

冻融作用对原状棕壤抗剪强度的影响

朱龙祥, 范昊明, 郭成久, 金丹, 谢立群, 马仁明

(沈阳农业大学水利学院, 辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室, 沈阳 110866)

摘要: 为揭示冻融循环作用对棕壤抗剪强度的影响, 采集沈阳地区 5 cm 和 25 cm 2 个深度原状棕壤(分别为 H_5 和 H_{25}) 为研究对象, 通过室内冻融循环模拟和土壤直剪试验, 研究冻融循环次数和土壤含水率对土壤抗剪强度的影响。结果表明: (1) 土样含水率越高, 初次冻融作用的破坏效果越强, 1 次冻融循环后, 含水率为 25% 的 H_5 和 H_{25} 土样黏聚力分别下降 50.00% 和 25.87%; 含水率 35% 的 H_5 和 H_{25} 土样黏聚力分别下降 75.61% 和 50.77%。15 次冻融循环后, 含水率 10% 的 H_5 和 H_{25} 土样黏聚力分别增加 74.36% 和 60.08%; 含水率 35% 的 H_5 和 H_{25} 土样黏聚力分别增加 14.63% 和 26.15%。但在 2 个不同含水率条件下, 黏聚力的增大机制不同。(2) 含水率为 15%, 20%, 25% 条件下, H_5 和 H_{25} 土样内摩擦角在多次冻融循环中始终在一定范围内波动, 说明这 3 个含水率下冻融作用对土壤内摩擦角影响具有不确定性。35% 含水率的 H_5 和 H_{25} 土样内摩擦角受冻融作用的影响较小, 分别在 $(18.57^\circ \pm 0.88^\circ)$ 和 $(12.86^\circ \pm 1.14^\circ)$ 变化。(3) 平均抗剪强度主要受土壤含水率影响, 随着含水率的增加呈指数函数减小。受黏粒含量影响, 含水率低于 25% 时, H_{25} 土样平均抗剪强度高于 H_5 土样; 含水率高于 25% 时, H_{25} 土样平均抗剪强度偏低。

关键词: 棕壤; 冻融循环; 抗剪强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0055-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.008

Effect of Freeze-thaw Cycles on Shear Strength of Undisturbed Brown Soil

ZHU Longxiang, FAN Haoming, GUO Chengjiu, JIN Dan, XIE Liquan, MA Renming

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Liaoning Province

Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration, Shenyang 110866)

Abstract: In order to reveal effects of freeze-thaw cycles on shear strength of brown soil, the undisturbed brown soil from 5 cm and 25 cm depths (H_5 and H_{25} , respectively) in Shenyang area were collected. The effects of freeze-thaw cycles and soil water contents on soil shear strength were analyzed through indoor freeze-thaw simulation and direct shear tests in laboratory. The results showed that: (1) The higher soil water content, the stronger damage effect of the first freeze-thaw cycle. After the first freeze-thaw cycle, soil cohesion of H_5 and H_{25} samples with 25% soil water content decreased by 50.00% and 25.87%, respectively; and the soil cohesion with 35% soil water content decreased by 75.61% and 50.77%, respectively. After 15 freeze-thaw cycles, the cohesion of H_5 and H_{25} samples with 10% soil water content increased by 74.36% and 60.08%, respectively; the cohesion of H_5 and H_{25} samples with 35% soil water content increased by 14.63% and 26.15%, respectively. However, the mechanisms of cohesion increasing under two different soil water contents were different. (2) The internal friction angle of H_5 and H_{25} samples with 15%, 20%, and 25% soil water contents fluctuated during the multiple freeze-thaw cycles, indicating that the effects of freeze-thaw cycles on the internal friction angle were complicated and uncertain in the soil water contents. The internal friction of H_5 and H_{25} samples with the soil water content of 35% were hardly affected by freeze-thaw cycles and varied between $(18.57^\circ \pm 0.88^\circ)$ and $(12.86^\circ \pm 1.14^\circ)$, respectively. (3) The average shear strength mainly decreased exponentially with the increasing of soil water contents. Clay content might play important role in average shear strength at different water contents. When the soil water contents were below 25%, the average shear strength of H_{25} soil samples were higher than that of H_5 ; while soil water contents were above 25%, the average shear strength of H_{25} were lower.

