

文章编号: 1007-2993(2022)03-0243-05

冻融作用下秸秆纤维加筋土力学特性研究

刘 鹭

(福建省建筑科学研究院有限公司, 福建福州 350000)

【摘要】 秸秆纤维加筋是一种优良的土质改良技术,但季节性的温度变化会导致纤维土的强度劣化,影响工程的安全稳定。为了探究冻融作用对秸秆纤维土力学特性的影响,对经历不同冻融次数的纤维土进行无侧限抗压与直剪试验。结果表明素土和纤维土的抗压强度和黏聚力随着冻融次数的增加呈指数下降的趋势,且纤维土的抗压强度和黏聚力下降幅度均明显小于素土;纤维土和素土的内摩擦角随着冻融次数的增加呈指数上升的趋势。通过 SEM 发现冻融后素土出现孔隙和微裂隙,造成土体强度衰减。冻融后的纤维土中包裹纤维的土体出现松动,导致筋土界面强度下降,但纤维与纤维之间的三维受力网仍发挥加筋作用,提高冻土的稳定性的。

【关键词】 秸秆纤维加筋;冻融作用;三维受力网

【中图分类号】 TU 472

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.013

Effects of Freeze-thaw Cycles on the Strength of Straw Fiber-reinforced Soil

Liu Lu

(Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350000, Fujian, China)

【Abstract】 Straw fiber-reinforcement is a newly developed soil improvement technology. The variation in soil strength caused by seasonal temperature changes damages the safety and stability of geotechnical engineering projects. To investigate the effects of freeze-thaw cycles on the strength of fiber-reinforced soil, the unconfined compressive tests and the direct shear tests of reinforced samples are carried out after different freeze-thaw cycles. The test results indicates that unconfined compressive strength and the cohesion of the soil samples decreases exponentially with the increasing number of freeze-thaw cycles. However, the decrease ratio of the reinforced soil is smaller than that of the unreinforced soil. The internal friction angle of the soil samples increases exponentially with the increasing number of freeze-thaw cycles. Moreover, SEM indicates that a very distinct increase in the amount of pores and microfissures is found in the unreinforced soil after the cycles. This leads to the decrease of soil strength. The soil surrounding the fiber becomes less dense after freeze-thaw cycles, which indicates the decrease in the interfacial strength of the fiber/soil. However, the complex spatial stress network established by fibers still plays an role in the reinforcement of the fibers, which can improve the stability of frozen soil.

【Key words】 straw fiber-reinforcement; freeze-thaw action; spatial stress network

0 引言

秸秆纤维加筋是一种优良的土质改良技术,具有成本低廉、生态环保、加固效果优良等优点,引起了学者们的关注^[1-2]。众多学者针对不同的秸秆纤维加筋土的力学特性,包括无侧限抗压强度、抗剪强度以及 CBR 等进行了广泛研究。Bouhicha 等^[3]采用麦秸秆纤维加固四种不同类型土,认为麦秸秆纤维在黏土中加固效果更显著;Adili 等^[4]采用纸莎草纤维加筋土体,结果表明在纤维掺量 10% 的工况下,土体

的抗剪强度提高最为明显。Prabakar 和 Sridhar^[5]研究不同加筋率和长度的剑麻纤维对土体强度的影响,认为纤维有效提高黏土破坏时最大偏应力;Vinod 等^[6]采用椰壳纤维加固软土,试验结果表明 1% 为最佳掺入比,且加固效果在高压下更明显。

由上述研究成果可知,秸秆纤维能很大程度提高土体的抗压强度、抗剪强度以及承载力。但在实际工程中,季节和昼夜的温度变化会引起纤维土的冻结和融化,进而导致加筋土的强度劣化,影响工程质

