

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.01.017

重塑非饱和黏土脱吸湿抗剪强度对比

温晓鹏¹ 杨 庆² 杨 钢² 杨清雷²

(1. 铁道第三勘察设计院 天津 300142 ; 2. 大连理工大学岩土工程研究所 辽宁 大连 116023)

摘要 : 基于压力板仪与非饱和土直剪仪 , 针对脱湿与吸湿条件非饱和土的抗剪强度特性进行对比试验研究 , 探讨不同基质吸力、不同竖向压力下非饱和粉质黏土试样的抗剪强度特性。研究结果表明 , 抗剪强度与基质吸力成正比 , 基质吸力的变化对抗剪强度的影响主要表现在对黏聚力的影响 , 对摩擦角影响不大。进行脱湿与吸湿情况下相同含水率的抗剪强度对比 , 发现脱湿后试样的抗剪强度高于吸湿试样的抗剪强度 , 脱湿过程中试样的抗剪强度参数高于吸湿试样的抗剪强度参数。

关键词 : 非饱和土 ; 脱湿 ; 吸湿 ; 抗剪强度 ; 基质吸力

中图分类号 : TU411.7 文献标识码 : B 文章编号 : 1006-7647(2011) 01-0070-04

Comparison of shear strengths of remolded unsaturated clay under dehydration and moisture absorption // WEN Xiaopeng¹, YANG Qing², YANG Gang², YANG Qing-lei² (1. Third Railway Survey and Design Institute, Tianjin 300142, China ; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract : By use of the pressure plate extractor and the direct shear apparatus for unsaturated soil, comparative tests on shear strength properties of unsaturated soil under moisture absorption and dehydration conditions were carried out. The shear strengths of unsaturated clay samples with different matric suctions and different vertical pressures were investigated. The test results show that the shear strength is directly proportional to the matric suction. The impact of the variation of the matric suction on the strength is mainly represented by the impact on the cohesion and little impact on the friction angle. Under the same moisture content, the shear strength and shear strength parameters of the specimens with dehydration are higher than those of the specimens with moisture absorption.

Key words : unsaturated soil ; dehydration ; moisture absorption ; shear strength ; matric suction

土体抗剪强度是工程设计、施工中必不可少的计算参数 , 而自然界中的土多处于非饱和状态 , 由于非饱和土中气相的存在 , 直接以饱和土计算方法得到的非饱和土的抗剪强度误差很大 , 因而非饱和土抗剪强度的研究成为现代土力学的重要研究内容。

1960 年 Bishop 等^[1]从饱和土的有效应力原理出发 , 提出了非饱和土的抗剪强度表达式 :

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi \quad (1)$$

式中 : c' 为有效黏聚力 ; σ 为作用在土体上的正应力 ; u_a 为孔隙气压力 ; χ 为与土的饱和度及土性有关的试验参数 ; u_w 为孔隙水压力 ; φ 为有效内摩擦角。

1977 年 , 加拿大 Saskatchewan 大学的 Fredlund 等^[2]建议用 2 个独立的变量即净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 和基质吸力 $(u_a - u_w)$ 建立抗剪强度表达式 , 他们认为非饱和土的抗剪强度由 c' 以及 $(\sigma - u_a)$ 引起的强度、 $(u_a - u_w)$ 对强度的贡献等 3 个部分组成。

1978 年 , Fredlund 等^[3-4]提出了非饱和土的抗剪强度公式 (式 (2)) , 其中 $(\sigma - u_a)$ 引起的强度及 $(u_a - u_w)$ 对强度的贡献与 φ 有关 , 而 $(u_a - u_w)$ 引起的强度与 φ_b 有关 (φ_b 为与基质吸力有关的内摩擦角)。

