

# 模拟干湿交替对夯实土壤抗剪强度的影响

宋鹏帅<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 陈琳<sup>1</sup>, 曹博召<sup>2</sup>, 宋朝阳<sup>2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为了探究农业生产实践中经过人工夯实的田坎在自然营力作用下的垮塌变形机理,通过采集黄土区梯田土壤,对其进行室内击实、模拟干湿交替处理和剪切试验,探究了干湿交替过程对夯实土壤抗剪强度的影响。结果表明:在试验条件下,随着干湿交替次数的增加,土壤的粘聚力呈现逐渐增加的趋势。土壤的内摩擦角逐渐降低,并在第 7 次干湿交替时达到最小值。在 100 kPa 垂直压力作用下,土壤的抗剪强度受影响不明显;在 200 kPa 垂直压力作用下,土壤抗剪强度先增加然后趋于稳定;而在 300,400 kPa 垂直压力作用下,土壤的抗剪强度先增加然后逐渐降低,并趋于稳定,并在第 2 次干湿交替时达到最大值。此外,在相同干湿交替次数的情况下,随着垂直压力的增大,土壤的抗剪强度逐渐增大,说明垂直压力与土壤的抗剪强度呈正相关。经过显著性分析,干湿交替过程对土壤内摩擦角的影响大于相同条件下对粘聚力的影响。干湿交替过程对夯实土壤的抗剪强度有显著影响,随着干湿交替次数的增加,土壤的抗剪强度降低,其中土壤粘聚力增加,而内摩擦角下降。

**关键词:**干湿交替; 抗剪强度; 内摩擦角; 粘聚力

中图分类号:S157; TU411

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0074-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.02.012

## Effect of Wet-Dry Cycle on Shear Strength of Compacted Soil

SONG Pengshuai<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, CAO Bozhao<sup>2</sup>, SONG Chaoyang<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The chief aim of this paper is to explore the mechanism of deformation of manual rammed ridges under natural forces in agricultural production practice. Several terrace soil samples were collected from loess area, rammed and then put into wet-dry cycle to observe its impact on shear strength in laboratory. The results showed that with the increase of the frequency of wet-dry cycle, cohesion of soil increased gradually; internal friction angle decreased gradually, and reached the minimum at the 7th cycle; under 100 kPa vertical pressure, no significant impact was found on shear strength; under 200 kPa vertical pressure, shear strength first increased and then stabilized; under 300 kPa and 400 kPa vertical pressure, shear strength first increased then decreased and at last stabilized and reached the maximum at the 2nd cycle; in addition, with the same frequency of wet-dry cycle, shear strength increased gradually with the increase of vertical pressure, indicating that there was a positive correlation between them; the significance analysis proposed that wet-dry cycle had a greater impact on internal friction angle than on cohesion under the same condition. These findings implicate that shear strength is affected significantly by wet-dry cycle. With the increase of the frequency of the latter, shear strength decreases, cohesion of soil increases, and internal friction angle decreases.

**Keywords:** wet-dry cycle; shear strength; internal friction angle; cohesion

土坎梯田是西部坡耕地地区农业生产的重要组成部分,在生态环境保护、社会经济发展方面发挥着至关重要的作用。然而,由于地形地势、降雨等自然因素和梯田田坎修筑过程中的质量、建成后的不合理利用等

人为因素的影响,田坎垮塌现象严重。相关调查表明,在陕南膨胀土分布区,当年修筑的梯田,经过一个雨季,梯田田坎垮塌 2/5,情况严重时达到 4/5<sup>[1-2]</sup>,因此对梯田田坎保护措施的相关研究变得尤为重要。

收稿日期:2020-05-23

修回日期:2020-06-19

资助项目:“秦巴山地”近自然坡面整治水土保持关键技术示范与推广项目;国家自然科学基金(41771308)

第一作者:宋鹏帅(1994—),男,宁夏石嘴山人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:505483732@qq.com