作者简介:刘 鹭,女,1983 年生,福建浦城人,硕士研究生,高级工程师,主要从事岩土力学及工程应用方向研究。E-mail: 31794474@qq.com

量。已有学者开始探讨冻融循环下秸秆纤维土的强度变化,例如 Güllü 和 Khudir^[7]研究了3次冻融循环下不同含量的剑麻纤维土的抗压强度,可以发现纤维含量为0.75%的纤维土的抗冻融性能最优;Dong等^[8]探究了冻融下不同纤维含量的甘蔗纤维加筋膨润土的力学特性,得出冻融下加筋膨润土的抗压强度随着纤维含量的提高而衰减变缓。但需要指出的是,目前的研究重点多局限于冻融作用下秸秆纤维掺量或长度等因素对加筋土力学参数的影响,而对冻融下秸秆纤维加筋机理缺乏深入探讨。

本文采用棉花秸秆纤维为土体加筋材料,通过

对经历不同冻融循环次数的试样进行无侧限抗压试验和直剪试验,得到冻融循环下秸秆纤维土强度演化规律。通过扫描电镜,得到冻融前后纤维土和素土的微观变化,并结合相关宏观力学特性分析,得到一些新的发现。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验用土取自位于盐城某基坑黏土,其物理特性见表1。试验采用的纤维为棉花秸秆纤维,其平均直径为0.102 mm,长度为1 mm,其物理力学特性见表2。

表1 土的物理力学性质

天然含水率 w /%	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	比重 e_s	最优含水率 w_d /%	最大干密度 ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
34.3	41.09	21.71	19.38	2.65	18.36	1.87

表2 秸秆纤维的物理力学特性

长度/mm	直径/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗拉强度/MPa	延伸率/%
10	0.102	1.55	290	7.0~8.0

1.2 试样制备

土样取回风干后,过2 mm筛。试验中选取三种不同的纤维掺量,分别为干土质量的0%、0.2%、0.4%。在试验过程中,首先将纤维与土进行充分搅拌,使得纤维均匀分散在土中。其次,当纤维分散均匀后,在土中喷洒入适量的水配制到纤维土的最大含水率。将土样装入密封袋中24 h,确保土样中的水分均匀分布。最后,制备两种不同尺寸的试样。无侧限抗压试验是称取适量的土样,分五层倒入内径39.8 mm、高80 mm的击实桶内进行击实。直剪试验则分三层倒入内径61.8 mm、高20 mm的环刀内进行击实。

将上述试样制备好的试样用塑料薄膜密封好,以防水分蒸发。冻融循环试验方案为将试样放入 -20°C 的恒温箱冻结12 h后,放入 20°C 的室温融化12 h,以上为一次冻融循环^[9-10]。分别冻融循环至0、3、5、10、15、20次。

1.3 试样测试

无侧限抗压试验采用YYW-2型应变式无侧限抗压仪,加载速率为2.4 mm/min,当试验进行至轴向应变20%时,停止试验。

直剪试验采用应变式直剪仪进行剪切。剪切过程中,分别施加100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa轴向压力,设定剪切速率为0.08 mm/min,记录试样

剪切过程中的位移和测力计读数。抗剪强度选择土样应力-位移曲线的峰值。当曲线无峰值时,取4 mm位移对应的应力为抗剪强度。

2 结果与讨论

2.1 无侧限抗压强度

图1为冻融作用下不同纤维掺量的加筋土抗压强度变化,可以发现素土和纤维土抗压强度整体都呈指数下降趋势。在前3次冻融循环中,素土和加筋土的抗压强度都下降剧烈。3~10次冻融循环中,强度值下降变缓。10次循环后强度下降波动变化幅度较小,趋于稳定。Boz等^[11]研究聚丙烯纤维加筋土以及Ghazavi等^[12]研究玄武岩纤维土时发现,冻融循环至10次后纤维土的抗压强度趋于稳定,与本

