

DOI: 10.11779/CJGE202009002

广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性

孙德安¹, 徐钱垒¹, 陈波², 张舟¹

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 衢州学院建筑工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 为了研究广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性, 采用轴平移技术和饱和盐溶液蒸汽平衡法控制试样的吸力, 对 Q₃ 原状黄土进行了一系列控制吸力的常净围压三轴剪切试验, 分析了吸力和净围压对原状黄土强度和变形特性的影响。试验结果表明: 净围压一定条件下广吸力范围内原状黄土破坏时的偏应力随着吸力的增大而增大; 不同吸力条件下原状黄土剪切过程中表现出不同程度的应变硬化或应变软化现象, 同时吸力对黄土的剪胀性有明显的影响, 且吸力越小或净围压越大, 剪胀性越小; 原状黄土的强度参数黏聚力随着吸力的增大而明显增大, 而内摩擦角在低吸力范围内变化不明显, 在高吸力范围内随吸力增大而明显增大。

关键词: 非饱和原状黄土; 广吸力范围; 力学特性; 三轴剪切试验; 净围压

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2020)09 - 1586 - 07

作者简介: 孙德安(1962—), 男, 教授, 主要从事土力学研究和教学。E-mail: sundean@shu.edu.cn。

Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range

SUN De-an¹, XU Qian-lei¹, CHEN Bo², ZHANG Zhou¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: A series of triaxial shear tests with controlled suction are performed on Q₃ unsaturated intact loess under constant net confining pressure to study the mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range, and the suction is imposed using the axis translation technique and vapor equilibrium technique with saturated salt solution. The influences of the suction and net confining pressure on the strength and deformation characteristics of intact loess are analyzed. The test results show that the deviator stress of intact loess at failure increases with the suction under the same net confining pressure. The intact loess show different degrees of strain hardening or strain softening during the shear process under different suctions. The suction and net confining pressure have obvious influences on the shear dilatancy of intact loess, and a lower suction or higher net confining pressure results in a smaller shear-dilatancy. The cohesion of strength parameter of the intact loess increases obviously with the suction, while the internal friction angle does not change obviously in low suction range, but increases with the suction in high suction range.

Key words: unsaturated intact loess; wide suction range; mechanical behavior; triaxial shear test; net confining pressure

0 引言

在自然界中非饱和土普遍存在, 与工程实践联系最为紧密的地表土大多是非饱和土^[1]。黄土作为一种典型的非饱和土, 在中国分布广泛且沉积巨厚, 尤其是在中国西北地区。随着西北大开发战略和“一带一路”战略的实施, 黄土地区基础工程建设中涉及的非饱和黄土问题日益增多, 如机场跑道、公路、边坡等土体都处于非饱和状态, 对这些问题的合理解决依赖于对非饱和黄土力学特性的深入认识。很多学者对非饱和黄土的力学特性进行了大量研究。如陈宗基^[2]通过三轴试验测试了非饱和原状黄土在不同固结压力下

的力学特性, 结果表明低围压下呈软化剪胀现象, 高围压下呈硬化体缩现象。邵生俊等^[3]研究了不同含水率下原状与重塑黄土的应力应变特性和体变特性; 陈伟等^[4]通过三轴剪切试验研究了不同围压和不同含水率条件下杨凌原状黄土的结构性, 并引入新的结构性参数, 结果表明土的结构性参数随围压或含水率的增大而减小。段钊等^[5]系统研究了原状与重塑 Q₂ 黄土的物理力学特性, 认为含水率对于黄土应力 - 应变关系、

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11672172); 浙江省基础公益研究计划项目 (LGG19 E080002)

收稿日期: 2019 - 11 - 25

抗剪强度参数等具有显著影响。陈正汉^[6]研究了重塑非饱和黄土的力学特性和其强度参数与吸力之间的关系。张登飞等^[7]分析了吸力、净围压以及应力路径对非饱和原状黄土力学特性的影响。郭楠等^[8]研究了吸力对原状 Q₃ 黄土及其重塑土加卸载过程中变形和强度特性的影响。高登辉等^[9]研究了 Q₃ 重塑黄土变形和强度特性随干密度与吸力的变化规律。

