

# 干密度对非饱和粉质黏土土水特征的影响

张庆安<sup>1\*</sup>, 徐学彬<sup>1</sup>, 姚义胜<sup>1</sup>, 刘依依<sup>2</sup>

<sup>1</sup>济南城市建设集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年9月29日; 录用日期: 2024年10月22日; 发布日期: 2024年10月31日

## 摘要

非饱和土广泛地存在于自然界和工程领域, 其工程性质和行为特征备受关注, 对工程建设安全性和地质环境稳定性至关重要。土-水特征曲线(SWCC)作为描述非饱和土的基本工具, 揭示了土壤湿度状态与基质吸力的变化关系, 其形状和参数与土壤力学行为、渗透性及工程应用紧密相关, 而干密度的变化则直接影响土体的孔隙结构、持水性能和力学响应。基于此, 本研究基于压力板仪, 开展土-水特征曲线测试, 探究了不同干密度条件下粉质黏土土-水特征曲线的变化规律。结果表明: 土样的干密度对土-水特征曲线的变化具有显著影响, 相同基质吸力下, 初始干密度越大的试件对应的质量含水率越小, 随着干密度的增大, 试件之间质量含水率的差异逐渐减小; 当基质吸力由0增大至500 kPa时, 干密度为1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup>的试件的质量含水率分别减小了11.1%、10.7%、9.8%; 基于VG模型, 建立考虑干密度的土-水特征曲线模型, 可快速预测山东某地区粉质黏土土-水特征曲线, 提供便捷途径。

## 关键词

干密度, 粉质黏土, 土-水特征曲线, 模型

# Effect of Dry Density on Soil-Water Characteristics of Unsaturated Silty Clay

Qing'an Zhang<sup>1\*</sup>, Xuebin Xu<sup>1</sup>, Yisheng Yao<sup>1</sup>, Yiyi Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jinan City Construction Group, Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Sep. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Oct. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Unsaturated soil widely exists in nature and engineering fields. Its engineering properties and be-

\*通讯作者。

文章引用: 张庆安, 徐学彬, 姚义胜, 刘依依. 干密度对非饱和粉质黏土土水特征的影响[J]. 土木工程, 2024, 13(10): 1945-1954. DOI: 10.12677/hjce.2024.1310213

havior characteristics have attracted much attention, which is very important for the safety of engineering construction and the stability of the geological environment. The soil-water characteristic curve (SWCC), as a basic tool to describe unsaturated soil, reveals the relationship between soil moisture state and matric suction. Its shape and parameters are closely related to soil mechanical behavior, permeability, and engineering application. The change of dry density directly affects the pore structure, water holding capacity and mechanical response of soil. Based on this, this study carried out the soil-water characteristic curve test based on the pressure plate instrument and explored the variation law of the soil-water characteristic curve of silty clay under different dry density conditions. The results show that the dry density of the soil sample has a significant effect on the change of the soil-water characteristic curve. Under the same matrix suction, the larger the initial dry density, the smaller the corresponding mass moisture content of the specimen. With the increase of dry density, the difference of mass moisture content between specimens gradually decreases. When the matric suction increased from 0 to 500 kPa, the mass water content of the specimens with dry density of 1.5, 1.6 and 1.7 g/cm<sup>3</sup> decreased by 11.1 %, 10.7 % and 9.8 %, respectively. Based on the VG model, a soil-water characteristic curve model considering dry density is established, which can quickly predict the soil-water characteristic curve of silty clay in a certain area of Shandong and provide a convenient way.