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (2)$$

目前对抗剪强度的研究多集中在非饱和土脱湿过程中 , 但自然界中土体往往在气候、环境的影响下导致其含水量增大或减少 , 以此形成干湿循环现象。研究表明吸湿过程中的土水特征曲线相对于脱湿过程存在“滞后”现象 , 即 2 个过程在相同含水量下的基质吸力并不相同^[5]。由于基质吸力对抗剪强度有较大影响 , 因而脱湿与吸湿条件下的抗剪强度也应存在较大的差异。笔者在以往研究的基础上 , 利用压力板仪与非饱和土直剪仪组合 , 分别对脱湿与吸湿条件下非饱和土的抗剪强度进行试验研究 , 鉴于基质吸力的复杂性 , 以含水量为媒介 , 对 2 种条件下的抗剪强度进行对比分析。

作者简介 : 温晓鹏 (1985 —) , 男 , 山东招远人 , 硕士研究生 , 从事非饱和土抗剪强度研究。 E-mail : wenxp@mail.dlut.edu.cn

1 试验方法

1.1 试验设备

采用 Soilmoisture 公司生产的 15 Bar 压力板仪进行试样脱湿,采用南京土壤仪器厂生产的 ZFY-1 型非饱和土应变控制式直剪仪进行直剪试验。

1.2 试样制备

试验用土取自大连营房子地区典型黏土,其基本物理特性如下:天然含水量为 5.32%,最大干密度为 1.75 g/cm^3 ,最优含水量为 17.70%,塑限为 15.7,液限为 26.1,塑性指数为 10.4。土样经烘干碾碎,过 1 mm 筛,控制干密度为 1.7 g/cm^3 ,按含水量 16.3% 配制土样。将土样放置于保湿箱静置 24 h,使其充分混合均匀。称量后放入压样器内压制成型。成型试样的直径及高度分别为 61.8 mm 和 20 mm。经抽气饱和后放入保湿箱备用。

1.3 试验方案

对 2 批试样进行了控制基质吸力的脱湿直剪试验与控制含水量的吸湿直剪试验。每批试样分 4 组,每组 4 个试样,控制基质吸力分别为 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 竖向应力分别为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa; 试验控制剪切速率为 1 mm/min 。

脱湿过程直剪试验在非饱和土应变控制式直剪仪中完成,吸力平衡后直接剪切。吸湿过程直剪试验时,将饱和试样置于压力板仪中,调节到指定的基质吸力,待平衡称其质量 m ,然后调节基质吸力至 400 kPa,平衡后取出,用移液管精确均匀滴水至试样表面,达到质量 m ,再将试样表面用凡士林密封,防止水分蒸发,用保鲜膜包裹试样之后放于保湿箱中静置 24 h,然后取出试样进行直剪试验。

2 试验结果分析

2.1 脱湿过程控制吸力的直剪试验分析

图 1 为竖向荷载作用下击实黏土试样的抗剪强度与基质吸力的关系。从图中可以看出:①抗剪强度与竖向正应力成正比,这与饱和土抗剪强度特性

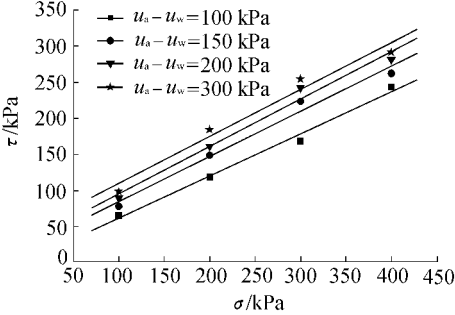


图 1 脱湿过程抗剪强度与基质吸力关系曲线

一致。②试样的抗剪强度与基质吸力的关系是基质吸力越大则抗剪强度越大。由于基质吸力与含水量成反比,因此含水量越大则抗剪强度越小。图 2 为内摩擦角 φ 随基质吸力变化曲线。图 2 表明基质吸力增大,内摩擦角呈增大趋势,但是增大幅度不明显。在工程计算中,可假设非饱和土的内摩擦角与饱和土的内摩擦角相等。

