

干湿循环下云南非饱和红土土—水特性研究

黄英¹, 程富阳², 金克盛¹

(1. 昆明理工大学, 昆明 650500, 2. 国网湖北省电力有限公司远安县供电公司, 湖北 远安 444200)

摘要: 以云南红土为研究对象, 以脱湿、吸湿引起的干湿循环作为控制条件, 考虑初始干密度(1.20, 1.25, 1.30 g/cm³)、初始含水率(30.0%, 33.0%, 36.0%)、预固结压力(0.50, 100, 200 kPa)、过筛粒径(0.5, 1.0, 2.0 mm)等影响因素, 通过压力板仪法, 研究干湿循环下云南非饱和红土的土—水作用特性。结果表明: 干湿循环过程中, 不同影响因素下红土的基质吸力随含水率的增大而减小, 其土—水特征曲线呈直线型或“倒J”形, 其脱湿变化过程可以分为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿3个阶段, 对应的吸湿变化过程也可以分为快速吸湿、缓慢吸湿、稳定吸湿3个阶段。相同基质吸力下, 随初始干密度、初始含水率、预固结压力的增大, 红土的含水率增大; 随粒径的增大, 红土的含水率减小。初始干密度、预固结压力、粒径(0.5 mm除外)影响下的红土的土—水特征曲线可采用幂函数关系进行拟合, 不同初始含水率、粒径0.5 mm时的土—水特征曲线可采用线性函数关系进行拟合。红土脱湿过程的含水率高于吸湿过程的含水率, 脱湿—吸湿过程中的土—水特征曲线存在滞后现象, 其实质在于干湿循环作用下红土具有孔隙效应、瓶颈效应、角度效应的综合结果。

关键词: 云南非饱和红土; 干湿循环作用; 不同影响因素; 土—水特征曲线; 拟合关系

中图分类号: TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0097-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.015

Study on Soil-water Characteristics of Unsaturated Yunnan Laterite Under Wet-dry Cycle

HUANG Ying¹, CHENG Fuyang², JIN Kesheng¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yuan'an County Power Supply Company, Yuan'an, Hubei 444200)

Abstract: The paper take Yunnan laterite as the object, soil-water characteristics under wet-dry cycle by the pressure plate method were explored, meanwhile, factors such as initial dry density(1.20, 1.25 and 1.30 g/cm³), initial moisture content(30.0%, 33.0% and 36.0%), pre-consolidation pressure(0.50, 100 and 200 kPa), and particle size(0.5, 1.0 and 2.0 mm) were taken into consideration. The results showed that laterite's matrix suction decreased with increasing moisture content during the wet-dry cycle, and the soil-water characteristic curve was “inverted J”. The soil-water characteristic curve could be divided into three stages, which included rapid dehydration, slow dehydration, and stable dehydration, and the corresponding moisture absorption process could also be divided into three stages: rapid moisture absorption, slow moisture absorption, and stable moisture absorption. Under the same matrix suction, laterite moisture content increased with the increase of initial dry density, initial moisture content and pre-consolidation pressure, while laterite moisture content decreased with the increase of particle size. Laterite soil-water characteristic curve could be fitted by power function, while initial dry density, pre-consolidation pressure, particle size (except 0.5 mm), and soil-water characteristic curve could be fitted with a linear function. The moisture content of the laterite dehumidification process was higher than that of the moisture absorption process. There was a hysteresis in the soil-water characteristic curve during the process of moisture removal and moisture absorption. It was ascribed to the effects of pore size, bottle neck, contact angle and cyclic expansion and shrinkage of laterite under wet and dry cycles.

Keywords: unsaturated Yunnan laterite; dry-wet cycle action; different influence factors; soil-water characteristic curve; fitting relationship

长期库水位升降、气候环境变化引起的干湿循环作用是导致水库大坝、库岸边坡等土工工程发生变形、开裂、渗漏、失稳等病险问题的一个重要原因。在干湿循环过程中,土体长期处于非饱和状态,而非饱和状态下土体中气相、液相的不稳定,加上反复增湿、脱湿的干湿循环作用,导致非饱和土的土水作用更为复杂,非饱和土的工程性质远比饱和土的工程性质难于准确把握。因此,研究非饱和土的土水作用尤其是干湿循环影响下的土水作用对于深入研究非饱和土的工程性质以及病险防治具有重要意义。而云南红土广泛分布,存在大量的红土型大坝、红土型库岸边坡等红土型工程,由于红土的特殊性,年复一年的干湿循环作用引起的非饱和红土问题比其他土体更为突出,而干湿分明、降雨集中的气候特点,尤其是前几年的极端干旱气候条件,加深了云南红土的非饱和状态,非饱和红土中的土水作用更为剧烈,干湿循环作用加剧了非饱和红土的工程病险问题。因此,研究干湿循环下非饱和红土中的土水相互作用对于有效指导红土型病险工程的防治具有重要作用。

关于土体的土—水特性,卢靖等^[1]采用高速离心机法研究了不同温度和密度条件下非饱和黄土的土—水特征曲线;陈东霞等^[2]采用滤纸法研究了不同影响因素和干湿循环作用下厦门地区的残积砂质黏性土和残积黏土的土—水特性;李军等^[3]研究了土—水特征曲线滞回特性的影响因素;Adefemi 等^[4]采用压力板仪法研究了西非地区废弃垃圾场土壤的土—水特性;伊盼盼等^[5]采用压力板仪法研究了干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土—水特征曲线的影响;周葆春等^[6]利用 Fredlund-Xing 模型开展了荆门膨胀土的土—水特征曲线的特征参数分析与非饱和抗剪强度的预测研究;Vanapalli 等^[7]研究了非饱和压实冰碛土的土—水特征曲线与抗剪强度的关系;Fredlund 等^[8]开展了运用土—水特性曲线预测非饱和土的渗透系数的研究;张俊然等^[9]开展了多次干湿循环后土—水特征曲线的模拟研究;赵天宇等^[10]、刘奉银等^[11]研究了密度与干湿循环对黄土土—水特征曲线的影响等。

关于红土的土—水特性,刘小文等^[12-13]研究了不同影响因素下非饱和红土的土—水特征曲线以及基质吸力与含水率、密度之间的关系;徐润泽^[14]研究了全吸力范围内桂林红黏土的土—水特征曲线及微观结构演化规律;孙德安等^[15]、傅鑫晖等^[16]、常红帅等^[17]采用压力板仪法和滤纸法研究了桂林、柳州红黏土的土—水特征曲线;易亮^[18]采用改进的滤纸法研究了黔东南地区红黏土的土—水特征及湿化特性;叶云雪^[19]采用压力板仪法研究了江西非饱和红土的土—水特征曲线;刘艳敏^[20]研究了巴东组软岩残坡

积非饱和红黏土的土—水特征;陈伟等^[21]采用滤纸法研究了陕北非饱和红土的土—水特征曲线;唐军等^[22]采用压力板仪法研究了毕威高速公路玄武岩红土的土—水特征曲线;石振明等^[23]、郝康宁^[24]采用滤纸法研究了洞庭湖等地区网纹红土的土—水特征曲线。可见,目前对于一般红土的土—水特性主要采用滤纸法和压力板仪法进行研究。对于云南红土的土—水特性,只有张丁^[25]采用压力板仪法开展了对昆明红土的初步研究,表明随干密度的增加、含砂率的减小,红土的基质吸力增大;脱湿过程的基质吸力大于吸湿过程的基质吸力。而对于干湿循环下云南红土的土—水特性更是缺乏研究。所以,本文就针对云南红土,考虑不同影响因素,控制脱湿、吸湿的干湿循环条件,利用压力板仪法,测试分析不同影响因素下干湿循环作用对红土土—水特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验土料

