

冻融作用对黑土力学性质的影响研究

范昊明, 钱多, 周丽丽, 武敏

(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 反复的冻融循环会通过改变土壤黏聚力、内摩擦角等土壤力学性质而使其侵蚀加剧。探讨了冻融循环作用对土壤黏聚力及内摩擦角的影响, 从冻融机理上分析了冻融作用对土壤抗蚀性的影响机制。以黑土为试验对象, 考虑冻融循环周期和土壤含水率 2 个影响因素, 通过室内冻融试验研究了黑土黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的变化规律。结果表明, 冻融作用对黑土黏聚力影响较大, 而对内摩擦角影响较小。随着冻融循环次数的增加, 同一含水率下, 黑土黏聚力 c 呈减小趋势, 3 次冻融循环以后, c 值趋于稳定。在冻融循环次数一定时, 随着土壤含水率的增加, 黑土黏聚力 c 呈先减小后增大的趋势。在冻结温度一定时, 1 次冻融循环对土壤黏聚力 c 的扰乱较大, 其后扰动程度则基本不变。与土壤黏聚力不同, 土壤内摩擦角在整个冻融循环过程中没有明显变化。

关键词: 冻融循环; 黏聚力; 内摩擦角; 黑土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0081-04

中图分类号: S157.1

Effects of Freeze — Thaw Cycle on Mechanical Properties of Black Soil

FAN Haoming, QIAN Duo, ZHOU Lili, WU Min

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: Repeated freeze — thaw cycles cause changes in soil cohesion and internal friction angle, increasing the erodibility of the soil. This study discussed the variations of soil bulk cohesion and internal friction angle in the freeze — thaw cycles and analyzed the freeze — thaw effects on soil anti-erodibility. The black soil was selected as the study object. The changing trend of cohesion and internal friction angle of the soil were investigated through indoor freeze — thaw experiments with consideration of different freezing cycles and various soil moisture contents. The results show that freeze — thaw cycles affected greatly the soil cohesion and slightly the internal friction angle. With increasing numbers of freeze — thaw cycles, soil cohesion decreased and then achieved a stable state after three freeze — thaw cycles. With the increase of soil moisture, soil cohesion reduced and then increased in individual freeze — thaw cycles. At same freeze — thaw temperature, soil cohesion was affected greatly in the first freeze — thaw cycle, and very little in the following cycles. In contrast to soil cohesion, internal friction angle did not change significantly in the whole process of freeze — thaw cycles.

Keywords: freeze — thaw cycle; cohesion; internal friction angle; black soil

在我国冻融侵蚀作为一种侵蚀类型分布广泛, 虽然我国的冻融侵蚀以轻度、中度为主, 但对人类生存与发展的影响已经表现得越来越明显。冻融作用同水力侵蚀、重力侵蚀等复合起来, 对坡面、沟道侵蚀的影响非常大, 尤其是在春季解冻期, 冻融作用已经成为坡面、沟道侵蚀的主要外营力之一。

据松辽委调查报告, 部分东北黑土区, 土壤冻融侵蚀的速度已不亚于暴雨造成的水土流失。国内外的许多研究结果也都表明, 冻融作用能够通过改变土

壤性状, 影响土壤黏聚力和内摩擦角等力学性质进而加剧侵蚀程度。

土壤黏聚力和内摩擦角是表示土体抗剪强度的 2 个指标, 土壤抗剪强度又是衡量土壤可蚀性的重要指标之一, 土壤抗剪强度大, 则在降雨径流冲刷的作用下, 抵抗径流的剪切破坏能力就增加, 从而可以减缓土壤侵蚀或滑坡等的发生^[1]。很多研究都表明, 反复的冻融循环作用会引起土壤力学性质的变化, 但是不同的研究结果差异较大。Formanek 等^[2]对 Pa-

收稿日期: 2010-11-12

修回日期: 2010-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“辽西褐土旱作农区沟灌侵蚀机理与侵蚀过程研究”; 国家自然科学基金青年基金项目“东北旱地耕作土壤冻融作用机理与春季解冻期土壤侵蚀模拟”(40601054)