目前的试验研究基本上都是在较低吸力条件下进行的。中国西北黄土处于干旱、半干旱地区, 长期在相对湿度较低的环境中, 有时吸力可达到几十或几百兆帕。许多黄土处于高吸力的非饱和状态^[10], 因此研究高吸力或者广吸力范围内黄土的力学特性有重要的现实意义。目前针对广吸力范围内非饱和土的力学特性研究成果较少, 如 Gao 等^[11]研究了广吸力范围内不同干密度非饱和粉质黏土的持水与力学特性。孙德安等^[12]研究了广吸力范围内压实红黏土的强度特性。Ng 等^[13]结合饱和和盐溶液蒸汽平衡法用直剪试验研究了高吸力下(吸力范围约为 8~230 MPa)非饱和压实黄土的强度特性。因此有必要对高吸力或者广吸力范围内非饱和和原状黄土的力学特性进行系统的研究。

本文以咸阳 Q₃ 原状黄土为对象, 研究广吸力范围内原状黄土的力学特性。首先采用轴平移技术和饱和和盐溶液蒸汽平衡法对试样施加吸力, 然后通过可以控制吸力的非饱和三轴仪进行三轴试验, 得到广吸力范围内不同吸力和净围压下原状黄土的强度和变形特性及其抗剪强度参数随吸力的变化规律。

1 试验概况

1.1 土样

试验用的原状黄土取自陕西省咸阳市泾阳县的 Q₃ (晚更新世) 马兰黄土, 取土深度约为 23 m。原状黄土的基本物理指标如表 1 所示, 从表可知, 土样为低液限黏土。图 1 为该土的颗粒级配累计曲线, 从图可知, 粒径在 0.005~0.075 mm 之间的粉粒含量约占 71.4%, 小于 0.005 mm 的黏粒含量约占 25%。三轴试验所用原状试样是用专门的切样器将原状土块切削成

表 1 试验黄土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of loess

取土深度 / m	天然密度 ρ / (g·cm ⁻³)	干密度 ρ_d / (g·cm ⁻³)	相对密度 G_s	液限 w_L / %	塑限 w_p / %
23	1.65	1.42	2.71	30	16.5
天然含水率 w / %	天然饱和度 s_0 / %	初始吸力 s_0 / kPa	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
17.6	51.8	约 80	0.92	13.5	0.084

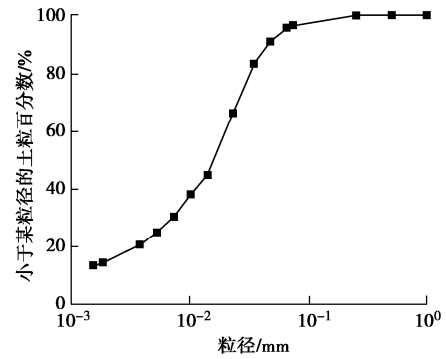


图 1 黄土的颗粒级配累积曲线

Fig. 1 Grading curve of loess

直径约 38 mm, 高约 76 mm 的圆柱体。由于取土深度较深, 土质均匀且各试样的干密度相差不大, 约为 1.42 g/cm³。

1.2 试验方法及方案

压力板仪采用美国 GCTS 公司生产的 SWC-150 土水特征压力仪, 可控制的吸力范围为 0~1.5 MPa。由 Kelvin 方程^[14]可知, 相对湿度与吸力存在对应关系, 利用不同的饱和盐溶液可以控制密闭环境的相对湿度, 从而可以达到控制土样吸力的目的。饱和盐溶液蒸汽平衡法可控制的吸力范围为 3.29~367 MPa。因此通过以上两种方法可将试样的吸力控制在 0~367 MPa 的广吸力范围。

三轴试验采用的是 GDS 非饱和土三轴仪, 该设备可通过轴平移技术对试样施加吸力, 可进行控制吸力的三轴试验。此外该设备通过高精度的差压传感器来量测内室水位变化, 从而得到试样在试验过程中的体积变化。仪器其它部分参见文献[15]。

