

# Q<sub>3</sub> 原状黄土与重塑黄土的土水特性研究

张玉伟<sup>1</sup>, 宋战平<sup>1</sup>, 翁效林<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 黄土土水特征曲线与其强度、渗流及本构关系等密切相关。为研究 Q<sub>3</sub> 黄土的土水特性, 分别进行了 Q<sub>3</sub> 原状黄土和重塑黄土的土水特征曲线测试, 并用经典的 B-C 模型和 V-G 模型对试验结果进行拟合, 分析孔隙比对 Q<sub>3</sub> 重塑黄土土水特性的影响。结果表明: 原状黄土土水特征曲线分为快速减小、缓慢减小和稳定 3 个阶段, 进气值为 20kPa 左右, 随土体排水, 空气进入孔隙内部, 吸力逐渐增大, 稳定阶段土体饱和度很低, 土体处于大吸力段, 孔隙排水不明显; 重塑黄土土水特征曲线整体趋势与原状黄土一致, 但孔隙比对其影响较明显, 当孔隙比较大时, 体积含水率降低引起吸力明显增加, 进气值较小, 孔隙比较小时, 随着吸力值增加, 体积含水率降低速率较小, 随着孔隙比减小, 土体进气吸力值逐渐增大; 采用 B-C 模型和 V-G 模型与原状黄土试验结果进行对比, B-C 模型低吸力段拟合效果不佳, 高吸力段拟合较好, V-G 模型整体拟合效果良好。

**关键词:** 原状黄土; 重塑黄土; 压力膜仪; 土水特性; 进气值

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0224-06

## Study on soil water characteristic curve of Q<sub>3</sub> intact and remolded loess

ZHANG Yuwei<sup>1</sup>, SONG Zhanping<sup>1</sup>, WENG Xiaolin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Soil water characteristic curve of loess is closely related to its strength, seepage and constitutive simulation. This study tested soil water characteristic curves of intact and remolded Q<sub>3</sub> loess. The classical B-C model and V-G model were used to fit the test results, and the effect of void ratio to soil water characteristic curve of Q<sub>3</sub> remolded loess was analyzed. The results showed that soil water characteristic curve of intact loess is divided into three stages: the rapid decreasing stage, the slow decrease stage and the stable stage. When air suction value was about 20 kPa, air began to fill into the pore with the internal soil with drainage, and air suction increases gradually, stable stage of soil saturation is very low, the soil in the large suction pore drainage is not obvious. The overall trend of remolded loess consistent with the curves of intact loess, but the effect of void ratio on the soil water characteristic curve is larger, when the pore is relatively large, the initial volume of high water content, low suction volume water content decreased significantly with increasing suction, the pore is small, relatively small volume of the initial moisture content, with suction value increases, volumetric water content decrease rate is smaller; by using the B-C model and the V-G model of intact loess and experimental results were compared, results in low suction B-C model and difference test. However, the B-C model of high suction section is in good agreement with the experimental results. The overall fitting effect of V-G model is good. Especially in the low suction section, the fitting effect is better than the B-C model.

**Key words:** intact loess; remolded loess; pressure membrane gauge; soil-water characteristic; air entry value

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378004, 51578447); 西安建筑科技大学人才基金(RC1803); 中国博士后基金项目(2018M643809XB)

作者简介: 张玉伟(1989-), 男, 山东淄博人, 博士后, 讲师, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究。

