

厦门地区非饱和残积土抗剪强度的试验研究

陈东霞^{1,2*}, 倪 健², 张马秀², 林友强², 胡 易²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要:非饱和残积土是厦门地区诸多填方工程的工程用土,而岩土工程的强度与稳定性问题都涉及到非饱和土的抗剪强度及其指标.采用滤纸法测定非饱和残积土的基质吸力,通过一系列的直接剪切试验,测定不同初始含水量状态下土的抗剪强度及其强度指标.试验结果表明:基质吸力随着含水量、体积含水量或饱和度的增加而减小.当含水量小于 16%,体积含水量大于 35%或者饱和度大于 70%时,基质吸力对含水量的变化非常敏感.在低基质吸力区,抗剪强度随着基质吸力的增加显著增加,表观粘聚力随基质吸力的增大而线性增加;在高基质吸力区,强度随基质吸力的增加变化不大,表观粘聚力的增长速率减小.表观内摩擦角仅在基质吸力较小时增加而后可近似为某一值.

关键词:基质吸力;滤纸法;残积土;初始含水量;抗剪强度

中图分类号:TU 411.7

文献标志码:A

文章编号:0438-0479(2012)05-0877-05

福建沿海地区花岗岩残积土分布十分广泛,主要分布于厦门、福州、福清、莆田、泉州、罗源等地^[1].非饱和状态下的花岗岩残积土是厦门地区主要的工程用土之一,而大多数填方工程的强度问题、稳定性问题甚至变形问题都涉及到如何正确地评估土的抗剪强度.目前普遍采用饱和状态下残积土的抗剪强度指标作为设计参数进行强度或稳定性等问题的计算分析,这与实际情况有出入.若采用非饱和土的强度参数进行分析计算将使其结果更加合理.

根据非饱和土力学理论,非饱和土中存在的基质吸力对土的性质有着十分重要的影响.因此,研究非饱和土的基质吸力必要性显而易见.几十年来,许多国内外学者对基质吸力的测量和评估做了大量的工作,目前常用的有以下几种方法:改进三轴仪法、张力法、探针法、时域反射法、电导传感器法、热导传感器法、滤纸法^[2].滤纸法与其他吸力测量设备相比,具有简便、便宜等特点,近年来已被广泛认可使用.1980年 McQueen 在机场跑道工程以及 1984 年 Cheng 和 Frenlund 在膨胀土工程都使用滤纸法量测土中吸力^[3].滤纸法是建立在滤纸能够与具有一定吸力的土达到平衡的假设基础上对土的吸力进行测定.当滤纸与土样直接接触时,土与滤纸之间的水分或水蒸气交换可以达到平衡,滤纸的平衡含水量通过一定的公式计算即得

土的基质吸力^[3].本文拟采用滤纸法测定非饱和土的基质吸力.刘小文等^[4]通过对非饱和土的基质吸力的研究,提出基质吸力对含水量的变化敏感性很强,孟长江^[5]通过试验也认为非饱和土抗剪强度中的吸力与含水量关系密切.因此,为了解福建省沿海一带非饱和花岗岩残积土基质吸力随含水量变化的规律,对一系列具有不同初始含水量的非饱和土样通过滤纸法测定吸力,通过直接剪切试验测定土的抗剪强度以及其抗剪强度指标.

1 试验土样的基本物理性质

本次试验用土取自厦门某实验室旁开挖的基坑内地基土,土样呈棕褐色,基本物理性质:天然含水量在 13.88%~38.01%,土颗粒的相对密度 $G_s = 2.69$,天然容重 $\gamma = 19.1 \text{ kN/m}^3$,天然孔隙比 $e = 0.864$.通过液塑限联合测定,液限 $W_L = 38.66\%$,塑限 $W_p = 23.78\%$,塑性指数 $I_p = 14.9$.福建地区花岗岩残积土中的粘性土大致分 3 类:残积粘性土、砂质粘性土和砂砾质粘性土^[6].结合本次试验土样的外观特征以及以上土的物理性质指标,可以初步判断试验土样为砂质粘性土.

2 试样的制备及试验方法

2.1 试样制备

土样是通过计算理论需水量控制含水量,用喷雾

收稿日期:2012-03-20

基金项目:厦门大学 2011 年度大学生创新性实验计划项目

* 通信作者:dongxiachen@xmu.edu.cn

器将水喷洒在散装土样上拌至均匀,并分别装袋静置 1~2 d 直至土样含水量均匀分布.然后采用轻型击实试验的方法,采用 5 层击实,每层标准击数为 27 击.

