

文章编号: 1001-4888(2018)03-0477-07

确定非饱和粉土吸附强度的试验研究^{*}

宋达, 岳建伟, 杨光辉, 原江波

(河南大学岩土与轨道交通研究所, 河南开封 475004)

摘要: 非饱和粉土的吸附强度是土力学研究中的难点。针对非饱和粉土吸附强度的影响因素复杂且难以确定等问题, 以饱和粉土抗剪强度计算公式为基础, 以非饱和粉土抗剪强度作为过渡, 研究吸附强度的确定方法。本文通过对不同含水率条件下的非饱和粉土进行固结不排水三轴剪切试验, 利用 MATLAB 对得到的试验结果进行线性回归分析, 探究非饱和粉土吸附强度与含水率之间的关系, 提出了非饱和粉土吸附强度的计算公式。研究结果表明, 非饱和粉土的吸附强度与含水率呈线性递减趋势。本文提出的计算公式可为非饱和粉土的理论分析和工程应用提供参考。

关键词: 非饱和粉土; 抗剪强度; 吸附强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-037

0 引言

目前在工程界广泛应用的土力学理论大都属于经典的饱和土力学理论范畴, 然而地球表面的土层绝大部分都处于非饱和状态。包承纲^[1]等曾指出: “非饱和土工程问题时有发生, 世界上有超过 60% 以上的国家都遭受过非饱和土所带来的工程危害”。在工程实践中, 非饱和土中吸力的存在会对地基的稳定和安全有很大影响, 当发生降雨或管道漏水时会使土中含水率增加, 造成土中的吸力减小, 进而会引起坍塌事故的发生, 这种事故具有突发性, 造成的损失非常严重^[2], 因此对非饱和土吸附强度的掌握和理解是很有必要的。

国内外学者结合试验与理论分析, 对非饱和粉土的抗剪强度理论进行了大量研究。樊申^[3]、Bishop^[4]等提出了在饱和土强度理论基础上建立的非饱和土强度理论。Fredlund^[5]、YANG^[6]等从非饱和土本身的力学特点出发, 以孔隙气压为基准, 建立了双应力状态变量的非饱和土抗剪强度表达式。汤连生^[7]等通过对非饱和土粒间吸力的研究, 将颗粒间总吸力分为结构吸力、广义吸力及收缩膜张力, 并提出了总有效应力原理。以上所述强度理论都反映了基于总应力法研究非饱和土的受力特性是可行的, 且均被广泛应用于岩土工程实践中。

非饱和土的抗剪强度通常表示为饱和土的抗剪强度 τ_{fs} 与基质吸力引起的吸附强度 τ_s 二者之和, 其中饱和土的抗剪强度比较容易确定, 而非饱和土抗剪强度的确定相对困难^[8-11], 因而吸附强度确定的关键在于非饱和土抗剪强度的合理表征。为此本文以开封地区的粉土为研究对象, 通过对不同含水率条件下的粉土进行三轴剪切试验, 利用 MATLAB 对得到的试验结果进行线性回归分析, 拟合出非饱和粉土抗剪强度与含水率之间的关系式, 然后基于非饱和粉土抗剪强度、饱和粉土抗剪强度及吸附强度之间的关系, 最终确定出非饱和粉土的吸附强度计算公式。

^{*} 收稿日期: 2017-02-23; 修回日期: 2017-05-08

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿研究项目(162300410012); 住建部砂芯水泥土砂浆桩的试验及理论分析研究(2011k345)

通讯作者: 岳建伟(1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究非饱和土的本构模型。Email: yjwchn@126.com

1 室内固结不排水三轴试验

1.1 试样制备

试验用土取自开封河南大学金明校区附近的施工现场,取粉土 500g,采用筛分法对粉土的颗粒级配进行筛分,得到该粉土颗粒粒径分布在 $0.075 \sim 1\text{mm}$ 的含量达到 95% 以上,大于 1mm 的颗粒极少。表 1 为试验测得的原状粉土的基本物理性质。

表 1 原状土的基本物理性质
Tab. 1 The basic physical properties of undisturbed soil

天然含水率/%	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
10.2	1.67	1.84	15.3	10.1	5.2

