

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.010; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.010.

冯筱, 顿耀权, 屈建军, 等. 冻融作用下黄河源玛曲段砂壤土力学性能变化[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 145-154, 164.

Feng Xiao, Dun Yaoquan, Qu Jianjun, et al. Changes in mechanical properties of sandy loam soil in Maqu section of Yellow River source under freeze-thaw action[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 145-154, 164.

冻融作用下黄河源玛曲段砂壤土力学性能变化

冯筱^{1,2}, 顿耀权³, 屈建军⁴, 丁新辉^{1,2}, 李萌^{1,2}, 杨莹博^{1,2}

(1. 咸阳师范学院 地理与环境学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 咸阳市渭北旱塬环境演变与生态修复重点实验室, 陕西 咸阳 712000; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710000)

摘要: [目的] 探究冻融作用对砂壤土力学性能的影响, 阐明其在干、湿两种状态下的变化规律, 为揭示砂壤土冻融风蚀和水蚀机理提供理论依据。[方法] 以黄河上游玛曲段典型草地砂壤土为研究对象, 通过野外采样、室内冻融模拟试验等, 系统分析了不同冻融循环次数(0~15)以及初始含水量(8%~20%)对重塑土体经历冻融后在干、湿状态下力学性能的影响。[结果] 冻融作用小幅提升了湿润土体抗剪强度和黏聚力, 黏聚力在冻融次数为9时增幅最大, 但降低了干土体硬度、抗剪强度和黏聚力, 硬度和黏聚力在冻融次数为9时降幅最大; 初始含水量越高, 干土体硬度、抗剪强度和黏聚力增加越显著, 但受冻融作用的削减程度也越大, 湿润土体力学性能变化不明显; 干、湿土体内摩擦角对冻融循环次数和初始含水量的变化均不敏感, 最大变化幅度在2°以内。[结论] 冻融作用削弱了干土体的力学性能, 小幅提高了湿润土体的力学性能, 初始含水量对干土体力学性能影响较大。

关键词: 砂壤土; 冻融作用; 力学性能; 黄河源; 初始含水量

中图分类号: P642.14; S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0145-10

Changes in mechanical properties of sandy loam soil in Maqu section of Yellow River source under freeze-thaw action

Feng Xiao^{1,2}, Dun Yaoquan³, Qu Jianjun⁴, Ding Xinhui^{1,2}, Li Meng^{1,2}, Yang Yingbo^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China; 2. Key Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Restoration of Weibei Arid Plateau, Xianyang, Shaanxi 712000, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the impact of freeze-thaw action on the mechanical properties of sandy loam soil, clarify its variation patterns under dry and wet conditions, and provide a theoretical basis for revealing the mechanisms of freeze-thaw wind and water erosion of sandy loam soil. [Methods] Typical grassland sandy loam soil from the Maqu section in the upper reaches of the Yellow River was taken as the research object. Through field sampling and laboratory freeze-thaw simulation experiments, the impact of different numbers of freeze-thaw cycles (0~15) and initial water contents (8%~20%) on the mechanical properties of remolded soil under dry and wet conditions after freeze-thaw action was systematically investigated. [Results] Freeze-thaw action slightly increased the shear strength and cohesion of wet soil, with the maximum increase in cohesion observed at 9 freeze-thaw cycles. However, it reduced the hardness, shear strength, and cohesion of dry soil, with the greatest decrease in hardness and cohesion also occurring at 9 freeze-thaw cycles. The higher the initial water content, the more significantly the hardness, shear strength, and cohesion of dry soil increased, but the greater the reduction caused by freeze-thaw action. The mechanical properties of wet soil showed no obvious change. The internal friction angles of both dry and wet soil were not sensitive to changes in the numbers of freeze-thaw cycles

收稿日期: 2025-03-23

修回日期: 2025-04-06

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(42201080); 陕西省青年科技新星项目(2025ZC-KJXX-57); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-176)

第一作者: 冯筱(1990—), 女, 陕西渭南人, 博士, 讲师, 主要从事沙漠化与沙漠化防治研究。E-mail: feng_xiaohappy@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

and initial water contents, with a maximum variation within 2° . [Conclusion] Freeze-thaw action weakens the mechanical properties of dry soil while slightly enhancing those of wet soil. The initial water content has a significant impact on the mechanical properties of dry soil.

Keywords: sandy loam soil; freeze-thaw action; mechanical properties; Yellow River source; initial water content

土壤力学性能如土壤硬度、剪切强度、黏聚力以及内摩擦角等,是衡量和评估土壤侵蚀的重要指标^[1-3]。土体抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限强度,通常用土壤的黏聚力和内摩擦角来表征。土壤硬度是指土壤抵抗外力压实和破碎的能力。冻融循环作用使冰水不断发生相态变化,引起土壤颗粒重新排列、土壤水分重新分布、孔隙大小和数量变化,导致土壤结构和力学性能等发生变化,进而对土壤侵蚀产生不同程度的影响^[4-6]。冻融作用下的风力或水力侵蚀所造成的土壤侵蚀问题远大于单一侵蚀的危害^[6],从而加剧沙漠化过程,对高寒区脆弱的生态环境造成严重威胁。因此研究冻融作用对土壤力学性能的影响,对揭示冻融侵蚀机理以及深入了解高寒区沙漠化过程具有重要的科学意义。

目前,众多学者对冻融土力学性质的研究集中在细粒土如黏土、粉土、壤土等土壤质地上^[7-10],仅有部分学者的研究涉及沙质土^[2,11],主要探讨冻融作用对土壤侵蚀的影响程度。部分学者对粒径大于 0.075 mm 的粗颗粒以及改良粗粒土的力学性能进行了研究,主要是探讨冻融作用对粗粒土应用于道路工程、岩土工程等技术领域的安全性能影响^[12-13]。冻融作用对土体力学性能的影响表现为增加、减小或者不明显的结论均有报道。多数研究认为冻融作用使得细粒土土体抗剪强度和黏聚力衰减,最后趋于稳定^[7-9,14]。例如全晓娟等^[8]研究认为冻融循环作用减小了青藏黏土的抗剪强度和黏聚力,内摩擦角先减小后增大。范昊明等^[9]研究表明东北棕壤、白浆土以及黑土的黏聚力随冻融循环次数的增加而减小,最后趋于稳定,内摩擦角变化幅度较小。然而,也有部分研究结果表明冻融作用提高了土体的力学性能。如许强等^[15]指出非饱和黏土在融化状态下的抗剪强度随冻融循环次数的增加而增加。朱龙祥^[16]研究结果认为冻融循环作用增加了辽河平原棕壤的黏聚力,尤其是在低含水量(10%)条件下,冻融固结效应比较明显,冻融作用对内摩擦角的影响比较小。土体含水量是影响冻融土体力学性能的重要因素^[4,14]。有研究指出初始含水量越大,反复的冰水相变引起的土体结构越疏松,冻融循环后土体的各项性能衰减越大,冻融劣化作用越明显^[8,14]。然而也有研究指出一些土体的抗剪强度或黏聚力随含水量的增加呈增加趋势^[3,9],可能与土壤本身性质有关。

