

岩土工程

非饱和黄土强度特性的常规三轴试验研究

刘 春¹, 丁 力²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 兰州铁道学院土木工程学院, 兰州 740073)

[摘 要]以马兰黄土为例,对非饱和黄土的强度特性进行了常规三轴试验研究,根据试验结果,提出了非饱和黄土的吸力强度与饱和度之间的非线性关系表达式,并证实了非饱和黄土抗剪强度与含水量之间存在指数函数关系。

[关键词]非饱和黄土 常规三轴试验 吸力强度 非线性关系

[中图分类号]TU444 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2002)05-0089-03

黄土是一种特殊的第四纪陆相松散堆积物,覆盖了我国西北、华北等地区 64 万 km² 的疆土。位于西北地区的马兰黄土,在干旱半干旱及地下水深埋条件下,常常处于非饱和状态。非饱和黄土的强度特性较一般的粘性土更为复杂,其强度是黄土体抵抗剪切破坏能力的量度,也是黄土地基工程、边坡工程和洞室工程设计计算的重要参数。在西部大开发战略实施中,基础设施建设、生态环境改善均与黄土密切联系。因此研究非饱和黄土的强度特性极为重要。

1 非饱和土理论

非饱和土的抗剪强度研究开展较早的是美国,以后有很多学者对这一课题进行了研究,具有代表性的有 Bishop 和 Fredlund 的理论^[1]。

Bishop (1960) 提出如下以有效应力表达的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + x(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (1)$$

式中: c' 和 ϕ' 分别为有效粘聚力和有效内摩擦角; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; x 为有效应力参数。

Fredlund (1978) 提出了双变量公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

式中: ϕ^b 为抗剪强度随基质吸力 ($u_a - u_w$) 而变化的内摩擦角。

另外缪林昌^[2] (1999) 提出了双曲型吸力强度

公式

$$\tau_{us} = \frac{u_s}{a + \frac{a-1}{p_{at}} u_s} \quad (3)$$

根据这一理论可将非饱和土的强度表示为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \frac{u_s}{a + \frac{a-1}{p_{at}} u_s} \quad (4)$$

式中: u_s 为吸力; a 为试验参数; p_{at} 为大气压。

非饱和土的总粘聚力 c_{total} 可以表示为:

$$c_{total} = c' + \tau_{us} \quad (5)$$

其中吸力强度 τ_{us} 是本文的主要研究对象

2 非饱和黄土的常规三轴试验研究

由于非饱和土本身固有的复杂性,试验和测试都很困难。对于这种现状可以设想采用常规三轴试验方法进行黄土的强度特性研究,这样试验方法和设想既可被工程实践接受,又可推广到工程设计中。

2.1 土样的制备与实验方法

试验土样取自陕西关中地区的马兰黄土层,取土深度为 45 m。土样直径 40 mm、高 80 mm,分 4 层均匀击实,干密度为 1.47 g/cm³,含水量 w 分别为:10%、13%、16%、19%、22% 和 25%,对应的饱和度 S_r 分别为 31.5%、41%、50.4%、59.9%、69.3% 和 78.8%。共制备了 6 组 24 个击实样进行三轴试验,围压分别采用 50、100、150 和 200 kPa。

为了保持非饱和黄土试验含水量的稳定和均匀,每组试验制备好后,用橡皮膜密封后放入养护缸中养护 24 h 后再进行试验。试验采用常规三轴仪

[收稿日期]2001-12-11; [修订日期]2002-01-11; [责任编辑]李石梦。

[第一作者简介]刘 春(1972 年-),男,2000 年毕业于兰州铁道学院,获硕士学位,现为中科院武汉岩土力学研究所博士研究生,主要研究方向为边坡工程中岩土体强度的研究。

进行排水剪切试验,剪切速率为 $3.5 \mu\text{m}/\text{min}$ 。试验中对非饱和黄土在试验前后的含水量进行了测定,结果表明,土样的平均含水量变化不大,土样在剪切的过程中体积变形,主要是由于气体的压缩和排水及颗粒重新排列引起的,土样内部上、中、下部的含水量不再像试验前那样相同,剪切破坏后,在土样底部含水量稍高而顶部稍低。在试验中,土样的竖向应变超过 14% 即认为土样破坏。

2.2 试验数据

图 1 图 6 分别是饱和度分别为 31.5% 、 41% 、 50.4% 、 59.9% 、 69.3% 、和 78.8% 的非饱和黄土样围压分别在 50 、 100 、 150 和 200 kPa 下的三轴剪切强度包线,三轴剪切的试验结果见表 1。

