

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.019

# 脱湿条件下黏性土吸力强度演化规律及其微观机理

卢海锋<sup>1,2</sup>, 陈 盼<sup>1</sup>, 韦昌富<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 43007; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要:** 含水率的增减变化是非饱和土强度改变的关键因素。开展室内脱湿条件下压试样的直剪试验结果表明, 在土样脱湿条件下土体抗剪强度特性变化显著, 低含水率下非饱和黏性土抗剪强度变化有明显峰值, 展示应变软化特性, 高含水率下展示应变强化特性。通过联系土-水特征关系(SWCC)及吸应力特征关系(SSCC)曲线建立的非饱和土抗剪强度模型, 能够预测含水率变化下非饱和土的抗剪强度演化。基于实测数据开展的模型验证结果表明, 所建模型利用测定的土-水特性和饱和土的抗剪强度参数, 能够准确地确定脱湿过程中非饱和土的吸力强度, 该模型的应用将极大地简化试验和节约测试时间。采用核磁共振(NMR)技术对脱湿过程中的剪切样开展了孔隙水分布的测试, 从微观上解释了非饱和黏土抗剪强度随含水率改变的演化机理。

**关键词:** 非饱和土; 土-水特征曲线(SWCC); 吸力强度; 核磁共振(NMR)

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0145 - 06

## Evolution of suction strength of clayey soil under drying conditions and its microscopic mechanism

LU Hai-feng<sup>1,2</sup>, CHEN Pan<sup>1</sup>, WEI Chang-fu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The increase/decrease change of water content is one of important factors for shear strength of unsaturated soils. Direct shear tests are done on the compacted soils under continue drying conditions. The results show that the behavior of shear strength changes significantly during the drying conditions. The peak value of shear strength occurs under lower water content conditions. And the strain softening characteristic is demonstrated during the shear process, whereas the strain strengthening characteristic is shown under higher water content conditions. The shear strength model is developed by combining the soil-water characteristic curve (SWCC) and suction stress characteristic curve(SSCC), which can be used to predict the shear strength of unsaturated soil accurately. Compared to the measured data, the model can predict the evaluation of suction strength under a continue drying condition only using the determined soil-water retention curve and shear strength parameters under the fully saturated state. The measurement can be simplified and the tested time can be saved greatly when the model is used in practice. Furthermore, the nuclear magnetic resonance (NMR) technique is used to determine the distribution of pore water in soils on the same samples for shear strength tests. The measured data are used to explain the strength evolution of clayey soils under different water contents from microscopic analysis.

**Keywords:** unsaturated soil; soil-water characteristic curve(SWCC); suction strength; nuclear magnetic resonance(NMR)

### 1 引 言

非饱和土分布广泛, 与工程实践联系密切的地表土几乎都是非饱和土, 实践中发现含水率或饱和

度的变化会使非饱和土的工程性质发生较大变化, 导致非饱和土的边坡失稳和地表沉降, 威胁建筑物或构筑物安全, 造成经济损失及人员伤亡。非饱和土的强度是土颗粒之间相互作用的宏观反映, 在多

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51239010, No. 11302243)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51239010, 11302243).

第一作者简介: 卢海锋, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究。

通讯作者: 陈盼, 男, 1984 年生, 博士, 副研究员, 主要从事非饱和土力学及降雨边坡稳定性问题的研究。E-mail: pchen@whrsm.ac.cn

年非饱和土的强度研究中学者们通过大量的理论研究和试验各自提出对非饱和强度预测的公式<sup>[1-3]</sup>,也越来越考虑更多的因素完善自己的强度预测公式。