收稿日期: 2020-09-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目(41601284)

第一作者: 朱龙祥(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: zhulongxiang@stu.syau.edu.cn

通信作者: 马仁明(1986—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: marenming@syau.edu.cn

Keywords: brown soil; freeze-thaw cycles; shear strength

冻融作用的影响面积广,秦岭淮河以北大概十余个省市地区都存在土壤冻融,其面积约占全国总国土面积的 53.5%^[1],虽然冻融强度以轻、中度为主,但对人类生存与发展的影响已愈发明显^[2]。真正因冻融循环导致土颗粒移动量很小,而通过改变土壤性质等间接导致的土壤流失量更大,在水蚀和风蚀作用下冻融作用影响更加显著^[3]。土壤冻融过程是一种基于固、液、气三相组成的水热传递过程^[4],冻融过程中水分相变、冰晶生长和水分迁移对土颗粒和孔隙的反作用力,是冻融循环对土壤结构影响的根本原因^[5]。冻融作用主要通过改变土壤结构进而影响团聚体水稳定性、土壤孔隙特征以及土壤抗剪强度等,从而影响土壤可蚀性^[6-10]。

冻融后的土壤抗剪强度变化,对研究冻融后沟坡侵蚀过程有重要意义^[11]。土壤抗剪强度是由土粒间发生相对滑动而产生的摩擦力和颗粒间胶结作用,以及电子吸引微小颗粒所产生的黏聚力构成^[12],内摩擦角和黏聚力是决定土壤抗剪强度大小的主要内在因素^[13]。广大学者在探究冻融作用对土壤黏聚力和内摩擦角的规律领域开展了大量工作,王大雁等^[14]研究青藏黏土的冻融循环后发现,该黏土的黏聚力降低,内摩擦角并无规律可循;而苏谦等^[15]研究青藏黏土发现,冻融作用下黏聚力的变化受土体密度影响,低密度土体的黏聚力随冻融次数增加有所提高,随后趋于平衡,高密度土体的黏聚力下降,随后趋于平衡;倪万魁等^[16]以洛川黄土为研究对象,得到反复冻融作用使黏聚力降低,内摩擦角增大;丑亚玲等^[17]将兰州黄土进行冻融循环后也得到相似结果,且随冻融次数的增加,土样的黏聚力呈指数函数减小,内摩擦角

呈指数函数增大;而董晓宏等^[18]对杨凌黄土做了冻融循环后发现,黄土的黏聚力先减小再增大,最低值在 10 次冻融循环之内,而内摩擦角基本不变;齐吉琳等^[19]对 2 种超固结土样进行研究发现,冻融作用使超固结土的黏聚力降低,内摩擦角增大。综上,冻融作用对土壤抗剪强度的影响机理和影响结果并未形成统一结论,土壤初始状态的不同会导致土壤抗剪强度对冻融作用的响应结果不同。同时,研究对象多以黄土和青藏黏土为主,鲜有对原状棕壤的研究。

辽宁省是我国重要的商品粮生产基地,也是我国温带农田生态系统的重要组成部分^[20]。当地的气候条件和昼夜温差造就了冻融作用发生所需的基础,每年晚秋和春季发生土壤“昼融夜冻”的冻融交替现象^[21],其所带来的影响将直接威胁当地农业生产和生态环境的可持续发展。本文以辽宁省主要土壤类型——棕壤为研究对象,通过室内冻融循环试验和土壤直剪试验,研究不同含水率、不同冻融循环次数对原状棕壤抗剪强度参数的影响,以期为该地区坡面土壤侵蚀机理研究及防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试土壤类型为棕壤,取土地点为沈阳农业大学水利学院综合实验基地(123°33′42.80″E,41°50′0.80″N)。气候类型为温带半湿润大陆性气候,受季风影响降雨集中,冬冷夏暖,寒冷期长。年均降水量为 722 mm,最低气温在零下的时间主要集中在每年 11 月至翌年 3 月,土壤冻结深度约 1 m。供试土壤的基本物理性质见表 1。

表 1 供试土壤基本物理性质

土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水率/%	饱和 含水率/%	土壤颗粒组成/%		
				砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
5	1.26	27.25	37.43	47.14	34.68	18.17
25	1.36	25.31	35.79	35.64	40.67	23.68

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备 供试土样取样时间为 2019 年 10 月 4—6 日,取样地点为沈阳农业大学水利学院综合实验基地。选取多年未利用裸地进行取样,该地块坡度为 2°~3°,土壤容重较为均匀,且无人扰动。在距地表 5,25 cm 处,用内径为 61.8 mm、高为 20 mm 环刀取样,并将与平均重量差值>5 g 的土样剔除,所取土样简写为 H₅和 H₂₅。土样运至实验室后,统一进行慢速湿润并饱和处理,随后将土样置于室温(20±3)℃避光自然阴干,分别控制重量含水率为

