

冻融循环作用下秸秆纤维加筋土抗压强度试验研究

徐敏普¹,孙明瑞¹,常成²

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001;2.盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城 224002)

摘要:通过室内无侧限抗压试验,分析纤维掺量和冻融循环次数两个因素对棉花秸秆纤维加筋土强度的影响规律,研究冻融循环作用对纤维加筋土强度的影响。试验结果表明:土体中掺入纤维能有效提高土体的抗压强度,明显改善土体的软化程度;加筋土无侧限抗压强度随冻融循环次数的增加呈指数下降趋势,经历5次冻融后,强度下降幅度最大;通过将不同加筋率的纤维土与冻融循环次数进行拟合,建立两者之间的半经验公式,为纤维加筋土的实际工程应用奠定理论基础。

关键词:冻融循环;棉花秸秆纤维;加筋土;无侧限抗压强度;拟合参数

中图分类号:TU411.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2021)02-0006-05

在我国,因季节和昼夜温差变化引起土体冻结、融化而造成工程事故的报道屡见不鲜。例如:青海“3·19”基坑坍塌事故,由于气温回升,冻结土体融化,导致土体松动,基坑发生坍塌,造成人员的伤亡^[1];由于冻胀和融沉问题,中国格尔木—拉萨输油管道发生露管现象,管道的安全性遭到破坏^[2]。

对此,不少专家学者提出采用固化剂(水泥、石灰等)进行固化,提高土体抗冻融特性。方秋阳等^[3]研究发现石灰+SH固化盐渍土在冻融循环后的抗压强度最高,且冻融后其抗压强度降幅最小。栗勇等^[4]研究发现掺入硅微粉的盐渍土冻融后的无侧限抗压强度高于素土,且强度下降幅度小于素土,硅微粉的加入提高了盐渍土的抗冻融特性。张建伟等^[5]通过试验发现木质素的掺入可以有效地填充土颗粒间的孔隙并起着胶结作用,从而提高土体的抗压强度以及冻融后土体的耐久性。同时,也有学者提出采用纤维加筋技术提高土体的抗冻融特性。Liu等^[6]研究发现棉秸秆纤维可以提高土体的抗压强度且削弱冻融作用所造成的土体抗压强度下降的程度。Boz等^[7]通过试验发现冻融后的玄武岩纤维加筋土和聚丙烯纤维加筋土抗压强度均高于素土,其中聚丙烯纤维抗冻融效果更好。Yan等^[8]进行直剪试验发

现加筋黄土的黏聚力高于黄土,且冻融10次后的加筋黄土黏聚力下降幅度小于黄土。但是目前还鲜有学者提出可应用于实际工程的反映纤维加筋土强度与冻融循环次数关系的公式。

本文以前人的研究为基础选择棉花秸秆纤维作为加筋材料。例如,Zhou等^[9]探究了棉花秸秆纤维的成分,指出棉花秸秆纤维含有丰富的纤维素和木质素,具有较强的抗拉性能;Jha等^[10]对棉花秸秆纤维的力学性能进行研究,结果显示棉花秸秆纤维的抗拉强度为290 MPa,弹性模量为5 500 MPa;Liu等^[6]将棉秸秆纤维掺入黏土中,发现加筋后土体的抗压强度提高了约30%;刘建龙等^[11]将纤维加入黄土中,发现黄土的强度提高了24.8%。目前学者的研究主要集中于棉花秸秆纤维掺量以及纤维长度对土体力学特性的影响,对于冻融作用下棉花秸秆纤维加筋土强度的研究鲜有报道。本文通过对不同冻融循环次数下的纤维加筋土的无侧限抗压强度进行研究,总结纤维加筋土的强度与冻融循环次数之间的半经验公式,为纤维土工程应用提供理论基础。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验中所用盐渍土取自江苏省东台市某工程

收稿日期:2021-01-25

基金项目:盐城市盐都区科技成果转化项目(2018035)。

作者简介:徐敏普(1996—),男,江苏淮安人,硕士生,主要研究方向为环境岩土工程。

场地,天然含水率为 24.6%。将盐渍土在自然条件下风干,碾碎,过 2 mm 筛后装桶备用,测得风干土样的含水率为 2.5%。试验土样为粉质黏土,土样的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil samples