为了研究广吸力范围内原状黄土的力学特性, 本试验共选取吸力分别为 0, 0.1, 0.25, 0.4, 1.2, 3.29, 38, 367 MPa, 净围压为 100, 200, 400 kPa 的 24 组三轴试验, 如表 2 所示。其中, 低吸力 (0~0.4 MPa) 试样通过直接在三轴仪上采用轴平移的技术施加吸力制备, 而吸力 1.2 MPa 试样用压力板仪制备。高吸力 (3.29~367 MPa) 的试样通过饱和和盐溶液蒸汽平衡法制备, 方法与文献[11]一样。

控制吸力和净围压的三轴试验一般需要经历 3 个阶段, 即吸力平衡阶段、固结平衡阶段、剪切阶段。其中高吸力段的试样吸力平衡阶段是在饱和盐溶液缸里进行的, 然后在三轴仪上进行固结和剪切试验。为了维持试样的吸力, 对试样进行不排水等向压缩和三轴剪切试验, 这种通过控制试样含水率来维持试样高吸力不变的方法是有试验数据支持的。如 Romero 等^[16]的 Boom clay 试验数据表明, 大于 3 MPa 范围的吸力只与含水率有关, 与干密度无关。秦冰等^[17]在对高庙

子膨润土水特性的研究中发现，高吸力范围内压实样与粉末样的吸力与含水率关系曲线几乎一致。Gao 等^[11]的试验数据表明，吸力大于 0.25 MPa 范围内击实粉质黏土的吸力和含水关系不受干密度的影响。因此，在高吸力范围内，即使力学试验（如三轴试验）过程中试样密度发生变化，只要含水率不变，其吸力也不会发生变化。也就是说，常含水率（即不排水）三轴试验等同于常吸力三轴试验。比较文献[11]和[16]使用土样和本文土样的物理指标，参考两文献中吸力和含水率关系不受干密度影响的吸力范围，本文对吸力 1.2~367 MPa 的试样采用不排水三轴试验。

三轴试验中固结稳定的标准为体变和排水的变化率均小于 0.01 cm³/2h，剪切速率约为 0.0027 mm/min，剪切至轴向应变为 15%约需 3 d。

表 2 三轴剪切试验方案

Table 2 Triaxial shear test scheme

净围压/kPa	吸力/MPa
100	0, 0.1, 0.25, 0.4, 1.2, 3.29, 38, 367
200	0, 0.1, 0.25, 0.4, 1.2, 3.29, 38, 367
400	0, 0.1, 0.25, 0.4, 1.2, 3.29, 38, 367

1.3 土水特征曲线

使用压力板仪和饱和盐溶液蒸汽平衡法，对经过饱和的原状黄土试样施加吸力，可测得其广吸力范围内脱湿时的土水特征曲线，如图 2 所示。由图 2 可知，在 $w - \log s$ 平面上土水特征曲线主要由两段直线组成，而吸力大于约 350 kPa 段的直线斜率明显小于吸力小于约 350 kPa 段的直线斜率。

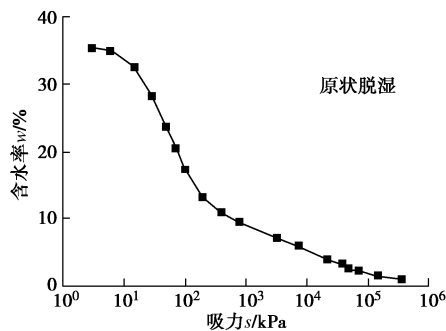


图 2 广吸力范围内原状黄土的土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curve of intact loess over a wide suction range

2 三轴试验结果与分析

2.1 吸力和净围压对应力应变关系的影响

图 3 表示了原状试样在不同吸力和净围压下三轴剪切试验过程中的偏应力 - 应变关系。图 3 中， $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力， σ_3 为净围压， ε_1 为试样轴向应变， ε_v 为试样的体变。对于应变硬化型和应变软化型曲线分别以轴向应变 $\varepsilon_1 = 15\%$ 和峰值点对应的偏应力为

