

斥水红黏土的增湿强度特性研究^①

杨松, 吴玉琴, 周明凯

(云南农业大学水利学院, 昆明 650201)

摘要: 在红黏土中加入十八胺使其由亲水变为斥水, 分别对亲水和斥水土进行不同容重下增湿和不增湿直剪试验, 通过试验对不增湿条件下红黏土由亲水变为斥水后的抗剪强度变化规律及增湿对亲水和斥水红黏土抗剪强度的影响展开研究。试验结果表明: 不增湿条件下, 亲水土壤变为斥水后其强度会降低, 且随着正应力的增大斥水土壤抗剪强度降低越明显; 增湿对亲水土壤影响较大, 而对斥水土壤的影响则较小。随着容重的增大, 亲水与斥水土的抗剪强度都会增大, 增湿对两类土壤的影响随着容重和正应力会发生改变, 利用土壤的斥水特性来提高土壤增湿条件下的抗剪强度时, 需要综合考虑土壤的容重及所处的应力状态。

关键词: 斥水土; 抗剪强度; 增湿; 容重

中图分类号: S147.2 **文献标志码:** A

Study on Wetting Strength Characteristics of Water Repellency Red Clay

YANG Song, WU Yuqin, ZHOU Mingkai

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this study, octadecylamine was added into red clay to change its state from hydrophilic into repellent. Direct shear tests on hydrophilic and repellent soils with and without wetting were carried out under different dry densities. Moreover, the variation in the shear strength of red clay without wetting during the transition from hydrophilic soil to repellent soil were investigated, and the influences of wetting on the shear strengths of hydrophilic and repellent soils were tested. Results demonstrated that shear strength of repellent soil without wetting was lower compared with that of hydrophilic soil and that such reduction amplitude increased with the increase in normal stress. Wetting considerably influenced the shear strength of hydrophilic soil but only slightly affected that of repellent soil. The shear strengths of both hydrophilic and repellent soils increased with the increase in dry density. The influences of wetting on hydrophilic and repellent soils were related to dry density and normal stress. Thus, comprehensive considerations should be given to the dry density and stress state of soils when improving the shear strength of wetting soils based on the characteristics of repellent soils.

Key words: Repellent soil; Shear strength; Wetting; Dry density

土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1]。当土壤中含有斥水成分或土壤颗粒被有机物包裹时, 土壤可能由亲水变为斥水^[2-3]。斥水性土壤分布很广, 从热带到亚北极地区都有发现, 并且包括了各种类型的土壤^[4]。长期以来人们对斥水土的研究更关注其不利方面, 如: 斥水性土壤会阻止水分入渗, 形成地表径流; 斥水土壤中可能形成优先流通道, 优先流的发生是由于裂隙的存在, 使地表水很快到达土壤深层, 增大了入渗面积, 造成地下水污染^[5-6]; 斥水性土壤还会影响农作物生长等^[7]。只有少部分学者关注到斥水性土壤的有利一面,

如: 增加土壤团聚体的稳定性, 减少土壤中水分的蒸发量^[8]。事实上, 站在不同的角度, 斥水性土壤不利之处也可能变成有益之处。斥水土壤阻止雨水入渗一直被认为是不利因素, 这对农作物的生长当然是毋庸置疑的, 然而, 从地质学或岩土力学的角度看, 阻止雨水入渗可以使土壤保持非饱和状态, 土壤的抗剪强度不会因为雨水的进入而减小, 有利于斜坡的稳定, 此时斥水土壤阻止雨水入渗又变成有益的一面。

降雨后雨水渗透到土壤中, 土壤中的含水率上升, 基质吸力不断减小^[9-11], 当土壤从非饱和状态变为饱和状态时, 基质吸力消失, 土壤的抗剪强度在此

^①基金项目: 国家自然科学基金项目(41867038, 41662021)资助。

作者简介: 杨松(1982—), 男, 云南昆明人, 博士, 教授, 主要从事农业水土工程方面的研究工作。E-mail: ysliff007@126.com

过程中不断减小,并可能因此导致滑坡^[12-14]。人们对土壤抗剪强度随基质吸力或含水率变化已经有了较为深刻的认识,并且提出了很多非饱和土抗剪强度公式^[15-18]。土的抗剪强度主要是通过直剪试验和三轴试验进行测试,并且可以利用轴平移技术或张力计测量土壤剪切破坏时的基质吸力,从而得到非饱和土的有效应力或应用双应力变量强度理论^[19]。但是,如果待测土壤的测试状况比较复杂,如:测量植物根系对强度的影响或水分突然入渗等,则直接用总应力反映土壤的抗剪强度^[20-21]。

