

DOI: 10.11779/CJGE2020S2006

含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究

蔡国庆^{1,2}, 张 策², 黄哲文², 李俊霖², 侯剑龙²

(1. 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 实际工程中, 含水率对土的抗剪强度影响较大, 探究含水率对非饱和黄土抗剪强度的作用对于工程的安全十分重要。对不同含水率、不同干密度的非饱和黄土试样进行直剪试验以研究非饱和黄土的抗剪强度, 并采用露点水势仪与滤纸法相结合的方法测定非饱和黄土的土-水特征曲线。结合对非饱和黄土的微观结构的研究, 分析含水率对微观结构的影响。试验结果表明: 随着含水率的增加, 土的抗剪强度降低, 含水率的增加降低了土的黏聚力, 也降低了内摩擦角, 但对内摩擦角的影响较小。在此基础上, 根据试验结果分析含水率与非饱和土抗剪强度指标之间存在的函数关系, 再通过分析土-水特征曲线中含水率与基质吸力的函数关系, 建立了以基质吸力为变量的抗剪强度公式。

关键词: 直剪试验; 抗剪强度; 含水率; 非饱和土; 基质吸力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0032-05

作者简介: 蔡国庆(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学及土体多场耦合理论方面的教学和科研工作。E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn。

Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess

CAI Guo-qing^{1,2}, ZHANG Ce², HUANG Zhe-wen², LI Jun-lin², HOU Jian-long²

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Determining the relationship between moisture content and shear strength is of guiding significance for engineering. The direct shear tests are carried out on the unsaturated loess samples with different moisture content and dry densities to study the shear strength of unsaturated loess, and the soil-water characteristic curve of unsaturated soil is determined by the method combining the dew point water potential meter and the filter paper method. Based on the researches on the microstructure of unsaturated soils, the influences of moisture content on the microstructure are analyzed. The test results show that as the moisture content increases, the shear strength of the soils decreases, and the increase in the moisture content reduces the cohesion of the soils and the internal friction angle, but has little effect on the internal friction angle. On this basis, the functional relationship between the moisture content and the shear strength index of unsaturated soils is analyzed, and then by analyzing the functional relationship between the moisture content in the soil-water characteristic curve and the matrix suction, a formula for the shear strength is proposed by regarding the matrix suction as the variable.

Key words: direct shear test; shear strength; moisture content; unsaturated soil; matrix suction

0 引言

传统土力学所研究的对象是饱和土, 而对水利工程、路基工程、基坑工程等岩土工程施工中, 非饱和土大量存在, 传统土力学已经不能准确地描述、预测土的行为, 进而导致出现相关灾害。水对土的作用机制十分复杂, 而土-水特征曲线(SWCC)作为非饱和土力学中的一个重要概念, 描述土中的含水状态和基质吸力之间的本构关系。1956年, Donald^[1]通过一系列控制孔隙水压力的直剪试验发现, 在吸力小于101 kPa时, 细砂、粗粉土的抗剪强度随基质吸力增长而

提高。不断有研究者用试验数据证实了基质吸力使非饱和土抗剪强度中的摩擦强度和黏聚力都得以提高。Bishop等^[2]在饱和土抗剪强度理论的基础上, 于1960年提出了非饱和土抗剪强度公式, Fredlund等^[3]通过大量室内试验和理论分析, 针对Bishop公式进行了补充, 于1978年提出了以正应力和基质吸力双变量的非

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020JBM048);
国家自然科学基金项目(52078031, U2034204, 52042201); 北京市
自然科学基金面上项目(8202038)
收稿日期: 2020-09-09

饱和土抗剪强度公式。近年来, 国内很多学者也对黄土的强度和非饱和土的抗剪强度进行了研究^[4-6]。影响非饱和土的强度因素众多, 如何将多种影响因素进行统一, 在减少变量的同时能简化强度方程是当前研究的热点。近年来, 吸力测量仪器逐步成熟, 测量吸力比测量含水率更快速。因此本文选取吸力作为单一变量, 直接建立吸力与非饱和土抗剪强度的公式。以重塑非饱和黄土为研究对象, 通过直剪试验, 研究含水率对抗剪强度的影响规律, 采用露点水势仪与滤纸法相结合的方法, 测定非饱和黄土的土-水特征曲线, 并建立起含水率与基质吸力的关系, 进而建立了抗剪强度随基质吸力的变化规律。在此基础上, 提出了一个非饱和黄土的抗剪强度与基质吸力的强度公式。通过电镜扫描, 从微观结构对上述影响规律进行了分析解释。

