加水至规定的试样含水量。此时含水率并不均匀,采用保鲜膜将制备好的混合土料密封 48 h,水分会从含水量高的区域向含水量低的区域转移,形成细小的水膜。这些水膜填充了土壤孔隙中的空隙,并在试样内部形成连续的水通道,使得含水率达到均匀。最后将纤维混合土料分 5 次装入制样筒中,两层土之间刮毛,以免出现分界面。仪器采用 SYL-2 型应力应变路径三轴仪,考虑到初次冻结和融化历时短而多次冻融循环试验历时长,对于冻结温度和融化的影响试验采用不固结不排水剪切,冻融循环试验则采用固结排水剪切,剪切应变速率分别取  $1\%/ \text{min}$  和  $0.01\%/ \text{min}$ 。参考黄土高原冬季夜间和白天的平均温度,试验最低冻结温度和融化温度分别为  $-10^\circ\text{C}$  和  $5^\circ\text{C}$ ,冻结和融化时间为 24 h,以确保试样能完全冻结或融化,具体试验方案如下。

#### 1) 冻结温度对加筋黄土影响

在探究冻结温度对加筋黄土的影响时,试验组设计了两类试样,包括加筋和未加筋黄土。为了模拟不同的自然冻结环境,试样的含水率被设定为 17.8%、22% 和饱和状态,并将这些试样置于  $-10^\circ\text{C}$ 、 $-5^\circ\text{C}$  和  $0^\circ\text{C}$  的冻结温度下进行 24 小时的冻结处理。此外,设立了对照组,即在  $5^\circ\text{C}$  的环境温度下不进行冻融处理的试样。所有试样在完成冻结后都将进行不固结不排水的剪切测试,以评估冻结温度对其强度的影响。

#### 2) 融化对加筋黄土影响

对于融化对加筋黄土影响的研究,试样设置保

持与上一实验方案相同。经过  $-10^\circ\text{C}$ 、 $-5^\circ\text{C}$  和  $0^\circ\text{C}$  的冻结后,这些试样被置于  $5^\circ\text{C}$  的环境中融化 24 小时。融化过程完成后,通过不固结不排水剪切的方式对试样进行测试,以探索融化过程对加筋黄土强度的具体影响。

#### 3) 冻融循环次数对加筋黄土影响

在研究冻融循环次数对加筋黄土影响的试验中,试样先在  $-10^\circ\text{C}$  条件下冻结 24 小时,再在  $10^\circ\text{C}$  的环境下融化 24 小时,完成一次冻融循环。试验选定的冻融循环次数为 0(即无冻融循环的对照组)、1、3、5、7、9、12 次,以模拟不同程度的季节性冻融作用。每组试样循环后,试样都将进行固结排水剪切测试,从而分析冻融循环对加筋黄土结构和强度的长期影响。