破坏偏应力 q_f ，由此得到图 4 所示的不同净围压下破坏偏应力 q_f 随吸力变化的试验结果。

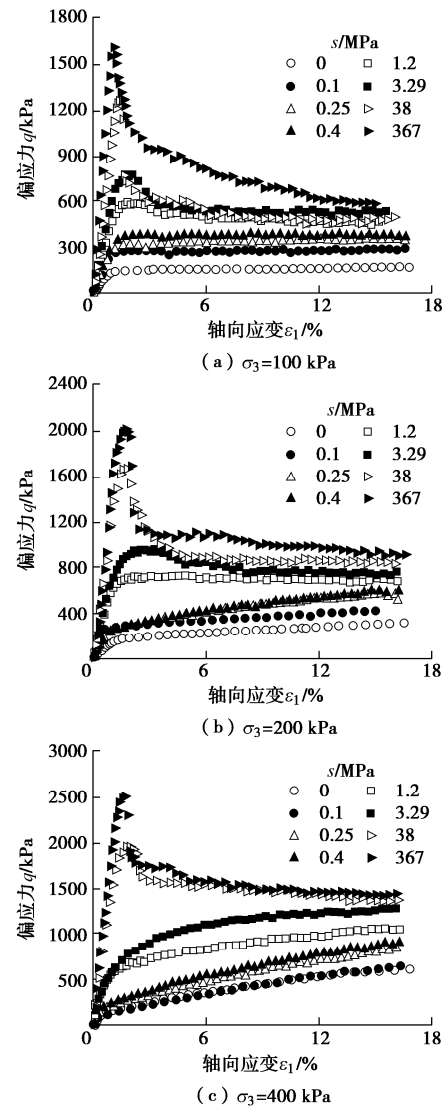


图 3 广吸力范围内原状黄土 $q - \varepsilon_1$ 曲线

Fig. 3 $q - \varepsilon_1$ curves of intact loess over a wide suction range

从图 3 中可以看出，同一净围压下，不同吸力原状黄土应力 - 应变曲线有硬化型或软化型。试样在低吸力下的应力 - 应变曲线呈现硬化型，当吸力增加到某一值（本文称为临界吸力）时，其应力 - 应变曲线呈现软化型。临界吸力随着净围压的增大而增大。同一吸力下，应力 - 应变曲线是否软化与净围压有关，如图 3 所示。吸力为 1.2 MPa 和 3.29 MPa 的试样，低围压（100 kPa）下，其应力 - 应变曲线为软化型；中围压（200 kPa）下，其应力 - 应变曲线类似理想弹塑型（ $s=1.2$ MPa）或者弱软化型（ $s=3.29$ MPa）；高围压（400 kPa）下，其应力 - 应变曲线为硬化型。

从以上分析可知，造成这种结果的原因是原状土的结构性。当吸力较低（即含水率较高）和围压较大时，土的结构（胶结）被破坏，其应力 - 应变曲线呈

现硬化型。

由图 4 可知, 同一吸力下, 围压越大, 其破坏偏应力越大; 同一围压下, 试样破坏时的偏应力随着吸力的增大而增大。这一变化趋势与文献[11]的结果不一样, 粉质黏土的强度先随吸力的增大而增大, 到某一吸力后, 其强度随吸力增大而略微减小, 然后几乎不随吸力的增加而变化。原状黄土的强度随着吸力的增大而一直增大, 其原因可能是原状黄土中胶结物干化所致, 而上述粉质黏土没有胶结物的存在。