关于冻融作用对土壤力学性能的影响研究尚无统一结论,可能与冻融循环作用下土壤质地、初始含水量及其他理化性质以及试验条件的差异等有关,且相关研究多集中于土壤质地较细的壤土、黏土和粉土等,而对土壤质地既不同于细粒土,又不同于粗粒土的砂壤土涉及较少。研究冻融后不同含水量土体的力学性能变化,通常用来衡量冻融—水蚀作用所引起的土壤侵蚀问题。然而土壤含水量越高,土壤颗粒起动风速越大,土壤的抗风蚀性也就越强。如当粒径为 0.1~0.25 mm 的沙子含水量由干燥状态增加到 4.73% 时,起动风速由 5.0 m/s 增加到 14.32 m/s^[17]。可以看出,土壤处于干燥状态时更易发生风蚀现象。因此,为了衡量冻融—风蚀复合作用所引发的土壤侵蚀问题,有必要对具备一定含水量且经历冻融后的土体进行自然风干,研究风干土体力学性能的变化。因此开展冻融作用下不同初始含水量的砂壤土在干、湿两种状态下力学性能变化的研究,对揭示冻融作用对砂壤土风蚀和水蚀的影响机理具有非常重要的意义。

黄河上游玛曲段地处青藏高原东缘,冻融作用十分频繁^[18]。在过去几十年里,由于气候变化和人类活动的不合理,玛曲县的草地遭受了严重的沙漠化^[19-20]。黄河阶地上发育的草甸层因过度放牧、过度开挖和高原鼠兔破坏而逐渐遭到破坏,导致斑块状或片状裸地的形成,草甸层的下层沉积物暴露出来^[21-22],土壤质地多以砂壤土或壤沙土为主^[23]。本文以黄河上游玛曲段典型草地砂壤土为研究对象,开展冻融作用对具有不同初始含水量的砂壤土在干、湿状态下力学性能的影响,研究结果对揭示砂壤土的冻融侵蚀机理具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原东缘的黄河源玛曲县境内(33°06'30"—34°30'15"N,100°45'45"—102°29'00"E),海拔为 3 315~4 779 m,平均海拔 3 700 m。玛曲县气候寒冷,年平均气温仅为 1.8℃,寒冷期长达 300 d/a。距地表 5 cm 深处,冻结期持续时间为 120 d/a,距地表 50 cm 深处,冻结期持续时间为 89 d/a^[18]。季节性冻土广泛分布,且频繁经历冻融循环。在冻融期间,最高气温可达 12℃,而最低气温可达 -25℃。玛曲

县大风天数较多,每年有77 d风力达到8级及以上(风速 ≥ 17 m/s),最多可达140 d。玛曲县年平均风速约为2.3 m/s,年降水量为604.1 mm,年潜在蒸发量为1 274.1 mm。植被类型以高寒草甸为主,主要土壤类型包括高寒草甸土、亚高寒草甸土、草甸土、泥炭土、沼泽土、棕壤和荒漠土,其中沙土和砂壤土广泛分布,pH值为7.0~7.5。

1.2 土壤样品采集

试验用土采集时间为2023年7月,土壤样品采样点选在沙丘边缘草地上有裸露斑块的区域,采集深度为距地表0—5 cm处。这些裸露斑块的形成很可能与放牧活动、冻融、风蚀及水蚀等有关,因为紧邻沙丘,所以裸露斑块处基本以沙质土为主。土壤机械组成采用马尔文激光粒度仪测定,土壤有机碳采用重铬酸钾—浓硫酸消煮法测定,土壤容重采用原状土烘干法测定。经测定,试验用土沙粒(50~2 000 μm)含量为65.77%,粉粒(2~50 μm)含量为34.02%,黏粒(< 2 μm)含量为0.21%,土壤有机碳含量为15.7 g/kg,土壤容重为1.3 g/cm³(表1)。根据美国制土壤质地分类标准,本试验土壤质地为砂壤土。

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties

沙粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
65.77	34.02	0.21	15.7	1.3

1.3 试样制备

将采集的土壤自然风干,过2 mm筛子后备用。根据《土工试验方法标准》(GB/T50132-1999),以环刀为模具,制成土壤初始容重为1.3 g/cm³,初始含水量为8%,12%,16%和20%,直径为61.8 mm,高度为20 mm的圆柱体试样。具体制备方法如下:根据土壤容重和环刀体积,计算所需干土重;根据设计的土壤初始含水量、所需干土重以及风干土自身含水量,计算制备试样所需加水量;准确称取所需水量,用小喷壶均匀喷洒在风干土上,搅拌均匀后,放置在塑料袋内密封12 h,使新加水充分均匀地渗透在土壤中,制成具备设计含水量的湿润土壤。根据环刀体积、土壤容重以及设计的初始含水量,称取制备好的湿润土,以环刀为模具,制备圆柱试样。

1.4 冻融试验

冻融试验在温度可调控温箱中进行。冻结温度为-18℃,融化温度为10℃。每次冻融时间持续24 h,其中冻结时间为12 h,融化时间为12 h。冻融循环时间持续15 d,即冻融循环次数最大为15次。在冻融循环次数为0,1,3,6,9,12,15时,对土体试样进行力学指

标测定。为防止在冻融过程中湿润土体水分蒸发,土体试样置于铝盒中,并用塑料袋将铝盒密封包裹。

1.5 试样硬度测定和剪切试验

本文主要对具有不同初始含水量的土体在经历冻融循环之后,保持湿润状态(湿润土体)以及自然风干之后(干土体)两种情况下的力学性能进行测定。具体试验过程如下:冻融循环结束之后,将一部分具备不同含水量的土体自然风干,用于干土体的硬度测定和剪切试验,另一部分土体在冻融结束后,仍保持不同含水量的湿润状态时立即进行剪切试验。湿润土体硬度很小,土壤硬度计几乎检测不到数据,因此,土壤硬度测定只采用自然风干土体,每个测定重复6次,共计168个土体试样。自然风干土体和湿润土体用于剪切试验(后文简称干测和湿测),获取干测和湿测条件下的土体抗剪强度。每组剪切试验需要4个土体试样,每个试验重复三次,共计672个土体试样。

土壤硬度采用数字手持式土壤硬度计进行测定(型号DIK5558)。

采用四联动ZJ型电动直剪仪对冻融循环后的圆柱体试样进行剪切试验,采用快剪方法,剪切速度设定为0.5 mm/min,法向应力采用100,200,300,400 kPa四级。每组试验重复三次。试样所受剪应力按如下公式计算:

$$\tau = 10CR/A_0 \quad (1)$$

式中: τ 为剪应力(kPa); R 为量力环测表读数(0.01 mm); C 为量力环校正系数(N/0.01 mm); A_0 为试样受力面积(cm²)。

在剪切过程中,量力环读数达到稳定或者出现明显峰值下降之后,继续剪切至4 mm停止剪切,取稳定值或者峰值计算土体的抗剪强度;若无明显峰值,且量力环读数继续增加,则剪切至6 mm停止,取4 mm处读数计算土体的抗剪强度^[3]。