## 2 试验结果及分析

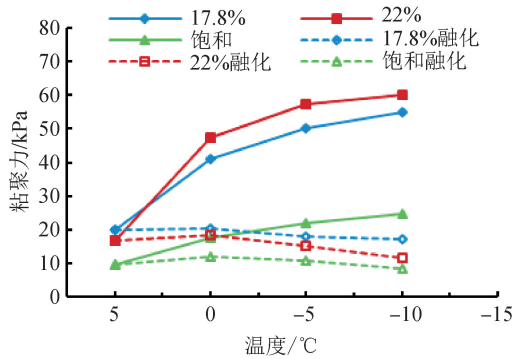
### 2.1 冻结温度对加筋黄土强度参数影响

由图 2(a)可见,未加筋试样在未冻结情况下含水量升高黏聚力降低,原因是本次试验采用的起始含水量 17.8% 为最优含水量,即击实试验中试样达到最大干密度对应的含水量,土体中的胶结物质与土颗粒能够紧密连接。含水量进一步增加时,土粒包裹的水膜变厚,粒间胶结力、基质吸力变弱,导致试样黏聚力降低。含水量相同时,黏聚力随冻结温度降低而增大,在  $0^\circ\text{C}$  时增大最明显。含水量为 17.8% 时,试样黏聚力由  $5^\circ\text{C}$  时的 20.0 kPa 增加到 41.2 kPa,这是由于在低温条件下,试样中的孔隙水冻结成冰,使土颗粒之间的胶结力增大,含水量为 22% 时,试样黏聚力由  $5^\circ\text{C}$  时的 16.9 kPa 增加到 47.4 kPa,黏聚力增大幅度超过 17.8% 含水量的试样。虚线部分为试样在  $5^\circ\text{C}$  融化 24 h 后的黏聚力,可以看出经过低温冻结的试样溶解后黏聚力明显降低,冻结温度越低黏聚力降低幅度越大。

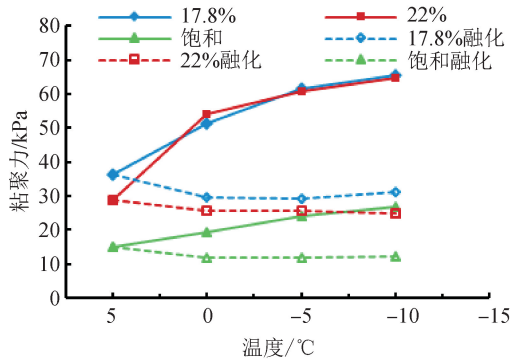
由图 2(b)可见, $5^\circ\text{C}$  时 17.8%、22% 和饱和含水量的加筋试样黏聚力分别为 36.1 kPa、28.9 kPa、14.8 kPa,相比于未加筋试样分别提高了 80%、71%、54%,含水量过高不利于纤维发挥加筋作用。冻结后加筋试样相对于未加筋试样的黏聚力也有提升,经过低温冻结的试样融化后黏聚力虽然有所下降,但仍高于未加筋试样。分析其原因主要是,纤维的存在,使试样具有更好的结构性,从而在冻结时限制了试样的膨胀,减弱冻融对试样的劣化效应。

试验结果表明,冻融作用对于黄土的强度有着劣化效应,在冻结过程中,试样中的孔隙水转化为冰,体积发生膨胀,进而使试样膨胀,当试样中的冰

融化后,试样发生收缩沉陷,破坏了试样原先的胶结、导致黏聚力降低。



(a) 未加筋黄土



(b) 加筋黄土

图2 不同冻结温度下黏聚力变化  
Fig. 2 Variation of cohesion at different freezing temperatures

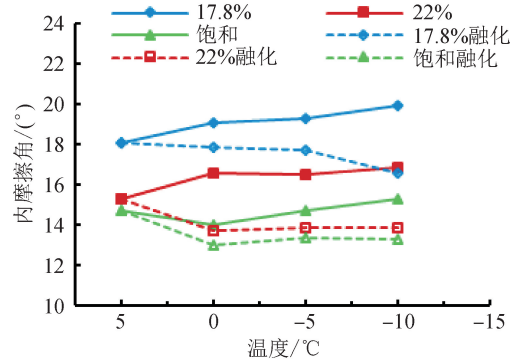
由图3可见,无论是否加筋,冻结后内摩擦角变化并不明显。融化后,3组不同含水量的试样内摩擦角都有所降低,但幅度相对较小,未加筋试样在20%以内,加筋试样的内摩擦角变化幅度在10%以内,纤维加筋在一定程度上降低了强度的劣化。

试验结果说明单次冻融对于试样内摩擦角的影响较小,原因是黄土的摩擦强度主要受粒径级配、颗粒形状、矿物成份的影响,单次冻融对于黄土影响有限;纤维加筋对于试样内摩擦角的提升有限,但是能够降低冻融作用下内摩擦角衰减幅度。