目前的抗剪强度理论模型大多以基质吸力为主要变量,但是吸力的控制在室内和现场的测试比较昂贵和耗时<sup>[4-5]</sup>,尤其是黏性土的测试。为了避开基质吸力的量测和计算,不少学者提出了吸力强度的概念,将基质吸力对强度的贡献称为吸力强度,通过拟合试验数据提出了各自的经验公式,在非饱和土强度理论的发展起了重要的推动作用<sup>[6-8]</sup>。在室内土-水特征曲线测定已经非常普遍,测试的手段也较为丰富诸如压力板仪、滤纸技术等。沈珠江院士<sup>[9]</sup>提出广义吸力的概念,将一切增加颗粒间抗滑阻力的因素都归为广义吸力。Lu等<sup>[10]</sup>详细地分析了微观颗粒间的相互作用,提出各种微观相互作用在宏观的表现可用吸应力定量地描述,定义了吸应力特征曲线(SSCC)。吸应力特征曲线是指吸应力与基质吸力的关系<sup>[3]</sup>,引入吸应力特征曲线并结合土-水特征关系曲线(SWRC),可以间接地预测非饱和土的强度变化<sup>[11]</sup>,尽管此类模型已经采用残积土的强度试验证实<sup>[12]</sup>,但在黏性土中仍未得到验证与应用。在吸应力的基础上,Oloo等<sup>[13]</sup>和Miao等<sup>[14]</sup>先后提出了吸力强度概念,表征由吸应力引起的土体抗剪强度的增加部分。

非饱和土的抗剪强度不仅与含水率的大小,而且与其分布有关系<sup>[15]</sup>。本研究采用核磁共振技术探测土中含水率的大小及分布,从微观上解释了非饱和土抗剪强度的演化规律。核磁共振技术是通过正比于水分含量中的氢核的核磁信号计算水分含量,利用岩土介质中水分的横向弛豫时间 $T_2$ 分布得到了含水率的分布,核磁共振具有快速无损监测的特点<sup>[16-17]</sup>。

本文介绍了吸力强度模型,通过土-水特征关系曲线试验标定模型参数。本次通过开展室内不同含水率、不同干密度条件下的直剪试验,对比模型预测结果与实测结果,验证了模型的可靠性。采用核磁共振技术,从微观上探测不同土样中含水率的分布,揭示了含水率变化下非饱和黏土吸力强度的演化规律,为非饱和土强度理论的发展提供实测数据和分析理论模型。

## 2 理论公式

不同基质吸力条件下抗剪强度 Mohr-Coulomb (M-C)破坏强度包线不是唯一的,随着基质吸力变化而不同(见图 1)。通常细粒土在饱和状态下仍然

存在黏聚力,表明饱和条件下土体内吸应力并不为 0,使得吸应力特征曲线(SSCC)不通过原点,为了与水-土特征曲线(SWRC)相对应,需对 SSCC 进行修正,获得修正的吸应力特征关系曲线如图 1 所示。图中, $\sigma_s$ 为土体实际的吸应力; $p^w$ 为孔隙水压力; $p^N$ 为孔隙气压力; $\sigma'_n$ 为有效正应力; $\sigma_{s0}$ 为饱和状态下的吸应力; $\sigma_{s1}$ 、 $\sigma_{s2}$ 为非饱和条件下不同基质吸力下的吸应力; $c'_1$ 、 $c'_2$ 为不同基质吸力下的有效黏聚力; $\phi'_1$ 、 $\phi'_2$ 为不同基质吸力下的有效内摩擦角; $\tau$ 为剪应力。

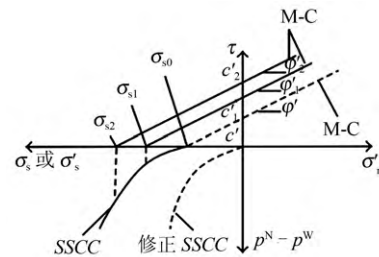


图 1 摩尔-库仑破坏强度包线和吸应力特征曲线

Fig.1 Mohr-Coulomb failure envelopes and suction stress characteristic curves(SSCCs)