除了水分对土壤强度有重要影响外,土壤的容重也是影响其强度的一个重要因素^[22-23]。Wei 等^[24]的试验结果表明:当土壤容重保持不变时,随着土壤含水率的增加,土壤的强度减小;而当含水率保持不变,土壤的容重增加,则土壤的强度也会增加。如今,各种重型机械设备用于农业生产活动,使土壤压实问题显得突出^[25-26],土壤压实后其密度会增加,并可能对农作物生长^[27]、植物根系的延伸产生负面影响^[28]。对土壤的抗剪强度而言,土壤容重增加是有利因素,而对作物生长则是不利的,当土壤

由亲水变为斥水,并且考虑水分入渗后,情况变得更加复杂。具有斥水性的土壤能有效阻止雨水入渗,如果具有一定压实度的土壤能维持其强度的同时又保持其斥水特性,则可以把其应用于边坡等一些需要防渗的地方。

本文对不同初始密度亲水和斥水土壤增湿过程中的土壤强度特性进行了研究,比较了土壤由亲水变为斥水后的强度变化规律,探讨了亲水和斥水土壤在剪切过程中水分入渗对其强度的影响。通过本文的研究可以增加人们对土壤斥水性有益方面的认识,并为利用土壤斥水性提高降雨条件下的土坎、土坡稳定性提供相应的试验基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自云南省昆明市,土样为红褐色,取土深度为 0.5 m,试验前,将土样风干、碾碎,过 2 mm 筛。本文采用土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)对土样进行基本物理性质的测定,得到土样的基本物理指标(表 1)。

表 1 供试土壤基本物理参数
Table 1 Basic physical properties of tested soil samples

土壤类型	比重 G_s	液限 $W_L(\%)$	塑限 $W_p(\%)$	塑性指数 I_p	颗粒组成(g/kg)		
					>0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	<0.002mm
亲水土 NS	2.81	62.7	29.5	33.2	417	402	181
斥水土 RS	2.81	52.2	35.1	17.1	417	402	181

根据国际制土壤质地分级标准和表 1 颗粒分析试验结果,对该土命名为黏土。所用土样的最大容重是 1.42 g/cm³,把筛好的土样分为两部分,一部分用于不同容重亲水土样(natural soil, NS)的制备,另一部分用于不同容重斥水土样(repellent soil, RS)的制备。制备亲水土样时,为方便试样击实,在风干土中加水,使制样含水量为 280 g/kg,根据击实筒的体积计算出所需土样的质量后进行制样,试样分为 4 组,每组的容重分别为:1.2、1.3、1.4 和 1.5 g/cm³,每组 8 个样,共 32 个样。斥水土的制备采用在风干土中加入十八胺的方法,十八胺的加入量为 8 g/kg,为使十八胺在土中分布均匀,在风干土中加入十八胺后,先搅拌均匀,然后把土样放置到烘箱内烘烤 8 h,烘箱温度控制为 70 °C,每隔 2 h 把土样取出搅拌 5 min,直到烘烤结束。待散土冷却后再加水制样,制样含水量控制为 300 g/kg,因为容重为 1.5 g/cm³的斥水土样在击实中难成型,所以斥水土样容重分为 3

组,分别为:1.2、1.3 和 1.4 g/cm³,共 24 个样。含水量是影响土壤斥水性的一个重要因素,随着土样含水量的增大土壤斥水性可能会消失,因此,强度试验需要控制试样的初始含水量,把制好的试样放置在室外进行二次风干,风干时间为 48 h,试验时,亲水或斥水试样的含水量均为(35 ± 5)g/kg。

1.2 土样斥水性测量

土壤斥水性测量采用滴水穿透时间法(water drop penetration time, WDPT)^[29],用滴管在制好后的风干试样表面不同位置滴上 12 滴去离子水,每个水滴的体积大概是 30 μl,用秒表记录每个水滴完全渗入土样所用的时间,去掉 1 个最长时间和 1 个最短时间,取剩余 10 个时间的算术平均值即为土样在该状态下的 WDPT。1.2、1.3 和 1.4 g/cm³三种试样的 WDPT 分别为:1 424、1 610 和 1 962 s,均为严重斥水。