10%,15%,20%,25%,35%。每个处理设 3 次重复,共制作试样 600 个。

1.2.2 冻融循环模拟试验 直剪土样的冻融模拟和直剪试验于 2019 年 10 月 15 日至 12 月 30 日完成。为了尽可能模拟冻融交替过程,并结合野外观测结果,共设计 5 个冻融循环次数,即 0,1,5,10,15 次,其中 0 次冻融作为对照组。在模拟冻融试验中,将不同含水率的土样包裹保鲜膜放入温度可调控的冻融机(调节温度误差为±0.3℃)中,根据沈阳市气象数据,模拟冻结温度设为-6℃,解冻温度设为 6℃。

将冻融机温度调整为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$,约 30 min 后达到冻结温度并保持恒定,冻结 12 h,然后在 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下进行 12 h 解冻。本试验的冻结、解冻时间均为 12 h,可以将土样完全冻结和解冻。

1.2.3 土样直剪试验 应用南京土壤仪器厂的 ZJ 型应变控制式直剪仪,进行不排水快剪试验,设定剪切速度为 0.8 mm/min ,分别在 100,200,300,400 kPa 4 种垂直压力下进行剪切。若剪应力出现峰值,以峰值为抗剪强度,无峰值时,取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力为抗剪强度。为得到更加准确的试验结果,每个处理均进行 3 次重复试验。作出抗剪强度与垂直压力的关系图,根据库伦定律,土壤抗剪强度参数黏聚力 C 和内摩擦角 φ 通过公式(1)求得^[22]。

$$\tau=\sigma\tan\varphi+C$$

(1)

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为法向应力(kPa); φ 为土壤内摩擦角($^{\circ}$); C 为土壤黏聚力(kPa)。

每组试样分布在 4 个不同的法向应力(100,200,300,400 kPa)下进行直剪试验,张祖莲等^[23]研究发现,

土壤干容重 $>1.2\text{ g/cm}^3$ 时土壤侵蚀模数与土壤平均抗剪强度呈负相关关系,且有一定程度的线性相关关系。因此,将不同法向应力下的土壤抗剪强度通过公式(2)进行加权处理,得到加权平均抗剪强度^[23]。

$$\tau=\frac{\sum_{i=1}^4\tau_i\sigma_i}{\sum_{i=1}^4\sigma_i}$$

(2)

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为法向应力(kPa)。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016、OriginPro 2017、Statistix 8 以及 SPSS 25 软件进行数据统计处理与作图,运用 LSD 法和 Pearson 法进行各指标间的显著性检验和相关性分析。基于方差分析结果计算冻融次数、含水率其相互作用对黏聚力、内摩擦角和平均抗剪强度的贡献,利用公式(3)进行计算^[24],计算结果见表 2。

$$CT=(SS-MSE\times df)/SST$$

(3)

式中: CT 为贡献度(%); SS 为平方和; MSE 为误差均方; df 为自由度; SST 为总平方和。

表 2 冻融次数和含水率对各指标的影响与贡献

土样	项目	黏聚力		内摩擦角		平均抗剪强度	
		Sig.	CT/%	Sig.	CT/%	Sig.	CT/%
H ₅	冻融次数	0.001	3.4	0.001	14.8	0.003	5.0
	含水率	0	70.9	0.041	5.1	0	58.4
	冻融次数×含水率	0	11.0	0.001	24.8	0.001	11.4
	误差		14.6		55.4		25.2
	主因素和		74.3		19.9		63.4
H ₂₅	冻融次数	0.028	1.3	0.041	4.0	0.024	3.3
	含水率	0	75.2	0	21.2	0	49.8
	冻融次数×含水率	0	11.3	0	31.8	0	17.5
	误差		12.2		43.1		29.4
	主因素和		76.5		25.2		53.1

注:Sig.<0.05 表示该数据具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对棕壤黏聚力的影响

由表 2 可知,含水率对黏聚力的影响程度远大于冻融循环次数。其主要原因为土壤中液态水冻结成固态冰后,体积增大,随着含水率的增大,水分冻结后对土体内的影响效应变强^[25]。冰晶体填充土壤孔隙,每次冻融循环后,冰晶对土壤孔隙的填充效果均发生变化,导致土颗粒间的联结情况和黏聚力产生改变。

由图 1 可知,低含水率(10%)条件下,H₅ 和 H₂₅ 土样的黏聚力具体表现为除 1 次冻融作用导致 H₅ 土样黏聚力降低外,黏聚力均随着冻融次数的增加而增加,最终增加 74.36%;除 15 次冻融循环后 H₂₅ 土样黏聚力降低外,黏聚力均随着冻融次数的增加而增加,最终增加 60.08%。黏聚力反映土粒间的各种物理化学作用力,包括库仑力、范德华力、胶结作用力