试验前将土风干,控制重塑土的干密度与原状土的干密度相同,根据试验设计要求配置不同含水率的土。采用击实法^[12]以 GB50123—1999 土工试验方法标准^[13]进行击实制样,分 5 层来击实,按照击实功,每层击 10 次,将土样制成直径为 3.8cm,高为 7.6cm 的标准土样,击实后的土样如图 1 所示。对于饱和粉土的试验,土样采用毛细管饱和法进行饱和,将土样装入饱和器中在水内静置 48h,如图 2 所示。

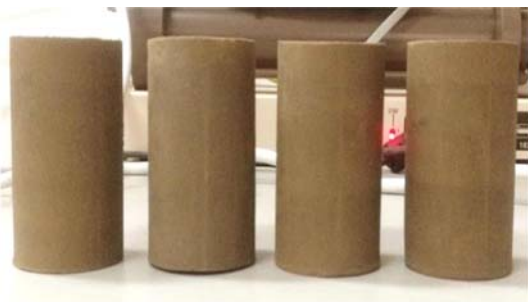


图 1 击实后的土样

Fig. 1 The compacted soil sample

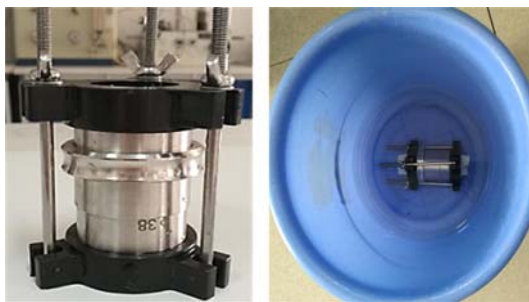
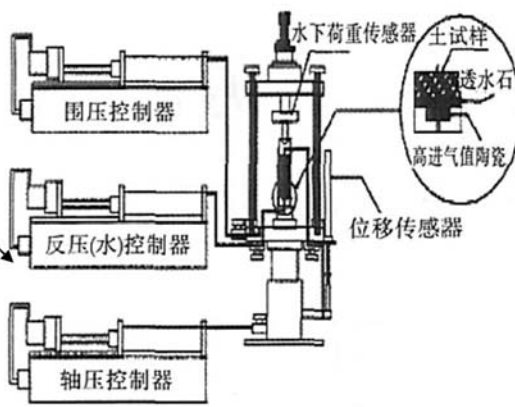


图 2 饱和器

Fig. 2 The saturating apparatus



(a)



(b)

图 3 GDS 三轴仪试验系统

Fig. 3 The testing system of GDS tri-axial apparatus

1.2 试验过程

本次固结不排水静三轴试验是在 GDS 三轴仪试验系统^[14]上进行的,试验装置如图 3 所示。GDS 三轴仪试验系统由控制器(液压控制的围压控制器、反压控制器、轴压控制器)、压力室和数据采集系统 3 大部分构成。土样的横向荷载通过围压控制器、反压控制器共同控制,竖向荷载由轴向控制器进行控制。非饱和粉土三轴试验根据含水率的不同分 5 组进行,含水率 w 分别为 10.8%、12.5%、14.2%、15.8%、25%(饱和),每组均为 3 个土样。通过 GDS 全自动三轴仪控制围压分别为 100kPa、200kPa、

400kPa, 剪切速率为 0.4mm/min, 对试样进行固结不排水剪切试验。

试验开始时, 首先将套好橡皮膜的试样安装在底座上, 并用橡皮筋对试样两端进行固定。然后安装压力室、注水、排气、升高压力架, 开始试验。接着将传感器读数清零、选择存储路径、设置试验类型、输入控制参数开始固结, 固结过程中孔隙压力逐步下降。最后固结完成后, 设置剪切速率开始剪切, 直到曲线出现峰值或轴向应变达到 15%, 试验停止。在试验过程中, 偏应力、轴向应变等数据均由电脑采集处理, 可直接进行读数。

2 抗剪强度

2.1 饱和粉土的抗剪强度

根据摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)破坏准则, 土体在各项主应力的作用下, 作用在某一应力面上的剪切应力 τ 与法向应力 σ 之比达到某一比值(即土的内摩擦角正切值 $\tan\varphi$), 土体将沿该面发生剪切破坏, 而与作用的各向主应力的大小无关。发生剪切破坏时, 满足下列关系式:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cdot \cos\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi$$