1.3 增湿条件下的土壤强度试验

强度试验在常规直剪仪上完成,垂直荷载分为 4

级, 分别为 100、200、300 和 400 kPa, 剪切速度控制为 0.8 mm/min, 每个容重又分为不增湿和增湿两种情况, 增湿方案为: 当试样开始剪切时, 用注射器吸取 10 ml 水从剪切盒传压板的缝隙向试样中加水, 10 ml 水使含水量提升 90 ~ 110 g/kg, 加水速度尽量缓慢均匀, 不宜过快, 注水时间控制在 3 min 以内。增湿过程中试样含水量分布不均匀且随时间不断变化, 因此本次试验中的应力变量采用总应力, 不测量基质吸力。

2 结果

2.1 红土由亲水变斥水后的强度变化

图 1 为不同容重下亲水和斥水土样的强度包线。从图中可以看出, 当红土从亲水变为斥水时, 强度包线在 τ - σ 坐标上会往下移, 即: 试样容重相同, 且正应力 ≥ 100 kPa 时, 亲水土样的强度包线总是位于斥水土样的上方。随着试样垂直荷载的增大, 亲水土样与斥水土样破坏时的剪应力差不断增大, 容重为 1.2 g/cm³ 的试样(图 1A), 在 100 kPa 的垂直荷载下亲水土样变为斥水土样时, 抗剪强度从 101 kPa 下降到 88 kPa, 抗剪强度相差 13 kPa; 在 400 kPa 的垂直荷载下, 抗剪强度则从 231 kPa 下降到 183 kPa,

抗剪强度相差 48 kPa。当试样容重变为 1.3 和 1.4 g/cm³ 时(图 1B、1C), 100 kPa 正应力下亲水和斥水抗剪强度差均为 15 kPa, 400 kPa 正应力下亲水和斥水的抗剪强度差分别为 81 kPa 和 101 kPa。由此可见, 当垂直荷载较小时, 试样由亲水变为斥水后其抗剪强度的变化量受容重影响较小。

两种土样的强度包线都呈直线, 用直线方程拟合时的 R^2 都达到 0.98 以上, 很好地满足摩尔-库伦强度方程。试验设计了容重为 1.5 g/cm³ 的土样, 亲水土样在最优含水量下可以比较容易达到此容重, 而斥水土样在增加一倍击实功的情况下仍然不能把土样击实到 1.5 g/cm³, 这主要是因为: 土样由亲水变为斥水后, 其界限含水量发生了变化, 如表 1 所示, 塑性指数 I_p 从 33.2 下降到 17.1, 而塑性指数是影响黏土击实特性的一个重要指标。

2.2 亲水与斥水红土增湿过程中抗剪强度变化

2.2.1 剪应力与水平位移关系 试样剪切过程中剪应力随剪切位移的变化关系如图 2 所示, 所有试样在剪切过程中剪应力均先增大后减小, 即: 出现了应变软化现象。亲水和斥水土样增湿的应力-剪位移关系曲线大部分位于非增湿应力-剪位移关系曲线的下方。当剪切位移相同时, 亲水土样增湿和不增湿曲线