等,这些力的大小由土壤颗粒间的距离和颗粒间胶结物质的胶结力共同决定^[15]。丑亚玲等^[17]认为,低含水率下的短程吸附作用(主要是土颗粒骨架—水界面附近的电场和范德华力场作用而产生)对黏聚力的影响至关重要。低含水率下,电荷力与范德华力的作用强度较强。此外,土壤在冻结峰面附近产生较大的负孔隙水压力,使有效应力增大,土体被压缩;当土样融化时,有效应力减少,在整个过程中,总应力保持不变,冻融循环可以对土样产生超固结效应^[15],在低含水率土样中,冰晶的膨胀作用远小于冻结峰面的负孔隙水压力。土样受低温作用时,表面最先产生冰晶,内部水分向冻结锋面迁移并冻结,低含水率土样内部气体含量较高,气体的冷却收缩也促进超固结效应。因此,随着冻融循环次数的增多,土壤结构随之增强,黏聚力随之增大。同时,冻融过程中水分迁移存在不平衡和不确定性,H₅ 土样在 1 次冻融后的黏聚力有

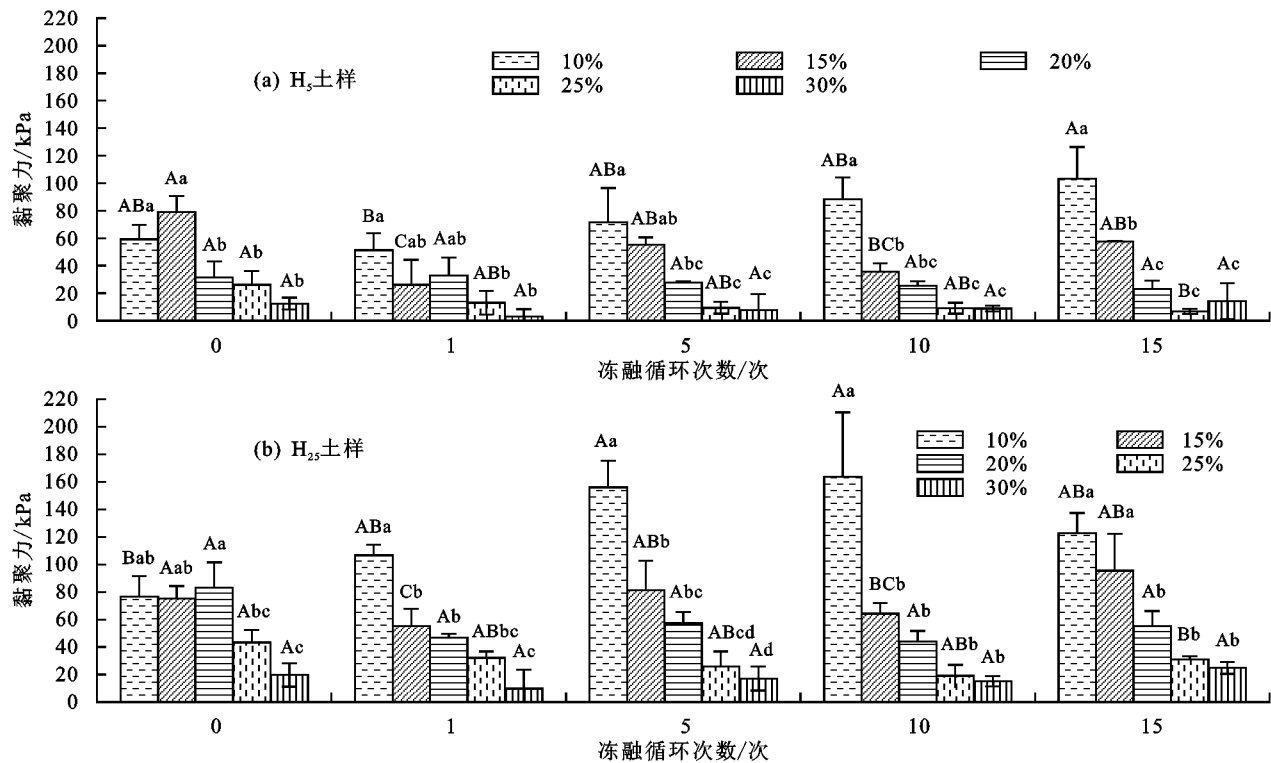
所下降;H₂₅土样在 15 次冻融后的黏聚力显著低于 10 次冻融后的黏聚力。

中含水率(15%和 20%)条件下,H₅和 H₂₅土样的黏聚力在 1 次冻融循环后下降,在多次冻融循环中呈现出小范围波动。说明 1 次冻融对黏聚力变化的影响较大,低含水率的 H₅土样在 1 次冻融循环后黏聚力下降的机制也应与之相似,多次冻融循环中水分的不均衡性和相位移移动的不确定性在其中起着重要作用,土体内冷冻固结效应与冻结过程中冰晶体积膨胀的破坏作用“此消彼长”。