试验用土选取云南昆明世博园地区的典型红土,该红土颗粒的比重为 2.77,最大干密度为 1.49 g/cm³,最优含水率为 27.4%;液限为 47.2%,塑限为 31.9%,塑性指数为 15.3;颗粒组成中粉粒含量为 45.7%,黏粒含量为 44.9%。分类属于低液限粉质红土。该红土料取样时间为 2016 年 1 月,于 2016 年 3 月完成该红土的基本特性测试,于 2016 年 8—12 月完成该红土的土—水特性测试。

1.2 试验方案

以云南昆明红土为研究对象,考虑初始干密度、初始含水率、预固结压力、过筛粒径(以下简称粒径)的影响,采用击实法,制备不同影响因素下脱湿、吸湿以及干湿循环过程中的非饱和红土试样,试样直径 70 mm、高度 19 mm。利用 GEO—Experts 压力板仪,开展云南非饱和红土的土—水特性试验,研究干湿循环条件下不同影响因素对非饱和红土的含水率和基质吸力的影响。具体试验方案见表 1。

1.3 试验开展

按照拟定的试验方案,利用 GEO—Experts 压力板仪开展干湿循环下的土—水特性试验。试验时,脱湿过程是先调整仪器,记录初始读数;再顺时针慢慢控制调节器,增加气压至拟定的基质吸力值,定时观测读数,直至红土样达到吸力平衡状态;再增加气压到下一个拟定的基质吸力值;重复上述过程至基质吸力值增加到 400 kPa。吸湿过程则逆时针慢慢控制调节器,降低气压至所需的基质吸力值,直至达到吸力平衡状态;再降低气压到下一个拟定的基质吸力值;重复上述过程至基质吸力值减小到零。这样即完成一个干湿循环过程。

表 1 非饱和红土的土—水特性试验方案

试验 方案	影响 因素	初始干密度 $\rho_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	初始含水率 $w_0/\%$	预固结压力 p/kPa	粒径 d/mm
方案 1	脱湿过程	初始干密度	1.20, 1.25, 1.30	27.0	0
		初始含水率	1.25	30.0, 33.0, 36.0	0
		预固结压力	1.30	27.0	0, 50, 100, 200
		过筛粒径	1.25	27.0	0
方案 2	吸湿过程	初始干密度	1.20, 1.25, 1.30	27.0	0
		过筛粒径	1.25	27.0	0
方案 3	干湿循环过程	初始干密度	1.20, 1.25, 1.30	27.0	0
		过筛粒径	1.25	27.0	0

2 结果与分析

土体的土—水作用特性可以用土—水特征曲线来描述,它反映了含水率与基质吸力之间的变化关系。干湿循环过程中红土的土—水特征曲线可以提取不同的土—水特征参数来衡量,脱湿过程包括 5 个参数:初始脱水斜率 K_0 、最大脱水斜率 K_m 、平均脱水斜率 K_v 、最大脱水斜率吸力 S_m 和残余含水率 w_r ;吸湿过程包括 3 个参数:初始吸水斜率 K_0' 、最大吸水斜率 K_m' 和残余含气量 θ_s' 。

初始脱水斜率指土—水特征曲线脱湿时的初始斜率,反映了土体的进气值大小;最大脱水斜率指土—水特征曲线脱湿时的最大斜率,即土—水特征曲线下降段斜率的最大值,反映了土体的脱水速率和持水性能;平均脱水斜率指土—水特征曲线脱湿时的平

均斜率(初始斜率除外),反映了曲线无明显的快速下降段时红土样脱水的平均速率;最大脱水斜率吸力指土—水特征曲线快速下降段取得最大斜率时对应的基质吸力值,即饱和度下降最快时的基质吸力;残余含水率指土—水特征曲线快速下降段斜率最大处的切线和高吸力范围内曲线切线的交点所对应的含水率值。初始吸水斜率指土—水特征曲线吸湿时的初始斜率,最大吸水斜率指土—水特征曲线吸湿时的最大斜率,残余含气量指吸湿过程中当基质吸力减小至零时对应的土—水特征曲线上的含水率与脱湿时的初始含水率的差值。

2.1 脱湿过程中非饱和红土的土—水特性

2.1.1 初始干密度的影响 图 1 为不同初始干密度 ρ_d 下,脱湿过程中红土的土—水特征曲线以及土—水特征参数。

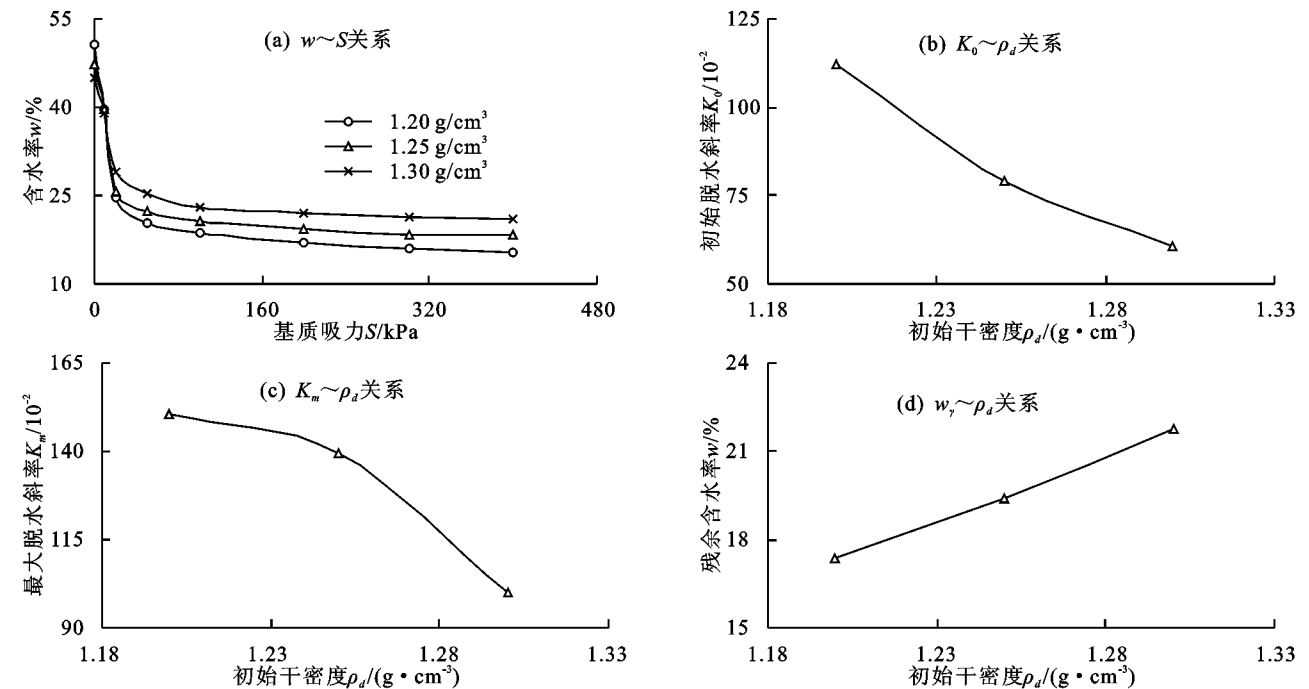


图 1 不同初始干密度下红土脱湿过程的土—水特征曲线及土—水特征参数

从图 1 可以看出,脱湿过程中,无论初始干密度的大小,红土的基质吸力随含水率的增大而减小;土—水特征曲线呈现出“倒 J”形,其变化过程可以分

为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿 3 个阶段。土—水特征曲线的快速脱湿阶段,基质吸力很小范围的变化引起对应含水率的极大变化,这时初始干密度对基质

