



移动扫码阅读

王成文,薛忠歧,李英,等.非饱和扰动粉砂质黏土的土-水特征曲线特征研究[J].能源环境保护,2020,34(6):35-39.

WANG Chengwen, XUE Zhongqi, LI Ying, et al. Characteristics research on soil-water characteristic curve of unsaturated disturbed silty clay[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(6): 35-39.

非饱和扰动粉砂质黏土的土-水特征曲线特征研究

王成文¹, 薛忠歧¹, 李英^{1,2,3}, 黄小琴¹, 朱薇¹

(1.宁夏回族自治区水文环境地质勘察院,宁夏银川 750011;2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;3.宁夏回族自治区地质局,宁夏银川 750021)

摘要:针对粉砂、粉砂土、粉质黏土3种非饱和扰动土样进行土-水特征曲线试验研究,利用Brooks-Corey(B-C)模型和Van Genuchten(V-G)模型对脱水过程试验数据进行拟合分析。结果表明:在较低吸力段(<30 kPa),土体含水率变化最为显著,曲线较陡;在中吸力段(30~120 kPa),土-水特征曲线减小幅度变缓,速率变小;在较高吸力段(>120 kPa),土体基质吸力的增加对含水率的影响减弱,土体含水率趋于稳定;V-G模型的拟合更为理想,尤其是对砂质类土体拟合,方差均大于0.99;在同一含水率条件下,黏粒含量越多,土体对水分的吸附作用就越强;反之,砂性颗粒含量越多,在相同土体吸力下的持水能力越差,含水率越小。

关键词:非饱和扰动样;砂粒黏粒;曲线拟合;影响因素

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)06-0035-05

Characteristics research on soil-water characteristic curve of unsaturated disturbed silty clay

WANG Chengwen¹, XUE Zhongqi¹, LI Ying^{1,2,3}, HUANG Xiaoqin¹, ZHU Wei¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750011, China; 2. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil-water characteristic curves of three unsaturated disturbed soil samples (silt, silty sand and silty clay) were studied. Brooks Corey (B-C) model and Van Genuchten (V-G) model were used to fitting analyze the experimental data of dehydration process. The results showed that the soil moisture content changed most significantly in the lower suction section (< 30 kPa) and the curve was steep. In the middle suction section (30 ~ 120 kPa), the moisture content decreased slowly. When the suction was higher (>120 kPa), the influence of the increase of soil matrix suction on water content was weakened, and the soil moisture content tended to be stable. In addition, the fitting of V-G model was more ideal than that of B-C model, especially for sandy soil, and the variance was more than 0.99. At the same moisture content, the adsorption of water on soil improved with the increase of clay content. On the contrary, more sand particles caused worse water holding capacity under the same suction and lower soil moisture content.

Key Words: Unsaturated disturbed sample; Sand and clay content; Curve fitting; Influence factor

收稿日期:2020-08-12;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:宁夏自然科学基金(2018AAC03205,2020AAC03459);宁夏财政厅项目“沿黄生态经济带地下水资源开发利用与生态环境保护效应调查评价”(6400201901273)

第一作者简介:王成文(1991-),男,内蒙古乌兰察布人,工程师,主要从事环境水文地质研究工作。E-mail:1120694441@qq.com

0 引言

土-水特征曲线是用来表示非饱和土体中基质吸力与含水率关系的曲线。在土-水特征曲线研究过程中,由于土体基质吸力与含水率的关系复杂,受外界诸多因素影响,很难从理论上推导出具体的关系表达式。在一般的研究方法中,大致分为两类方法:直接法和间接法。直接法有张力计法、压力膜法、砂芯漏斗法、离心机法、平衡水汽压法等;目前,虽然在室内或原位的直接测定土体的水分特征曲线得到一定的发展,但是这些方法大部分有较耗时、费力、准确度低等缺点,难以精确得到土-水特征曲线,不能满足科研要求。因此间接推求法显得尤为重要,它克服了室内方法存在的测量条件难以实现、试验过程时间过长或者试验精度较低等问题^[1-2]。