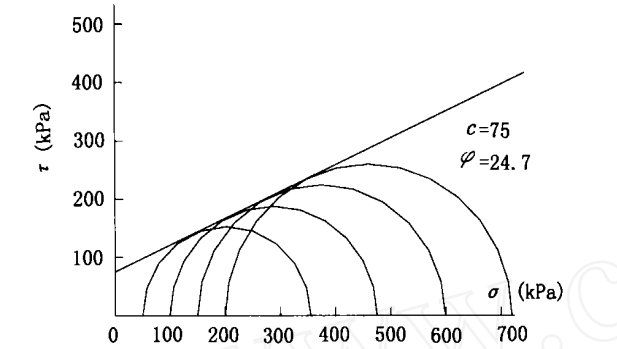


图 1 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 31.5\%$)

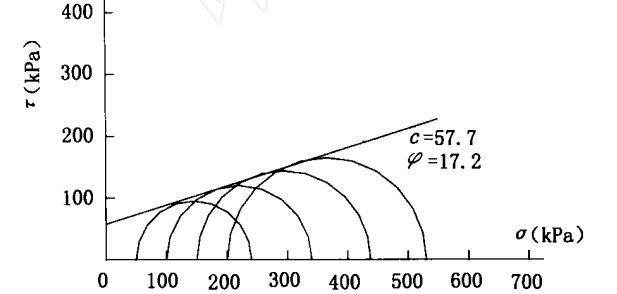


图 2 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 41\%$)

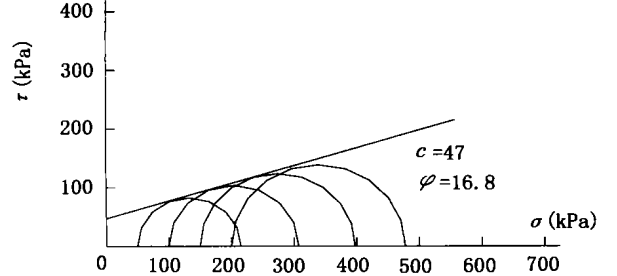


图 3 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 50.4\%$)

饱和黄土土样的强度参数 $c' = 10.8 \text{ kPa}$, $\phi' = 16.1^\circ$ 表 1 中的 c_{total} 是 c' 和吸力强度之和,吸力强度随饱和度变化而变化。从表 1 中可以看出,随着饱和度的增大,吸力强度减小。这一结论与已有的

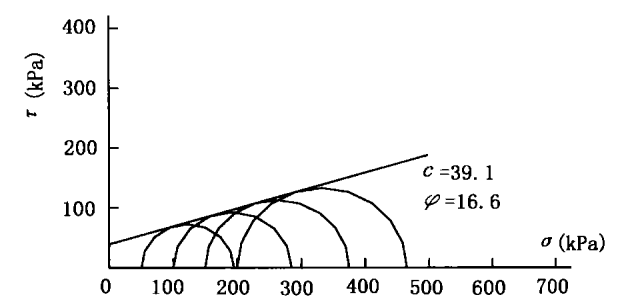


图 4 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 59.9\%$)

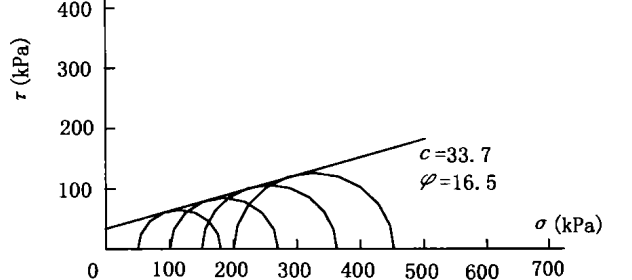


图 5 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 69.3\%$)

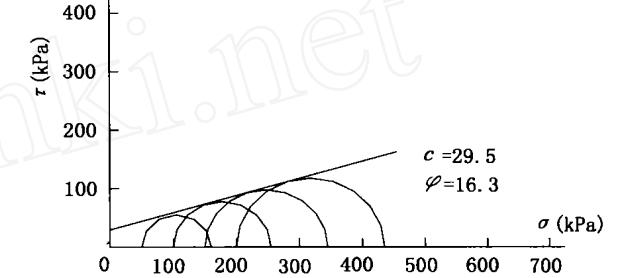


图 6 非饱和黄土三轴试验强度包线 ($S_r = 78.8\%$)

研究结果相一致^[3]

表 1 三轴剪切试验结果

含水量 (%)	饱和度 S_r (%)	c (kPa)	ϕ (°)
10	31.5	75	24.7
13	41	57.7	17.2
16	50.4	47	16.8
19	59.9	39.1	16.6
22	69.3	33.7	16.5
25	78.8	29.5	16.3

3 吸力强度与饱和度的关系

由 Drumright^[4]和 Rohm^[5]的研究成果可知, c' 和 ϕ' 与吸力无关,也就是与饱和度无关,因此非饱和黄土的强度变化主要是由于吸力强度的变化。从表 1 可知,随着黄土土样的饱和度从 31.5% 变化到 78.8% , ϕ 值的变化不大,而 c_{total} 的变化很大。由此可以看出,饱和度的变化主要对粘聚力产生影响。现将表 1 中的数据 c_{total} 按式 (5) 重新整理成吸力强度 τ_{cu} , 见表 2。

