

# 高吸力下黏性土的抗剪强度和体变特性

徐 筠<sup>1</sup>, 赵成刚<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 非饱和土中土-水之间的相互作用可区分为毛细作用和吸附作用, 已有的非饱和土力学特性的研究大都局限于较低吸力、毛细作用占优范围。实践中由于环境的变化, 地表土体常经历干湿循环及处在低含水率、高吸力状态, 此时吸附作用占优。针对高岭土-河砂配制的非膨胀性黏性土, 采用饱和盐溶液蒸汽平衡法, 从脱湿和吸湿两种吸力路径下对土体施加高吸力。测试了高吸力下土体的强度和变形特性, 试验中选用了0(接近无侧限)、25、50、100 kPa共4组小围压。试验结果表明, 高吸力下土体表现为应变软化型破坏和剪胀性。随着围压的施加, 土体从沿纵向开裂的张裂破坏过渡为剪切破坏。验证了修正后的Bishop非饱和土强度公式不适用于描述高吸力时峰值抗剪强度的变化, 得到了高吸力下峰值抗剪强度可用相对于净应力的临界状态强度和剪胀作用来表示。分析发现, 高吸力时土体的抗剪强度和比表面积直接相关, 吸力对土体抗剪强度的作用取决于土体集聚体组构的形成和发展程度及其导致的剪胀作用。

**关键词:** 高吸力; 抗剪强度; 剪胀性; 集聚体

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)05-1598-13

## Shear strength and volume change behavior of clay-rich soil at high suctions

XU Xiao<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-gang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** The soil water interaction in unsaturated soils can be divided into capillarity and adsorption. The current study of unsaturated soils is mostly limited to lower suction range where capillarity dominates. In practice, due to climatic changes, soils near the ground surface often experience cyclic wetting and drying, and the low water content and high suction conditions, where adsorption dominates. Using the vapor equilibrium technique on the saturated salt solution, the high suctions are controlled for non-expansive kaolin-sand soil under drying and wetting paths respectively. The strength and deformation behaviors under high suction are tested under four confining pressures of 0 (close to unconfined), 25, 50, 100 kPa. The results show that the soils under high suctions indicate strain softening failure and dilatancy. With confining pressure applied, the failure mode change from the longitudinal cracking to shear failure. It is proved that the modified Bishop's effective stress model is not suitable for describing the peak shear strength at high suction. The peak shear strength can be expressed by the net stress-dilatancy relationship. The peak shear strengths are directly related to specific surface area and depend on the development of aggregates and dilatation.

**Keywords:** high suction; shear strength; dilatancy; aggregate

## 1 引言

在当前非饱和土的理论中, 用基质势(matric potential)来表示土体中孔隙水势能的降低, 并约定基质势为负值。而在描述孔隙水对非饱和土的力学和水力特性的影响时, 普遍地采用了基质吸力

(matric suction)来替代基质势, 认为基质吸力是基质势的负值。土体中导致基质势降低的物理机制可以明确地区分为毛细作用(capillarity)和吸附作用(adsorption)<sup>[1]</sup>。毛细作用包含水-气界面的曲率和毛细现象中的负孔隙水压力, 多与孔隙水中的毛细水相对应; 吸附作用主要是指土体中固-液相间

的双电层作用力、范德华作用力和其他水合作用，表现为结合水（或吸附水膜）。实践中土体的孔隙气压力为大气压，这使得毛细作用局限于土体孔隙水的张力范围内，而广泛采用的轴平移技术却掩盖了这一情况，这导致基质势好像在整个变化范围内均可表示为负的孔压力<sup>[1-2]</sup>。高吸力及低含水率时，吸附作用引起的基质势的减小量要远大于毛细作用引起的势能减小量<sup>[3]</sup>。

与毛细作用相比，吸附作用下土体中孔隙水的赋存形式、孔隙水和固相颗粒间的作用力及土体的组构均差异明显<sup>[2-6]</sup>，即这两部分吸力的作用机制不同，对土体宏观力学性质的影响也不同<sup>[7]</sup>。已有的针对非饱和土的强度和变形的研究中大都通过轴平移技术来控制吸力，故得到的结论也只是局限于毛细作用（较低吸力，通常为0~1 500 kPa）范围内<sup>[8]</sup>。实践中地表土工构筑物，由于环境条件的变化，常经历干湿循环及处在低含水率、高吸力状态。然而鲜有研究关注高吸力、吸附作用占优时土体的强度和变形特性。

本文采用饱和盐溶液蒸汽平衡法，从脱湿和吸湿两种吸力路径下对土体施加高吸力，测试了高吸力、低围压下土体的强度和变形特性。结合试验结果，分析了高吸力时吸力对土体强度和变形的作用机制。

## 2 试验描述

### 2.1 试验材料

Wiebe<sup>[9]</sup>、Blatz<sup>[10]</sup>等已针对被作为核废料缓冲

层的干重比为50%:50%的硅砂和膨润土的混合土体，探究了高吸力下压实土体的强度和变形特性。由于膨润土的胀缩性，吸力变化时同时会引起混合土体的干密度的变化，导致试验中很难区分吸力变化和干密度变化的影响。本文只关注高吸力下吸力变化时土体力学特性的变化，故选用了商品化的高岭土和河砂，按干重比为70%:30%得到人工配制土作为试验用土。这样得到的配制土黏土矿物含量丰富，其中高岭土纯度高（96%以上），粒度分布均匀（20.3 μm），性质和结构稳定，同时黏土矿物成分中没有膨胀性矿物，可忽略膨胀性的影响。河砂的级配如图1所示，由于纯高岭土液限高，水分的扩散慢，故掺入河砂改良，这也是工程实践中的一贯做法。选用这样的配制土可保证试验具有较好的重复性和代表性。按照土工试验规程<sup>[11]</sup>，得到土体的基本物理指标如表1所示。

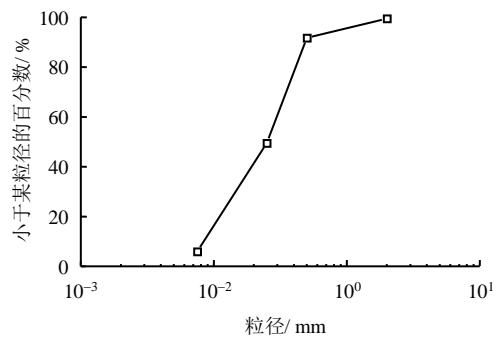


图1 河砂的级配曲线

Fig.1 Grain-size distribution of sand

表1 土体的物理特性

Table 1 Physical properties of tested soil

土的工程分类	相对密度 $G_s$	液限 $w_L$ / %	塑限 $w_p$ / %	塑性指数 $I_p$	最大干密度 $\rho_d$ / (g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率 $w_{opt}$ / %	饱和内摩擦角 <sup>*</sup> $\phi'$ / (°)	饱和黏聚力 <sup>*</sup> $c'$ / kPa
含砂高液限粉土(MHS)	2.72	57	38	19	1.3	36	35.17	11.01

注：上标\*指采用干密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>的饱和样在小围压下的固结排水三轴试验中得到。

### 2.2 试样的制备和高吸力的施加

试验采用分层击实法制样。制样时选用较高含水率（35%）土样，充分搅拌后过1 mm筛，去除较大集聚体的影响，保证土样的均匀性，之后装入保鲜袋中密封静置24 h，使水分润湿均匀。制样前再次校核含水率，取保鲜袋中3处不同位置土样，烘干校核其含水率，保证误差不超过0.5%。试样选用直径为39.1 mm、高为80.0 mm的三轴样。为了避免干密度过大（1.3 g/cm<sup>3</sup>）时剪切不充分，或过小（1.1 g/cm<sup>3</sup>）时应变局部化，制样时控制干密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>。制样时分8层击实，每层高为10 mm，