## Keywords

Dry Density, Silty Clay, Soil-Water Characteristic Curve, Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

非饱和土在自然界和工程领域中的广泛存在, 使得其工程性质和行为特征成为众多学者关注的焦点。这类土壤的特性对于工程建设的安全性和地质环境的稳定性起着至关重要的作用。土-水特征曲线 (SWCC) 作为描述非饱和土中水分与土颗粒相互作用的基本工具, 已被广泛认可并应用于各类工程实践中。土-水特征曲线不仅揭示了非饱和土在不同含水量状态下的吸力变化, 其形状和参数与非饱和土的力学行为、渗透性以及工程应用密切相关。不同的干密度会直接导致土体孔隙结构的改变, 进而影响土体的持水性能和力学响应。

目前, 国内外学者在土水特征曲线方面已经进行了一系列的研究, 并相应建立了各种不同的土-水特征曲线模型[1]-[5]。王铁行和王晓峰[6]采用砂土作为试验材料, 探究了土体密度对吸力效应的作用机制。王世梅[7]则选取红黏土为对象, 系统分析了应力状态对吸力变化的影响规律。SALAGER S 等[8]综合理论与试验手段, 针对两种不同类型黏土的持水特性, 在温度变化条件下的表现进行了研究, 从理论上阐述了吸力随含水量、温度及孔隙比变动的内在规律, 并阐释了密度与温度对持水特性的影响机理。刘奉银等[9]通过测定不同初始干密度黄土样品的土-水特征曲线, 采用适宜的曲线模型进行数据拟合分析, 揭示了初始干密度对该曲线的具体影响, 并创新性地提出了“滞回度”这一概念。陈宇龙等[10]针对不同粒径的土样, 在吸湿与脱湿过程中开展了持水性能试验, 发现有效粒径的增大导致进气值、进水值及残余基质吸力在半对数坐标系中均呈现线性下降趋势, 而减湿率则呈现二次函数增长模式。毕庆涛等[11]人利用改进后的压力板仪进行试验, 分析了干密度对非饱和黄土的土-水特征曲线的影响。田湖南等[12]对沉积粉细砂土的土-水特征曲线特性进行了深入分析, 讨论了细粒含量对砂土持水能力的具体作

用,并建立了细粒、基质吸力与含水率之间的函数关系模型。Dolinar B [13]则提出了一种新的数学表达式,用于描述细粒土在特定含水率区间内所展现的塑性特性土-水特征曲线。陶高粱等[14]基于压力板仪,研究了非饱和黏土在不同初始孔隙比条件下的土-水特征曲线,进一步提供了针对不同初始孔隙条件的土-水特征曲线预测策略。

尽管国内外众多学者对非饱和土土-水特征曲线的各种影响因素进行了分析,但针对山东地区的非饱和粉质黏土特性的研究尚显匮乏,土体干密度对非饱和粉质黏土土水特性影响的研究及相应模型的建立更是鲜有涉及。基于此,本研究立足于实际工程,通过现场采集粉质黏土样品,在室内制备了不同干密度的粉质黏土试件,并基于压力板仪,开展土-水特征曲线测试,探究了不同干密度条件下粉质黏土土-水特征曲线的变化规律,并基于 VG 模型建立了考虑干密度的土-水特征曲线模型,为深入理解非饱和粉质黏土的土水特性提供理论支撑。

## 2. 试验概况

### 2.1. 试验仪器

本研究采用的试验仪器为 Geo-Experts 公司生产的土-水特征曲线压力板仪,基于轴平移技术,主要用于研究一定压力下土壤与水分之间的物理关系。该仪器配备 5 bar (500 kPa)进气值的陶土板,陶土板饱和后能够与空气之间形成收缩膜,阻止土样中的气体透过,允许土中水分排出。该设备具备独立的排水/吸水和排水量测量系统,以及两套气泡冲刷系统,能够精确测量土样在不同基质吸力下的水体积变化。通过数字式传感器自动读取数据,可精确测量土样的土-水特征曲线。

### 2.2. 试验材料

试验用土取自山东省某工程现场,原状土经破碎、烘干、研磨碾碎、过筛后密封保存。通过室内基本物理学指标试验,得到试验材料的颗粒级配和基本物性指标见表 1 和表 2。由此可知,试验材料的液限为 27.5%,塑性指数为 10.8。土样中粉粒与黏粒含量占 84.6%,其中粉粒占 72.9% (2~75  $\mu\text{m}$ ),黏粒占 11.7% (小于 2  $\mu\text{m}$ ),因此本试验用土为粉质黏土。