Lu等<sup>[10]</sup>提出将不同基质吸力作用下的抗剪强度试验得到的 Mohr-Coulomb 破坏强度包线投影到正应力轴上,得到的负压力值就是土体实际的吸应力 $\sigma_s$ (见图 1)。基于抗剪强度试验得到不同基质吸力下吸应力的表达式:

$$\sigma_{sn} = -c'_n / \tan \phi'_n \quad (1)$$

式中: $\sigma_{sn}$ 为不同含水率状态下的吸应力; $c'_n$ 为非饱和(或饱和)状态下在 $\sigma$ 、 $\tau$ 平面获得的剪应力轴上的截距; $\phi'_n$ 为非饱和(或饱和)状态下 $\sigma$ 、 $\tau$ 平面与正应力轴的夹角。

基于 Bishop 有效应力公式,用吸应力表达的有效应力为

$$\sigma' = (\sigma - p^N) - \sigma_s \quad (2)$$

式中符号意义同图 1。

基于式(2)抗剪强度为

$$\tau_f = c' + c_s + (\sigma - p^N) \tan \phi' \quad (3)$$

式中: $c'$ 、 $\phi'$ 分别为饱和条件下的有效黏聚力和有效内摩擦角; $c_s$ 为吸力强度,定义为

$$c_s = -\sigma_s \tan \phi' \quad (4)$$

由式(4)可知,只要得到 $c_s$ 及饱和土的强度参数,就可以获得含水率变化下非饱和土的抗剪强度。

吸应力与土水状态参数(饱和度、吸力)关系<sup>[3]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= -S_e \psi \\ S_e &= (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \\ \psi &= (p^N - p^W) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $S_e$  为有效饱和度； $\theta$  为体积含水率； $\theta_s$  为饱和体积含水率； $\theta_r$  为残余体积含水率； $\psi$  为吸力。

采用 VG 模型来描述土-水特征曲线<sup>[18]</sup>：

$$S_e = 1 / [1 + (\alpha \psi)^m]^{(1-1/2m)} \quad (6)$$

式中： $\alpha$  为土体进气值的倒数( $\text{kPa}^{-1}$ )； $m$  为表征土体孔隙分布的参数。这两个参数通过室内测定的土-水特征关系数据进行最小二乘拟合确定<sup>[18]</sup>。

将式(6)代入式(5)可得吸应力公式：

$$\sigma_s = -\psi / [1 + (\alpha \psi)^m]^{(1-1/2m)} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)，可得

$$c_s = \psi / [1 + (\alpha \psi)^m]^{(1-1/2m)} \tan \phi' \quad (8)$$

即为吸力强度的数学表达式，表征由含水率变化引起的土体颗粒间内应力改变和导致土体抗剪强度的变化。通过测定土-水特征关系和饱和条件下的抗剪强度参数，利用式(8)可以预测含水率变化下非饱和土的吸力强度，代入式(3)可获得非饱和土体抗剪强度随含水率的演化规律。建立的模型通过土-水特征关系即可以描述土体吸力强度的变化。引入考虑水力滞回效应的土-水特征关系模型，本模型即可拓展描述考虑干湿循环条件下土体抗剪强度的改变。

### 3 土-水特征关系与抗剪强度试验

#### 3.1 试验材料、设备和方法

试验黏土样取自河南三门峡某高速公路，其主要物理性质指标见表 1，

表 1 粉质黏土物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of silty clay

| 土类   | 风干含水率/% | 土粒相对密度 | 液限/% | 塑限/% |
|------|---------|--------|------|------|
| 粉质黏土 | 5.1     | 2.74   | 36.2 | 19.4 |

采用压力板仪 (Soil Moisture Equipment Corp) 测定脱湿条件下的土-水特征关系曲线<sup>[19]</sup>。此方法利用轴平移技术，通过施加气压力改变土体吸力，共施加 13 级吸力步，加载系列为：0-20-40-60-80-120-160-200-260-350-450-550-700-900 kPa。直剪试验中土样按照土工试验规程<sup>[20]</sup>扰动土样的制备方法处理，控制干密度为 1.4、1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$  制备试样，每种干密度制备初始含水率相同的 4 个试样用于直剪试验。试验采用计算机自动控制的应变控制式四联直剪仪，为了保证试验尽量模拟实际