通信作者:王健(1973—),男,陕西商洛人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究。E-mail:wangjian@nwsuaf.edu.cn

步入 21 世纪以来,水土流失问题日益严重,其中由于气候的周期性变化引发的水土流失问题尤为突出。干湿交替过程作为气候周期性变化的主要特征,探究其对水土保持的影响变得十分必要。干湿交替的概念于 20 世纪 30 年代首次出现,其对土壤影响的相关研究始于 50 年代。土壤的干湿交替是土壤受降雨蒸发的周期性变化影响而交替出现湿润、干燥变化的循环过程,变化过程中其物理力学特性会有明显的变化<sup>[3-5]</sup>,并常常发生胀缩现象,影响土壤孔隙的分布,造成土壤体积的变化以及裂缝的发育,进而影响土壤的结构和稳定性;土壤的干湿交替过程同时也是土壤系统热力学和水文学视角短期变异较大的过程,可使土壤的物理、化学性质发生一定程度的变化<sup>[6]</sup>。干湿交替使得土壤的容重、崩解性及抗蚀性等指标发生相应的改变,同时一定程度上改变土壤呼吸、有机质分解及化学吸附等能力,最终使得土壤侵蚀产生较大不确定性<sup>[7-12]</sup>。田坎作为梯田最核心的部分,不仅能够提高土地生产力,还可防治水土流失,保护土地资源,改善农业生产条件<sup>[13]</sup>,通过机械阻挡作用来减少土壤侵蚀、改善土壤水分条件,提高土壤的抗剪能力<sup>[14]</sup>。因此关于夯实土壤在干湿交替条件下的理论研究对于农业和工程等的生产实践具有十分重要的意义。

自然条件下,由于土体的破坏所引发的自然灾害众多,抗剪强度作为衡量土体稳定性的重要指标,需对其进行定量测定,探究其在干湿交替过程中的变化规律。土壤的抗剪强度是土壤能够抵抗外界荷载作用下剪切破坏的极限强度,大量工程实践和科学研究发现,土体的破坏主要是由于剪切所引发的<sup>[15-16]</sup>,剪切破坏直接影

响土壤的结构和稳定性,进一步影响农业和工程建设的发展,而季节性的气候变化,使得自然界长期处于干湿交替的循环过程中,干湿交替的环境导致土壤的结构逐渐破坏,大幅降低了土壤的抗剪强度,使得农业生产受到影响,工程结构失稳或者出现大幅度沉降,产生一系列的环境和工程问题。杨和平<sup>[17]</sup>、勾丽杰<sup>[18]</sup>等对于膨胀土的干湿交替在工程领域的特性进行了相关研究,其认为土壤在干湿交替过程中的裂隙发育是导致抗剪强度衰减的主要原因<sup>[19]</sup>;徐丹等<sup>[20]</sup>认为土壤经历多次干湿交替后,剪切特性类似于超固结土,土壤脆性显著增加;汪东林<sup>[21]</sup>、张芳枝<sup>[22]</sup>等在干湿交替条件下对非饱和重塑黏土进行了相关研究,并在此基础上总结了黏土在干湿交替过程后的相关特性。目前,针对膨胀土领域的相关研究较多且已经形成了一定的理论基础<sup>[23-24]</sup>,但针对田坎在自然周期性蒸发和降雨作用下抗剪强度的研究较少,因此选择杨凌矮土作为试验土样,通过进行夯实、干湿交替处理以及抗剪强度测定等方法,研究土壤在干湿交替条件下抗剪强度的变化规律,研究结果可为农业生产实践、水土资源的保护提供一定的理论依据和参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤

试验土壤选用杨凌矮土,土壤均采自耕层下 20—30 cm,取样地属温带大陆性季风气候区,年平均气温 10~12℃,年降雨量 500~700 mm,年均日照数 2 196 h,无霜期 210 d。试验前测定试验土壤的相关参数指标见表 1。