Table 1. Particle composition of the test material

表 1. 试验材料的颗粒组成

粒径(mm)	0.5 ~ >0.25	0.25 ~ >0.075	0.075 ~ >0.005	$\leq 0.005$
质量分数(%)	0	15.4	69.1	15.5

Table 2. Basic physical property indexes of test materials

表 2. 试验材料的基本物性指标

土粒比重	塑限(%)	液限(%)	塑性指数	最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最优含水率(%)
2.75	16.7	27.5	10.8	1.84	11.8

### 2.3. 试验方案及试验步骤

为研究不同干密度下非饱和粉质黏土的土水特性,分别制备干密度为 1.5  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、1.7  $\text{g}/\text{cm}^3$  的标准环刀试件(直径 61.8 mm、高度 20 mm)。取土,按含水率为 12%,加入适量的水并搅拌均匀,放入密封袋静置 12 h,使土中的水分分布均匀。按照设置的干密度计算所需土的质量,制备出固定干密度的环刀试件。将制备好的试件放入叠式饱和器中进行固定,并放入真空饱和缸中,真空抽气饱和并静置约 24 h,不同干密度试件的基本物理参数见表 3。

**Table 3.** Basic physical parameters of specimens with different dry densities  
**表 3.** 不同干密度试件的基本物理参数

编号	干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	孔隙比	饱和质量含水率(%)
1	1.5	0.83	30.2
2	1.6	0.72	26.0
3	1.7	0.62	22.4

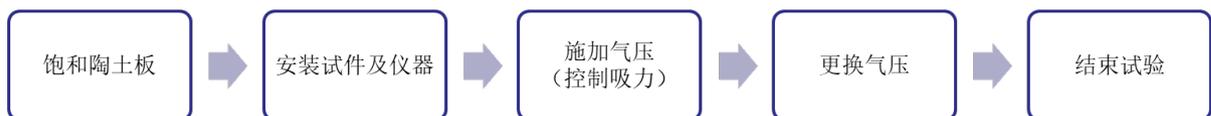
具体的试验步骤如下，并以流程图表示，见图 1。

1) 注入无气水，饱和陶土板，水面高出陶土板 5 cm，设置一定气压，排气陶土板中的气体，避免试验过程中的测量误差。

2) 用无气水冲刷管路，避免气泡存在，将饱和后的试件置于陶土板上，密封上压力室，打开气源。

3) 逐级施加气压，依次为 0 kPa、10 kPa、20 kPa、40 kPa、80 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa，共 10 级基质吸力，维持每个吸力等级至少 48 h，待排水量稳定后，记录数据，然后施加下一级基质吸力。