吸力的影响很小,对含水率的影响很大。缓慢脱湿阶段,随基质吸力即气压的增加,基质吸力较大的变化范围引起对应含水率的变化范围较小,这时初始干密度对基质吸力的影响大于对含水率的影响。稳定脱湿阶段,随基质吸力的进一步增大,基质吸力更大的变化范围引起对应含水率的变化范围进一步减小,这时初始干密度对基质吸力的影响远大于对含水率的影响。当初始干密度分别为 1.20, 1.25, 1.30 g/cm^3 时,土-水特征曲线的快速脱湿阶段,在基质吸力小于 20 kPa 范围内,红土含水率的减小程度分别达 49.6%, 46.1%, 35.7%; 缓慢脱湿阶段,基质吸力在 20~100 kPa 范围内,含水率减小程度分别达 27.6%, 19.8%, 20.4%; 稳定脱湿阶段,基质吸力在 100~400 kPa 范围内,含水率减小程度分别达 17.2%, 11.3%, 8.6%。达到相同的基质吸力,初始干密度越大,红土的含水率越大,200 kPa 基质吸力对应的含水率分别按 17.1%, 19.3%, 31.9% 增大。随初始干密度的增

大,脱湿时红土土-水特征曲线的初始脱湿斜率和快速下降段的最大脱水斜率都减小,残余含水率增大。说明初始干密度越大,红土试样的进气值越高,下降段的脱水速率越小,与张丁^[25]、张雪东^[26]的研究结果类似。这是因为土的初始干密度较小时,土颗粒排列较松散,土样内部结构的孔隙空间较大且连通性较好,对水分的束缚能力较弱,在受到吸力的作用下脱水时土样中水分排出较容易,在较小吸力的驱动下水分即被排出,因而进气值较小,在饱和度降低过程中的脱水速率也较快,进而也就导致了当基质吸力较高时残余含水率较低;而相对应的初始干密度较大时,土样内部孔隙较小,并存在一定的微孔隙,微孔隙中的孔隙水不易排出,需要较大的吸力才能使其挤出。

2.1.2 初始含水率的影响 由图 2 可知,初始含水率组试验之前,试样并未饱和,因此初始状态下非饱和红土样中已具有一定的基质吸力值,所以图 2(a)中横坐标初始值为 S_0 ,而不是 0。

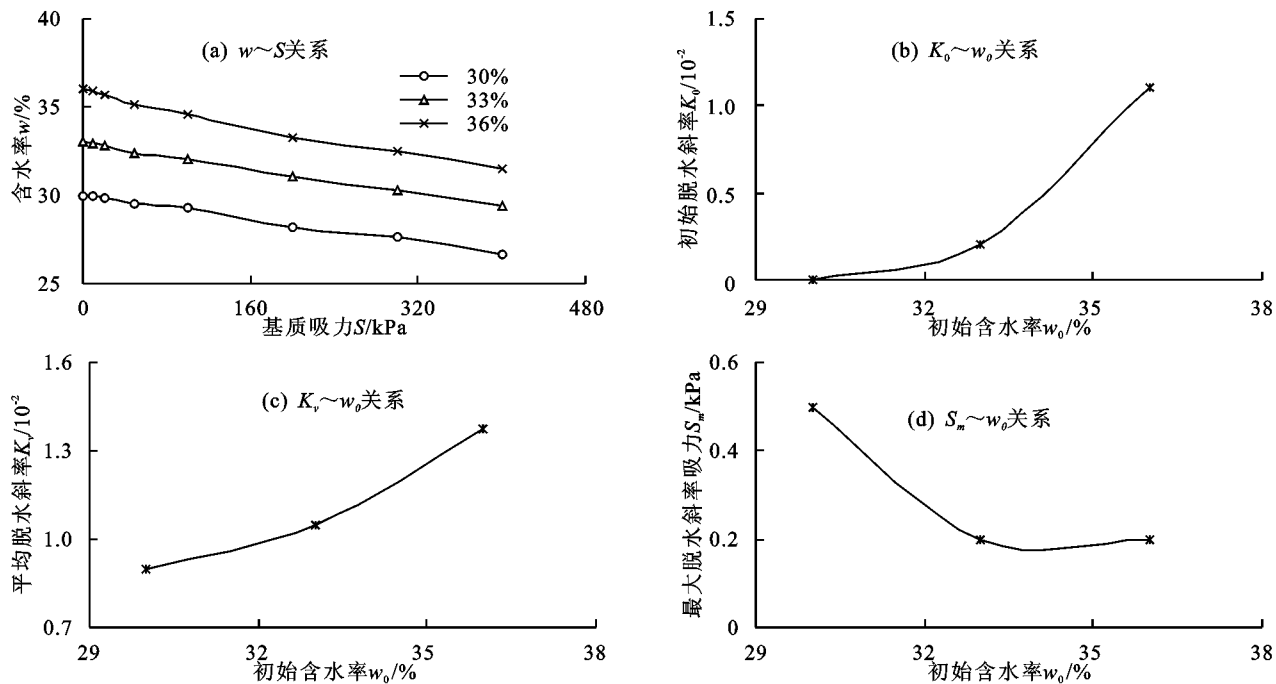
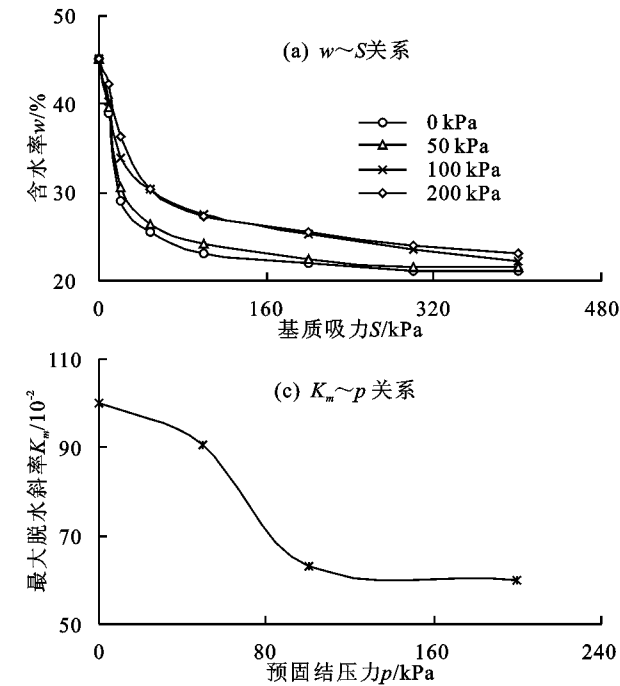


图 2 不同初始含水率下红土脱湿过程的土-水特征曲线及土-水特征参数

从图 2 可以看出,脱湿过程中,不同初始含水率下,红土的基质吸力随含水率的增加逐渐减小;土-水特征曲线呈现出直线型变化趋势。当初始含水率分别为 30.0%, 33.0%, 36.0% 时,基质吸力在 20~400 kPa 范围内,对应红土含水率的减小程度分别达 10.8%, 10.3%, 11.8%。达到相同的基质吸力,初始含水率越大,对应红土的含水率相应增大,200 kPa 基质吸力对应的含水率分别按 28.2%, 31.1%, 33.2% 增大。随初始含水率的增大,脱湿时红土土-水特征曲线的初始脱水斜率和平均脱水斜率都增加,最大脱水斜率吸力减小。说明初始含水率越大,红土试样的进气值越低,脱水速率越大,最大脱水速率对应的基质吸力区段越小,土样的

