

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201907016

原状黄土土水特征滞后性研究

康海伟^{1,2}, 李 萍^{1,2}, 侯晓坤³, 李同录^{1,2}, 夏增选^{1,2}, 张 辉^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 现有的土水特征曲线(SWCC)滞后性的研究多针对重塑土,原状黄土土水特征曲线滞后性特征的研究较少。为研究全吸力范围内原状黄土的滞后特征,以泾阳马兰黄土(L1)和离石黄土(L5)为研究对象,采用压力板仪和滤纸法测定增湿和减湿 SWCC,采用压汞法测定孔隙分布特征,X 衍射分析矿物成分。结果表明,在压力板仪测试基质吸力范围内(0~600 kPa),滤纸法和压力板仪测定的 SWCC 具有一致性,且在减湿过程中两种方法的测试结果更为一致。滤纸法测得的全吸力范围(0~30 000 kPa)内,黄土 SWCC 滞后性存在三段性特征。即在天然含水率(L1 14.2%、L5 17.3%)附近,黄土 SWCC 几乎无滞后性;含水率高于天然含水率一定范围(L1 大于 19.2%、L5 大于 18.3%),存在极为明显的滞后性;低于天然含水率一定范围(L1 小于 11.2%、L5 小于 15.4%),存在弱滞后性。天然状态下反复干湿循环,导致黄土 SWCC 在天然含水率附近无滞后性;黄土限制孔隙对墨水瓶效应的增益作用,导致高含水率下黄土 SWCC 呈强滞后性;黏土矿物的水合作用,导致低含水率下 SWCC 呈弱滞后性。

关键词: 土水特征曲线;滞后性;原状黄土;天然含水率;孔隙分布

中图分类号: P642.11⁺5; TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)02-0076-08

A study of hysteresis of soil and water characteristics of intact loess

KANG Haiwei^{1,2}, LI Ping^{1,2}, HOU Xiaokun³, LI Tonglu^{1,2}, XIA Zengxuan^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Water Cycle and Geological Environment Observation and Research Station for the Chinese Loess Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: There are few studies on hysteresis of soil and water characteristic curve (SWCC) of intact loess, and most of the existing studies focus on remolding soil samples. In order to study the hysteresis characteristics of intact loess in the full suction range, Malan loess (L1) and Lishi loess (L5) in Jingyang were taken as the research objects, their wetting and drying SWCCs were determined by filter paper method and pressure plate instrument. And their pore distribution and mineral composition were measured by mercury intrusion method and X-ray diffraction, respectively. The results show that the SWCCs measured by filter paper method and pressure plate instrument are consistent in the range of pressure plate instrument (0~600 kPa), and the results of two methods are more consistent in the process of drying. Within the total suction range (0~30 000 kPa) measured by filter paper method, the hysteresis of SWCC is characterized by three stages. That is, in the vicinity of natural water content (L1 14.2%, L5 17.3%), SWCC of the two layers of loess has almost no hysteresis; the water content is higher than a certain range of natural water content (L1 is greater

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41877242;41772278)

第一作者: 康海伟(1995-),男,硕士研究生,研究方向为非饱和黄土力学。E-mail:271684610@qq.com

通讯作者: 李萍(1971-),女,博士,副教授,主要从事非饱和黄土力学、边坡稳定性及可靠度研究。E-mail:dcdgx07@chd.edu.cn

than 19.2% and L5 is greater than 18.3%), and there is extremely obvious hysteresis; lower than a certain range of natural water content (L1 is less than 11.2% and L5 is less than 15.4%), there is a weak hysteresis. Repeated drying and wetting cycles under natural conditions result in no hysteresis of SWCC near the natural water content; the potentiation of limited pores on the ink-bottle effect leads to strong hysteresis at high water content; the hydration of clay minerals results in a weak hysteresis at low water content.