式中, σ_1 、 σ_3 为大小主应力, kPa; c 为土的黏聚力, kPa; φ 为土的内摩擦角, ($^\circ$)。

对本次饱和粉土试验数据进行整理分析, 利用摩尔-库伦破坏准则绘制出摩尔圆, 如图 4 所示。其中, 摩尔圆的公切线为剪应力与法向应力的关系曲线, 通常以近似的直线表示, 其倾角为土的内摩擦角 φ , 在纵轴上的截距为土的黏聚力 c 。

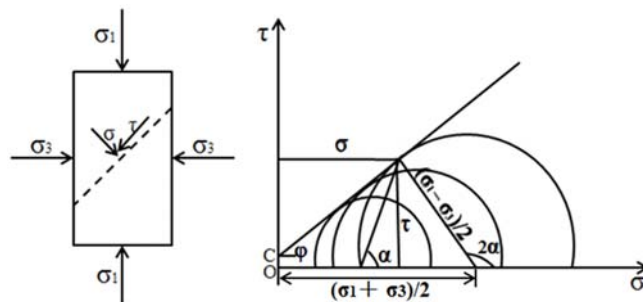


图4 三轴试验中剪应力与法向应力的关系

Fig. 4 The relationship between shear stress and normal stress in triaxial tests

剪应力与法向应力之间的函数关系用库伦方程表示为:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi$$

式中, 剪应力 τ 和正应力 σ 的大小与主应力及破坏面的倾角 α 有如下关系:

$$\sigma - \sigma_1 \cos^2 \alpha - \sigma_3 \sin^2 \alpha = 0$$

$$\tau + \sigma_3 \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha = 0$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha$$

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi$$

综合上述公式, 利用所得到的饱和粉土的抗剪强度指标和试验数据, 可以计算出饱和粉土的抗剪强度。

2.2 非饱和粉土的抗剪强度

经过对试验数据整理分析, 得到非饱和粉土抗剪强度指标与含水率之间的关系曲线, 如图 5 所示。由图可知, 非饱和粉土的黏聚力 c 随着含水率增大逐渐减小, 且变化幅度比较明显, 其原因是颗粒间的水膜联结和胶结作用的影响, 土颗粒表面的水膜产生的表面张力由强变弱; 而内摩擦角 φ 随着含水率增

大呈减小趋势,并逐渐趋于平缓,其主要原因是土颗粒周围的结合水膜由薄变厚,由强变弱。因此抗剪强度变化的本质归结于含水率对抗剪强度指标的影响。利用 MATLAB 对图 5 中的曲线进行线性回归分析,得到非饱和粉土抗剪强度指标与含水率之间的拟合公式,如表 2 所示,且拟合公式的相关系数都达到 0.99 以上。从拟合出的关系式看出黏聚力与含水率近似呈二次函数关系,而内摩擦角与含水率近似呈线性关系。

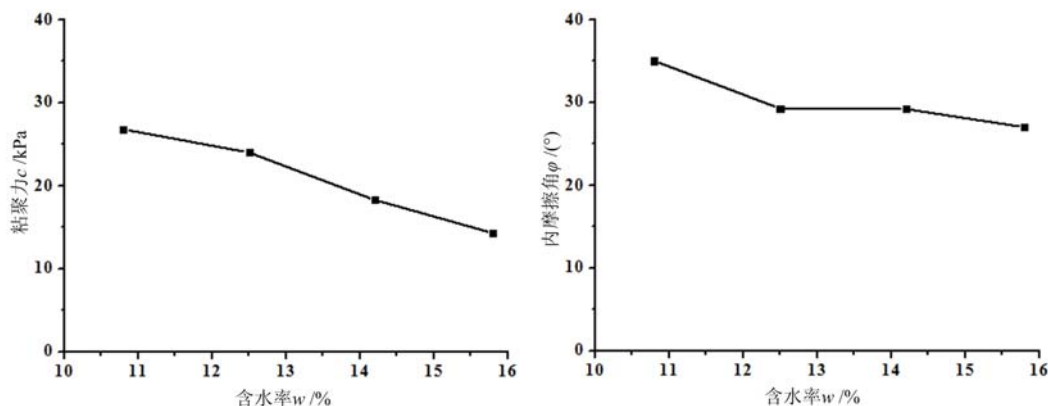


图 5 抗剪强度指标试验结果

Fig. 5 Test results of shear strength index

表 2 含水率与抗剪强度指标关系拟合公式

Tab. 2 The formula of the relationship between water content and shear strength index

