

考虑密度和含水率影响的 非饱和黄土吸力强度的试验研究

李彦龙, 苏立君, 王铁行, 王娟娟

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:吸力对土体抗剪强度的贡献部分称为吸力强度,是非饱和土体抗剪强度的核心变量.土在饱和及非饱和状态下,其有效抗剪强度指标是相同的,基于这一研究结论,可通过常规三轴试验来研究非饱和土的吸力强度.三轴试验结果表明,吸力强度与含水率为准线性关系,二者为负相关;吸力强度与干密度为准线性关系,二者为正相关.在含水率、干密度和吸力强度空间中,吸力强度的分布为一平面.建立了综合考虑含水率和干密度的吸力强度表达式和非饱和黄土抗剪强度表达式,可供工程实践参考.

关键词:非饱和黄土;吸力强度;含水率;干密度;三轴试验

中图分类号:TU 441

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)05-0663-05

工程实践上遇到的土通常都不是两相体,绝大部分是非饱和土.在非饱和土中,吸力对强度的贡献部分称为吸力强度^[1],记为 τ_s .吸力强度是非饱和土抗剪强度的核心变量,其与含水率和干密度之间的关系尤为密切.综合考虑干密度和含水率对非饱和黄土吸力强度影响的相关研究尚少.就工程而言,控制吸力的非饱和土三轴试验非常耗时,本文拟通过常规三轴试验来探讨非饱和黄土吸力强度与含水率和干密度之间的关系,并建立相应的吸力强度表达式.

1 非饱和土理论

自土力学在20世纪30年代成为一门独立学科后,近80年的研究和发展使非饱和土力学的理论和测试技术取得了重大的进展.其中,国内外具有代表性的抗剪强度公式有(下述公式中: c' 为有效粘聚力, φ' 为有效内摩擦角, σ 为总应力, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, $u_a - u_w$ 为基质吸力):

Fredlund^[2](1978)提出了双应力状态变量抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (1)$$

其中, φ_b 表示抗剪强度随基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 而增加的速率.

沈珠江^[3](1995)提出了双曲线非饱和土抗剪强度模型:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \frac{(u_a - u_w)}{1 + d(u_a - u_w)} \tan \varphi' \quad (2)$$

其中, d 为试验参数.

党进谦^[4](1997)以陕西关中地区的Q₃黄土为研究对象,提出了如下的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c_w + \sigma \tan \varphi + b S^d \quad (3-a)$$

其中, $c_w = c'$ 是饱和黄土的有效粘聚力, $\varphi = \varphi'$ 是饱和黄土的内摩擦角, b, d 为试验参数随土样的不同而不同, S 为基质吸力.为了便于与非饱和土的抗剪强度公式比较,3-a式可以改写为如下形式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + b (u_a - u_w)^d \quad (3-b)$$

缪林昌^[1](1999)建立了非饱和土抗剪强度的双曲模型:

收稿日期:2013-03-27 修改稿日期:2013-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278397;51078309)

作者简介:李彦龙(1985-),男,河南南阳人,博士生,主要研究方向为非饱和土力学.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \frac{u_s}{a + (a - 1)/p_{at}} u_s \quad (4)$$

其中, u_s 为基质吸力; a 为试验参数, p_{at} 为标准大气压。

张常光^[5](2010)基于统一强度理论和非饱和土双应力状态变量抗剪强度,合理考虑中主应力效应,建立非饱和土双应力状态变量抗剪强度统一解:

$$\tau_f = c'_t + (\sigma - u_a) \tan \varphi'_t + (u_a - u_w) \tan \varphi'_b \quad (5)$$

其中, c'_t 为统一有效黏聚力; φ'_t 为统一有效内摩擦角; $\tan \varphi'_b$ 为与基质吸力有关的统一角。

可以把上述非饱和土抗剪强度公式如下形式:

$$\tau_f = C_{total} + \sigma \tan \varphi = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \tau_s \quad (6)$$

其中, C_{total} 为总黏聚力; τ_s 为吸力强度。不难看出,上述典型的非饱和土抗剪强度公式均由 3 个部分组成:其一,有效黏聚力 c' ;其二,净法相应力引起的抗剪强度 $(\sigma - u_a) \tan \varphi'$;其三,吸力所引起的吸力强度 τ_s 。非饱和土抗剪强度公式的实质性区别仅在于确定第三项吸力强度时,所采用的参数和试验方法的不同。这些吸力强度表达式基本上都是基于特定土体而言的,对于黄土是否适用有待检验。有些吸力强度表达式的参数并没有明确的物理意义,同时也存在拟合精度问题。