## 1 研究背景

土水特征曲线 SWCC (soil - water characteristic curve) 是研究黄土力学特性的基础<sup>[1-2]</sup>。土体的渗透性、强度、变形等均与土水特征曲线密切相关,土体本构模型建立也常常用到土水特征曲线模型。目前土水特征曲线方面研究已取得了丰硕的成果,理论方面国外学者通过试验提出了多个经典的经验公式<sup>[3-8]</sup>,得到了广泛的认同与应用,试验方面,王铁行等<sup>[9]</sup>开展了重塑砂土土水特征试验,研究了砂土密度对吸力变化的影响;王世梅等<sup>[10]</sup>开展了某滑坡重塑红黏土的土水特征试验,研究了土体应力状态对吸力变化的影响;陶高粱等<sup>[11-12]</sup>基于分形理论,探讨了黏粒含量和土体压缩变形对土水特征曲线的影响,并利用已有试验数据进行了对比验证;张昭等<sup>[13]</sup>利用 GCTS 土水特征曲线仪,测定了无压和固结压力下 Q<sub>3</sub> 黄土土水特征曲线,引入“水土体积比”对不同土体进行分析;褚峰等<sup>[14]</sup>分析了天然干密度和竖向应力对原状黄土土水特性的影响;周葆春等<sup>[15]</sup>系统分析了土体含水率改变导致其孔隙体积变化,进而研究了孔隙变化下土体的土水特征曲线变化规律;谭晓慧等<sup>[16]</sup>采用渗析法及滤纸法测定了膨胀土的土 - 水特性,以 Van Genuchten 模型为基础对试验结果进行了曲线拟合。可以看出学者们已对土体材料的土水特性开展了较多的研究,并逐渐认识到孔隙变化对土水特性具有重要影响,但目前关于 Q<sub>3</sub> 黄土土水特性的研究相对较少,而且 Q<sub>3</sub> 黄土具有明显的孔隙结构,孔隙变化对其土水特性的影响非常明显,因此本文系统研究 Q<sub>3</sub> 黄土的土水特性,着重考虑 Q<sub>3</sub> 黄土的孔隙变化对土水特征曲线的影响,分别制备原状试样和不同孔隙比重塑黄土试样,采用 15bar 压力膜仪进行 Q<sub>3</sub> 原状试样和不同孔隙比重塑试样的试验,系统分析 Q<sub>3</sub> 黄土的土水特性,进而采用经典模型对原状黄土和重塑黄土试验数据进行拟合验证,分析现有经典模型对 Q<sub>3</sub> 黄土土水特性预测的适用性,并探讨孔隙变化对 SWCC 的影响规律。

## 2 Q<sub>3</sub> 原状黄土与重塑黄土的土水特性试验

### 2.1 SWCC 测试方法

采用 1500F1 型压力膜仪(图 1)开展测试<sup>[17]</sup>,压力膜仪测试装置包括增压泵、保压阀门、密闭压力室和集水管,增压泵提供持续性压力,通过阀门调节

试验所需的压力值,压力室提供保压空间,压力室下方陶瓷板浸水饱和时可使室内外压力保持平衡,平衡条件下,土体吸力值与外加压力值相等,土样脱水过程的吸力值变化可通过加压系统实时监测,土体排水量进入集水管,通过排水量可计算出任何试验阶段土体的体积含水率。

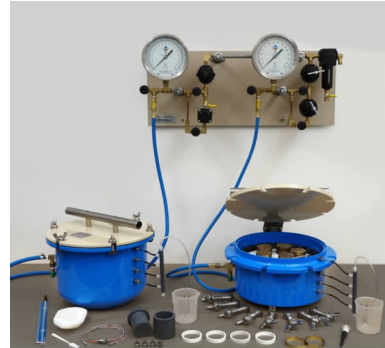


图1 1500F1 压力膜仪

压力膜仪压力室中的陶瓷板分布有细密的小孔,浸湿时由于受到表面张力作用,小孔表面会形成收缩膜,阻止空气进入内部,压力室内部压力较大,达到土体脱湿的目的,陶瓷板小孔收缩膜内外压差即为基质吸力(见图 2),陶瓷板保压极限值可通过下式计算:

$$s_d = (u_a - u_w)_d = 2T_s/R_s \quad (1)$$

式中:  $s_d$  为进气值;  $T_s$  为水膜表面张力;  $R_s$  为水膜曲率半径。

压力室内土样内部水分受到压差作用逐渐排出,通过实时监测各阶段阀门压力值和集水管排水量,即可得到土体体积含水率和吸力之间的变化关系,最终得到土样的土水特征曲线。

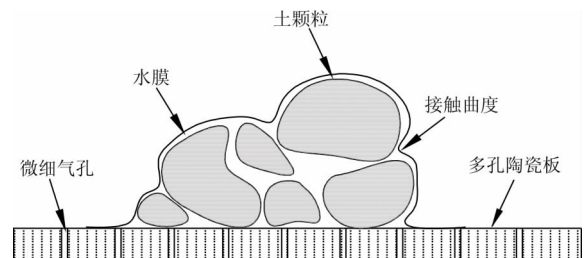


图2 土颗粒与陶瓷板的接触示意图

### 2.2 试验方案及过程

本文考虑 Q<sub>3</sub> 黄土孔隙变化对 SWCC 的影响,此外还关注现有经典模型对黄土土水特性预测的准确性,分别制备 Q<sub>3</sub> 黄土原状试样和重塑试样开展试验,重塑试验考虑了孔隙变化影响。原状试样和重塑试样均由施工现场取土制得,同时进行现场土样

的基本参数测试,结果见表1所示。试验过程增压值设置为10、20、40、60、80、100、150、200、250、300、350、400、450、500 kPa。

表1 现场黄土土样基本参数

$G_s$	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w / \%$	$c / \text{kPa}$	$e$	$\varphi / (^\circ)$	$E_s / \text{MPa}$
2.72	1.52	14.1	30.66	0.82	21	12.6

原状土样采用环刀削样,环刀为直径61.8 mm、高度20 mm的标准小环刀,原状土样如图3所示。拟制备的重塑土样孔隙比分别为0.85、0.8、0.75、0.7、0.65、0.6,不同孔隙比重塑土样由压样器(如图4)来制备,制样原理如下:小环刀体积为 $V = \pi r^2 h = 59.99 \text{ cm}^3$ ,根据干密度的定义 $\rho_d = m_s / V$ ,得到不同干密度 $\rho_d$ 所需要一个小环刀样的干土量 $m_s$ ,含水率设定为原状土含水率,可得到小环刀样所需水量,称取干土量 $m_s$ 和所需水量,通过压样筒可依次制备不同孔隙比的重塑黄土试样。



图3 原状土样制备



图4 重塑土样制备

按照《公路土工试验规程》中要求,试样饱和采用毛细管饱和法,土样饱和度大于95%认为符合要求。每级加压平衡后记录集水管读数,每级压力对应的排水量为:

$$m_{wj} = \alpha \cdot \Delta h \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为标定参数, $\text{g}/\text{mm}$ ;  $\Delta h$ 为两级压力下集水管读数差, $\text{mm}$ 。

最大压力稳定时的含水量记作 $m_{wf}$ ,每级压力下含水率为:

$$m_{wi} = m_{wf} + \sum_{j=i+1}^n (m_{wj} n \omega_i \theta) \quad (3)$$

重力含水率为:

$$w_i = m_{wi} / m_s \quad (4)$$

可得:

$$\theta_i = \omega_i \rho_d / \rho_w \quad (5)$$

式中: $m_{wf}$ 为最大压力对应的水重量, $\text{g}$ ;  $m_{wi}$ 为加压过程不同压力对应的含水量重量, $\text{g}$ ;  $n$ 为加压等级;  $\omega_i$ 为加压过程不同压力对应的重量含水率;  $\theta$ 为加压过程不同压力对应的体积含水率;  $\rho_d$ 为试样干密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_w$ 为4℃水的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。由上述公式计算得到不同压力等级下土样的体积含水率,结合读取的增压值得到不同试样的土水特征曲线。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 原状黄土 SWCC