表 1 试验用土理化性质

土壤类型	土壤质地	粘化率	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值	颗粒含量/%				体积质量/ (g·cm <sup>-3</sup> )
					<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.2 mm	0.2~2.0 mm	
矮土	壤质黏土	1~1.1	8.53~22.7	8.2,9~8.40	10.25	57.54	29.98	1.56	1.30

### 1.2 试验原理及方法

将试验用土取回至实验室后,进行晾晒碾碎处理,然后将处理完成的土样过 1.25 mm 筛,除去草根等杂物,加水配置成含水率为 18%(质量含水率,下同)的土样,静置 6 h,待土样中的水分分布均匀后进行下一步试验处理。

1.2.1 击实试验 为了保证土壤在干湿交替试验过程中的完整性,方便土壤样品的取用,在击实试验前,根据击实筒的尺寸( $h=12.5$  cm, $r=10.0$  cm)大小,预先准备好同等尺寸的铝片,制成与击实筒等体积大小的铝筒,衬于击实筒内侧,使其与击实筒内壁紧贴。在击实筒内壁涂抹一层凡士林,减少铝筒与击实筒内壁之间的摩擦力,以便土壤顺利取出。击实试验器材

准备就绪后,将制备好的土壤放入击实筒中的铝筒内,为了保证试验的准确性,在击实试验中采取统一标准,每次击实土样时,统一用击实锤从同一高度落下并击实 10 次,对土壤进行夯实,击实后土壤下降高度为(8.3±0.05) cm,击实完成后测得土壤体积质量为(1.74±0.03) g/cm<sup>3</sup>。本次试验设计 7 次干湿交替循环,1 个对照,设置 3 个重复,共需 24 组土样。

1.2.2 干湿交替试验 击实试验结束后,将包裹土壤的铝筒从击实筒中取出,然后用环箍将铝筒固定,放入事先加有水的托盘中,水层高度始终高于土壤下表面 2 cm,湿化处理共持续 8 h。经过湿化处理后,为使土壤中的水分分布均匀,采用薄膜密封,静置 8 h,然后放入恒温 50℃的烘箱中干燥,干燥过程持续 24 h,测得含水率

为 8%，此为 1 个干湿交替过程，待每次干湿交替试验结束后，每组用直径为 6.18 cm，高为 2 cm 的直剪环刀取 4 个土样进行抗剪试验测定。

1.2.3 剪切试验 试验采用直剪仪进行快剪试验。剪切试验时对土样分别施加 100, 200, 300, 400 kPa 的垂直压力作为垂直荷载。在对土样施加垂直压力后，以 1.0 mm/min 的速率进行剪切试验。试验过程中，读出测微表读数并按下式求得土壤的抗剪强度值：

$$\tau_f = m \cdot R$$

式中： $\tau_f$  为土壤的抗剪强度； $m$  为测力环率定系数 (kPa/0.01 mm)； $R$  为直剪仪测微表读数。

### 1.3 数据处理与分析

本文研究采用 Excel 2010, SPSS 23.0 进行数据处理与分析、制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干湿交替变化对土壤内摩擦角的影响