参数	拟合公式	相关系数
C	$C = -0.1356w^2 + 1.019w + 31.81$	0.9904
φ	$\varphi = -1.387w + 48.84$	0.9966

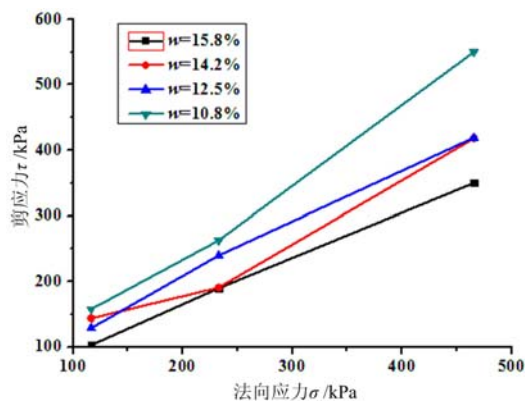


图 6 不同含水率下土样的剪切强度曲线

Fig. 6 The shear strength curves of soil samples with different water contents

在图 6 中也有所体现。

3 非饱和粉土的吸附强度

吸附强度实质上是一种与外力无关的摩擦强度,是由于吸力^[15]引起的负孔隙压力在土骨架内部产生有效应力而形成的。吸附强度的初始数值可以通过试验测定,但是由于受时间、气候及水文地质条件变化的影响,其值很难准确估算出。到目前为止,吸附强度的实际变化规律只能从现场吸力量测中求得。基质吸力通常用多孔陶土板技术和轴平移技术进行测定,但是由于目前的吸力测试技术比较复杂,尚未能够在工程实践中大量应用,使得基质吸力的确定比较困难,因此通过基质吸力确定吸附强度的想

为了探究含水率与非饱和粉土抗剪强度之间的关系,将不同含水率状态下的试验结果进行处理分析,如图 6 所示,从图中可以得到,在法向应力相同时非饱和粉土的抗剪强度随着含水率的增大而减小,且变化的幅度具有差异性。利用表 2 的结果,将饱和土抗剪强度公式应用于非饱和土中,可得到非饱和和粉土的抗剪强度表达式为: $\tau = C(w) + \sigma \tan \varphi(w)$, 式中: $C(w) = aw^2 + bw + c$; $\varphi(w) = dw + e$ 。从此式可以看出,含水率与抗剪强度呈二次函数关系,含水率对抗剪强度的影响归结于含水率与抗剪强度指标的关系。另外抗剪强度与法向应力呈正比例关系,这

法行不通。另外,根据式 $\tau_{fw} = \tau_{fs} + \tau_s$ 可知,非饱和粉土的吸附强度 τ_s 可以通过非饱和粉土的抗剪强度 τ_{fw} 与饱和粉土的抗剪强度 τ_{fs} 之差进行确定,但是由于非饱和粉土的影响因素比较复杂,确定非饱和粉土的抗剪强度容易存在偏差,因此通过这种方法得到吸附强度不能保证准确性。由此可知上述所述方法都不可行,因此吸附强度的确定就成为需要解决的关键问题。

利用饱和粉土抗剪强度计算式 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 表示出非饱和粉土的抗剪强度的表达式为 $\tau_{fw} = c(\omega) + \sigma \tan \varphi(\omega)$,接着根据摩尔-库伦准则确定饱和粉土的抗剪强度 τ_{fs} ,然后依据饱和粉土抗剪强度与非饱和粉土抗剪强度之间的关系 $\tau_{fw} = \tau_{fs} + \tau_s$,可以得到非饱和粉土吸附强度的表达式为: $\tau_s = c(\omega) + \sigma \tan \varphi(\omega) - \tau_{fs}$ 。利用表 2 中的拟合公式,经过计算分析得出不同围压下吸附强度与含水率之间的关系,如图 7 所示,从图中可以看出吸附强度随着含水率的增大逐渐减小。对吸附强度与含水率之间的关系进行线性回归分析,可知吸附强度与含水率基本呈二次函数关系,得出拟合公式如表 3 所示。