试验设计的不同初始含水量为 9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、23%,实测的初始含水量为 9.01%、11.68%、13.89%、15.24%、17.28%、19.03%、21.36%、22.45%.具体的试样方案如表 1 所示.在试验中击实试验试样为击实筒土样;每个击实筒土可切取 3~4 块土饼;滤纸法测基质吸力时试样为滤纸,每 2 块土饼间夹 1 张滤纸试样.

2.2 滤纸法测定吸力

在土饼与土饼之间放置 3 层圆形滤纸,上下 2 层滤纸直径较中间滤纸直径大,即上下滤纸直径 70 mm,中间一层滤纸直径 60 mm,这主要是避免中间滤纸层表面吸附土颗粒.中间层滤纸用于测定平衡时滤纸含水量.将放置滤纸的土饼间隙用胶布密封,并将土饼放置一个保湿容器中,待中间层滤纸与土样之间的水分迁移达到平衡后(一般为 10 d 以上),用镊子取出中间层的滤纸迅速放置铝盒内并称量其质量,此过程为避免滤纸吸附水分和大气中水气交流,尽量在 30 s 内完成.根据试验采用滤纸(杭州新华造纸厂的“双圈”牌 No. 203 型滤纸,具体技术指标:直径为 70 mm;灰分为 0.000 035 g/张,质量分数为 0.01%;滤速为慢速)的率定方程^[7]计算土样的基质吸力:

$$\begin{cases} \lg S = 5.493 - 0.076W_f, & W_f \leq 47\%, \\ \lg S = 2.470 - 0.012W_f, & W_f > 47\%, \end{cases} \quad (1)$$

式中, S 为基质吸力; W_f 为滤纸吸附水分后的含水量.

2.3 直接剪切试验

在土饼中取一环刀土样,进行直接剪切(快剪)试验,剪切速率为 0.8 mm/min.抗剪强度指标的测定需一组平行测定.将不同初始含水量的土饼分别在 50, 100, 200, 300, 400 kPa 5 级压力下直接进行直接剪切试验,通过试验结果分析求解出不同初始含水量下非饱和残积土的剪切强度指标 c, φ 值.

通过滤纸法测不同初始含水率下土饼的基质吸

力,并将其进行直接剪切试验,试验结果如表 2 所示.

3 试验结果与分析

3.1 干密度与饱和度的关系

根据击实试验结果得到干密度与饱和度的数据,通过对实验所得 8 个点进行拟合,分别得到含水量、饱和度与干密度间的关系,如图 1(a)、(b)所示.

表 2 不同初始含水量下基质吸力及抗剪强度参数表
Tab. 2 Matric suction, apparent cohesion and internal friction under different water contents

初始含水量/ %	基质吸力/ kPa	表观粘聚力/ kPa	表观内 摩擦角/(°)
11.68	1047.30	118.10	31.4
13.89	576.60	99.19	29.3
15.24	51.20	54.48	26.1
17.28	33.42	33.20	25.1
19.03	17.85	14.00	23.0
21.36	7.57	4.20	27.7
22.45	5.44	1.41	17.3

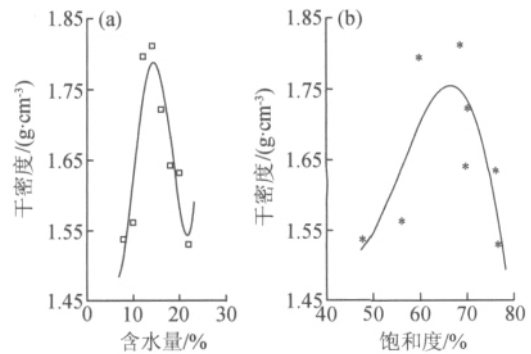


图 1 干密度与含水量、饱和度的关系曲线

Fig. 1 Curve of dry density versus moisture content and degree of saturation

表 1 试验方案
Tab. 1 Testing program

试样用途	试样个数							
	9.01%	11.68%	13.89%	15.24%	17.28%	19.03%	21.36%	22.45%
击实试验	2	2	2	2	2	2	2	2
直剪试验	无法切样	6~8	6~8	6~8	6~8	6~8	6~8	6~8
滤纸法	无法切样	4	4	4	4	4	4	4

由图 1 可知,土样的最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.80 \text{ g/cm}^3$, 最优含水量 $w_{op} = 14.2\%$. 干密度随饱和度变化的规律与干密度随含水量变化的规律相似,最大干密度 ρ_{dmax} 对应的饱和度称为最优饱和度 S_{rop} , 最优饱和度分布在 63% 左右. 可通过最大干密度 ρ_{dmax} 以及现场实测土的干密度 ρ_d , 计算出压实度 K 以评价施工现场的填土路基的压实情况^[8].