经快速剪切试验，测得不同干湿交替次数处理土壤内摩擦角，得到相应的干湿交替次数与土壤内摩擦角的关系见图 1。

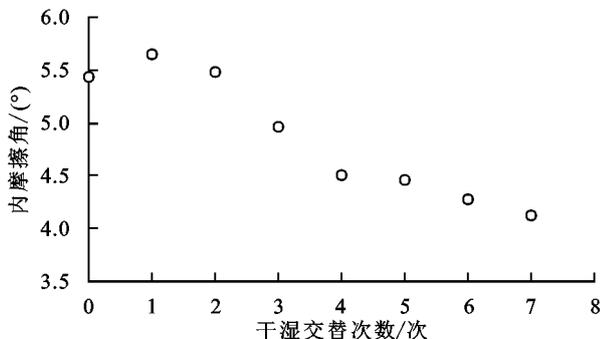


图 1 内摩擦角与干湿交替次数的关系

夯实土壤在不进行干湿交替的条件下，土壤内摩擦角为 5.4°；经过 1 次干湿交替处理，内摩擦角为 5.6°；随着干湿交替次数的增加，内摩擦角整体呈现总体极显著性下降的趋势 ( $p < 0.01$ )。土壤在经过第 1 次干湿交替后，其内摩擦角达到了峰值；随着干湿交替次数的增加，在第 2—4 次干湿交替时，土壤内摩擦角下降幅度最大；第 5 次干湿交替后土壤内摩擦角与第 4 次干湿交替后土壤内摩擦角数值大致相等；第 6 次干湿交替后，内摩擦角下降幅度减缓，直至第 7 次干湿交替后，土壤内摩擦角达到最小值 4.1°。

土壤在经历第 1 次干湿交替后，内摩擦角达到最大值，随着干湿交替次数的增加内摩擦角逐渐降低，土壤内部结构在复杂的物理化学变化中遭到破坏<sup>[16]</sup>，因此土体内微小颗粒的距离逐渐增大，孔隙比也不可避免地增大，同时，土壤在干湿交替湿化过程中土颗粒的不均匀收缩，逐渐形成部分团聚土颗粒，

破坏了土体结构间的内部联系，最终使得内摩擦角呈现衰减趋势<sup>[18]</sup>；土壤在经历第 2—4 次干湿交替时，此阶段土壤出现了大量裂隙，并且随着土壤裂隙的不断发育，土壤的内部结构发生改变，其完整性遭受破坏，稳定性大幅降低，因而土壤内摩擦角在此阶段下降幅度最大；土壤在经历第 5—7 次干湿交替时，随着干湿交替次数的逐渐增加，土壤裂隙已经基本发育完成，裂隙不再大量增加，土壤的结构逐渐稳定并达到新的平衡，故此阶段土壤内摩擦角的降幅较小，在第 7 次干湿交替时土壤内摩擦角出现最小值。

### 2.2 干湿交替变化对土壤粘聚力的影响

通过分析室内剪切试验测得的试验数据，得到干湿交替次数与土壤粘聚力的关系见图 2。

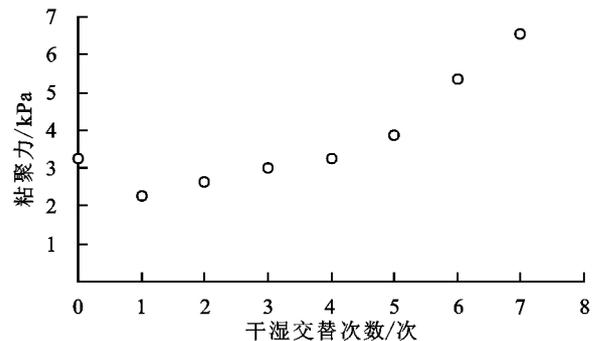


图 2 粘聚力与干湿交替次数的关系

通过图 2 给出的在不同干湿交替次数下，土壤粘聚力和干湿交替次数的关系可以看出，土壤粘聚力与干湿交替次数总体呈现极显著性正相关关系 ( $p < 0.01$ )。在不进行干湿交替时，土壤粘聚力为 3.25 kPa；经过 1 次干湿交替处理后，粘聚力出现最小值 2.25 kPa，随着干湿交替次数的逐渐增加，土壤的粘聚力逐渐增大，在第 2—5 次干湿交替过程中，土壤粘聚力增加的幅度较为缓慢，在第 6 次干湿交替后土壤的粘聚力增幅较大，并在第 7 次达到最大值 6.50 kPa。