本试验土体抗剪强度与法向应力呈线性关系,线性拟合度多数可达97%以上,其抗剪强度满足摩尔—库伦强度准则,由此可计算土壤的黏聚力和内摩擦角,计算公式如下:

$$T = c + \sigma \tan \Phi \quad (2)$$

式中: T 为土壤的抗剪强度(kPa); σ 为法向(正)应力(kPa); c 为土壤的黏聚力(kPa); Φ 为土壤的内摩擦角(°)。

2 结果与分析

2.1 冻融循环次数和初始含水量对土体硬度的影响

由图1可知,土体硬度随冻融循环次数的变化趋势与初始含水量有关。初始含水量为16%和20%时,也即在高含水量时,土体硬度随冻融次数的增加

呈显著减小的变化趋势,与未冻融土(FT-0)相比,土体经历 1~15 次冻融循环后的减小幅度分别为 20%~70% 和 5%~70%,其中,在冻融循环次数为 9 时减小幅度最大,经历 15 次冻融循环后,土体硬度减小幅度分别为 40.5% 和 61.8%。初始含水量为 12% 时(中含水量),土体硬度随冻融循环次数的增加总体呈增加—减小—增加的波动变化趋势,最大值出现在冻融次数为 3 时,与未冻融土相比增加了 23.8%,最小值出现在冻融次数为 9 时,减小幅度为 78.1%。初始含水量为 8% 也即在较低含水量时,土体较松软,土体硬度较小,表现为先增加后减小的变化趋势,最大值仅为 4.64 kPa,出现在冻融循环次数为 3 时,与未冻融土相比,增加了 1.31 倍,经历 15 次冻融循环后,土体硬度减少了 34.5%。

在各个冻融循环次数下,土体硬度随初始含水量的增加,均表现为增加的变化趋势。与初始含水量为 8% 时相比,土体硬度在初始含水量为 12% 时增加倍数为 4.7~13.2,平均值为 10.2 倍;在含水量为 16% 时增加倍数为 6.5~25.5,平均值为 18.1 倍;在含水量为 20% 时,增加倍数为 11.3~50.5,平均值为 26.7 倍。可以看出,随着初始含水量的增加,土体硬度增加幅度非常明显。

2.2 冻融循环次数和初始含水量对土体抗剪强度的影响

2.2.1 冻融循环次数对土体抗剪强度的影响 本文

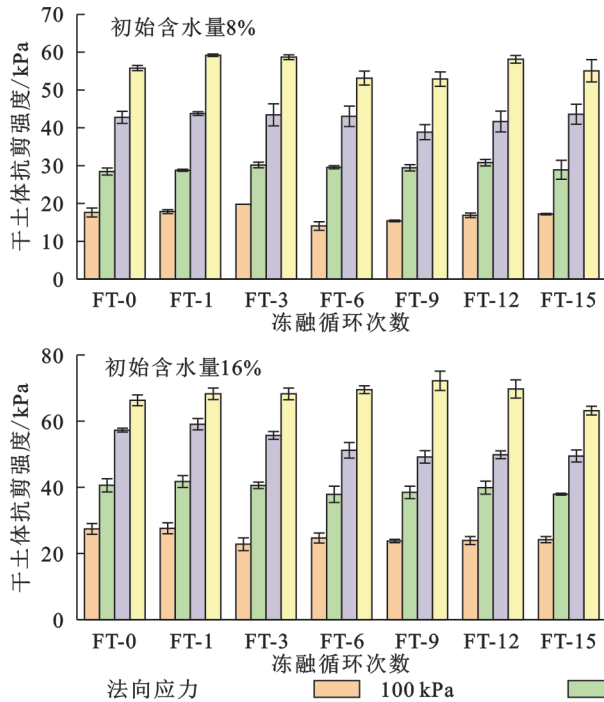
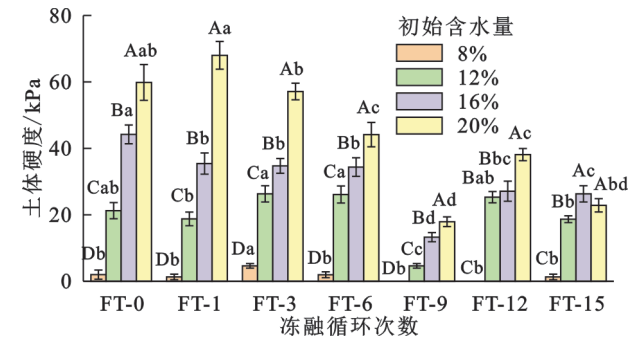


图 2 干土体抗剪强度随冻融循环次数的变化

Fig. 2 Variation of shear strength of dry soil with number of freeze-thaw cycles

湿润土体抗剪强度随冻融循环次数的变化趋势如图 3 所示。湿润土体的抗剪强度在不同初始含水

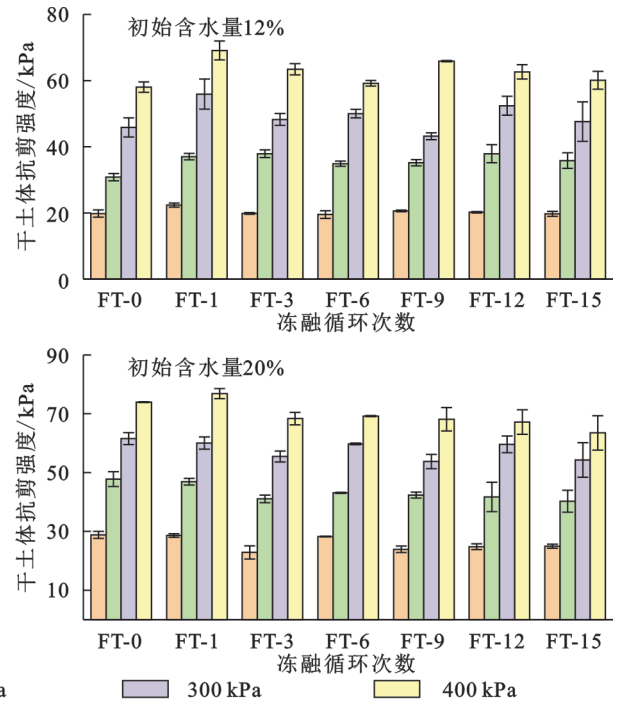
分别分析经历冻融循环之后湿润土体的抗剪强度,以及经历冻融循环之后的湿润土体在室温条件下自然晾干以后(干土体)的抗剪强度。干土体抗剪强度随冻融循环次数的变化趋势如图 2 所示,初始含水量为 8% 和 12% 时,干土体抗剪强度随冻融循环次数的增加波动变化,且无明显规律。初始含水量为 16% 和 20% 时,干土体抗剪强度随冻融循环次数的增加表现为波动减小的变化趋势,但变化幅度不大。与未冻融土(FT-0)相比,初始含水量为 16% 时,冻融循环次数为 3~15 时土体抗剪强度减小幅度为 1.7%~16.8%,平均减小幅度为 9.3%;初始含水量为 20% 时,冻融循环次数为 1~15 时土体抗剪强度减小幅度为 1.8%~20.6%,平均减小幅度为 9.6%。



注:图中不同大写字母表示土体硬度在不同初始含水量间差异显著,不同小写字母表示土体硬度在不同冻融循环次数间差异显著。

图 1 土体硬度随冻融循环次数和初始含水量的变化

Fig. 1 Variation of soil hardness with number of freeze-thaw cycles and initial water content



量条件下,随着冻融循环次数的增加,表现为小幅度波动增加的变化趋势。

土体初始含水量为 8%, 12%, 16% 以及 20% 时, 与未冻融土(FT-0)相比, 土体抗剪强度在冻融循环次数为 1~15 次时的增加幅度分别为 1.9%~