的情况，保证剪切前后含水率不变，采用 0.8  $\text{mm}/\text{min}$  的较快剪切速率，一组 4 个试样施加的垂直压力分别为 50、100、150、200 kPa。为了保证各土样的含水率分布的均匀性及初始条件一致，首先配置初始含水率为 8% 试验用土，通过设定的干密度将配好的试验土压制成环刀样(直径为 6.18 cm、高 2.00 cm)，然后真空抽气饱和，再拿出来自然风干，每隔一段时间称取质量，当达到试验需要的含水率时再把土样放在密封袋中静置 24 h，然后进行直剪试验。

#### 3.2 试验结果和分析

直剪试验中将干密度为 1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$  和 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$  制好的试样均抽气饱和的试样分别风干到含水率为 12%、14%、16%、20%、22%、24%。图 2 为不同含水率土样在不同垂直压力作用下剪应力与剪应变的关系曲线。限于篇幅，这里仅分析干密度为 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$  的直剪试验数据。从图中可以看出，随着含水率的增加，应力-应变曲线越来越缓，较低含水率时试验曲线有着明显的峰值，土体有明显的应变软化的特性，高含水率下展示应变硬化的趋势，含水率的继续增加时应变特性的演化与上覆压力关系不大；随着含水率的增加，黏土的抗剪强度逐渐降低，降低幅度较大，表明水分对非饱和黏土的强度有重要影响。

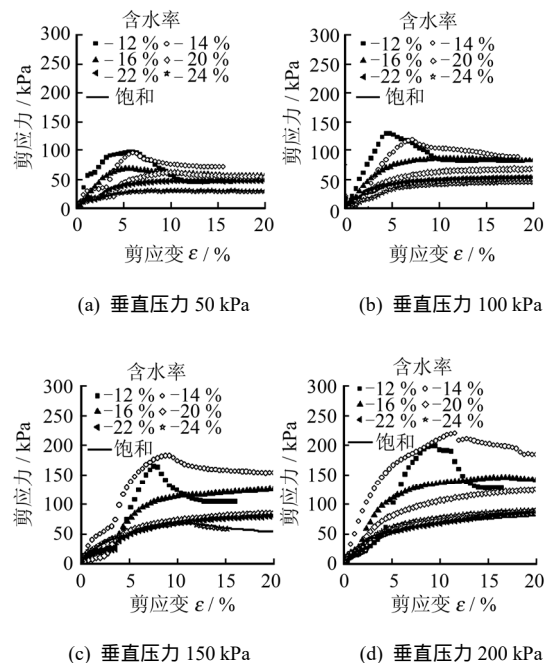


图 2 相同垂直压力、不同含水率下黏性土剪应变与剪应力关系

Fig.2 Relationships between shear strain and shear stress of clayey soils under same vertical pressure and different water contents

试验曲线出现上述现象的原因是土中水分在黏土中主要以吸附水、毛细水和自由水状态存在,由于粉质黏土的颗粒较小,制成试样时,试样中小孔隙较多,大孔隙较少,导致土中的吸附水较多。低含水率范围水分主要以吸附水和毛细水为主,土颗粒之间的各种化学作用力(范德华力、毛细作用力等)强会使黏土试样会表现出土样比较“硬”的特性,在破坏时出现“脆性”性质,显示出应变软化的特性。在高含水率范围内,随着含水率的增加,土颗粒之间吸附水膜越来越厚,逐渐出现自由水,将增加颗粒之间的润滑的作用,使试样变得较“软”,导致试样破坏时显示“延性”破坏的性质,软化的现象将慢慢减弱直至消失。

利用测定的两种干密度条件下不同含水率试样的抗剪强度曲线获取峰值强度,无明显峰值时取应力-应变曲线上4 mm对应的强度为破坏强度,应用摩尔-库仑强度准则得到不同含水率(基质吸力)状态下的 $c'_n$ 、 $\phi'_n$ ,如图3所示。从图中可以看出,不同干密度条件下非饱和土的抗剪强度参数均随含水率的变化而变化;有效黏聚力与含水率呈曲线关系,而有效内摩擦角与含水率近似呈线性关系。根据求得的抗剪强度参数,利用式(1)、(4)即可求得吸力强度值,见表2。