在土-水特征曲线的相关研究方面,毛尚之^[3]对湖北枣阳地区的膨胀细粒土进行土-水特征曲线试验研究,初步分析了应力及吸力历史等因素对土-水特征曲线的影响;田湖南、孔令伟^[4]进行了细粒对砂土持水能力影响的试验研究,分析了钱塘江南岸的萧绍冲积平原砂土的土-水特征曲线的特征,探讨细粒对砂土持水能力的影响;唐延贵、吴礼舟^[5]对西南某地的粉质砂土进行干燥试验,得到应力相关的土-水特征曲线及变形曲线。综上所述,目前大多数学者侧重对原样土的研究,而对扰动土的研究较少,同时对于粉土和粉砂类黏土的土-水关系缺少系统比较。本文在前人对细粒土研究的基础上,筛选配比三种非饱和和扰动土样,进行土-水特征曲线试验研究,并选取两种模型进行拟合分析,对以后研究非饱和和地下水流、土壤生态、水土保持等问题提供一定参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本次供试土样取有代表性的河漫滩沉积相砂土和河湖沉积相的黏性土,筛选不同颗粒级配的扰动土体进行试验研究,调试不同颗粒级配的土体类型,为以后实际复杂地层土-水特征曲线研究提供一定参考。在天然状态下风干、碾碎、去除杂质,过筛2.0、1.0、0.25、0.05 mm(泰勒标准筛制),制备不同颗粒级配的土样。根据国际制土体质地分类标准(孙向阳等,2005)^[6],配制三种类型扰动土样供本次试验用土,一种是粉砂,另外两种土样

分别是粉砂土、粉质黏土,其颗粒级配曲线见图1,试验土壤颗粒组分及定名见表1。

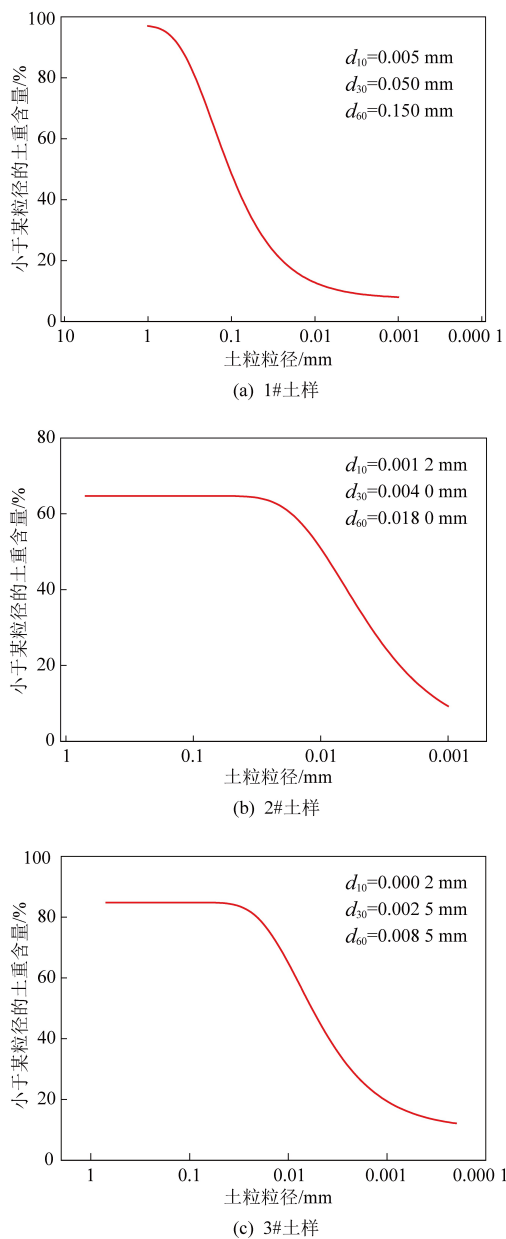


图1 试验用土颗粒级配曲线

表1 试验用土的颗粒组成及定名

编号	颗粒组成			土壤定名
	细砂粒/(2~0.075 mm)	粉粒/(0.075~0.002 mm)	粘粒/(0~0.002 mm)	
1#	4.36	8.24	87.40	粉砂
2#	28.45	44.26	27.29	粉砂土
3#	46.28	45.35	8.37	粉质黏土

1.2 土体物理指标测定

土体的物理特性是最基本的指标,本文对土体的容重、比重、含水率、pH值等项目进行了分析测定。按常规分析方法测定,测试方法参照《土工

试验方法标准》(GB/T 50123—2019)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),测试结果见表 2。

表 2 土体基本理化特性参数

土样 编号	容重 γ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 d /%	n /%	pH	θ_0 /% ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	θ_{sat} /% ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
1#	1.54	2.68	42.50	7.3	3.36	24.08
2#	1.46	2.71	46.13	7.3	4.40	33.35
3#	1.38	2.75	49.82	7.2	5.68	37.41