以保证试样的均匀性。

土体的吸力和含水状态对应，试验中可通过改变制样时土样的含水率来控制试样的吸力，如Wiebe<sup>[9]</sup>。这种方法虽更简单直接，但无法模拟实践中土体达到某一吸力状态时所经历的吸力路径，同时制样时不同初始含水率的土样会导致所得试样的微观结构迥异。故本文选用饱和盐溶液蒸汽平衡法对试样施加高吸力，这种方法通过不同的盐溶液控制环境湿度，从而达到控制土样吸力的目的<sup>[12-13]</sup>。根据全国物理化学计量技术委员会所给出的饱和盐溶液标准相对湿度值<sup>[14]</sup>和Kelvin公式，本文所选用

的饱和盐溶液的相对湿度值及其所对应的吸力如表 2 所示, 试验中配制盐溶液处于过饱和状态。试验中对试样施加高吸力时分为脱湿和吸湿两种吸力路径。为了明确试样的吸力路径, 制备相同初始含水率(35%) 和干密度( $1.2 \text{ g/cm}^3$ ) 的三轴样, 量测并记录每个试样最初的质量(尽可能的缩小击实制样的误差), 将其中一部分采用真空饱和装置抽气饱和后进行脱湿试验(drying, 用 D 表示), 另一部分放入烘箱烘干后进行吸湿试验(Wetting, 用 W 表示), 如图 2 所示。每个盐溶液上同时放置 7 个干化样和湿化样。吸力平衡在密封玻璃干燥器中进行, 控制环境温度为  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。放置一段时间后, 开始每间隔一定时间称量土样的重量, 当土样的重量在一周期内的变化小于  $0.01 \text{ g}$  时, 认为土体孔隙水与对应盐溶液的蒸汽压力达到热力学平衡, 土体达到对应吸力<sup>[12-15]</sup>。为避免称量过程中水分变化, 称量土样质量的过程要迅速(15 s 内)<sup>[16]</sup>。吸力平衡耗

**表 2 饱和盐溶液及对应吸力值( $20^\circ\text{C}$ )**  
**Table 2 Saturated salt solution and corresponding suction ( $20^\circ\text{C}$ )**

饱和盐溶液	RH / %	总吸力 / MPa
$\text{K}_2\text{SO}_4$	97.6	3.29
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	90.8	13.10
KCl	85.1	21.82
NaCl	75.5	38.00
NaBr	59.1	71.12
$\text{K}_2\text{CO}_3$	43.2	113.50
$\text{CH}_3\text{COOK}$	23.1	198.14

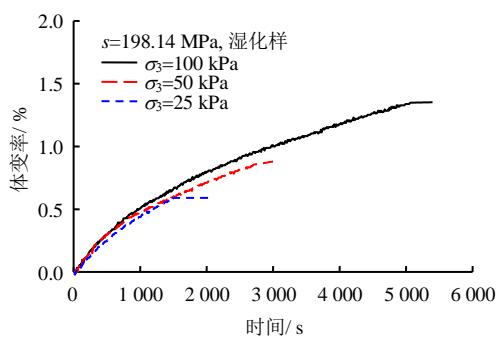


**图 2 试验试样**  
**Fig.2 Test samples**

时 4 个月左右, 当吸力平衡后通过游标卡尺、天平分别测量试样的尺寸和质量, 对应每个试样的初始质量和含水率计算吸力平衡后的含水率和饱和度, 取平均值得到对应吸力下的含水率和饱和度。试验中所用的水均为去离子的蒸馏水, 本文中忽略渗透吸力的影响, 认为所涉及的吸力均为基质吸力, 表示土中水和固体矿物骨架及气相的相互作用<sup>[1]</sup>。

### 2.3 高吸力下三轴剪切试验和剪切速率的选择

高吸力下三轴剪切试验采用 GDS 非饱和土三轴试验仪进行, 其中通过 GDS-HKUST 系统测量试样的体变<sup>[17]</sup>。试样吸力平衡后取出, 迅速测量其体积和质量, 之后装入三轴仪。高吸力时轴平移法不适用, 试验中不使用孔隙水压力及体积量控体系, 陶土板不饱和, 陶土板和试样间用硬塑料薄膜隔开, 防止试样吸排水。试样顶部通过孔隙气压控制管路和大气连通, 试验中保证孔隙气压为 0(相对大气压)。对于不同吸力路径及吸力下的试样, 均进行了 4 组不同围压下的三轴剪切试验, 围压分别为 0(无侧限)、25、50、100 kPa。试验中采用 25 kPa/20 min 的速率施加固压, 固压达到目标值后保持稳定 10 min, 以保证试样中孔隙气压及时完全消散, 即高吸力下试样充分固结排气, 之后开始剪切。图 3 示出了一组湿化样在吸力为 198.14 MPa 下排气固结时的体变特性, 其中  $s$  为土体的吸力,  $\sigma_3$  为三轴试验围压。图 3 中当围压稳定在目标值时, 试样的体变趋于稳定, 总的体变率较小。这里仅示出了一组含水率最低的试样的结果, 其他吸力状态下的试样有相同的结果。



**图 3 排气固结时的体变特性**  
**Fig.3 Volume change characteristics of drainage consolidation**

有研究表明, 高吸力下常含水率试验可认为是等吸力试验<sup>[1, 15, 18]</sup>。本文设计高吸力、不排水三轴剪切试验, 孔隙气压在整个试验过程中保持为 0, 即剪切过程中的孔隙气压能够及时消散, 试样变形充分发展, 这也与实践中高吸力下土体的破坏相符;

同时要保证试样吸力基本不变, 即需要尽量减少试样暴露在空气中的时间, 避免空气中的湿度环境导致试样吸力出现较大变化, 故应该选择合适的剪切速率<sup>[19]</sup>。选用吸力平衡后含水率最大的试样(吸力为3.29 MPa时的干化样), 进行了轴向剪切速率 $V_s$ 分别为0.01、0.1、1%/min的剪切试验, 其中围压 $\sigma_3$ 均为25 kPa。试验结果如图4所示, 其中 $\varepsilon_1$ 表示轴向应变,  $q$ 为偏应力,  $\varepsilon_v$ 为体应变。与0.01、1%/min相比, 0.1%/min对峰值剪应力和残余稳定剪应力影响较小(图4(a)), 同时0.1%/min下试样的变形已较为充分(图4(b)), 其中体缩为正, 体胀为负), 本文选用0.1%/min为高吸力下三轴剪切试验的剪切速率。

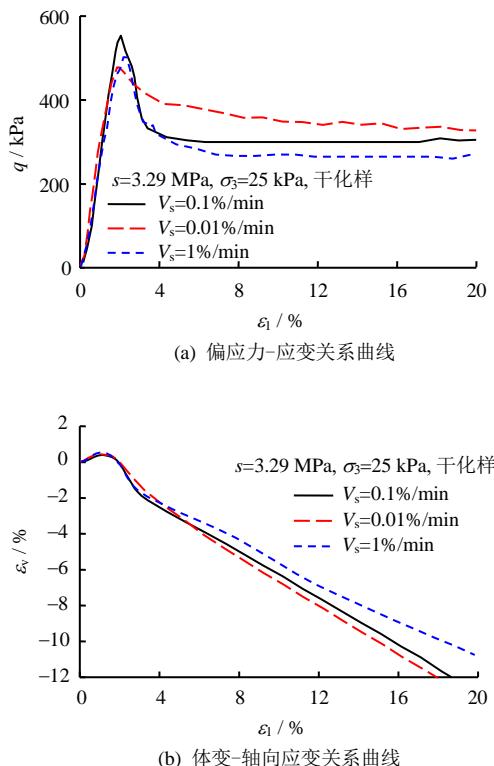


图4 不同剪切速率下的三轴压缩剪切试验结果  
Fig.4 Results of triaxial compression tests at different shearing strain rates