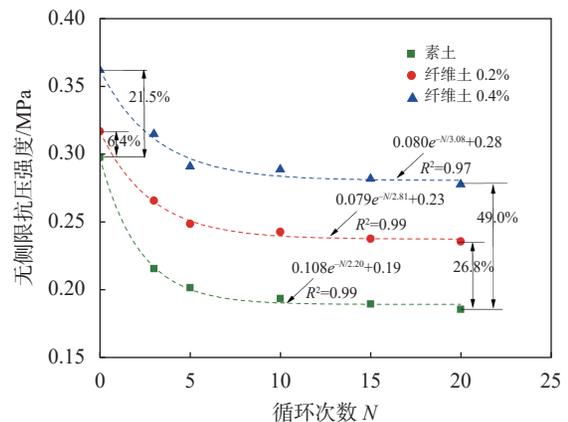


图1 纤维土抗压强度随着循环次数的变化

次试验得到的规律相一致。

同时,从图 1 可看出,当冻融 0 次时,相对于掺量为 0 的纤维土抗压强度,掺量为 0.2% 和 0.4% 的纤维土的抗压强度分别提高了 6.4% 和 21.5%。经过 20 次冻融循环,相对于掺量为 0 的纤维土抗压强度,掺量为 0.2% 和 0.4% 的纤维土的抗压强度分别提高 26.8% 和 49%。经历 20 次冻融循环后,纤维的掺入对冻土的抗压强度提高更明显。因而,在冻土中掺入棉花秸秆纤维能有效提高冻土的稳定性的。

2.2 黏聚力和内摩擦角

黏聚力和内摩擦角是评价土体抗剪强度的两个重要指标,图 2 为冻融作用下不同纤维掺量的纤维土的黏聚力和内摩擦角变化规律。

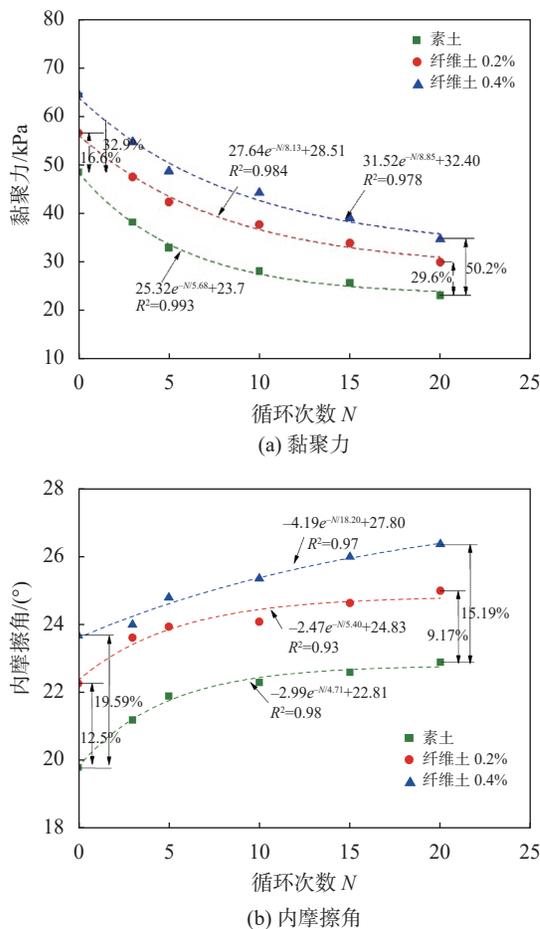


图 2 纤维土抗剪强度随着冻融循环次数的变化

从图 2(a)可得,随着冻融次数增加,素土和纤维土的黏聚力均呈指数下降趋势。有研究指出冻融作用破坏土体原有的内部结构,导致土颗粒之间的间距增大,造成土体的黏聚力下降^[13-14]。当冻融至 20 次后,相对于掺量为 0 纤维土的黏聚力,掺量为 0.2% 和 0.4% 纤维土的黏聚力分别提高 29.6% 和 50.2%。该值大于未冻融前的纤维加筋的抗压强度提高值,冻

融后纤维仍发挥优良加筋作用。

图 2(b) 为不同纤维掺量的纤维土的内摩擦角随着冻融次数增加的变化,从图 2(b) 可以发现,随着冻融次数增加,素土和纤维土的内摩擦角均呈指数增加趋势。冻融作用后的导致土颗粒之间具有更多的接触点,有利于摩擦力的发挥,因此内摩擦角增大^[15-16]。冻融 20 次后,相对于掺量为 0 纤维土的内摩擦角,掺量为 0.2% 和 0.4% 的纤维土的内摩擦角分别提高 9.17% 和 15.19%。结合图 2(a),发现无论是冻融后纤维土的黏聚力还是内摩擦角,均明显高于素土,说明冻土掺入棉花秸秆纤维能有效提高土的抗剪性能,和图 1 得到结论相一致。