3.2 基质吸力与含水量、体积含水量以及饱和度的关系

本试验先通过测定不同含水量的土饼间滤纸含水量,然后再代入滤纸的率定方程,计算得到不同含水量下非饱和土的基质吸力.

从图 2(a)可以看出基质吸力与含水量的关系:总体上基质吸力是随着含水量的增加呈现降低的趋势. 当含水量小于 16% 时,基质吸力对含水量的变化非常敏感. 随着含水量的增加,基质吸力明显大幅度降低;而当含水量大于 16% 时,基质吸力对含水量的变化敏感性减弱,此时含水量增加,基质吸力缓慢降低.

从图 2(b)、(c)可以看出,随着饱和度增加或体积含水量的增加,基质吸力明显降低. 饱和度小于 70% 或者体积含水量小于 35% 时,基质吸力对饱和度或体积含水量的变化非常敏感;当饱和度大于 70% 或体积含水量大于 35% 时,基质吸力对饱和度的变化敏感性降低并趋于稳定.

3.3 抗剪强度与基质吸力的关系

由于各类天然非饱和土中,对土体抗剪强度产生影响的基质吸力范围通常为 0~500 kPa^[9], 因此在此次研究中,基质吸力的范围取为 0~600 kPa.

从图 3 可以看出,在恒定的竖向压力的作用下,基质吸力在 0~50 kPa 范围内,抗剪强度随着基质吸力的增加显著地增加;基质吸力在 50~600 kPa 范围内,抗

剪强度随基质吸力的增加变化不大. 这说明了试验所得的抗剪强度隐含了基质吸力的影响,基质吸力在一定范围内对非饱和残积土的抗剪强度具有增强的作用;但随着基质吸力的增加,其对抗剪强度的贡献变小. 即基质吸力对厦门非饱和残积土的抗剪强度的提高是有限的.

Fredlund 利用 2 个独立的应力状态参数建立了非饱和土的双变量强度公式^[10], 如下式所示:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad (2)$$

式中, c' 为饱和土的有效粘聚力; $(\sigma_n - u_a)$ 为净法向应力; ϕ' 为饱和土的有效内摩擦角; $(u_a - u_w)$ 为非饱和土中的基质吸力; ϕ^b 为抗剪强度随基质吸力变化的内摩擦角.

Fredlund 认为土的抗剪强度由饱和土的有效粘聚力,净法向应力引起的强度以及基质吸力引起的强度所组成. 其中, c' 、 ϕ' 并不随基质吸力的变化而变化,可采用常规抗剪强度测试方法确定. $\tan \phi^b$ 为抗剪强度随吸力 $(u_a - u_w)$ 增加的速率^[11]. 由图 3 基质吸力与抗剪强度的关系可知,在竖向压力一定的情况下,基质吸力在 0~50 kPa 范围内,随基质吸力的增加,土的抗剪强度线性增加,曲线的倾角是一常数. 文献[12-13] 等也证明土中基质吸力低于某特定值时 ϕ^b 是一定值. 随着基质吸力的增大,基质吸力对抗剪强度的影响减弱,如图 3 所示,曲线变平缓,曲线倾角急剧减小,说明 ϕ^b 是随基质吸力的变化而变化的. Gan 等^[13] 和安骏勇等^[14] 也都得出抗剪强度与基质吸力之间的关系是非线性的.