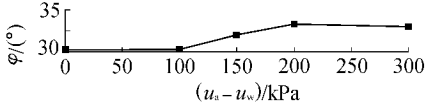


图 2 脱湿过程内摩擦角与基质吸力关系曲线

图 3 为黏聚力与含水率的关系。对黏聚力取对数,通过线性回归分析可以得到黏聚力 c 与含水量 w 的关系方程:

$$\lg c = A + Bw \tag{3}$$

式中: A 和 B 为试验所取得的参数。

通过 ORIGIN 软件拟合,得到本试验中回归方程参数 $A = 2.24$, $B = -0.07$ 。代入式 (3) 中,可得

$$\lg c = 2.24 - 0.07w \tag{4}$$

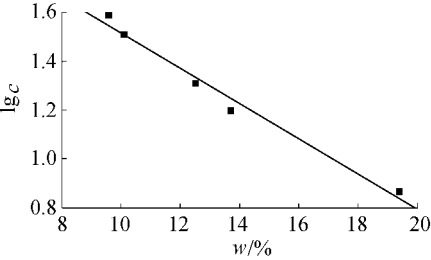


图 3 脱湿过程黏聚力与含水量关系曲线

2.2 吸湿过程控制含水量的直剪试验结果

图 4 为经过吸湿处理后不同含水量对应的抗剪强度包线。脱湿过程中各等级基质吸力对应的含水量分别为 w_{100} , w_{150} , w_{200} , w_{300} , 吸湿过程含水量与脱湿过程含水量相同,但受土水特征曲线滞回现象影响,二者基质吸力并不相同。由图 4 可以看出,吸湿过程与脱湿过程有相同的特点,即抗剪强度与竖向正应力成正比,与含水量成正比。对黏聚力取对数

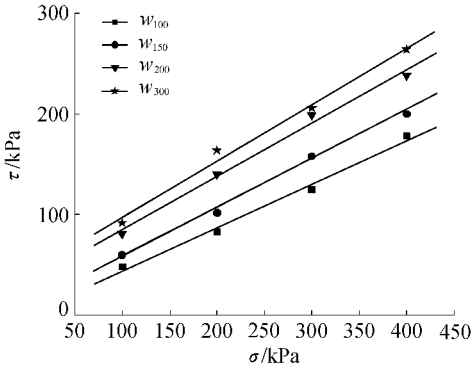


图 4 吸湿过程抗剪强度与含水量关系曲线

(图5),得

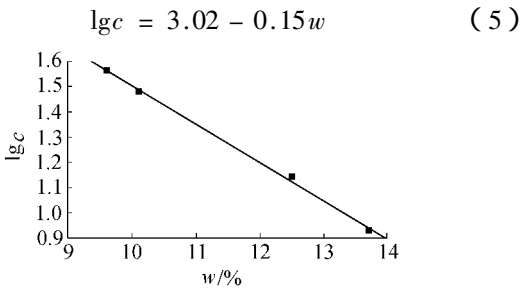


图5 吸湿过程黏聚力与含水量关系曲线

2.3 脱湿过程与吸湿过程直剪试验结果比较

将相同吸力等级下的脱湿试样抗剪强度曲线与吸湿试样抗剪强度曲线做比较(图6)。由吸湿与脱湿后抗剪强度包线分析可知,在竖向正应力相同的情况下脱湿试样的抗剪强度大于吸湿试样的抗剪强度。土体在吸湿与脱湿过程中会产生滞回现象,本试验中吸湿与脱湿阶段试样处于同一含水量时,脱湿试样的基质吸力大于吸湿阶段试样的基质吸力,