Keywords: soil and water characteristic curve; hysteresis; intact loess; natural water content; pore distribution

黄土作为一种典型的风成土,广泛分布于中国西北干旱半干旱地区。该地区地下水位埋藏较深,地表黄土常处于非饱和状态^[1]。作为研究非饱和黄土基本工具的土水特征曲线(简称 SWCC),表征了平衡条件下土体吸力与含水率之间的关系,与土的非饱和性质存在密切联系^[2-3]。例如,很多学者通过土水特征曲线研究非饱和土强度、变形和渗透^[4-6]。因此,精准测量土水特征曲线极为必要。测试土水特征曲线的方法包括蒸汽平衡法、轴平移技术、张力计、滤纸法等。在一些实际工程应用中,所涉及到的吸力常可达到 3 000 kPa 以上^[7],轴平移技术的量程在 0 ~ 1 500 kPa、张力计在 0 ~ 500 kPa,不能满足实际要求。而滤纸法作为一种间接测试全吸力范围(0 ~ 300 000 kPa) SWCC 的方法,自 Gardner(1937)首次提出之后,便被广泛应用于岩土工程领域的科学研究和工程实践中^[8-10]。相较于其他测试方法,该方法不仅可测量全范围吸力,且具有测试时间短、操作简单和成本低等特点,但对试验操作人员技术要求较高。

非饱和土在增湿、减湿过程中,相同的基质吸力对应不同的含水率,且减湿含水率高于增湿含水率,具有滞后性。在实际工程中,气候环境多变,土体总是处于增、减湿循环过程,这使得深入理解土水特征曲线的滞后性变得尤为重要。Wei 等^[11]通过理论分析接触角滞后效应、温度效应和毛细管硬化效应对毛细滞后性的影响,建立了任意路径下的毛细滞后模型。刘奉银等^[12]提出了滞回度的概念,并用其初步研究了非饱和和重塑黄土的土水特征曲线滞后性。李军等^[13]通过 GCTS 土水特征曲线仪测定了西安重塑黄土的土水特征曲线,探究了初始干密度、干湿循环、应力状态变化对滞后性的影响。LU 等^[14]研究了不同矿物含量对高吸力段滞后性的影响,发现膨胀性矿物含量越多,滞后性越强。Al-mahbashi 等^[15]认为在不同吸力段吸力产生机理不同,导致了土体在高、低吸力范围滞后程度的不同。黄伟等^[16]通过水汽吸附法测定了钠、钾和钙蒙脱土在高吸力下的 SWCC,发现层间阳离子是产生高

吸力段滞后性的主要原因。尽管很多学者研究了 SWCC 的滞后性,但大多数工作都是基于重塑土进行的,忽略了土体原生结构性的影响。

本文以非饱和原状黄土为研究对象,基于滤纸法和压力板仪测定了其增湿和减湿土水特征曲线,校验滤纸法测试黄土基质吸力的适用性;结合压汞法测定的孔隙分布曲线,探究了非饱和原状黄土土水特征曲线的滞后性特征,并从气候、物性、微观结构方面对其进行解释,将原状黄土土水特征曲线滞后特征分区,以期天然黄土工程的稳定性研究提供参考。

1 试验土样、仪器及方案

1.1 试验土样

将陕西泾阳 L1 和 L5 地层的原状黄土作为试验土样。其中 L1 马兰黄土取自地下 5.3 m, L5 离石黄土取自地下 42.5 m。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)^[17]测试了基本物理指标(表 1)。在天然状态下, L1、L5 含水率均低于其饱和含水率,都为非饱和土。

表 1 黄土的物理性质指标
Table 1 Physical indices of loess

地 层	比 重	干密度/ (g·cm ⁻³)	饱和质 量含水 率/%	天然 含水 率/%	孔 隙 比	液 限/ %	塑 限/ %	塑 性 指 数
L1	2.71	1.23	44.4	14.2	1.203	30.2	19.8	10.4
L5	2.71	1.52	28.9	17.3	0.786	28.8	18.5	10.3

利用 X 射线衍射仪,测定黄土中的黏土矿物成分及含量(表 2)。2 层黄土的黏土矿物总含量相近,矿物种类相同,均以伊蒙混层和伊利石为主,但其相对含量差异较大。L1 伊蒙混层矿物相对含量显著高于 L5,其他黏土矿物相对含量均低于 L5。其原因可能是 L1 黄土的沉积气候较 L5 温暖湿润^[18]。

分别取一定量的散土,过 2 mm 筛,利用激光粒度仪分析其颗粒组成(图 1)。L1、L5 黄土中大于 0.075 μm 的颗粒含量分别为 3.82%、2.73%,塑性指

数均大于 10 且小于 17, 根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)^[19], 2 层黄土均属细粒土中的粉质黏土。

表 2 黄土的黏土矿物成分及含量

Table 2 clay mineral content of loess

地层	黏土矿物 含量/%	黏土矿物相对含量/%				
		伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	混层比
L1	27.5	51	27	10	12	20
L5	26.3	38	33	12	17	50