注: n 为土的孔隙度, $n = 1 - \gamma / (d \cdot \gamma_w)$, $\gamma_w = 1$ 。

1.3 试验方法

大量试验研究表明^[7-12], Brooks-Corey 模型和 Van Genuchten 模型在不同种类质地、不同环境等条件下模拟得到的曲线较为理想,具有很高的连续性,在相当宽的基质吸力或是函数率范围内具有普遍适用性,因而在各领域研究中得到较为广泛的应用。B-C 模型与 V-G 模型的经验公式如下:

Brooks-Corey 模型(简称 B-C 模型):

$$\begin{cases} S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda & h < h_b \\ S_e = 1 & h > h_b \\ K(h) = K_s & h < h_b \\ K(h) = K_s \left(\frac{h_b}{h}\right) & h \geq h_b \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水率; S_e 为饱和度; θ_s 为饱和含水量; θ_r 为残余含水量; h_b 为进气压力; h 为压力水头; λ 为反映土体孔隙大小分布的正常数; $\{(1 - a|h|)^{n-1} [1 + (a|h|)^n]^{-m}\}^2$ 。

Van Genuchten 模型(简称 V-G 模型):

$$\begin{cases} S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (a|h|)^n\right]^{-m} & h < 0 \\ S_e = 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \frac{(1 - a|h|)^{n-1} [1 + (a|h|)^n]^{-m}}{[1 + a|h|^n]^{\frac{m}{2}}} h \geq 0 \quad (3)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_s 和 θ_r 分别为饱和含水量和残余含水量; h 为压力水头; a 为与进气值有关的参数; n 为曲线形状参数, $m = 1 - \frac{1}{n}$ 。因此,本文借助 RETC 数值拟合,利用 B-C 模型和 V-G 模型对实测数据(脱水过程)进行拟合分析。

表 3 土-水特征曲线拟合数学模型

提出者	数学表达式	参数意义
Gardner	$\theta = \frac{1}{1 + a\psi^n}$	n, a —拟合参数
Van Genuchten	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{[1 + (a_{vg}\psi)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \right]$	θ_r 为残余重量含水率; a_{vg} 、 n_{vg} 、 m_{vg} 为与拟合参数
Brooks-Corey	$\left[\frac{1}{[1 + a_g \psi^{n_g}] } \right]$	a_g 、 n_g 为拟合参数

RET C 软件是由美国盐土实验室 Van Genuchten 等人(1999)依照最小二乘法回归原理编写开发,操作便捷,是专业的土-水特征曲线拟合软件(配合压力膜法),同时也用于分析包气带的各项水力特性参数。RET C 软件工作界面见图 2。本文借助于 RETC 软件,对拟合效果较好且具有代表性的 Brooks-Corey 模型和 Van Genuehten 模型进行拟合,比较拟合效果。

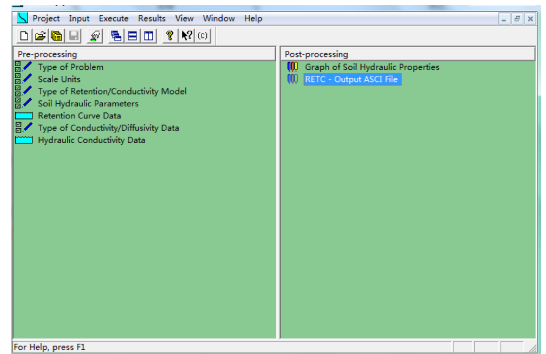


图 2 RETC 拟合软件工作窗口

2 试验结果分析

2.1 不同土样的拟合结果

运用不同的数学模型对三种土样进行拟合,由图 3 可知,在整个脱水实验过程中,三种试样土-水特征曲线主要表现为:随着土体所受外力(基质吸力)不断增大,含水率逐渐减小,尤其在砂性颗粒含量较高的土体中最显著。在较低吸力段(<30 kPa),土体含水率随吸力增加变化最为敏感,表现为曲线较陡;在中吸力段(30~120 kPa),随吸力的增加,土-水特征曲线减小幅度变缓,速率变小;在较高吸力段(>120 kPa),土体基质吸力的增加对含水率的影响减弱,表现为土-水曲线变化平缓,土体含水率趋于稳定。