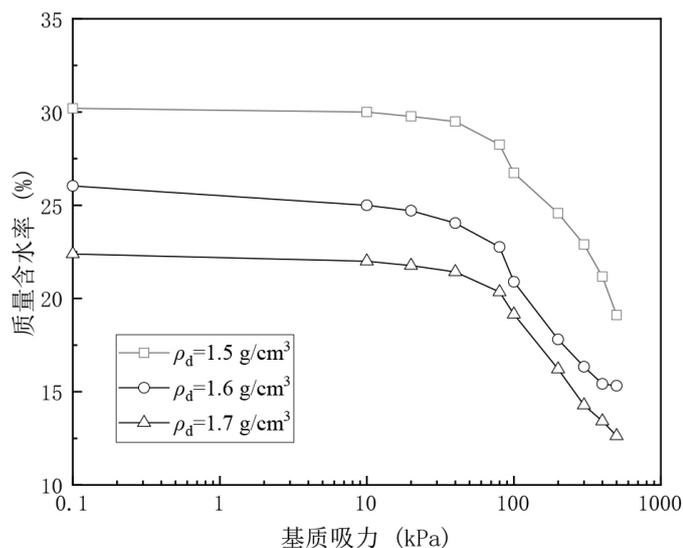
4) 试验完成后，卸掉气压，取出试件，用烘干法测量其含水率。



**Figure 1.** Test flow chart  
**图 1.** 试验流程图

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 干密度对土 - 水特征曲线的影响



**Figure 2.** Soil-water characteristic curve (water content-matrix suction)  
**图 2.** 土 - 水特征曲线(质量含水率 - 基质吸力)

由图 2 可知，非饱和粉质黏土试件的质量含水率均为随着基质吸力增大而减小，符合土 - 水特征曲

线的一般规律。在基质吸力由 0 增加至 80 kPa 时, 不同干密度粉质黏土试件的质量含水率均缓慢降低, 这是由于试件由饱和状态转变为非饱和状态时存在一个进气值, 当基质吸力小于进气值时, 土体内部较难进入空气以及排除水分。当基质吸力大于 80 kPa 时, 质量含水率降低的斜率显著增大, 孔隙水以较快的速度开始由土体孔隙内部排出。

此外, 土样的不同干密度对土 - 水特征曲线的变化具有显著影响, 相同基质吸力下, 初始干密度越大的试件对应的质量含水率越小, 并随着干密度的增大, 曲线整体向左下角移动, 但试件之间质量含水率的差异逐渐减小。当基质吸力由 0 增大至 500 kPa 时, 干密度为 1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup> 的试件的质量含水率分别减小了 11.1%、10.7%、9.8%, 这是因为干密度较低的土样展现出较高的孔隙连通性, 从而使得水分在其中具有更好的流动性; 相反, 干密度较高的土样则表现出较低的孔隙连通性, 其持水能力较强, 进而随着干密度增大, 土 - 水特征曲线更为贴近。

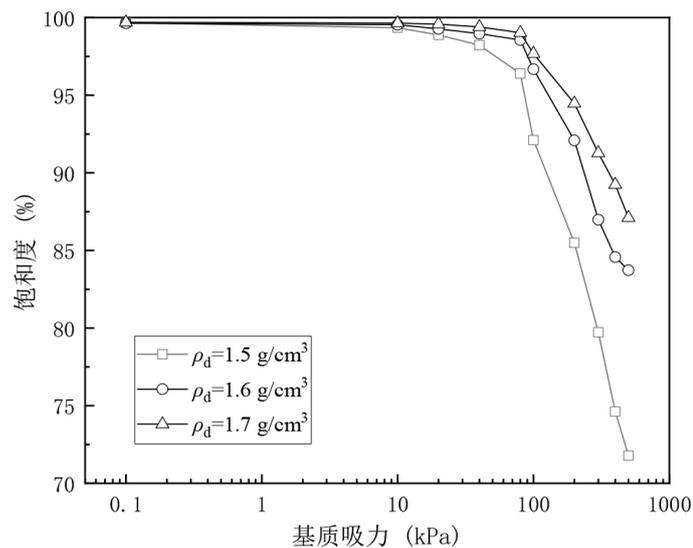


Figure 3. Soil-water characteristic curve (saturation-matrix suction)

图 3. 土 - 水特征曲线(饱和度 - 基质吸力)