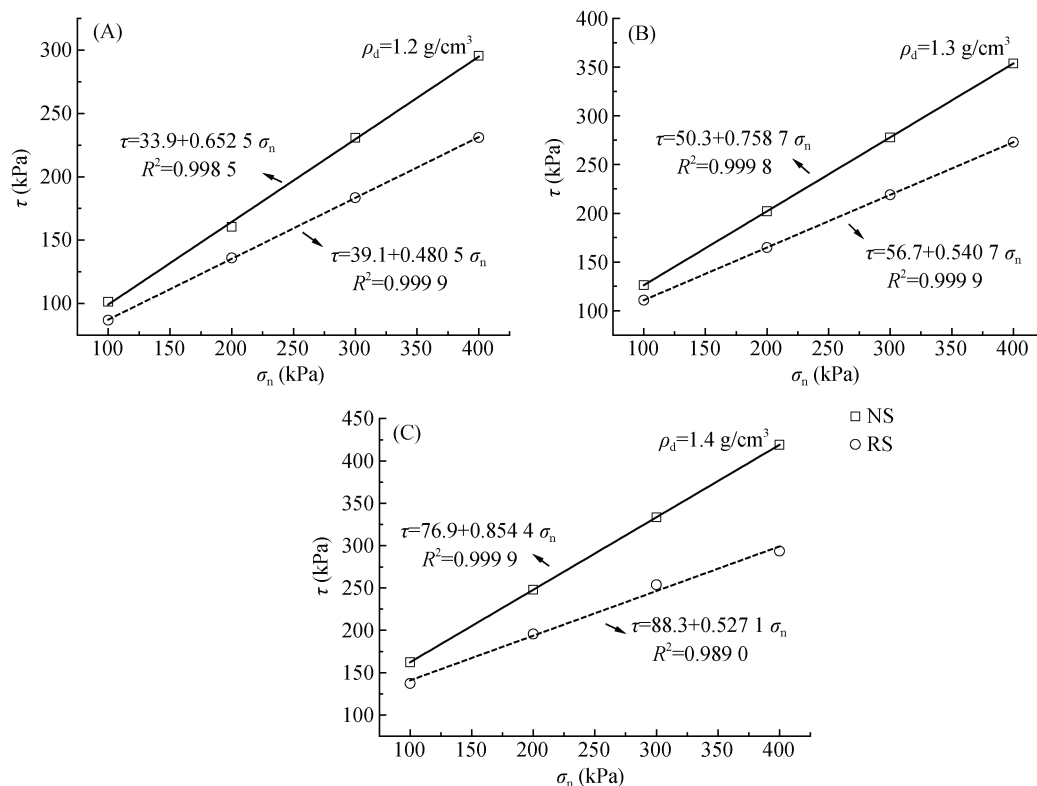


图 1 亲水土与斥水土的强度包线

Fig. 1 Strength envelopes of NS and RS

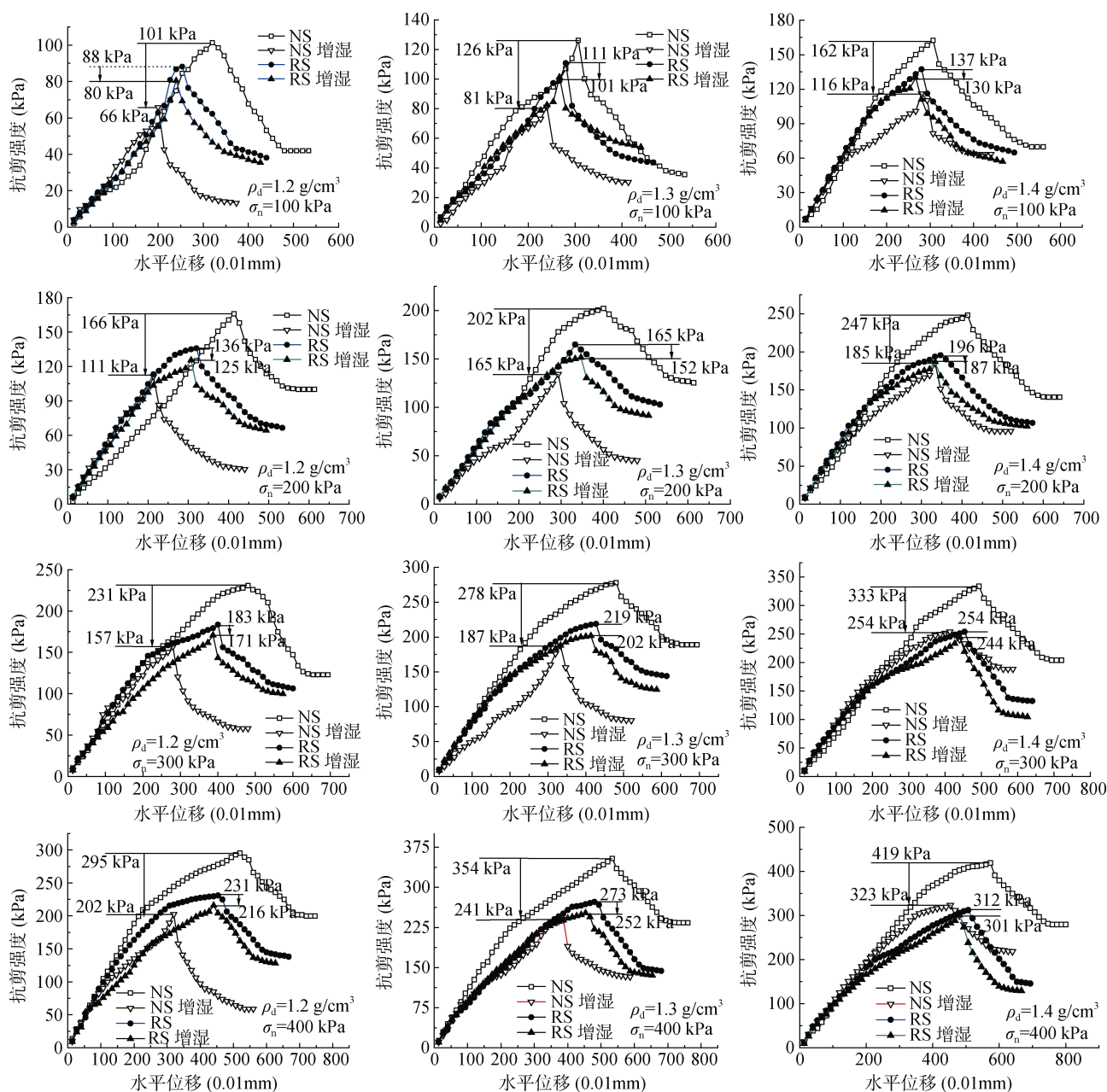


图 2 剪应力随水平位移变化关系曲线

Fig. 2 Relation curves between shear stress and horizontal displacement

所对应的剪应力差要明显大于斥水土样,这表明增湿导致亲水土样的强度损失要明显大于斥水土样。当增湿亲水试样剪应力未达到峰值时,亲水土样的应力-剪位移关系曲线比较靠近,一旦剪应力达到峰值,增湿亲水土样的应力-剪位移关系曲线迅速下降,而不增湿亲水土样的应力-剪位移关系曲线继续增大,直达到峰值后才下降,两条曲线的距离也因此拉开。斥水土样的剪应力与剪位移关系曲线在整个剪切过程中都比较靠近,表明增湿对斥水土样的影响不大。

当试样容重为 1.2 g/cm^3 时,相同的剪切速率下,增湿亲水土样最先达到峰值强度,斥水次之,增湿和

不增湿斥水土样达到峰值强度所对应的水平剪位移相差不大,不增湿亲水土样最后达到峰值强度。亲水增湿样的峰值强度值最小,斥水增湿和不增湿试样的峰值强度明显比亲水增湿样大,而亲水不增湿样的峰值强度最大。