作者简介: 范昊明(1972—), 男(汉族), 吉林省白山市人, 博士, 副教授, 主要从事流域侵蚀、产沙研究与水土保持规划教学及研究。E-mail: fanhaoming@163.com。

ouse 粉砂壤土的试验表明, 土壤的强度与冻融作用、冻融循环次数及土壤水压力有关, 且 1 次冻融循环对土壤强度影响最大。Kok 等^[3]则认为融化过程中, 土壤抗剪强度较低, 但如果蒸发较快(太阳辐射和风), 土壤可以很快又恢复其相对较大的抗剪强度。Aoyama 等^[4]发现, 经过冻融作用土壤的黏聚力降低而内摩擦角变化很小; Ogata 等^[5]对 2 种土的研究发现黏聚力降低而内摩擦角增大。此外, 马巍等^[6]通过室内冻融试验发现, 反复冻结和融化强烈影响着石灰土的强度特征, 1 次冻融循环后, 对未加石灰的粉土来说, 其剪切强度变化不大, 但是对石灰粉土来说, 其剪切强度明显低于未冻融土, 而且随着冻融循环次数的增加, 石灰粉土的抗剪切强度逐渐衰减。杨平等^[7]通过试验研究得出, 黏性原状土经过 1 次冻融循环后, 物理力学性质都发生了很大的变化, 而砂类土经过 1 次冻融循环后, 物理力学性质变化不大。

以往研究表明, 不同土壤在经受冻融循环作用后, 表现各有差异。本文以黑土为研究对象, 通过对一定温差条件下, 不同冻融循环周期、不同含水率的黑土进行冻融循环试验, 讨论冻融作用下不同循环周期、不同含水率黑土黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 的变化, 从机理上分析冻融作用对黑土力学性质的影响机制。研究结果将为冻融作用对黑土区侵蚀发育特征的影响提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样

试验选取黑土为试验土壤, 取土地点为黑龙江省北安市二井镇长水河农场, 地理坐标为东经 $126^{\circ}33'22.9''$, 北纬 $48^{\circ}21'7.9''$ 。选取黑土容重为 0.9 g/cm^3 , 饱和含水率为 55.76%, 其颗粒组成如表 1 所示。

表 1 黑土的机械组成

土粒径级/mm	1.00~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	>0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
含量/%	0.5	4.2	26.7	31.4	10.3	15.5	42.8	68.6

1.2 试验方法

本试验采用直接剪切试验中不排水快剪试验, 试验土样的制备和剪切试验程序按照《土工试验规程》(GB/T 50123-1999) 中有关要求。将取回的黑土风干后过 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 筛, 定制大小为 $70 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的铁皮槽, 将筛后的土放入容器中, 压实达到所要求的土壤容重, 计算配置成所需含水率需要的水量, 用喷壶均匀地喷到土壤表面, 经过 18 h 以上的闷土, 达到所要控制的含水率, 在闷土期间用保鲜膜覆盖土样以减少含水率的变化。

将装有土样的铁皮槽放入由温控仪控制的温度可调冻融机, 分别在不同的冻融循环周期时用环刀取样。试验土样制好后用保鲜膜包裹以减小土壤含水率的变化, 然后进行直接剪切试验, 并计算得出土壤黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。

试验土样分别采用了 20%、30%、40% 共 3 种含水率, 由于自然界中的土壤夜晚冻结, 白天融化, 有一个冻结融化的缓慢过程, 因此本试验采取的是 12 h 冻结, 12 h 融化的缓慢冻融, 土样在冻融循环过程中未进行补水处理。为对比黑土在不同循环周期下各项指标的差异, 选取了 6 组冻融周期, 即 0 (原状土)、1, 3, 5, 7 和 10 次。冻融温差为 $-25 \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度变化由温控仪控制。冻融机中放置温度探头, 用以连续观测温度变化。

2 结果与分析

试验在一定温差, 不同冻融循环周期和 3 种不同土壤含水率条件下, 得出黑土黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 随不同冻融循环次数的变化规律, 随着冻融循环次数的增加, 土壤黏聚力 c 呈逐渐减小趋势, 3 次冻融循环以后, 其变化达到基本稳定的状态, 而内摩擦角 ϕ 的变化趋势则不如 c 值显著, 整个冻融循环过程中内摩擦角 ϕ 变化很小, 相对很稳定。

试验结果表明, 经过多次冻融循环对土壤黏聚力和内摩擦角的作用明显不同。这是因为冻结过程中土壤孔隙的变化和冻融作用对土壤性质和微观结构的影响, 致使土壤孔隙度增大, 土壤颗粒间胶结力和咬合作用减小, 摩擦力减小, 土壤的抗剪能力减弱。

同时, 也与土壤的状态和试验条件有关, 由于供试土壤为扰动土, 尽管试验中尽量保证与自然条件下土壤的一致性, 但是土样结构仍会有所改变, 因此也会影响实验结果的稳定性。

试验结果也表明, 在温差一定下, 土壤黏聚力和内摩擦角不仅受冻融循环周期的影响, 土壤含水率也是影响其变化的重要因素。在冻融循环次数一定的时, 随着含水率的增加, 土壤黏聚力 c 呈现先增大后减小的趋势, 而内摩擦角 ϕ 变化不明显。