剪切试验在试样的轴向应变达到20%时终止, 剪切完成后取下试样观察其破坏形式, 称量试样的质量变化, 并分层校核试样的含水率, 误差不超过0.5%。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 蒸汽平衡法得到的高吸力下的土-水特征曲线

图5为蒸汽平衡法吸力平衡后高吸力下的土-水特征曲线。为确保高吸力的施加可靠, 同时采用

了Decagon公司WP4C露点水势仪验证了平衡后试样的土-水特性, 如图5(a)所示。由图可知, 干化曲线和湿化曲线之间存在着明显的滞回现象, 吸力相同时干化路径下试样的含水率和饱和度高于湿化路径下的值。同时, 随着吸力的增大, 滞回现象逐渐减弱, 当吸力达到200 MPa附近时, 滞回现象消失, 干化与湿化曲线基本重合, 这与之前研究者得到的结论一致<sup>[20]</sup>。试验中吸力平衡时相对湿度较高的干燥器中( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )不同干化样间含水率差别较大, 图5中采用了其平均值, 即相对湿度较高时蒸汽平衡法误差较大。图5(c)中, 高吸力时干化和湿化路径下吸力变化时试样的干密度基本不变, 干化样的干密度略高于湿化样。与制样时试样的体积相比, 吸力平衡后干化样和湿化样分别出现1%左右的体缩和体胀。

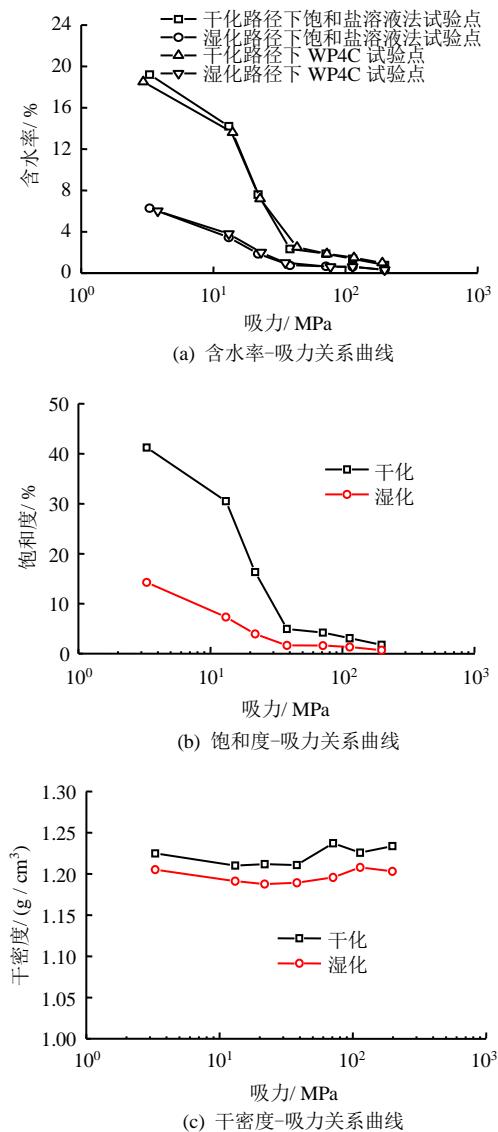


图5 蒸汽平衡法得到的高吸力下的土-水特征曲线  
Fig.5 Soil-water characteristic curves under high suction range by vapor equilibrium method

### 3.2 高吸力下的强度和变形特性

#### 3.2.1 强度和体变试验结果描述

图 6、7 从抗剪强度和体变特性两方面示出了三轴剪切试验的结果。图中图例 D、W 表示干化和湿化。按照土力学的约定, 本文中在描述试样排气固结和剪切时, 均以体缩为正, 体胀为负。图 6 中偏应力和轴向应变关系曲线大多表现为应变软化型破坏, 即在较小应变处强度出现峰值, 继而软化至大

应变时强度降低, 即峰后强度。

对比图 6 中同一吸力下干化和湿化样的强度可得, 在吸力分别为 3.29、13.10、21.82 MPa 时相同围压下干化样的强度显著高于湿化样; 然而当吸力达到 38.00 MPa 并继续增加时, 干化样和湿化样的偏应力-应变曲线逐渐接近, 试样的强度趋于相近。