3.4 表观粘聚力、表观内摩擦角与基质吸力的关系

此次试验抗剪强度采用的是不固结快剪试验,因此试验获取的非饱和残积土的抗剪强度是总应力强

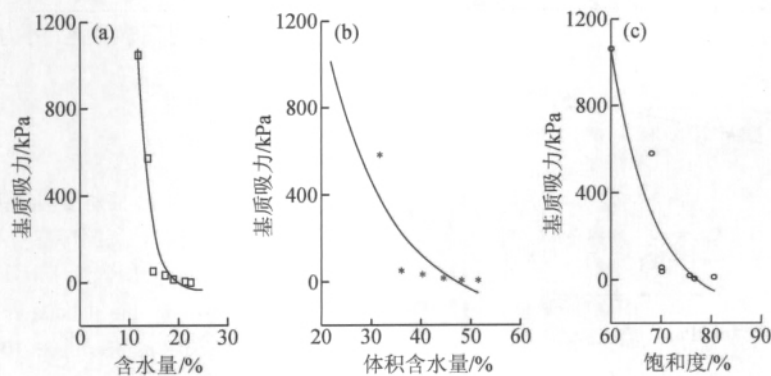


图 2 基质吸力与含水量、体积含水量及饱和度的关系曲线

Fig. 2 Curves of matric suction versus moisture content, volumetric moisture content and degree of saturation

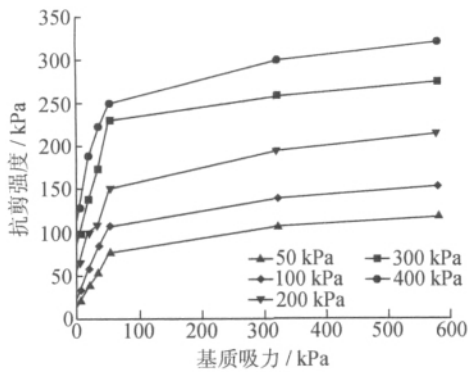


图 3 不同竖向压力下抗剪强度与基质吸力的关系曲线
Fig. 3 Matric suction versus shear strength corresponding to different normal stresses

度,抗剪强度参数为表观内聚力和表观内摩擦角,都隐含了基质吸力的影响^[15].

关于基质吸力对非饱和土抗剪强度参数 c 、 φ 的影响已有许多研究. 扈胜霞等^[12]认为在某个基质吸力范围内,原状黄土的基质吸力与表观粘聚力 c 呈线性增加,与表观内摩擦角 φ 之间呈近乎一条直线; 闫亚景等^[15]也得出基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的影响主要体现在对表观粘聚力的影响; 黄志全等^[16]的研究结果显示基质吸力对非饱和粉质粘土的表观内摩擦角的影响极小,而对表观粘聚力影响较大. 然而已有的研究结果并不完全一致,如林鸿州等^[17]对非饱和的粉细砂,砂质粉土和粉质粘土的研究结果为:基质吸力对表观粘聚力和表观内摩擦角均有较大的影响.

本次试验的研究结果如图 4 所示. 它们是基质吸力与抗剪强度关系的另一种体现. 基质吸力在 0~50 kPa 内,表观粘聚力随基质吸力增大而大幅度线性增大,而表观内摩擦角随基质吸力增大而小幅度增大; 基质吸力在 50~600 kPa,表观粘聚力随着基质吸力增加而增加,但增长速率有所下降; 而表观内摩擦角随基质吸力增加几乎保持不变,近似为某一定值(图 4). 试

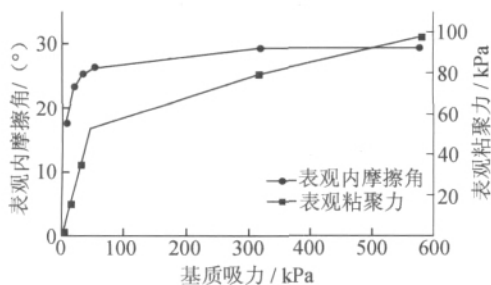


图 4 表观内摩擦角、表观粘聚力与基质吸力关系曲线
Fig. 4 Apparent internal friction and apparent cohesion versus matric suction

验结果表明基质吸力对抗剪强度的影响主要体现在表观粘聚力上,也即对于该类土表观粘聚力对基质吸力的敏感性更强,这与许多研究所得结论类似^[12,15-16,18],而表观内摩擦角受基质吸力的变化影响较小,仅在低基质吸力区时表现出一定的影响.