1 试验材料及方案

1.1 试验用土的基本物理指标

试验用土为陕西榆林靖边地区的阳城隧道砂质 Q3 黄土。其基本的物理性质: 相对密度为 2.70, 最优含水率为 12.0%, 最大干密度为 1.81 g/cm³, 液限为 25.2%, 塑限为 12.6%, 塑性指数为 12.6。

1.2 直剪试验

本次试验研究采用应变控制式直剪仪。为了得到不同干密度及不同含水率下非饱和土重塑黄土抗剪强度的变化规律, 直剪试验中, 把重塑土的干密度分为 1.50, 1.60, 1.70, 1.80 g/cm³ 4 个组进行试验, 每组 7 种试样, 各种试样的含水率在 5.0%~18.0% 以内分布。以干密度为 1.60 g/cm³ 的土为例, 分别先配置出含水率为 5.0%, 6.0%, 7.0%, 8.0%, 11.0%, 13.0%, 15.0% 的重塑土, 共 7 种含水率的土样, 每种土样制备 3 个用于直剪试验, 分别施加 100, 200, 300 kPa 的法向压力进行快剪试验, 剪切速率控制为 0.8~1.2 mm/min。试验后取大部分试验土样再次进行含水率测试。

1.3 土-水特征曲线试验

土-水特征曲线测定主要采用 WP4C 露点水势仪 (图 1) 进行快速、准确的测定。其主要原理: 样品水势与其在特定空间中达到平衡时的水汽压具有函数关系。WP4C 保持温度平衡状态, 通过测量封闭样品室中空气的露点温度, 然后根据内部函数计算样品水势。

含水率小于 14.0% 时, 利用露点水势仪进行测量, 控制样品的干密度为 1.50, 1.60, 1.70, 1.80 g/cm³, 对于在相同干密度下, 控制不同含水量进行基质吸力

与含水率的关系测量, 每个干密度下可分为 8 个不同的含水率。由于露点水势仪本身的量程限制, 当含水率大于一定的界限值时使用滤纸法进行吸力的测量, 在试验过程中根据不同干密度的情况, 来确定需要补充的含水率所对应的吸力值。



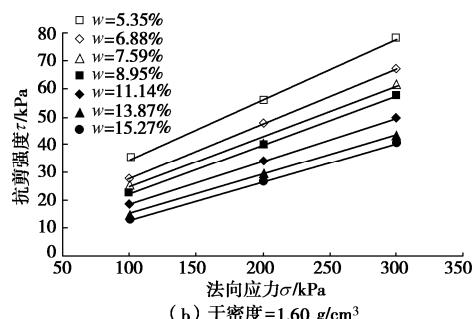
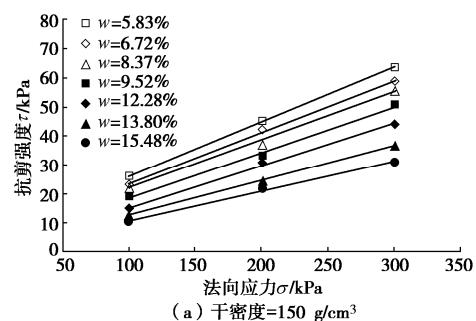
图 1 WP4C 露点水势仪

Fig. 1 Dew point water potential instrument of WP4C

2 试验结果及分析

2.1 抗剪强度与含水率的关系

对试验结果进行整理, 图 2 (a) 为干密度 1.50 g/cm³ 的土样剪切试验强度曲线, 分析试验记过结果: 随着含水率增加, 剪切强度逐渐下降, 黏聚力也随着含水率的增加而下降, 且各个干密度下的剪切曲线均有此规律。图 2 (b), (c), (d) 分别为干密度 1.60, 1.70, 1.80 g/cm³ 时不同含水率的剪切强度曲线, 可以看出随着干密度增加, 土的抗剪强度也在逐渐增大。不同干密度、含水率的参数值如表 1 所示。