2 研究方法

2.1 土样物理性指标

试验所用土样取自西安市南郊某基坑工程地表下 3.0 m 深度处,按颗粒组成分类和按塑性图分类均属于粉质粘土。该黄土属于典型的 Q_3 黄土,土样呈黄褐色,具有针状孔隙,含铁锰质斑点,其物理参数见表 1。

表 1 土样的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of the soil

2.2 试样制备

将试验所需的扰动土样风干碾碎后过 2 mm 筛,加水配制到试验所需要含水率。制样前,分别取两点计算土样的实际含水率,试样的实际含水率与试验所要求的含水率之差不得大于 $\pm 1\%$ 。制备重塑土样所用的对开三轴圆模高度为 80 mm,直径为 39.1 mm,体积为 96 cm³。把称取好的土样分 5 层,通过击样法制样,制样完毕后土样的实测干密度与试验所要求的干密度之差不得大于 ± 0.01 g/cm³。

2.3 试验方案

采用全自动 KTG 三轴仪对土样进行排水剪,应变速率控制为 0.032 mm/min,试验内容如下:

1. 饱和重塑黄土:干密度分别控制为 1.3 g/cm³、1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6 g/cm³,围压分别控制为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa,采用抽气饱和法对试样进行饱和。

2. 非饱和黄土:含水率分别控制为 12%、16%、20%、24%,干密度分别控制为 1.3 g/cm³、1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6 g/cm³,平行制样,围压分别控制为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa。

3 试验结果

3.1 抗剪强度参数

由饱和重塑黄土的三轴 CD 试验结果得到其有效抗剪强度指标 c' , φ' , 见表 2。从表中可以看到饱和和重塑黄土的有效黏聚力 c' 随着干密度的增大而增大,有效内摩擦角也有随着干密度的增加而增加的趋势,但是增幅不大。

按 Mohr-Coulomb 总应力抗剪强度公式对非饱和重塑黄土的三轴试验结果进行整理,得到其总粘聚力 C_{total} 和有效内摩擦角 φ' , 见表 3。从表中可以看出,当干密度不变的时候,总黏聚力随着含水率的增加而减小;当含水率不变的时候,总黏聚力随着干密度的增加而增加。其内摩擦角的变化并不明显,且与饱和重塑黄土的有效内摩擦角基本相等。

表 2 饱和黄土有效抗剪强度指标

Tab. 2 Effective shear strength indexes of saturated loess

$\rho_d / g \cdot cm^{-3}$	1.3	1.4	1.5	1.6
c' / kPa	7.9	10.3	12.8	16.7
$\varphi' / ^\circ$	15.6	15.9	16.3	16.8

表 3 不同含水率和干密度状态下的抗剪强度参数
Tab.3 Parameters of shear strength with in different moisture content and dry density states

$\omega / \%$	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$							
	1.3		1.4		1.5		1.6	
	$C_{\text{total}}/\text{kPa}$	$\varphi' / ^\circ$	$C_{\text{total}}/\text{kPa}$	$\varphi' / ^\circ$	$C_{\text{total}}/\text{kPa}$	$\varphi' / ^\circ$	$C_{\text{total}}/\text{kPa}$	$\varphi' / ^\circ$
12	62.9	14.7	72.8	15.3	86.7	15.2	100.5	15.7
16	50.7	15.4	63.5	14.8	74.5	14.9	86.3	15.4
20	40.8	15.2	49.4	15.3	60.1	15.2	73.3	15.2
24	30.3	14.9	39.2	15	49.1	15	60.2	15.4

3.2 吸力强度与含水率和干密度

试验证明^[6-8],对于同一种土而言,饱和以及非饱和状态下,其有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' 均相同.上述三轴试验结果也证实了饱和、非饱和状态下黄土的有效内摩擦角 c' 基本相等.因此,非饱和土的吸力强度可以通过下式计算:

$$\tau_s = C_{\text{total}} - c' \tag{6}$$

其中, C_{total} 为非饱和黄土的总黏聚力, c' 为饱和黄土的有效粘聚力.计算结果见表 4,从表 4 中可以看到,当干密度固定不变时,吸力强度随着含水率的增加而减小;当含水率固定不变时,吸力强度随着干密度的增加而增加.

表 4 不同含水率和干密度下的吸力强度参数
Tab.4 Suction strength parameters under different water content and dry density

$\omega / \%$	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$			
	1.3	1.4	1.5	1.6
	τ_s/kPa	τ_s/kPa	τ_s/kPa	τ_s/kPa
12	55.0	62.5	73.9	83.8
16	42.8	53.2	61.7	69.6
20	32.9	39.1	47.3	56.6
24	22.4	28.9	36.3	43.5

4 试验结果分析

4.1 吸力强度与含水率之间的关系

图 1 为吸力强度与含水率之间的关系曲线.从图中可以看到,吸力强度与含水率之间为准线性关系,二者为负相关,其函数关系见表 5.