12.7%, 1.5%~19.9%, 1.2%~17% 以及 1.6%~16.7%, 平均增加幅度分别为 6.3%, 6.4%, 7.0% 以及 7.4%, 增加幅度平均值为 6.8%。

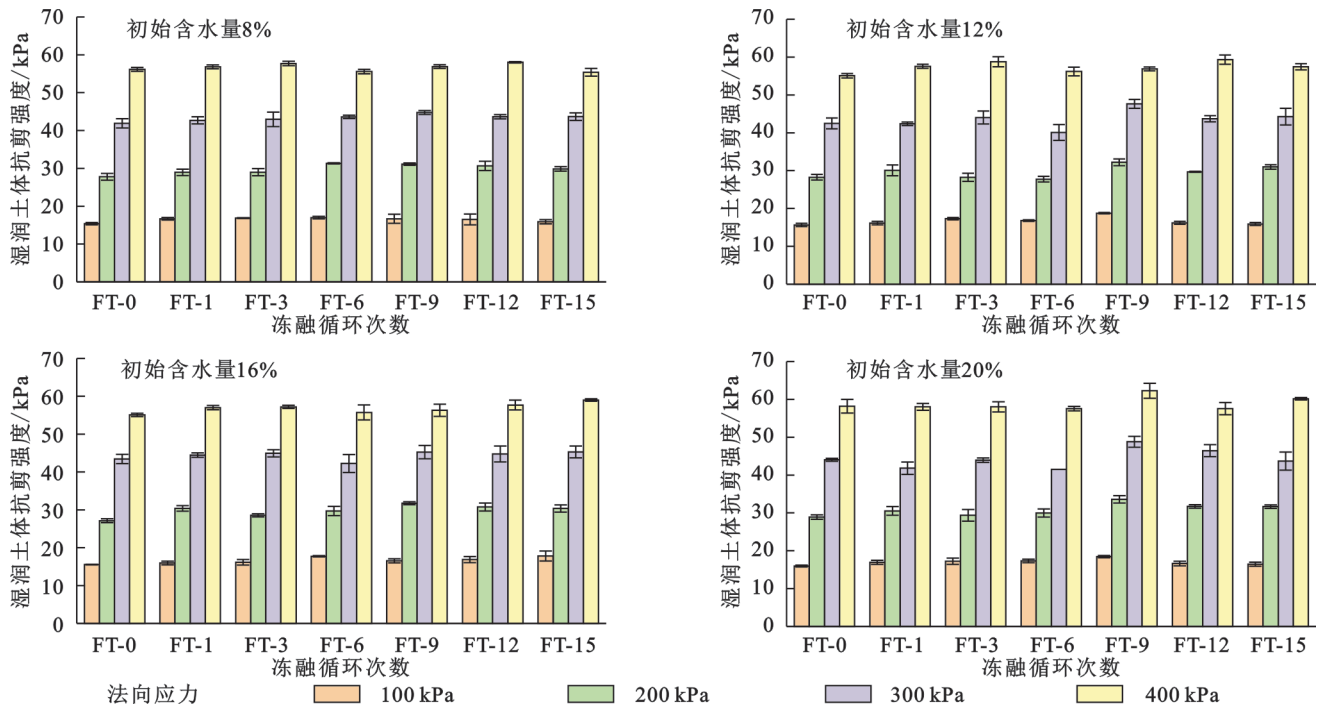


图 3 湿润土体抗剪强度随冻融循环次数的变化

Fig. 3 Variation of shear strength of wet soil with number of freeze-thaw cycles

2.2.2 初始含水量对土体抗剪强度的影响 干土体抗剪强度随初始含水量的变化如图 4 所示。在不同冻融循环次数下, 干土体抗剪强度随含水量的增加大体呈线性增加的变化趋势。将线性函数的斜率作为抗剪强度的增加速率, 根据拟合结果可知, 初始含水量每增加 1%, 干土体抗剪强度在不同处理条件下的增长速率为 0.3~1.7 kPa, 平均值为 1.08 kPa。

另外, 根据表 2 可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 干土体随初始含水量增加而增加的速率呈减小趋势, 也就是说冻融循环作用削弱了高含水量条件下土体的抗剪强度。例如, 未冻融土体抗剪强度随含水量增加速率为 1.50 kPa/(10 g/kg), 冻融循环次数为 15 时, 土体抗剪强度增加速率为 0.79 kPa/(10 g/kg), 与未冻融土相比, 增加速率减小了 47.3%。

湿润土体抗剪强度随初始含水量的变化如图 5 所示。随着初始含水量的增加, 大多数情况下, 湿润土体的抗剪强度变化不明显。大多数情况下, 抗剪强度与初始含水量的拟合直线几乎与横轴平衡, 也即抗剪强度随初始含水量的增加几乎不发生变化。个别条件下, 抗剪强度随初始含水量的增加呈小幅度增加的变化趋势, 例如在冻融循环次数为 6, 9, 12, 15 时, 可以观察到这一增加趋势。

2.3 冻融循环次数和初始含水量对土体黏聚力和摩擦角的影响

2.3.1 土体黏聚力的变化特征 土体黏聚力随冻融循环次数以及初始含水量的变化如表 3 所示。干土体黏聚力随冻融循环次数的变化特征与初始含水量有关。在初始含水量为 8% 时, 干土体黏聚力较小, 平均值仅为 3.61 kPa, 随冻融循环次数的增加, 表现为先增加后减小而后保持稳定的变化趋势, 最大值出现在冻融循环次数为 3 时, 仅为 5.55 kPa, 冻融循环次数为 6~15 时的黏聚力与未冻融土相比, 差异不显著 ($p > 0.05$)。初始含水量为 12% 时, 在统计学上, 黏聚力在不同冻融循环次数间差异不显著 ($p > 0.05$), 但是从数值上看, 最小值出现在冻融次数为 9 时, 与未冻融土相比, 减小幅度为 15.6%。当初始含水量为 16% 和 20% 时, 黏聚力随冻融循环次数的增加, 呈先减小后增加, 总体呈波动减小的变化趋势, 最小值出现在冻融循环次数为 9 时, 与未冻融土(FT-0)相比, 分别减小了 52.4% 和 29.9%, 经历 15 次冻融循环后, 黏聚力减小幅度分别为 20.6% 和 15.3%。不同初始含水量条件下黏聚力的平均值也表现出先减小后增加, 总体表现为波动减小的变化趋势, 最小值亦出现在冻融循环次数为 9 时, 与未冻融土(FT-0)相比, 减小了 33.7%, 经历 15 次冻融循环后减小幅度为 9.5%。