图 7 中示出了三轴压缩试验的体变结果。试样开始在初始的较小应变范围内经历了接近 1% 体变

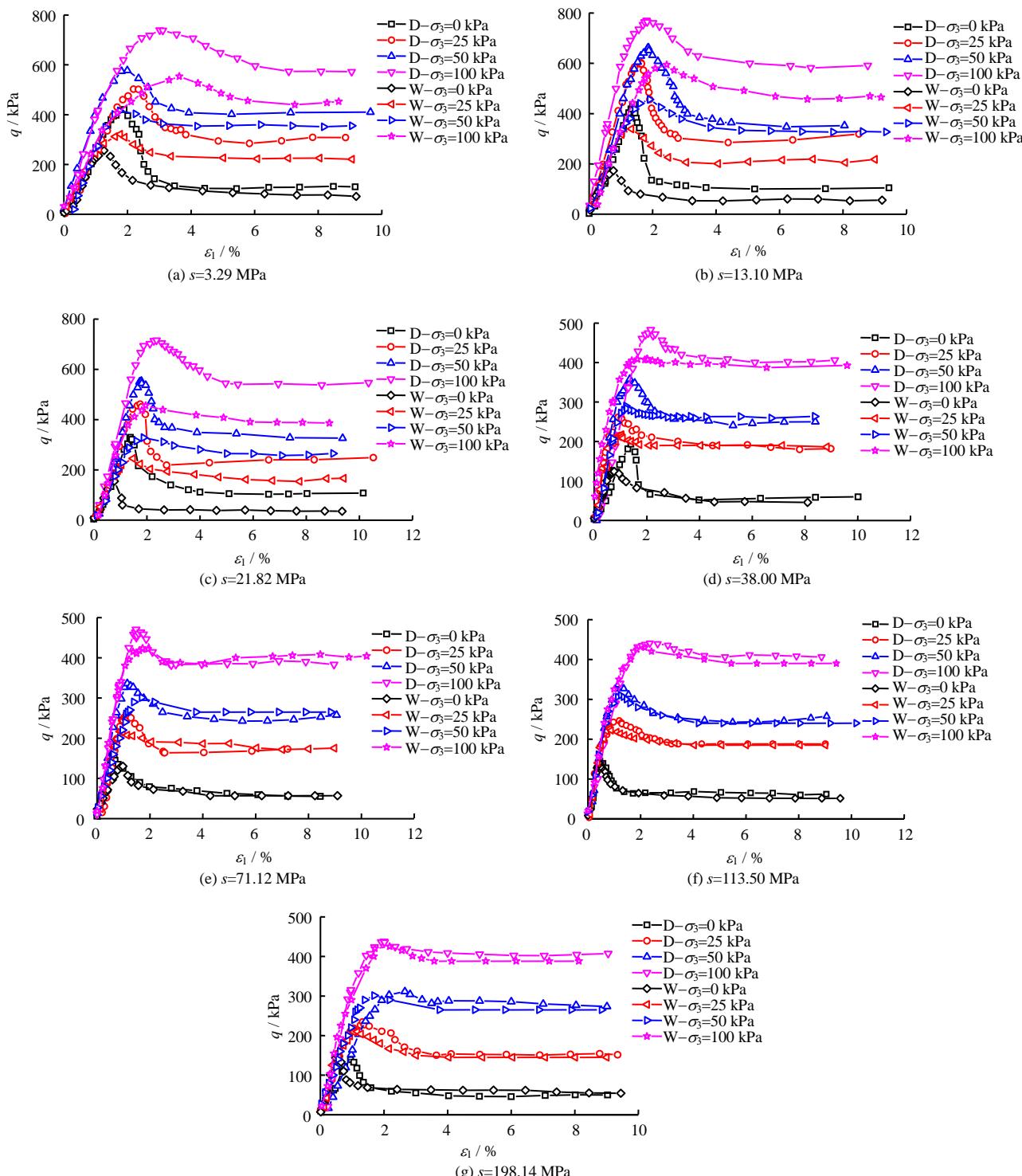


图 6 偏应力-轴向应变关系曲线  
Fig.6 Curves of deviator stress versus axial strain

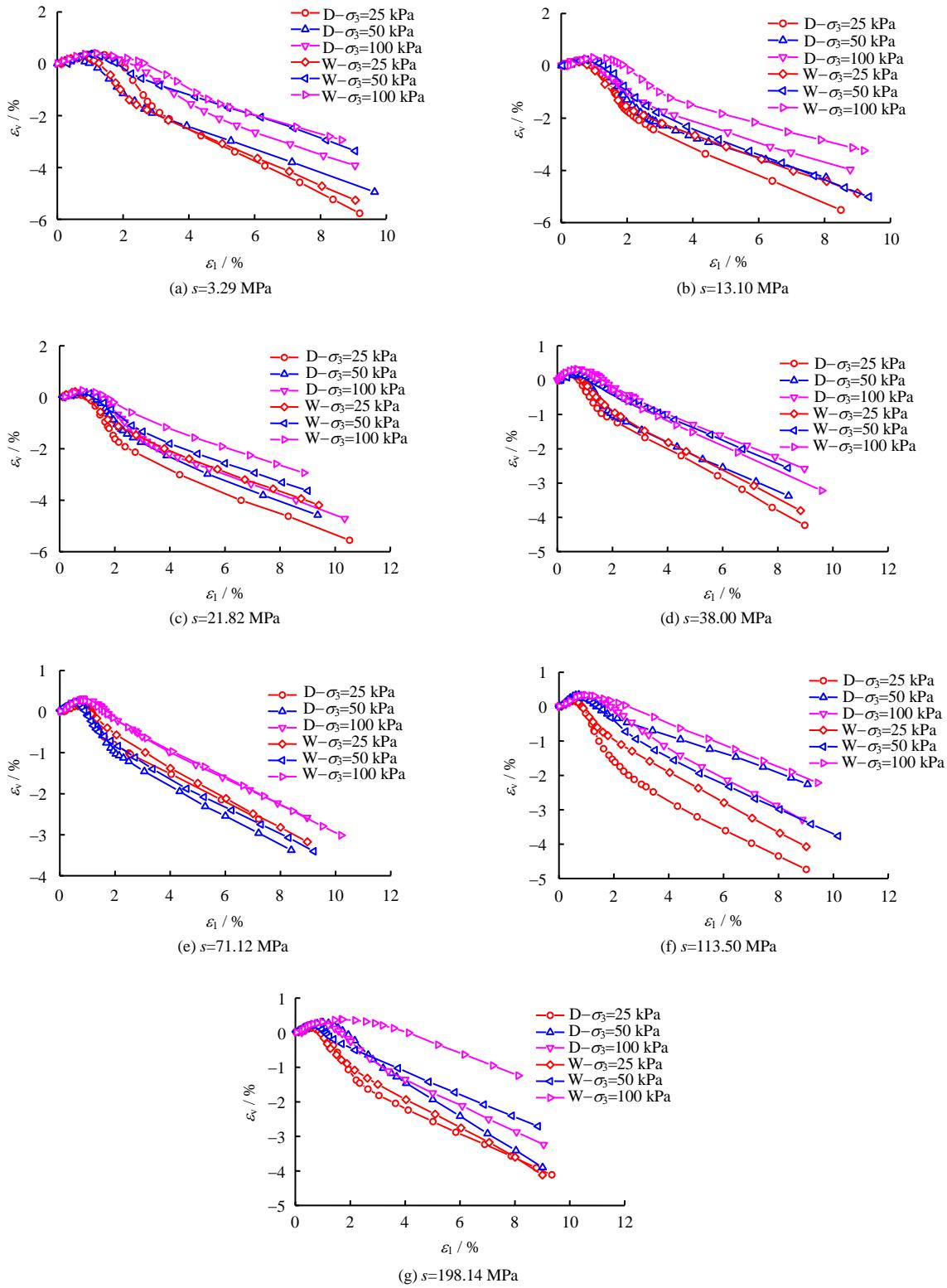


图 7 体变-轴向应变关系曲线  
Fig.7 Curves of volumetric strain versus axial strain

的短暂压缩，在最大体变压缩点后开始出现体胀，之后在出现峰值强度和软化至残余强度的剪切过程中试样持续剪胀。按照临界状态的描述，试样在软化至峰后稳定强度后应该达到临界状态，即体变趋于 0。然而在图 7 中，当软化至稳定的残余强度后继续剪切时，体变和轴向应变关系曲线在稳定的斜

率下持续发展，试样持续剪胀。这是由于试样应变局部化及剪切不充分引起的，图 6、7 中仅示出了轴向应变达到 10% 即剪切稳定时的结果。

### 3.2.2 围压的影响和张裂破坏

图 8 给出了围压为 0（接近于无侧限）和施加围压时（25、50、100 kPa）试样的破坏形式。从中

可见, 围压为 0 时土样为张裂破坏, 表现为沿纵向开裂。随着围压的施加, 过渡为剪切破坏。图 9 给出了高吸力下干化和湿化时无侧限抗压强度  $q_u$  和吸力  $s$  的关系。

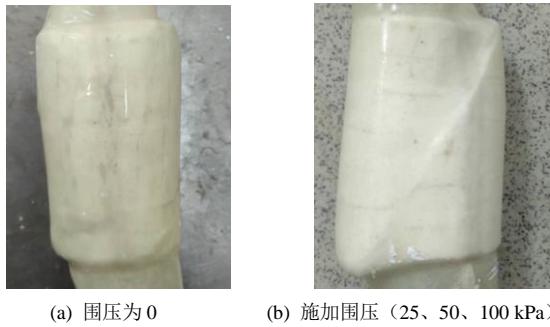


图 8 试样破坏形式  
Fig.8 Damage forms of samples

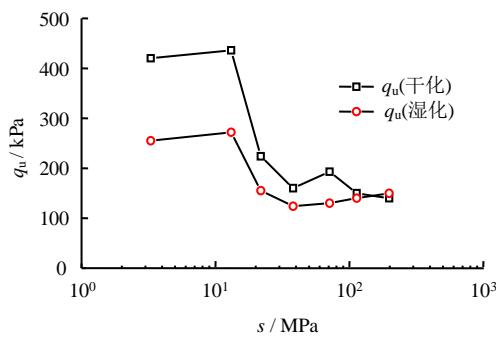


图 9  $q_u$  和  $s$  的关系  
Fig.9 Relationships between  $q_u$  and  $s$

### 3.2.3 剪切破坏

对于剪切破坏, 选取峰值强度, 利用最小二乘拟合法, 在偏应力  $r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  (其中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为大、小净主应力) 和平均应力  $t = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  平面内绘制相同吸力和吸力路径下不同围压试样的破坏主应力线 (即  $k_f$  线<sup>[21]</sup>), 继而给出试样的破坏包线及抗剪强度指标, 如图 10 (干化) 和图 11 (湿化) 所示。这里采用了摩尔-库仑强度准则, 通过强度指标 (表观内摩擦角  $\bar{\varphi}$  和表观黏聚力  $\bar{c}$ ) 表示了不同吸力状态下土体的强度。图中在小围压范围内 (25~100 kPa), 强度包线呈现出很好的线性特性<sup>[22]</sup>。