分析其原因,在较低土体基质吸力范围内,土体中的水分保持与传输主要受土体毛细力的作用影响,而毛细力大小主要取决于土体孔隙大小分

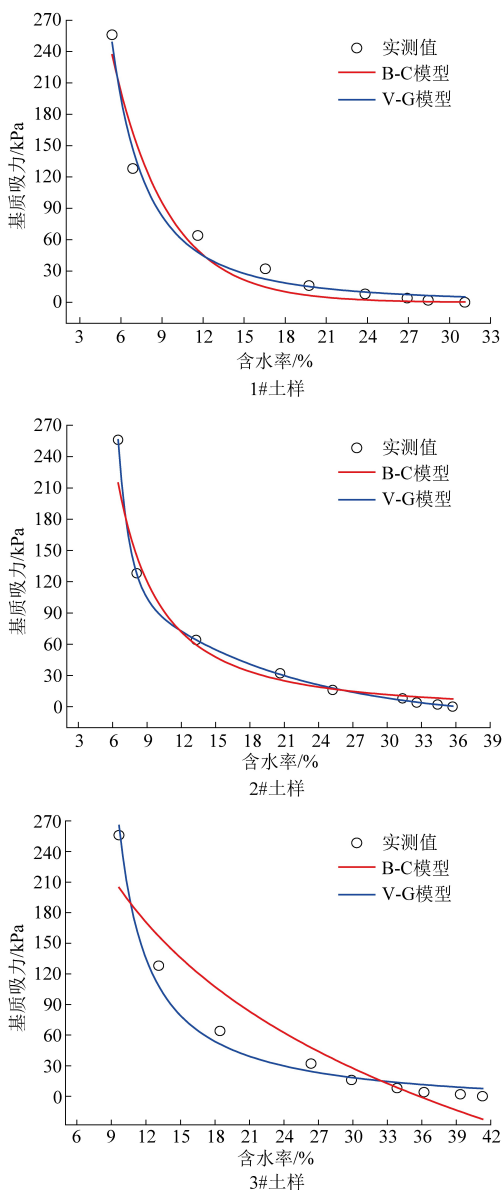


图3 三种试样土-水特征曲线拟合

布、排列方式等。在砂性颗粒较大土体(1#土样)中,孔隙分布较为疏散,持水性最差,故变化最为敏感;在较大吸力范围内,土体对水分的作用主要为土体颗粒表面的吸附力作用,土体颗粒质地对土壤含水率影响甚微。在同一含水率条件下,土体黏粒含量越多,土体对水分的吸附作用就越强,即持水性越强,表现为土体水分随吸力的增加而释水输出缓慢,即土-水曲线变化缓慢。反之,土体砂性颗粒含量越多,在相同土体吸力下,持水能力越差,表现为含水率越小。

2.2 拟合误差分析

由于土-水特征曲线的复杂性,难以用理论公式来表达土吸力与含水率的关系,只能用经验模型来拟合,得出较为理想的曲线。在不同数学模

型拟合中,均有一定的误差。设随吸力递减的含水率为因变量 $Y(X)$, 土水吸力为自变量 X , 令:

$$Y(X) = KX \quad (4)$$

在理想情况下,即误差为零, $K=1$ 。用公式(1-4)对试验结果与模拟结果进行回归分析,见表4。

表4 不同质地试样土-水特征曲线

土样 编号	B-C 模型			V-G 模型		
	K 值	R-Square	标准差	K 值	R-Square	标准差
1#	1.015 6	0.977	0.017 0	0.996 8	0.992	0.001 2
2#	1.015 2	0.971	0.023 0	1.004 5	0.995	0.008 0
3#	1.064 5	0.863	0.048 0	1.008 9	0.951	0.028 0

由表4和表5可知,B-C模型和V-G模型的模拟结果和实测结果非常吻合,均在容许的范围之内,方差均大于0.86,其中V-G模型的拟合更为理想,尤其是对供试土样1#和2#的拟合,方差均达到了0.99以上。该两种经验模型对3#试样的拟合效果较差,这可能是由于实际测定的机械组成是过了1 mm土筛,而测定特征曲线的土体却没有,从而使得大于1 mm的颗粒相对较多,造成了这样的影响。理论模型对粉砂质黏土的模拟有较大误差,这说明土体累积曲线的拟合是重要的。从上面计算过程可以看出理论模型比较直观、简单,同时可知经验模型相对比较准确。