注:混层比:伊蒙混层中蒙脱石所占的质量百分比。

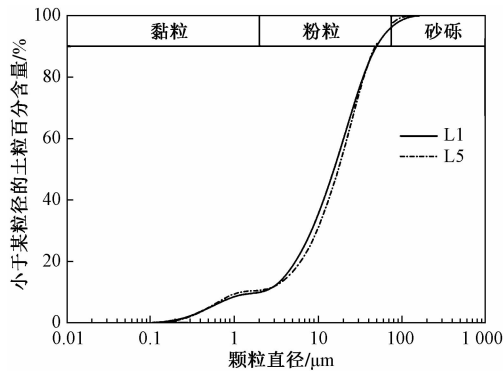


图 1 泾阳黄土的颗粒分布

Fig. 1 Grain size distribution of Jingyang loess

1.2 滤纸法测定基质吸力

1.2.1 试验原理

本文采用接触式滤纸法测定非饱和黄土 L1 和 L5 的土水特征曲线, 测试原理如图 2 所示。该方法将测试滤纸与土样直接接触、密封, 在相对恒定的温度、湿度条件下, 土样中的水以液态水流的形式向干燥滤纸迁移; 当该封闭整体达到热力学平衡后, 滤纸吸力与土样吸力相等, 通过滤纸含水率与吸力的对应关系间接测定土样基质吸力。

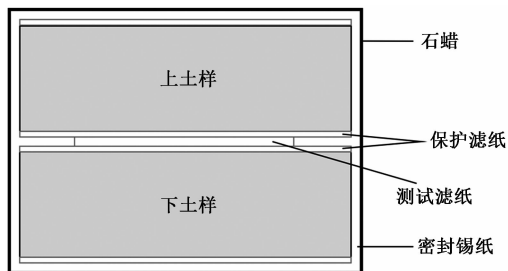


图 2 接触式滤纸法示意图

Fig. 2 Principle of contact filter paper method

选用 Whatman No. 42 滤纸, 其基质吸力率定方程采用 ASTM D5298 - 10^[20] 给出的双线性率定方程:

$$\begin{cases} \log \psi = 5.327 - 0.0779w_{fp} & w_{fp} < 45.3\% \\ \log \psi = 2.412 - 0.0135w_{fp} & w_{fp} \geq 45.3\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ ——土样的基质吸力/kPa;

w_{fp} ——滤纸的质量含水率/%。

试样制备: 利用环刀直接在野外削取原状土样, 土样直径 61.8 mm、高度 20 mm。将土样表面削平, 以便测试滤纸能与其充分接触。

1.2.2 试验步骤

配水: 增湿时, 利用胶头滴管依次缓慢滴定土样, 直至其达到预配含水率; 减湿时, 通过真空饱和仪将土样抽气饱和后, 自然风干至目标含水率。

封样: 将夹有测试滤纸的保护滤纸置于 2 个已称重的环刀样之间, 用锡箔纸将 2 个环刀样完全包裹, 要求锡箔纸表面平整, 且不能破损, 用石蜡将包裹好的土样完全密封。

平衡: 将蜡封完毕的土样置于恒温箱中, 平衡时间为 15 d, 且平衡过程中, 恒温箱温度始终保持 20 ℃, 以减小温度变化对水分迁移的影响。

开样: 将土样表面的石蜡和锡箔纸拆掉, 分别称量铝盒、铝盒与湿滤纸总质量, 将内含湿滤纸的铝盒在烘箱内烘 2 h 以上, 待滤纸烘干, 分别称量滤纸和铝盒总质量及铝盒质量。此外, 由于称量滤纸的天平测试精度高、对外界条件感应灵敏, 测试过程中试验人员需保持安静。

1.3 压力板试验

采用 Fredlund 压力板仪测定 L1 原状黄土增、减湿土水特征曲线, 用于检测滤纸法测试的精度。该仪器基于轴平移技术, 保持平衡孔隙水压力恒等于大气压力, 通过改变孔隙气压控制基质吸力。试验所用陶土板的进气值为 1 500 kPa。试验过程中, 首先将饱和陶土板置于压力板仪底板凹处, 将饱和试样置于陶土板中央, 固定顶板、检查气密性; 然后将软化水加入体变管, 利用冲刷装置驱除残余空气, 记录体变管的初始水位; 最后逐级施加目标压力, 每隔 24 h 读取体变管水位, 直至土样达到土水平衡。试验吸力路径 10→20→50→100→200→300→400→500→600→500→400→300→200→100→50→20→10 kPa。