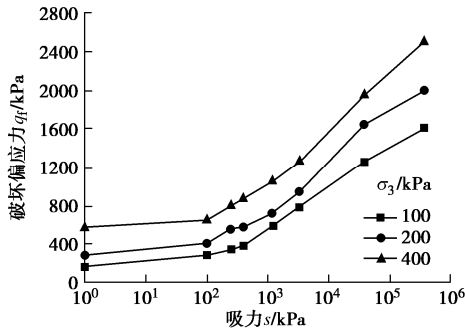


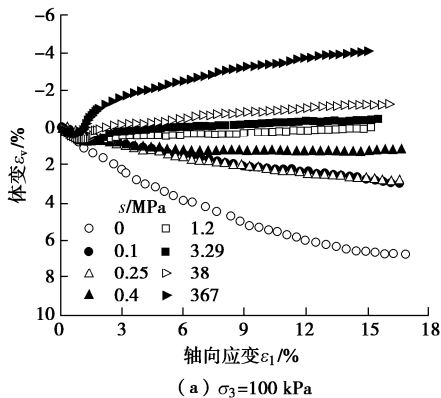
图 4 广吸力范围内原状黄土强度随吸力的变化

Fig. 4 Change in strength of intact loess with suction over a wide suction range

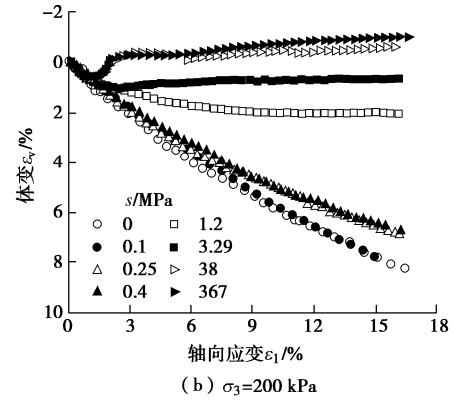
2.2 吸力和净围压对剪切过程中体变的影响

在三轴剪切试验中原状黄土的体变与轴向应变关系如图 5 所示, 其中正值体变代表剪缩, 负值体变代表剪胀。由图 5 可知, 随着吸力的增大, 试样的体变值减小。不同吸力下试样呈现出剪缩或剪胀现象。低吸力下, 试样呈现剪缩现象, 且吸力越小, 剪缩性越强, 随着吸力的增大, 试样逐渐呈现剪胀现象。

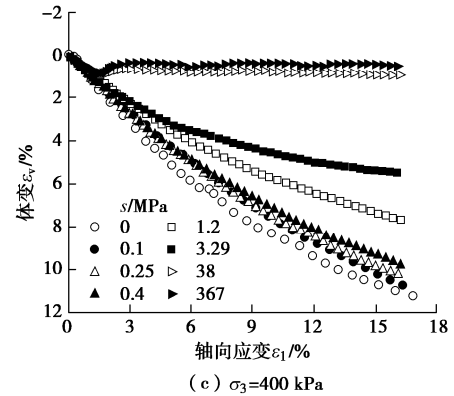
对于同一吸力试样, 围压越大, 其剪缩性越强。不同的围压可使其呈现出剪缩或者剪胀现象, 如吸力 3.29 MPa 的试样, 其在低围压 (100 kPa) 下, 试样表现为剪胀; 中围压 (200 kPa) 下, 表现为弱剪缩; 高围压 (400 kPa) 下, 则为剪缩。由图 3 和图 5 可知, 应力 - 应变关系出现应变软化的试样均出现剪胀现象, 且软化性越强, 剪胀越明显。



(a) $\sigma_3=100$ kPa



(b) $\sigma_3=200$ kPa



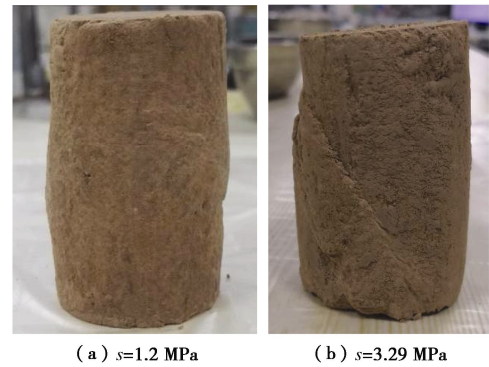
(c) $\sigma_3=400$ kPa

图 5 广吸力范围内原状黄土 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 曲线

Fig. 5 $\epsilon_v - \epsilon_1$ curves of intact loess over a wide suction range

2.3 应变软化和剪胀与滑动面之间的关系

图 6 是吸力分别为 1.2, 3.29, 38 MPa 和净围压为 200 kPa 的条件下三轴剪切试验后原状黄土试样的形状。



(a) $s=1.2$ MPa

(b) $s=3.29$ MPa



(c) $s=38$ MPa

图 6 三轴剪切后的原状黄土试样 ($\sigma_3=200$ kPa)

