

# 非饱和土强度随含水量的变化

凌 华, 殷宗泽

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 吸力的量测和计算比较困难, 而含水量的分布在工程中却容易确定, 在非饱和土强度的研究中, 选择含水量代替吸力, 研究非饱和土强度随含水量的变化, 具有重要的实用价值。首先, 在改进的普通三轴仪上进行非饱和土的强度试验。试验中控制含水量不变, 同时保证气压消散, 以模拟工程施工期间气压消散快、水压消散慢的工程实际特点。其次, 根据试验结果分析含水量对非饱和土强度的影响, 建立非饱和土的实用强度公式。试验结果表明: 随着含水量的增大, 强度明显减小, 表明含水量对强度的影响较大; 且在一定含水量范围内, 强度指标随含水量的增大线性减小, 并在此基础上建立了引入含水量的非饱和土实用总应力强度公式。公式运用时由土层含水量的分布确定强度, 避免吸力的量测和计算的困难, 简单实用。

**关键词:** 土力学; 强度; 含水量; 非饱和土; 三轴试验

**中图分类号:** TU 447

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)07 - 1499 - 05

## VARIATION OF UNSATURATED SOIL STRENGTH WITH WATER CONTENTS

LING Hua, YIN Zongze

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The variation of the strength of unsaturated soil with water contents is studied; and the practical strength formula is developed. To study the relationship between the strength and the water content, it is necessary to keep the water content constant in the test. The pore air pressure dissipates quickly and the pore water pressure does not have such behavior. To study the problem, it is necessary to guarantee that the pore air pressure has dissipated completely in the test, and to adjust the general triaxial test apparatus to strength tests of unsaturated soil. The test procedure and control measures to realize the above two test aims are put forward. Secondly, based on the test results, the influences of water contents on strength are analyzed. It can be easily found that the cohesion and the angle of internal friction of unsaturated soil decrease linearly with the increase of water content. Then, the total stress strength formula of unsaturated soil is established. If the water content distribution of soil strata is known, the strength can be easily obtained by the presented formula, i.e. the difficulty of measuring and calculating suction pressure can be avoided. For the water content can be easily obtained, the presented formula is convenient and practical.

**Key words:** soil mechanics; strength; water content; unsaturated soil; triaxial test

## 1 引 言

非饱和土的强度大于饱和土的强度, 大多数强

度公式, 如著名的 Bishop 有效应力强度公式<sup>[1]</sup>和 Fredlund 的双应力变量强度公式<sup>[2]</sup>, 都是含有吸力项的, 反映吸力对强度的贡献。但是, 控制吸力的室内试验代价昂贵、非常耗时; 至于吸力的现场量

**收稿日期:** 2006 - 09 - 08; **修回日期:** 2007 - 01 - 24

**作者简介:** 凌 华(1977 -), 男, 1999年毕业于南京工业大学工业与民用建筑专业, 现为博士研究生, 主要从事非饱和土土力学和复合桩基等方面的研究工作。E-mail: lyzzxzh@sina.com

测更加困难，即使世界范围内积累的实测资料也很少<sup>[3]</sup>；在理论分析和数值计算中要获得吸力，就涉及到现阶段仍不成熟且也比较复杂的非饱和土固结模型。正因为吸力量测和计算的困难，将吸力作为变量的非饱和土强度公式未能得到广泛的实际运用。

近年来，不少学者提出关于确定强度的实用方法，如通过水分特征曲线预测非饱和土的强度<sup>[4]</sup>。但是严格地讲，这种方法应考虑水分特征曲线的诸多影响因素，特别是土体的应力状态和滞回特性<sup>[5]</sup>。龚壁卫等<sup>[6]</sup>的试验表明，在干湿循环过程中，相同的吸力具有不同的强度贡献。这样所要进行的水分特征曲线测试的试验内容还是比较多的，如孙树林和王利丰<sup>[7]</sup>进行5个等正应力下的水分特征曲线测试试验。还有一种实用方法是建立膨胀力与非饱和和膨胀土的强度的关系<sup>[8, 9]</sup>。

实际工程中，含水量(或饱和度)数值非常容易确定。直接研究非饱和土的强度随含水量的变化，建立引入含水量的强度公式，这种方法虽然是近似的和经验性的，但由土体含水量分布就可方便地确定强度，非常实用，也避免吸力量测和计算的困难。本文在改进的应力控制式的普通三轴仪上进行非饱和土强度试验，并建立实用非饱和土总应力强度公式。