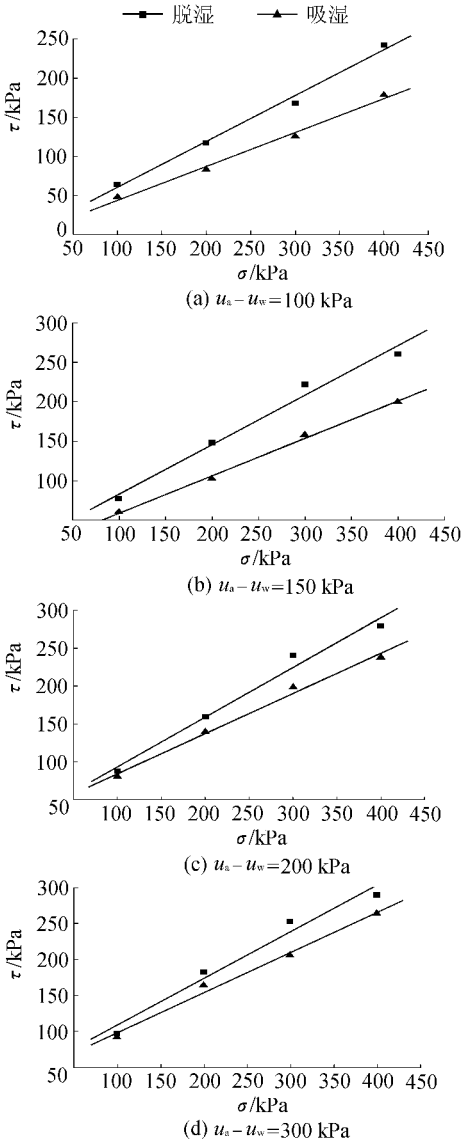


图6 吸湿与脱湿抗剪强度对比

因此两者抗剪强度产生明显变化。

脱湿及吸湿过程中内摩擦角、黏聚力对比关系见图7、图8。吸湿过程非饱和土内摩擦角均小于脱湿过程内摩擦角;吸湿过程黏聚力除个别点外皆小于脱湿过程黏聚力。

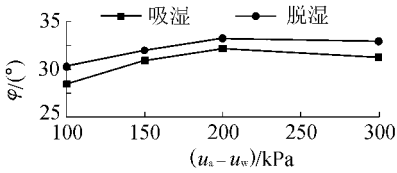


图7 脱湿与吸湿内摩擦角比较

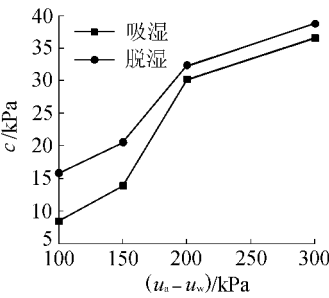


图8 脱湿与吸湿黏聚力比较

定义内摩擦角损失百分比为 λ_φ ,黏聚力损失百分比为 λ_c ,即

$$\lambda_\varphi = \frac{\varphi_d - \varphi_w}{\varphi_d} \quad (6)$$

$$\lambda_c = \frac{c_d - c_w}{c_d} \quad (7)$$

式中: φ_d 和 c_d 分别为脱湿过程的内摩擦角和黏聚力; φ_w 和 c_w 分别为吸湿过程的内摩擦角和黏聚力。

基质吸力 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa 所对应的 λ_φ 分别为 6.27%, 3.44%, 3.30%, 5.15%; λ_c 分别为 46.43%, 32.50%, 6.67%, 5.60%。脱湿过程与吸湿过程存在 2 方面差异: ①非饱和土中水的变化路径不同; ②虽然吸湿过程与脱湿过程试样的含水量保持一致,但由于“滞后”现象的存在,2 组情况基质吸力并不相同。基质吸力是影响抗剪强度参数的直接因素,抗剪强度受脱湿与吸力路径的影响明显。试验结果表明,相同含水量下脱湿过程的抗剪强度参数高于吸湿过程的抗剪强度参数。工程实践中有很多相似的条件,如降雨过程中非饱和土边坡的稳定预测,是否考虑含水量变化路径的影响将对结果产生很大影响。如何将理论应用于实践,有待于进一步研究。

3 结 语

本文综合讨论了非饱和黏土击实试样的抗剪强度与基质吸力的关系,并对比分析了吸湿与脱湿过程中的抗剪强度变化,得到如下认识:

a. 内摩擦角 φ 随基质吸力的变化不明显,在实际工程应用中可以直接采用饱和土内摩擦角。推导出黏聚力 c 与含水量的线性回归方程,对实际工程具有指导意义。

b. 由典型土水特征曲线可见,同一含水量下,脱湿段吸力要高于吸湿段吸力,受“滞后”现象影响,脱湿后试样的抗剪强度高于同一含水量下吸湿试样的抗剪强度。

c. 土是一种特殊的材料,其强度、变形等力学特性与其应力路径有关。不同的含水量变化路径使土体达到同一含水量时基质吸力并不相同。试验结果表明,相同含水量下脱湿过程的抗剪强度参数高于吸湿过程的抗剪强度参数。

参考文献：

[1] BISHIP A W , ALPAN I , BLIGHT G E , et al. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soil [C]//ASCE Res Conf Shear Strength of Cohesive Soils.[S. l.]:Univ of Colorado , Boulder ,1960 503-532.
[2] FREDLUND D G ,MORGENSTEM N R. Stress state variables for unsaturated soil[J]. ASCE J Geotech Eng Div GT5 ,1977 , 103 :447-466.

