

文章编号: 1007-2993(2010)05-0243-05

非饱和抗剪强度指标 c 、 φ 值与含水率 w 的关系

李金玉^{1,2} 杨庆^{1,2} 孟长江^{1,2}

(1. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁大连 116085;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116085)

【摘要】 非饱和土力学已经确认了基质吸力与非饱和土的强度指标有关, 而基质吸力与含水率有着密切的关系。通过理论和三轴剪切试验分析, 探讨了非饱和和残积土抗剪强度指标 c 、 φ 与含水率 w 变化的一般规律, 同时结合已经推出的土水特征曲线关系, 探讨抗剪强度指标 c 、 φ 与基质吸力 μ 的变化的一般规律。结果表明: 随着非饱和土含水率 w 增加、基质吸力 μ 的减小, 黏聚力 c 有减少的趋势, 内摩擦角 φ 变化不大。通过线性回归分析, 黏聚力与含水率成半对数线性关系, 黏聚力与基质吸力成线性关系。现有的非饱和土实用公式精确性较差, 非饱和土抗剪强度指标有待进一步的研究与完善。

【关键词】 非饱和土; 含水率; 黏聚力; 基质吸力; 抗剪强度指标; 土水特征曲线

【中图分类号】 TU 411.7

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2010. 05. 007

Relationship Between Water Content w and Unsaturated Soil Strength Indices c and φ

Li Jinyu^{1,2} Yang Qing^{1,2} Meng Changjiang^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116085 Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore

Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116085, Liaoning, China)

【Abstract】 It is proved that shear strength of unsaturated soil is related to matric suction. However matric suction has close relationship with water content. Based on the results of the laboratory test and theoretic analysis, the effect of water content on unsaturated soil shear strength indices c and φ is investigated. At the same time, the effect of matric suction on unsaturated soil shear strength indices c and φ is discussed by the soil-water characteristic curve (SWCC). Based on the tests, the value of c decreases as the value of water content w increases and the value of matric suction μ decreases. The value of φ has little change. By linear regression analysis, the conclusion is indicated that cohesion has semilog linear relationship with water content and cohesion is directly proportional to matric suction. The precisions of the previous aren't satisfied and further research is needed. With the development of unsaturated soil mechanics, researches on unsaturated soil shear strength indices should be strengthened.

【Key words】 unsaturated soil; water content; cohesion; matric suction; shear strength indices; soil-water characteristic curve

0 引言

土体强度是土体工程性质最直观的体现, 人们关心土体工程性质在很大程度上体现在对土体强度的考虑上^[1]。含水率与土体强度的关系很早以前就引起岩土工程界的关注, 在广大北方地区, 由于地下水位比较低, 施工范围内的土质以非饱和土为主, 含水率的改变对非饱和土强度的影响更为明显, 然而, 现有的实验结果初步表明, 含水率与非饱和土的强度

绝不是简单的线性关系或此消彼涨的关系^[2-4]。如何从定量的角度建立含水率与非饱和土强度的关系, 对于岩土工程设计及稳定性预测具有重要的意义。

土体边坡的稳定性在很大程度上取决于土的抗剪强度指标 c 、 φ 值, 虽然影响土的抗剪强度指标的因素有很多, 土体的结构、密度、含水率等因素都与抗剪强度指标有很大的联系, 但是对于某一土体工程来说, 土体的结构与密度在局部范围内的变化不

基金项目: 国家自然科学基金资助项目: 非饱和膨胀土强度与本构模型的试验研究与理论分析 (50679015)

作者简介: 李金玉, 1981 年生, 男, 汉族, 河南新乡人, 博士研究生。主要从事非饱和土强度及边坡稳定方面的研究。E-mail: lijinyu6@sina.com

会太大,相对而言,含水率的变化对强度参数的影响可能要大于其它因素,尤其对非饱和土体来说,含水率的变化直接影响了非饱和土的一个重要的指标—基质吸力^[5]。很多学者研究表明,基质吸力与非饱和土体的表观黏聚力有关,而表观黏聚力是土体总黏聚力的一部分^[6],因此,含水率的变化对非饱和土体的强度参数有很大的影响,进而对非饱和土体的工程性质有明显的影 响。为此,作者在室内通过三轴剪切试验,就含水率(饱和度)的变化对土体抗剪强度参数的影响进行了研究。