图5为 $Q_3$ 黄土原状试样的试验结果,由图5(a)可看出原状黄土SWCC经历了快速减小、缓慢减小、稳定3个阶段,初始段体积含水率随吸力变化敏感,随着排水的进行,吸力逐渐增大,最终基本达到稳定状态,图5(b)可看出 $Q_3$ 原状黄土进气值为20 kPa左右,当初始段基质吸力低于100 kPa时,土体内部自由水较多,饱和度较大,自由水排出一部分对吸力大小影响不明显,土体饱和度仍然较高,对于黄土来说,此阶段可认为土体处于饱和阶段(饱和度 $S_r$ 处于85%~100%),土体处于饱和湿陷状态,体积含水率的变化对吸力影响很小,土体性质改变也很小;当吸力超过100 kPa而小于400 kPa时,土体进一步排水逐渐进入不饱和状态,土体吸力明显增大,此时土体含水率变化常常引起吸力值的敏感变化,吸力改变也会引起土体性质急剧变化,对于湿陷性黄土而言,此阶段对应着土体强烈湿陷阶段,土体处于不饱和状态(饱和度 $S_r$ 小于85%,大于残余饱和度),土体浸水导致含水率变化,引起吸力的明显变化,内部土颗粒粘聚力急剧降低,土颗粒排列更为紧密,宏观上表现为浸水湿陷变形;当吸力超过400 kPa时,土体内部自由水较少,剩余难以排出的结合水,土颗粒之间的吸力作用较大,土体具有明显的结构强度。

#### 3.2 不同孔隙比重塑黄土 SWCC

图6给出不同孔隙比重塑试样的土水特征试验结果,图6(a)显示重塑黄土的土水特征曲线与原状

黄土整体变化趋势一致,同样可分为 3 个变化阶段,初始段土体含水改变对吸力影响较小,随着排水的进行,土体吸力变化逐渐增大,最终达到稳定,但可看出孔隙比对 SWCC 的影响非常显著,孔隙比较大时,相比于孔隙比较小时初始段体积含水率变化对吸力影响更小,说明土体孔隙大时的持水能力更强,随着排水过程,孔隙较大时达到的参与体积含水率较小,孔隙较小时残余体积含水率较大,说明土体孔隙大时的自由水较多,排水量更大;图 6(b) 显示土体孔隙比对其进气值影响也较为明显,土体孔隙比

大时的进气值较小,土体孔隙比小时的进气值较大,说明土体孔隙较大时饱和状态排水更容易,土体孔隙较小时排水困难,这是因为孔隙比较大时,土样内部排水通道更加通畅,自由水迁移阻力相对小,随着吸力增大,自由水逐渐排出,孔隙较小时,土体内部连通性相比大孔隙土体有所减弱,迂曲度增大,自由水在土体内部迁移阻力更大,随着吸力增加土体内部自由水排水相对困难。因此,整体来看孔隙比对 Q<sub>3</sub> 黄土土水特性的影响明显,孔隙变化对土水特征曲线的影响不可忽视。