## 2 试验要求与方法

### 2.1 试验要求

研究非饱和土的强度随含水量的变化，试验中当然要求试样的含水量保持不变，即不排水。另外，在工程施工期间，孔隙气压是能够迅速消散的，而水压的消散却比较缓慢。H. Rahardjo<sup>[10]</sup>指出，对于大部分非饱和土土体，气压消散几乎是瞬时完成的。为模拟施工期间的这一工程实际特点，试验中还要要求气压消散。

因此，试验中要控制含水量不变，同时还要保证气压消散。

### 2.2 试验方法

考虑到经济利益和时间因素，本文选择在应力控制式普通三轴仪上进行非饱和土的强度试验，试验仪器见图1。

(1) 为保证孔隙气压完全消散，试验中应始终打开与试样帽连接的排气阀门。可在试样顶部和试样帽之间平铺一层薄砂，以使孔隙气能够迅速排

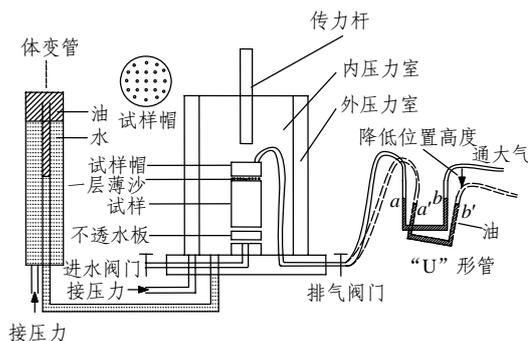


图1 三轴仪简图

Fig.1 Diagram of general triaxial apparatus

出土体。

试验过程中降低与排气阀门连接的“U”形管的右端位置，维持“U”形管两端油液面相齐平，就保证孔隙气压与大气压力的平衡，控制孔隙气压为0。另外，“U”形管内的油，也可防止试样水分的散发。

(2) 控制含水量不变，即试样应不排水。打开排气阀门，水也有可能排出土体。但是对于饱和度较低的非饱和土，气压消散快，水压消散非常缓慢。而在试验中，当10 min内轴向应变小于0.125%时，认为加载稳定，再施加下级荷载。在这种稳定条件下，可保证水不排出土体，同时气压也能消散。

对于含水量较大、饱和度较高的非饱和土试样，在加围压和逐级加载过程中，应仔细观察与试样帽连接的软管中是否出现水珠。当水珠出现时，减少加载增量和放缓加载速度，尽量做到不排水。也可预估在最大围压下，最大偏应力下体变的范围，土体体积变化应小于土中气体的体积。值得说明的是，缪林昌等<sup>[11]</sup>的非饱和土普通三轴排水剪试验结果表明：即使是饱和度高达92%，试验前后含水量总体上不发生变化，只是在试样不同高度位置上有所差异，但也不大。

试验中水压力也发生变化，但由非饱和土土力学知识可知，变化应不大，这也正与工程施工期间的水压消散的特点吻合。由于试验的主要目的是为分析含水量对强度的影响，以建立引入含水量的总应力强度公式，因此水压是否消散和消散多少不是所关心的关键问题。

(3) 可安装体变管来测量双层压力室的内压力室的水量变化，获得土体的体积应变，以研究非饱和土的应力-含水量-应变关系。

对于饱和度不太高的非饱和土，采取上述试验方法，试验能达到气压消散和含水量不变的要求。

对于饱和度太高的非饱和土, 气和水同时排出土体, 气压和水压的消散速度相差不大, 保持含水量不变和保证气压消散这两者不能同时满足, 因此文中试验方法不适用于高饱和度的非饱和土。

### 3 试验结果与分析

土样取自蚌宁高速蚌明段, 共制备 20 个试样。各试样的干密度、孔隙比相同, 其中  $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $e = 0.8$ 。试样以含水量分为 5 组, 含水量分别为 17.2% ( $S_r = 58.1\%$ ), 18.5% ( $S_r = 62.4\%$ ), 21.1% ( $S_r = 71.2\%$ ), 23.9% ( $S_r = 80.7\%$ ) 以及 26.7% ( $S_r = 90.1\%$ )。每组试样分别施加围压 100, 200, 300, 400 kPa 后一夜, 待排气完成后, 逐级加载至试验结束。