1 非饱和土抗剪强度理论

非饱和土具有不同于饱和土的强度特性,由于非饱和土的颗粒空隙中除了有孔隙水存在外,还有孔隙气体存在。水气交界面处的表面张力,使孔隙中的水与气具有不同的压力,使得非饱和土强度的研究变得复杂起来。

非饱和土的强度理论研究已有近 40 年的历史,它以 Mohr-Coulomb 准则为基础。目前非饱和土的强度理论公式中有 2 类已被岩土界广泛认可。

1) Bishop^[7]公式

$$\tau_f = c' + [(\sigma - \mu_a) + x(\mu_a - \mu_w)] \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ_f 为饱和土的抗剪强度; c' 和 φ 分别为非饱和土的有效黏聚力和有效内摩擦角; σ 为总应力; μ_a 为孔隙气压力; μ_w 为孔隙水压力; x 为与饱和度有关的有效应力参数,其值介于 0 和 1 之间,当饱和度为零时, $x=0$;当饱和度为 100 % 时, $x=1$; $(\sigma - \mu_a)$ 为净法向应力; $(\mu_a - \mu_w)$ 为基质吸力。

Bishop 理论已为许多学者接受,但由于吸力及参数不易测定,所以未能大量应用。

2) Fredlund 和 Mogerstern^[8]等提出来的双应力状态变量公式

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \varphi + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: φ^b 为随吸力变化的内摩擦角。

由式(1)和式(2)可见,非饱和土的抗剪强度有 3 部分组成:即公式中的 c' 代表土的真黏聚力,或称结构黏聚力; $(\sigma - \mu_a) \tan \varphi$ 代表土受到外部有效压力时所产生的摩擦力,可简称为摩擦强度; $(\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b$ 代表土由于吸力和负孔隙水压力所产生的附加摩擦强度,可简称为吸附强度。

2 试验研究

2.1 试验原理

非饱和土抗剪强度理论都需要测定基质吸力,但由于基质吸力测量一般都比较复杂,不易取得。特别对于参与实践生产的单位而言,不但仪器设备、

技术力量上不具备条件,而且试验时间比较长(大量非饱和土试验表明,一个非饱和土样抗剪强度参数的获取至少需要一个月的时间)。因此,上面提到的大多数非饱和土强度公式仅有理论价值而在实际中鲜有应用。所以,在实际工程中,由于受测试手段和技术条件的限制,我们处理非饱和土强度问题采用象饱和土强度问题一样,通过试验获取它的黏聚力值和内摩擦角大小。不过,对于非饱和土问题这里的黏聚力值和内摩擦角大小,是和饱和土问题有很大区别的,非饱和土中的黏聚力值和内摩擦角已不是一个确定的值,他们中包括基质吸力和土的结构贡献,且随含水率发生变化^[9]。但我们可以将前面的公式统一写成类似于 Mohr-Coloumb 强度公式:

$$\tau_f = c_{\text{total}} + \sigma \tan \varphi_{\text{total}} \quad (3)$$

式中: c_{total} 定义为广义黏聚力; φ_{total} 定义为广义内摩擦角。

试验采取先饱和和再脱湿的方式获取不同含水率(饱和度)条件下的土样,然后得到含水率与抗剪强度的关系及规律性。先取工程中接触比较普遍的残积土,经过除渣、碾压、制样等一系列前期准备后制备好试样用重塑土样,然后进行抽气饱和,之后将试样放入 TEMPLE 仪中,加一定的气压值,也就是基质吸力值由土水特性原理控制试样的含水率,根据实际边坡中土体含水率和饱和度变化的实用范围,制取不同饱和度条件下的试样。由于是重塑土样,为了更加接近实际工程中土样的状态,采用施工期间常用的固结快剪试验,获得不同含水率条件下的土样抗剪强度值。分析整理后,可获得含水率变化与非饱和状态下土样的抗剪强度关系

2.2 试样的物理性质

土样采自辽宁大连常见的残积土。在试样制备过程中控制干密度,使其等于工程实际干密度(1.2 g/cm^3),其基本物理性质见表 1。

表 1 土样物理性质指标

性 状	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	相对 密度	初始含水率 /%
残积土	39.2	23.1	16.1	2.70	18

2.3 试样选择

为了深入研究含水率的变化对土体抗剪强度参数的影响,采用室内三轴固结不排水剪切试验,测出不同含水率条件下非饱和土体的抗剪强度参数。土样为重塑残积土,设计做五组土样,三个土样为一组,共十五个土样,各组土样的平均含水率(饱和度)