不同冻融循环次数下,干土体黏聚力随着初始含水量的增加呈显著增加的变化趋势。与初始含水量为 8% 时相比,含水量为 12%, 16% 和 20% 时的干土体

黏聚力分别增加了 0.89, 1.94, 2.57 倍。干土体黏聚力与土壤硬度随冻融循环次数以及初始含水量的增加而变化的趋势几乎一致。

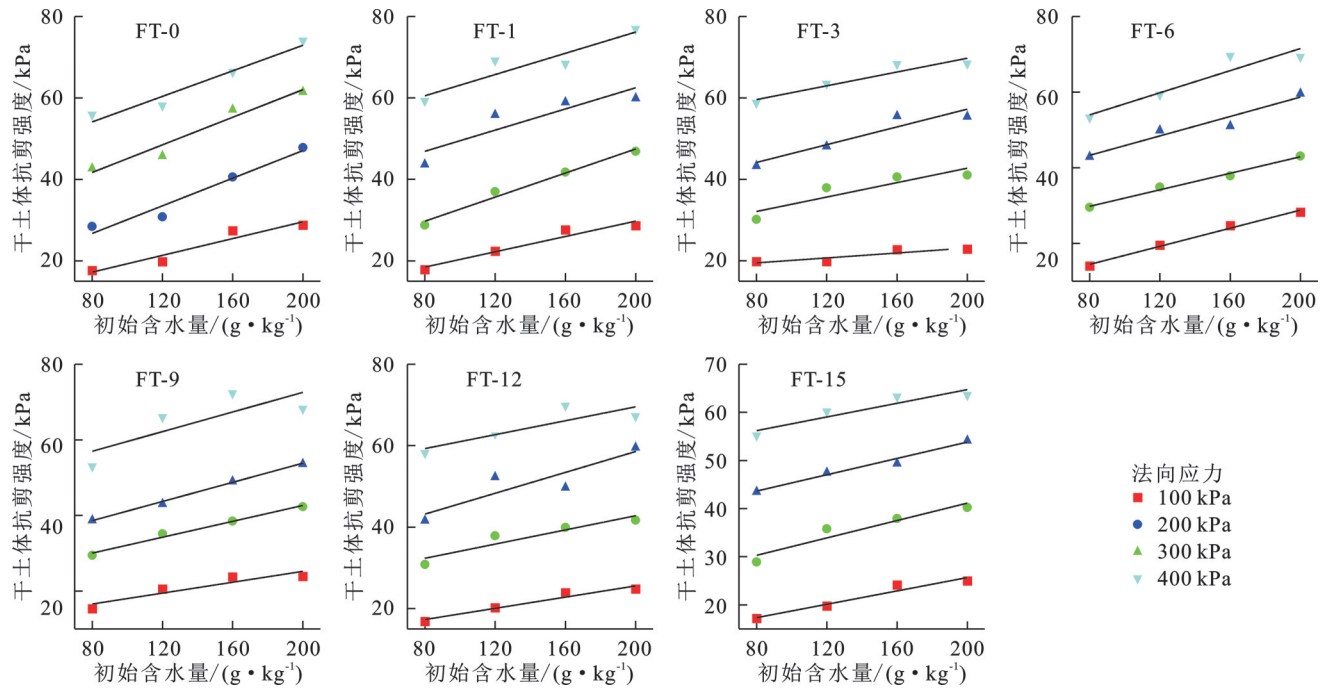


图 4 干土体抗剪强度随初始含水量的变化

Fig. 4 Variation of shear strength of dry soil with initial water content

表 2 不同处理条件下干土体抗剪强度随初始含水量的增加速率

Table 2 Rate of increase in shear strength of dry soil with initial water content under different treatment conditions

冻融循环次数	干土体抗剪强度随初始含水量的增加速率/(kPa/10 g/kg)				平均值
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa	
FT-0	1.03	1.70	1.70	1.57	1.50
FT-1	0.94	1.48	1.30	1.30	1.26
FT-3	0.30	0.89	1.09	0.85	0.78
FT-6	1.20	1.09	1.28	1.46	1.26
FT-9	0.72	1.05	1.27	1.30	1.08
FT-12	0.69	0.87	1.28	0.86	0.92
FT-15	0.69	0.90	0.85	0.71	0.79
平均值	0.80	1.14	1.25	1.15	1.08

湿润土体呈松软状态,在不同冻融循环次数以及不同初始含水量条件下,土体黏聚力均比较小,变化范围为 1.20~6.42 kPa。湿润土体黏聚力在不同含水量间差异不显著,并且当初始含水量为 8%, 16% 和 20% 时,土体黏聚力在不同冻融循环次数间差异亦不显著。但是从黏聚力数值大小来看,黏聚力随着冻融循环次数的增加先增加后减小,总体表现为增加的变化趋势,最大值出现在冻融循环次数为 6 或

9 时。当初始含水量为 12% 时,土体黏聚力随冻融循环次数的增加先增加后减小,变化较为显著,最大值出现在冻融次数为 9 时。不同含水量下黏聚力平均值呈先增加后减小的变化趋势,最大值出现在冻融次数为 9 时。

综上分析发现,干土体与湿润土体黏聚力随冻融循环次数的增加表现出相反的变化趋势。

2.3.2 土体内摩擦角的变化特征 土体内摩擦角随冻融循环次数以及初始含水量的变化如表 4 所示。对于土体来说,土体内摩擦角在不同处理条件下的变化范围为 6.96°~9.04°,变化范围较小,变化幅度仅为 2°。当初始含水量为 8%, 16% 和 20% 时,干土体内摩擦角随着冻融循环次数的增加波动变化,总体上呈先增加后减小的变化趋势,在经历首次冻融循环之后,内摩擦角达到最大值,之后呈波动减小的趋势。湿润土体内摩擦角的变化范围为 7.22°~8.35°,变化幅度仅为 1°。湿润土体内摩擦角随冻融循环次数的增加波动变化,且波动幅度较小,平均变化幅度仅为 0.51°。随着初始含水量的增加,干土体和湿润土体内摩擦角均呈小幅度波动增加的趋势。初始含水量从 8% 增加到 20% 时,干土体内摩擦角从 7.44° 增加到 8.26°,增加幅度为 11.0%;湿润土体内摩擦角从 7.64° 增加到 7.92°,增加幅度为 3.7%。