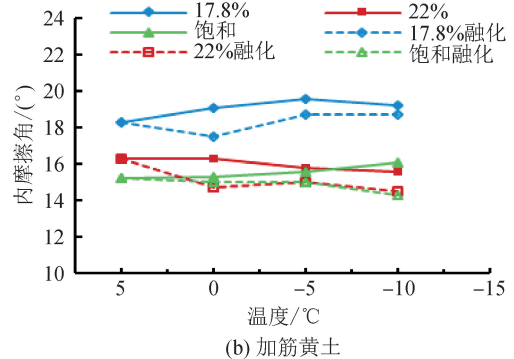
## 2.2 冻融循环对加筋黄土强度参数影响

由图4(a)可见,未加筋试样在前5次冻融循环作用下黏聚力下降明显,5次以后,黏聚力变化趋于稳定,冻融循环对于饱和试样影响较小。对比图4(b)可以看出试样加筋后,黏聚力显著增大,在12次冻融循环后,17.8%、22%和饱和含水量试样黏聚力分别为35.9kPa、27.7kPa、20.9kPa,对比未加筋试样分别增加了130%、97%、111%。试验结果表明,纤维加筋能够显著提高黄土的黏聚力,原因是纤维与土颗粒相互交织包裹,增强了颗粒间的胶结作用,

抑制黄土中水分冻结产生的膨胀,使得土体在多次冻融循环后仍然能够维持较高的强度水平。

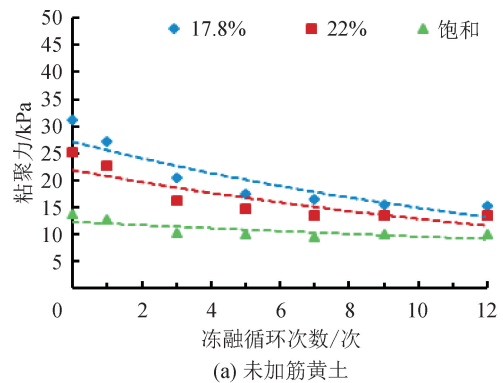


(a) 未加筋黄土

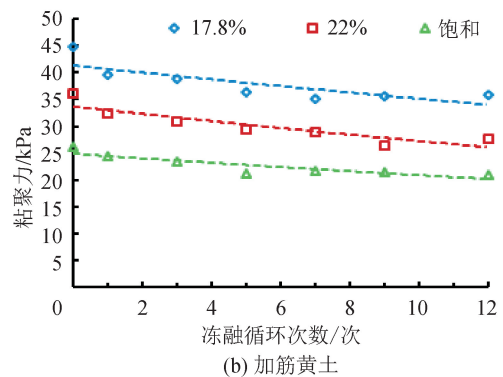


(b) 加筋黄土

图3 不同冻结温度下内摩擦角变化  
Fig. 3 Variation of internal friction angle at different freezing temperatures



(a) 未加筋黄土



(b) 加筋黄土

图4 不同冻融循环次数下黏聚力变化  
Fig. 4 Variation of cohesion at different freeze-thaw cycles

由图 5 可见,冻融循环作用下,试样的内摩擦角略微有所下降,但变化并不明显,说明冻融循环对于内摩擦角影响较小。

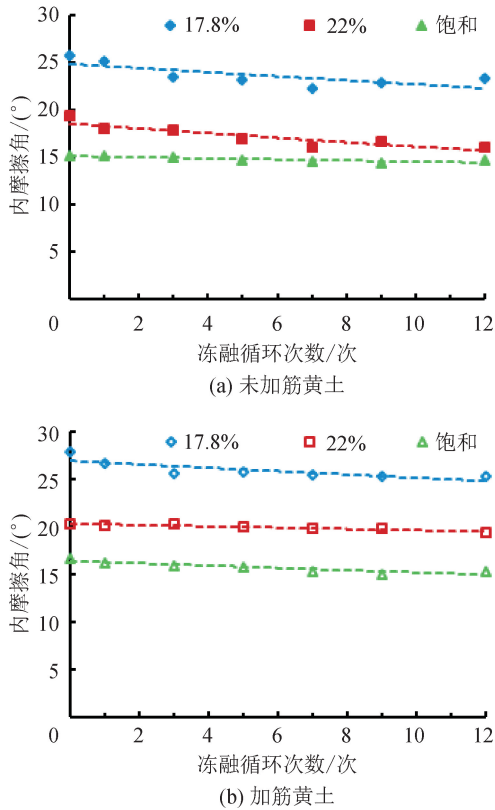


图 5 不同冻融循环次数下内摩擦角变化  
Fig. 5 Variation of internal friction angle at different freeze-thaw cycles