表 2 饱和度与吸力强度的数据表						
S_r (%)	31.5	41	50.4	59.9	69.3	78.8
τ_{us} (kPa)	64.2	46.9	36.2	28.3	22.9	18.7

如果将表 2 中的数据点绘在 $(1/S_r, \tau_{us})$ 坐标图上(见图 7),可以发现,这些点可以用一直线近似的拟合,这就是吸力强度与饱和度的非线性关系,而吸力强度与饱和度的倒数是线性关系,可以用以下直线方程来描述这种关系:

$$\tau_{us} = k/ S_r + c$$

(6)

式中: k, c 为试验参数。在 $(1/S_r, \tau_{us})$ 坐标图上 k 是斜率, c 是截距。对于非饱和黄土而言, $k = 24.26 \text{ kPa}$, $c = - 12.11 \text{ kPa}$ 。

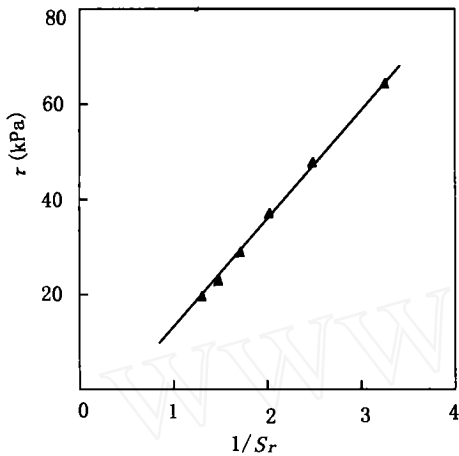


图 7 吸力强度与饱和度的非线性关系

4 总抗剪强度与含水量关系

据表 1 中的数据,经过分析,可以发现非饱和黄土的总粘聚力 c_{total} 与含水量 w 之间的关系,可以拟合为指数函数,见式(7) 及图 8

$$c_{total} = 131.63e^{-0.062\omega}$$

(7)

5 结 语

非饱和黄土随着土样的饱和度的增加,其吸力

强度降低,且饱和度与吸力强度呈非线性关系。这种非线性关系反映了黄土由于环境变化而表现为强度变化的特征。非饱和黄土的吸力强度与饱和度间非线性关系的建立,简化了非饱和土的试验方法,便于非饱和土理论在工程实践中的应用。非饱和黄土含水量与抗剪强度之间确实有指数函数关系,这为非饱和土体抗剪强度的研究提供了数量上的依据,这一规律是否适用于其他土质尚待进一步研究证实。

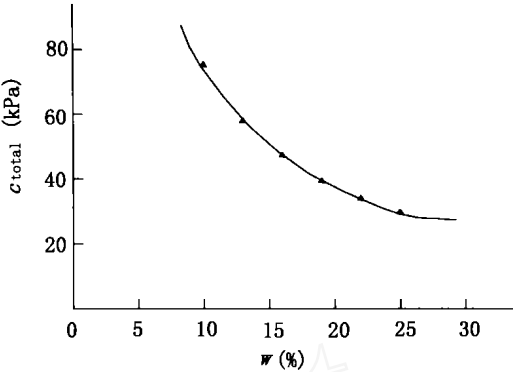


图 8 总粘聚力与含水量关系拟和曲线图

[参考文献]

[1] Fredlund D, H Rahardjo. 非饱和土土力学. 陈仲颐等译[M]. 北京:中国建筑业出版,1997,256278.

[2] 缪林昌,殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学,1999(3): 16.

[3] 缪林昌,等. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999,20(2):7175.

[4] Drumright E E, Nelson J D. The shear strength of unsaturated tailings sand[M]. The 1st International Conference on Unsaturated Soils, 1995,4550.

[5] Rohm S A, Vilar O M. Shear strength of unsaturated sandy soil [M]. The 1st International Conference on Unsaturated Soils, 1995,189195.

[6] 缪林昌,等. 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 2000,30(1).

[7] 党进谦. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土工程学报 1997,19 (2).

[8] 赵慧丽. 非饱和土抗剪强度研究方法的探讨[J]. 岩土工程技术 2001(3).

STRENGTH CHARACTERISTICS OF

UNSATURATED LOESS BASED ON GENERAL TRI- AXIAL TEST

LIU Chun¹, DING Li²

(1. Institute of and sil mechanics, The chinese Academy of scienll, Wuhan 430071, ;2. Lanzhou Railway College, Lanzhou 740073)

Abstract :In this paper , the strength characteristics of unsaturated loess are studied. Based on the general tri - axial test results the nonlinear relationship formula between suction strength and saturated degree is presented. The exponential function relationship between shear strength and water content of unsaturated loess are confirmed.

Key words :unsaturated loess ,general tri - axial test ,suction strength ,nonlinear relationship formula