2.3 扫描电镜 (SEM)

图 3 为素土和纤维土冻融前后的 SEM 照片。相对于图 3(a),冻融 20 次后的素土出现明显的孔隙和裂缝,见图 3(b)。这是由于土样处于正负温周期变化时,土中孔隙水凝固成冰后体积膨胀约 9%,冰晶增长,体积膨胀,由此产生的膨胀力挤压土颗粒,使得土颗粒不断发生变形和位移^[15-16],造成土体出现孔隙和裂缝。微观的孔隙和裂缝说明冻融后土骨架的结构出现明显的损伤,势必导致土体宏观强度下降。但有文献指出,当冻融循环至一定循环次数后,土骨架的结构和孔隙的状态逐渐趋于稳定,因而力学性能也会趋于稳定状态^[17-18],和上述素土的力学特性呈指数上升或下降的变化趋势相一致。

图 3(c) 为未经冻融循环的纤维土的微观图片。从图 3(c) 可得,冻融前的土体密实。纤维表面被大量的黏土颗粒包裹着,当土体受荷载作用而使纤维受拉时,纤维与土之间的黏聚力和摩擦力会限制筋土界面相对错动,从而发挥加固土体的作用^[19]。同时,从图 3(c) 看出,纤维与纤维存在明显的交织点。当纤维土中一根纤维受力时,周围的其它纤维将一同受力,从而形成三维空间受力网,从而能进一步限制土颗粒的位移,提高土体的强度^[1,19]。

当冻融至 20 次时,从图 3(d) 可以看出,包裹着纤维周围的土体出现孔洞,则纤维与土体界面之间黏聚力和摩擦力会明显下降,使得单根纤维的拉筋作用下降。当纤维受力时,纤维与土之间相对滑动较为容易产生,从而分担外部荷载能力降低。同时,由图 3(d) 可得,纤维与纤维之间相互交织,三维受力网仍发挥加筋作用。当土体受力时,纤维受力网中一根纤维会带动周围的纤维共同承受荷载,从而增强冻土的稳定性的。