### 2.3 冻融循环下加筋黄土强度劣化速率分析

通过前面分析可知,冻融循环主要是降低了原

状黄土的黏聚力,即颗粒间的胶结作用力,而加筋作用则是通过约束冻胀作用,增强土体结构整体性,来抵消冻融作用的劣化。

表 3 为冻融作用下不同含水量未加筋/加筋试样的黏聚力劣化表,劣化值为该级冻融循环次数与上一级冻融循环次数强度参数之差,占比为该级冻融循环次数劣化值占总劣化值的比例。可以看出未加筋黄土试样在 3 次冻融循环时劣化值占比最大,即劣化速率最快,而加筋试样在 1 次冻融循环时劣化值占比最大。含水率对冻融劣化速率的影响也十分敏感,17.8%、22%和饱和含水量 3 种条件下未加筋试样最大 3 次冻融循环时劣化值占比分别为 43.1%、53.7%、64.8%,可以看出含水量越大劣化速率也越大,而加筋试样的最大劣化占比分别为 58.4%、45.2%、43.4%,占比随着含水量增大反而降低,并且分别在第 1 次冻融循环和第 5 次冻融循环条件下出现。未加筋/加筋试样前 5 次冻融循环作用对黄土黏聚力影响最大,17.8%、22%和饱和含水量的试样粘聚力衰减达到了 80%,试样加筋后强度参数和抵抗冻融水平均得到提高。试样在 7 次冻融循环后加筋试样的劣化值出现了负值的情况,表明强度得到提升。在冻结阶段,试样内的水分在冰冻时会发生膨胀,导致体积增大。这种膨胀会在试样内部产生应力,导致黄土和加筋纤维之间以及黄土内部出现滑动和微裂纹。当试样经历融化时,试样内部的应力减小,使黄土微裂纹能够能够闭合并与加筋纤维接触。此外,融化过程中释放的水分可以渗入微裂缝中,促进颗粒的重新联结。

表 3 冻融循环下加筋黄土黏聚力劣化速率  
Tab. 3 Cohesion deterioration rate of reinforced loess freeze-thaw cycles

冻融次数	含水量 17.8%				含水量 22%				饱和含水量			
	未加筋		加筋		未加筋		加筋		未加筋		加筋	
	劣化值/kPa	占比/%	劣化值/kPa	占比/%	劣化值/kPa	占比/%	劣化值/kPa	占比/%	劣化值/kPa	占比/%	劣化值/kPa	占比/%
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.0	25.0	5.2	58.4	2.6	21.8	3.8	45.2	1.0	27.0	1.8	33.9
3	6.9	43.1	0.8	8.9	6.4	53.7	1.4	16.6	2.4	64.8	0.9	16.9
5	2.8	17.5	2.4	26.9	1.6	13.4	1.6	19.0	0.3	8.1	2.3	43.4
7	1.1	6.8	1.3	14.6	2.0	16.8	0.3	3.5	0.5	13.5	-0.4	-7.5
9	1.1	6.8	-0.5	-5.6	0.1	0.8	2.6	30.9	-0.5	-13.5	0.2	3.7
12	0.1	0.6	-0.3	-3.3	0.1	0.8	-1.3	-15.4	0.0	0.0	0.5	9.4