当容重变为 1.4 g/cm^3 时,斥水增湿和不增湿试样达到峰值强度时的水平剪位移与亲水增湿样基本一致。值得注意的是,当正应力为 100 kPa 时,亲水增湿样达到峰值的水平剪位移甚至大于斥水的增湿样和不增湿样;当正应力 $\geq 200 \text{ kPa}$ 时,亲水增湿样的峰值强度和斥水样相接近;正应力为 400 kPa 时,

亲水增湿样的峰值强度甚至超过了斥水增湿样和不增湿样。由此可见, 斥水土壤防止水分入渗带来的强度优势将随着土壤容重和正应力的增大而逐渐消失。

2.2.2 增湿引起的抗剪强度损失 土样增湿造成的强度损失随正应力的变化关系如图 3 所示, 随着正应力的增大, 亲水土样增湿后的强度损失线性增大, 而斥水土样增湿后的抗剪强度损失随着正应力的增大变化不大。亲水试样在容重为 1.3 g/cm^3 、正应力

为 400 kPa 时强度损失达到最大值 113 kPa , 斥水土样也在相同的容重和正应力下达到最大值 21 kPa 。亲水样在容重为 1.2 g/cm^3 、正应力 100 kPa 时强度损失为最小值 35 kPa , 斥水试样则在容重 1.4 g/cm^3 、正应力 100 kPa 时达到最小值 7 kPa 。亲水样强度损失的波动范围达到 78 kPa , 而斥水样的波动范围仅为 14 kPa 。由上可知, 土壤由亲水变为斥水后可以很好地减小增湿带来的强度损失。