中高含水率(25%)条件下,H₅和 H₂₅土样的黏聚力均随着冻融次数的增加而减小,H₅土样的黏聚力最终减小 74.42%;H₂₅土样的黏聚力,除 15 次冻融后黏聚力升高,其余均随着冻融次数的增加而减小,最终减小 28.67%。而高含水率(35%)土样中,1 次冻融后 H₅、H₂₅土样的黏聚力分别下降 75.61%和 50.77%,随后随着冻融次数的增加而逐渐上升,H₅土样的黏聚力最终增加 14.63%,H₂₅土样的黏聚力

最终增加 26.15%。

随着含水率的增加,土颗粒之间的水膜逐渐变厚,土体冻结时生长的冰晶破坏了颗粒间的连结,冻结时土体颗粒之间冰晶体积变大,土颗粒的连结更容易破坏,故冻融循环对土样结构的破坏越来越强烈^[18]。冻融作用对较高含水率土样结构的破坏非常强烈,因此,中高含水率(25%)土样的黏聚力整体上因冻融作用而降低,且冻融次数越多,黏聚力越低。多次冻融循环作用可以改变土体结构,部分大团聚体破碎为细小团聚体,部分土粒解冻后在重力作用下发生沉陷,造成强烈的冻融沉降,堵塞内部的孔隙空间^[25]。多次冻融循环后,冻融沉降也可能导致剪切滑动面逐渐变得密实。苏谦等^[15]研究结果也表明,高密度土样的土体强度和黏聚力均大于低密度土样的土体强度和黏聚力。15 次冻融循环后,冻融沉降导致高含水率(35%)土样剪切滑动面的密度增大,密度增大后黏聚力随之增大。中高含水率(25%)条件下 H₂₅土样的黏聚力在 15 次冻融循环后增大的机理应与之相似。



注:不同大写字母表示相同含水率不同冻融次数之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同冻融次数不同含水率之间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 冻融作用对棕壤黏聚力的影响

2.2 冻融作用对棕壤内摩擦角的影响

内摩擦角主要反映相对位移发生面上土壤颗粒之间的摩擦力和咬合力,内摩擦角越大,土样发生相对滑动越难。由表 2 可知,冻融次数和含水率对内摩擦角的影响均比较小,且小于二者的耦合关系,说明冻融循环作用对原状棕壤内摩擦角的影响较为复杂。由图 2 可知,低含水率(10%)条件下,H₅和 H₂土样

的内摩擦角最大值均出现在 0 次冻融条件下,几乎不受 1 次冻融循环作用的影响,多次冻融循环后,内摩擦角呈下降趋势。1 次冻融作用难以对低含水率土样产生破坏,低含水率下土壤的冻结过程主要是非原位冻结,即土颗粒之间有水分迁移,冰晶在土壤颗粒之间的分布不均,多次冻融循环后,受到水分重分布的影响,冻融作用对土壤颗粒的破坏效果得以体现。

中含水率(15%和20%)和中高含水率(25%)条件下, H_5 和 H_{25} 土样的内摩擦角均受1次冻融作用的影响较大,多次冻融循环后在一定范围内波动。1次冻融作用可能导致部分团聚体破碎,土壤内部的比表面积增大,所以中含水率(15%,20%)和中高含水率(25%)土样内摩擦角均在1次冻融作用后增加。同时,冻融对土壤内摩擦角作用的不确定性,如土样内部团聚体破碎后堵塞孔隙和土壤颗粒之间发生相对错动,既会导致内摩擦角增大,又可能导致内摩擦角减小。冻融作用也会导致一部分细小土粒由冰晶或土壤团聚体间的挤压而凝结成较大土粒,降低比表面积和颗粒间接触点数量,降低内摩擦角;也可能导致大土粒破碎成小土粒,增大比表面积和接触点数量,增大内摩擦角。设定水分由试样中心向四周的迁移为正向迁移,水分由试样四周向

中心的迁移为逆向迁移,经过多次冻融循环后,正向水分迁移量与逆向水分迁移量也达到动态平衡^[14]。总之,冻融循环改变了土体内部结构与土壤颗粒排列方式,中含水率和中高含水率的 H_5 和 H_{25} 土样内摩擦角在多次冻融循环过程中呈现波动。

高含水率(35%)条件下,冻融作用对 H_5 和 H_{25} 土样的内摩擦角影响较小,土样的内摩擦角分别在 $(18.57^\circ \pm 0.88^\circ)$ 和 $(12.86^\circ \pm 1.14^\circ)$ 之间变化。高含水率(35%)条件下,土壤含水率非常接近棕壤饱和含水率,土粒周围的分子膜引力较大,对土粒的牵引作用有所增强^[26]。但土样水分含量较高,水膜较厚,对土颗粒之间相对运动起到强烈的润滑作用。二者的共同作用导致在剪切过程中,土样的内摩擦角较小,且受冻融作用的影响也小。