土壤经历第 1 次干湿交替后，粘聚力达到最小值，主要是因为是在干湿交替的作用下，土壤颗粒间的孔隙逐渐增大，土壤裂隙增加，土壤颗粒之间的化合物胶结作用降低，从而使得粘聚力降低。但是随着干湿交替次数的逐渐增加，在第 2—5 次干湿交替过程中，土壤的粘聚力逐渐增大，这是由于土壤干化过程中，水分含量减少，土压力作用下土壤颗粒间的孔隙有一定程度的压缩，土壤基质吸力逐渐增大<sup>[18]</sup>，土壤颗粒发生定向排列，达到一个新的稳定状态，此时的土壤粘聚力大于前一次进行干湿交替的土壤的粘聚力，所以土壤粘聚力呈现逐渐增加的趋势，在第 6 次干湿交替后，重组的土壤颗粒稳定性进一步提高，所以土壤粘聚力增幅比第 2—5 次干湿交替过程大，并在第 7 次达到最大值。

### 2.3 干湿交替变化对土壤抗剪强度的影响

试验测得在不同的垂直压力作用下的土壤其抗剪强度与干湿交替次数的关系见图 3。

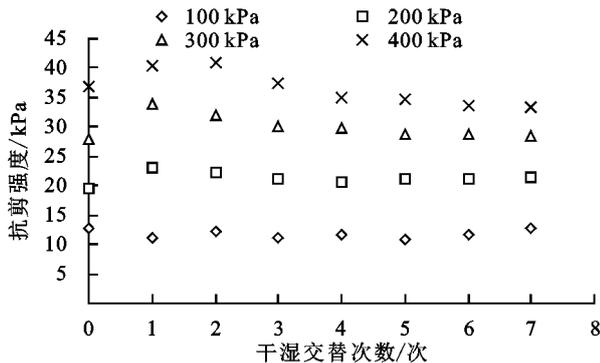


图 3 不同垂直压力作用下土壤抗剪强度与干湿交替次数的关系

从图 3 中可以看出,在干湿交替次数一定的前提下,随着垂直压力的不断增加,土壤的抗剪强度显著增大,这是由于垂直压力对土壤有压实作用,这种压实作用缩短了土壤颗粒的粒间距,减少了土壤孔隙,使得土壤颗粒更加紧密,趋于密实化、整体化,在一定程度上提高了土壤的密实性,使得土壤抵抗剪切破坏的能力增加,从而提高了土壤的抗剪强度。

在不同垂直压力的作用下,抗剪强度与干湿交替次数的关系不完全一致。在 100 kPa 的垂直压力作用下,随着干湿交替次数的增加,土壤的抗剪强度变化不明显,保持在 10.75~12.45 kPa 范围内;200 kPa 垂直压力下,土壤的抗剪强度随着干湿交替次数的增加先增大,然后趋于稳定;垂直压力为 300,400 kPa 时,土壤抗剪强度随着干湿交替次数的逐渐增加,均呈现先增大,然后降低,最后趋于稳定的趋势。在 100 kPa 的垂直压力作用下,随着干湿交替次数的增加,土壤的抗剪强度变化不明显,在 11~12.75 kPa 范围内无规律变化,说明 100 kPa 的垂直压力对于土壤的抗剪强度影响较小。

200~400 kPa 垂直压力作用下的土壤,在第 1 次干湿交替时抗剪强度均达到最大值,随着干湿交替次数的增加,土壤裂隙逐渐发育,土壤结构发生不可逆的损伤,土壤颗粒间的摩擦阻力逐渐降低,虽然粘聚力在逐渐增加,但是其对土壤抗剪能力的影响较小,其中 200 kPa 垂直压力作用下的土壤,在第 1 次干湿交替后,抗剪强度维持稳定,不随着干湿交替次数的变化而变化。而 300 kPa 和 400 kPa 垂直压力作用下的土壤,在第 1 次干湿交替后,随着次数的增加,抗剪强度逐渐下降,并最终趋于稳定。