### 3 强度参数预测模型

针对冻融循环作用下黄土黏聚力和内摩擦角的变化趋势,建立加筋黄土强度参数随冻融次数变化的计算模型,模型引入有4个系数, $S_c$ 、 $S_\varphi$ 为黄土加筋作用下的强化系数, $K_c$ 、 $K_\varphi$ 为冻融作用下的劣化系数,计算方法为:

$$S_c = \frac{c_{d0}}{c_{u0}} \quad (1)$$

$$S_\varphi = \frac{\varphi_{d0}}{\varphi_{u0}} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{c_{dn}}{c_{d0}} \quad (3)$$

$$K_\varphi = \frac{\varphi_{dn}}{\varphi_{d0}} \quad (4)$$

式中: $c_{u0}$ 、 $\varphi_{u0}$ 为未加筋黄土未冻融试样的黏聚力和内摩擦角; $c_{d0}$ 、 $\varphi_{d0}$ 为加筋黄土未冻融试样的黏聚力和内摩擦角; $c_{dn}$ 、 $\varphi_{dn}$ 为加筋黄土经过 $n$ 次冻融后的黏聚力和内摩擦角。

由于强化系数与劣化系数均为同一含水量下的比值,因此可以避免不同含水量的影响,从而求解加筋冻融后的强度参数。将不同含水量试样的强化系数求取平均值可以求得强化系数 $S_c = 1.6$ 、 $S_\varphi = 1.1$ ,平均强度劣化系数见表4。

表4 平均强度参数劣化系数

Tab. 4 Average strength parameter deterioration coefficient

劣化系数	冻融循环次数						
	0	1	3	5	7	9	12
$K_c$	1	0.90	0.87	0.81	0.80	0.78	0.78
$K_\varphi$	1	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93

强化系数 $S_c$ 、 $S_\varphi$ 反映的是纤维加筋对试样强度参数黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的提升效果,不考虑冻融过程。以17.8%含水量为例,强化系数 $S_c$ 为加筋黄土与未加筋黄土黏聚力的比值,强化系数 $S_\varphi$ 为加筋黄土与未加筋黄土内摩擦角的比值。同样方法求取22%和饱和含水量的强化系数 $S_c$ 和 $S_\varphi$ ,然后取平均值即可得到 $S_c = 1.6$ 和 $S_\varphi = 1.1$ 。该参数与黄土的类型以及纤维掺入比有关,对于不同的土样及纤维掺入比应该按照式(1)和式(2)重新计算对应的强化系数。

将表4中的不同冻融循环次数下的平均强度参数劣化系数进行指数拟合,图6为拟合曲线,通过式(5)~(6)可以定量计算加筋黄土任意冻融次数下的强度参数,为加筋黄土抗剪强度的数值模拟提供数据支持。

$$c_{dn} = 1.6 \times 0.98e^{-0.006n} \times c_{u0} \quad (5)$$

$$\varphi_{dn} = 1.1 \times 0.93e^{-0.018n} \times \varphi_{u0} \quad (6)$$

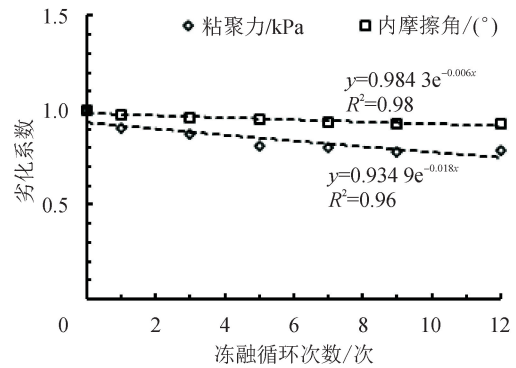


图6 平均强度参数劣化系数曲线

Fig. 6 Average strength parameter degradation coefficient curve

### 4 纤维加筋微观机理分析

图7为不同冻融循环次数下未加筋/加筋黄土的电镜扫描图像,可以看出,未冻融试样内部孔隙较大,颗粒之间通过胶结物质相互连接组成团粒,形状、大小均不规则。初次冻融时一些团粒周围开始出现微裂纹,随着冻融次数的增加,微裂纹进一步发展,最终导致团粒破碎。大孔隙逐渐被破碎的团粒填充,试样内大孔隙向小孔隙转化,同时一些原本为面-面接触的团粒转化为点-点接触,导致颗粒间的连接减弱。