各组含水量试样的三轴剪切试验结果见图 2; 饱和度为 90.1% 的试样试验前后的含水量值见表 1, 表明按上述试验方法, 可较好地控制试样含水量不变。

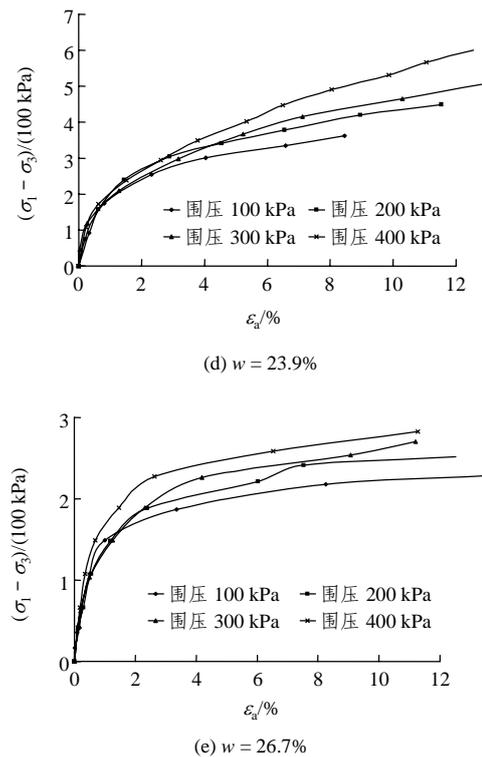
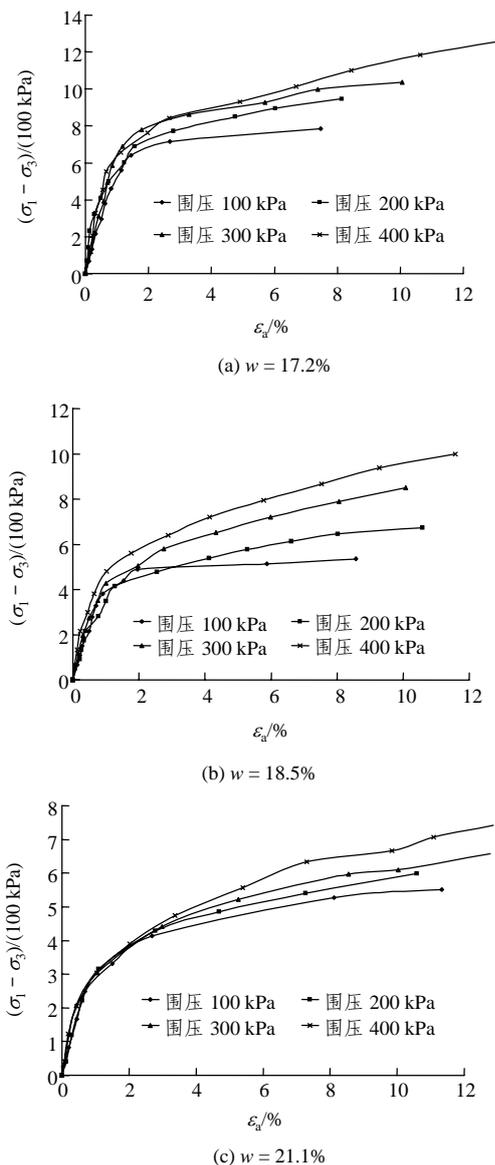


图 2 不同含水量三轴剪切试验结果

Fig.2 Results of triaxial shear tests with different water contents

表 1 剪切前后  $w$  对比

Table 1 Comparison between water contents  $w$  before and after shear tests

$\sigma_3/\text{kPa}$	剪切前 $w/\%$	剪切后 $w/\%$
100	26.75	26.74
200	26.85	26.65
300	26.70	26.60

由图 2 可明显观察到: 非饱和土的抗剪强度随着含水量的增大而明显减小, 这表明水分对强度的剧烈影响。

### 4 非饱和土总应力强度公式

点绘不同含水量下非饱和土的强度包线, 汇总至图 3。可发现  $c$ ,  $\varphi$  随含水量  $w$  变化, 有

$$\tau_f = c(w) + \sigma \tan \varphi(w) \tag{1}$$

总应力强度指标  $c$ ,  $\varphi$  与含水量的关系见图 4 和 5。由图 4, 5 可知,  $c$ ,  $\varphi$  与含水量的关系可线性表述为

$$\left. \begin{aligned} c &= c_{50} + k_c (w - w_{50}) \\ \varphi &= \varphi_{50} + k_\varphi (w - w_{50}) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