持水能力越弱。这与胡波^[27]、刘小文等^[13]的研究结论类似,但与伊盼盼等^[5]的结论相反,这是因为文献[5]拟定的 2 组初始含水率位于最优含水率的两侧,当初始击实含水率低于最优含水率时,土体中存在大孔隙,可塑性较差,使得进气值较小,容易脱水;当初始击实含水率高于最优含水率时,土体可塑性较好,孔隙尺寸小且分布较均匀,因而进气值较高,不容易脱水。而在本试验中,试验红土样的初始含水率均大于最优含水率,土样可塑性好,当初始干密度相同时,红土样中的孔隙大小一定,在较高的初始含水率下压实制样,使得土样中包裹颗粒的水膜较厚,孔隙中含水较多,在较低的基质吸力下就能很容易排水,所以初

始含水率越大,进气值越低。另外,可能是由于开展初始含水率影响的试验时,土样试验前未进行饱和,土样中原本就存在气体,也就存在小范围的基质吸力,因而在试验过程中随吸力的逐渐施加,排出的水分总量不大,土—水特征曲线的斜率变化也不大,即



脱水速率变化不大,没有明显的快速下降段,所以此处用曲线平均斜率分析,残余含水率也无法获取。

2.1.3 预固结压力的影响 图 3 为不同预固结压力 p 下脱湿过程中红土的土—水特征曲线及土—水特征参数。

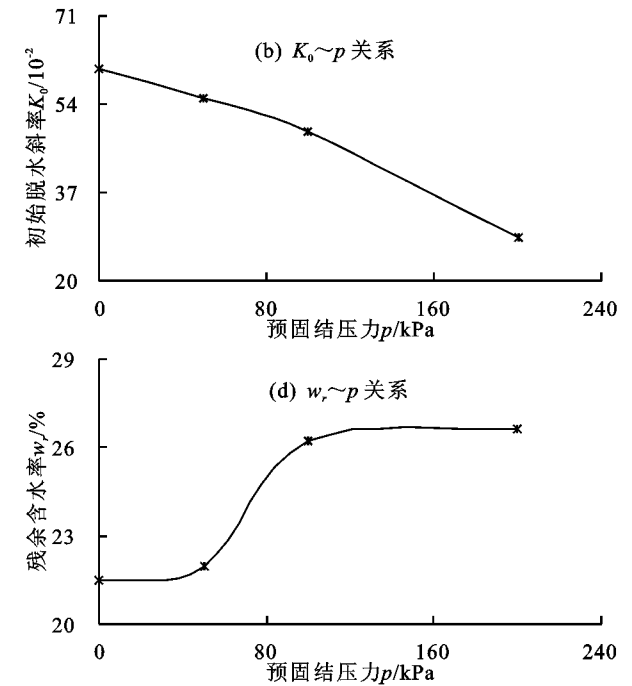


图 3 不同预固结压力下红土脱湿过程的土—水特征曲线及土—水特征参数

从图 3 可以看出,脱湿过程中,无论预固结压力大小,红土的基质吸力随含水率的增大而减小;土—水特征曲线呈现出“倒 J”型,其变化过程可以分为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿 3 个阶段。土—水特征曲线的快速脱湿阶段指随基质吸力的增大引起对应含水率快速减小,这时预固结压力对基质吸力的影响很小,对含水率的影响很大。缓慢脱湿阶段指随基质吸力的增大引起对应含水率的缓慢减小。稳定脱湿阶段指随基质吸力的进一步增大引起含水率稳定减小。当预固结压力分别为 0, 50, 100, 200 kPa 时,快速脱湿阶段,基质吸力在 10~50 kPa 范围内,红土含水率的减小程度分别达 34.8%, 33.0%, 24.5%, 28.1%;缓慢脱湿阶段,基质吸力在 50~200 kPa 范围内,含水率的减小程度分别达 13.7%, 15.4%, 16.8%, 15.7%;稳定脱湿阶段,基质吸力在 200~400 kPa 范围内,含水率的减小程度分别达 3.9%, 4.4%, 11.9%, 9.7%。说明预固结压力越高,土—水特征曲线达到稳定减小阶段所对应的基质压力越大,对应含水率越小。而达到相同的基质吸力,预固结压力越大,红土的含水率越大,400 kPa 基质吸力对应的含水率分别按 21.1%, 21.4%, 22.3%, 23.1% 增大。

随预固结压力的增大,脱湿时红土土—水特征曲线

的初始脱水斜率和快速下降段的最大脱水斜率都明显减小,残余含水率增大。说明预固结压力越大,红土试样的进气值越高,下降段的脱水速率越小,这与孟长江^[28]、刘艳华等^[29]的结论类似。试样在不同压力下进行固结时,试样中孔隙的大小不同,高固结压力下土颗粒更容易发生移动、错位,重新排列使土样更容易被压密,进而使孔隙尺寸更小,影响水在土中的运移,排水更困难,因此进气值更高,脱水速率更慢,土—水特征曲线更平缓,相应的残余含水率也更大。但与刘艳华等^[29]试验结果的不同之处在于,本次试验中不同预固结压力下的土—水特征曲线并没有重合的趋势。这是因为预固结的方法和仪器测量范围不同所致。刘艳华等^[29]的试验为了探讨外力对土—水特征曲线的影响,进行了有压和无压条件下的对比试验,有压是指饱和及试验的过程中土体受到约束不产生膨胀,孔隙比保持不变,无压是指土体自由膨胀饱和,变形不受外界约束,因此 2 组试样饱和后的含水率已经不同,无压条件下的含水率大于有压条件下的含水率,但在施加吸力时无压条件下土样的脱水速率却大于有压条件下的脱水速率,进而排出水量较多,以致高吸力时其含水率接近于有压条件下土样的含水率;另外,高吸力条件下应力状态的影响明显小于低吸力的

影响,因此在基质吸力施加至很高(>600 kPa)时,无论 2 组试样的初始含水率大小,残余含水率都很接近,2 条曲线趋于重合。而在本次试验中,饱和过程都是在受到约束状态下进行,饱和后几组试样的含水率相同,预固结时受到的压力不同,土样内部的孔隙结构就会不同,之后随基质吸力的增加排水量也就不