1.4 微观结构测试

微观结构对土的力学特性影响显著^[21]。利用 AutoPore IV 9500 型压汞仪测定原状 L1、L5 黄土的孔隙分布, 该仪器的低压范围为 3 ~ 207 kPa, 高压范围为 207 ~ 413 700 kPa。试验前, 将压汞试样自然风干并称重。在低压分析时, 膨胀计水平放置, 首先将试样抽至

真空使其绝对压力小于 0.006 7 kPa,通过虹吸法使汞充入膨胀计,待通入氮气加压至初始压力 3.4 kPa 后,开始加压测试;低压分析完成后,取出膨胀计放入高压室,通过油压对汞施加压力,加压至 413 700 kPa。同时通过电容监测每级压力下的进汞量,得出进汞体积与压力的关系。结合式(2)^[22]中孔隙直径与压力的对应关系,得到每级压力对应孔径与进汞量的关系:

$$p(d) = \frac{-4T_h \cos \theta}{d} \quad (2)$$

式中: $p(d)$ ——外加压力;

T_h ——汞表面张力,20℃时取 0.485 N/m;

θ ——汞与土颗粒间的接触角;

d ——土样孔隙直径。

2 试验结果及分析

2.1 孔隙分布特征

实测孔隙比 e_0 表征根据土样质量与体积关系计算得到土样的孔隙比。压汞孔隙比 e_{in} 表征累积压入汞的体积与土颗粒体积之比。未测孔隙比 e_{non} 表征压汞试验无法测得的孔隙比。表 3 为根据进汞量计算的压汞孔隙比与实测孔隙比的比较。由于压汞仪的最小压力限制,其不能测定大于某一孔径的大孔隙;由于最大压力限制,其不能测定小于某一孔径的小孔隙。因此,压汞孔隙比总是小于实测孔隙比。

表 3 压汞孔隙比与实测孔隙比的对比

Table 3 Comparison of intrusion void and measured void

地层	压汞孔隙比 e_{in}	实测孔隙比 e_0	未测孔隙比 e_{non}
L1	1.189	1.203	0.014
L5	0.693	0.786	0.093

雷祥义^[23]按照孔隙半径大小,将黄土孔隙划分大孔隙(大于 16 μm)、中孔隙(16~4 μm)、小孔隙(4~1 μm)和微孔隙(小于 1 μm)。不同沉积年代黄土孔隙大小分布如表 4 所示,反映了不同孔径的孔隙体积占土样总孔隙体积的百分比。2 层黄土的大孔隙占总孔隙体积比例较低(L1 6.3%、L5 3.6%),小、微孔隙占比较高。与 L1 相比,L5 的大孔隙占比降低 42.9%,中孔隙占比降低 83.8%,小、微孔隙占比分别增加 11.7%、50.8%。由于 L1 马兰黄土埋藏较浅,上覆压力较小,孔隙由中、小和微孔隙共同主导;L5 离石黄土埋藏较深,上覆压力较大,孔隙由小孔隙和微孔隙主导。

图 3 为不同沉积年代黄土的孔隙分布曲线,包括

孔隙累积分布曲线和密度分布曲线。可见,不同沉积年代的黄土,孔隙分布曲线形状相似,均为双峰,且微观峰值孔径相近(26~40 nm)、宏观峰值孔径 L1 较大(L1 为 7 μm , L5 为 4 μm)。此外,其微孔隙分布相近,小、中、大孔隙差异较大。可推断,上覆压力对黄土中、大孔隙的影响程度较大,对其小孔隙改造影响较小,对微孔隙几乎没有影响。

表 4 不同年代黄土孔隙组成

Table 4 Pore composition of loess in different sedimentary age

地层	各类孔隙百分含量/%			
	大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
L1	6.3	21.0	42.6	30.1
L5	3.6	3.4	47.6	45.4
相对增量	-42.9	-83.8	11.7	50.8