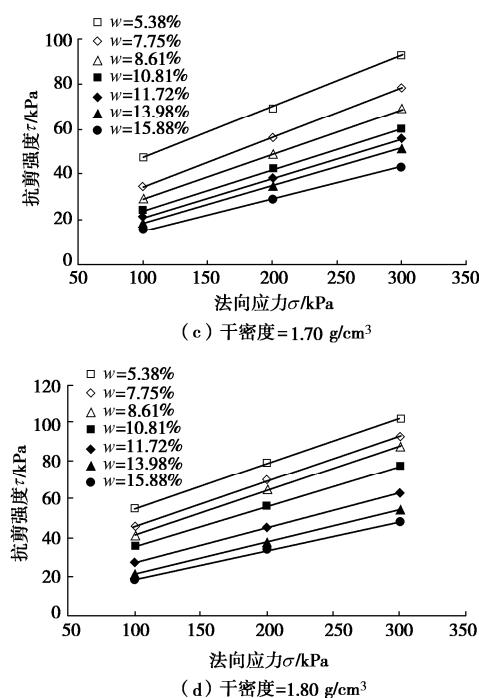


图2 不同干密度、含水率下抗剪强度

Fig. 2 Curves of shear strength of soils with different dry densities

表1 抗剪强度指标的拟合参数

Table 1 Fitting parameters for shear strength indexes

| 干密度 ρ (g/cm^3) | 含水率 $w/\%$ | 黏聚力 c/kPa | 摩擦角正切值 $\tan\varphi$ |
|--|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1.50 | 5.83 | 24.630 | 0.2290 |
| | 6.72 | 13.200 | 0.2190 |
| | 8.37 | 9.286 | 0.1990 |
| | 9.52 | 6.452 | 0.1800 |
| | 12.28 | 4.008 | 0.1730 |
| | 13.80 | 2.542 | 0.1640 |
| | 15.48 | 0.782 | 0.1420 |
| 1.60 | 5.83 | 13.386 | 0.2153 |
| | 6.88 | 7.938 | 0.1985 |
| | 7.59 | 6.960 | 0.1812 |
| | 8.95 | 4.745 | 0.1768 |
| | 11.14 | 2.480 | 0.1584 |
| | 13.87 | 0.960 | 0.1440 |
| | 15.27 | 0, (-0.768) | 0.1374 |
| 1.70 | 5.38 | 7.447 | 0.1870 |
| | 7.75 | 6.306 | 0.1770 |
| | 8.61 | 5.165 | 0.1680 |
| | 10.81 | 2.282 | 0.1600 |
| | 11.72 | 0.601 | 0.1460 |
| | 13.98 | 0.420 | 0.1230 |
| | 15.88 | 0.120 | 0.1040 |
| 1.80 | 6.97 | 32.063 | 0.2330 |
| | 7.58 | 23.265 | 0.2320 |
| | 8.90 | 19.550 | 0.2290 |
| | 10.18 | 14.956 | 0.2080 |
| | 13.46 | 9.775 | 0.1790 |
| | 15.24 | 5.474 | 0.1660 |
| | 17.37 | 4.790 | 0.1470 |

2.2 抗剪强度指标与含水率关系

由图2可以得出, 在不同干密度下黏聚力与含水率之间的函数关系。将所得到的数据进行拟合, 得到不同干密度下含水率与摩擦角和黏聚力的关系, 如图3, 4所示。由拟合结果, 在同一个干密度下, 该重塑土样的摩擦角随着含水率的增加而减小, 呈线性递减的关系; 黏聚力随着含水量的增加亦减小, 但呈现非线性的关系。