分别为 16.48% (71.65%)、18.83% (81.87%)、19.62% (85.30%)、20.43% (88.83%)、23% (100%)。试样初始含水率为 18%。非饱和土样的制备过程:先将试样统一进行抽气饱和,然后分别放入 TEMPLE 仪中,利用土水特征曲线理论,设定一定的基质吸力值,也就是在一定的气压条件下,可获得预定的含水率。试验仪器采用南京电力自动化设备厂生产的 SJ-1B 型三轴仪,试样用土样加工器制成圆柱状,直径 3.91 cm,高度 8 cm。其中土样的制备和三轴剪切试验均按照《土工试验规程》(SL 237—1999)完成的。

2.4 试验结果

试验过程采取固结不排水剪切方式,剪切速率设定为 0.12 mm/min,对试验破坏值的选择,以 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的峰值作为破坏点,如果土体没有明显的峰值点,以应变 15% 时的主应力差作为破坏点。每组土样取三个试样,当每个土样达到峰值或应变达到 15% 时,取其峰值,然后作包络图,可得到不同含水率条件下非饱和土样的剪切强度参数值。试验结果见表 2,其中的 c, φ 值是 Microsoft Origin 软件标定的,精度取 0.01。

表 2 含水率与剪切强度参数的关系

饱和度/%	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
71.65	16.48	39.66	25.95
81.87	18.83	24.82	24.87
85.30	19.62	20.88	26.20
88.83	20.43	16.72	24.61
100	23	7.84	24.89

根据已得到的土水特征曲线关系式:

$$w = 33.05 - 2.91 \ln(\mu + 18.45) \quad (4)$$

式中: w 为含水率; μ 为基质吸力。

可以推知基质吸力与含水率以及内摩擦角的对应关系,见表 3。

表 3 基质吸力与剪切强度参数的关系

基质吸力/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
278.68	39.66	25.95
114.05	24.82	24.87
82.55	20.88	26.20
58.01	16.72	24.61
13.16	7.84	24.89

2.5 结果分析

由于土样是在气压作用下逐渐不饱和的,所以土样孔隙中必然含有气体,因此前四组土样的抗剪强度必然包含吸力对其的贡献。随着含水率、饱和

度的增大,基质吸力的逐渐降低,强度是逐渐减小的。饱和度从 71.65% ~ 100%,黏聚力减少 80.23%,但内摩擦角变化不大,含水率和基质吸力的变化对强度的影响主要表现在对黏聚力的影响上,对内摩擦角影响不大。

2.5.1 含水率与黏聚力的关系

对黏聚力取对数,通过线性回归分析,可以得到黏聚力和含水率的关系方程如下:

$$\text{Lgc} = A + B \times w \quad (5)$$

式中: A, B 为土样试验结果确定的回归参数,本次试验中, $A = 3.416, B = -0.108$,得到抗剪强度黏聚力与含水率的关系式为:

$$\text{Lgc} = 3.416 - 0.108w \quad (6)$$

相关系数 $R = 99.33\%$,黏聚力与含水率的关系(见图 1)。

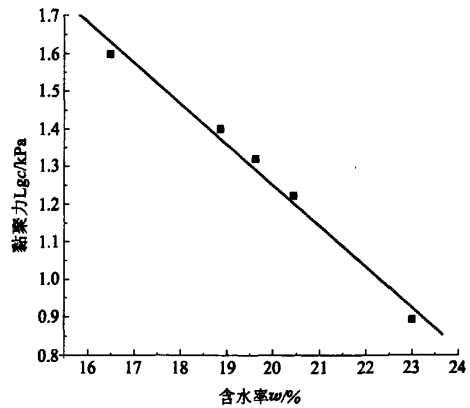


图 1 含水率与黏聚力的关系曲线

2.5.2 含水率与内摩擦角的关系

根据表 2 可以得到含水率与内摩擦角的关系(见图 2)。

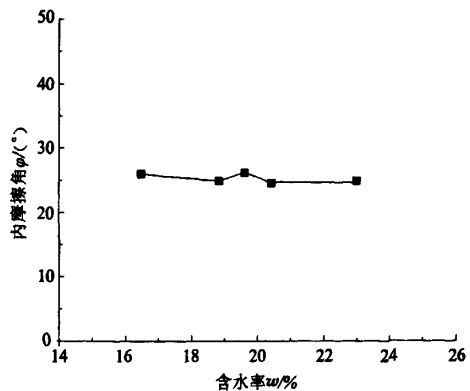


图 2 含水率与内摩擦角的关系曲线

2.5.3 基质吸力与黏聚力的关系

同样通过线性回归分析,可以得出黏聚力和基

质吸力的关系方程如下：

$$c = E + F\mu \quad (7)$$

式中： E 、 F 为土样试验结果确定的回归参数，本次试验中， $E=9.635$ 、 $F=0.113$ ，得到抗剪强度黏聚力与基质吸力的关系式为：

$$c = 9.635 + 0.113\mu \quad (8)$$

相关系数 $R=97.96\%$ ，黏聚力与基质吸力的关系(见图3)。

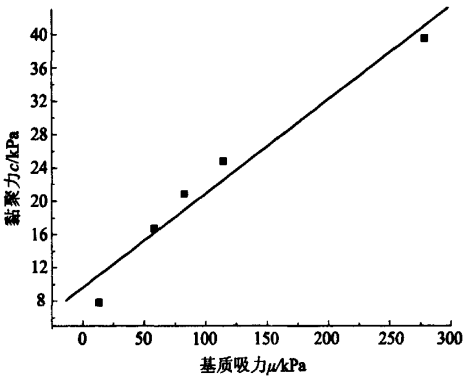


图3 基质吸力与黏聚力的关系曲线

2.5.4 基质吸力与内摩擦角的关系

根据表3可以得到基质吸力与内摩擦角的关系(见图4)。

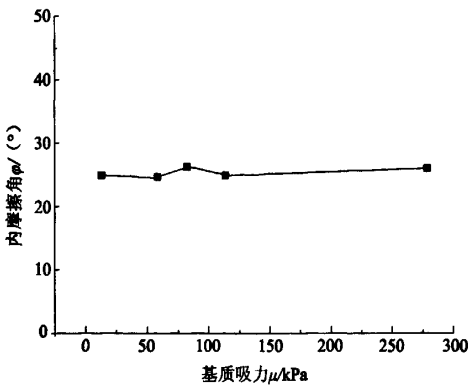


图4 基质吸力与内摩擦角的关系曲线

3 结论

随着含水率和基质吸力的变化，土体内摩擦角变化不大，也就是说含水率和基质吸力的变化对内摩擦角影响不大。所以，为了以后实际生产中计算方便，对饱和土体和非饱和土体统一取饱和土的内摩擦角进行计算。

1)对于非饱和和重塑残积土而言，土样含水率的变化与黏聚力的变化有较好的函数关系，即两者成半对数线性关系；基质吸力与黏聚力成线性关系。

2)随着含水率的增大，基质吸力的降低，土样的

黏聚力随之下降，且变化幅度较大。

3)含水率的变化与内摩擦角的变化无规律可循，且变化幅度较小，因此可以认为含水率的变化对土样内摩擦角的变化影响不大。

4)由于试验条件的限制，本实验中对土样人工仅配制了5种不同的含水率，这样试验得到 c 和 φ 与 w 的关系曲线中每条曲线仅有5个点，造成曲线不够完整，所以未能得到非饱和的抗剪强度指标 c 、 φ 值随含水 w 变化的完整规律，有待更深一步的研究。

4 理论解释

非饱和土的抗剪强度与含水率的关系，要作出理论解释就要了解非饱和土中的孔隙水的存在状态。在非饱和土中，孔隙水有三种存在方式：①吸附在土粒子表面的结合水，因所占的含水率一般不变，可视为土粒子的一部分；②包围在土粒子接触点周围形成弯液面的自由水(以下称毛细水)，因在土孔隙内不是连续存在，所以只影响两土粒子接触点间的作用力；③充满土孔隙的自由水(以下称重力水)，因在土孔隙内连续存在，所以与土骨格、孔隙气一起分担传递作用于土界面上的垂直总应力。

根据上述土中水分的存在方式将非饱和土分为三种不同的非饱和形态：①封闭非饱和形态：孔隙水以结合水和重力水两种形式存在，空气仅以气泡的形式存在于水中，孔隙内只有水相连通，这时土的饱和度非常高；②悬垂水非饱和形态：孔隙内的自由水已充分排出，仅极少一部分以毛细水的形式保留下来，孔隙内只有空气相连通，这时土的吸力非常大；③过渡非饱和形态：实际中的土孔隙有大有小，大孔隙因吸力小而处于悬垂水非饱和形态，小孔隙因吸力大而处于封闭非饱和形态^[10]。