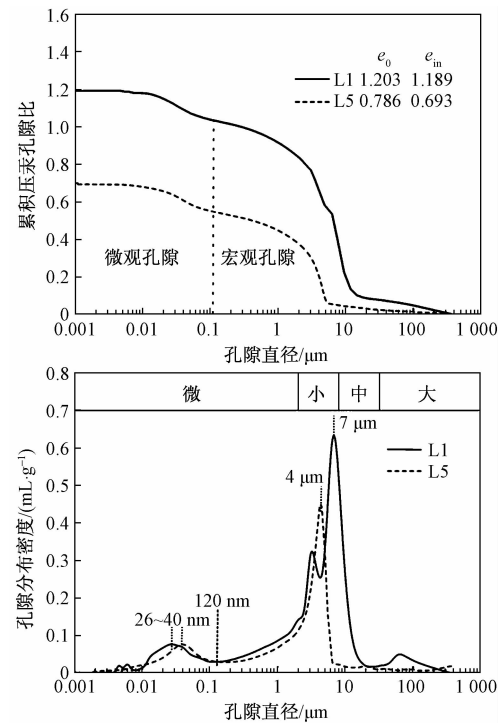


图 3 L1 和 L5 黄土孔隙分布曲线

Fig. 3 Pore size distribution curves of L1 and L5 loess

2.2 滤纸法的适用性分析

通过压力板仪和滤纸法测定泾阳 L1 黄土的增、减湿土水特征曲线,测试结果如图 4 所示。不同测试方法测定的土水特征曲线基本相近,相同含水率下,在增湿过程中,轴平移所测基质吸力略小于滤纸法所测;但在减湿过程中,轴平移测定的基质吸力和滤纸法的测试结果基本接近。整体趋势上看,滤纸法测得的结果与压力板仪测得的结果具有一致性。且规范 ASTM

D5298-10^[20] 给定的 Whatman No. 42 的率定曲线方程是根据轴平移技术测得的减湿条件下土体的基质吸力进行的标定。因此,两种测试方法的减湿结果更为接近。

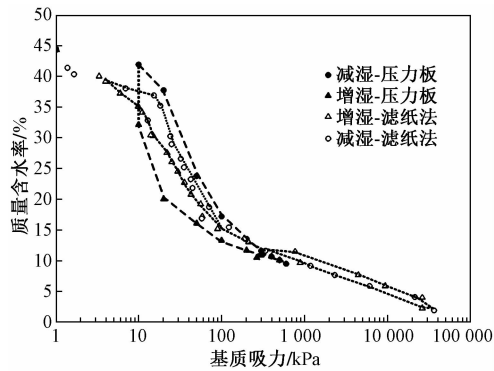


图 4 不同方法测定的土水特征曲线

Fig. 4 SWCC measured by different methods

图 4 也反映了压力板仪测得的 SWCC 滞后性显著大于滤纸法所测。其原因可能为压力板仪测试先进行加压进气减湿,后进行减压排气增湿过程。这使得较多气体进入密闭孔隙,水不得进入,导致增湿过程中含水率显著降低,因而其测得的 SWCC 滞后性更显著。而滤纸法不需要加压进气过程,其 SWCC 滞后性应更能反映野外的实际情况。

2.3 滞后特征分析

孔隙分布特征对土体 SWCC 形状和滞后性影响很大。Young-Laplace 方程表征了吸力平衡后,孔隙半径与基质吸力的关系:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (3)$$

式中: u_a , u_w ——孔隙气压力和水压力,两者的差值

$u_a - u_w$ 代表基质吸力;

T_s ——水表面张力,20℃时取 0.727 N/m;

α ——土颗粒与水之间的接触角;

r ——孔隙半径。

结合压汞试验得到的孔隙直径与孔隙分布密度的关系,可得到基质吸力与孔隙分布密度的对应关系(图 5)。采用滤纸法测定不同年代非饱和黄土的增、减湿过程 SWCC,将测试结果绘于图 5 中。

可见,SWCC 呈典型的“单降”模式,孔隙分布曲线呈典型的“双峰”模式。孔隙分布曲线的宏观峰与 SWCC 的拐点对应,孔隙分布曲线在宏观孔隙处的第一个陡增点与土样的进气值也基本对应。但孔隙分布曲线微观峰处对应的 SWCC 却近似于一条直线段,表