同,残余含水率出现了差异;再加上基质吸力最大只增加至 400 kPa,因此高吸力的影响并未占据主导,几组土—水特征曲线定然不会趋于重合。

2.1.4 过筛粒径的影响 图 4 为不同过筛粒径 d 下、脱湿过程中红土的土—水特征曲线及土—水特征参数。

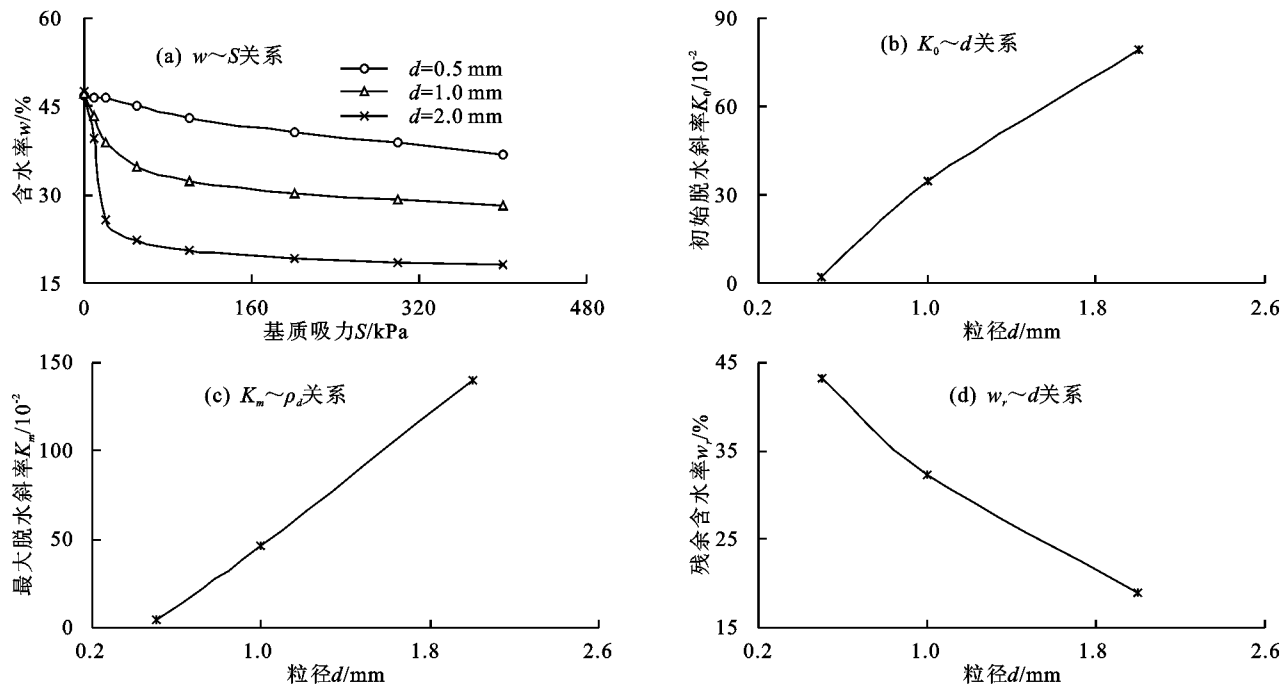


图 4 不同粒径下红土脱湿过程的土—水特征曲线及土—水特征参数

从图 4 可以看出,脱湿过程中,不论粒径大小,红土的基质吸力随含水率的增大而减小。但粒径不同,土—水特征曲线形状差异明显,粒径为 0.5 mm 时,红土的土—水特征曲线近似于直线型,基质吸力在 20~400 kPa 范围内,红土的含水率均匀减小,其减小程度为 20.8%。粒径为 1.0, 2.0 mm 时,红土的土—水特征曲线呈“倒 J”形,其变化过程可以分为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿 3 个阶段。土—水特征曲线的快速脱湿阶段,基质吸力小于 20 kPa 范围内,红土含水率的减小程度分别为 18.0%, 46.1%;缓慢脱湿阶段,基质吸力在 20~100 kPa 范围内,含水率的减小程度分别为 16.8%, 19.8%;稳定脱湿阶段,基质吸力在 100~400 kPa 范围内,含水率的减小程度分别为 13.2%, 11.3%。达到相同基质吸力时,粒径越大,红土的含水率越小,基质吸力 200 kPa 下,红土的含水率从粒径 1.0 mm 时的 30.2%减小为粒径 2.0 mm 时的 19.3%。

随粒径的增大,脱湿时,红土土—水特征曲线的初始脱水斜率和快速下降段的最大脱水斜率都明显增大,残余含水率减小。说明粒径越大,红土样的进气值越低,下降段的脱水速率越大,这与胡波^[27]、刘

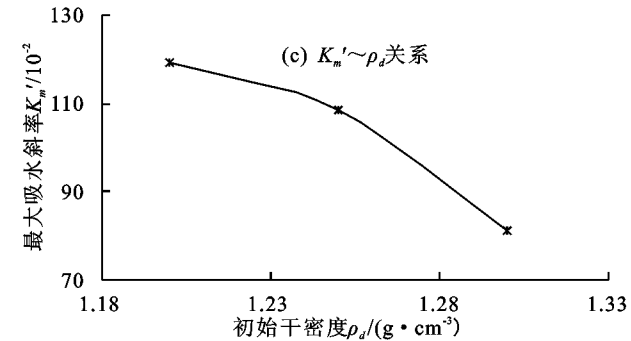
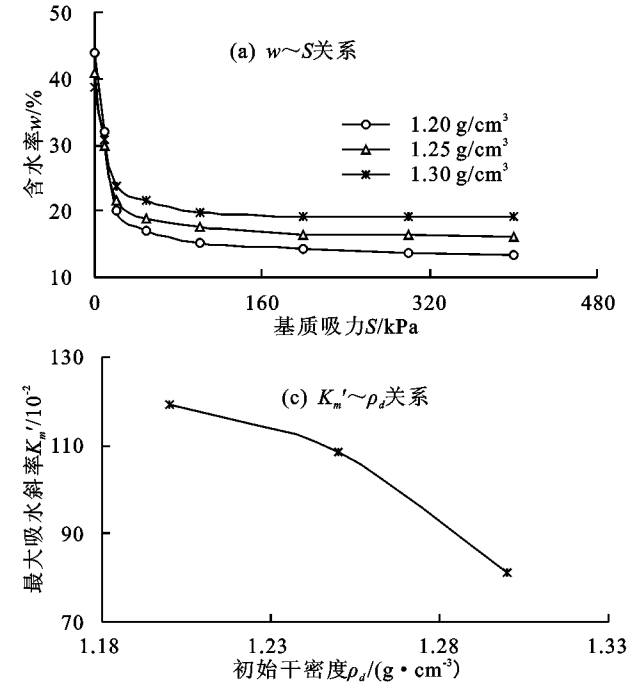
小文等^[12]的结论类似。这是因为:一方面,粒径较小时,土样中细颗粒含量较多,孔隙较小,孔隙连通性差。脱湿时,气体进入土体中的孔隙较难,只有在较大的进气值下才能排出孔隙水,脱水速率较小,持水能力较强,最终只能缓慢排出较少的孔隙水,残余含水率较大,因而不存在含水率迅速下降的阶段,曲线总体呈现直线型。另一方面,粒径较大,制样过程中易于形成大孔隙和连通孔隙。土样脱湿时,气体先进入连通大孔隙中快速排除孔隙水,因此土—水特征曲线出现快速下降段;随吸力的增大,连通大孔隙中的水明显减少,气体逐渐进入小孔隙中缓慢排出孔隙水,因此土—水特征曲线出现缓慢下降趋于稳定的阶段。曲线总体上呈现“倒 J”形。

2.2 吸湿过程中非饱和红土的土—水特性

2.2.1 初始干密度的影响 图 5 为不同初始干密度 ρ_d 下、吸湿过程中红土的土—水特征曲线及土—水特征参数。

从图 5 可以看出,吸湿过程中,无论初始干密度大小,红土的基质吸力随含水率的增大而减小;土—水特征曲线呈现出“倒 J”形,与脱湿变化过程相对应,吸湿变化过程可以分为快速吸湿、缓慢吸湿、稳

定吸湿3个阶段。当初始干密度分别为 1.20,1.25,1.30 g/cm³ 时,土—水特征曲线的快速吸湿阶段,在基质吸力小于 20 kPa 范围内,红土含水率的减小程度分别达 51.8%,45.0%,36.7%;缓慢吸湿阶段,基质吸力在 20~100 kPa 范围内,含水率减小程度分别达 21.7%,16.8%,15.5%;稳定吸湿阶段,基质吸力在 100~400 kPa 范围内,含水率减小程度分别达 11.4%,6.8%,3.5%。达到相同的基质吸力,初始干密度越大,红土的含水率越大。当初始干密度分别按



1.20,1.25,1.30 g/cm³ 增大时,200 kPa 基质吸力对应的含水率分别按 16.2%,18.6%,21.3% 增大。随初始干密度的增大,红土的土—水特征曲线的初始吸水斜率、最大吸水斜率和残余含气量都减小,这与脱湿时的初始脱水斜率、最大脱水斜率、残余含水率的变化趋势一致,因为吸湿时残余含气量的减小对应于脱湿时残余含水率的增大。但吸湿时红土的土—水特征参数小于脱湿时的相应参数,体现出水分在红土中的迁移难度吸湿过程大于脱湿过程。