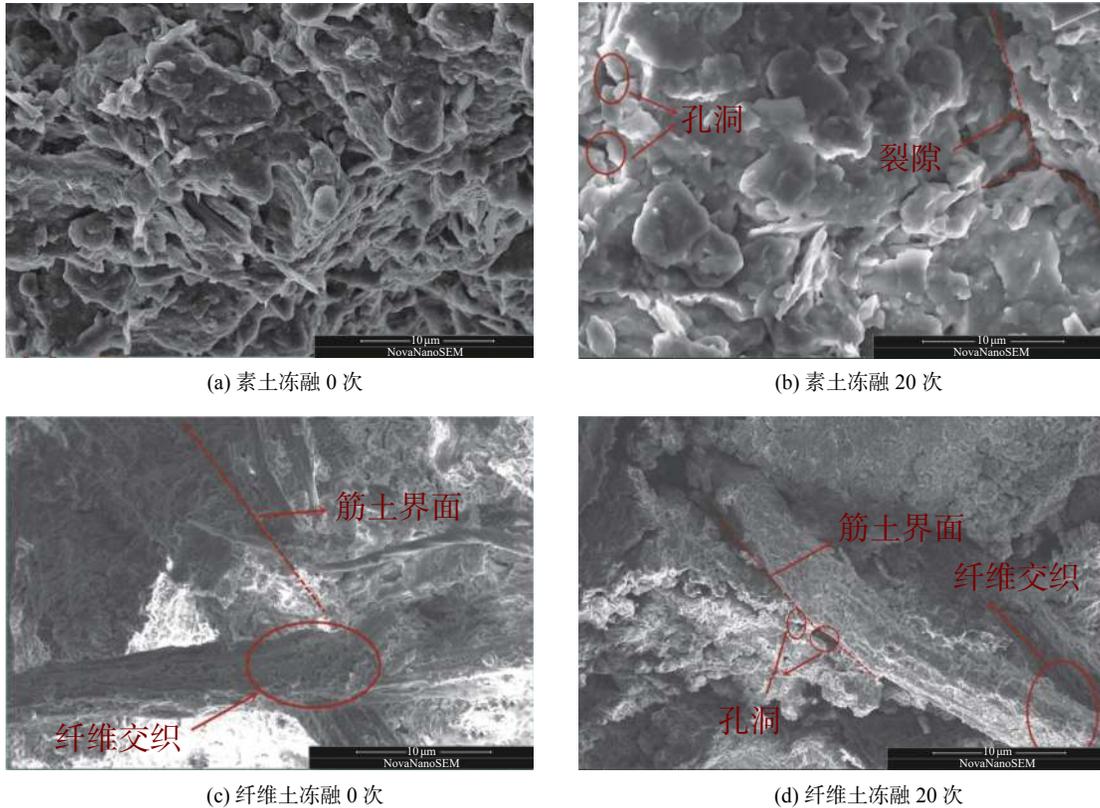


图3 冻融前后 SEM 照片

3 结论

本文对经历不同冻融次数的棉花秸秆纤维土进行无侧限抗压试验、直剪试验以及扫描电镜观测,分析了冻融下纤维土宏观力学特性和微观结构变化,得到以下结论:

(1)纤维土和素土的抗压强度随着冻融次数的增加均呈指数下降的趋势,且素土的下降幅度明显大于纤维土。当冻融 20 次后,对应纤维掺量为 0、0.2% 和 0.4% 三种情形,抗压强度分别下降 56.5%、25.5% 和 23.2%。

(2)纤维土和素土的黏聚力随着冻融次数的增加均呈指数下降的趋势,而内摩擦角随着冻融循环次数的增加呈指数上升的趋势。冻融 20 次后,纤维土的黏聚力和内摩擦角均大于素土,掺入纤维能有效提高冻土的稳定性。

(3)素土冻融后出现明显的裂缝和孔洞造成宏观力学性能下降。冻融后纤维土中包裹纤维的土体松动,导致筋土界面的单根纤维拉筋作用下降,但是纤维与纤维之间的三维受力网相互交织,仍在冻土中发挥加筋作用。

参 考 文 献

[1] 刘宝生,唐朝生,李 建,等.纤维加筋土工程性质研究

进展[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(4): 540-547.

- [2] KHOSROW G, ROMILDO D, TOLEDO F, et al. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(1): 39-48.
- [3] BOUHICHA M, AOUISSI F, KENAI S. Performance of composite soil reinforced with barley straw[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 27(5): 617-621.
- [4] ADILI A A, AZZAM R, GIOVANNISPAGNOLI, et al. Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus)[J]. *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 2012, 48(6): 241-247.
- [5] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. *Construction & Building Materials*, 2002, 16(2): 123-131.
- [6] VINOD P, BHASKAR A, LEKSHMI C S. Triaxial compression of clay reinforced with sand-coir fiber core[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2007, 30(4): 333-336.
- [7] GÜLLÜ H, KHUDIR A. Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106: 55-65.
- [8] DANG L C, FATAHI B, KHABBAZ H. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse

- fibres[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 658-665.
- [9] 张 英, 郇 慧, 杨成松. 基于SEM和MIP的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3597-3603.
- [10] ROUSTAEI M, ESLAMI A, GHAZAVI M. Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 120: 127-137.
- [11] 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.
- [12] GHAZAVI M, ROUSTAIE M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61(2-3): 125-131.
- [13] 冯德成, 林 波, 张 锋, 等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, 47(2): 111-127.
- [14] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 887-894.
- [15] WANG D, MA W, NIU Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2007, 48(1): 34-43.
- [16] 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: 2690-2694.
- [17] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. *Engineering Geology*, 1979, 13(4): 73-92.
- [18] KLASSEN S P, MCLEAN J E, GROSSL P R, et al. Fate and behavior of lead in soils planted with metal-resistant species (river birch and smallwing sedge)[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 1826-1834.
- [19] 王德银, 唐朝生, 李 建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1933-1940.

收稿日期: 2021-01-25