表 5 吸力强度与含水率的拟合方程

$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	函数关系	R
1.3	$\tau_s = -2.69\omega + 86.74$	0.999 02
1.4	$\tau_s = -2.87\omega + 97.63$	0.996 99
1.5	$\tau_s = -3.18\omega + 112.04$	0.998 81
1.6	$\tau_s = -3.35\omega + 123.63$	0.999 78

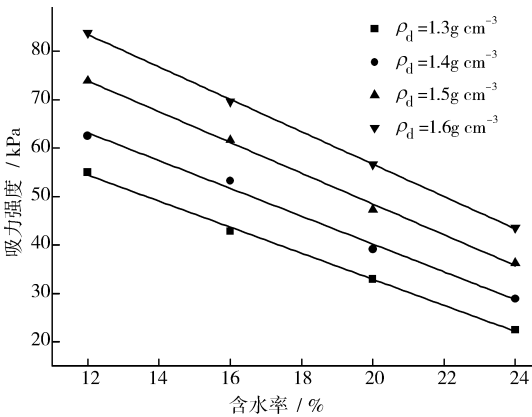


图 1 不同干密度下吸力强度与含水率的关系
Fig.1 Relation of suction strength and water content in different dry density

把表 5 中的 4 个线性方程统一记为:

$$\tau_s = k\omega + b \tag{7}$$

其中, k 为斜率, b 为截距.

再以干密度 ρ_d 为自变量, k 、 b 分别为因变量, 所拟合的函数关系如下:

$$k = -2.3\rho_d + 0.27 \tag{8}$$

$$b = 125.1\rho_d - 76.4 \tag{9}$$

因此,吸力强度 τ_s 可表达为如下的函数:

$$\tau_s = -2.3\rho_d \cdot \omega + 0.27\omega + 125.1\rho_d - 76.4 \tag{10}$$

4.2 吸力强度与干密度之间的关系

图 2 为吸力强度与干密度之间的关系,从图中可以看出,吸力强度与干密度为准线性关系,二者为正相关.

4.3 吸力强度与含水率和干密度之间的关系

式(10)给出了考虑密度和含水率的非饱和黄土吸力强度表达式,同时,也可以建立非饱和黄土的抗剪强度表达式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_d) \tan \varphi' - 2.3\rho_d \cdot \omega + 0.27\omega + 125.1\rho_d - 76.4 \quad (11)$$

利用式 10 计算黄土的吸力强度,其计算值与实测值见表 6,其计算值与实测值比较一致。

表 6 吸力强度的计算值与实测值

Tab. 6 Calculated value and measured values of suction strength

ω /%	$\rho_d / g \cdot cm^{-3}$							
	1.3		1.4		1.5		1.6	
	τ_s/kPa		τ_s/kPa		τ_s/kPa		τ_s/kPa	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
12	55.0	54.1	62.5	63.8	73.9	73.6	83.8	83.4
16	42.8	43.3	53.2	52.2	61.7	61.1	69.6	69.9
20	32.9	32.6	39.1	40.6	47.3	48.5	56.6	56.5
24	22.4	21.9	28.9	28.9	36.3	36.0	43.5	43.0

把吸力强度、含水率和干密度的相关试验数据绘制在三维空间中,见图 3。从图中可以看到在含水率、干密度和吸力强度空间中,吸力强度 $\tau_s = f(\rho_d, \omega)$ 近似为一平面。

5 结 论

本文在饱和、非饱和重塑黄土三轴试验结果的基础上,讨论了吸力强度与含水率和干密度之间的关系,主要结论如下:

(1) 吸力强度与含水率之间的关系为准线性关系,二者为负相关;吸力强度与干密度之间的关系为准线性关系,二者为正相关。

(2) 建立了综合考虑干密度和含水率影响的吸力强度表达式以及非饱和重塑黄土的抗剪强度表达式。

(3) 吸力强度在含水率、干密度和吸力强度空间中近似为一平面。

需要说明的是,用普通三轴仪进行非饱和土的剪切试验无法测量剪切过程中的吸力变化,因此不可避免地存在着一定的误差。但就工程应用而言,文中所建立的吸力强度表达式和抗剪强度表达式是可以满足精度要求的。

参考文献 References

- [1] 缪林昌,殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6.
MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze. Shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1-6.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [3] SHEN Z J. Reduced suction and simplified consolidation theory for expansive soils[C]// Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils, Paris: 1995(3): 1321-1328.
- [4] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 56-61.
DANG Jin-qian, LI Jing. Strength characteristics of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 56-61.