Fig. 6 Specimens of intact loess after triaxial tests ($\sigma_3=200$ kPa)

如图 3 (b) 所示, 随着吸力的增大, 3 种吸力 (1.2, 3.29, 38 MPa) 下试样的应力 - 应变曲线分别表现为应变硬化型 (1.2 MPa)、弱软化型 (即曲线没有出现尖锐的峰值, 3.29 MPa)、软化型 (38 MPa)。从图 6 可知, 三轴试验后, 吸力 1.2 MPa 试样呈鼓型, 没有出现滑动面; 吸力 3.29 MPa 试样出现了滑动面, 但并没有发育成型; 吸力 38 MPa 试样出现了发育成型的滑动面。结合图 3 (b) 和图 6 可知, 3 种不同应力 - 应变曲线形式对应 3 种不同的破坏形态。因此试样的应变软化现象的出现与其滑动面的发育相关。高游等^[15]在对粉质黏土的试验研究中有类似的结果。

从图 5 (b) 中可以看出, 3 种吸力下试样的体变 - 应变曲线分别呈现为剪缩型、弱剪缩型和剪胀型, 对应图 6 中的无滑动面、发育未成型滑动面和发育成型的滑动面。因此试样的剪胀现象也与其滑动面的发育有关。

2.4 吸力对原状黄土抗剪强度参数的影响

三轴剪切试验中, 净平均应力 $p = q/3 + \sigma_3$, 不同吸力和净围压下试样破坏时的应力状态为 (p_f, q_f) , 本文所有三轴试验得到的 q_f 和 p_f 值如表 3 所示, 图 7 绘制 $q_f - p_f$ 关系曲线。

表 3 原状黄土的强度参数

Table 3 Strength parameters of intact loess							
s/MPa	σ_3/kPa	q_f/kPa	p_f/kPa	ξ/kPa	M	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
0	100	169.43	156.48	18.84	0.942	8.91	24.02
	200	295.13	298.38				
	400	578.90	592.97				
0.1	100	291.18	197.06	124.5	0.851	58.75	21.87
	200	413.16	337.72				
	400	647.97	615.99				
0.25	100	352.07	217.36	156.9	0.976	74.36	24.81
	200	562.38	387.46				
	400	795.66	665.22				
0.4	100	385.26	228.42	156.0	1.05	74.18	26.46
	200	584.69	394.90				
	400	874.21	691.40				
1.2	100	594.18	298.06	278.4	1.03	132.3	26.11
	200	720.09	440.03				
	400	1058.84	752.95				
3.29	100	781.29	360.43	404.5	1.05	192.4	26.53
	200	948.85	516.28				
	400	1266.9	822.29				
38	100	1262.2	520.72	626.2	1.29	303.9	31.97
	200	1649.5	749.84				
	400	1951.3	1050.4				
367	100	1611.8	637.25	688.9	1.48	343.2	36.37
	200	2001.4	867.12				
	400	2499.6	1233.2				

吸力相同的一组试验点落在一条直线上, 可用下式表达:

$$q_f = \xi + M p_f \quad (1)$$

式中, ξ 和 M 分别是直线的截距和斜率。内摩擦角 φ 和黏聚力 c 与 ξ 和 M 的关系如下:

$$\sin \varphi = 3M / (6+M) \quad (2)$$

$$c = \xi (3 - \sin \varphi) / (6 \cos \varphi) \quad (3)$$

有关黄土的抗剪强度参数随吸力 (或含水率) 变化的研究有许多, 研究发现黏聚力随吸力的变化显著, 而对于内摩擦角随着吸力的变化规律有不同的试验结果, 而且都是在低吸力条件下进行的试验研究。陈正汉^[6]在对重塑非饱和黄土强度特性的试验研究中发现, 在试验的吸力范围内 (0~300 kPa), φ 变化不大且与饱和土的内摩擦角接近。张登飞等^[7]在对原状非饱和黄土的研究中发现随吸力 (0~200 kPa) 的增大, 内摩擦角 φ 减小。