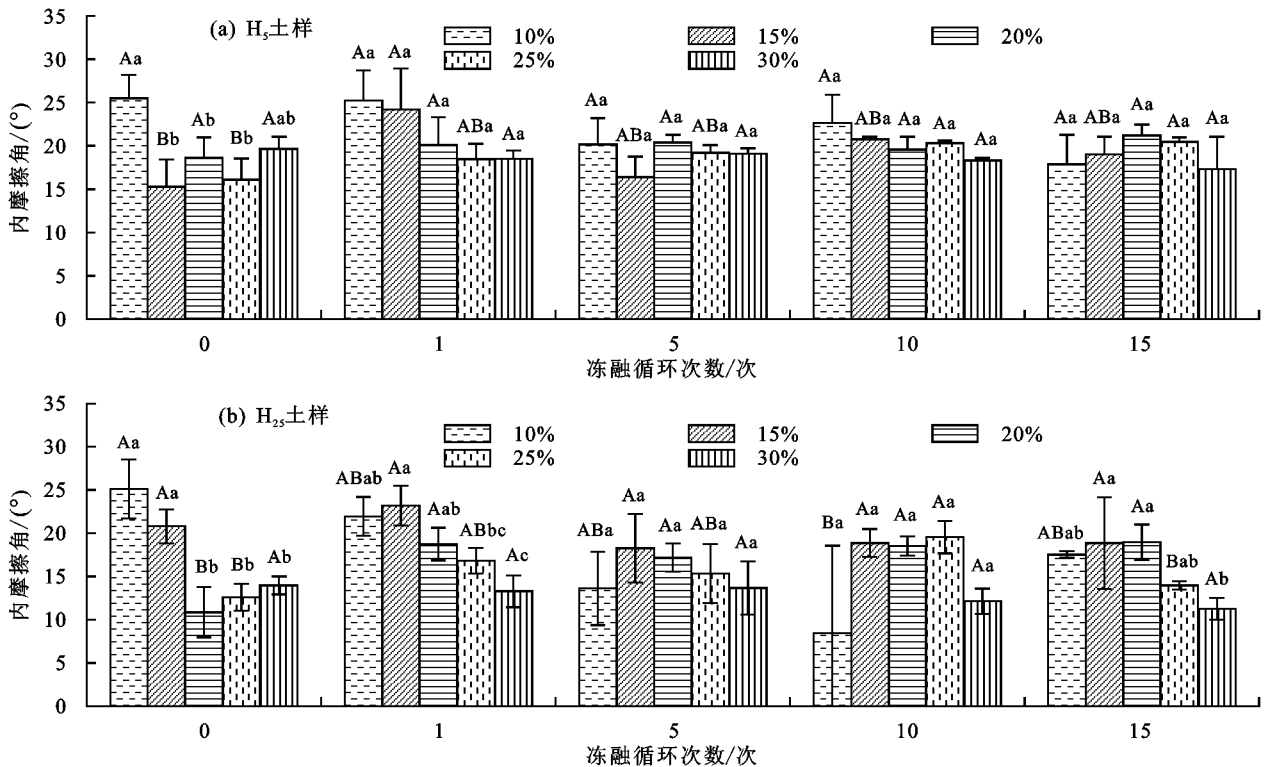


图2 冻融作用对棕壤内摩擦角的影响

2.3 冻融作用对棕壤平均抗剪强度的影响

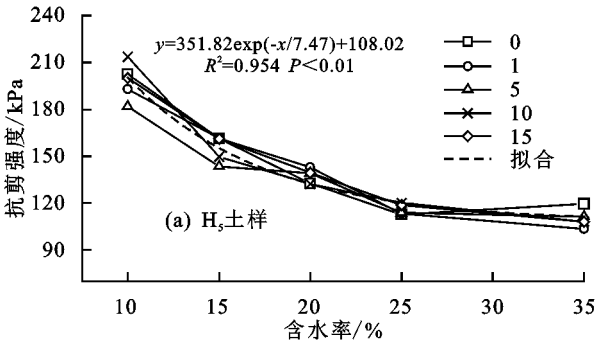
由表2可知,平均抗剪强度主要受含水率的影响,其中含水率的贡献度为58.4%和49.8%,冻融次数的贡献度为5.0%和3.0%,两者交互作用的贡献度为11.4%和17.5%。从图3可以看出, H_5 和 H_{25} 土样的平均抗剪强度基本随着含水率的增加呈指数函数减小,同一含水率条件下,冻融循环次数对平均抗剪强度的作用并无规律可循。对比 H_5 和 H_{25} 土样,当含水率低于25%时, H_{25} 土样的平均抗剪强度高于 H_5 土样;当含水率高于25%时, H_{25} 土样的平均抗剪强度低于 H_5 土样。