在 1—7 次干湿交替过程中,第 1 次干湿交替处理后的土壤随着垂直压力的增加,土壤的抗剪强度增

幅最大,随着次数的增加,其抗剪强度的增幅逐渐减小,在第 7 次土壤的抗剪强度增幅最小,说明干湿交替次数会影响垂直压力对土壤的压实作用,进而影响土壤的抗剪强度。

### 2.4 干湿交替变化对土壤抗剪强度指标影响显著性分析

利用 SPSS 23.0 对不同干湿变化(1—7 次),分别对粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  进行单因素方差分析,计算结果见表 2。

表 2 干湿变化对抗剪强度单因素方差分析

抗剪强度指标	方差来源	离差平方和(SS)	自由度(df)	平均平方	F 值	Sig.
粘聚力( $c$ )	组间	46.330	6	7.722	245.428	0.000
	组内	0.425	14	0.030		
	总差异	46.754	20			
内摩擦角( $\varphi$ )	组间	6.468	6	1.078	190.327	0.000
	组内	0.079	14	0.006		
	总差异	6.547	20			

注: $\alpha=0.05$ ,Sig.为统计显著性值。

由计算结果 Sig.小于 0.05,说明不同干湿交替水平对土壤粘聚力和内摩擦角的影响是显著的。为进一步分析不同干湿交替之间的显著性,进行了多重比较,结果见表 3。

以上单因素分析及两两比较结果可以说明,不同干湿交替次数处理的土壤,其粘聚力和内摩擦角的变化不同。对于粘聚力来说,仅经过 2 次和 3 次两种干湿交替处理水平的土壤差异不显著,其他处理水平之间差异均显著。对于内摩擦角来说,不同的是经历 4 次和 5 次两种处理水平、6 次和 7 次两种处理水平之间差异不显著,其他水平之间均显著。因此,可以说明干湿交替处理次数的不同,对于土壤粘聚力和内摩擦角的影响不同,相比较而言对内摩擦角的影响较大。

## 3 讨论

干湿交替过程对土壤的抗剪强度有着显著的影响。已有研究表明,随着干湿交替次数的增加,土壤的抗剪强度逐渐衰减,土壤粘聚力逐渐下降<sup>[25]</sup>,而内摩擦角基本保持不变<sup>[26]</sup>。杨和平等<sup>[27]</sup>认为,经过干湿交替的土壤,由于含水率的变化、土颗粒间裂隙的无规则分布以及颗粒间结合水膜的影响,土壤颗粒之间的粘聚作用下降,土壤粘聚力降低,进而抗剪强度下降。本试验的研究结果中,内摩擦角的变化与已有研究结果相同<sup>[18]</sup>,但粘聚力的变化存在差异,土壤粘聚力在第 1 次干湿交替时出现最小值,之后随着干湿交替次数的增加,粘聚力逐渐增大。