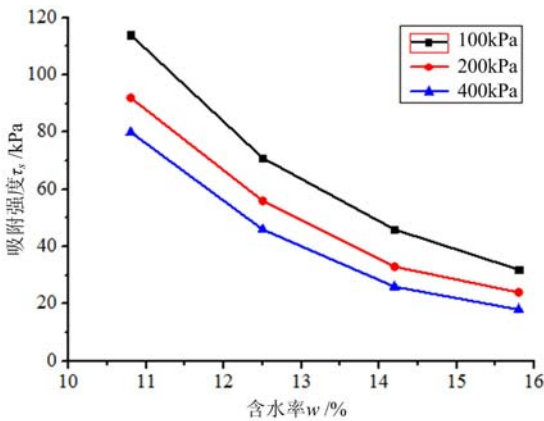


图 7 不同围压下吸附强度与含水率的关系曲线

Fig. 7 Relation curves between suction strength and water content under different confining pressures

表 3 含水率与吸附强度关系拟合公式

Tab. 3 The formula of the relationship between water content and suction strength		
围压 σ_c (kPa)	拟合公式	相关系数
100	$\tau_s = 2.457w^2 - 81.52w + 707.5$	0.9995
200	$\tau_s = 2.358w^2 - 76.3w + 641.2$	0.9999
400	$\tau_s = 2.062w^2 - 67.3w + 566.2$	0.9997

确定出的吸附强度的关系式可以推广应用到其他含水率的粉土,由于饱和粉土抗剪强度易于确定,非饱和粉土的抗剪强度可以通过含水率所确定的吸附强度与饱和粉土抗剪强度相加进行确定,可以为其他不同含水率的非饱和粉土抗剪强度的确定提供参考依据。另外,由于非饱和粉土的基质吸力与吸附强度密切相关,可通过确定非饱和粉土的吸附强度来确定出非饱和粉土的基质吸力。因此吸附强度的确定不仅可以进一步探究非饱和粉土的抗剪强度,还能够得出非饱和粉土含水率与基质吸力之间的关系曲线(即土-水特征曲线),那么非饱和粉土的含水率、非饱和粉土的抗剪强度及非饱和粉土的基质吸力三者之间的变化规律也就一目了然。因此通过此方法来确定非饱和粉土的吸附强度,对研究非饱和土的抗剪强度具有很大帮助和参考价值。

4 结论

非饱和粉土吸附强度的确定是个难点,许多非饱和土抗剪强度在计算吸附强度时都需要对强度理论的计算公式进行修正,且在这个过程中会存在许多问题。若将现有的饱和粉土抗剪强度计算公式运用到非饱和粉土抗剪强度计算中,可以进一步确定非饱和粉土的吸附强度,这一方法是简便可行的,并且对现实工程具有一定的指导意义。结合试验研究和理论分析可以得出以下结论:

- (1) 非饱和粉土的抗剪强度随着含水率增大逐渐减小;非饱和粉土的黏聚力和内摩擦角随着含水率的增大逐渐减小,其中黏聚力变化幅度较为明显。
- (2) 利用 MATLAB 对非饱和粉土抗剪强度指标与含水率之间的关系进行拟合,得到黏聚力与含水率近似呈二次曲线关系,内摩擦角与含水率近似呈线性关系,即 $C(\omega) = a\omega^2 + b\omega + c$, $\varphi(\omega) = d\omega + e$ 。

(3) 将饱和粉土抗剪强度计算公式运用到非饱和粉土抗剪强度计算中,利用非饱和粉土抗剪强度与饱和粉土抗剪强度之间的关系确定出非饱和粉土吸附强度的表达式为 $\tau_s = c(\omega) + \sigma \tan \varphi(\omega) - \tau_{fs}$, 经过分析计算得出吸附强度与含水率之间的关系曲线及拟合公式,吸附强度随着含水率的增大近似呈二次曲线递减。