由图1和图2可知,0次冻融条件下, H_5 和 H_{25} 土样黏聚力均随着含水率的增大而先增大后减小,而

内摩擦角变化趋势却与之相反。1次冻融后,15%,20%和25%含水率的 H_5 和 H_{25} 土样黏聚力均下降,而内摩擦角均增大。说明在原状棕壤内部黏聚力和内摩擦角的变化相对于土壤颗粒连结情况具有“拮抗”关系。假设剪切滑动面上下的2个土壤颗粒连结效果极好,甚至接近1个土壤颗粒,那么剪切过程破坏的主要对象是土壤颗粒间的黏聚力;如果剪切滑动面上下的2个土壤颗粒连结效果极差,则剪切过程中土颗粒间会发生摩擦,剪切过程中土壤颗粒间的内摩擦角就是抗剪强度的主要影响因素。

对比 H_5 和 H_{25} 土样,土壤含水率可以通过影响黏粒活动而影响平均抗剪强度。土样内部粗颗粒周围的黏粒能产生聚集,直至形成粗颗粒的包衣,黏粒含量高导

致包衣偏厚且更为连续^[27], H₂₅ 土样的黏粒含量高于 H₅ 土样(表 1), 土样内部的胶结作用随之增大, 此时土样的抗剪强度主要受黏聚力的影响。当含水率高于 25% 时, 可能导致粗颗粒的包衣分散。黏粒含量高的土样



更容易出现黏粒向骨架颗粒间接触点的聚集, 致使相对稳定的骨架结构产生“润滑”效果^[27], 土样内颗粒间的咬合作用逐渐减小, 摩擦力随之下降, 此时土样的抗剪强度主要受内摩擦角的影响。

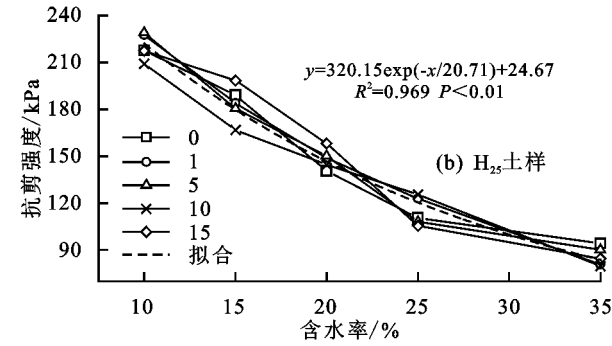


图 3 冻融作用对棕壤平均抗剪强度的影响

3 结论

(1)冻融循环对低含水率土样产生超固结效应, 10%含水率的 H₅ 和 H₂₅ 土样黏聚力在 15 次冻融后分别增加 74.36%和 60.08%。含水率越高初次冻融作用的破坏效果越强, 25%含水率的 H₅ 和 H₂₅ 土样黏聚力在 1 次冻融后分别下降 50%和 25.87%, 35%含水率土样分别下降 75.61%和 50.77%。冻融过程中, 35%含水率的 H₅ 和 H₂₅ 土样内部发生了强烈的融沉降, 试样的黏聚力在 15 次冻融后分别增加 14.63%和 26.15%。

(2)10%含水率的 H₅ 和 H₂₅ 土样内摩擦角受 1 次冻融作用影响较小。在 15%, 20%和 25%含水率下, 冻融作用对土壤内摩擦角的影响具有不确定性, H₅ 和 H₂₅ 土样内摩擦角在冻融循环中波动。在分子膜对土颗粒的牵引作用和厚水膜对土颗粒的润滑作用共同影响下, 35%含水率的 H₅ 和 H₂₅ 土样内摩擦角受冻融作用影响较小, 分别在 (18.57°±0.88°) 和 (12.86°±1.14°) 变化。

(3)在原状棕壤内部黏聚力和内摩擦角间具有“拮抗”关系。平均抗剪强度主要随含水率的增加呈指数函数减小趋势, 冻融循环次数对平均抗剪强度的作用并无规律可循。H₂₅ 土样黏粒较高, 更容易聚集并形成粗颗粒的包衣, 土样内部胶结作用随之增强; 当含水率高于 25%时, 粗颗粒周围的黏粒发生分散, 随后向土颗粒的接触点聚集, 弱化土颗粒间的咬合作用。

参考文献:

[1] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 9-12.

[2] 范昊明, 钱多, 周丽丽, 等. 冻融作用对黑土力学性质的影响研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 81-84.