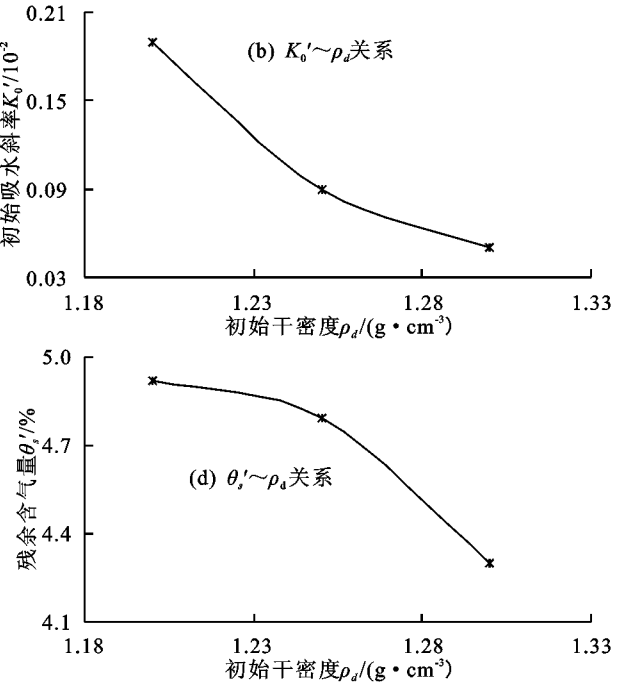


图 5 不同初始干密度下红土吸湿过程的土—水特征曲线及土—水特征参数

2.2.2 过筛粒径的影响 图 6 为不同过筛粒径 d 下,吸湿过程中红土的土—水特征曲线及土—水特征参数。

从图 6 可以看出,吸湿过程中,不论粒径大小,红土的基质吸力随含水率的增大而减小。但粒径不同,土—水特征曲线形状差异明显,粒径为 0.5 mm 时,红土的土—水特征曲线近似于直线型,基质吸力在 20~400 kPa 范围内,红土的含水率均匀减小,其减小程度为 19.6%。粒径为 1.0,2.0 mm 时,红土的土—水特征曲线呈“倒 J”形,与脱湿变化过程相对应,吸湿变化过程可以分为快速吸湿、缓慢吸湿、稳定吸湿 3 个阶段。土—水特征曲线的快速吸湿阶段,基质吸力小于 20 kPa 范围内,红土含水率的减小程度分别为 19.5%,45.0%;缓慢吸湿阶段,基质吸力在 20~100 kPa 范围内,含水率的减小程度分别为 12.3%,16.8%;稳定吸湿阶段,基质吸力在 100~400 kPa 范围内,含水率的减小程度分别为 10.8%,6.8%。达到相同基质吸力时,粒径越大,红土的含水率越小,基质吸力 200 kPa 下,红土的含水率从粒

径 1.0 mm 时的 29.8% 减小为粒径 2.0 mm 时的 18.6%。随粒径的增大,红土土—水特征曲线的初始吸水斜率减小,最大吸水斜率和残余含气量增大。这是因为粒径越大,红土样中细颗粒含量越少,比表面积越小,对水分子的吸附交换能力越弱,因此初始吸水斜率越小;同时,粒径越大,孔隙通道越大,吸湿时水分更容易楔入红土的孔隙中,因此最大吸水斜率越大。

2.3 干湿循环过程中非饱和红土的土—水特性
2.3.1 初始干密度和过筛粒径的影响 图 7 为不同初始干密度 ρ_d 、不同过筛粒径 d 下,干湿循环过程中红土的土—水特征曲线。

从图 7 可以看出,干湿循环过程中,不同初始干密度、不同粒径下,脱湿、吸湿条件下,红土的土—水特征曲线的变化趋势一致,但都不重合,产生滞回圈,脱湿—吸湿过程存在滞后现象,脱湿曲线高于吸湿曲线。相同基质吸力下,红土的脱湿含水率大于吸湿含水率;相同含水率下,脱湿过程中红土的基质吸力大于吸湿过程中的基质吸力。

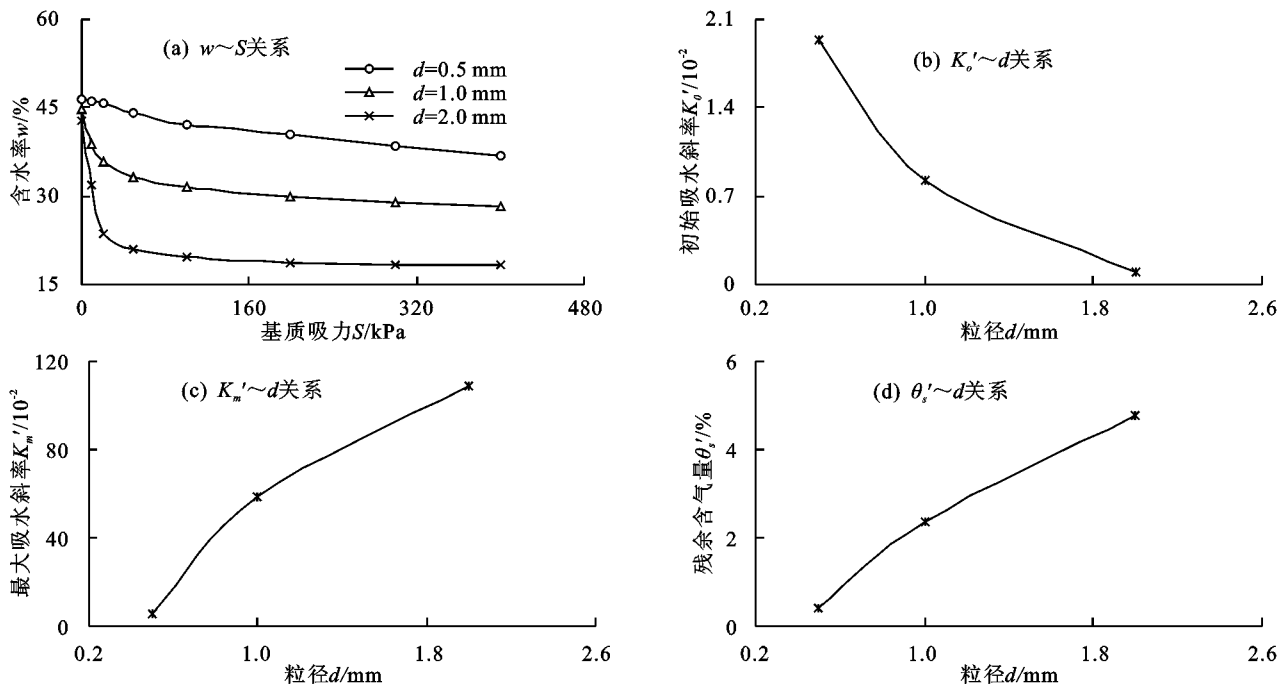


图 6 不同粒径下红土吸湿过程的土-水特征曲线及土-水特征参数

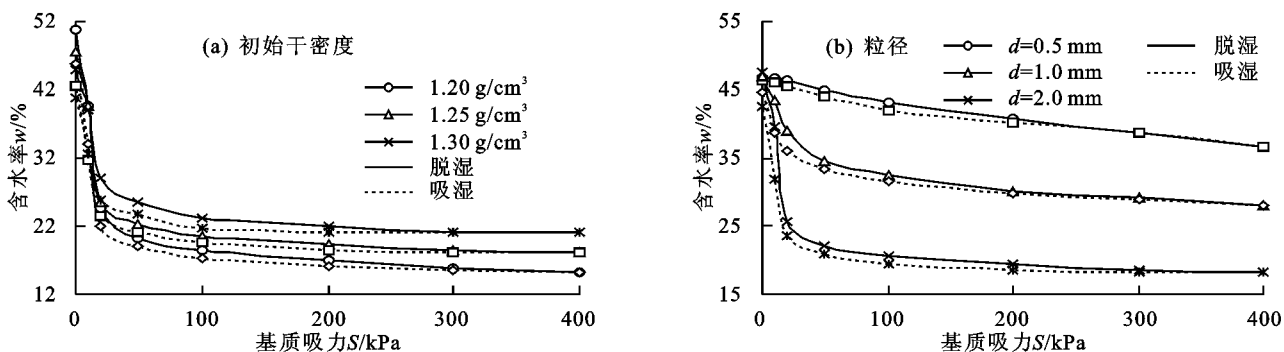


图 7 干湿循环过程中红土的土-水特征曲线

2.3.2 土-水特征曲线的滞后性 干湿循环条件下的脱湿-吸湿过程中,红土土-水特征曲线的脱湿曲线与吸湿曲线之间存在滞后现象,其原因在于干湿循环过程中红土试样具有孔隙效应、瓶颈效应和角度效应的综合作用结果。

