

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.22

非饱和黄土干湿循环土水特征曲线试验 及渗透系数预测

刘朋飞¹, 殷跃平², 李 滨³, 孙一博⁴

(1. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3. 中国地质科学院地质力学所, 北京 100081; 4. 重庆地勘局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121)

摘要: 利用5Bar体积压力板仪对甘肃东乡原状马兰黄土基质吸力和体积含水量进行了干湿循环测试, 同时分别采用Gardner、Fredlund和Xing以及Van Genuchten土水特征曲线方程对试验数据进行拟合, 得出其土水特征曲线方程, 分析不同模型对试验土样的适宜性; 根据土水特征曲线方程, 采用Gardner和Van Genuchten模型对其非饱和渗透系数进行预测, 分析不同模型、吸湿脱湿两个过程的差异性, 建议对不同工况采取不同的渗透模型。

关键词: 非饱和; 黄土; 土水特征曲线; 渗透系数

中图分类号: TV4

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)04-0125-05

The tests of soil-water characteristical curve and permeability coefficient prediction of the wetting-drying cycles for unsaturated loess

LIU Pengfei¹, YIN Yueping², LI Bin³, SUN Yibo⁴

(1. Chongqing Survey, Design and Research Institute Co., Ltd. of CREEG, Chongqing 400023, China;
2. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Institute of
Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
4. Chongqing Geological Prospecting Bureau of Nanjiang Hydrogeological &
Engineering Geology Brigade, Chongqing 401121, China)

Abstract: This paper use 5Bar volumetric pressure plate extractor carry on the dry-wet cycle test of matric suction and volumetric water content for the Gansu Dongxiang undisturbed malan loess. Meanwhile, respectively using Gardner, Fredlund, Xing and Van Genuchten soil-water characteristical curve (SWCC) equation to fit the experimental date, obtain its SWCC equation, analysis of different models of the suitability of the soil samples. According to the soil-water characteristical curve (SWCC) equation, using Gardner and Van Genuchten model to predict its unsaturated permeability coefficient, analysis of different models, hygroscopic and dehumidifying of the differences between two processes. Finally, recommendations for different conditions to take a different penetration models.

Keywords: unsaturated; loess; soil-water characteristical curve (SWCC); permeability coefficient

0 引言

非饱和土分布相当广泛, 而工程中几乎都会涉

及到, 黄土高原处于干旱半干旱气候区, 地层结构为上覆黄土, 下伏上新统红粘土和中生界砂、页岩^[1]。而下伏红粘土地层为隔水层, 使之基本上不存在自

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-02-05

第一作者: 刘朋飞(1986-), 男, 河南襄城人, 博士, 工程师, 主要从事地质灾害与铁路勘察工作。E-mail: liupf616@163.com

下而上的顶托补给,黄土地下水埋藏较深,因此地表黄土常处于非饱和状态,黄土成为一种典型的非饱和土。土水特征曲线(英文简称 SWCC)是研究非饱和土的纽带,与土的强度、渗透系数、变形等均相关^[2],由于 SWCC 存在干湿循环,在循环过程中存在滞后性,加强干湿循环研究,探讨其变化规律^[3],为工程建设中采取合理的方法提供依据。本文以 SWCC 干湿循环试验为依托,讨论非饱和黄土干湿循环土水特征曲线方程的适用性及对非饱和黄土进行渗透系数预测。

1 土水特征曲线试验

在甘肃东乡县城城边坡挖探井,深度约 6 m,取原装样六块,长宽高约 40 cm×50 cm×40 cm,试样为甘肃东乡县城取原状样,是中更新世末以后形成的黄土,其土质较疏松,有大孔隙,承载力较低,具有中等的湿陷性。采用环刀切样,环刀直径 61.8 mm,高 20 mm。东乡黄土天然含水量为 15%,干密度为 1.28 g/cm³。

本次试验采用的仪器为是应力式体积压力板仪。试验设备的基本原理采用轴平移技术及压力板的试验原理,试验中采用的 5Bar 体积压力板仪进行 0~4kPa 范围内的土-水特征曲线的量测。试验分两个过程,第一个过程为脱湿过程,寻找 9 个平衡点,记录九组数据,第二个阶段为吸湿过程,寻找 6 个平衡点,记录六组数据。

