

干-湿循环过程中吸力与强度关系研究

龚壁卫¹, 周小文², 周武华¹

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 华南理工大学建筑学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对膨胀土干-湿循环过程中的吸力变化和强度变化特征, 开展试验研究。采用体积压力板仪实现脱湿和吸湿并制备不同吸力的试样, 通过直剪试验测试不同吸力下的抗剪强度。试验成果显示: ①土水特征曲线是不稳定的, 它与土体含水率的变化路径有关; ②在干湿循环过程中, 相同的吸力具有不同的强度贡献。

关键词: 非饱和土; 膨胀土; 抗剪强度

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0207-03

作者简介: 龚壁卫(1962-), 男, 重庆江津人, 硕士, 高级工程师, 主要从事膨胀土、非饱和土的工程特性研究。

Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture

GONG Bi-wei¹, ZHOU Xiao-wen², ZHOU Wu-hua¹

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: To study the variation of matric suction and shear strength of unsaturated soils with different water contents, a group of tests were performed to measure the strength of expansive soil during a cycle of desorption-absorption of moisture. Desorption-absorption of moisture was achieved by controlling the suction at different levels. Direct shear tests were conducted to measure strengths of soil samples with controlled suctions in the desorption or absorption process of moisture. From the test results, we could get some insights that: ①soil-water characteristic curve of soil was unstable and related to the variation of soil moisture; ②different variation of soil moisture might lead to different contribution of the same suction to the strength of soil.

Key words: unsaturated soils; expansive soils; shear strength

1 问题的提出

粘性土的抗剪强度主要由颗粒之间的摩擦强度和胶结强度组成。影响粘性土抗剪强度的因素很多, 大致可划分为土的物性因素, 如土的粘土矿物、化学成分、含水率、孔隙率以及土体结构等; 受力因素, 包括应力状态、应力水平、应力历史、应力路径、力的频谱特性等; 环境因素, 如排水条件、温度。按照太沙基有效应力原理, 饱和土的强度由有效应力($\sigma_n - u_w$) (单变量) 决定, 如下式所示:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \varphi' \quad (1)$$

对于非饱和土, 经过多年的争论, 目前大多趋向于认为, 其抗剪强度由双变量决定^[1], 如下式所示:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (2)$$

式中, $\sigma_n - u_w$ 和 $\sigma_n - u_a$ 作为两个独立的应力状态变量, $\sigma_n - u_w$ 称为基质吸力, φ_b 为吸力内摩擦角。由式(2)可见, 吸力 $u_a - u_w$ 与土的非饱和程度有密切关系, 因此, 非饱和土的抗剪强度与含水率关系密切。

膨胀土是种性质特殊的非饱和土, 在干燥的状态

下, 它有很高的强度, 而在遇水后体积迅速膨胀, 强度明显降低。膨胀土的强度变动特性是与土的三相状态紧密联系的, 更确切的说, 是由于颗粒骨架中孔隙水-孔隙气界面上的微观力效应-基质吸力的变化所引起。土的含水率与基质吸力的关系, 用土水特征曲线描述。土水特征曲线可在室内用专门的试验仪器测得。由此, 由式(2)很容易想到, 是否可在建立膨胀土的基质吸力与含水率的关系(土水特征曲线)之后, 在日常工程中通过测定土的含水率来确定土的基质吸力进而确定土的抗剪强度? 鉴于常规试验中测定土的吸力很困难, 时间长代价高, 如能够转化为量测含水率, 则膨胀土强度的计算就变得简单, 在实际工程中运用非饱和土强度理论就很容易。包承钢等^[2]提出的非饱和土边坡的研究思路“含水率→吸力(场)→抗剪强度(场)→边坡稳定性”, 就是基于这种思想。由此已做了不少研究工作, 主要是研究土水特征曲线的特征及根据土水特征曲线计算强度的方法^[3-5]。

然而,人们已经认识到,在膨胀土的基质吸力与含水率间并不存在惟一的关系,亦即对于同样土质和孔隙比的膨胀土,其土水特征曲线不是惟一的。其原因是影响基质吸力的因素除了含水率(饱和度)之外,还与含水率的变化路径有密切关系。换言之,膨胀土当前的含水率是从饱和度较高的状态脱湿而得,还是从较干燥的状态吸湿而致,或者是经过多次的干湿循环而得,对于土的基质吸力是有影响的。从膨胀土的土水特征曲线上看,即是土体的脱湿-吸湿过程不重合。对于某一特定的基质吸力,其脱湿曲线和吸湿曲线所对应的含水率不同,呈现出明显的回滞现象。显然,这种现象将引起膨胀土的强度差异,因为即使含水率相同,其对应的基质吸力却差别较大,或基质吸力相同,对应的含水率却不同。膨胀土的含水率变化历史和路径不同,也使土骨架承受不同的有效应力路径。