液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水率/%
30.2	17.2	13.0	2.70	1.68	18.8



图 1 棉花秸秆纤维
Fig 1 Cotton straw fiber

1.2 试样制备

本次试验中纤维的掺入量分别为干土质量的 0% (不掺纤维)、0.15% 和 0.3%。试样的制备过程如下:首先称取一定量的风干土样,并按照上述比例称取一定质量的纤维;然后手工将纤维少量多次地掺入风干土样中,不断拌和,保证纤维均匀地分散在土样中。接着,根据土样最优含水率及风干土样含水率计算纤维加筋土中需要加入的水量,用喷水壶将所需加入的水缓慢均匀地喷洒在纤维土中。然后,将配制好的土样装入塑料袋中,密封焖料 24 h 以上,使水分充分扩散,保证土样中水分的均匀。最后,将焖料后的土样以 96% 的压实度,分 4 层竖向击实,制成直径 39.1 mm,高 80 mm 的无侧限抗压试样。

1.3 试验方法

1.3.1 冻融循环试验

采用室内模拟试验,模拟天然条件下土体冻结和融化的过程。冻融循环之前将制备好的试样用保鲜膜包裹,防止在冻融循环过程中试样内水分散失^[12]。首先将试样放置在冷冻箱内,设置冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻结 12 h;冻结完成后将试样

试验用棉花秸秆取自江苏省盐城市郊区。将棉花秸秆加工制成纤维,如图 1 所示。控制纤维长度,用剪刀将其长度剪为 12 mm。

置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养护箱中融化 12 h,至此完成一次冻融循环。本试验将进行 0、1、5、10、15、20 和 30 次冻融循环。

1.3.2 无侧限抗压试验

试验采用南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪,仪器应变速率为 2.4 mm/min 。

2 试验结果

2.1 纤维掺量对无侧限抗压强度的影响

不同纤维掺量对土体无侧限抗压强度的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着纤维掺量的增加,试样的无侧限抗压强度也相应地提高。未加筋试样的无侧限抗压强度为 100.88 kPa ,纤维掺量 0.15% 和 0.3% 的试样对应的无侧限抗压强度分别为 118.30 kPa 和 125.66 kPa ,相较于未加筋时的无侧限抗压强度分别提高了 17.2% 和 24.5%,说明纤维的掺入可以有效提高土体的抗压强度。同时由图 2 可以看出,不同纤维掺量的加筋土应力-应变曲线都表现为应变软化型,未加筋试样的强度在达到峰值后呈现明显下降趋势,但是随着纤维掺量的增加,试样在达到峰值强度后应变软化趋势逐渐减弱,加筋土试样残余强