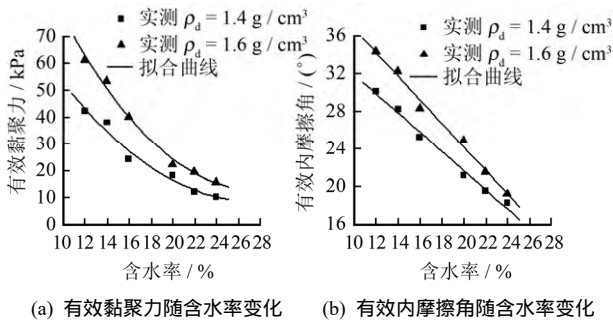


图3 不同含水率下黏土抗剪强度参数的变化曲线  
Fig.3 Change curves of shear strength parameters of clayey soil with different water contents

表2 不同含水率和干密度时黏性土的抗剪强度参数  
Table 2 Shear strength parameters of clayey soil with different water contents and dry densities

| w/% | $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$ | $c'_n / kPa$ | $\phi'_n / (^\circ)$ | $\rho_d / (g/cm^3)$ | $c'_n / kPa$ | $\phi'_n / (^\circ)$ |
|-----|------------------------------|--------------|----------------------|---------------------|--------------|----------------------|
| 12  | 1.40                         | 42.3         | 30.2                 | 1.6                 | 61.3         | 34.3                 |
| 14  | 1.40                         | 38.1         | 28.3                 | 1.6                 | 53.4         | 32.2                 |
| 16  | 1.40                         | 24.1         | 25.2                 | 1.6                 | 40.3         | 28.4                 |
| 20  | 1.40                         | 18.1         | 21.1                 | 1.6                 | 22.3         | 24.9                 |
| 22  | 1.40                         | 12.2         | 19.6                 | 1.6                 | 19.6         | 21.5                 |
| 24  | 1.40                         | 10.3         | 18.2                 | 1.6                 | 15.8         | 19.2                 |
| 饱和  | 1.40                         | 9.3          | 18.1                 | 1.6                 | 12.5         | 18.6                 |

土-水特征曲线在室内的测试手段已经非常丰富,建立的模型也具有很好的实用性,建立土-水特

征关系曲线与抗剪强度的关系能够推广非饱和土力学在工程实践中的应用,本次通过压力板仪试验测得土-水特征曲线如图4所示。利用VG模型(见式(6))采用最小二乘拟合实测的土-水特征曲线试验数据,获得土-水特征关系的模型参数,见表3。利用获得的土-水特征关系曲线模型参数式(8)预测吸力强度(抗剪强度)的变化,如图5所示。从图中可以看出预测曲线与试验数据吻合很好;吸力强度随基质吸力的增加而增加,在相同基质吸力(或含水率)下干密度越大,吸力强度较高。式(8)能有效地预测含水率变化下非饱和黏土吸力强度(或抗剪强度)的变化。

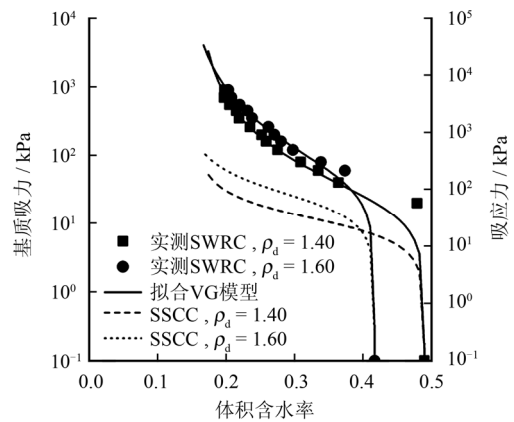


图4 黏性土的土-水特征曲线和吸应力特征关系(单位: g/cm³)  
Fig.4 Relationships between SWCCs and SSCCs of clayey soils(unit: g/cm³)