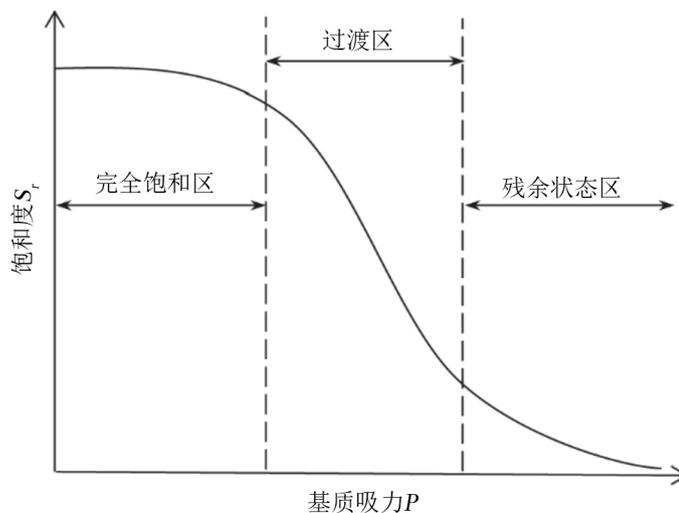


Figure 4. Division of soil-water characteristic curve

图 4. 土 - 水特征曲线分区示意

饱和度和基质吸力的关系曲线如图 3 所示, 随着基质吸力的增大, 试件的饱和度随之减小, 其变化关系类似质量含水率与基质吸力的关系。在基质吸力较小的阶段, 不同干密度土体的饱和度非常接近, 干密度对于土体饱和度影响效应较低。经计算得到, 干密度为 1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup> 的试件的进气值分别为 59.2、71.7、106.7 kPa, 即土样的干密度越小, 对应的进气值越低, 其原因是, 土样内部孔隙较大, 水流路径较多, 施加较小的吸力可使土样中的水分迅速排出。随着基质吸力的逐步增大, 粉质黏土样本的脱水速率呈现出随其干密度增加而减缓的趋势。在这一过程中, 当样本达到相同的饱和度时, 较高的干密度对应于更大的基质吸力, 标志着干密度效应的开始显现。

进气值和残余含水率是土-水特征曲线的两个关键特征点, 二者将曲线划分为三个具有明确特性的区域: 完全饱和区、过渡区及残余状态区[15], 如图 4 所示。在完全饱和区域内, 土壤孔隙被水完全填充, 且土颗粒间及其接触点上的水膜保持连续状态; 随着吸力值增大至进气值, 曲线进入过渡区域, 此时孔隙水因气体侵入而受到挤压并开始排出, 导致原本均匀连续分布的水分变得分散且不稳定, 饱和度随基质吸力的增强而急剧下降; 当施加的吸力持续增加, 直至达到残余状态区域, 孔隙中水分主要为吸附水, 此时吸力的进一步增加不再引起土壤饱和度显著变化。基质吸力与弯液面的曲率半径之间存在反比关系。随着干密度的增大, 土体内部孔隙趋于减小, 相应地, 弯液面的半径亦会减小, 从而导致进气值增大。据此分析, 孔隙的大小对土-水特征曲线的形态及其变化趋势具有直接影响。而干密度的变化会导致孔隙特性的改变, 最终将对非饱和土的持水特性产生显著影响。

### 3.2. 土-水特征曲线的拟合

试验得到的土-水特征曲线是一些离散的数据点, 将其变成连续函数更有利于实际计算和应用。连续的土-水特征曲线可通过特定的数学模型表示, 目前已有学者建立了大量模型来表征土-水特征曲线, 常用的模型有 Gardner 模型[16]、Van Genuchten (VG)模型[17]、Fredlund & Xing (F-X)模型[18]。

Gardner 模型表达式为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^b} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $s$  为基质吸力;  $a$ 、 $b$ 、 $\theta_r$  为拟合参数。

VG 模型表达式为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (ls)^m\right]^n} \quad (2)$$

式中:  $\theta$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $s$  的含义同前;  $l$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $\theta_r$  为拟合参数, 其中  $n = 1 - 1/m$ 。

F-X 模型表达式为

$$\theta = C(s) \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left(\frac{s}{\eta}\right)^\gamma \right] \right\}^\lambda} \quad (3)$$

$$C(s) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{s}{s_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{s_r} \right)} \quad (4)$$

式中： $\exp(1)$ 为自然对数的底数； $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $\lambda$ 、 $s_r$ 为拟合参数； $\theta$ 、 $\theta_s$ 、 $s$ 的含义同前。