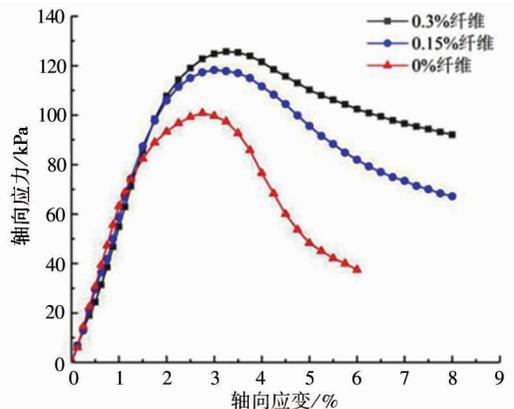


图 2 不同纤维掺量的应力-应变曲线
Fig 2 Stress-strain curves of different fiber content

度均高于未加筋土,表明纤维的掺入使土体的抗变形能力得到明显的提升。

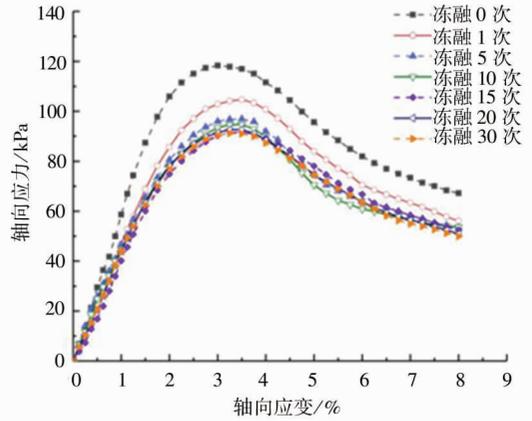
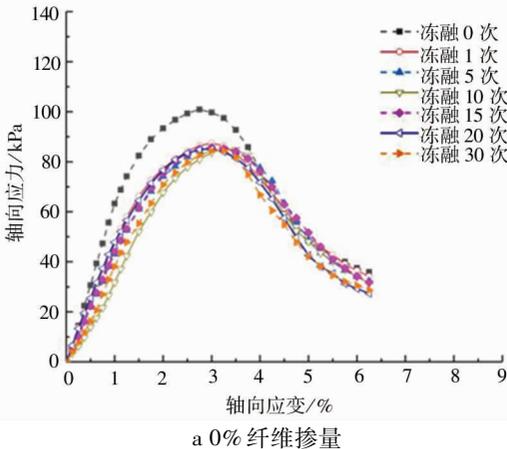
2.2 冻融循环对无侧限抗压强度的影响

无侧限抗压试验结果数据如表 2 所示,冻融作用下不同掺量纤维加筋土抗压强度的应力-应变曲线如图 3 所示。从图 3a 可以看出,在 0~30 次冻融循环过程中,未加筋土样的应力都是先随应变呈线性增加,到达峰值强度后,呈急剧下降的变化趋势。随着冻融循环次数的增加,土样的峰值强度下降,当冻融循环为 0、1、5、10、15、20 和 30 次时,抗压强度分别为 100.88、87.32、85.57、85.08、85.86、85.17 和 84.59 kPa。由此可以看出,0~5 次冻融循环后,土体抗压强度下降了 15.18%,下降幅度大;5~30 次冻融循环后,土体抗压强度共计下降了 16.15%,下降幅度小,该变化趋势同相关文献^[6,13-14]一致。

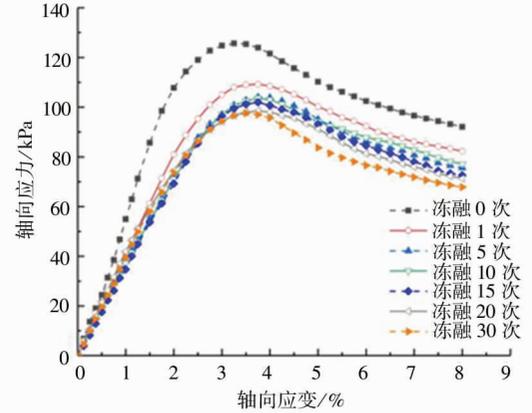
表 2 试样的无侧限抗压强度
Table 2 Unlimited compressive strength of specimens kPa

冻融循环次数	纤维掺量		
	0%	0.15%	0.3%
0	100.88	118.30	125.66
1	87.32	102.64	109.27
5	85.57	96.88	104.00
10	85.08	94.74	103.61
15	85.86	91.71	101.96
20	85.17	92.69	98.54
30	84.59	91.22	97.57

从图 3b、图 3c 可以看出,在 0~30 次冻融循环过程中,纤维掺量 0.15% 和 0.3% 的土样的应力都随着应变呈先增加后下降的变化趋势,与图 3a 相比,下降幅度变小,说明在冻融作用下纤维的掺入仍可以改善土体的脆性破坏,提高土体的延性。



b 0.15% 纤维掺量



c 0.3% 纤维掺量

图 3 不同冻融循环次数下不同纤维掺量纤维加筋土的应力-应变曲线

Fig 3 Stress-strain curves of fiber reinforced soil with different fiber content under different freeze-thaw cycles

从表 2 可以看出,冻融循环次数为 0、1、5、10、15、20 和 30 次,纤维掺量为 0.15% 时,试样抗压强度分别为 118.30、102.64、96.88、94.74、91.71、92.69 和 91.22 kPa;纤维掺量为 0.3% 时,抗压强度分别为 125.66、109.27、104.00、103.61、101.96、98.54 和 97.57 kPa。