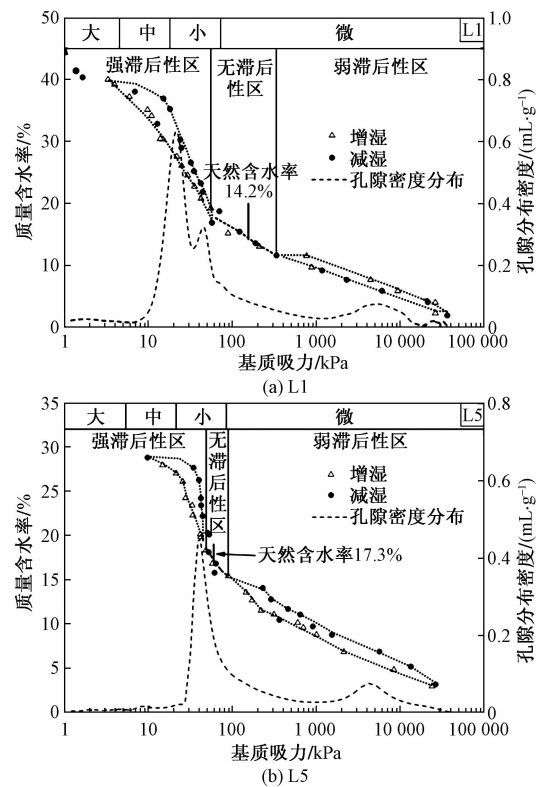


图 5 非饱和黄土土水特征曲线与孔隙分布的对应关系图

Fig. 5 The corresponding relationship between SWCC and pore distribution of unsaturated loess

明该吸力段基质吸力与孔隙分布不存在明显的对应关系。这佐证了 SWCC 在低吸力段由孔隙分布控制,在高吸力段由矿物成分控制的观点^[14-15,24]。

与许多学者^[25-26]测定的土水特征曲线滞后性特点相比,本文测定的土水特征曲线滞后性存在一个显著特点,即在围绕天然含水率(L1 14.2%、L5 17.3%)波动的含水率区间(L1 11.6%~19.2%, L5 15.4%~18.3%)内,2 层黄土的土水特征曲线均无滞后性;土样含水率高于该区间时,存在极为明显的滞后性;低于该区间时,存在弱滞后性。Muñoz-Castelblanco 等^[27]基于滤纸法测定法国原状黄土土水特征曲线,也得到了相似的试验结果。

在特定的土样含水率下,干湿循环历史对其基质吸力的影响很大。研究发现,随着干湿循环次数的增加,土水特征曲线的滞回圈面积逐渐减小^[12-13,26]。此外,水进入孔隙时,先充填小孔隙、后充填大孔隙;排水时,水先排出大孔隙,后排出小孔隙^[28]。故天然状态下,土中仅有微观孔隙和部分宏观孔隙被水充填。随着气候变化,土样含水率围绕天然含水率频繁升降,土样反复吸水、脱水。但无论吸水还是脱水过程均不完

全,土样几乎不能完全干燥或者饱和。故土体的某些较大孔隙总是完全干燥、某些较小孔隙总是完全饱和,而部分孔径适中孔隙总是反复吸水、脱水。增、减湿历史导致的土体内部孔隙和颗粒位置的调整完成后,土的含水率与吸力的对应关系将趋于恒定^[26]。在野外,随着气候变化,原状土体将围绕天然含水率发生许多次小范围的干湿循环,其可能会使该含水率变化区间影响范围内的孔隙结构、颗粒位置达到稳定状态。因而试验土样在围绕天然含水率波动的区间内无滞后性的原因,可能是由于气候变化,在天然含水率附近,土样含水率升降频繁,干湿循环往复。基于这个猜想,在旱季 L1 和 L5 原状黄土的含水率分别为 11.6% 和 15.4%,雨季的含水率分别为 19.2% 和 18.3%。结合图 5 孔隙分布与土水特征曲线的对应关系,可知干湿循环改造了黄土的部分小孔隙和微孔隙结构,致使天然含水率(L1 14.2%、L5 17.3%)附近无滞后性。

基质吸力变化梯度和变化次数会改变土体内部的细观结构^[29]。由于 L1 比 L5 更接近地表,其对气候变化的敏感性更高,含水率波动范围更大、变化次数更多。而含水率变化梯度和变化次数会直接影响基质吸力的变化梯度,故 L1 的细观结构变化较 L5 更为明显, L1 无滞后性的含水率区间比 L5 大。