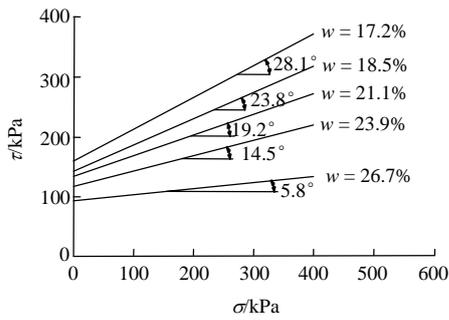


图3 强度包线

Fig.3 Strength envelopes

式中： $c_{50}$  为饱和度正好等于 50% 时的黏聚力(饱和度为 50% 时，含水量等于 14.81%， $c_{50}=172.80$  kPa)； $k_c$  为图 4 所示的直线斜率，且  $k_c = -6.506$ ； $\varphi_{50}$  为饱和度等于 50% 时的内摩擦角，且  $\varphi_{50}=33.17^\circ$ ； $k_\varphi$  为图 5 中所示的直线斜率，且  $k_\varphi = -2.214$ 。

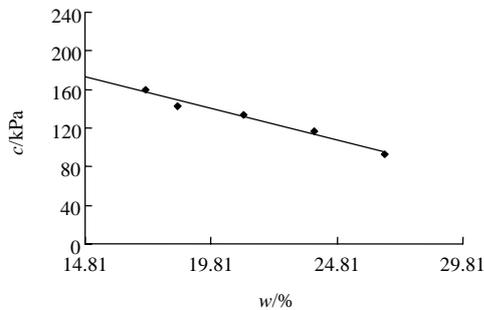


图4 c 与 w 的关系

Fig.4 Relationship between c and w

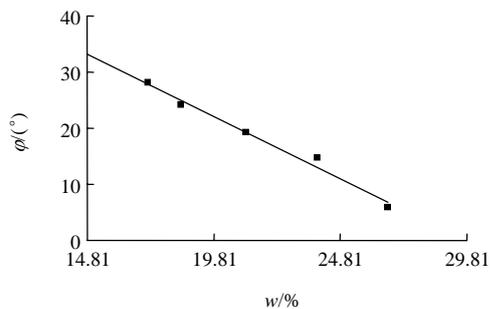


图5 φ 与 w 的关系

Fig.5 Relationship between φ and w

式(2)中  $k_c$ ， $k_\varphi$  为负值，反映非饱和土强度随含水量的增加而降低。上述 4 个参数，可由几组等含水量普通三轴试验共同确定。另外，式(2)确定强度指标时，含水量不带百分号。当然也可选择其他饱和度时的强度指标为标准，如饱和度等于 60% 或 70% 时的强度指标。

试验中要求气压消散和含水量不变，当土太干时，土能被视作干土，虽然能满足试验要求，但强

度指标与含水量的关系可能不满足线性关系；土太湿时，试验要求不能得到完全满足。因此式(2)的适用范围，仅比试验用土的饱和度取值范围适当放宽，建议取  $50\% \leq S_r \leq 92\%$ 。

在实际工程中，含水量的数值非常容易得到，钻孔取样后通过简单的室内试验便可确定。因此式(2)的运用是非常方便的，由土层含水量分布就可方便地确定强度，避免吸力的量测和计算困难。试验要求孔隙气压消散，这模拟工程施工期间孔隙压力消散的特点，因此式(2)特别适用于施工期间的稳定计算。

当然，影响非饱和土的强度因素众多，如土的种类、土的密度等且也与试验方法有关。如缪林昌等<sup>[11]</sup>通过三轴试验认为膨胀土的吸附强度与饱和度的倒数呈线性关系；且通过直剪试验<sup>[12]</sup>认为膨胀土的强度指标的对数与含水量呈直线关系；龚壁卫<sup>[13]</sup>通过固结快剪试验得到膨胀土的内摩擦角与含水量呈幂函数关系，但是黏聚力与含水量的关系曲线存在突变，难以进行曲线拟合。这些关系或规律与本文试验得出的强度指标与含水量呈线性关系不相同。但是总的规律一致，即非饱和土的强度随含水量的增大而降低。在实际工程中，可仿照本文强度公式的建立方法：尽量模拟现场实际情况情况进行试验，由试验结果研究强度随含水量的变化，建立强度或强度指标与含水量(或饱和度)的关系式，以运用于工程实践。