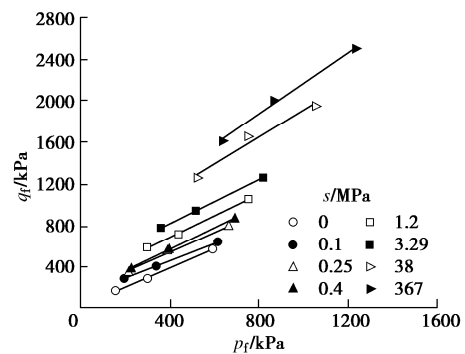


图 7 $p-q$ 平面内原状黄土的强度包线

Fig. 7 Strength envelopes of intact loess in $p-q$ plane

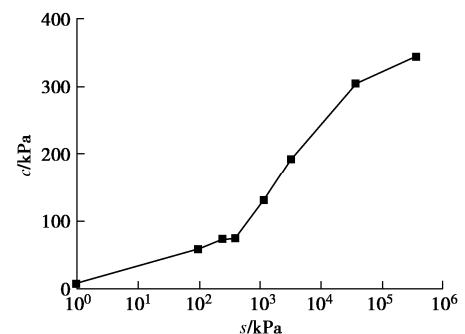


图 8 广吸力范围内原状黄土黏聚力随吸力的变化

Fig. 8 Change in cohesion with suction over a wide suction range

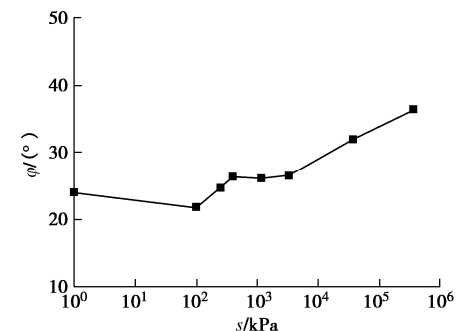


图 9 广吸力范围内原状黄土内摩擦角随吸力的变化

Fig. 9 Change in internal friction angle with suction over a wide suction range

本文研究了广吸力范围内原状黄土的抗剪强度参数随吸力变化的规律, 如图 8 和图 9 所示。由图 8, 9 可知, 黏聚力随着吸力的增大而增大, 且在较高吸力

范围内变化显著。在低吸力范围内内摩擦角随吸力变化不明显, 略微增大; 在高吸力范围内显著增大。黏聚力和内摩擦角在高吸力范围内随吸力的变化均比较显著, 这是由于在高吸力的作用下, 原状黄土的结构明显增强, 从而使其强度参数明显增加。

3 结 论

本文在广吸力范围内对非饱和和原状黄土进行了一系列控制吸力的常净围压三轴剪切试验, 研究了广吸力范围内原状黄土的力学特性, 得如下结论:

(1) 在广吸力范围内原状黄土的应力-应变关系有硬化型和软化型, 随着吸力的增加, 应力-应变关系逐渐从硬化型变成软化型。原状黄土的破坏强度随着吸力的增大而增大。

(2) 低吸力下, 试样呈现剪缩现象, 且净围压越大剪缩性越强; 高吸力下, 试样呈现剪胀现象, 且净围压越低, 剪胀性越强。原状黄土的剪胀性受吸力和净围压的共同影响。