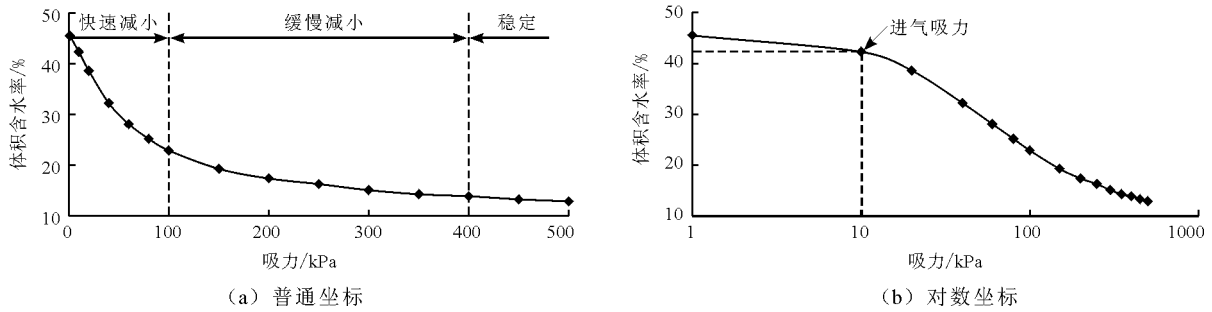


图 5 原状黄土土水特征曲线

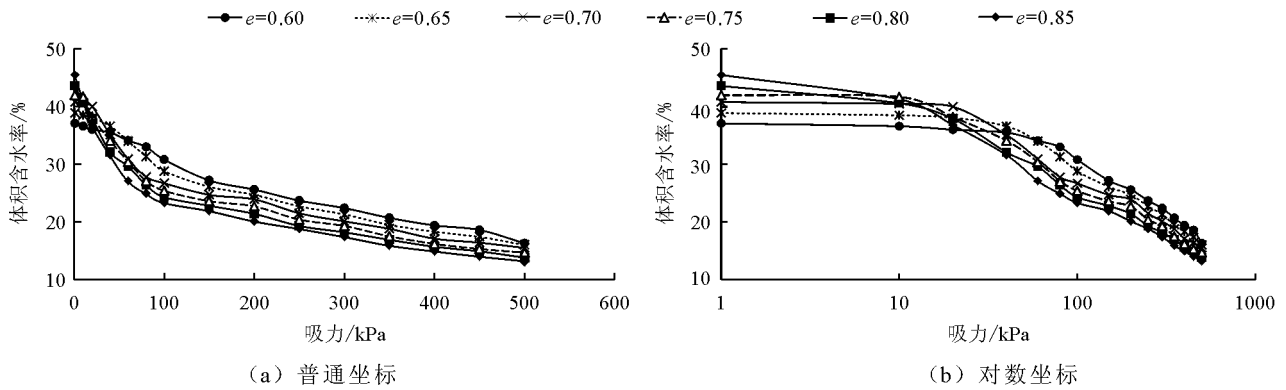


图 6 不同孔隙比重塑黄土土水特征曲线

### 3.3 理论模型拟合分析

国内外学者根据试验结果及某些假定提出了许多经典的土水特征曲线模型,其中包括 Brooks and Corey 模型<sup>[3]</sup>、Van Genuchten 模型<sup>[4]</sup>、Gardner 模型<sup>[5]</sup>、Fredlund & Xing 模型<sup>[6]</sup>,这些模型多针对于黏土提出,并且上述模型均没有考虑孔隙变化的影响,是否适用于 Q<sub>3</sub> 黄土不得而知,因此分别采用 Brooks and Corey 模型(简称 B - C 模型)和 Van Genuchten 模型(简称 V - G 模型)对试验结果进行拟合对比,分析两个模型对 Q<sub>3</sub> 黄土的适用性。

Brooks and Corey 模型:

$$\begin{cases} S_e = \left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda & \Psi \geq \Psi_a \\ S_e = 1 & \Psi < \Psi_a \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $S_e$  为有效饱和度;  $\Psi_a$  为进气吸力值;  $\Psi$  为吸力;  $\lambda$  为土性参数。

又由:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

则 B - C 模型以体积含水率可表示为:

$$\begin{cases} \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda & \Psi \geq \Psi_a \\ \theta = \theta_s & \Psi < \Psi_a \end{cases} \quad (8)$$

Van Genuchten 模型:

$$S_e = \left[ \frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad (9)$$

以体积含水率来表示:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad (10)$$

式中: $a$ 、 $m$ 、 $n$ 均为土体参数; $m$ 、 $n$ 的关系一般假定为 $m = 1 - 1/n$ 或 $m = 1 - 2/n$ 。

首先对B-C模型和V-G模型参数进行确定,由式(8)可知,B-C模型包括进气值 $\Psi_a$ 、孔隙分布指数 $\lambda$ 、饱和体积含水率 $\theta_s$ 和残余体积含水率 $\theta_r$  4个参数,其中饱和体积含水率 $\theta_s$ 可由饱和度换算得到,换算关系为 $\theta_s = (e/(1+e))S_n$ ;残余体积含水率 $\theta_r$ 为吸力无穷大时的体积含水率,本文采用Mualem提出确定残余状态体积含水率 $\theta_r$ 的方法确定<sup>[18]</sup>。另外进气值 $\Psi_a$ 和土体参数 $\lambda$ 可以通过试验拟合得到,最终确定B-C模型的4个参数如表2所示。

