

饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比

孙树林^{1,2}, 王利丰²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学地质及岩土工程系, 江苏 南京 210098)

摘要:通过对饱和-非饱和淤泥土的抗剪强度和土-水特征曲线 SWCC 测试, 以及利用 SWCC 对非饱和淤泥土的抗剪强度预测, 结果显示了饱和土的抗剪强度 τ_{sat} 小于非饱和土的抗剪强度 τ_{unsat} , 预测与实测的非饱和抗剪强度基本一致, 并且非饱和抗剪强度随基质吸力 ψ 增加而增大, 也反映了野外现场的物理条件和应力状态对细颗粒土的性质有重要影响。

关键词: 非饱和淤泥土; 抗剪强度; 基质吸力; 土-水曲线

中图分类号: TU411.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)11-1932-04

作者简介: 孙树林(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 2004年8月~2005年8月为美国威斯康星大学(University of Wisconsin-Madison) 土木与环境工程系访问学者, 现从事岩土力学理论及其工程应用的研究。

Comparison of shear strength between saturated and unsaturated sandy silt

SUN Shu-lin^{1,2}, WANG Li-feng²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Dept. of Geological and Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Comparisons of shear strength between the saturated and unsaturated sandy silt were shown based on the measured shear strength using a modified direct shear device, and shear strength was predicted using the saturated soil properties and soil-water characteristic curve (SWCC) for the sandy silt. It was illustrated that the saturated shear strength was less than the unsaturated shear strength, and the unsaturated shear strength increased with increasing matric suction. It was shown by this study that properties of the saturated-unsaturated fine-grained soils were affected by physical conditions and the stress condition in the field.

Key words: unsaturated sandy silt; shear strength; matric suction; SWCC

0 引言

密实的细颗粒土通常被用在工程的土结构中, 例如作为土盖层和垫层的环境岩土结构正是用的这类土。这就需要有一个能预测在饱和-非饱和条件下土结构行为的模型, 抗剪强度是在进行结构设计时所关注的最重要工程性质的参数。对绝大部分的工程应用来说, 抗剪强度的试验测定既费时, 又浪费开支, 通过近似估算这些参数就可以满足要求。

众所周知, 水含量(饱和度)与吸力有关的水土特征曲线、结合饱和土强度参数, 可以有效地预测土的非饱和抗剪强度^[1-2], 土的孔隙比、土结构、初始水含量和应力状态等因素影响了饱和与非饱和细颗粒土的强度参数。Fredlund 和 Vanapalla 等^[3-4]研究表明, 同一细颗粒土在不同含水率条件下显示了不同的土强度参数。

本文首先通过试验测定饱和、非饱和状态下土的抗剪强度和水-土特征曲线 SWCC; 然后通过经验公

式, 利用 SWCC 以及饱和状态下的抗剪强度参数进行预测非饱和土的抗剪强度; 最后对测试和预测的饱和-非饱和抗剪强度进行比较。

1 土样的特性与试验

土样成份主要有 24.1%砂、65.8%淤泥、10.1%粘土, 液限 w_L 为 30%, 塑限 w_P 为 23%, 比重 G_s 为 2.73。最大干重度 γ_{dm} 为 14.8 kN/m³, 最佳含水率 w_{opt} 为 15.0%, 燃烧后损失重量的百分比 LOI 为 1.45%, 按 GBJ 145-90 确定土样为低液限有机质粉土 MLO, 如表 1 所示。

根据 ASTM D6836-02 制作土样后, 用自排水压力板装置^[5] (Leak-Free Pressure Plate Extractor) 测得土-水特征曲线(图 1)。

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005408911)

收稿日期: 2005-08-15

表 1 土样的特性

Table 1 Index properties for a soil sample

$\gamma_{dm}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	w_{opt}	w_L	w_P	G_s	砾石/%	砂/%	淤泥/%	粘土/%	LOI/%	分类	
										GBJ 145-90	USCS
14.8	15.0	30	23	2.73	0.0	24.1	65.8	10.1	1.45	MLO	ML

注: GBJ 145-90 为《土的分类标准》; USCS 为美国土分类统一系统 (Unified Soil Classification System), ASTM D-2487。

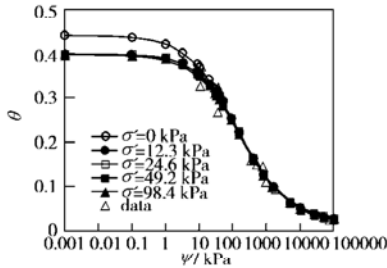


图 1 有机质粉土的土 - 水特征曲线 SWCC

Fig. 1 Soil-water characteristic curves of soil

饱和 - 非饱和土的抗剪强度测定通过使用改进了的直剪装置进行。该装置主要由非饱和直剪装置和测定吸力的悬挂柱 (Hanging Column) 组成。将土样制成饱和样品并放入非饱和和剪切盒内后, 首先通过悬挂柱施加试验所需的吸力, 其次按试验要求加载进行土的抗剪强度试验。