在不同的非饱和形态中，吸力有不同的作用效果见图5；为弄清它们的关系，考察图5中的三粒子土模型。

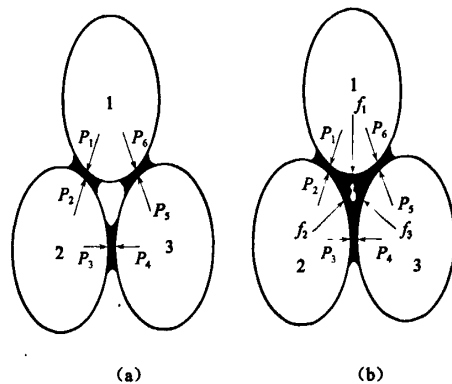


图5 三粒子吸力模型

当孔隙内弯液面水相互独立(即处于悬垂水非饱和形态)时(图 5(a)),对 1 号土粒子,由吸力引起的粒间压力 P_1, P_6 分别作用于该土粒子与其他两粒子接触面的垂直方向,不传递,所以仅有抑制土粒子滑动的作用(土粒子的滑动遵从摩擦准则),塑性变形是由土粒子间的滑动产生的,因此这种情况下吸力有抑制塑性变形提高土骨格刚性的作用。当孔隙内处于封闭非饱和形态时,(如图 5(b)),由吸力引起的压缩力 f_1 作用于连接该土粒子左右弯面连线的垂直方向,该力能传递(P_2, P_3 就是作为 f_1 的分力而存在的),所以与有效应力有相同的作用:一方面引起土体的压缩;另一方面抵抗土体的变形提高土骨格的刚性。毛细水作用面积上的吸力和重力水作用面积上的吸力分别被称为内部应力和有效应力。内部应力任何情况下都有保持土骨格稳定的作用,有效应力则不同。

如图 6 所示的四粒子土模型,当孔隙内只含毛细水时,同三粒子土模型一样,吸力(内部应力)有抑制土粒子滑动保持土骨格稳定的作用,当孔隙内充满重力水时,吸力(有效应力)使模型受剪处于不稳定的状态,这时由于重力无摩擦平衡,会发生变形急剧增加的现象(即湿陷)。

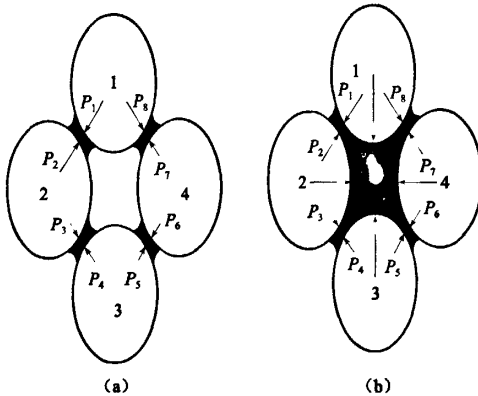


图 6 四粒子吸力模型

根据上述分析可知,在悬垂水非饱和形态中,吸力的增加只引起内部应力的增加,有效应力不变。在封闭非饱和形态中,吸力的增加等于平均有效应力的增加,太沙基有效应力原理基本适用。在过渡非饱和形态中,吸力的增加既使有效应力增加,又使内部应力增加。因此随着含水率的增加,吸力将逐步降低,有效应力以及内部应力减小,导致非饱和土抗剪强度指标减小。含水率研究非饱和土的强度和变形,实质上是研究如何定量确定由吸力产生的有效应力和内部应力。

参 考 文 献

- [1] 李兆平,张 弥,赵慧丽. 含水量的变化对非饱和土强度影响的试验研究[J]. 西部探矿工程,2001,71:1-3.
- [2] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报,1999,32(4):582-587.
- [3] 胡展飞,傅艳蓉. 基于不同初始含水量的软粘土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质,2001(1):38-42.
- [4] 沈珠江. 广义吸力与非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报,1996,18(2):1-9.
- [5] 包承刚. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):1-15.
- [6] 陈海明,班凤其,刘小伟. 非饱和土抗剪强度指标 c, φ 值与含水量 w 的关系[J]. 合肥工业大学学报,2006,29(6):736-738.
- [7] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils [J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [8] Fredlund D G, Rahardjo. 非饱和土土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:256-278.
- [9] 缪林昌,仲晓晨,等. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学,1999,20(2):71-75.
- [10] 汤连生. 结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨[J]. 中山大学学报,2000,39(6):583-588.

收稿日期:2010-04-28