通过Canny算子边缘检测技术提取电镜扫描图像的孔隙,参考穆彦虎等<sup>[16]</sup>研究,根据孔隙面积 $S$ 大小将孔隙分为微孔隙( $S < 20 \mu\text{m}^2$ )、小孔隙( $20 \mu\text{m}^2 \leq S < 100 \mu\text{m}^2$ )、中孔隙( $100 \mu\text{m}^2 \leq S < 300 \mu\text{m}^2$ )、大孔隙( $S \geq 300 \mu\text{m}^2$ )。图8为不同冻融循环次数下各类孔隙面积占总孔隙面积比值,可以看出未加筋黄土大孔隙在冻融循环作用下占比下降明显,主要转化为中孔隙和小空隙;加筋黄土大孔隙占比减小幅度明显小于未加筋黄土,说明团粒破碎较少,加筋能够减弱冻融的劣化作用。

### 5 结论

1) 初始含水量相同时,冻结温度越低黏聚力越高,内摩擦角提升幅度较小。随着试样中冰晶融化,黏聚力会显著降低,加筋能够很好地抑制黄土的冻融劣化。

2) 冻融循环条件下,前5次冻融循环黄土黏聚力劣化明显,后期强度参数趋于稳定。纤维加筋通过与土颗粒相互包裹、连接,提高整体结构性,抑制冻融循环产生的膨胀、沉陷进而增强了试样抵抗冻融循环的能力。