孔隙效应是指干湿循环过程中,由于红土中的孔隙大小不同、连通情况不同,导致红土在脱湿时的排水能力和在吸湿时的吸水能力不同。孔隙越大,连通性越好,排水、吸水能力越强;孔隙越小,连通性越差,排水、吸水能力越弱。脱湿过程中,水分的排出主要由红土中的最小孔隙控制,脱湿时气体需要通过红土中的最小孔隙才能排除孔隙水,需要的气压更大;而吸湿过程中,水分的进入主要由红土中的最大孔隙控制,吸湿时气体只需通过红土中的最大孔隙就能吸入水分,需要的气压相比较小。因此,相同含水率下,脱湿过程的基质吸力大于吸湿过程的基质吸力;相同基质吸力下,脱湿过程的含水率高于吸湿过程的含水率。

瓶颈效应是指干湿循环的脱湿过程中,红土中的孔

隙不均匀的闭合收缩减小到类似于瓶颈约束的现象。由于红土的脱湿收缩、吸湿膨胀的循环胀缩特性,导致脱湿过程、吸湿过程中红土的孔隙收缩、膨胀运动方向相反,引起脱湿、吸湿的孔隙大小、连通情况不同。吸湿时,与脱湿相同的基质吸力值下,由于脱湿产生的瓶颈约束效应,导致水分难于楔入红土的孔隙中。因此,吸湿过程的含水率低于脱湿过程的含水率。

角度效应是指干湿循环过程中,脱湿时水分迁出红土的收缩角和吸湿时水分迁入红土的扩散角不同,从而引起红土颗粒对水分的滞留能力不同。相同基质吸力下,脱湿过程中水分的迁出引起收缩角减小,吸湿过程中水分的迁入引起扩散角增大,扩散角的增大对应的表面张力较小,进而对水的滞留能力较弱。因此,吸湿过程的含水率低于脱湿过程的含水率。

2.4 干湿循环下非饱和红土土-水特征曲线的拟合

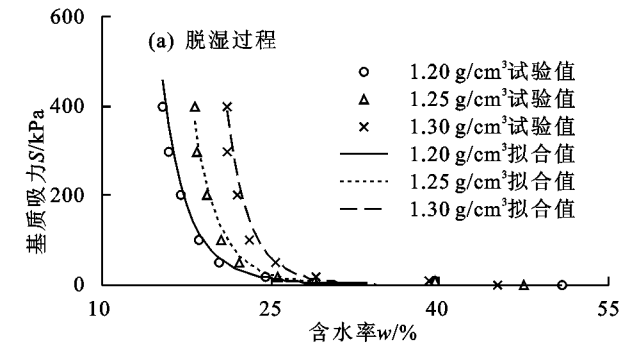
2.4.1 土-水特征曲线的拟合关系 拟合干湿循环过程中非饱和红土土-水特征曲线的变化趋势,在初始干密度、预固结压力、过筛粒径($d = 0.5 \text{ mm}$ 除

外)等因素影响下,脱湿过程、吸湿过程中,红土土—水特征曲线的基质吸力与含水率的关系可统一用幂函数拟合:

$$S=aw^{-b}$$
 (1)

而在不同初始含水率、粒径 $d=0.5\text{ mm}$ 时,脱湿过程、吸湿过程中,红土土—水特征曲线的基质吸力与含水率关系可用线性函数拟合:

$$S=aw+b$$
 (2)



式中: S 为红土的基质吸力(kPa); w 为红土的含水率(%); a 、 b 为拟合参数。

2.4.2 不同影响因素下的拟合结果

(1)初始干密度的影响 图 8 为不同初始干密度下,干湿循环过程中红土土—水特征曲线的试验值与幂函数关系拟合值的对比结果,表明相关系数平方为 $0.80\sim 0.95$,拟合程度较高,且吸湿过程的拟合程度高于脱湿过程。

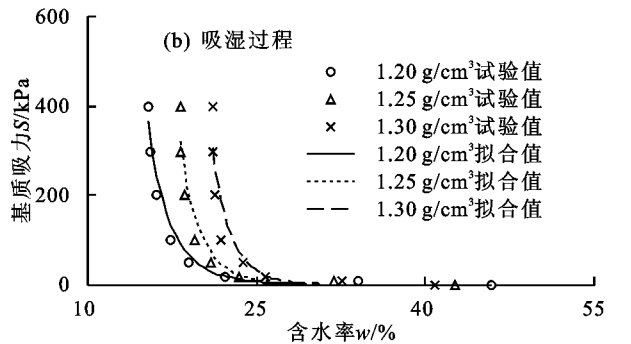


图 8 不同初始干密度下红土的基质吸力和含水率拟合曲线

(2)过筛粒径的影响 图 9 为不同粒径下,干湿循环过程中红土土—水特征曲线的试验值与幂函数关系、线性关系拟合值的对比结果。从图 9 可以看出,

基质吸力和含水率拟合曲线的相关系数平方为 $0.76\sim 0.99$,拟合程度较高,吸湿过程的拟合程度总体上高于脱湿过程。

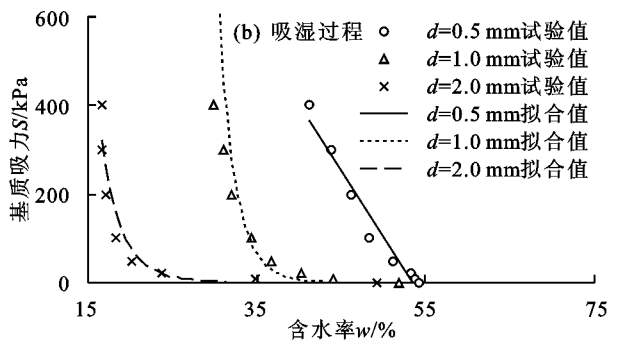
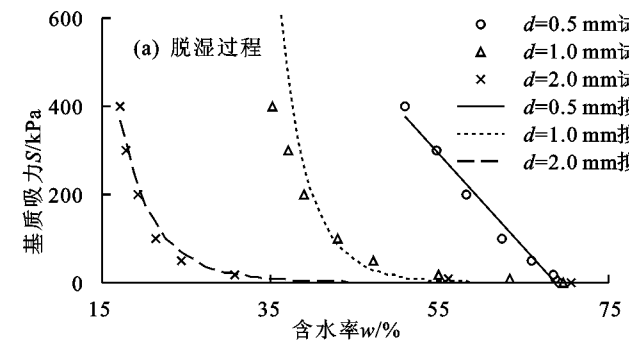