4 结 论

本文采用滤纸法测定了厦门地区不同初始含水量下非饱和残积土土中的基质吸力,并对一系列不同初始含水量的试样进行不固结不排水条件下的直接剪切试验,重点分析了重力含水量、体积含水量、饱和度、抗剪强度以及抗剪强度指标与基质吸力之间的关系,得到如下结论:

- 1) 当厦门地区这类残积土的饱和度在 63%~67%之间,含水量在 13%~16%范围内土样可获得较大的干密度. 此饱和度和含水量的数据区间可供填方工程参考.
- 2) 基质吸力随着含水量、体积含水量、饱和度的增加均呈现降低的趋势. 当含水量 $\leq 16\%$ 时,体积含水量 $> 35\%$ 或者饱和度 $> 70\%$ 时,基质吸力对含水量的变化非常敏感. 相反,在此区间外,基质吸力对含水量、体积含水量或饱和度的变化敏感性减弱. 此时含水量、体积含水量或饱和度的增加,基质吸力缓慢降低.
- 3) 在恒定的竖向压力作用下,基质吸力在 0~50 kPa 范围内,抗剪强度随着基质吸力的增加显著增加; 基质吸力在 50~600 kPa 范围内,抗剪强度随基质吸力的增加变化不大.
- 4) 基质吸力在 0~50 kPa 范围内,表观粘聚力随基质吸力的增大而线性增加,而在 50~600 kPa 范围内,表观粘聚力的增长速率有所下降; 而表观内摩擦角仅在基质吸力较小时随着基质吸力增加而增加,而后几乎可近似为某一定值. 这表明基质吸力对抗剪强度的影响主要体现在表观粘聚力上,而表观内摩擦角受其影响较小.

参考文献:

[1] 王戟丰,王翔宇. 福建厦门地区花岗岩残积土物理力学参数统计分析[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(6): 633-637.
 [2] Pan H, Qing Y, Li P Y. Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 15 (3): 1-14.
 [3] Marinho F A M, Oliveira O M. The filter paper method revisited[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(3): 250-258.

- [4] 刘小文,常立君.非饱和红土基质吸力与含水量及密度关系试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3302-3306.
- [5] 孟长江.考虑吸力的非饱和黏性土地基承载力分析[J].路基工程,2009(5):141-142.
- [6] 杨茂长.福建沿海地区花岗岩残积土工程特性探讨[J].资源环境与工程,2010,24(1):41-43.
- [7] 王钊,杨金鑫,况娟娟,等.滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J].岩土工程学报,2003,25(4):405-408.
- [8] 冯忠居,谢永利.标准击实实验最佳含水量和最大干密度的理论计算[J].长安大学学报:自然科学版,2002(2):10-13.
- [9] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.
- [10] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R S. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [11] 赵慧丽,马易鲁,牛红凯.非饱和土抗剪强度研究方法的探讨[J].岩土工程技术,2001(3):142-145.
- [12] 扈胜霞,周云东,陈正汉.非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J].岩土力学,2005,26(4):660-663,672.
- [13] Gan J M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 500-510.
- [14] 安骏勇,蒋刚,王钊.基于平面应变试验的非饱和膨胀土强度分析[J].岩土力学,2007,28(12):2649-2651,2656.
- [15] 闫亚景,文宝萍,计博勋.基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的贡献[J].工程地质学报,2011,19(6):865-874.
- [16] 黄志全,陈贤挺,刘丰收,等.基质吸力对小浪底水库滑坡非饱和土强度影响试验研究[J].中国水运,2007,7(7):123-125.
- [17] 林鸿州,李广信,于玉贞,等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J].岩土力学,2007,28(9):1931-1936.
- [18] Rafael B, Frydman S. Unsaturated soil mechanics; critical review of physical foundations[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 26-39.

Experimental Study on the Shear Strength of Unsaturated Residual Soils in Xiamen

CHEN Dong-xia^{1,2*}, NI Jian², ZHANG Ma-xiu², LIN You-qiang², HU Yi²

(1. School of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Unsaturated residual soils are often used as backfills of engineering structures in Xiamen. The strength and stability of many geotechnical structures are related with the shear strength of unsaturated soils. A series of direct shear tests were carried out on unsaturated residual soils with different initial moisture contents and matric suction was conducted by filter paper method. Results of tests show that matric suction decreases greatly with increasing of gravimetric moisture content, volumetric moisture content and degree of saturation when gravimetric moisture content is less than 16%, volumetric moisture content is less than 35% or degree of saturation is less than 70%. The shear strength and apparent cohesion increase greatly with increasing of matric suction in lower matric suction range and then the increasing rates of them decrease in higher matric suction range. Apparent internal friction angle increases at first with the increasing matric suction and then be approximated to a certain value.

Key words: matric suction; filter paper method; residual soil; initial moisture content; shear strength