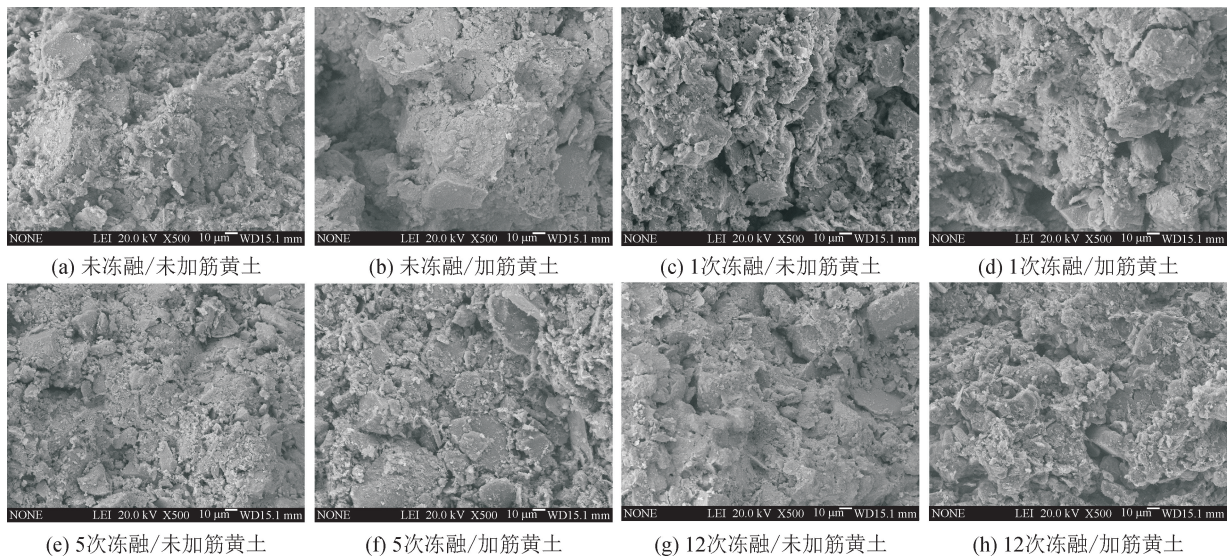


图 7 不同冻融循环次数下黄土的电镜扫描图像

Fig. 7 SEM images of loess under different freeze-thaw cycles

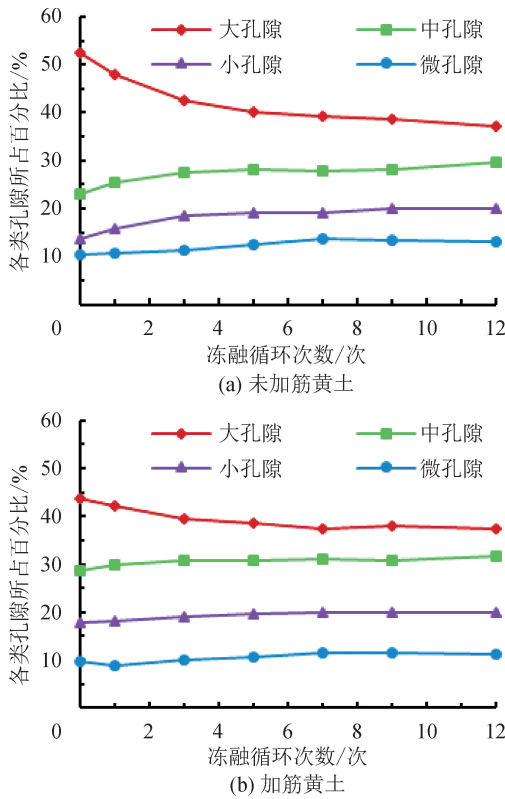


图 8 各类孔隙占比变化曲线

Fig. 8 Variation curves pore proportions of different types

3) 通过试验数据建立了加筋黄土冻融循环下的强度参数预测模型,进一步证实纤维提升了黄土的强度参数,为数值模拟中参数选取提供了支持。

4) 通过电镜扫描和图像处理技术发现冻融循环导致团粒破碎,大孔隙向中孔隙和小孔隙转化,纤维加筋能够约束团粒破碎,进而提高黄土抵抗冻融劣化的能力。

参考文献:

[1] 任婧宇,彭守璋,曹扬,等. 1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征[J]. 自然资源学报,2018,33(4):621-633.  
REN Jingyu, PENG Shouzhang, CAO Yang, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of climate change in the loess plateau from 1901 to 2014[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4):621-633.

[2] 沈珠江,胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报,2003(7):1-6.  
SHEN Zhujiang, HU Zaiqiang. Binary medium model for loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (7):1-6.

[3] 胡再强,沈珠江,谢定义. 结构性黄土的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(4):565-569.  
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Constitutive model of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 565-569.

[4] 胡再强,沈珠江,谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4142-4142.  
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4142-4142.

[5] 邵生俊,周飞飞,龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量参数研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):531-536.  
SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4):531-536.

- [6] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):651-656.  
XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):651-656.
- [7] 郑勋,马巍,郝慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土,2015,37(1):132-137.  
ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1):132-137.
- [8] 郑勋,马巍,郝慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 冰川冻土,2015,36(5):1282-1287, 1294.  
ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5):1282-1287, 1294.
- [9] 邱恩喜,何巧玲,孙希望,等. 冻融循环作用下西藏东南冰碛土剪切力学特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(6):1267-1278.  
QIU Enxi, HE Qiaoling, SUN Xiwang, et al. Experimental study on shear mechanical properties of moraine soil in Southeast Tibet subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6):1267-1278.
- [10] 董晓宏,张爱军,连江波,等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土,2010,32(4):767-772.  
DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Study of shear deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4):767-772.
- [11] 齐吉琳,张建明,朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增刊2):2690-2694.  
QI Jilin, ZHANG Jianming, ZHU Yuanlin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 22(S2):2690-2694.
- [12] 胡瑞林,李焯芬,王思敬,等. 动荷载作用下黄土的强度特征及结构变化机理研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):174-181.  
HU Ruilin, LI Zhuofen, WANG Sijing, et al. Approach to the strength behaviors and microstructural changes of loess under dynamic load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2):174-181.
- [13] 王铁行,杨涛,鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):72-78.  
WANG Tiehang, YANG Tao, LU Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S1):72-78.
- [14] 仇楠,崔自治,占世源,等. 补水条件下压实黄土的二维冻融变形特性[J]. 西安理工大学学报,2020,36(1):115-121.  
QIU Nan, CUI Zizhi, ZHAN Shiyuan, et al. Two-dimensional freeze-thaw deformation characteristics of compacted loess under makeup water condition [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(1):115-121.
- [15] 许健,王掌权,任建威,等. 原状与重塑黄土冻融过程渗透特性对比试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(2):292-299.  
XU Jian, WANG Zhangquan, REN Jianwei, et al. Comparative experimental study on permeability of undisturbed and remolded loess under freezing-thawing condition [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2):292-299.
- [16] 倪万魁,师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土,2014,36(4):922-927.  
NI Wankui, SHI Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4):922-927.
- [17] 穆彦虎,马巍,李国玉,等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1919-1925.  
MU Yanhu, MA Wei, LI Guoyu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon micro-structure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12):1919-1925.
- [18] 吕擎峰,李晓媛,赵彦旭,等. 改性黄土的冻融特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014(45):819-825.  
LÜ Qingfeng, LI Xiaoyuan, ZHAO Yanxu, et al. Properties of modified loess under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014(45):819-825.
- [19] 叶万军,李长清,杨更社,等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学,2018,39(7):2336-2343,2360.  
YE Wanjun, LI Changqing, YANG Gengshe, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions [J]. Rock and Soil Me-