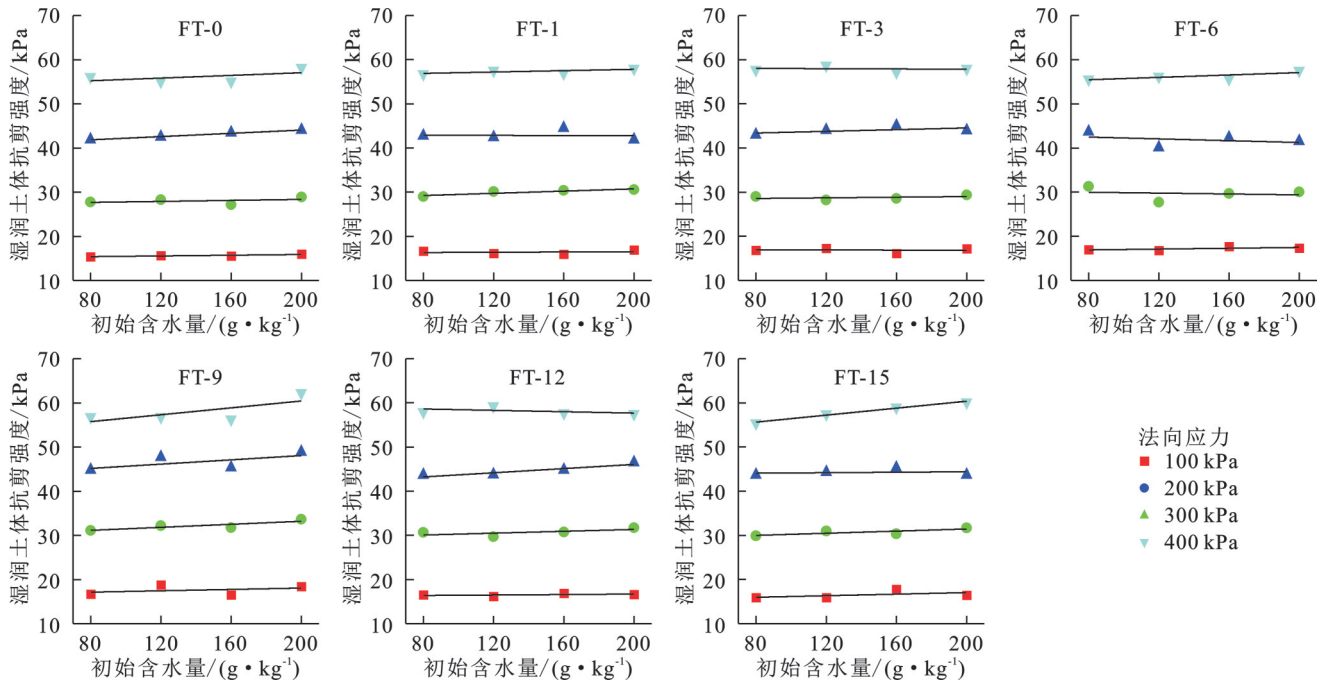


图 5 湿润土体抗剪强度随初始含水量的变化

Fig. 5 Variation of shear strength of wet soil with initial water content

表 3 不同处理条件下土体黏聚力的变化

Table 3 Variation of soil cohesion under different treatment conditions

测定条件	冻融循环次数	不同初始含水量条件下土体黏聚力/kPa				平均值
		8%	12%	16%	20%	
干测	FT-0	3.92±1.44 ^{Bab}	6.2±1.57 ^{Ba}	14.54±0.92 ^{Aa}	15.72±1.12 ^{Aa}	10.10
	FT-1	2.63±0.62 ^{Cb}	6.31±0.62 ^{Ba}	14.34±0.72 ^{Aa}	13.64±0.75 ^{Aab}	9.23
	FT-3	5.55±0.69 ^{Ba}	7.07±1.53 ^{ABa}	8.96±1.08 ^{ABb}	9.22±0.7 ^{Ab}	7.70
	FT-6	2.24±0.6 ^{Cb}	7.37±1.17 ^{Ba}	8.87±1.61 ^{Bb}	15.23±0.33 ^{Aa}	8.43
	FT-9	3.64±0.31 ^{Bab}	5.23±0.47 ^{Ba}	6.92±1.85 ^{Bb}	11.02±1.01 ^{Ab}	6.70
	FT-12	3.18±0.31 ^{Cb}	7.83±0.55 ^{Ba}	9.01±0.45 ^{Bb}	12.07±1.15 ^{Ab}	8.02
	FT-15	4.09±0.41 ^{Cab}	7.61±0.64 ^{Ba}	11.54±0.5 ^{Aab}	13.31±1.92 ^{Aab}	9.14
	平均值	3.61	6.80	10.60	12.89	
湿测	FT-0	1.2±0.5 ^{Aa}	2.24±1.04 ^{Ab}	1.56±0.16 ^{Aa}	1.33±0.59 ^{Aa}	1.58
	FT-1	2.73±0.97 ^{Aa}	2.39±0.87 ^{Ab}	2.62±0.64 ^{Aa}	3.19±1 ^{Aa}	2.73
	FT-3	2.5±0.37 ^{Aa}	2.04±0.48 ^{Ab}	1.8±0.93 ^{Aa}	2.9±1.38 ^{Aa}	2.31
	FT-6	4.86±0.58 ^{Aa}	2.57±0.41 ^{Ab}	4.69±1.53 ^{Aa}	3.54±0.93 ^{Aa}	3.91
	FT-9	3.79±0.86 ^{Aa}	6.42±0.04 ^{Aa}	4.25±0.55 ^{Aa}	4.09±1.28 ^{Aa}	4.64
	FT-12	2.8±1.94 ^{Aa}	1.37±0.45 ^{Ab}	3.39±1.72 ^{Aa}	3.72±0.83 ^{Aa}	2.82
	FT-15	3.13±1.34 ^{Aa}	2.66±0.62 ^{Ab}	3.47±1.72 ^{Aa}	2.2±0.35 ^{Aa}	2.87
	平均值	3.00	2.81	3.11	3.00	

注:不同大写字母表示在 0.05 水平下土体黏聚力在不同初始含水量间差异显著;不同小写字母表示在 0.05 水平下土体黏聚力在不同冻融次数间差异显著。

3 讨论

3.1 冻融作用对湿润土体力学性质的影响

冻融作用小幅度提高了湿润土体的抗剪强度和黏聚力,黏聚力在冻融循环次数为 9 时增加幅度最大。本研究中土壤以颗粒较粗的沙粒和粉粒为主,沙粒组分占 65.77%,粉粒组分占 34.02%,黏粒组分

很少。土壤的这种机械组成使得土壤孔隙较大,导水性强,水分运移速率较快。冻结过程中,土壤中未冻结水向冻结锋面迁移,形成冰晶,使得冻结锋面周边土体趋于干燥,在干燥过程中土壤溶液中的胶结物质析出,附着在土壤颗粒上,加上颗粒间分子引力的增加,使得颗粒间的黏结性增强^[24-25]。另外,冻结锋面冰晶的发育会挤压周围土壤颗粒,使其接触更

加紧密,使得颗粒间胶结作用增强^[24-25]。土壤融化后,冰晶发育处所形成的中大孔隙不会完全复原,产生部分裂隙,部分液态水分布在新形成的裂隙中^[26]。冻融后,土壤颗粒的重新排列产生的紧密接触、土体的局部干燥以及胶结物质的黏结作用不可完全逆转,从而使得土体的黏聚力以及抗剪强度有所增加。另外,融化后部分水分可能会排出土体,降低土体含

水量,从而减小水分对土壤颗粒的润滑作用,增加颗粒间的黏聚力。反复的冻融作用使得颗粒间的胶结作用进一步加强,这一现象在冻融循环次数为6~9时表现得较为突出。一些学者也报道了类似的研究结论,即冻融作用增加了土壤颗粒间的黏结力,促进了土壤结构的稳定^[24-25,27-28]。朱龙祥^[16]研究也发现了冻融固结效应,冻融作用提高了壤土的黏聚力。

表 4 不同处理条件下土体内摩擦角的变化

Table 4 Variation of soil internal friction angle under different treatment conditions