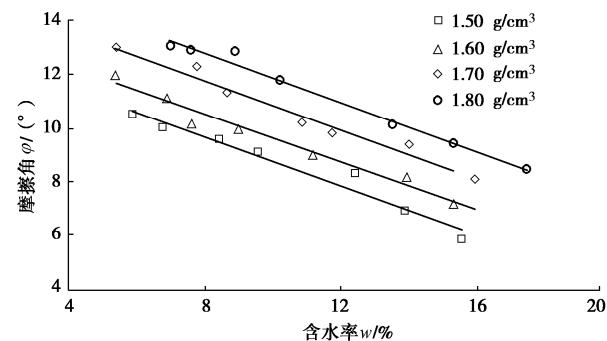


图3 含水率与摩擦角的关系图

Fig. 3 Relationship between moisture content and friction angle

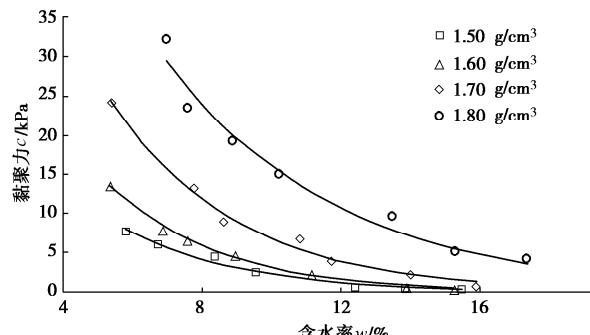


图4 含水率与黏聚力的关系图

Fig. 4 Relationship between moisture content and cohesion

2.3 基质吸力与含水率的关系

通过露点水势仪和滤纸法测得的不同干密度下的基质吸力与质量含水量之间的关系如图5所示。

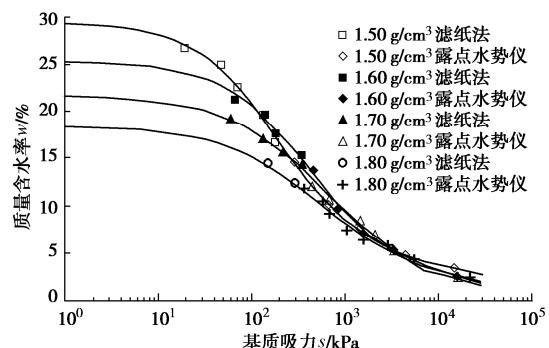


图5 不同初始干密度下土-水特征曲线

Fig. 5 SWCCs of soils with different dry densities

2.4 建立非饱和土总应力强度公式

库仑提出的总应力条件下抗剪强度公式表示为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad , \quad (1)$$

式中, c 为黏聚力, φ 为摩擦角。由试验结果可知黏聚力 c 与摩擦角 φ 均随含水率 w 变化且均满足函数关系:

$$\varphi = Aw + B \quad , \quad (2)$$

$$c = C \exp(Dw) \quad . \quad (3)$$

则存在由含水率作为自变量的抗剪强度公式:

$$\tau = c(w) + \sigma \tan \varphi(w) \quad , \quad (4)$$

式中, A, B, C, D 均为拟合参数。

对试验数据进行拟合, 拟合图如图 3, 4 所示, 拟合参数如表 2 所示。

表 2 抗剪强度指标的拟合参数

Table 2 Fitting parameters

| $\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | A | B | C | D |
|---|---------|---------|----------|----------|
| 1.50 | -0.4663 | 16.5651 | 45.0403 | -0.29750 |
| 1.60 | -0.4636 | 15.5091 | 72.6715 | -0.31346 |
| 1.70 | -0.4434 | 14.0912 | 106.4089 | -0.27460 |
| 1.80 | -0.4549 | 13.3135 | 121.0407 | -0.20200 |

蔡国庆等^[7]的研究结果显示 Fredlund-Xing 模型对各类土的拟合效果最好。在进行含水率与基质吸力关系曲线分析时, 采用 Fredlund 三参数模型^[8]进行拟合:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} \quad . \quad (5)$$

将体积含水率转化成质量含水率, 其模型如下:

$$w = w_s \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} \quad , \quad (6)$$

式中, w_s 为饱和含水率, a, n, m 为拟合参数。

根据汪东林等试验研究^[9], 本次试验为砂质黄土, 残余含水率为 0 在拟合精度上是合适的, 且对模型的参数值影响不大。根据本次试验数据进行拟合, 拟合参数如表 3 所示, 拟合曲线如图 5 所示。

表 3 土水特征曲线拟合参数

Table 3 Fitting parameters of SWCCs under different dry densities

| $\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | a | n | m |
|---|----------|---------|---------|
| 1.50 | 108.8800 | 1.01115 | 1.34315 |
| 1.60 | 331.3985 | 0.91283 | 1.85813 |
| 1.70 | 437.9342 | 0.81921 | 1.87375 |
| 1.80 | 350.4498 | 0.83102 | 1.63982 |