2.1 冻融循环过程中循环周期对黏聚力、内摩擦角的影响

图1和图2分别为不同含水率条件下黑土黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 随冻融循环次数变化的规律曲线,从中能够看出在冻融循环过程中 c 值和 ϕ 值受含水率影响的变化情况。在整个冻融过程中,各个含水率下的 c 值都随冻融循环次数的增加呈减小趋势,且最终趋于稳定。如图1所示,当土壤含水率为40%时,未冻土的 c 值为18.5 kPa,经过1次和3次冻融循环后, c 值分别减小到16.5和10.9 kPa,循环3次后基本趋于稳定,变化幅度在9~10.9 kPa之间。在其它两组土壤含水率下,也有类似的规律,即经过冻融循环作用,土壤黏聚力 c 变化幅度逐渐减小,3次冻融循环以后, c 值趋于稳定。这是因为在 -25°C 冻结时,主要是原位冻结,土颗粒之间水分迁移较小,此时冰晶相对均匀的分布在土颗粒之间,起到胶结支撑土骨架的作用,致使土的空隙有所增大,冰晶融化后,其胶结作用消失,土颗粒之间的空隙增大,接触点减少,故抗剪强度有所降低^[8]。同时,由于冻融作用破坏了土壤微观结构,使土颗粒间的胶结力和咬合作用减小,更使得土壤黏聚力的降低势在必行^[9]。而内摩擦角 ϕ 的变化规律远不如 c 值明显,经过不同循环周期后的 ϕ 值变化幅度很小,变化量甚至可以忽略。由图2可以看出,内摩擦角 ϕ 随循环次数的增加变化曲线非常平缓,当含水率分别为20%、30%和40%时,10次冻融循环过程中, ϕ 值变化幅度分别仅为 3.04° 、 2.49° 和 3.58° 。这与苏谦等^[10]对青藏线典型斜坡黏土的冻融循环试验所得结论一致,即冻融循环过程对土体黏聚力值的影响较大,对内摩擦角数值影响较小。

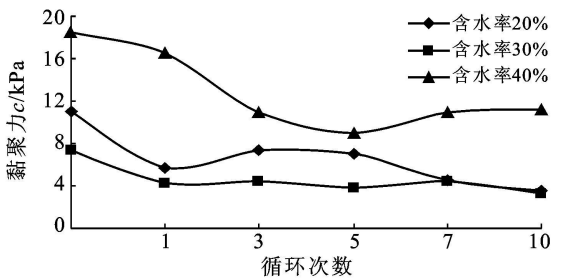


图1 不同含水率下黑土黏聚力的变化

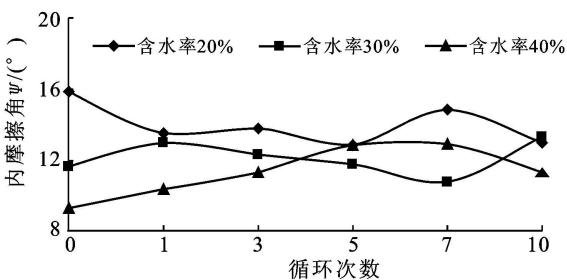


图2 不同含水率下黑土内摩擦角的变化

2.2 冻融循环过程中土壤含水率对黏聚力、内摩擦角的影响

如图3和图4所示,在循环次数一定时,随着土壤含水率的增加,黑土黏聚力 c 都呈现先减小后增大的趋势,而与土壤黏聚力 c 不同,土壤内摩擦角 ϕ 随土壤含水率的变化则非常稳定。当冻融循环次数为1,5和10次时,土壤内摩擦角 ϕ 随土壤含水率变化量分别为 3.1° 、 1.09° 和 1.98° ,其它冻融周期 ϕ 值也呈相同规律,这与土壤黏聚力 c 随含水率的变化对比非常强烈。图3所示,同样当冻融循环为1,5和10次时,含水率为30%的土样相对于含水率为20%的土样,土壤黏聚力 c 分别减小了1.45,3.16和0.35 kPa,而相对于含水率为40%时的土样, c 值则分别增大了12.25,5.16和7.95 kPa,可见随着含水率的增加,土壤黏聚力 c 增加的幅度远大于减小的幅度。这是因为黑土是在温带湿润气候草甸植被下形成的具有深厚腐殖质层的土壤,属于半水成土,相对于其它土壤,饱和含水率较高。而土壤黏聚力除与库仑力、范德华力、胶结作用力以及由浓度差所引起的渗透压力等有关外,它还受水膜粘结力的影响,在土壤含水率较低时,水膜粘结力的大小直接影响土壤的力学性质^[11]。当土壤含水率为40%时,相对于20%和30%的土壤含水率,更为接近黑土饱和含水率,此时土质比较黏,土粒周围的分子膜引力较大,对土粒的牵引作用增强^[12]。虽然土粒间水膜的润滑作用也有所增强,但是由于冻融作用使土体的空隙度增大^[13],致使土壤颗粒间水膜相对变薄,颗粒间摩擦力也相应增大,抗剪能力增强。此外,在冻结过程中,土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,土被压缩。当土融化时,有效应力减少,在整个冻融过程中,总应力保持不变。可见,冻融循环对正常固结土产生超固结效应,对土的结构具有强化作用^[14]。因此,在水膜厚度与空隙度双重作用下和冻融作用对土体的超固结效应下,土体黏聚力相应地增大。而含水率为20%和30%时,土壤结构松散,分子膜引力及颗粒间摩擦力都较小,故而抗剪切能力较低。