图 12 给出了干化和湿化时不同吸力下土体抗剪强度指标的变化。图 12(b)中, 与饱和内摩擦角相比, 土体的表观内摩擦角变化较小。令  $\bar{\varphi}$  等于  $\varphi'$ , 在三维应力状态下的偏应力  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  和平均净应力  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  (试验过程中孔隙气压  $u_a = 0$ ) 平面内重新整理峰值强度数据, 将土体的强度表示为

$$q = Mp + \bar{q}_0 \quad (1)$$

式中:  $M$  为饱和时的临界状态应力比;  $\bar{q}_0$  为利用最小二乘法拟合得到的某一吸力和吸力路径下试样破坏线在  $q$  轴上的截距, 如表 3 所示。虽然假定  $\bar{\varphi}$  等于  $\varphi'$  带来一定误差, 表 3 中的相关系数小于图 10、11 中的值, 但仍然表现出较好的拟合性, 可以满足实践中的要求, 同时也为应用时带来很大便利。故本文建议高吸力下依旧选取  $\bar{\varphi}$  等于  $\varphi'$ , 将高吸力下吸力的影响放在表观黏聚力项来考虑。

分析图 9、12 及表 3 中的强度指标和吸力的关系, 可以发现高吸力时强度并非随着吸力的增大持续单调增长, 而是在达到最大值后开始降低, 并最终趋于稳定, 这与所选用的土为黏性较弱的非膨胀性土有关。图 13 对比了张裂破坏时无侧限抗压强度  $q_u$  和剪切破坏时  $\bar{q}_0$  之间的关系, 干化和湿化时不同吸力下  $\bar{q}_0$  均约为  $q_u$  的一半, 此时可通过  $q_u$  来预测  $\bar{q}_0$  的值。

### 3.3 分析和讨论

#### 3.3.1 峰值强度和 Bishop 非饱和土强度公式

吸力对非饱和土剪切强度的作用是非饱和土研究的重点。Alonso<sup>[23]</sup>、张俊然<sup>[15]</sup>、张添峰<sup>[24]</sup>等指出高吸力时, 吸力对抗剪强度贡献的实测值明显小于模型的预测值。据此, 在三轴应力状态下提出以下模型:

$$q = c' \frac{6 \cos \varphi'}{3 - \sin \varphi'} + M \left( p + \left\langle \frac{S_r - S_{r,\text{parameter}}}{1 - S_{r,\text{parameter}}} \right\rangle s \right) \quad (2)$$

$$q = c' \frac{6 \cos \varphi'}{3 - \sin \varphi'} + M \left[ p + (S_r)^\alpha s \right] \quad (3)$$

式中:  $S_r$  为饱和度;  $\langle x \rangle = 0.5(x + |x|)$  为 Macauley 括号,  $S_{r,\text{parameter}}$  为不同物理含义的材料参数, 如残余饱和度  $S_{r,\text{residual}}$ <sup>[25-26]</sup>、微观饱和度  $S_r^m$ <sup>[15, 23]</sup> 等;  $\alpha \geq 1$ , 为材料参数。

对比式 (1), 利用式 (2)、(3) 来预测试验值  $\bar{q}_0$ , 使得  $\sum (\bar{q}_{0,\text{预测值}} - \bar{q}_{0,\text{试验值}})^2$  取得最小值, 如图 14 所示。图中式 (2) 干化和湿化时的预测值均等于饱和时的值, 其中干化时  $S_{r,\text{parameter}} = 0.69$ , 湿化时  $S_{r,\text{parameter}} = 0.53$ 。式 (3) 干化时  $\alpha = 3.61$ , 湿化时  $\alpha = 1.85$ 。随着吸力的增大, 湿化时的预测值和试验值较为接近; 然而干化时预测值逐渐变化为饱和时的值, 即式 (2)、(3) 由于材料参数的作用, 高吸力时土体的饱和度被折减趋近于 0, 而不能合理地考虑高吸力时吸力的作用<sup>[27]</sup>。

#### 3.3.2 峰值强度和剪胀作用

上述式 (2)、(3) 本质上是从修正高吸力时吸

力对非饱和土有效应力贡献的角度来描述高吸力时土体剪切强度变化的。然而试验结果表明, 高吸力时仅从有效应力角度不能描述土体强度的变化。图 6、7 中的试验结果也可表示为净应力比  $q/p$  和剪胀率  $d\varepsilon_v/d\varepsilon_d$  的关系曲线, 其中  $\varepsilon_d$  为偏应变。典型的应力比和剪胀率曲线如图 15 所示。整理试验中的峰值

强度点及对应的最小剪胀率(剪胀为负), 如图 16 所示。从图中可得, 峰值净应力比和最小剪胀率满足以下剪胀方程:

$$\left(\frac{q}{p}\right)_{\max} = 1.448 - 0.877 \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_d}\right)_{\min} \quad (4)$$