由此可以看出,与未加筋土样一致,掺入棉花秸秆纤维土样冻融后的抗压强度明显下降,且随冻融次数增加下降幅度呈由大到小的变化趋势,0~5 次冻融循环后,强度下降幅度大;5~30 次冻融后,强度下降幅度较小。同时,对比图 3a、3b、3c 可以看出,相同的冻融循环次数下,加筋土的抗压强度明显高于未加筋土样,且纤维掺量 0.3% 土样的抗冻融性能高于纤维掺量 0.15% 的土样。因此,纤维的掺入能有效提高土体的抗压强度,并且改善冻土的脆性破坏。

2.3 机理分析

分析冻融后土样强度降低的原因:冻融循环过程中,土体内水分在液态与固态之间的相互转变,以及冻融过程中试样内外温度梯度引起的水分迁移^[15],破坏了土体内土颗粒初始的排列方式,土颗粒的位置及间距发生改变,土颗粒重新分布,因此在冻融循环前5次土体的强度下降明显,当经历5次冻融循环后,土颗粒的排列方式逐渐达到一种新的平衡状态,冻融循环对土体强度的影响逐渐减弱。

2.4 无侧限抗压强度与冻融循环次数关系分析

将表2中不同冻融循环次数下不同纤维掺量的无侧限抗压强度结果进行拟合,结果如图4所示。可以看出,纤维掺量为0%、0.15%、0.3%的纤维加筋土的无侧限抗压强度随着冻融循环次数的增加呈指数下降的趋势,并且两者呈现以下的变化趋势:

$$q = a \cdot e^{-N} + b \cdot N + c$$

式中, q 为无侧限抗压强度值,kPa; N 为冻融循环次数; a 、 b 、 c 均为拟合参数,不同纤维掺量下拟合参数 a 、 b 、 c 的取值见表3。

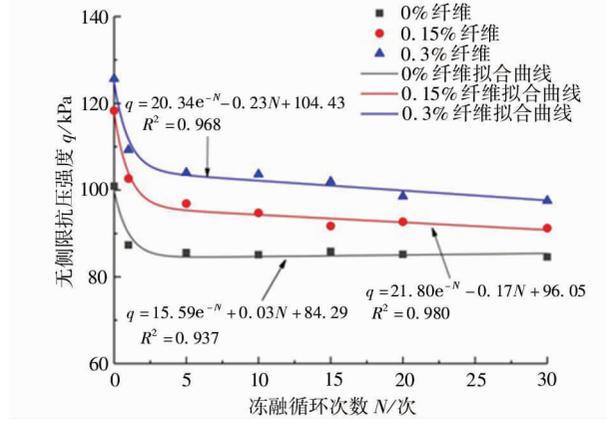


图4 冻融循环下纤维加筋土的无侧限抗压强度拟合曲线

Fig 4 Fitting curve of unconfined compressive strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw cycles

表3 加筋土抗压强度的拟合参数取值

Table 3 Value of fitting parameters of compressive strength of reinforced soil

文献	土样类型	纤维种类	纤维掺量	冻融循环次数	a	b	c	R^2
本文	盐渍土	棉秸秆纤维	0%	30	15.59	0.03	84.29	0.937
			0.15%		21.80	-0.17	96.05	0.980
			0.3%		20.34	-0.23	104.43	0.968
文献[16]	黄土	聚丙烯纤维	0.2%	6	39.53	-1.01	88.99	0.987
			0.4%		41.73	-2.19	128.17	0.999
			0.6%		23.61	-3.62	116.04	0.993
文献[6]	黏土	棉秸秆纤维	0.2%	20	57.17	-1.36	260.15	0.966
			0.4%		55.18	-1.60	307.25	0.939
文献[7]	高岭土	玄武岩纤维	0.5%	10	26.07	-3.34	77.04	0.981
			1%		71.72	-1.36	64.23	0.989

由表3可以看出纤维掺量为0%、0.15%和0.3%的纤维加筋土的无侧限抗压强度拟合系数 R^2 分别为0.937、0.980和0.968,均大于0.9,说明此函数具有较好的拟合度。

为了更好地验证本文所提出公式的适用性,将文献[6、7、16]中无侧限抗压强度结果进行统计并采用上述公式进行拟合,得到相应的拟合参数 a 、 b 、 c 值及拟合系数 R^2 ,如表3所示。可以看出拟合系数 R^2 也均大于0.9,拟合度较好,表明此函数也适用于其他不同类型的纤维加筋土在冻融循环下的强度变化规律。