表2 原状黄土B-C模型参数

$\theta_s$	$\theta_r$	$s_a$	$\lambda$
0.455	0.082	20.56	0.65

V-G模型需要确定 $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $a$ 、 $m$ 、 $n$ ,其中取 $m = 1 - 1/n$ , $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 的确定方法与B-C模型一致,参数 $a$ 、 $n$ 则由试验数据拟合确定,最终得到V-G模型参数见表3所示:

表3 原状黄土V-G模型参数

$\theta_s$	$\theta_r$	$n$	$a$
0.455	0.082	1.9	0.015

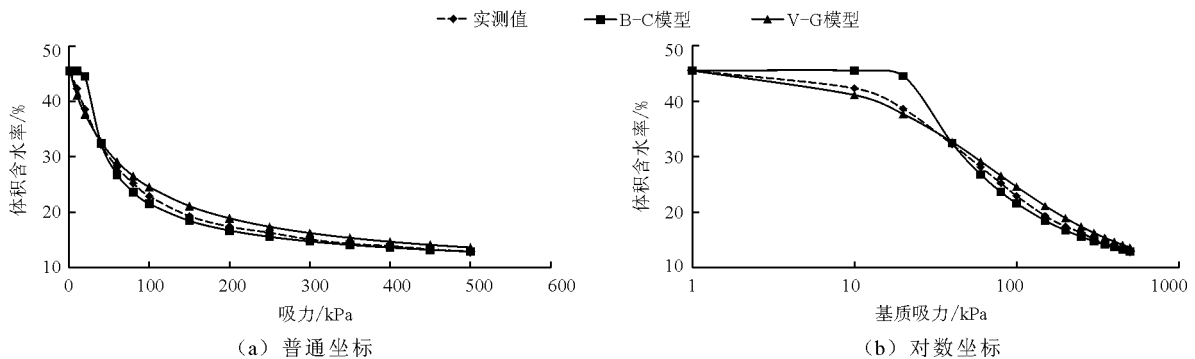


图7 两个模型对原状黄土土水特征曲线的拟合结果

图7给出了B-C模型和V-G模型对原状黄土土水特征曲线的拟合结果,由图7可知V-G模型整体拟合效果较好,尤其在初始吸力段,V-G模型拟合效果明显优于B-C模型,高吸力段两者拟合效果均较好。分析认为B-C模型假定吸力小于进气值时,体积含水率保持为初始值,事实上即使吸力较小时,其微小改变也会引起体积含水率的微小改变,因此在初始吸力段存在偏差,此外模型参数确定也存在一定误差,导致拟合结果存在偏差;V-G模型给出了体积含水率和吸力关系曲线,尤其初始段精确描述了两者的关系,因此整体拟合效果较好。对于常规土体,孔隙变化不明显,初始吸力段可近似认为体积含水率随吸力的变化不大,可能B-C模型和V-G模型误差不大,但对于具有大孔隙性的非饱和黄土,初始段体积含水率与吸力变化明显,B-C模型预测效果较差,因此对于 $Q_3$ 原状黄土的土水特征曲线可用V-G模型进行预测。