2 测试结果与分析

2.1 饱和状态的抗剪强度

将土制成饱和土放入改进了的直剪装置剪切盒内进行试验。剪切速率为 0.0096 mm/min, 采用 4 种不同的净正应力 12.3、24.6、49.2 和 98.4 kPa 分别剪切试验。表 2 为饱和土的抗剪强度参数表。图 2 显示饱和土的抗剪强度 τ_{sat} 与净正应力 σ' 关系曲线, 吸力为 0 时, 抗剪强度 τ_{sat} 与净正应力 σ' 呈线性关系, 抗剪强度 τ_{sat} 随着净正应力 σ' 的增加而增加。

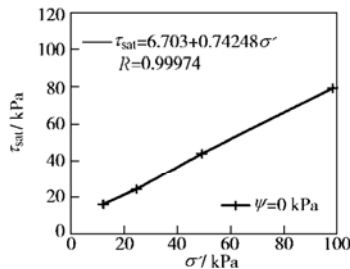


图 2 饱和土抗剪强度 τ_{sat} 与净正应力 σ' 试验曲线

Fig. 2 Variation of shear strength τ_{sat} with net normal stress σ' under same matric suctions ψ for saturated soil

2.2 土 - 水特性曲线(SWCC)

土 - 水曲线是表示土的吸力和饱和程度 S 、或者含水率 w 、或者体积含水量 θ 之间的关系。随着土样从饱和状态向干燥状态脱湿, 土中水和气所占比例发

生变化, 土体应力状态因此改变。图 1 所示在不同净正应力 σ' 下的土 - 水特征曲线 (SWCC)。可以看出: 随着吸力的增加, 土中体积含水量在不断减少, 土颗粒间接触的潮湿面积也不断减少; 在净正应力 σ' 等于 0 时饱和体积含水量 θ_s 高于净正应力 σ' 大于 0 时饱和体积含水量 θ_s , 残余体积含水量 θ_r 相同; 在不同的净正应力 $\sigma' > 0$ 下饱和体积含水量 θ_s 相等。

表 2 饱和土的抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters of saturated soil

试验编号	σ' / kPa	ψ / kPa	τ_f / kPa	τ_{sat} / kPa	c / kPa	$\tan \phi$	$\phi' / (^\circ)$
1	12.3	0	16.17	16.17	6.7		
2	24.6	0	24.14	24.14	6.7	0.74	36.60
3	49.2	0	43.89	43.89	6.7		
4	98.4	0	79.6	79.6	6.7		

用 Van Genuchten 方程^[6]拟合, 确定出土 - 水特征曲线 SWCC 的特征参数。残余体积含水量 θ_r 为 0.015, 净正应力 σ' 等于 0 时饱和体积含水量 θ_s 为 0.44, 净正应力 σ' 大于 0 时饱和体积含水量 θ_s 为 0.40。

3 非饱和淤泥土的抗剪强度

3.1 试验的非饱和土抗剪强度

采用同一个装置和相同的剪切速率 (0.0096 mm/min), 在 4 种不同的净正应力 (12.3、24.6、49.2 和 98.4 kPa) 下, 分别加 4 种不同的吸力 (11、22、28 和 35 kPa) 进行非饱和和抗剪强度的测试。表 3 为试验的非饱和土抗剪强度参数, 图 3 和 4 分别为不同的净正应力下非饱和土抗剪强度与吸力的关系曲线。

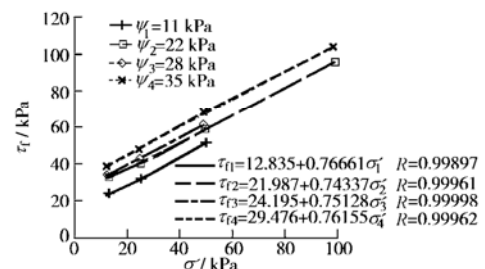


图 3 非饱和土抗剪强度 τ_f 与净正应力 σ' 试验曲线

Fig. 3 Variation of shear strength τ_f with net normal stress σ' under different matric suctions ψ for unsaturated soil

图 3 反映了在不同的基质吸力下非饱和土抗剪强度与净正应力呈线性关系, 随着吸力的增加非饱和土

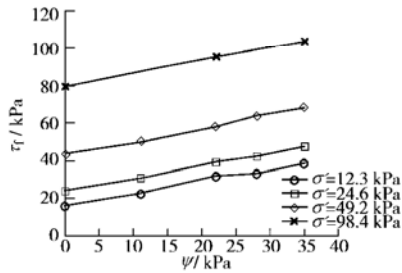


图4 有机质粉土抗剪强度 τ_f 测量值与吸力 ψ 的关系图

Fig. 4 Variation of measured shear strength τ_f with matric suction ψ under different net normal stresses σ' for saturated-unsaturated soil