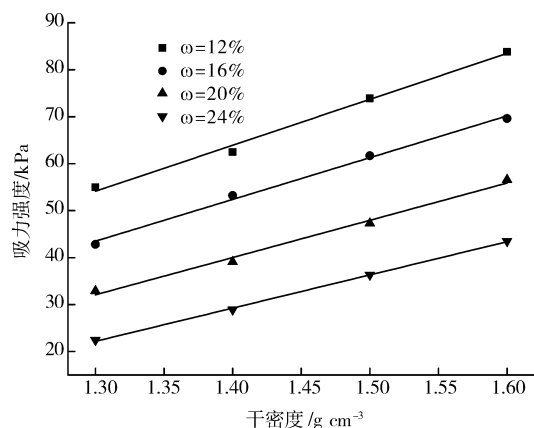


图 2 不同含水率下吸力强度干密度的关系

Fig. 2 Relation of suction strength and dry density with different water content

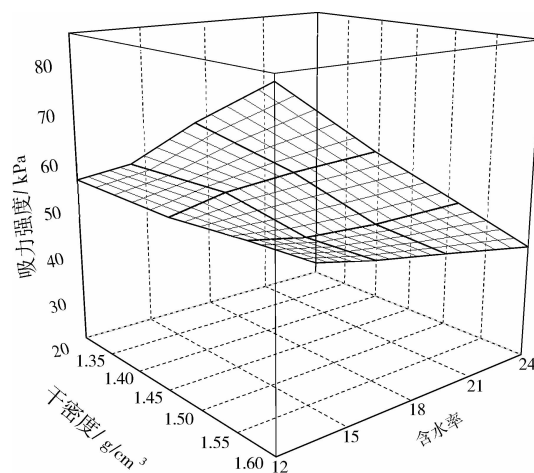


图 3 吸力强度在含水率和干密度空间中的变化

Fig. 3 Variation of suction strength in the space of moisture content and dry density

- [5] 张常光,张庆贺,赵均海. 非饱和土抗剪强度及土压力统一解[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1871-1876.
ZHANG Chang-guang, ZHANG Qing-he, ZHAO Jun-hai. Unified solutions of shear strength and earth pressure for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1871-1876.
- [6] DRUMRINGHT E E, NELSON J D. The shear strength of unsaturated tailings sand[C]// Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils Paris: 1995(1): 45-50.
- [7] ROHM S A, VILAR O M. Shear strength of an unsaturated sandy soil[C]// Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils. Paris: 1995(1): 189-193.
- [8] 冯志焱,邱本胜,谢定义. 黄土的三轴试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(6): 803-808.
FENG Zhi-yan, QIU Ben-sheng, XIE Ding-yi. Experimental study of triaxial test of loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(6): 803-808.

Relation of suction strength with water content and dry density of unsaturated loess

LI Yan-long, SU Li-jun, WANG Tie-hang, WANG Juan-juan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Suction strength is defined as the contribution of suction to shear strength, which is also the core variable of unsaturated soil. The effective shear strength index of soil remains unchanged in both circumstances of saturated and unsaturated loess. Based on this conclusion, suction strength of unsaturated soil can be studied by conventional triaxial test. Triaxial test results show that the relation of suction strength and moisture content is of the linear type in, negative correlation. The relation of suction strength and dry density is linear that is positively correlated. A function about suction strength is established which includes dry density and moisture content. Distribution of suction strength acts like a plane in water content, dry density and suction strength space. Formulas about shear strength and suction strength of unsaturated loess including the impact of water content and dry density are also established, to serve as reference for engineering.

Key words: unsaturated loess; suction strength; water content; dry density; triaxial test

Biography: LI Yan-long, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-15809298289, E-mail: liyanlong1229@163.com

(上接第 651 页)

Application of DEA method in the selection of building materials applicable for rural infrastructure

LI Hui-ming^{1,2}, LU Qiu-ping¹, XUE Jian-hua¹, MA Xin³, SUN Wan-qi⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Architectural Engineering College of Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. Baoji petroleum steel pipe co., LTD, Baoji 721008, China)

Abstract: Through comprehensive analysis of performance evaluation index of rural infrastructure construction materials, this paper puts forward a comprehensive evaluation system, the DEA model, in evaluating the economy input, technology output and environmental protection set output of rural infrastructure construction material, so as to choose the best rural infrastructure construction materials, and improve the overall quality of rural infrastructure. In addition, the model is used for the evaluation of four kinds of typical rural infrastructure construction material. The conclusion proves that the data envelopment analysis(DEA) method is feasible in the research of the rural infrastructure construction material optimization.

Key words: rural infrastructure; construction material; data envelopment analysis (DEA); DEA validity

Biography: LI Hui-min, Professor, Xi'an 710055, P. R. China., Tel: 0086-013909180668, E-mail: Li_Huimin2005@126.com