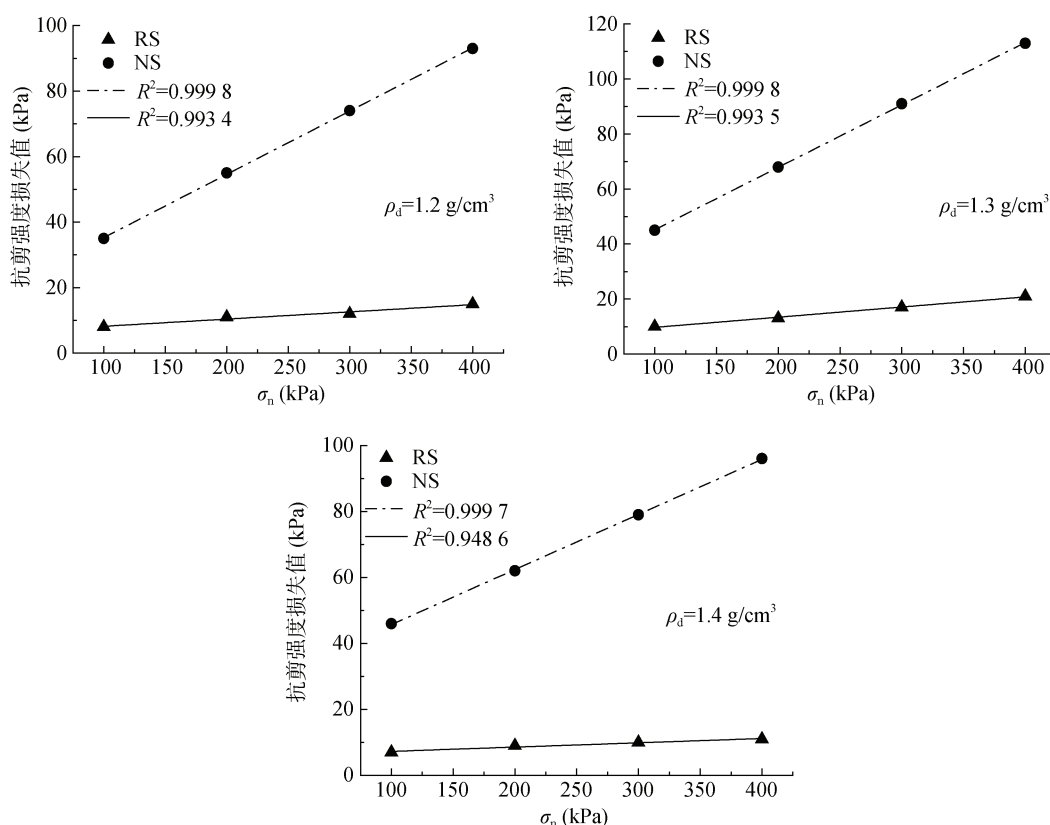


图 3 土样增湿强度损失随正应力变化关系

Fig. 3 Variations of shear strength loss of wetting samples with normal stress

2.2.3 抗剪强度参数变化规律 不同容重亲水和斥水土样增湿和不增湿条件下的抗剪强度参数如表 2 所示。随着容重的增大, 亲水和斥水土样不论增湿或不增湿, 其强度参数 c 、 ϕ 都不断增大, 亲水土样 c 、 ϕ 增大幅度较明显, 斥水土样 c 值增大较明显, 而 ϕ 值变化幅度不大。增湿对亲水土样的强度参数影响较大, 土样增湿后 c 、 ϕ 都出现了明显的下降, 其中当试样容重为 1.3 g/cm^3 时, 增湿使其强度降低最多: 黏聚力 c 降低了 22.8 kPa , ϕ 降低了 9.1° ; 而斥水土样的强度参数受增湿的影响则相对较小, 3 种容重试样 c 值减小值均为 6 kPa , 而内摩擦角降低最多的为容重 1.3 g/cm^3 时的 1.7° 。不考虑增湿, 当试样从亲水变为斥水时, 内摩擦角 ϕ 值下降, 而黏聚

力 c 值反而增大。

3 讨论

3.1 斥水土壤的强度特性

当土壤由亲水变为斥水后, 最显著的变化是透水性方面, 但由于土壤颗粒的界面发生了变化, 其力学性质也可能因此而变。本研究发现, 当黏土由亲水变为斥水, 其强度是降低的, 这与用玻璃珠模拟无黏性土的试验结果一致^[30]。非饱和土和饱和土的最本质区别是非饱和土由三相组成, 非饱和土间存在由气-液交界面所引起的基质吸力, 基质吸力也会使非饱和土的强度提高。从毛细定律及一些学者的试验结果都可知, 当土壤颗粒与孔隙水的接触角增大, 非饱和土

中的基质吸力减小甚至消失,这必然使得土体的强度降低,这也是土壤由亲水变为斥水后强度降低的一个主要因素。

从强度参数上看,当土壤由亲水变为斥水后,其内摩擦角减小而黏聚力提高,这个现象从亲水土壤与斥水土壤的微观角度分析可以得到解释。当土壤由亲水变为斥水后,土壤颗粒可能由斥水物质包裹,本次试验使用的斥水土是先在亲水土壤中加入十八胺,斥