表5 模型相关拟合参数值

土样 编号	B-C 模型				V-G 模型			
	θ_r	θ_s	λ	b	θ_r	θ_s	α	n
1#	0.084	0.523	1.034	0.126	0.068	0.463	0.018 6	1.486
2#	0.096	0.686	0.895	0.133	0.087	0.430	0.010 2	1.243
3#	0.070	0.435	0.954	0.156	0.073	0.354	0.005 3	1.055

2.3 土-水特征曲线的主要影响因素

(1) 土体质地

在影响土-水特征曲线的各种因素中,土体地质的影响最为明显。结合土-水曲线实测值分析,土体颗粒越细越黏,其比表面积越大,压实后的土孔隙也越小,土体对水分的持有能力越强。如图4所示,在相同吸力作用下,3#土样的含水率最大,释水性最差,即黏性越大的土颗粒,吸水性能越好;相反之,质地越粗越砂,在相同吸力条件下,3#土样的含水率最小,释水性最强;因此,土体质地对土-水特征曲线的影响最为直观、显著。

(2) 土体结构(孔隙性)

土体结构对土-水特征曲线的影响也较为明显,尤其是在土体接近饱和含水率的时间段内,当

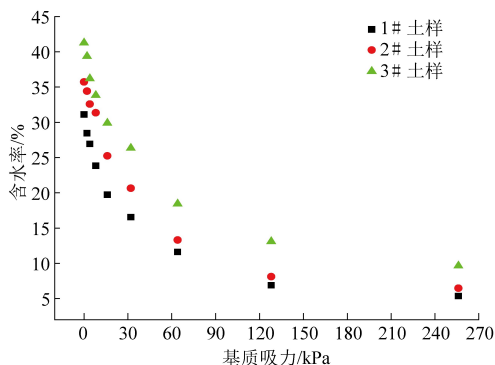


图4 不同质地试样土-水特征曲线

土体的团聚性较好,土体团聚体数量较多时,曲线开始时都先经过一个平缓上升段后又变急速上升,团聚体含量越多,曲线一开始平缓上升的越低平;当土体比较分散,团聚体含量比较少时,曲线一开始就上升很快,而后经历一段缓慢上升,最后转入急速上升,呈现出典型的“S”型曲线。土体结构之所以对土-水特征曲线有影响,实质上是由于土体结构状况的不同而导致的孔隙状况不同所引起。

3 结论

(1)在三种类型土样的土-水特征曲线模型中,V-G模型的拟合更为理想,尤其是对砂质类的土体拟合,拟合相关性较高,方差均达到了0.99以上,是描述该种土的水分特征曲线的适宜模型。

(2)在同一含水率条件下,土体黏粒含量越多,土体对水分的吸附作用就越强,表现为土体水分随吸力的增加而释水输出缓慢,即土-水曲线变化缓慢;反之,土体砂性颗粒含量越多,在相同土体吸力下,持水能力越差,表现为含水率越小。

(3)土体质地和土体结构是影响土-水特征曲线的主要因素。土体质地的颗粒越细越黏,其

比表面越大,土体对水分的持有能力越强,曲线随吸力的变化越缓慢;在土体结构中,当土体比较分散,团聚体含量比较少时,曲线经历“快速上升—缓慢上升—急速上升到稳定”,呈现出典型的“S”型曲线。

参考文献

- [1] 王康. 非饱和土体水流动及溶质迁移 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 56-75.
- [2] 谭晓慧, 余伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (S2): 51-56.
- [3] 林群仙, 李少和. 基于两种粉质粘土的土水特征曲线试验对比分析 [J]. 科技通报, 2018, 34 (8): 182-184.
- [4] 孙德安, 高游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (1): 91-97.
- [5] 唐延贵, 吴礼舟. 粉质砂土的土-水特征及一维应力变形试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (10): 62-65.
- [6] 卢宁, William J. Likos. 非饱和土力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 48-65.
- [7] SUN D, YOU G, ANNAN Z, et al. Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75 (2): 781-791.
- [8] ZHAI Q, RAHARDJO H. Determination of soil-water characteristic curve variables [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 42: 37-43.
- [9] Van-Genuechten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [10] 周冬. 应力作用下非饱和土-水特征曲线及渗透性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2010: 14-19.
- [11] 王修康, 戚兴超, 刘艳丽, 等. 泰山山前平原3种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响 [J]. 自然资源学报, 2018, 33 (1): 63-74.
- [12] 李幻, 谭晔, 梁文鹏, 等. 粉土-水特征曲线影响因素试验及模型验证 [J]. 人民长江, 2018 (14): 110-114.