[3] FREDLUND D G ,MORGENSTEM N R ,WILDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Can Geotech J ,1978 , 15(3) 313-321.
[4] FREDLUND D G ,RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
[5] PHAM H Q ,FREDLUND D G ,BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves[J]. Can Geotech J 2005 42(6):1548-1568.
[6] 龚壁卫. 非饱和击实膨胀土总应力强度探讨[J]. 长江科学院院报,1998 ,15(3):40-42.
[7] 龚壁卫,詹良通,刘艳华,等. 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(4):19-22.
[8] 徐炎兵,韦昌富,陈辉,等. 任意干湿路径下非饱和岩土介质的土水特征关系模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008 27(5):1046-1052.
[9] 刘晓敏,赵慧丽,王连俊. 非饱和粉质黏土的土水特性试验研究[J]. 地下空间 2001 21(5) 375-378 385.
[10] 徐泽友,卢廷浩. 高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性[J]. 河海大学学报:自然科学版 2009 37(1):71-74.
[11] 宁永升,冯树荣,胡育林,等. 土工膜黏土组合防渗在溧阳抽水蓄能电站中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009 29(6) 83-85.

(收稿日期 2010-04-01 编辑:高建群)

(上接第 44 页)

在深厚透水覆盖层上进行渗流量观测时,有多种方案可供选择。该实例中提出了采用测压管、截水墙和导渗沟 3 种观测方案,通过综合评价可以看出测压管方案最优(88.5),导渗沟方案次之(74.2),截水墙方案欠佳(48.0)。在决策时宜优先采用测压管方案。该综合评价方法考虑的因素较为全面合理,易于操作,结论较为合理,可供设计方案比较时参考。

4 结 语

- a. 对建造在透水覆盖层上的土石坝进行渗流量观测可根据透水覆盖层的规模、工程及水文地质条件选择导渗沟、截水墙或测压管(井)方案。
- b. 采用线性加权和法建立评价模型,进而对方案的 5 个影响因素(技术可行性、经济合理性、观测效果好坏程度、运行管理方便程度及对环境及结构物的影响程度)予以权重分配和分级赋值,便可对渗流量观测的各种方案进行综合评价和科学比选。
- c. 实例应用表明,本文提出的透水覆盖层上土

石坝渗流量观测设计方案综合评价方法考虑的因素较为全面,权重处理得当,易于操作,结论较为合理。可供设计方案比选参考。

参考文献：

[1] 蔡跃波,盛金保,李雷,等. 浙江省新昌县巧英水库除险加固工程蓄水安全鉴定报告[R]. 南京:南京水利科学研究院 2009.
[2] 蔡跃波,言蝶达,袁辉,等. 浙江省龙游县沐尘水库蓄水安全鉴定报告[R]. 南京:南京水利科学研究院 2009.
[3] 王仁钟,陈生水,赵增凯,等. 湖北兴山古洞口(I 级)水利水电枢纽工程蓄水安全鉴定报告[R]. 南京:南京水利科学研究院 2005.
[4] 司洪洋. 当前我国混凝土面板坝监测中的若干问题[J]. 大坝观测与土工测试 ,1997 21(5) 6-9.
[5] SL60—94 土石坝安全监测技术规范[S].
[6] 王仁钟,李雷,彭雪辉. 横山水库大坝渗流监测方案研究报告[R]. 南京:南京水利科学研究院 2009.
[7] 浙江省水利水电勘测设计研究院. 浙江省奉化市横山水库加固改造工程初步设计报告[R]. 杭州:浙江省水利水电勘测设计研究院 2008.

(收稿日期 2010-04-07 编辑:方宇彤)