根据上述试验,在吸湿与脱湿两个过程,其记录的平衡数据见表 1。

表 1 甘肃东乡黄土吸湿脱湿两个过程基质吸力与含水量
Table 1 The hygroscopic and dehumidifying process of matrix suction and water content for the Gansu Dongxiang loess

脱湿过程		吸湿过程	
基质吸力/kPa	体积含水量	基质吸力/kPa	体积含水量
0	0.52	200	0.19
1	0.52	100	0.22
5	0.50	50	0.24
10	0.49	25	0.31
25	0.39	10	0.42
50	0.27	5	0.45
100	0.21		
200	0.19		
400	0.18		

2 非饱和土水特征曲线拟合方程的适用性

2.1 模型参数的拟合

目前,非饱和土水特征曲线的模型达数十种之多,文章选择前国内目前外广泛运用的典型的三种模型进行分析(表 2)。

表 2 非饱和土水特征曲线的三种经典模型
Table 2 Unsaturated soil-water characteristic curve of three classical model

研究者	方程	参数	说明
Gardner ^[4] (1958)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n}$	θ_r, θ_s, a, n	θ_r 为残余体积含水量,
VanGenuchten ^[5] (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m}$	$\theta_r, \theta_s, m, n, a$	θ_s 为饱和含水量, a, m, n 为拟合参数。
Fredlund and Xing ^[6] (1994)	$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right\}^m} + \theta_r$	$\theta_r, \theta_s, m, n, a$	

根据非饱和黄土实验成果,采用 Gardner、Van Genuhten 和 Fredlund and Xing 三种典型的模型对方程进行拟合,得到非饱和黄土在吸湿和脱湿过程中 SWCC 参数^[7](表 3、表 4)。

表 3 甘肃东乡黄土干密度 1.28g/cm³ 脱湿土水特征曲线拟合参数
Table 3 The fitting parameters of Gansu Dongxiang loess dry density of 1.28g / cm³ dehumidifying soil-water characteristic curve

模型	拟合参数					
	θ_r	θ_s	α	n	m	resnorm
Gardner	0.18	0.517	0.032	2.04		1.48e-004
Van Genuhten	0.18	0.514	0.043	2.54	0.20	2.24e-005
Fredlund and Xing	0.18	0.519	46.444	1.73	4.34	1.67e-004

表 4 甘肃东乡黄土干密度 1.28g/cm³ 吸湿土水特征曲线拟合参数
Table 4 The fitting parameters of Gansu Dongxiang loess dry density of 1.28g / cm³ hygroscopic soil-water characteristic curve

模型	拟合参数					
	θ_r	θ_s	α	n	m	resnorm
Gardner	0.19	0.475	0.047	1.73		1.48e-004
Van Genuhten	0.187	0.462	0.065	2.32	0.22	2.6e-005
Fredlund and Xing	0.18	0.491	45.51	1.05	5.17	5.3e-004

2.2 三种模型的适用性

运用上述拟合参数,得出非饱和黄土吸湿脱湿过程三种模型的土水特征曲线(图 1、图 2)。

从拟合的参数和方程可以看出,三种模型的均方差均达到 10⁻⁴级,拟合较为统一,三种模型对该地区马兰黄土具有较好的实用性(图 1、图 2)。

2.3 非饱和黄土土水特征曲线的滞后性

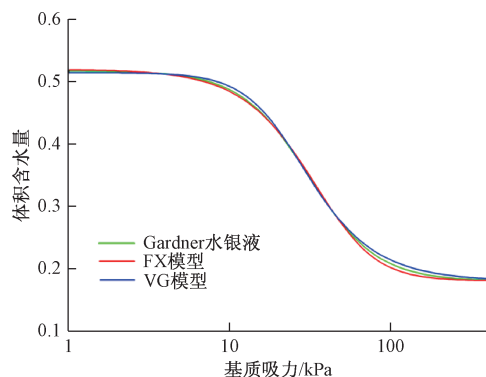


图1 甘肃东乡干密度 1.28 g/cm^3 黄土的脱湿曲线
Fig.1 The dehumidifying curve of Gansu Dongxiang loess dry density of 1.28 g/cm^3