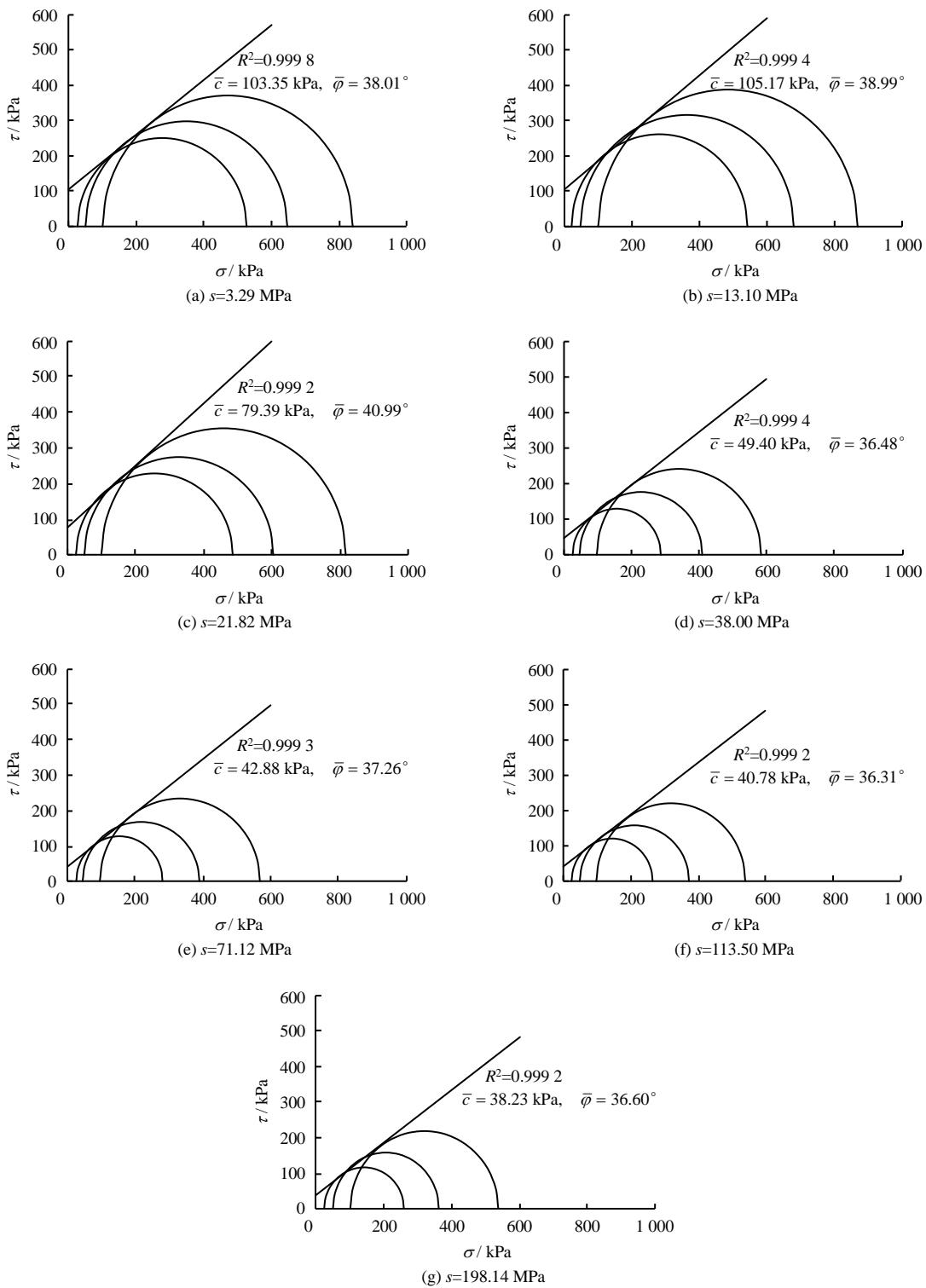


图 10 干化时的摩尔-库仑抗剪强度包线

Fig.10 Mohr-Coulomb shear strength envelopes under drying

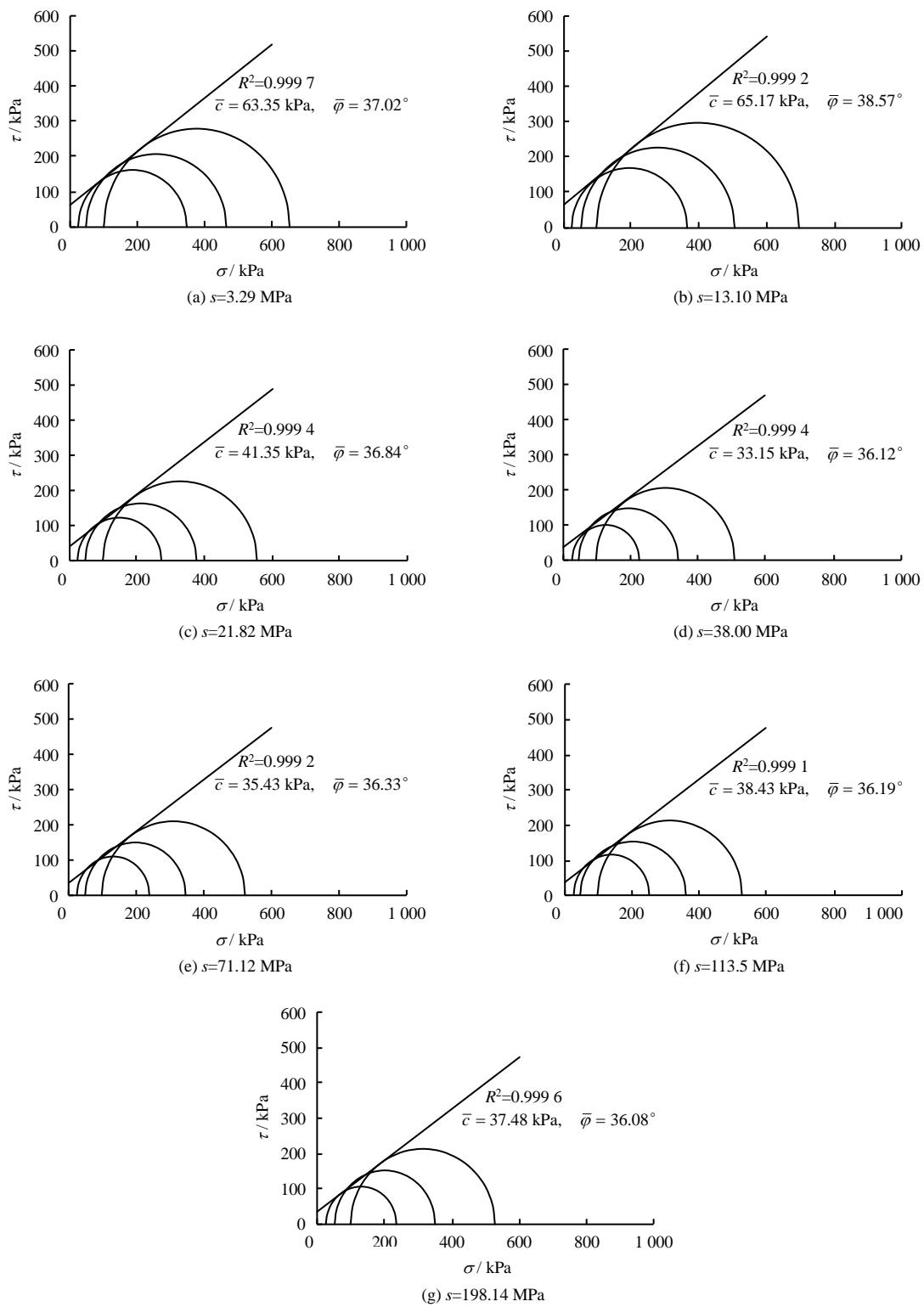


图 11 湿化时的摩尔-库仑抗剪强度包线

Fig.11 Mohr-Coulomb shear strength envelopes under wetting

式中：相关系数  $R^2 = 0.92$ 。式(4)可表示为

$$\left(\frac{q}{p}\right)_{\max} = M + (N - 1) \left( \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_d} \right)_{\min} \quad (5)$$

式中： $M = 1.448$ ，即式(1)中定义的饱和时的临界状态应力比； $N = 0.123$ ，表示剪胀参数。式(5)

和 Nova 等<sup>[28]</sup>建议的剪胀方程形式相同，区别在于式(5)中  $p$  为平均净应力，而 Nova 针对饱和土得到的方程中采用了平均有效应力  $p'$ 。式(5)表明，高吸力下峰值强度可用相对于净应力的临界状态强度（可采用饱和时的临界状态应力比）和剪胀作用来表示。同时图 16 中围压和吸力变化时峰值强度和

剪胀率沿着同一斜率变化, 干化和湿化时相同。围压减小时, 剪胀率增大; 吸力增大时, 剪胀率和图14中所示试验得到的剪切强度的变化趋势相同(剪胀为负)。

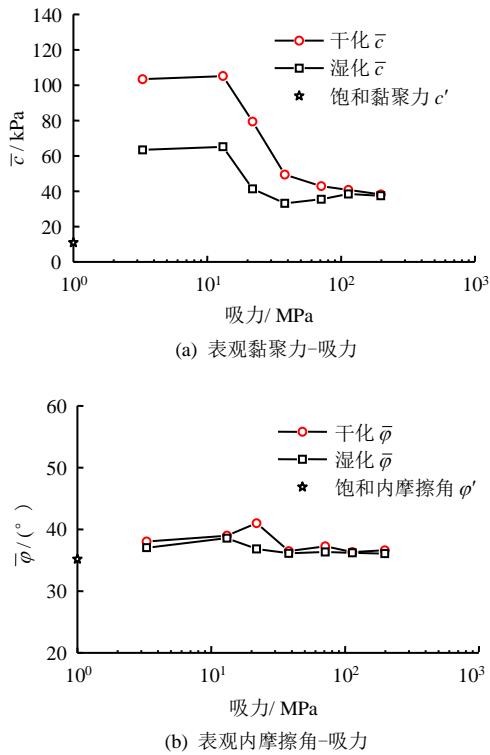


图12 抗剪强度指标和吸力的关系  
Fig.12 Relationships between shear strength indexes and suction