抗剪强度逐渐增加。图4反映了在不同的净正应力下非饱和土抗剪强度与基质吸力的关系，在同一净正应力下随吸力的增加非饱和土抗剪强度呈非线性增加，非饱和土的内摩擦角 ϕ^b 小于饱和土的内摩擦角 ϕ' 。

表3 试验的非饱和土抗剪强度参数表

Table 3 Shear strength parameters of unsaturated soil from tests

试验编号	σ' / kPa	ψ / kPa	τ_f / kPa	$\tau_{\text{sat}} / \text{kPa}$	τ_{ψ} / kPa	c / kPa	$\tan \phi'$	$\phi' / (^\circ)$	$\tan \phi^b$	$\phi^b / (^\circ)$
1	12.3	11	22.76	16.17	6.58	6.70	0.77	37.59	0.60	30.89
	12.3	22	32.08	16.17	15.90	6.70	0.77	37.59	0.72	35.86
	12.3	28	33.50	16.17	17.33	6.70	0.77	37.59	0.62	31.75
	12.3	35	38.56	16.17	22.38	6.70	0.77	37.59	0.64	32.60
2	24.6	11	30.95	24.14	6.81	6.70	0.71	35.33	0.62	31.75
	24.6	22	39.52	24.14	15.38	6.70	0.71	35.33	0.70	34.96
	24.6	28	42.58	24.14	18.44	6.70	0.71	35.33	0.66	33.37
	24.6	35	47.75	24.14	23.60	6.70	0.71	35.33	0.67	34.00
3	49.2	11	50.8	43.89	6.91	6.70	0.76	37.09	0.63	32.14
	49.2	22	58.03	43.89	14.14	6.70	0.76	37.09	0.64	32.73
	49.2	28	64.19	43.89	20.30	6.70	0.76	37.09	0.73	35.94
	49.2	35	68.13	43.89	24.24	6.70	0.76	37.09	0.69	34.71
4	98.4	22	95.47	79.60	15.87	6.70	0.74	36.53	0.72	35.80
	98.4	35	103.97	79.60	24.37	6.70	0.74	36.53	0.70	34.85

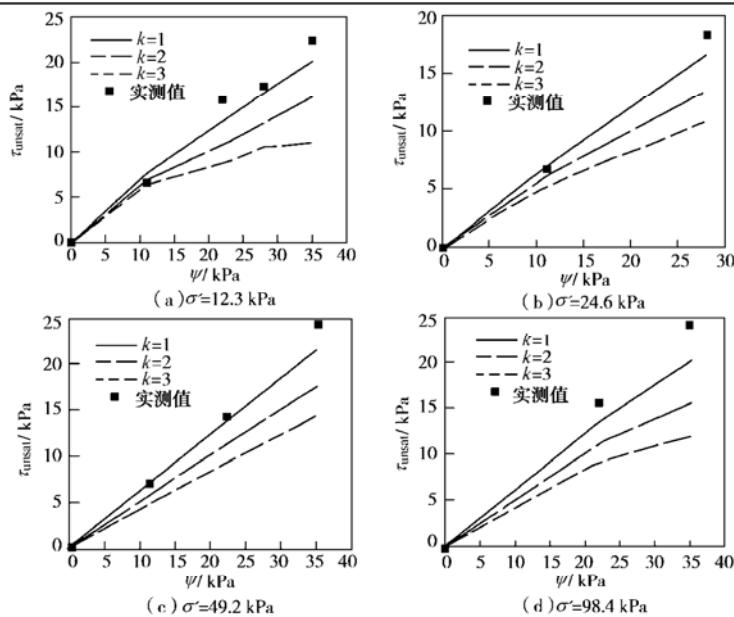


图5 不同应力作用下土中基质吸力 ψ 引起抗剪强度 τ_{ψ} 实测值与预测值对比

Fig. 5 Comparison between measured and predicted variation of shear strength τ_{ψ} due to matric suction ψ with different normal stresses

3.2 预测的非饱和土抗剪强度

Fredlund 等提出了通用的利用双应力状态变量表示非饱和土抗剪强度^[7-8]，即

$$\tau_f = c + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

式中 τ_f 为非饱和土的抗剪强度； c 为土的有效粘性指数； ϕ' 为土在非饱和状态下的摩擦角； ϕ^b 为与吸力有关的摩擦角； σ_n 为正应力； u_a 为孔隙气压力； u_w 为孔隙水压力； $(u_a - u_w)$ 为在破裂点上的基质吸力； $(\sigma_n - u_a)$ 为作用在破裂面上的净正应力。