水土通过加热到 70 ℃(高于十八胺熔点)搅拌,使十八胺能很好地分散并包裹土壤颗粒,这样就使得一部分土壤颗粒接触点处是十八胺,这样就会导致土壤颗粒间的摩擦强度降低,从而出现斥水土壤的内摩擦角减小的现象。十八胺虽然降低了土壤的内摩擦角,但制样时十八胺先熔化后凝固,凝固后的十八胺使土壤具有一定的胶结强度,这在一定程度上提高了土壤的 c 值,因此土壤由亲水变为斥水后, ϕ 值减小 c 值增大。

表 2 亲水和斥水土样的抗剪强度参数
Table 2 Shear strength parameters of NS and RS samples

强度参数	NS(1.2 g/m ³)		RS(1.2 g/m ³)		NS(1.3 g/m ³)		RS(1.3 g/m ³)		NS(1.4 g/m ³)		RS(1.4 g/m ³)		NS(1.5 g/m ³)	
	不增湿	增湿	不增湿	增湿	不增湿	增湿	不增湿	增湿	不增湿	增湿	不增湿	增湿	不增湿	增湿
黏聚力 c (kPa)	36.5	20.5	40.5	34.5	50.3	27.5	56.7	51.0	76.0	47.0	79.0	73.0	100	89.0
内摩擦角 ϕ (°)	32.9	24.4	25.5	24.4	37.2	28.1	28.4	26.7	40.6	34.6	30.2	29.7	45.0	36.9

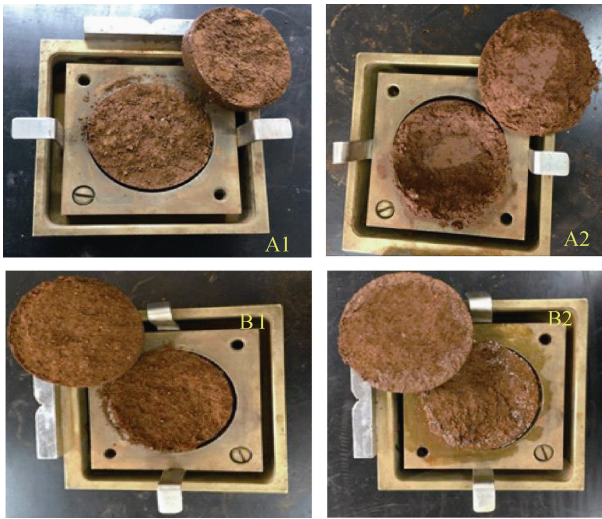
3.2 增湿对亲水、斥水土壤强度的影响

许多不良地质现象,如:边坡失稳、基坑垮塌、水土流失、泥石流等往往发生在降雨后。当水进入原本较为干燥的土壤后,土壤含水率上升,土中基质吸力减小,甚至消失,土壤强度明显下降,地质灾害就可能因此而发生。当土壤由亲水变为斥水后,水分不易进入土壤内部,因此土壤能维持较高的非饱和土强度,从而延迟甚至避免地质灾害的发生。

亲水试样增湿后,土样的剪切破坏面明显比不增湿试样潮湿很多(图 4A1、A2),这表明增湿条件下,水分渗入到了土样剪切破坏面,对其强度产生了重要影响。斥水土样增湿和不增湿条件下试样的剪切破坏面差别不大,增湿并不会使水分渗入到斥水试样内部(图 4B1、B2)。因此,增湿对斥水土壤的强度影响不大,但当土壤具有较大的容重,同时处于较高的应力状态时,斥水土增湿时的强度可能小于亲水土壤增湿时的强度,此时土壤由亲水变为斥水并不能使降雨造成的地质问题得到改善。因此,若要利用斥水土壤的斥水性防止降雨带来的不利影响,只能把斥水土壤置于低应力状态,即浅层土壤且外荷载不大的情况。

3.3 容重对亲水、斥水强度的影响

土壤容重是影响其抗剪强度的一个重要因素,许多试验结果都表明随着土壤容重的增大,土壤的抗剪强度不断增大,且强度参数 c 、 ϕ 都随之增大,当土壤从亲水变为斥水后依然符合这个规律。容重增加还可以减小水对土壤强度的降低作用,当红黏土的容重为 1.4 g/cm³、正应力为 400 kPa 时,斥水土的增湿和不增湿强度均小于亲水土增湿强度,这表明土壤由亲水变为斥水所引起的强度减小值要大于土壤由于水



(A1. 亲水试样不增湿; A2. 亲水试样增湿; B1. 斥水试样不增湿; B2. 斥水试样增湿)