吸力 / MPa	$R^2$		$\bar{q}_0$	
	(干化)	(湿化)	(干化)	(湿化)
3.29	0.993 4	0.996 4	232.67	139.79
13.10	0.987 9	0.989 1	245.74	154.79
21.82	0.975 6	0.995 9	148.89	92.45
38.00	0.994 3	0.997 4	98.17	71.41
71.12	0.996 3	0.996 7	111.05	77.25
113.50	0.996 6	0.996 5	88.16	82.66
198.14	0.995 9	0.998 1	84.63	80.14

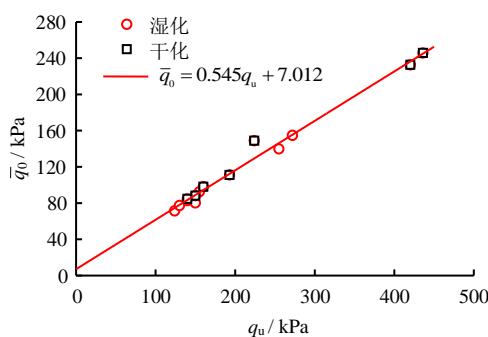


图13  $\bar{q}_0$  和  $q_u$  之间的关系  
Fig.13 Relationship between  $\bar{q}_0$  and  $q_u$

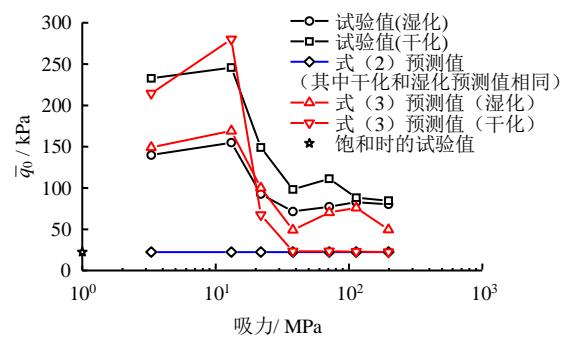


图14 高吸力下剪切破坏时表观黏聚力的预测值和试验值对比  
Fig.14 Comparisons between predictive and experimental apparent cohesion during shear failure under high suction

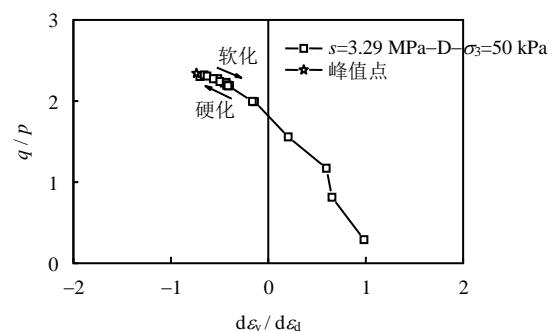


图15 典型的应力比和剪胀率的关系曲线形式  
Fig.15 Curve of representative stress ratio and dilatancy rate

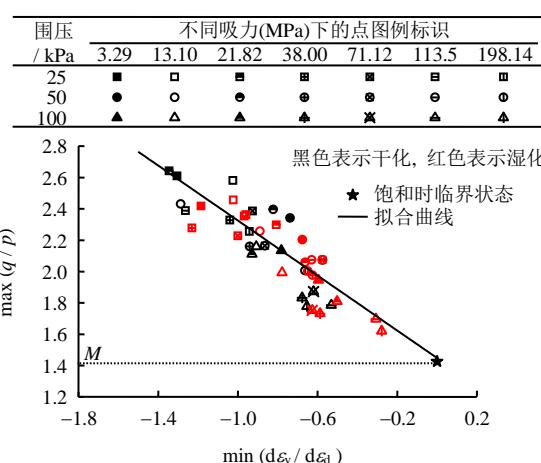


图16 峰值净应力比和最小剪胀率关系  
Fig.16 Relationships between peak net stress ratio and minimum dilatancy rate

### 3.3.3 峰值强度和比表面积

上述土体峰值抗剪强度和剪胀作用的变化可以从高吸力时孔隙水状态(即毛细和吸附作用)和土体组构的变化来解释。随着吸力的增大、基质势的降低, 土中的水从毛细水占优过渡为吸附水占优。吸附水包括强吸附水(阳离子水化)和吸附水膜(颗粒表面和内部水化, 即范德华力作用), 其中吸附水

膜对应于吸力从几千千帕到几百兆帕的范围<sup>[1, 6, 29]</sup>, 本文中的吸力在此范围内, 即土中水多以吸附水膜形式赋存。此时, 可将重力含水率  $w$  (%) 表示为

$$w = 100h \cdot SA \cdot \rho_w \quad (6)$$

式中:  $SA$  为比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ );  $h$  为水膜厚度 ( $\text{m}$ );  $\rho_w$  为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。如果将  $h$  表示为

$$h = \sqrt[3]{\frac{A_{svl}}{6\pi g \rho_w \psi}} \quad (7)$$

式中:  $A_{svl}$  为 Hamaker 常数 ( $\text{J}$ ),  $A_{svl} = -6 \times 10^{-20}$ ;  $\psi$  为吸力水头 ( $\text{m}$ ),  $\psi = 10^6 s/(\rho_w g)$ ;  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ); 吸力  $s$  为负值。此时  $SA$  可表示为<sup>[30]</sup>

$$SA = \frac{w \times 0.01}{\sqrt[3]{\frac{A_{svl}}{6\pi g \rho_w \psi}}} \cdot \rho_w \quad (8)$$

图 17 给出了高吸力时通过式 (8) 得到的比表面积的变化。图中比表面积的变化形式和图 14 中剪切强度的变化形式基本一致, 即高吸力时土体的抗剪强度和比表面积直接相关。

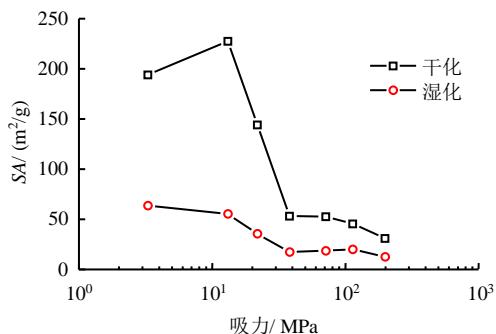


图 17 高吸力下的比表面积

Fig.17 Specific surface area under high suction

### 3.3.4 峰值强度和微观组织

大量的研究证实, 高吸力时土体在吸附作用下逐渐过渡为集聚体组构, 集聚体间接触点处形成弯液面, 孔隙水缩至集聚体表面和内部, 集聚体形成土体的骨架, 正应力在集聚体间传递, 土体孔隙细化, 双孔隙特性明显<sup>[31-33]</sup>。这种组构的改变会导致土体力学特性出现变化<sup>[34]</sup>。研究发现, 随着吸力的增大土体的剪胀特性增强<sup>[35]</sup>。图 18 给出了 3.29 MPa 下吸力平衡后环境扫描电镜法 (ESEM) 得到的试样照片。由图可见, 此时试样表现为集聚体组构。故本文中土体的力学特性可解释为, 当吸力为 3.29 MPa 时, 孔隙水中吸附水占优, 土体形成集聚体组构, 试样脆性特性显著, 强度较大。当吸力上