[3] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 17-24.

[4] 付强, 侯仁杰, 李天霄, 等. 冻融土壤水热迁移与作用机

理研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 99-110.

[5] 郑鄯, 马巍, 邵慧. 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.

[6] 吴胡强, 张雅坤, 张金池, 等. 上舍流域两种林地土壤结构与抗蚀性[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 9-13.

[7] 肖俊波. 季节性冻融对土壤可蚀性影响的试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

[8] Liu H Y, Yang Y, Zhang K L, et al. Soil Erosion as affected by freeze-thaw regime and initial soil water content[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(3): 459-467.

[9] Tang L, Cong S Y, Geng L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 145: 197-207.

[10] Liu Y W, Wang Q, Liu S W, et al. Experimental investigation of the geotechnical properties and micro-structure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 32-42.

[11] 孙宝洋. 季节性冻融对黄土高原风水蚀交错区土壤可蚀性作用机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.

[12] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 125-130, 172.

[13] 李想, 王瑄, 盛世博, 等. 不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 102-106.

[14] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.

[15] 苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2990-2994.

报(自然科学版),2019,37(1):105-111.

[17] 刘新平,赵哈林,何玉惠,等.沙质农田表层土壤水分扩散率测定及氯化钴试纸的应用研究[J].水土保持学报,2007,21(6):147-150.

[18] 王睿垠,魏永霞,刘慧,等.生物炭对东北草甸黑土水分运动参数的影响[J].农业机械学报,2018,49(7):186-194.

[19] 李志萍,王欢,曾磊,等.甘肃黑方台黄土水分运动参数试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(4):15-19.

[20] 刘彬彬.基于微遗传算法的土壤水力特征参数反演及水分运动模拟[D].杭州:浙江大学,2018.

[21] 赵晓晓,黄炎和,林金石,等.崩壁不同土层水分运动特征的染色示踪[J].福建农林大学学报(自然科学版),2017,46(2):199-205.

[22] 詹振芝,黄炎和,蒋芳市,等.砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):85-90,95.

[23] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009.

[24] 廖凯华,徐绍辉,吴吉春,等.不同土壤转换函数预测砂土非饱和导水率的对比分析[J].水科学进展,2013,24(7):560-567.

[25] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J].水土保持学报,2013,27(3):49-54.

[26] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-56.

[27] 雷志栋,杨诗秀,谢传森.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.

[28] 李卓,冯浩,吴普特,等.砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].水土保持学报,2009,23(3):204-208.

[29] 罗丽澎,王辉,朱晋斌,等.温度对南方红壤和水稻土水分特征曲线影响差异性分析[J].水土保持学报,2019,33(5):72-78.

[30] 叶为民,钱丽鑫,白云,等.由土—水特征曲线预测上海非饱和软土渗透系数[J].岩土工程学报,2005,27(11):1262-1265.

[31] 刘新平,张铜会,何玉惠,等.不同粒径沙土水分扩散率[J].干旱区地理,2008,31(2):249-253.

[32] 马美红,张书函,王会肖,等.非饱和土壤水分运动参数的确定:以昆明红壤土为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):38-42.

[33] 谢森传,慧士博,李华珍.非饱和土壤水分运动参数的测定[J].水文地质工程地质,1982,5(1):8-15.

(上接第 60 页)

[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.

[17] 丑亚玲,张庆海,郝书胜.基于冻融—干湿作用的非饱和重塑黄土强度试验[J].兰州理工大学学报,2019,45(3):118-125.

[18] 董晓宏,张爱军,连江波,等.长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J].工程地质学报,2010,18(6):887-893.

[19] 齐吉琳,马巍.冻融作用对超固结土强度的影响[J].岩土工程学报,2006,28(12):2082-2086.

[20] 陈欣,张旭东,宇万太,等.坚持土肥高效管理促进区域农田生态系统可持续发展[J].中国科学院院刊,2018,33(9):992-999.

[21] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35,42.

[22] 袁聚云.土工试验与原理[M].上海:同济大学出版社,2003:101-103.

[23] 张祖莲,洪斌,黄英,等.降雨作用下云南省红土抗剪强度与坡面侵蚀模数的关系[J].水土保持通报,2017,37(1):1-8.

[24] Liu Q J, An J, Zhang G H, et al. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems[J]. Soil and Tillage Research,2016,160:92-100.

[25] 范昊明,李贵圆,周丽丽,等.冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J].沈阳农业大学学报,2011,42(1):114-117.

[26] 赵晓光,石辉.水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J].干旱区地理,2003,26(1):12-16.

[27] 王力,李喜安,洪勃,等.黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验[J].煤田地质与勘探,2019,47(3):179-185.