各模型的拟合结果汇总于表 4~6，不同干密度的土-水特征曲线拟合曲线见图 5~7。

从拟合结果来看，拟合曲线形态基本呈现 S 型，三个模型对于不同干密度的非饱和和粉质黏土土-水特征曲线拟合效果均较好， $R^2$  在 0.98 以上。综合来看，VG 模型拟合效果好，并且模型结构简单，仅需三个参数就能够较好地描述土-水特征曲线，故 VG 模型更适合用来拟和不同干密度下非饱和粉质黏土。

**Table 4.** Gardner model fitting results

**表 4.** Gardner 模型拟合结果

干密度(g/cm <sup>3</sup> )	$a$	$b$	$\theta_r$	$R^2$
1.5	852.003	1.057	5.266	0.992
1.6	639.011	0.916	7.712	0.985
1.7	559.639	1.102	8.482	0.991

**Table 5.** VG model fitting results

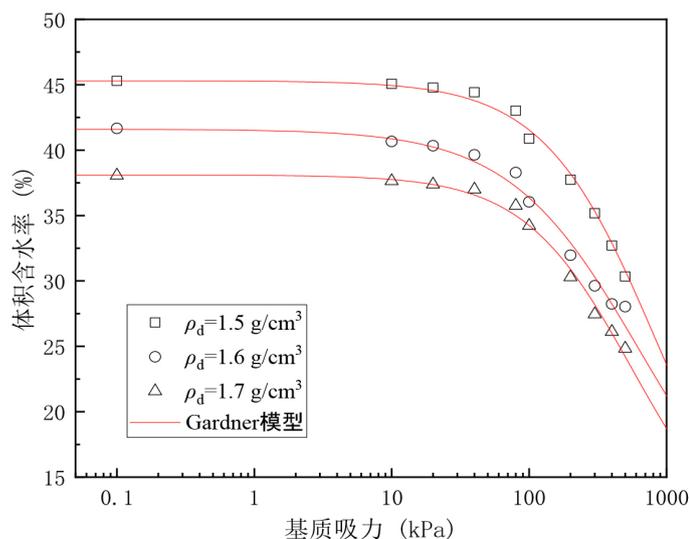
**表 5.** VG 模型拟合结果

干密度(g/cm <sup>3</sup> )	$l$	$m$	$\theta_r$	$R^2$
1.5	0.005	1.374	5.115	0.995
1.6	0.010	1.337	7.488	0.991
1.7	0.007	1.481	8.984	0.996

**Table 6.** F-X model fitting results

**表 6.** F-X 模型拟合结果

干密度(g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$	$\eta$	$\lambda$	$s_r$	$R^2$
1.5	1.477	139.969	0.462	1.225E8	0.995
1.6	1.476	82.818	0.411	1.828E8	0.991
1.7	1.761	103.952	0.400	1.404E8	0.997