- chanics, 2018, 39(7):2336-2343,2360.
- [20] 杨更社,田俊峰,叶万军. 冻融循环对阳曲隧道黄土微观损伤演化规律影响研究[J]. 西安科技大学学报, 2014,34(6):635-640.  
YANG Gengshe, TIAN Junfeng, YE Wanjun. Influence of freeze-thaw cycles on Yangqu tunnel loess meso-damage evolution[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(6):635-640.
- [21] 熊雨,邓华峰,彭萌,等. 四种人工合成纤维加筋黄土的抗剪特性[J]. 长江科学院院报,2022,39(1):122-126,133.  
XIONG Yu, DENG Huafeng, PENG Meng, et al. Shear properties of loess reinforced with four synthetic fibers [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(1):122-126, 133.
- [22] 魏丽,柴寿喜,张琳,等. 冻融作用下三类纤维加筋固  
化土的抗压抗拉性能[J]. 岩土力学,2022,43(12):  
3241-3248,3280.  
WEI Li, CHAI Shouxi, ZHANG Lin, et al. Compressive and tensile properties of three fiber-loess soils under freeze-thaw cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12):3241-3248, 3280.
- [23] 朱敏,倪万魁,李向宁,等. 黄土掺入聚丙烯纤维后的无侧限抗压强度和变形试验研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(20):8337-8343.  
ZHU Min, NI Wankui, LI Xiangning, et al. Study on unconfined compressive strength and deformation after incorporating polypropylene fiber into Loess [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8337-8343.
- (责任编辑 王绪迪)

(上接第 531 页)

- [19] 孙久文,崔雅琪,张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J]. 自然资源学报,2022,37(7):1673-1690.  
SUN Jiuwen, CUI Yaqi, ZHANG Hao. Spatio-temporal pattern and mechanism analysis of coupling between ecological protection and economic development of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1673-1690.
- [20] 张振东,常军. 2001—2018年黄河流域植被 NPP 的时空分异及生态经济协调性分析[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):166-177.  
ZHANG Zhengdong, CHANG Jun. Spatial-temporal differentiation and eco-economic coordination of vegetation NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2018[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 166-177.
- [21] 褚钰,付景保,陈华君. 区域生态环境与经济耦合高质量发展时空演变分析——以河南省为例[J]. 生态经济,2022,38(5): 161-168.  
CHU Yu, FU Jingbao, CHENG Huajun. Temporal and spatial evolution of the coupling coordination of the high-quality development of regional ecological environment and economy: taking Henan Province for example [J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 161-168.
- [22] 李长松,周玉玺. 中国粮食主产区农业水资源脆弱性与粮食安全时空耦合关系研究[J]. 生态与农村环境学报,2022,38(6):722-732.  
LI Changsong, ZHOU Yuxi. Research on the spatio-temporal coupling relationship between agricultural water resources vulnerability and food security in China's main grain producing areas[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(6): 722-732.
- [23] 赵建吉,刘岩,朱亚坤,等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020,42(1):159-171.  
ZHAO Jianji, LIU Yan, ZHU Yakun, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 159-171.
- (责任编辑 王绪迪)