而土与其它材料的差别之一就是:强度与变形等力学特性与其应力路径有关。由此也可推测,膨胀土的力学特性与其含水率的变化路径有关。因此,这就使得膨胀土的土水特征曲线产生变异性,需要做更多的研究。广泛深入地探讨土水特征曲线的变异性 and 变异规律是研究膨胀土力学特性的基础。只有在含水率的变化路径与土水特征曲线之间的关系比较清楚之后,通过在吸力估算中考虑含水率的变化路径的影响,按照“含水率→吸力(场)→抗剪强度(场)→边坡稳定性”的思路处理非饱和土的工程问题才能比较恰当。

基于上述考虑,本文通过控制膨胀土样的干-湿路径的抗剪强度试验,对含水率变化路径与吸力和强度之间的关系进行初步的研究,探讨含水率变化路径对后两者的影响。

2 研究过程

2.1 试验土样的基本特性

试验土样取自湖北枣阳某渠道一处已发生滑坡的边坡,土样的比重为 2.74,天然含水率 34.6%,粘粒含量($<0.005\text{ mm}$) 50%,液限含水率 53.1%,塑限含水率 26.7%,塑性指数 26.4。自由膨胀率 93%,按照土的自由膨胀率划分属于强膨胀土。土样粘土矿物成分及含量如表 2 所示。粘土矿物中伊利石含量 70%,石英含量 12%,方解石含量 8%,蒙脱石含量仅 4%。

2.2 试验方法

(1) 试验设计

试验设计为多个干-湿循环过程,因时间关系目前只进行了一个循环过程。将试样从饱和状态脱湿到若干非饱和状态,再从非饱和土状态吸湿到某特定的基质吸力,在此过程中测定不同状态下的抗剪强度。

考虑到天然状态下膨胀土的基质吸力较高,设定最大脱湿压力为 1300 kPa,相当于试样最大基质吸力达到 1300 kPa。试验测定干-湿循环过程中对应于基质吸力为 200, 500, 800 kPa 状态下的抗剪强度。土样制备采用取自现场滑坡体的扰动土样,经自然晾干,剔除大于 5 mm 浆石后,制备成天然状态含水率的土料,在标准击实功能下(592.2 kJ/m^3),按照预设干密度压实,然后再采用真空饱和的方法,将土样进行饱和。

(2) 吸力控制

为保证试样达到一定的基质吸力,采用 1500 kPa 体积压力板仪对土样进行脱湿或吸湿处理。之前需将体积压力板仪进行必要的改造,以满足控制试样吸湿的要求。脱湿过程:将完全饱和的土样装入预先饱和的体积压力板仪,以预定的气压对试样脱湿,待试样排水完全停止后,打开压力室,取出土样切成剪切试验用的试样,进行剪切试验;吸湿过程:试样安装过程同上。首先,将饱和试样脱湿,每组试样均脱湿达到最大气压 1300 kPa,待排水稳定后,按一定的气压卸荷使试样吸湿,通过量测试样吸湿水量,判定试样是否达到吸湿稳定。然后切样进行剪切试验。为避免试验过程中气压加-卸荷对试样造成的影响,每次试验仅进行一级压力的操作。

(3) 剪切过程

剪切试验采用直剪仪进行。将已脱湿或吸湿达到预定基质吸力的试样切削成直径 $\phi 61.8\text{ mm}$ 、厚度 20 mm 的标准尺寸,装入直剪仪剪切盒。为防止试样含水率变化,试样上、下用薄膜与自然风干的透水石隔开,剪切过程按不固结快剪试验进行,剪切速率为 0.8 mm/s 以保证在剪切过程中没有水分和基质吸力的变化。试样正应力采用 100、200、300、400 kPa 四级。

3 试验成果分析

3.1 干-湿循环过程中的土水特征曲线

图 1 是试样干-湿循环过程中的土水特征曲线 SWCC。可看出在脱湿过程中,当 $w>31\%$ 的范围内时,吸力较小,曲线变化也较平缓($w=31\%$ 时,液性指数=0.16,硬塑状态);当含水率低于 31%后,吸力增加很快,塑限含水率 26.7%时,吸力达到 700 kPa。

在土样从 $w\approx 26\%$ 时开始吸湿的过程中,随着含水率的增加,吸力降低,形成一条新的土水特征曲线,与脱湿过程的特征曲线不重合,两者之间出现不小的滞回差。这说明,在干-湿循环中,相同的含水率可以有不同的吸力,同一个吸力可能对应不同的含水率。这说明土水特征曲线是不稳定的,它与土体含水率的变化路径有关。