表 3 干湿变化对抗剪强度多重比较分析

干湿水平 变化(I)	干湿水平 变化(J)	粘聚力(c)		内摩擦角( $\varphi$ )	
		平均值差异 (I-J)	Sig.	平均值差异 (I-J)	Sig.
1	2	-0.382*	0.018	0.188*	0.009
	3	-0.393*	0.015	0.691*	0.000
	4	-0.790*	0.000	1.111*	0.000
	5	-1.625*	0.000	1.195*	0.000
	6	-3.095*	0.000	1.415*	0.000
	7	-4.267*	0.000	1.535*	0.000
	2	1	0.382*	0.018	-0.188*
3		-0.012	0.936	0.503*	0.000
4		-0.408*	0.012	0.923*	0.000
5		-1.243*	0.000	1.007*	0.000
6		-2.713*	0.000	1.227*	0.000
7		-3.885*	0.000	1.347*	0.000
3		1	0.393*	0.015	-0.690*
	2	0.012	0.936	-0.503*	0.000
	4	-0.397*	0.014	0.421	0.000
	5	-1.232*	0.000	0.504*	0.000
	6	-2.702*	0.000	0.724*	0.000
	7	-3.873*	0.000	0.844*	0.000
	4	1	0.790*	0.000	-1.111*
2		0.397*	0.012	-0.923*	0.000
3		0.340*	0.014	-0.421*	0.000
5		-0.835*	0.000	0.083	0.197
6		-2.305*	0.000	0.303*	0.000
7		-3.480*	0.000	0.423*	0.000
5		1	1.625*	0.000	-1.195*
	2	1.243*	0.000	-1.007*	0.000
	3	1.232*	0.000	-0.504*	0.000
	4	0.835*	0.000	-0.083	0.197
	6	-1.470*	0.000	0.220*	0.000
	7	-2.642*	0.000	0.340*	0.000
	6	1	3.095*	0.000	-1.415*
2		2.713*	0.000	-1.227*	0.000
3		2.702*	0.000	-0.724*	0.000
4		2.305*	0.000	-0.303*	0.000
5		1.470*	0.000	-0.220*	0.000
7		-1.172*	0.000	0.120	0.071
7		1	4.267*	0.000	-1.535*
	2	3.885*	0.000	-1.347*	0.000
	3	3.873*	0.000	-0.844*	0.000
	4	3.477*	0.000	-0.423*	0.000
	5	2.642*	0.000	-0.340*	0.000
	6	1.172*	0.000	-0.120	0.071

注:  $\alpha=0.05$ , 差异显著。1—7 表示 1—7 次干湿交替次数。

造成结果不同的原因:(1) 土壤经过第 1 次干湿交替后,由于土壤内部结构发生一定程度的破坏,土壤颗粒间裂隙增加,颗粒之间的粘聚作用下降,因而粘聚力降低;而经过第 2 次干湿交替后,土壤颗粒逐步形成定向排列,随后逐渐聚集,胶结作用逐步增大,粘聚力逐渐增大,故随着干湿交替次数的增加(2—7 次),土壤粘聚力逐渐增大。(2) 试验土壤的膨胀性较弱,与膨胀性较强的土壤理化特性存在一定差异,在进行干湿交替处理后,土壤表现出来的性状不同,进而试验结果存在差异。干湿循环效应使土颗粒间的联结产生了不可逆的损伤,土体微结构的劣化使得土壤抗剪强度降低<sup>[28]</sup>,可见土壤内部结构的完整性影响着土颗粒之间的联结作用,进一步影响土壤的抗剪强度。

目前,土壤干湿交替的研究主要侧重膨胀土领域的探索,对于膨胀性较弱或者无膨胀性的土壤相关研究较少。在试验方法中,干湿交替次数,烘干和湿化的过程,以及土壤含水率的控制方面等诸多要素,在不同的研究中选取的标准并不一致,且目前针对干湿交替相关研究的试验用土主要为重塑土,以原状土为试验用土的相关研究较少。与原状土相比,重塑土本身的结构已经受到了一定程度的影响,加之试验仪器和人为操作的因素,影响试验的结果,所以针对不同特性的土壤,研究得出的结论存在一定程度的差异性。本试验以膨胀性较弱的杨凌塬土为研究对象,进行干湿交替条件下夯实土壤抗剪特性的探究,模拟梯田田坎在自然条件下抗剪强度的变化规律,土壤内摩擦角和抗剪强度两个指标与已有相关研究的结论基本一致,土壤粘聚力的变化趋势有所差异,试验结果丰富了干湿交替过程对土壤力学性质影响这一领域的研究。