升到 13.10 MPa 时, 集聚体组构充分发展, 集聚体间接触点处形成弯液面, 集聚体的强度和刚度很大, 剪切时集聚体表现为单个土体颗粒的特性, 试样的强度继续增大。当吸力继续上升时, 集聚体内的微观孔隙开始排水<sup>[36]</sup>, 集聚体开始破碎, 剪切时土体的脆性特性和强度开始减弱。当吸力达到 198.14 MPa 时, 土中水为强吸附水, 强度趋于稳定。

上述分析表明, 在高吸力下, 吸力已不再具有可以通过直接与一个函数 (作用范围<sup>[37]</sup>、尺度转化因子<sup>[38]</sup>等) 相乘而使其等同于应力作用的力学特性, 而是通过改变土体固相和孔隙的组构及导致宏观结构的变化来影响土体宏观力学特性及其变化的。吸力对土体抗剪强度的作用取决于土体集聚体组构的形成和发展程度及土体集聚体之间连接的稳定性和变化性 (即剪胀作用)。

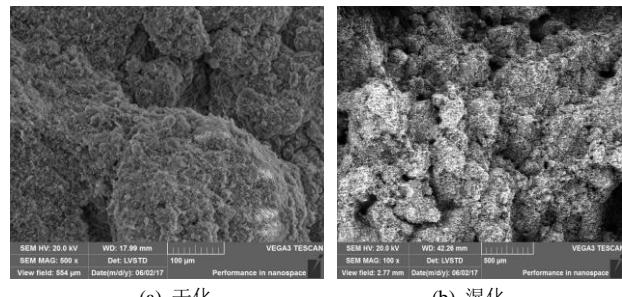


图 18 在 3.29 MPa 下吸力平衡后试样的 ESEM 照片  
Fig.18 ESEM photomicrographs of the sample after 3.29 MPa suction equilibrium

## 4 结 论

(1) 高吸力下土体表现为应变软化型破坏和剪胀特性。开始时土体的峰值强度随着吸力的增大缓慢上升, 达到峰值后开始降低, 并最终趋于稳定。

(2) 围压为 0 时土体表现为沿纵向开裂的张裂破坏, 随着围压的施加, 过渡为剪切破坏。高吸力下也可仅通过摩尔-库仑线性强度准则中的表现黏聚力项来考虑吸力的作用, 此时剪切破坏时表现黏聚力和张裂破坏时无侧限抗压强度线性相关。

(3) 高吸力时从修正吸力对非饱和土有效应力贡献的角度, 即修正的 Bishop 非饱和土强度公式, 难以描述土体峰值抗剪强度的变化。此时有效应力表达式中吸力对应的饱和度折减趋近于 0, 吸力的作用被湮灭。

(4) 高吸力下峰值强度可用相对于净应力的临界状态强度 (可采用饱和时的临界状态应力比) 和剪胀作用来表示。峰值时剪胀率和剪切强度的变化相对应。

(5) 高吸力时土体的抗剪强度与比表面积直接相关, 此时吸力对土体抗剪强度的作用取决于土体集聚体组构的形成和发展程度及其导致的剪胀作用。

## 参 考 文 献

- [1] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics: critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1–2): 26–39.
- [2] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825–1831.  
ZHAO Cheng-gang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1825–1831.
- [3] LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. New York: John Wiley, 2004.
- [4] 汤连生, 颜波, 张鹏程, 等. 非饱和土有效应力及有关概念的解说与辨析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 216–220.  
TANG Lian-sheng, YAN Bo, ZHANG Peng-cheng, et al. Definition and exploration for effective stress and related conception in unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(2): 216–220.
- [5] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(1): 3–74.
- [6] LU N. Generalized soil water retention equation for adsorption and capillarity[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2016, 142(10): 04016051.
- [7] LEBEAU M, KONRAD J M. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 2010, 46(12): W12554.
- [8] ALSHERIF N A, MCCARTNEY J S. Effective stress in unsaturated silt at low degrees of saturation[J]. **Vadose Zone Journal**, 2014, 13(5): 1–13.
- [9] WIEBE B, GRAHAM J, TANG G X, et al. Influence of pressure, saturation, and temperature on the behaviour of unsaturated sand-bentonite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(2): 194–205.
- [10] BLATZ J A, GRAHAM J, CHANDLER N A. Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(5): 1005–1015.
- [11] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237 — 1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water and Power Press, 1999.
- [12] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土–水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3345–3351.  
SUN De-an, LIU Wen-jie, LÜ Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3345–3351.
- [13] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土–水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1839–1846.  
SUN De-an, ZHANG Jun-ran, LÜ Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1839–1846.
- [14] The International Organization of Legal Metrology (OIML). OIML R121 The scale of relative humidity of air certified against saturated salt solutions[S]. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [15] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1064–1070.  
ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(6): 1064–1070.
- [16] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(1): 287–296.
- [17] NG C W W, ZHAN L T, CUI Y J. A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 757–764.
- [18] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curves of deformable clays[C]//International Workshop on Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches.

- Trento: A. A. Balkema, 2000.
- [19] PATIL U D, HOYOS L R, PUPPALA A J. Suitable shearing rate for triaxial testing of intermediate soils under vapor controlled medium to high suction range[C]//The International Foundations Congress and Equipment Expo 2015. San Antonio: [s. n.], 2015: 2141—2150.
- [20] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted boom clay[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54(1—2): 117—127.
- [21] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009.  
ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, WANG Yun-xia. Fundamentals of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2017.
- [22] IKARI M J, KOPF A J. Cohesive strength of clay-rich sediment[J]. **Geophysical Research Letters**, 2011, 38(16): 239—255.
- [23] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(12): 913—925.
- [24] 张添锋, 孙德安, 刘文捷. 桂林压实红黏土抗剪强度与含水率关系[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, 20(5): 586—595.  
ZHANG Tian-feng, SUN De-an, LIU Wen-jie. Relationship between shear strength and moisture content for Guilin laterite[J]. **Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)**, 2014, 20(5): 586—595.
- [25] SCHNELLMANN R, RAHARDJO H, SCHNEIDER H R. Controlling parameter for unsaturated soil property functions: validated on the unsaturated shear strength[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(3): 374—381.
- [26] LU N, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. **Water Resources Research**, 2010, 46(5): 1—14.
- [27] NG C W W, SADEGHI H, JAFARZADEH F. Compression and shear strength characteristics of compacted loess at high suctions[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(5): 690—699.
- [28] NOVA R, WOOD D M. A constitutive model for soil under monotonic and cyclic loading[C]//Soil Mechanics — Transient and Cyclic Loading. Chichester: John Wiley & Sons, 1982, 343—373.
- [29] LU N, KHORSHIDI M. Mechanisms for soil-water retention and hysteresis at high suction range[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(8): 04015032.
- [30] TULLER M, OR D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. **Water Resources Research**, 2005, 41(9): 319—335.
- [31] MERCHÁN V, VAUNAT J, ROMERO E. Drying induced effects on the residual strength of remoulded clays[C]//3rd International Workshop on Unsaturated Soils. Trento: Taylor & Francis, 2009.
- [32] ROMERO E, VECCHIA G D, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(4): 313—328.
- [33] TOLL D G. The influence of fabric on the shear behaviour of unsaturated compacted soils[C]// Geotechnical Measurements: Lab and Field. Denver: [s. n.], 2000: 222—234.
- [34] TOLL D G, ONG B H. Critical-state parameters for an unsaturated residual sandy clay[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(1): 93—103.
- [35] HOSSAIN M A, YIN J H. Shear strength and dilative characteristics of an unsaturated compacted completely decomposed granite soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(10): 1112—1126.
- [36] ZHAO H F, ZHANG L M, FREDLUND D. G. Bimodal shear-strength behavior of unsaturated coarse-grained soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(12): 2070—2081.
- [37] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(1): 123—135.
- [38] LU N. Is matric suction a stress variable?[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(7): 899—905.