测定条件	冻融循环次数	不同初始含水量条件下土体内摩擦角/(°)				平均值
		8%	12%	16%	20%	
干测	FT-0	7.35±0.18 ^{Bab}	7.39±0.19 ^{Bb}	7.6±0.27 ^{Bb}	8.49±0.11 ^{Aa}	7.71
	FT-1	7.92±0.11 ^{Aa}	9.04±0.58 ^{Aa}	7.93±0.25 ^{Aab}	8.97±0.26 ^{Aa}	8.46
	FT-3	7.4±0.02 ^{Bab}	8.03±0.3 ^{ABab}	8.61±0.25 ^{Aa}	8.58±0.19 ^{Aa}	8.16
	FT-6	7.45±0.22 ^{Bab}	7.64±0.18 ^{Bb}	8.4±0.19 ^{Aab}	7.94±0.09 ^{ABa}	7.86
	FT-9	6.96±0.2 ^{Bb}	8.19±0.09 ^{ABab}	8.86±0.54 ^{Aa}	8.2±0.62 ^{ABa}	8.05
	FT-12	7.67±0.27 ^{Aab}	8.07±0.37 ^{Aab}	8.33±0.36 ^{Aab}	8.25±0.54 ^{Aa}	8.08
	FT-15	7.31±0.53 ^{Aab}	7.56±0.54 ^{Ab}	7.33±0.11 ^{Ab}	7.38±1.11 ^{Aa}	7.40
	平均值	7.44	7.99	8.15	8.26	
湿测	FT-0	7.77±0.17 ^{Aa}	7.55±0.14 ^{Ab}	7.69±0.11 ^{Aab}	8.07±0.27 ^{Aa}	7.77
	FT-1	7.64±0.14 ^{Aa}	7.78±0.08 ^{Aab}	7.82±0.09 ^{Aab}	7.67±0.2 ^{Aa}	7.73
	FT-3	7.77±0.18 ^{Aa}	7.98±0.22 ^{Aa}	7.95±0.2 ^{Aa}	7.8±0.31 ^{Aa}	7.87
	FT-6	7.29±0.15 ^{Aa}	7.44±0.13 ^{Ab}	7.22±0.36 ^{Ab}	7.62±0.13 ^{Aa}	7.39
	FT-9	7.65±0.14 ^{ABa}	7.39±0.13 ^{Bb}	7.57±0.22 ^{ABab}	8.35±0.43 ^{Aa}	7.74
	FT-12	7.84±0.26 ^{Aa}	8.16±0.13 ^{Aa}	7.77±0.28 ^{Aab}	7.82±0.17 ^{Aa}	7.90
	FT-15	7.53±0.31 ^{Ba}	7.86±0.08 ^{ABab}	7.89±0.17 ^{ABab}	8.15±0.11 ^{Aa}	7.86
	平均值	7.64	7.74	7.70	7.92	

注:不同大写字母表示在0.05水平下土体内摩擦角在不同初始含水量间差异显著;不同小写字母表示在0.05水平下土体内摩擦角在不同冻融次数间差异显著。

随着冻融循环次数的继续增加,中大孔隙的数量和体积增加^[26],部分细小颗粒随土壤溶液迁移,填充在中大孔隙中,部分粗颗粒因黏结性较差可自由活动,在水分相变运移以及颗粒重新排列的过程中进入中大孔隙,中大孔隙被填充,使得小孔隙数量重新增加,裂隙逐步消失,土体变得密实。此时,土壤水分运移通道相对受阻,土壤水分在冻融过程中运移速率变慢,被包裹在土壤颗粒组成的孔隙中,由于水的润滑作用,土壤颗粒之间胶结性减弱,这可能是在冻融循环次数为12,15时,土体抗剪强度和黏聚力有所减小的原因,但与未冻融土相比,这一阶段的抗剪强度和黏聚力依然有所增加。

湿润土体的内摩擦角在不同处理水平下变化幅度很小,变化幅度在1°以内。砂壤土中沙粒含量较多,土体黏结性较弱,湿润条件下,土壤水分对颗粒的润滑作用更是削弱了颗粒间的内摩擦力。

3.2 冻融作用对干土体力学性质的影响

经过冻融循环作用后的湿润土体在自然风干之

后,其力学性能与湿润土体表现为相反的变化趋势。也即冻融作用削弱了干土体的力学性能,这种削弱作用在高含水量(16%和20%)和中含水量(12%)且冻融循环次数为9时最为突出。湿润土体在经历冻融循环之后,土体固相部分构成的土体“骨架”基本不会再改变,在自然风干后,土壤溶液中的胶结性物质析出,包裹在土壤颗粒表面,加之颗粒之间的水膜分子力显现,使得干土体之间的黏聚力和内摩擦角较湿润土体明显增加。冻融循环次数小于9时,随着冻融循环次数的增加,湿润土体内部中大孔隙增多,这意味着裂隙也在不断形成^[26],但随着孔隙周边土体的局部干燥和黏结作用增强,裂隙对湿润土体的局部破坏作用可能被干燥作用增加的黏结性所抵消,从而表现为黏聚力和抗剪强度小幅增加的趋势。风干之后,土体不同位置都处于干燥状态,干燥作用引起的黏结优势在不同冻融循环次数之间差异不大,此时,裂隙对土体的破坏作用不断显现。随着冻融循环次数的增加,干土体的硬度和黏聚力均有所减

小,在冻融次数为9时达到最小。随着冻融次数的继续增加,湿润土体裂隙被其他颗粒填充,裂隙的破坏作用有所减弱,干燥之后,颗粒之间重新黏结,固结强度开始有所增加,因此冻融次数为12,15时,土体的力学性能逐步增加,但仍低于未冻融土体。杨震等^[7]以及Xie等^[2]研究也发现了冻融作用降低了沙质粉土和沙质土的抗剪强度和黏聚力,但对内摩擦角的影响较小。而文中冻融作用对土体的劣化作用在风干之后开始显现,与前人的研究结果有相同之处。

总的来说,风干之后,干土体的力学性能受制于土体“骨架”的稳定性。初始含水量较高时(16%和20%),随冻融循环次数的增加,干土体经历“密实—疏松—新的密实”变化过程,土体结构表现为“稳定—不稳定—新的稳定”,土体硬度和黏聚力表现为先减小后增加,但相比未冻融土,依旧呈减小的变化趋势。在中低初始含水量(12%和8%)时,冻融过程中冰水的相变作用对土体结构的影响较小,产生的裂隙较少,对土体的破坏作用也相对较少,因此冻融作用对土体力学性能的影响也相对较小。

干土体内摩擦角最大变化幅度仅为 2° ,变化幅度较小,随冻融循环次数的增加,最大值出现在首次冻融循环后,之后呈小幅度减小的变化趋势,可能与首次冻融循环后土体局部颗粒间的接触点增多有关,之后土体孔隙的变化、颗粒的重新排列等,导致土体结构的疏松,使得内摩擦角小幅度减小。

3.3 初始含水量对土体力学性质的影响

随初始含水量的增加,湿润土体的抗剪强度以及黏聚力无明显变化,内摩擦角呈小幅度的增加趋势,平均增加幅度仅为 0.28° ,可认为初始含水量对内摩擦角的影响不大。沙质土粗颗粒之间组成的孔隙直径通常较大,水分的固液相态变化对其孔隙影响相对较小。沙粒及粉粒等粗颗粒间的黏结性不如黏粒大,加之湿润条件下水分的润滑作用,土体的黏结性通常较小,湿润土体黏聚力平均值仅为3 kPa,土体在不同初始含水量条件下均较松软,结构疏松,其力学表现在不同含水量条件下差异并不显著。