综合式 (2) ~ (6) 之间的函数关系, 得到一个以基质吸力为自变量的抗剪强度公式如下:

$$\begin{aligned} \tau &= C \exp \left\{ Dw_s \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} \right\} + \\ &\quad \sigma \tan \left\{ Aw_s \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} + B \right\} \quad . \quad (7) \end{aligned}$$

3 微观结构分析

土的宏观物理力学性质由土的微观结构决定, 因

此通过微观结构研究可以更好地了解土的力学行为。土的基质吸力大小也与其相应的微观结构有关。如图 6 所示, 依次为相同干密度 1.70 g/cm³ 下, 5.05%, 8.37%, 10.85%, 15.43% 含水率的非饱和重塑土放大 200 倍的微观结构图, 由微观观测结果可以看出: 当试样含水率较小时, 黄土颗粒以面胶结连接为主, 连接强度较大, 并呈镶嵌排列, 骨架颗粒排列紧密, 互相嵌入, 孔隙空间小, 导致基质吸力较大。随着含水率的增大, 颗粒间的胶结连接被破坏, 颗粒间变为以点接触为主的连接, 从而使结构连结强度迅速降低, 镶嵌的紧密排列变为架空的松散排列, 孔隙空间大导致基质吸力变小, 微观空间结构体系失稳, 造成土的强度下降。

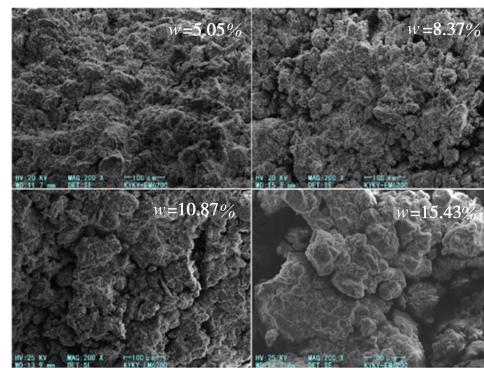


图 6 干密度=1.70 g/cm³ 时, 不同含水率的非饱和重塑土放大 200 倍的微观结构图

Fig. 6 Magnification of 200 times for unsaturated remolded soils with different moisture contents under dry density of 1.70 g/cm³

4 结 论

(1) 分析直剪试验结果, 随着含水率增加, 土的抗剪强度降低, 土的黏聚力与内摩擦角均下降, 并且含水率对黏聚力的影响比内摩擦角要大, 以此建立了非饱和黄土抗剪强度和含水率方程。含水率与内摩擦角呈线性关系, 含水率与黏聚力成指数函数型关系。

(2) 采用露点水势仪与滤纸法相结合的方法, 测试了不同干密度的土-水特征曲线。分析拟合后土-水特征曲线与抗剪强度试验数据, 建立了含水率与吸力的函数关系。

(3) 基于拟合的含水率-内摩擦角和黏聚力的方程和含水率与吸力的函数关系, 建立了一个以基质吸力为自变量的抗剪强度公式。

(4) 观测土的微观结, 分析得出不同含水率下土微观结构的变化, 以及基质吸力导致强度变化的原因。

参考文献:

[1] DONALD I B. Shear strength measurements in unsaturated

non-cohesive soils with negative pore pressure[C]// Proceedings of the 2nd Australia and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1956.

[2] BISHOP 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. 1960, Boulder.

[3] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WILDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**(3): 313 - 321.

[4] 党进谦, 李 靖. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土工程学报, 1997, **29**(2): 59 - 64. (DANG Jing-qian, LI Jing. Strength characteristics of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **29**(2): 59 - 64. (in Chinese))

[5] 姚攀峰. 再论非饱和土的抗剪强度[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2315 - 2318. (YAO Pan-feng. Discussion on shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2315 - 2318. (in Chinese))

[6] 凌 华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(7): 1499 - 1503. (LING Hua, YIN Zong-ze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(7): 1499 - 1503. (in Chinese))

[7] 蔡国庆, 张 策, 李 舰, 等. 考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Study on prediction method of swcc considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 27 - 31. (in Chinese))

[8] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**: 521 - 532.

[9] 汪东林, 莲茂田, 杨 庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 751 - 756. (WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay[J]. Rock and Mechanics, 2009, **30**(3): 751 - 756. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)