**Figure 5.** Gardner model fitting curve

**图 5.** Gardner 模型拟合曲线

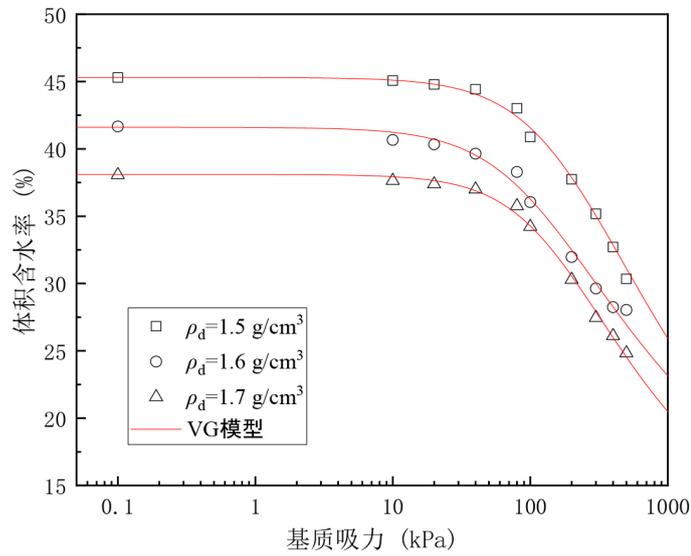


Figure 6. VG model fitting curve

图 6. VG 模型拟合曲线

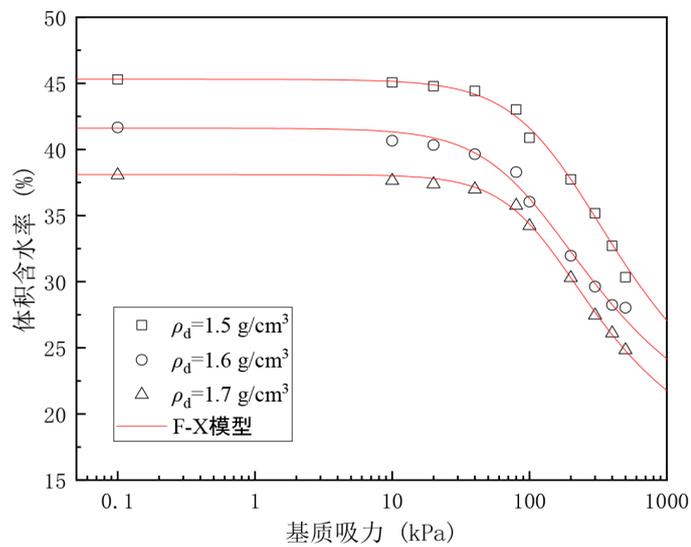


Figure 7. F-X model fitting curve

图 7. F-X 模型拟合曲线

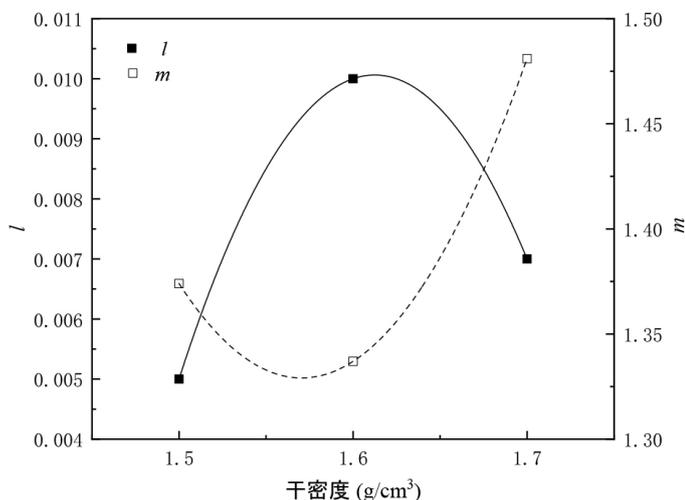
的土 - 水特征曲线。

图 8 描述了 VG 模型中拟合参数随土体干密度变化的关系, 可得拟合参数  $l$  和  $m$  的关系表达式为

$$\begin{cases} l = -0.41\rho_d^2 + 1.29\rho_d - 1.03 \\ m = 9.05\rho_d^2 - 28.43\rho_d + 23.65 \end{cases} \quad (5)$$

则基于 VG 模型, 考虑干密度的土 - 水特征曲线模型为

$$\begin{cases} \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (ls)^m]^n \\ l = -0.41\rho_d^2 + 1.29\rho_d - 1.03 \\ m = 9.05\rho_d^2 - 28.43\rho_d + 23.65 \end{cases} \quad (6)$$



**Figure 8.** The relationship between fitting parameters and dry density in VG model

**图 8.** VG 模型中拟合参数与干密度的关系

已知土体干密度，并根据该式可预测出山东省某地区粉质黏土的土 - 水特征曲线，为确定该地区土 - 水特征曲线寻求了一条快捷路径。

#### 4. 结论

本文针对山东地区粉质黏土，基于压力板仪，开展土 - 水特征曲线测试，探究了不同干密度条件下粉质黏土土 - 水特征曲线的变化规律主要结论如下：

1) 土样的不同干密度对土 - 水特征曲线的变化具有显著影响，相同基质吸力下，初始干密度越大的试件对应的质量含水率越小，并随着干密度的增大，试件之间质量含水率的差异逐渐减小。