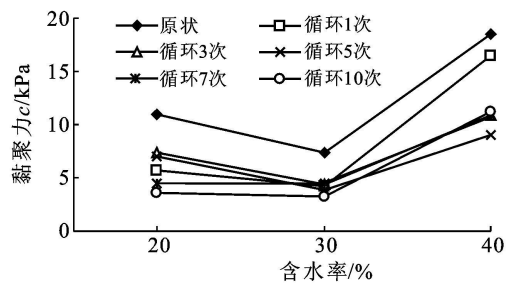


图3 不同循环周期下黑土黏聚力的变化

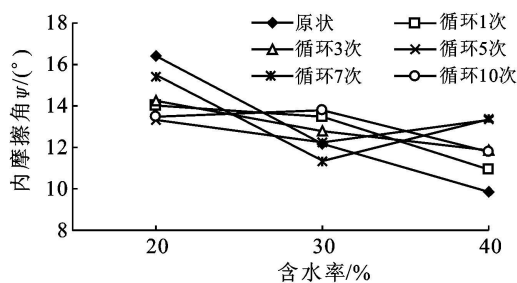


图 4 不同循环周期下黑土内摩擦角的变化

同时,从图 3 中还可以看出,1 次和 1 次以后的冻融循环黑土的影响曲线基本重合,且相对于未冻土黏聚力影响曲线有所下移,这说明当冻结温度一定时,1 次冻融循环对土壤黏聚力 c 值的扰乱较大,而 1 次冻融循环以后,扰动程度则基本不变,即土壤黏聚力 c 扰动达到稳定。这主要是由于反复冻融作用改变土壤的结构,破坏了土壤颗粒间的联结力,使土壤颗粒重新排列^[15],而融化后破坏不能还原,这使得土壤本身丧失了加固黏聚力,故原状土的抗剪强度要高于同样密度和含水量的冻融试验土样。

3 结论

(1) 冻融作用对黑土黏聚力影响较大,而对内摩擦角影响较小。

(2) 在黑土含水率一定时,随着冻融循环次数的增加,土壤黏聚力 c 都呈减小趋势。当其它条件一定时,冻融循环次数对黏聚力 c 的影响或扰动是有限度的,并且影响或扰动的程度大部分是在前 3 次冻融循环中完成的。而内摩擦角 ϕ 的变化规律远不如 c 值明显,经过不同循环周期后 ϕ 值变化幅度很小,变化量甚至可以忽略。

(3) 在冻融循环次数一定时,随着黑土含水率的增加,黏聚力 c 呈现先减小后增大的趋势,而土壤内摩擦角 ϕ 随土壤含水率的变化则非常稳定。

(4) 冻结温度一定时,1 次冻融循环对黑土黏聚力 c 的扰乱较大,而 1 次冻融循环以后,扰动程度则基本不变,即土壤黏聚力 c 扰动达到稳定。

[参 考 文 献]

[1] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.

[2] Formanek G E, McCool D K, Papendick R I. Freezethaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(6): 1749-1752.

[3] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2): 501-506.

[4] Aoyama K, Ogawa S, Fukuda M. Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing[C] // Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1985: 217-222.

[5] Ogata N, Kataoka T, Komiya A. Effect of freezing thawing on the mechanical properties of soil[C] // Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1985: 201-207.

[6] 马巍,徐学祖,张立新.冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J].岩土工程学报,1999,21(2):158-160.

[7] 杨平,张婷.人工冻融土物理力学性能研究[J].冰川冻土,2002,24(5):665-667.

[8] 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.

[9] 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(S2):2690-2694.

[10] 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].岩土力学与工程学报,2008,27(1):2990-2994.

[11] 王为,李小昱,王转卫.农业土壤抗剪强度的试验研究[J].干旱地区农业研究,2002,20(1):125-127.

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

[13] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):186-189.

[14] Chamberlain E J, Gow A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13: 73-92.

[15] Konrad J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts[J]. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16(3): 291-303.