(3) 在三轴剪切过程中试样出现的应变软化现象和剪胀现象与试样滑动面的发育程度相关。随着滑动面的出现或者发育成型, 试样逐渐表现出软化和剪胀现象。

(4) 原状黄土的黏聚力 c 随着吸力的增大而增大, 内摩擦角 φ 在低吸力范围内随吸力变化不明显, 高吸力范围内显著增大, 说明在高吸力的作用下, 原状黄土的胶结明显增强。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [2] 陈宗基. 中国西北黄土的基本性质及其工程建议[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 9 - 24. (CHEN Zong-ji. Fundamental properties of loess from Northwestern China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6): 9 - 24. (in Chinese))
- [3] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531 - 536. (SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531 - 536. (in Chinese))
- [4] 陈伟, 骆亚生, 郭靖. 基于三轴剪切试验的原状黄土结构性研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(7): 110 - 114. (CHEN Wei, LUO Ya-sheng, GUO Jing. The intact loess structural research based on the conventional triaxial compression test[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(7): 110 - 114. (in Chinese))
- [5] 段钊, 彭建兵, 冷艳秋. 泾阳南塬 Q_2 黄土物理力学特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 60 - 66, 109. (DUAN Zhao, PENG Jian-bing, LENG Yan-qiu. Physico-mechanical characteristics of Q_2 loess in South Plateau of Jingyang[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(5): 60 - 66, 109. (in Chinese))
- [6] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82 - 90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [7] 张登飞, 陈存礼, 李文文, 等. Q_3 原状非饱和黄土的水量变化和临界状态特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1): 197 - 201. (ZHANG Deng-fei, CHEN Cun-li, LI Wen-wen, et al. Characteristics of critical state and water volume change for Q_3 unsaturated intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 197 - 201. (in Chinese))
- [8] 郭楠, 陈正汉, 高登辉, 等. 加卸载条件下吸力对黄土变形特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 735 - 742. (GUO Nan, CHEN Zhen-han, GAO Deng-hui, et al. Experimental research on influences of suction on deformation characteristics of loess under unloading-reloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 735 - 742. (in Chinese))
- [9] 高登辉, 陈正汉, 郭楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 736 - 744. (GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, GUO Nan, et al. The influence of dry density and matric suction on the deformation and strength characteristics of the remolded unsaturated loess soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 736 - 744. (in Chinese))
- [10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 131 - 144. (YIN Zong-ze. Geotechnical Principle[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, 2007: 131 - 144. (in Chinese))
- [11] GAO Y, SUN D A, ZHU Z C, et al. Hydromechanical

- behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(2): 417 - 428.
- [12] 孙德安, 何家浩, 高游. 广吸力范围内压实红黏土的强度特性[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(增刊 2): 51 - 56. (SUN De-an, HE Jia-hao, GAO You. Strength characteristics of compacted lateritic clay in a wide range of suction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(S2): 51 - 56. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] HOYOS L R, SUESCUN-FLOREZ E A, PUPPALA A J. Stiffness of intermediate unsaturated soil from simultaneous suction-controlled resonant column and bender element testing[J]. *Engineering Geology*, 2015, **188**: 10 - 28.
- [15] 高游, 孙德安. 制样方法对非饱和土力学特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(8): 1529 - 1534. (GAO You, SUN De-an. Effect of specimen preparation on mechanical behavior of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(8): 1529 - 1534. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (in Chinese))

2020年第五届土木工程国际会议 (ICCVIL2020) 通知

2020年第五届土木工程国际会议为广大从事土木工程相关领域的研究学者、专家提供交流平台。会议组委会诚邀全球相关领域的学者、专家参加此次国际会议,就相关主题的热点问题探讨、交流,共同促进全球土木工程的发展。

2020年第五届土木工程国际会议将于2020年11月28—30日在中国西安召开。西安,古称长安,陕西省省会。西安是举世闻名的世界四大文明古都之一,居中国古都之首,是中国历史上建都时间最长、建都朝代最多、影响力最大的都城。作为华夏文明的发源地,西安的历史悠久,文化的积淀非常厚重,它是著名的丝绸之路的起点。西汉时期,汉武帝派遣张骞出使西域,正式开辟了以长安为起点,联结欧亚大陆的通道“丝绸

之路”。“西安文物甲天下”,深厚的历史文化积淀和浩瀚的文物古迹遗存使西安享有“天然历史博物馆”的美称。有诸如秦始皇兵马俑、大雁塔、西安古城墙、华清池等著名旅游景点。

2020年第五届土木工程国际会议诚邀全球相关领域的学者、专家参会并投稿。本次会议接受中文及英文原创性文章。本次会议接受摘要或全文投稿。所有录用论文的在线出版时间为收到最终稿后15~20天。

会议日期:2020年11月28—30日;录用通知:投稿后20~40天;论文出版:收到最终稿后15~20天;会议网址:<http://www.iccivl.org/2020/cn/home>。

(摘自《地基处理》)