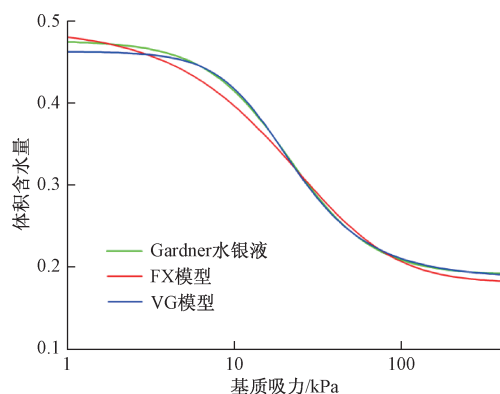


图2 甘肃东乡干密度 1.28 g/cm^3 黄土的吸湿曲线
Fig.2 The hygroscopic curve of Gansu Dongxiang loess dry density of 1.28 g/cm^3

本文选取 Van Genuehten 模型探讨非饱和黄土脱湿、吸湿过程的滞后性(图3)。

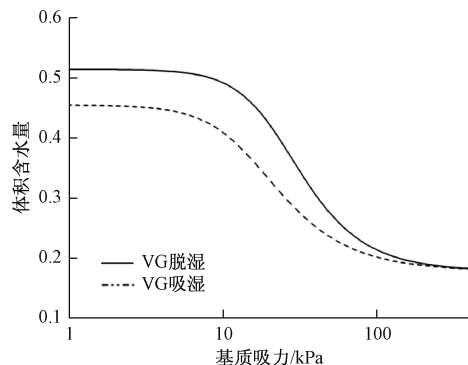


图3 Van Genuehten 模型非饱和黄土脱湿、吸湿过程的滞后性
Fig.3 The Van Genuehten model of unsaturated loess hygroscopic and dehumidifying process lag

非饱和黄土具有较强的的滞后性,在吸湿与脱湿过程中,同一吸力对应不同的含水量,而且同一吸力吸

湿过程对应含水量较大。主要原因是:一方面黄土体中的空隙分布大小不等,在吸湿与脱湿过程中,连通性好的空隙容易进水或者脱水,小空隙进水与排水能力较弱,于是产生在脱水过程中小空隙内残留水比吸水过程多,使得吸力相同在脱湿过程中含水量高于吸湿过程^[8];另一方面黄土在吸湿/脱湿过程中,孔隙水在浸入的过程中面临着“瓶颈”约束,导致了在同一吸力下吸湿的含水量小于脱湿的含水量,空隙大小的不同以及互相连通通道差异造^[9-10]。

3 非饱和黄土渗透系数预测

干密度为 1.28 g/cm^3 饱和渗透系数为 $2.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,根据 SWCC 试验和分析,运用目前常用的经验模型 Gardner 模型和统计模型 VG 模型,对非饱和渗透系数进行估算。对 VG 模型分析了基质吸力和体积含水量两个方面与渗透系数关系,对 Gardner 模型分析了基质吸力与渗透系数的关系。

$$\text{Gardner}^{[3]} (1958): k(\psi) = \frac{k_s}{1 + \alpha \psi^n}$$

Van Genuehten^[5] (1980) 提出了统计传导模型:

$$K_r(\psi) = \frac{[1 - (\alpha \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{m/2}}$$

$K_r(\psi)$ 为基质吸力为 ψ 的渗透系数与饱和渗透系数的比值。

3.1 基质吸力与非饱和渗透系数

从图4、图5中可以看出:

(1) 非饱和黄土其渗透系数非常小,且随着基质吸力的变化差异非常大,从 1 kPa 到 100 kPa 差别达 10000 倍。

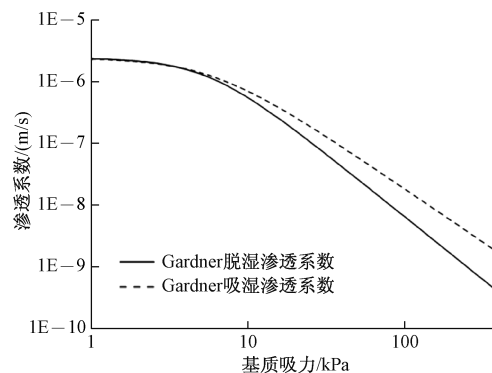


图4 干密度 1.28 黄土基质吸力与渗透系数 (Gardner 模型)
Fig.4 The dry density of 1.28 loess matric suction and permeability coefficient (Gardner model)

(2) 非饱和黄土土水特征曲线有其典型的滞后性,在吸湿脱湿过程中,相同基质吸力对应的非饱和和渗

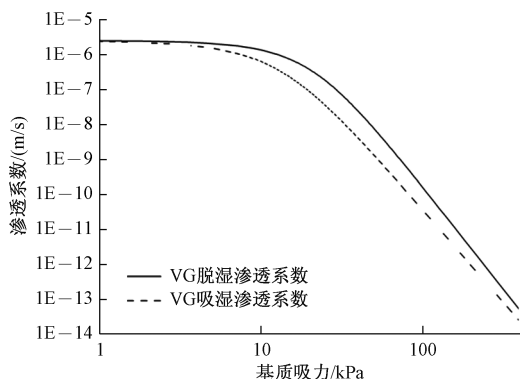


图5 干密度 1.28 黄土基质吸力与渗透系数 (VG 模型)

Fig.5 The dry density of 1.28 loess matric suction and permeability coefficient (VG model)

透系数不同,而在饱和和残余含水量两个节点附近差别较小,在基质吸力随含水量变化较大阶段其渗透系数差异较大,差异性多达到 50 倍。

(3)不同的非饱和渗透系数估算模型,差异性较大。在 VG 模型中吸湿过程比脱湿过程对应相同基质吸力条件下吸力对应的渗透系数小,而在 Garden 模型中刚好相反。

3.2 体积含水量与渗透系数

Van Genuchten^[5] (1980)提出了统计传导模型,在知道饱和渗透系数的前提下,由 SWCC 来确定土体非饱和渗透系数,得到一个封闭的函数表达式:

$$K_r = \Theta^{0.5} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2$$

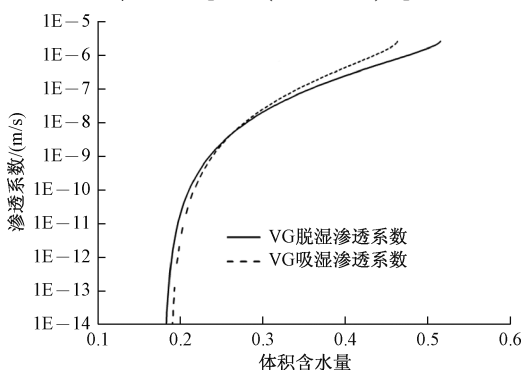


图6 东乡干密度 1.28 含水量与渗透系数

Fig.6 The dry density of 1.28 water content and permeability coefficient

从图 6 中可以看出,在吸湿和脱湿过程中,体积含水量对应的渗透系数不同,渗透系数在接近残余含水率时相同含水量都存在吸湿过程的渗透系数小于脱湿过程,随着含水量的增大,其吸湿过程对应相同含水量其渗透系数大于脱湿过程的,吸湿和脱湿过程相等的交点对于密度不同,其交点差异较大。

3.3 运用非饱和黄土土水特征曲线预测渗透系数的讨论

从基质吸力与非饱和渗透系数的关系和体积含水量与非饱和渗透系数的关系,由于土水特征曲线具有滞后性,造成吸湿脱湿过程其渗透系数的差异。而在非饱和渗流计算中,应结合实际情况选定合适的曲线,在蒸发过程计算,运用脱湿曲线,而在降雨、灌溉等地表入渗过程需要运用吸湿过程。