干湿条件下土壤的力学性质与土壤的饱和性密切相关,目前针对饱和土的相关研究逐渐成熟,基本形成了较为统一的观点,即土壤的力学性质随着干湿交替次数的增加逐渐衰减,最终趋于稳定。同时土壤的含水状态对土壤抗剪强度也有很大的影响,不同的含水率,土壤对应的吸力存在差异,从而影响土壤的强度特性<sup>[29-30]</sup>,针对饱和性和含水率对膨胀性较弱土壤的抗剪强度变化的影响分析,以及土壤强度特性的变化规律的相关研究有待进一步探索。

## 4 结论

(1) 在土壤体积质量和含水率一定的情况下,土壤的粘聚力在第 1 次干湿交替时出现最小值,之后随着干湿交替次数的增加,粘聚力逐渐增大。

(2) 在相同条件下,土壤的内摩擦角随着干湿交替次数的增加,在第1次干湿交替时内摩擦角达到峰值,随后逐渐减小,在第7次干湿交替时出现最小值。

(3) 不同的垂直压力对土壤的抗剪强度有不同的影响。随着干湿交替次数的增加,在100 kPa的垂直压力作用下,土壤的抗剪强度受影响不明显,在200 kPa的垂直压力作用下,土壤的抗剪强度先增加,然后趋于稳定;在300 kPa和400 kPa的垂直压力作用下,土壤的抗剪强度先增加,然后降低,最后趋于稳定。

(4) 在相同干湿交替次数的前提下,土壤的抗剪强度与垂直压力呈现正相关关系;通过显著性分析可以看出不同干湿交替处理对土壤的内摩擦角的影响大于土壤粘聚力。

#### 参考文献:

- [1] 朱建强. 陕南土坎梯地垮塌的原因分析及防治对策[J]. 水土保持通报, 1994, 14(3): 44-47.
- [2] 朱建强, 李靖. 陕南膨胀土分布区土坎梯地建设探讨[J]. 中国水土保持, 1998(12): 34-35.
- [3] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [4] 杨娟, 李光录, 魏舟, 等. 陕南土坎梯地田坎强度试验研究[J]. 水土保持研究, 2016, 26(1): 360-363.
- [5] 段赫, 刘目兴, 易军, 等. 干湿交替条件下稻田土壤裂隙开闭规律[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 370-376.
- [6] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 等. 固沙植被区土壤呼吸对反复干湿交替的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6720-6727.
- [7] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
- [8] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124-132.
- [9] 李晓宇, 刘兴士, 李秀军, 等. 不同干湿交替频率对芦苇生长和生理的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 99-107.
- [10] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [11] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 模拟降雨条件下坡面细沟形态演变与量化方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 51-58.
- [12] 张秀敏, 陈先江, 侯扶江. 陇东典型草原不同坡向土壤呼吸对模拟降雨的短期响应[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1820-1824.
- [13] 蔡强国. 冀西北黄土丘陵区复合农林业与水土保持综合技术研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [14] 曹世雄, 陈莉, 高旺盛. 黄土丘陵区软坎梯田复式配置技术[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1443-1449.
- [15] 罗冲, 殷坤龙, 周春梅, 等. 膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 635-638.
- [16] 陈翔, 张福海, 张晓阳, 等. 干湿循环效应对纤维膨胀土抗剪强度室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19): 175-179.
- [17] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949-954.
- [18] 勾丽杰, 胡甜, 吴亮. 干湿循环对路基不同液限黏土强度影响研究[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 64-67.
- [19] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727-731.
- [20] 徐丹, 唐朝生, 冷挺, 等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 286-296.
- [21] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和和重塑黏土干湿循环特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1862-1867.
- [22] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- [23] Yazdandoust F, Yasrobi S S. Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays[J]. Applied Clay Science, 2010, 50(4): 461-468.
- [24] Kalkan E. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume[J]. Applied Clay Science, 2011, 52(4): 345-352.
- [25] 韦秉旭, 黄震, 高兵, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 127-130, 140.
- [26] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [27] 杨和平, 肖夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2005, 2(2): 1-5, 12.
- [28] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 934-939.
- [29] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915-1918.
- [30] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干—湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209.