因此,可以通过有限次数的试验,得到半经验公式拟合参数 a 、 b 、 c 的值,确定该公式,然后将其

推至冻融 N 次。该公式在实际工程中具有很好的应用性。

3 结论

通过冻融循环下纤维加筋土的无侧限抗压试验,研究了纤维掺量及冻融循环次数对加筋土无侧限抗压强度的影响,得出以下结论:

(1)在土体中掺入棉花秸秆纤维,能有效地提高土体的抗压强度,当纤维加筋率分别为0.15%和0.3%时,纤维土强度较素土分别提高了17.2%和24.5%,且纤维的掺入能提高土体的抗变形能力。

(2)不同掺量纤维加筋土的无侧限抗压强度

随冻融循环次数增加呈指数下降趋势。抗压强度在冻融 5 次内下降幅度较大,5 次后下降幅度减小。

(3)根据试验结果提出不同掺量纤维加筋土

与冻融循环次数关系的半经验公式,将该公式应用于不同学者的试验数据,拟合程度良好,可应用于实际工程。

参考文献:

- [1] 孙世梅,刘柳,管中铭,等. 基坑坍塌事故不安全行为及对策研究[J]. 绿色环保建材,2019(2):193-194.
- [2] 金会军,喻文兵,陈友昌,等. 多年冻土区输油管道工程中的(差异性)融沉和冻胀问题[J]. 冰川冻土,2005,27(3):454-464.
- [3] 方秋阳,柴寿喜,李敏,等. 冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(5):1041-1047.
- [4] 栗勇,唐瑞兆. 硅微粉改良盐渍土冻融循环试验研究[J]. 科技创新与应用,2020(4):98-100.
- [5] 张建伟,亢飞翔,边汉亮,等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J/OL]. 岩土力学,2020,41(S2):1-6[2021-01-19]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0097>.
- [6] LIU C, LÜ Y, YU X J, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020,48(4):581-590.
- [7] BOZ A, SEZER A. Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018,151:359-366.
- [8] YAN C G, AN N, WANG Y C, et al. Effect of dry-wet cycles and freeze-thaw cycles on the antierosion ability of fiber-reinforced loess[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021,2021:1-12.
- [9] ZHOU X Y, ZHENG F, LI H G, et al. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers[J]. Energy and Buildings, 2010,42(7):1070-1074.
- [10] JHA S K, SINGH A, KUMAR A. Physical characteristics of compressed cotton stalks[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(2):205-210.
- [11] 刘建龙,侯天顺,骆亚生. 棉纤维加筋土无侧限抗压强度试验研究[J]. 水力发电学报,2018,37(2):12-21.
- [12] 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(S1):72-78.
- [13] 王文华,万健. 冻融循环作用对碳酸盐渍土单轴抗压强度影响的试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2016,17(3):6-9,15.
- [14] 韩航天. 冻融作用下盐渍土及稻壳灰固化盐渍土的工程力学性质[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
- [15] 李生伟,杨超. 冻融循环作用下盐渍土病害机理及改良技术综述[J]. 水利水电技术,2020,51(8):191-200.
- [16] 何玫玫. 冻融循环作用下纤维黄土的力学性质试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.

Experimental Study on Compressive Strength of Straw Fiber-reinforced Soil Under Freeze-thaw Cycles

XU Minpu¹, SUN Mingrui¹, CHANG Cheng²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;)
(2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China)

Abstract: Through indoor unconfined compression test, the influence of fiber content and freeze-thaw cycles on the strength of cotton straw fiber reinforced soil was analyzed, and the influence of freeze-thaw cycles on the strength of fiber reinforced soil was studied. The test results show that the incorporation of fiber into the soil can effectively increase the compressive strength of the soil and significantly improve the softening degree of the soil. The unconfined compressive strength of reinforced soil decreases exponentially with the increase of the number of freeze-thaw cycles, and the strength decreases the most after 5 freeze-thaw cycles. The semi-empirical formula between the fiber-reinforced soil with different reinforcement ratio and the number of freeze-thaw cycles is established, which lays a theoretical foundation for the practical engineering application of fiber-reinforced soil.

Keywords: freeze-thaw cycles; cotton straw fiber; reinforced soil; unconfined compressive strength; fitting parameters

(责任编辑:熊璐璐)