表3 黏性土土-水特征曲线模型参数  
Table 3 Model parameters for SWCCs of clayey soils

| 编号 | 干密度<br>$\rho_d / (g/cm^3)$ | 孔隙率<br>$n$ | 土-水特征参数             |      |            |
|----|----------------------------|------------|---------------------|------|------------|
|    |                            |            | $\alpha / kPa^{-1}$ | $m$  | $\theta_r$ |
| 1  | 1.40                       | 0.489      | 0.048               | 1.57 | 0.155      |
| 2  | 1.60                       | 0.417      | 0.020               | 1.50 | 0.136      |

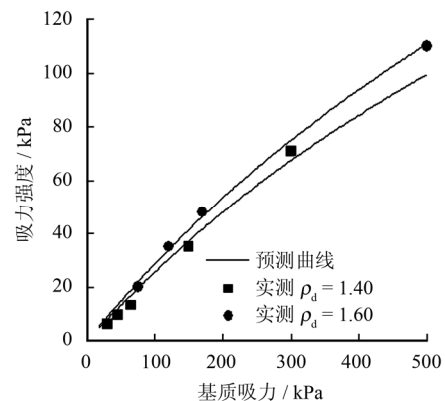


图5 非饱和黏土吸力强度实测与预测曲线对比  
Fig.5 Comparison of measured and predicted curves of suction strength of unsaturated clayey soil

## 4 核磁共振试验

为了解黏土脱湿过程中含水率改变对吸力强度的影响规律，从微观的角度分析土体中水分的变化分布情况是一种较好的途径。由于核磁共振技术能够无损快速测定土体孔隙中水分的赋存特性，已被用于非饱和土与冻土特性的测试与分析<sup>[16-17]</sup>，本文利用核磁共振技术测量黏性土中含水率的大小及分布，反映脱湿过程中含水率变化对黏性土吸力强度的影响规律，关于核磁共振测试仪器及方法详见文献<sup>[16-17]</sup>。直剪试验开始前将获得水分平衡后的各黏土试样置于核磁共振仪中，先开展核磁共振谱测试，测得的核磁共振横向弛豫时间  $T_2$  的分布谱即为  $T_2$  分布曲线，通过该曲线可获得土体中含水率的大小及分布规律，如图 6 所示。图中，弛豫时间对应的核磁信号量大小表征土体中对应的某一等效半径孔隙的体积大小<sup>[17]</sup>。

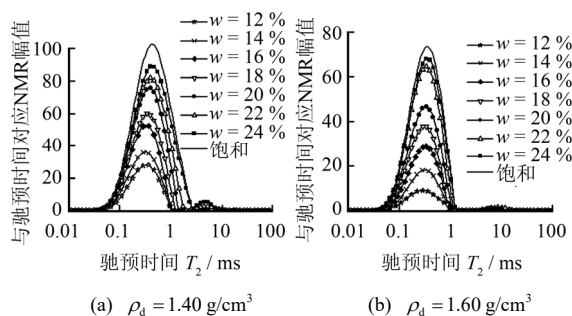


图 6 不同含水率黏土样的  $T_2$  分布曲线  
Fig.6  $T_2$  distribution of clayey soils with different water contents

从图 6 中可以看出，同一干密度下随着含水率的降低，土体中大孔隙中的核磁信号逐渐减弱，脱湿过程中土体中的水分先从小孔隙排出，导致大孔隙中的含水率逐渐减少；毛细水与自由水降低，颗粒之间的吸附作用增强，导致吸力强度增大。对比图 6(a)和 6(b)可知，高含水率条件下毛细水占优，干密度越大，横向弛豫时间  $T_2$  的分布范围更小，土

中的小孔隙较多，在相同的含水率下小孔隙所占比例随干密度增大而增大，吸力增大，从而产生的吸力强度也越大（见图 5）。随着含水率的降低， $T_2$  谱分布逐渐向左向下移动，黏土中由毛细水占优逐渐转为吸附水占优。干密度大的土样，土体颗粒间吸附越强，吸力增大，吸力强度越大，核磁测试结果表明，通过含水率分布的测试可以从微观上解释吸力强度随干密度变化的规律（见图 5）。