图 9 不同粒径下红土的基质吸力和含水率拟合曲线

(3)初始含水率的影响 图 10(a)为不同初始含水率下,脱湿过程中红土土—水特征曲线的试验值与线

性关系拟合值的对比结果,表明相关系数平方在 0.98 以上,拟合程度高。

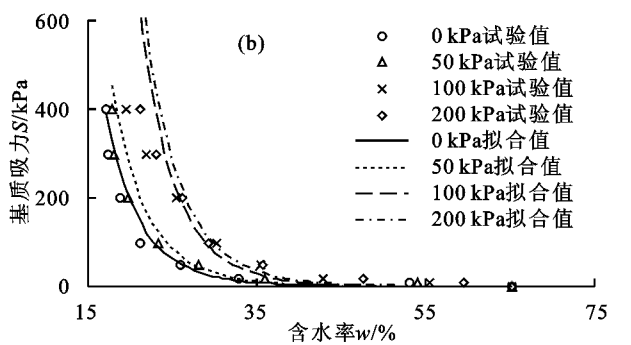
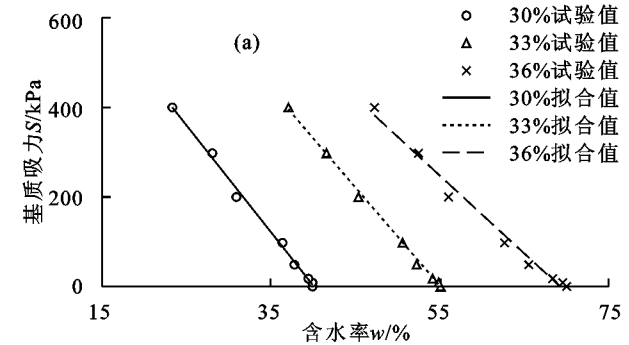


图 10 脱湿过程中红土的基质吸力和含水率拟合曲线

(4)预固结压力的影响 图 10(b)为不同预固结压力下,脱湿过程中红土土—水特征曲线的试验值与幂函数关系拟合值的对比结果,表明相关系数平方为 $0.72\sim 0.82$,相比初始干密度的影响,预固结压力影响下的拟合程度较低。

3 结论

(1)干湿循环过程中,红土的土—水作用特性受初始干密度、初始含水率、预固结压力、过筛粒径等因素的影响。不同影响因素下,红土的基质吸力随含水率的增

大而减小;不同初始含水率、粒径 0.5 mm 时,红土的土—水特征曲线呈直线型;不同初始干密度、不同预固结压力、不同粒径(0.5 mm 除外)时,红土的土—水特征曲线呈“倒 J”形,其脱湿变化过程可以分为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿 3 个阶段,对应的吸湿变化过程也可以分为快速吸湿、缓慢吸湿、稳定吸湿 3 个阶段。

(2)脱湿过程中,红土的土—水特征曲线表现为:相同基质吸力下,随初始干密度、初始含水率、预固结压力的增大,红土的含水率增大;随粒径的增大,红土的含水率减小。初始干密度、预固结压力对应红土的土水特征参数的初始脱水斜率和最大脱水斜率减小、残余含水率增大,初始含水率、粒径对应红土的土水特征参数的变化正相反。

(3)吸湿过程中,红土的土—水特征曲线表现为:相同基质吸力下,随初始干密度的增大,红土的含水率增大;随粒径的增大,红土的含水率减小。初始干密度对应红土的土水特征参数的初始吸水斜率、最大吸水斜率、残余含气量减小,粒径对应红土的土水特征参数的初始吸水斜率减小,最大吸水斜率和残余含气量增大。

(4)干湿循环过程中,红土的土—水特征曲线表现为:相同基质吸力下,不论初始干密度和粒径大小如何,红土脱湿时的含水率高于吸湿时的含水率,脱湿—吸湿过程中土—水曲线存在滞后现象。其实质在于干湿循环作用下红土具有孔隙效应、瓶颈效应、角度效应的综合结果。

(5)干湿循环过程中,在初始干密度、预固结压力、粒径($d=0.5$ mm 除外)等因素影响下,红土的土—水特征曲线可采用幂函数关系进行拟合;而在不同初始含水率、粒径 0.5 mm 时,红土的土—水特征曲线可采用线性函数关系进行拟合。

参考文献:

- [1] 卢靖,程彬.非饱和黄土土水特征曲线的研究[J].岩土工程学报,2007,29(10):1591-1592.
- [2] 陈东霞,龚晓南.非饱和残积土的土—水特征曲线试验及模拟[J].岩土力学,2014,35(7):1885-1891.
- [3] 李军,刘奉银,王磊,等.关于土水特征曲线滞回特性影响因素的研究[J].水利学报,2015,46(增刊1):194-199.
- [4] Adefemi B A, Wole A C. Soil-water characteristics curves for compacted abandoned dumpsite soil[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 3315-3338.
- [5] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富.干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J].水文地质工程地质, 2012, 39(1): 42-46.
- [6] 周葆春,孔令伟,陈伟,等.荆门膨胀土土—水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):1052-1059.
- [7] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till

- [J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, 19(3): 259-268.
- [8] Fredlund D G, Xing A, Huang S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [9] 张俊然,许强,孙德安.多次干湿循环后土—水特征曲线的模拟[J].岩土力学,2014,35(3):689-695.
- [10] 赵天宇,王锦芳.考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(6):2445-2453.
- [11] 刘奉银,张昭,周冬,等.密度和干湿循环对黄土土—水特征曲线的影响[J].岩土力学,2011,32(增刊2):132-136.
- [12] 刘小文,叶云雪.不同影响因素下非饱和红土土—水特征曲线的试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(2):97-104.
- [13] 刘小文,常立君,胡小荣.非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3302-3306.
- [14] 徐润泽.全吸力范围内桂林红黏土的土—水特征曲线及微观结构演化规律研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [15] 孙德安,刘文捷,吕海波.桂林红黏土的土—水特征曲线[J].岩土力学,2014,35(12):3345-3351.
- [16] 傅鑫晖,韦昌富,颜荣涛,等.桂林雁山红黏土的土—水特征试验[J].桂林理工大学学报,2013,33(3):488-492.
- [17] 常红帅,刘丽,季春生,等.桂林、柳州两种红黏土的土—水特征曲线[J].桂林理工大学学报,2015,35(4):855-859.
- [18] 易亮.红黏土土水特征及湿化特性试验研究[D].湖南湘潭:湖南科技大学,2015.
- [19] 叶云雪.江西非饱和红土土—水特征曲线研究[D].南昌:南昌大学,2014.
- [20] 刘艳敏.巴东组软岩残坡积非饱和红黏土土水特征研究[D].北京:中国地质大学,2011.
- [21] 陈伟,李文平,刘强强,等.陕北非饱和红土土—水特征曲线试验研究[J].工程地质学报,2014,22(2):341-347.
- [22] 唐军,余沛,颜荣涛,等.毕威高速公路玄武岩红土土水特征曲线测定与模型应用研究[J].路基工程,2011(5):66-68.
- [23] 石振明,刘巍然,彭铭,等.网纹红土土水特征曲线试验研究及其在边坡稳定性评价中的应用[J].工程地质学报,2018,26(1):164-171.
- [24] 郝康宁.非饱和网纹红土土—水特征曲线的研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [25] 张丁.云南红土的人渗特性及土—水特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [26] 张雪东.土水特征曲线及其在非饱和土力学中应用的基本问题研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [27] 胡波.非饱和土土—水特征曲线的研究[D].武汉:武汉大学,2005.
- [28] 孟长江.非饱和土土水特征曲线与强度的试验研究及其应用[D].大连:大连理工大学,2006.
- [29] 刘艳华,龚壁卫,苏鸿.非饱和土的土水特征曲线研究[J].工程勘察,2002(3):8-11.