## 5 算例

对于大多数非饱和土工程，目前较普遍的做法是将非饱和土看成是饱和土，用饱和土的计算方法和模型参数来计算土体的应力和变形。非饱和土的强度要大于饱和土的，在工程中可运用这一特点，安全经济地进行设计与施工。下面用一算例来反映土体含水量的不同对土坡稳定的影响。

设有一均质土坡，高  $H = 36$  m， $\gamma = 19.5$  kN/m<sup>3</sup>，如图 6 所示。

计算以土体饱和度的不同共分为 4 种情况：(1)  $S_r = 60\%$ ；(2)  $S_r = 70\%$ ；(3)  $S_r = 80\%$ ；(4)  $S_r = 90\%$ 。各饱和度下的强度指标根据式(2)求得，参数同本文试验用土参数。采用河海大学的 SLP 程序，用简化 Bishop 条分法，对上述情况进行电算。计算结果也见图 6，图中  $O_{60}$  表示饱和度为 60% 的土体的

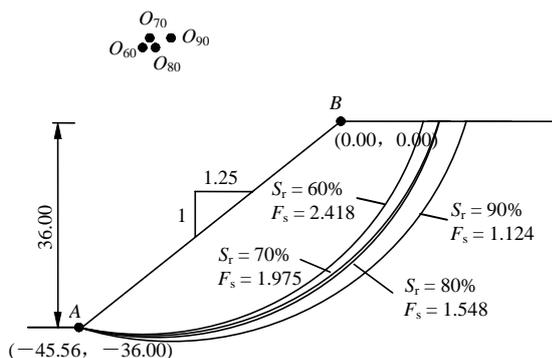


图 6 最危险滑弧位置(单位: m)

Fig.6 Positions of the most dangerous sliding circle(unit: m)

危险滑弧的圆心位置, 点 A 为滑弧下端位置。由图 6 可知: 随着含水量的增加, 土坡的安全稳定系数逐渐降低; 随着含水量的增加, 最危险滑弧的位置逐渐移向土体内部。

## 6 结 论

(1) 在普通三轴仪上进行非饱和土的强度试验。试验结果表明, 非饱和土的强度随含水量的增大而减少。

(2) 提出引入含水量的非饱和土总应力强度公式, 共 4 个参数, 由几组等含水量普通三轴试验共同确定。

(3) 公式引入含水量, 避免吸力的量测和计算的困难, 运用非常方便, 同时也能反映施工期间非饱和土气压能够迅速消散、短期内水压变化不大的特点。

### 参考文献(References):

[1] BISHOP A W, ALPAN I, BLIGHT G E, et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils[C]// ASCE Conference on Shear of Cohesive Soils. Boulder, CO: University of Colorado, 1960: 503 - 532.

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

[3] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. Geotechnique, 2003, 53(2): 143 - 157.

[4] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic

curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440 - 448.

[5] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 129 - 136.(BAO Chenggang, ZHAN Liangtong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 129 - 136.(in Chinese))

[6] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207 - 209.(GONG Biwei, ZHOU Xiaowen, ZHOU Wuhua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 207 - 209.(in Chinese))

[7] 孙树林, 王利丰. 饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1 932 - 1 935.(SUN Shulin, WANG Lifeng. Comparison of shear strength between saturated and unsaturated sandy silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1 932 - 1 935.(in Chinese))

[8] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 20 - 27.(LU Zhaojun, WU Xiaoming, SUN Yuzhen, et al. The role of swelling pressure in the shear strength theory unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 20 - 27.(in Chinese))

[9] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1 019 - 1 013.(TAN Luorong, KONG Lingwei. Study on strength behavior of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1 019 - 1 013.(in Chinese))

[10] RAHARDJO H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soils[Ph. D. Thesis][D]. Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan, 1990: 259 - 269.

[11] 缪林昌, 殷宗泽, 刘松玉. 非饱和膨胀土强度特性的常规三轴试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(1): 121 - 125.(MIAO Linchang, YIN Zongze, LIU Songyu. Research on strength characteristics of unsaturated expansive soils based on general triaxial test[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2000, 30(1): 121 - 125.(in Chinese))

[12] 缪林昌. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71 - 75.(MIAO Linchang. Relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 71 - 75.(in Chinese))

[13] 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): 19 - 22.(GONG Biwei. Discussion on shear strength of total stress of unsaturated compacted expansive soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(3): 19 - 22.(in Chinese))