### 3.4 讨论

由3.3节可看出,V-G模型可描述原状黄土的土水特性,但原模型中没有引入孔隙比,无法描述

孔隙比对土水特性的影响。本试验中同时测得不同孔隙比重塑土样的土水特征曲线,试验结果表明孔隙比对重塑黄土土水特征曲线的影响非常明显,引起进气值和初始吸力段明显不同,孔隙变形不得不考虑,但上述两种模型均无法合理考虑孔隙比对土水特征曲线的影响,如果采用上述模型进行预测则需要分别开展不同孔隙比土水特征曲线模型的参数拟合试验,工作量较大,因此采用上述模型进行不同孔隙比的重塑黄土的土水特性预测较为困难,而黄土具有明显的结构性,浸水诱发土体内部孔隙改变非常显著,必然对其土水特性造成更加显著的影响,因此建立考虑孔隙影响的SWCC来预测黄土的土水特性变化具有重要意义,这方面很多学者已经开始了研究,但针对于 $Q_3$ 黄土的研究还比较少见。本文研究表明,对于具有大孔隙的 $Q_3$ 黄土,V-G模型可用于原状黄土土水特征曲线的预测,但对比孔隙比对土水特征曲线的影响模拟无能为力,试验结果表明孔隙变化对土水特征曲线的影响不可忽略,因此后续从孔隙变形入手,建立具有实用性的SWCC模型是一个需要深入研究的方向。

## 4 结 论

(1) Q<sub>3</sub> 黄土土水特征曲线分为快速减小、缓慢减小和稳定3个阶段,快速减小阶段土体饱和度较高,吸力较小,土体孔隙排水容易,缓慢减小阶段空气进入土体内部孔隙,进气吸力值为20 kPa左右,吸力增大,土体孔隙排水变的困难,稳定阶段土体饱和度很低,土体进入大吸力段,土体孔隙排水不明显。

(2) 孔隙比对重塑黄土 SWCC 有显著影响,孔隙比较大时,初始段体积含水率变化对吸力影响更小,土体持水能力更强,随着排水过程,孔隙较大时达到的残余体积含水率较小,孔隙较小时残余体积含水率较大,孔隙比对进气值影响明显,土体孔隙比大时的进气值较小,孔隙比小时的进气值较大。

(3) 分别采用 B-C 模型和 V-G 模型与原状黄土试验结果进行了拟合对比,V-G 模型拟合效果明显优于 B-C 模型。但两者均无法预测孔隙变形对土水特征曲线的影响,如何引入孔隙指标描述孔隙变形对土水特征曲线的影响尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 谷 琪,王家鼎,全云莉,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.
- [2] 冯 立,张茂省,孙萍萍,等. 非饱和土脱湿与吸湿水力特性对比研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(2):134-139+146.
- [3] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins, USA: Colorado State University, 1964.
- [4] VAN GENUCHTENMTH. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [5] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the moisture flow equations with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958,85:228-232.
- [6] FREDLUND D G, XING A Q. A equation for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31:521-532.
- [7] PINCUS H J, HOUSTON S L, HOUSTON W N, et al. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2): 1209-1217.
- [8] VISSER W C. Progress in the knowledge about the effect of soil moisture content on plant production[R]. Wageningen: Institute for Land and Water Management Research, 1966.
- [9] 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,2003,24(6):979-982.
- [10] 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,2008,29(10):2651-2654.
- [11] 陶高梁,张季如,庄心善,等. 描述黏粒含量对土-水特征曲线影响规律的分形模型[J]. 水利学报,2014,45(4):490-496.
- [12] 陶高梁,张季如,庄心善,等. 压缩变形影响下的土-水特征曲线及其简化表征方法[J]. 水利学报,2014,45(10):1239-1246.
- [13] 张 昭,刘奉银,赵旭光,等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. 水利学报,2013,44(5):578-585.
- [14] 褚 峰,邵生俊,陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):413-420.
- [15] 周葆春,孔令伟. 考虑体积变化的非饱和膨胀土土水特征[J]. 水利学报,2011,42(10):1152-1160.
- [16] 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.
- [17] 李志清,李 涛,胡瑞林,等. 非饱和土土水特征曲线(SWCC)测试与预测[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5):700-707.
- [18] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976,12(3):513-522.