干土体硬度、抗剪强度和黏聚力随初始含水量的增加表现为显著增加的变化趋势,主要原因是风干过程中土壤溶液中黏结性物质的析出以及土壤颗粒之间分子力等对土壤颗粒的胶结,使得颗粒之间相互黏结,形成具有一定硬度和强度的块状土体^[29-30]。这与刘寒冰等^[30]的研究结果一致。初始含水量越大,析出的黏结性物质越多,对土壤颗粒的胶结作用也就越强,其力学性能也就越强。但是初始含水量越高,冻融作用对干土体力学性能的削弱作

用也就越大。

土体力学性质与侵蚀有着密切的关系。冻融作用对黄河源玛曲段草地砂壤土水蚀的影响可能并不显著,但可能会显著影响这类土壤的风蚀过程。秋末冬初以及冬末初春,黄河源玛曲段高寒草地经历着完全冻结和完全融化前的冻融时期,这个时期玛曲降水量少,在冻融初期,土壤易干燥,土体易受冻融作用的破坏而发生风蚀,因此加强草地沙质土壤在冻融初期的保护,防止土壤裸露,保持一定的湿润状态(含水量12%左右),可以有效防范冻融作用对土体的破坏,减少土壤风蚀的发生。

3.4 研究结果的局限性

本研究采用砂壤土重塑土体模拟野外相同土体容重的原状土,重塑土的孔隙分布、颗粒排列等可能与原状土不同。重塑土体相当于一个封闭小系统,土壤水分在冻融过程中的分布仅限于土体内部,而野外土壤处在一个开放的系统中,土壤水分在冻融过程中的运移分布可能与封闭系统有所不同。另外,室内冻融循环模拟所采用的温度是恒温,而野外土壤由负温到正温的融化以及由正温到负温的冻结过程均是循序渐变的过程。这些都可能导致室内模拟的结果与野外实际冻融情况下的结果有所差异。

4 结论

(1) 冻融作用削弱了干土体的力学性能,削弱程度与初始含水量有关。随冻融循环次数的增加,高含水量时(16%和20%),土体硬度和黏聚力表现为波动减小的变化趋势,最小值出现在冻融次数为9时,抗剪强度呈小幅度波动减小趋势;中含水量时(12%),土体硬度和黏聚力波动变化,最小值出现在冻融次数为9时;低含水量时(8%),土体硬度、黏聚力和抗剪强度总体变化幅度均较小。干土体内摩擦角最大变化幅度仅为 2° ,在经历首次冻融循环后达最大值,之后呈波动减小趋势。

(2) 冻融作用小幅度提高了湿润土体的力学性能。随冻融循环次数的增加,湿润土体抗剪强度呈小幅度增加的变化趋势,与未冻融土相比,平均增加幅度为6.8%;黏聚力总体呈波动增加趋势,在冻融循环次数为9时,增加幅度最大;内摩擦角小幅度波动变化,波动幅度在 1° 以内。

(3) 随初始含水量的增加,干土体硬度、抗剪强度和黏聚力表现为显著增加的变化趋势,干土体和湿润土体内摩擦角均表现为小幅度增加的趋势。初始含水量对湿润土体的抗剪强度和黏聚力的影响不显著。

参考文献(References):

- [1] 范昊明,蔡强国.冻融侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2003,1(4):50-55.
Fan H M, Cai Q G. Review of research progress in freeze-thaw erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003,1(4):50-55.
- [2] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2015,12(4):999-1009.
- [3] 张惠忍,李法虎,吕威.冻融状态和初始含水率对土壤力学性能的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):128-133.
Zhang H R, Li F H, Lü W. Effects of freeze-thaw status and initial water content on soil mechanical properties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(3):128-133.
- [4] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J].应用生态学报,2019,30(1):337-347.
Sun B Y, Li Z B, Xiao J B, et al. Research progress on the effects of freeze-thaw on soil physical and chemical properties and wind and water erosion[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(1):337-347.
- [5] Sun B Y, Ren F P, Ding W F, et al. Effects of freeze-thaw on soil properties and water erosion[J]. Soil and Water Research, 2021,16(4):205-216.
- [6] Yang W Q, Zhang G F, Yang H M, et al. Review and prospect of soil compound erosion[J]. Journal of Arid Land, 2023,15(9):1007-1022.
- [7] 杨震,冀鸿兰,李昊,等.冻融作用下黄河内蒙古段砂质粉土强度影响因素及回归模型研究[J].干旱区资源与环境,2024,38(11):137-147.
Yang Z, Ji H L, Li H, et al. Investigating influence factors and developing regression model for sandy silt strength in Inner Mongolia section of Yellow River under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(11):137-147.
- [8] 全晓娟,龚禹为,汪波,等.冻融循环对青藏黏土抗剪强度影响试验研究[J].冰川冻土,2023,45(3):1016-1025.
Quan X J, Gong Y W, Wang B, et al. Experimental study on the shear strength of Qinghai-Tibet clay under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023,45(3):1016-1025.
- [9] 范昊明,迟静怡,周丽丽,等.冻融条件下东北地区3种土壤抗剪强度差异性分析[J].沈阳农业大学学报,2020,51(5):606-611.
Fan H M, Chi J Y, Zhou L L, et al. Difference analysis of shear strength of three soils in Northeast China under freeze-thaw condition[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020,51(5):606-611.
- [10] Zhang T, Li H P, Hu C C, et al. Review and prospect of the effects of freeze-thaw on soil geotechnical properties[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021,13(5):349-356.
- [11] Liu J K, Chang D, Yu Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2016,210:23-32.
- [12] 屈永龙,倪万魁,牛富俊,等.中国寒区粗粒土力学研究现状与进展[J].科学技术与工程,2022,22(8):2979-2992.
Qu Y L, Ni W K, Niu F J, et al. Research status and progress of coarse-grained soil mechanics in cold regions of China [J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(8):2979-2992.
- [13] 卜建清,王天亮.冻融及细粒含量对粗粒土力学性质影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(4):608-614.
Bu J Q, Wang T L. Influences of freeze-thaw and fines content on mechanical properties of coarse-grained soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(4):608-614.
- [14] 董晓强,陈瑞锋.冻融循环作用下土体特性研究进展[J].太原理工大学学报,2017,48(3):275-287.
Dong X Q, Chen R F. Research progress of soil properties under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017,48(3):275-287.
- [15] 许强,吴礼舟,张莲花.冻融循环作用下非饱和黏土的抗剪强度试验[J].成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(3):334-338.
Xu Q, Wu L Z, Zhang L H. Shear strength test of the unsaturated frozen clay under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2011,38(3):334-338.
- [16] 朱龙祥.冻融作用对原状棕壤抗剪强度和崩解特性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
Zhu L X. Effects of freeze-thaw on shear strength and disintegration characteristics of undisturbed brown soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [17] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
Wu Z. Geomorphology of Wind-Drift Sands and Their Controlled Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [18] Feng X, Qu J J, Fan Q B, et al. Response of soil water content and temperature to rangeland desertification in an alpine region with seasonally frozen soil and plateau pika (*Ochotona curzoniae*) burrows[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(10):3722-3732.
- [19] 冯筱,屈建军,李倩茹.黄河上游玛曲段高寒草地沙化现状、成因及防治对策[J].林草政策研究,2024,4(1):1-7.
Feng X, Qu J J, Li Q R. Current status, causes and control measures of alpine grassland desertification in the Maqu section of Yellow River[J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2024,4(1):1-7.
- [20] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, et al. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Aeolian Research, 2015,19:275-281.