Fredlund 等、Vanapalli 等提出了利用土 - 水特征曲线和饱和强度指标来预测估算非饱和土抗剪强度的非线性函数^[2, 6]，即

$$\tau_f = [c + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \{(\Theta)^k (\tan \phi^b)\}] \quad (2)$$

式中 $k = 1, 2, 3$ ； Θ 为标准水含量， $\Theta =$

$(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$; τ_ψ 为因基质吸力而产生的抗剪强度, $\tau_\psi = [(u_a - u_w)\{(\theta)^k (\tan \phi^b)\}]$ 。

首先根据饱和抗剪强度试验, 求出 $\tan \phi'$ (表 3); 再根据基质吸力 ψ 利用式 (1) 求出 $\tan \phi^b$ (表 3); 利用土-水特征曲线求出 $\theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$; 最后, 用式 (2) 中 $[(u_a - u_w)\{(\theta)^k (\tan \phi^b)\}]$ 预测出土中因基质吸力引起抗剪强度增加的量, 见图 5。

图 5 表示在 4 种不同的净正应力 (12.3、24.6、49.2 和 98.4 kPa) 下, 实测的和不同 k 值预测的土中因基质吸力 ψ 引起抗剪强度 τ_ψ 对比图。图 5 表明: 当 $k=1$ 时, 预测的土中因基质吸力 ψ 引起抗剪强度 τ_ψ 与实际测量的基本一致, 随着基质吸力 ψ 的增加而增大; 当 $k=2$ 和 3 时, 实测的与预测的结果相差较大。图 6 为 $k=1$ 时不同应力作用下土中基质吸力 ψ 引起抗剪强度 τ_ψ 实测值与预测值对比。

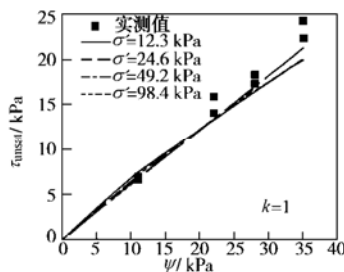


图 6 土中基质吸力 ψ 引起抗剪强度 τ_ψ 实测值与预测值对比

Fig. 6 Comparison between measured and predicted variation of shear strength τ_ψ due to matric suction

4 结 语

尽管测试过程中所用的土具有相同的矿物、塑性和结构, 但由于采用不同的含水率、不同的基质吸力, 土的抗剪强度表现出了不同的特征。土-水特征曲线 (SWCC) 与土的结构密切相关, 由于土的结构受土中含水率、密实程度和应力状态的制约, 所以土中含水率、密实程度和应力状态的改变对土-水特征曲线 (SWCC) 有重要影响, 也影响了非饱和土的抗剪强度。结论如下:

(1) 不同净正应力 σ' 下的 SWCC 中, 净正应力 σ' 等于 0 时饱和体积含水量 θ_s 高于净正应力 σ' 大于 0 时饱和体积含水量 θ_s , 残余体积含水量 θ_r 相同; 在不同的净正应力 $\sigma' > 0$ 下饱和体积含水量 θ_s 相等。

(2) 在不同的基质吸力下实测的非饱和土抗剪强度与净正应力呈线性关系, 并随着吸力的增加非饱和土抗剪强度也逐渐增加; 非饱和土的内摩擦角 ϕ^b 小于饱和土的内摩擦角 ϕ' 。

(3) 饱和土的抗剪强度 τ_{sat} 小于非饱和土的抗剪强度 τ_{unsat} ; 4 种不同的净正应力 (12.3、24.6、49.2 和 98.4 kPa) 下, 测量与预测的土中因基质吸力 ψ 增加的抗剪强度 τ_ψ 结果表明非饱和抗剪强度随基质吸力 ψ 增加而增大。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31:533 - 546.
- [2] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, BARBOUR S L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(3):440 - 448.
- [3] FREDLUND D G. The character of the shear strength envelope for unsaturated soils[C]// The Victor de Mello Volume, the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engg. Brazil:Rio de Janeiro, 1989:142 - 149.
- [4] VANAPALLA S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The relationship between the soil-water characteristic curve and the shear strength of a compacted glacial till [J]. Geotechnical Testing Journal, 1996,19(3):259 - 268.
- [5] WANG X, CRAIG H Benson. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve [J]. Geotechnical Testing Journal, 2004,27(2):1 - 10.
- [6] VAN Genuchten M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44:892 - 898.
- [7] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Can Geotech J, 1978,15(3):313 - 321.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John-Wiley & Sons Inc, 1993:517.