## 5 结 论

(1) 非饱和土抗剪强度与土-水特性存在内在联系，引入土-水特征关系模型，获得吸力强度的表达式，利用饱和土的抗剪强度参数能获得非饱和土的抗剪强度。

(2) 在低含水率范围，黏土显示明显的软化的特性，在高含水率范围，黏土显示应变硬化特性。

(3) 用核磁共振技术探测土体孔隙中水分分布的  $T_2$  分布曲线，可以定量地给出土体中孔隙水大小及分布变化，从微观上进一步解释了脱湿过程中非饱和土抗剪强度的变化特性。

建立的模型物理意义清晰，仅通过土-水特征关系模型与饱和土的抗剪强度参数即能够预测非饱和土的吸力强度与抗剪强度的改变，同时本文模型能较为容易地拓展为描述干湿循环下非饱和土的抗剪强度演化。

## 参 考 文 献

- [1] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. *Geotechnique*, 1963, 13(3): 177 - 197.
- [2] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15: 313 - 321.
- [3] LN N GODT, J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: 1 - 14.
- [4] 汤连生, 王洋, 张鹏程, 等. 非饱和黏性土粒间吸力测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(3): 304 - 307.  
TANG Lian-sheng, WANG Yang, ZHANG Peng-cheng, et al. Experimental study on suctions between grains in unsaturated cohesive soil[J]. *Chinese Journal of*

- Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 304 - 307.
- [5] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(2): 143 - 157.
- [6] ROHM S A, VILAR O M. Shear strength of an unsaturated sandy soil[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, ASCE. Paris: [s. n.], 1995: 189 - 193.
- [7] 沈珠江. 当前非饱和土力学研究中的若干问题[C]//区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集. 南京: 原子能出版社, 1996: 1 - 9.
- SHEN Zhu-Jiang. Present Study Issues in Unsaturated soils[C]//Proceedings of Regional Geotechnical Problems Symposium. Nanjing: Atomic Energy Press, 1996: 1 - 9.
- [8] LEE S J, LEE S R, KIM Y S. An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formulation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(6): 489 - 503.
- [9] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. **岩土工程学报**, 1996, 18(2): 1 - 9.
- SHEN Zhu-Jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(2): 1 - 9.
- [10] LU N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(2): 131 - 142.
- [11] CHEN P, WEI C F, LIU J, et al. Strength theory model of unsaturated soils with suction stress concept[J]. **Journal of Applied Mathematics**, 2013, 2013: 1 - 10.
- [12] OH S, LU N, KIM Y, et al. Relationship between the soil-water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from residual soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(1): 47 - 57.
- [13] OLOO S Y, FREDLUND D G. A method for determination of  $\phi(b)$  for statically compacted soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996. 33(2): 272 - 280.
- [14] MIAO L C, LIU S Y, LAI Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. **Engineering Geology**, 2002. 65(4): 261 - 267.
- [15] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(2): 351 - 356.
- SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, et al. Soil water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(2): 351 - 356.
- [16] TIAN H H, WEI C F, WEI H Z, et al. A NMR-based analysis of soil-water characteristics[J]. **Applied Magnetic Resonance**, 2014, 45: 49 - 61.
- [17] CHEN P, WEI C F, LIU J, et al. Approach to rapidly determining the water retention curves for fine-grained soils in capillary regime based on the NMR technique[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2017, 143(7): 1 - 7.
- [18] van GENUCHTEN M T h. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society American Journal**, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [19] 孙树国, 陈正汉, 朱元青, 等. 压力板仪配套及 SWCC 试验的若干问题探讨[J]. **后勤工程学院学报**, 2006, (4): 2 - 4.
- SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Coordinated ceramic plate extractors and some problems of SWCC test[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2006, (4): 2 - 4.
- [20] 南京水利科学研究所. SL 237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Water Conservancy Science Research Institute. SL 237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.