2) 当基质吸力由 0 增大至 500 kPa 时，干密度为 1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup> 的试件的质量含水率分别减小了 11.1%、10.7%、9.8%，这是由于干密度更小的土样具有较高的孔隙连通性，使得水分在其中流动性更强。

3) 干密度为 1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup> 的试件的进气值分别为 59.2、71.7、106.7 kPa，即土样的干密度越小，对应的进气值越低，其原因是，土样内部孔隙较大，水流路径较多，施加较小的吸力可使土样中的水分迅速排出。干密度的变化会导致孔隙特性的改变，最终将对非饱和土的持水特性产生显著影响。

4) VG 模型拟合效果好且结构简单，仅三个参数即可较好地描述土 - 水特征曲线。基于 VG 模型，进一步建立了考虑干密度的土 - 水特征曲线模型，根据该式可预测出山东省某地区粉质黏土的土 - 水特征曲线，为确定该地区土 - 水特征曲线寻求了一条快捷路径。

#### 参考文献

- [1] Xiao, Y., Liu, S., Shi, J., Liang, F. and Zaman, M. (2024) Temperature-Dependent SWCC Model for Unsaturated Soil. *International Journal of Geomechanics*, **24**, Article 4024071. <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmng-9406>
- [2] Liu, Y., Zhao, Y., Vanapalli, S.K. and Mehmood, M. (2024) Soil-Water Characteristic Curve of Expansive Soils Considering Cumulative Damage Effects of Wetting and Drying Cycles. *Engineering Geology*, **339**, Article 107642. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107642>
- [3] Yu, M., Gui, Y. and Li, B. (2024) Modelling Soil-Water Retention Curves Subject to Multiple Wetting-Drying Cycles: An Approach for Expansive Soils. *Computers and Geotechnics*, **171**, Article 106335. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106335>

- [4] 刘晓明, 杨泽曦, 杨刚, 等. 含细颗粒的粗粒土 SWCC 双分形维预测模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 96-102.
- [5] 高游, 李泽, 孙德安, 等. 考虑初始孔隙比影响的单/双峰土 - 水特征曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1441-1452.
- [6] 王铁行, 王晓峰. 密度对砂土基质吸力的影响研究[J]. 岩土力学, 2003(6): 979-982.
- [7] 王世梅, 刘德富, 谈云志, 等. 某滑坡土体土 - 水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2008(10): 2651-2654.
- [8] Salager, S., El Youssoufi, M.S. and Saix, C. (2010) Effect of Temperature on Water Retention Phenomena in Deformable Soils: Theoretical and Experimental Aspects. *European Journal of Soil Science*, **61**, 97-107. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01204.x>
- [9] 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(S2): 132-136.
- [10] 陈宇龙, 内村太郎. 粒径对土持水性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1474-1482.
- [11] 毕庆涛, 冯巧云, 赵俊刚, 等. 干密度对非饱和黄土土 - 水特征曲线的影响试验[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 84-88.
- [12] 田湖南, 孔令伟. 细粒对砂土持水能力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 56-60.
- [13] Dolinar, B. (2014) Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve Based on the Specific Surface Area of Fine-Grained Soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **74**, 697-703. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0664-y>
- [14] 陶高粱, 孔令伟. 不同初始孔隙比土体进气值及土 - 水特征曲线预测[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1): 34-38.
- [15] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E. (1999) The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-water Characteristics of a Compacted Till. *Géotechnique*, **49**, 143-159. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.2.143>
- [16] Gardner, W.R. (1958) Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table. *Soil Science*, **85**, 228-232. <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>
- [17] van Genuchten, M.T. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- [18] Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>.