(4) 通过确定出非饱和粉土的吸附强度能够进一步探究非饱和粉土的含水率、基质吸力以及抗剪强度之间的关系,因此研究非饱和粉土的吸附强度与和含水率之间的关系具有很大的实用价值。

参考文献:

- [1] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 129—136 (BAO Chenggang, ZHAN Liangtong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 129—136 (in Chinese))
- [2] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732—736 (WU Junjie, WANG Chenghua, LI Guangxin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 732—736 (in Chinese))
- [3] 樊申. 非饱和土强度参数的三轴试验研究与基坑开挖的数值模拟[D]. 河北工业大学, 2006 (FAN Shen. Experiment study of shear strength parameter of unsaturated soil by triaxial test and numerical simulation of excavation[D]. Hebei University of Technology, 2006(in Chinese))
- [4] Bishop A W, Alpan I, Blight G E, et al. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils [C]//ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder: University of Colorado, 1960: 503—532.
- [5] Fredlund D G, Rahardjo H. 陈仲颐等译. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997 (Fredlund D G, Rahardjo H. CHEN Zhongxi trans. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997 (in Chinese))
- [6] YANG D Q, SHEN Z J. Generalized nonlinear constitutive theory of unsaturated soils[C]. Proc. 7th. Int. Conf. on Expnsive Soils, Dallas. 1992: 158—162.
- [7] 汤连生, 王思敏. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000(1): 83—88 (TANG Liangsheng, WANG Simin. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000(1): 83—88 (in Chinese))
- [8] 陈正汉, 孙树国, 方祥伟, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 147—169 (CHEN Zhenghan, SUN Shuguo, FANG Xiangwei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 147—169 (in Chinese))
- [9] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 161—166 (CHEN Zhenghan, HU Shengxia, SUN Shuguo, et al. Development & application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 161—166 (in Chinese))
- [10] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 原状非饱和黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 660—672 (HU Shengxia, ZHOU Yundong, CHEN Zhenghan. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 660—672 (in Chinese))
- [11] 贾其军, 赵成刚, 韩子东. 低饱和度非饱和土的抗剪强度理论及其应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 580—585 (JIA Qijun, ZHAO Chenggang, HAN Zidong. Study on shear strength of the unsaturated soils in pendular state and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 580—585 (in Chinese))
- [12] 杨少丽. 改进的室内粉土制样技术[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 379—380 (YANG Shaoli. Improved preparing technique of silt sample[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 379—380 (in Chinese))
- [13] GB/T 50123—1999. 土工试验方法标准[S]. 中国计划出版社, 1999 (GB/T 50123—1999. Standard for soil test method [S]. China Planning Press, 1999 (in Chinese))

- [14] 李孝平, 王世梅, 李晓云, 等. GDS 三轴仪的非饱和土试验操作方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(5):37—40 (LI Xiaoping, WANG Shimei, LI Xiaoyun, et al. Method of unsaturated soil with GDS triaxial apparatus[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2008, 30(5):37—40 (in Chinese))
- [15] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2015 (XIE Dingyi. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015 (in Chinese))

Experimental study on determining the adsorption strength of unsaturated silt soil

SONG Da, YUE Jian-wei, YANG Guang-hui, YUAN Jiang-bo

(Institute of Geotechnical and Rail Transport Engineering of Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The adsorption strength of unsaturated silt soil is a difficult point in the study of soil mechanics. Aiming at the problems such as factors affecting adsorption strength of unsaturated silt soil are complex and difficult to determine, based on the formula of saturated silt soil shear strength, taking the shear strength of unsaturated silt soil as a transition, the determination method of its adsorption strength was studied. In this paper, the consolidated undrained three axis shear experiment of unsaturated silt soil with different water contents was carried out, the linear regression analysis of obtained experimental results was carried out by using MATLAB, the relationship between adsorption strength and water content of unsaturated silt soil was explored. A formula for calculating the adsorption strength of unsaturated silt soil is proposed. Results indicate that the relation between adsorption strength and water content of unsaturated silt soil presents a linear decreasing trend. Above mentioned formula may be used as a reference for theoretical analysis and engineering application of unsaturated silt soil.

Keywords: unsaturated silt soil; shear strength; adsorption strength