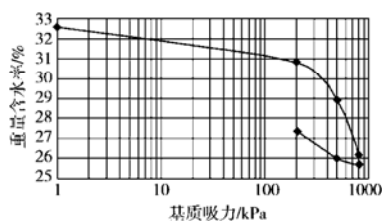


图1 干-湿循环中的土水特征曲线

Fig. 1 SWCC of drying and wetting cycles

3.2 脱湿过程中的抗剪强度

图2中4条曲线分别代表4级压力下抗剪强度与基质吸力的关系。可看出4级正应力下,随着基质吸力的增大,试样的抗剪强度均呈指数函数的趋势增大。

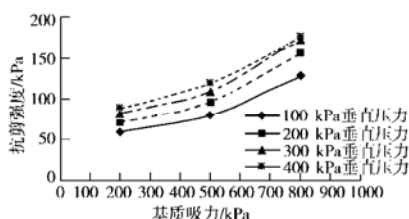


图2 脱湿过程中基质吸力与抗剪强度关系

Fig. 2 Variation of shear strength with matric suction in drying cycles

3.3 吸湿过程中的抗剪强度

图3为试样吸湿过程中基质吸力与抗剪强度的关系。可见,在土样较干燥、吸力较高的范围内(500~800 kPa),抗剪强度随吸力的减小(含水率增大)而降低的趋势很显著;而在土样吸湿、吸力降低到一定程度以后(本试验为500 kPa),强度降低的趋势明显减缓。

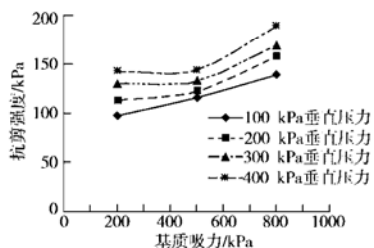


图3 吸湿过程中基质吸力与抗剪强度关系

Fig. 3 Variation of shear strength with matric suction in wetting cycles

3.4 脱湿过程与吸湿过程的强度比较

图4为干-湿循环过程中4级正应力下的抗剪强度与基质吸力的关系,每级正应力下曲线的下半段为脱湿过程,抗剪强度随吸力增大而增大;上半段为吸湿过程,抗剪强度随吸力减小而减小。由图4可见,对应于同一基质吸力,吸湿和脱湿过程所测得的抗剪强度显著不同,吸湿过程对应的试样抗剪强度普遍高于脱湿过程。这说明,相同的式(2),如土在两种状态下的 c' 、 ϕ' 、 $\sigma_n - u_a$ 和 $u_a - u_w$ 都相同,但 τ_f 不同,则表明 ϕ_b 不同。进一步推论,土经过不同的含水率变化路径(干或湿或多次干湿循环)后,土的细观或微

观结构产生变化,使 ϕ_b 发生变化,以至相同吸力具有不同的强度贡献。力并不意味着会有相同的强度贡献。

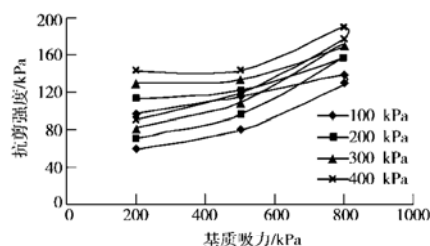


图4 干-湿循环中抗剪强度与吸力关系

Fig. 4 Variation of shear strength with matric suction in wetting and drying cycles

4 结 语

(1) 在干-湿循环中,土水特征曲线呈现滞回圈,相同的含水率可以有不同的吸力,同一个吸力可能对应不同的含水率。这说明土水特征曲线是不稳定的,它与土体含水率的变化路径有关。

(2) 在一个干湿循环过程中,对应于脱湿和吸湿过程的相同基质吸力条件下,试样的抗剪强度有明显差别,吸湿过程对应的试样抗剪强度高于脱湿过程。

(3) 土经过不同的含水率变化路径(干或湿或多次干湿循环)后,土的细观或微观结构产生变化,可能使吸力摩擦角 ϕ_b 发生变化,以至相同的吸力具有不同的强度贡献。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics For Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2] BAO Cheng-gang, GONG Bi-wei, ZHAN liang-tong. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils[C]// The Second International Conference on Unsaturated Soils. Beijing.
- [3] 龚壁卫,吴宏伟,王 斌.应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J].岩土力学,2004,25(12):1915 - 1918.(GONG Bi-wei, CHARLES W W Ng, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(12): 1915 - 1918.
- [4] 刘艳华,龚壁卫,等.非饱和土的水特征曲线研究[J].工程勘察,2002,3:8 - 11.(LIU Yan-hua, GONG Bi-wei, et al. Study on soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation & Survey, 2002,3: 8 - 11.)
- [5] 龚壁卫,王 斌.非饱和膨胀土的抗剪强度特性研究[J].长江科学院院报.2000,17(5):19 - 22.(GONG Bi-wei, WANG Bin. Study on shear strength of expansive soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000,17(5):19 - 22.