图 4 土样剪切破坏面

Fig. 4 Shear failure surface of soil samples

分渗入所引起的强度减小值。当土壤容重增大时,土壤孔隙率减小,渗透系数随之减小,水分难以进入土壤孔隙,因此水对土壤强度的影响也就减小了。

如果土壤容重和所处的应力状态都比较大时,没必要利用土壤由亲水变为斥水来减小水分对土壤的影响。利用土壤的斥水性进行防渗时,需要综合考虑土壤的容重和所处的应力状态,只有当容重较小且土壤内部所承受的应力不大时,斥水土壤才能保持较理想的强度的同时很好地减小水分渗入所带来的不利影响。

4 结论

当土壤从亲水变为斥水后,其抗剪强度会降低,

其中强度参数内摩擦角 ϕ 值下降, 黏聚力 c 值有所增加。增湿会引起亲水土壤强度的明显降低, 而对斥水土壤的影响较小。随着土壤容重的增加, 亲水和斥水红黏土试样的抗剪强度都随之增大, 当试样容重为 1.4 g/cm^3 、正应力为 400 kPa 时, 斥水土的增湿和不增湿强度均小于亲水土增湿强度。因此, 利用土壤的斥水性来防止水分入渗从而提高土壤强度时, 需要综合考虑土壤的容重和所处的应力状态。

参考文献:

- [1] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性[J]. 土壤学报, 2011, 48 (2): 275-285.
- [2] 李毅, 商艳玲, 李振华, 等. 土壤斥水性研究进展[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 68-75.
- [3] Morley C P, Mainwaring K A, Doerr S H, et al. Organic compounds at different depths in a sandy soil and their role in water repellency[J]. Soil Research, 2005, 43(3): 239.
- [4] Krueger J, Böttcher J, Schmunk C, et al. Soil water repellency and chemical soil properties in a beech forest soil—Spatial variability and interrelations[J]. Geoderma, 2016, 271: 50-62.
- [5] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 477-488.
- [6] 王秋玲, 施凡欣, 刘志鹏, 等. 土壤斥水性影响土壤水分运动研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 96-103.
- [7] Madsen M D, Petersen S L, Fernelius K J, et al. Influence of soil water repellency on seedling emergence and plant survival in a burned semi-arid woodland[J]. Arid Land Research and Management, 2012, 26(3): 236-249.
- [8] Rye C F, Smettem K R J. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation[J]. Geoderma, 2017, 289: 142-149.
- [9] Fredlund D G, Xing A Q, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.
- [10] 张鹏程, 汤连生, 邓钟尉, 等. 非饱和土湿吸力与含水率的定量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1453-1457.
- [11] 刘星志, 刘小文, 陈铭, 等. 基于 3 个不等粒径颗粒接触模型的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2018(2): 651-656.
- [12] Sorbino G, Nicotera M V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides[J]. Engineering Geology, 2013, 165: 105-132.
- [13] Urciuoli G, Pirone M, Comegna L, et al. Long-term investigations on the pore pressure regime in saturated and unsaturated sloping soils[J]. Engineering Geology, 2016, 212: 98-119.
- [14] Olivares L, Damiano E, Mercogliano P, et al. A simulation chain for early prediction of rainfall-induced landslides[J]. Landslides, 2014, 11(5): 765-777.
- [15] Khalili N, Khabbaz M H. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 681-687.
- [16] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 241-245.
- [17] 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.
- [18] Schnellmann R, Rahardjo H, Schneider H R. Unsaturated shear strength of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2013, 162: 88-96.
- [19] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [20] Zhang C L, Wang X S, Zou X Y, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of Northern China's wind erosion area[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 1-10.
- [21] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157-166.
- [22] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下不同初始干密度土体的力学特性[J]. 水利学报, 2014, 39(3): 261-268.
- [23] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 6-9.
- [24] Wei J, Shi B L, Li J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. CATENA, 2018, 166: 124-133.
- [25] Sivarajan S, Maharlooei M, Bajwa S G, et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 234-243.
- [26] Alaoui A, Rogger M, Peth S, et al. Does soil compaction increase floods? A review[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557: 631-642.
- [27] Lowery B, Schuler R T. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin[J]. Soil and Tillage Research, 1994, 29(2/3): 205-210.
- [28] Unger P W, Kaspar T C. Soil compaction and root growth: a review[J]. Agronomy Journal, 1994, 86(5): 759-766.
- [29] Leelamanie D A L, Karube J, Yoshida A. Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(3): 371-375.
- [30] Byun Y H, Morato H J V, Yun T S, et al. Shear Strength of Water-Repellent Hydrophobic Granular Media[C]. Geotechnical Special Publication, Geogongress, 2012(225).