当含水率较高时(L1 大于 19.2%、L5 大于 18.3%),孔隙水多为毛细水,其基质吸力主要为毛细吸力。由图 5 可知,该段 SWCC 对应于黄土的中孔隙和小孔隙。据 Ng 等^[30]研究,黄土中存在一些限制孔隙,这部分孔隙孔径(D)较大,但由一些狭窄的孔喉(d_i)与外界相连通,如图 6 所示。根据“墨水瓶效应”,增湿过程中基质吸力由限制孔隙中大孔隙孔径(D)控制,减湿过程中由孔喉(d_i)控制。即黄土限制孔隙对墨水瓶效应的增益作用导致 SWCC 在该部分呈现强滞后性。

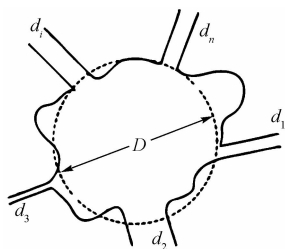


图 6 黄土中的限制孔隙^[30]

Fig. 6 The constricted pore in loess

图 5 也显示在高吸力、低含水率段(L1 小于 11.2%、L5 小于 15.4%), L1 和 L5 都有一定的滞后

性。当含水率较低时,孔隙水多以薄膜形式附着于土颗粒表面,其基质吸力主要为吸附吸力,该吸力与土中的矿物成分有关,来源于颗粒表面水合作用和阳离子水合作用^[15]。土样在增、减湿过程中,颗粒表面水合作用是可逆的,而层间阳离子水合作用是不可逆的^[14-15]。正是后者的不可逆性导致 SWCC 在高吸力段产生了滞后性。结合表 2 中伊蒙混层的相对含量及其混层比,发现 L5 的蒙脱石含量略高于 L1(L1 为 10%, L5 为 19%)。而蒙脱石具有强膨胀性,蒙脱石含量越高,高吸力段滞后性越显著^[14]。故在高吸力段 L5 的滞后性略大于 L1。

2.4 原状黄土土水特征曲线滞后特征分区

基于不同沉积年代原状黄土全吸力范围内土水特征曲线的滞后性特征,根据天然含水率波动范围,可按照土样含水率将原状黄土的土水特征曲线划分为 3 个部分,即无滞后性区、强滞后性区和弱滞后性区。在围绕天然含水率波动的含水率区间内,土体含水率随气候变化升降频繁,干湿循环往复,致使该区域 SWCC 没有滞后性,为无滞后性区;含水率高于该区间时(即高含水率阶段,低吸力区),由于限制孔隙的存在,该区域呈现较强的滞后性,为强滞后性区;含水率低于该区间时(低含水率阶段,高吸力区),SWCC 存在弱滞后性,为弱滞后性区。

3 结论

(1) 上覆压力对黄土中、大孔隙的影响较大,对其小孔隙影响较小,对微孔隙几乎没有影响;天然的干湿循环对黄土的小孔隙和微孔隙影响较大。

(2) 利用压力板仪对滤纸法的测试结果进行了验证,结果表明采用滤纸法测试黄土 SWCC 是可靠的。

(3) 不同沉积年代原状黄土 SWCC 均呈现出相似的滞后性特征,均在围绕天然含水率波动的含水率区间内无滞后性,高于该区间时滞后性显著,低于该区间时滞后性较弱。由此,将原状黄土的土水特征曲线分为强滞后性区、无滞后性区和弱滞后性区 3 个区域。

参考文献 (References):

- [1] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土含水量与基质吸力的关系[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 39-42.
- [2] DANG J Q, LI J. Study on correlation between water content and matrix suction of unsaturated loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(4): 39-42. (in Chinese)