4 结论

(1)常用的 Gardner、Van Genuehten 和 Fredlund and Xing 三种典型的模型对非饱和黄土土水特征曲线具有较好的适用性。

(2)非饱和黄土土水特征曲线在吸湿、脱湿两个过程中相同的基质吸力对应的含水量不同,具有典型的滞后性。

(3)土水特征曲线存在吸湿脱湿过程,对两个过程进行非饱和渗透系数预测,渗透系数与基质吸力的关系,吸湿脱湿两个过程都存在不同。

(4)非饱和渗透系数运用过程中应结合实际工况进行合理选择。

参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
LIU Dongsheng. The loess and the environment [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [2] Ning Lu, William J. Likos. 非饱和土力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
Ning Lu, William J. Likos. Unsaturated soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [3] 吴礼舟, 黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 94-97.
WU Lizhou, HUANG Runqiu. A numerical analysis of the infiltration and parameter effects in unsaturated soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 94-97.
- [4] Gardner, W. R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [5] Van Genuehten M. T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44: 892-898.

- [6] Fredlund, D. G. , and Xing, A. , Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 15 (3) : 521 – 532.
- [7] 刘朋飞. 非饱和黄土滑坡失稳机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
LIU Pengfei. Study on the instability mechanism of unsaturated loess landslide [D]. Xi ' an; Chang ' an University, 2013.
- [8] Klausner YF. Fundamentals of continuum mechanics of soils . New York; Springer-Verlag. 1991.
- [9] Fredlund, D. G The 1999 R. M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil meechanics into geoteehnie engineering . Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (5) : 96 – 98.
- [10] 李俊业, 唐红梅, 陈洪凯, 等. 考虑饱和 – 非饱和渗流作用的重庆奉节鹤峰乡场镇滑坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21 (4) : 1 – 6.
LI Junye, TANG Hongmei, CHEN Hongkai, et al. Stability analysis of Changzhen landslide in considering saturated and unsaturated seepage effects [J]. The Chinese Journal of Geologicool Hazard and Control, 2010, 21 (4) : 1 – 6.

(上接第 115 页)

- [3] 谭成轩, 雷伟志, 孙炜锋, 等. 中国典型粘黄土区地质灾害风险评估危险性影响因素分析 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11) : 1771 – 1781.
TAN Chengxuan, LEI Weizhi, SUN Weifeng, et al. An analysis of the danger influence factors of geo-hazard risk assessments in typical stick loess regions in China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11) : 1771 – 1781.
- [4] 唐亚明, 薛强, 李清, 等. 黄土滑塌灾害风险分级系统研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20 (3) : 378 – 386.
TANG Yaming, XUE Qiang, LI Qing, et al. Slope classification system for loess collapse risk assessment [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (3) : 378 – 386.
- [5] 陈国金, 宁国民, 袁琴. 长江三峡库区巴东黄土坡滑坡风险评价 [J]. 资源环境与工程, 2012, 26 (S) : 90 – 96.
CHEN Guojin, NING Guomin, YUAN Qin. Loess landslide risk assessment in Changjiang river area [J]. Resource Environment and Engineering, 2012, 26 (S) : 90 – 96.
- [6] 张军, 陈征宙, 刘登峰. 基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (6) : 44 – 50.
ZHANG Jun, CHEN Zhengzhou, LIU Dengfeng. Stability evaluation of a rock slope based on the cloud model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (6) : 44 – 50.
- [7] 黄奇, 费钊, 徐峰, 等. 基于物元模型的岩质边坡稳定性评估研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8 (2) : 439 – 444.
HUANG Qi, FEI Fan, XU Feng, et al. Assessment research on the stability of rock mass slopes based on matter-element model [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8 (2) : 439 – 444.
- [8] 刘杰, 李建林, 胡海浪, 等. 基于有限元分析的岩质边坡稳定性模糊评判方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S1) : 3438 – 3445.
LIU Jie, LI Jianlin, HU Hailang, et al. Study on fuzzy evaluation method of rock slope stability based on finite element analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S1) : 3438 – 3445.
- [9] 李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (1) : 83 – 87.
LI Jian, WANG Mingwu, XU Peng, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 36 (1) : 83 – 87.