- [2] FREDLUND D G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132 (3): 286 – 321.
- [3] 徐全, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 土水特征曲线的概率分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 79 – 85. [XU Q, TAN X H, XIN Z Y, et al. Probabilistic analysis of the soil-water characteristic curve[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 79 – 85. (in Chinese)]
- [4] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 – 898.
- [5] 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. [ZHOU B C, KONG L W, CHEN W, et al. Analysis of characteristic parameters of soil-water characteristic curve (swcc) and unsaturated shear strength prediction of Jingmen expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1052 – 1059. (in Chinese)]
- [6] 湛文武, 刘伟, 王娟, 等. 基于不同渗透持时的非饱和黄土渗透系数预测分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 22 – 27. [CHEN W W, LIU W, WANG J, et al. Prediction of coefficient of permeability of unsaturated loess with different seepage durations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (Sup 1): 22 – 27. (in Chinese)]
- [7] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 2001, 51(6): 573 – 576.
- [8] 唐东旗, 彭建兵, 孙伟青. 非饱和黄土基质吸力的滤纸法测试[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 37 – 41. [TANG D Q, PENG J B, SUN W Q. Matrix suction test based on the filter paper method for unsaturated loess[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5): 37 – 41. (in Chinese)]
- [9] 谷琪, 王家鼎, 仝云莉, 等. 滤纸法测非饱和黄土土水特征曲线试验及拟合研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 588 – 593. [GU Q, WANG J D, TONG Y L, et al. Soil water characteristic curve test and simulation of unsaturated loess based on filter paper method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 588 – 593. (in Chinese)]
- [10] 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. [SUN D A, LIU W J, LYU H B. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3345 – 3351. (in Chinese)]
- [11] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research, 2006, 42 (7). DOI: 10.1029/2005wr004594.
- [12] 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. [LIU F Y, ZHANG Z, ZHOU D, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 2): 132 – 136. (in Chinese)]
- [13] 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. [LI J, LIU F Y, WANG L, et al. A research of affect factor on hysteresis behavior for soil-water characteristic curve[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (Sup 1): 194 – 199. (in Chinese)]
- [14] LU N, KHORSHIDI M. Mechanisms for soil-water retention and hysteresis at high suction range[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(8): 04015032.
- [15] AL-MAHBASHI A M, ELKADY T Y, AL-SHAMRANI M A. Hysteresis soil-water characteristic curves of highly expansive clay[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(9): 1041 – 1059.
- [16] 黄伟, 刘清秉, 项伟, 等. 高吸力段黏土水合机制及微观持水模型研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1268 – 1276. [HUANG W, LIU Q B, XIANG W, et al. Hydration mechanism and microscopic water retention model of clay at high suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (7): 1268 – 1276. (in Chinese)]
- [17] 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准: GB/T50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [Nanjing Hydraulic Research Institute. Standard for soil test method: GB/T50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 1999. (in Chinese)]

- Chinese)]
- [18] 侯凯. 泾阳修石渡剖面黄土成壤与成分特征及其古环境意义[D]. 西安: 长安大学, 2018. [HOU K. Pedogenic and composition characteristics of the loess soil and its paleo-environmental significance in the xiushidu profile of Jingyang[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese)]
- [19] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [China Academy of Building Research. Code for design of building foundation: GB50007—2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012. (in Chinese)]
- [20] ASTM D5298-10. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper [S]. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014 A.
- [21] 杨爱武, 封安坤, 姜帅, 等. 固结与荷载耦合作用下吹填土力学性质与微结构参数关联性[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 96–105. [YANG A W, FENG A K, JIANG S, et al. Correlation between mechanical properties and microstructure parameters of soft dredger fill under the coupling action of consolidation and load [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 96–105. (in Chinese)]
- [22] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921, 7(4): 115–116.
- [23] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑 化学 生物学 农学 医学 地学), 1987, 17(12): 1309–1318. [LEI X Y. The pore types and collapsibility of loess in China [J]. Science in China, Ser. B, 1987, 17(12): 1309–1318. (in Chinese)]
- [24] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 26–39.
- [25] 汪明武, 杨江峰, 李健, 等. 合肥新桥国际机场原状非饱和膨胀土的土水特性研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 41–45. [WANG M W, YANG J F, LI J, et al. Soil-water characteristics of undisturbed and unsaturated expansive clays in the Xinqiao international airport area of Hefei [J]. Industrial Construction, 2012, 42(12): 41–45. (in Chinese)]
- [26] 许旭堂, 简文彬. 非饱和原状残积土土水特征曲线研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 668–674. [XU X T, JIAN W B. Research on swcc of unsaturated natural residual soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 668–674. (in Chinese)]
- [27] MUÑOZ-CASTELBLANCO J A, PEREIRA J M, DELAGE P, et al. The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France [J]. Géotechnique, 2012, 62(2): 95–106.
- [28] 汤连生, 颜波, 李振嵩, 等. 花岗岩残积土土水特征曲线的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 62–65. [TANG L S, YAN B, LI Z S, et al. The experimental research on the soil-water characteristic curve of the granite residual soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 62–65. (in Chinese)]
- [29] 陈留凤, 彭华. 干湿循环对硬黏土的土水特性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2337–2344. [CHEN L F, PENG H. Experimental study on the water retention properties of the hard clay under cyclic suction conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2337–2344. (in Chinese)]
- [30] NG C W W, SADEGHI H, HOSSEN S K B, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(8): 1258–1269.

编辑: 张明霞