

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.011

真三轴条件下原状黄土的强度与含水率的关系

方瑾瑾¹, 邵生俊¹, 冯以鑫²

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 在实际工程中, 吸力的量测比较困难, 而含水率容易确定, 研究原状黄土的强度与含水率的关系, 具有非常重要的理论价值。模拟土体的复杂受力状态, 利用真三轴仪对不同含水率的非饱和原状黄土进行了常含水率的等向固结和不同中主应力参数 b 值的剪切试验, 研究了非饱和原状黄土抗剪强度随含水率的变化规律。研究结果表明: 土体的抗剪强度随着含水率的增大而减小, 随着净围压和 b 值的增大而增大; 土体的黏聚力随着含水率的增大而线性降低, 而内摩擦角受含水率的影响不大; 内摩擦角随着 b 值的增大而减小, 而黏聚力随着 b 值的增大而增大; 并建立了不同 b 值条件下黏聚力与含水率的函数表达式。

关键词: 真三轴仪; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0314-07

Relationship between strength and water content of unsaturated intact loess based on true tri-axial tests

FANG Jinjin¹, SHAO Shengjun¹, FENG Yixin²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The suction is difficult measure but the moisture content is easy to determine in practical engineering. The study of the relationship between strength and water content of unsaturated intact loess is of important theoretical value in simulating the complex stress state of soil, with a series of isotropic consolidation and shear tests with different intermediate principal stress ratio b under constant water content performed on intact loess with various water contents by using unsaturated soil true tri-axial apparatus. The relationship between the strength and the water content is studied. Results show that the shear strength of soil decreases with the increase of water content, and increases with the net confining pressure and the ratio b ; the cohesion of unsaturated undisturbed loess has a linear decrease with the increase of water content, but the internal friction angle has little change with the change of water content; the internal friction angle decreasing with the increase of ratio b while the cohesion increases with the ratio b ; the function expression between the cohesion and the friction angle under different ratio b is established.

Key words: true tri-axial apparatus; the shear strength; the cohesion; the internal friction angle

工程实践证明, 非饱和土的强度较饱和土更为复杂, 其强度变化不仅与结构、吸力等因素的变化密切相关, 而且还与非饱和土所处的状态、外部压力及环境有关。如何认识非饱和黄土的强度特性, 是工程界和学术界所关心的难题。大多数强度公式, 如 Bishop 有效应力强度公式^[1] 和 Fredlund^[2] 的双应力变量强度公式, 都含有吸力项, 反映吸力对非饱和

土强度的贡献。但是, 由于非饱和黄土本身固有的复杂性, 其吸力的量测非常困难, 室内试验不仅耗时, 而且代价很高, 而一般施工单位也不具备现场测试吸力的条件。正是因为吸力量测的困难, 将吸力作为变量的非饱和土强度公式未得到广泛的应用。

针对这一现实问题, 许多学者避开吸力的量测, 研究了非饱和土抗剪强度随含水量的变化关系, 得

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272320)

作者简介: 方瑾瑾, 女, 博士生, 研究方向为非饱和土力学与黄土力学。E-mail: 286137393@qq.com

通讯作者: 邵生俊, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土动力学与黄土力学。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn

到了很多有价值的结论。黄琨等^[3]对原状土和重塑土进行直剪试验,研究了非饱和土抗剪强度随其含水率的变化规律。凌华等^[4]利用改进的应力控制式普通三轴仪进行非饱和土强度试验,建立了引入含水量的非饱和土总应力强度公式。缪林昌等^[5]通过直剪试验研究了膨胀土的强度与含水量的关系。然而,实际岩土工程中,土所受到的三个主应力的不同,往往是不同的,以上的研究成果多数没有考虑中主应力对土体变形和强度的影响,不能真实地反映土体的复杂受力状态。因此,本文在不改变土体本身物理性质的前提下,在改进的真三轴仪上进行非饱和黄土的强度试验,研究非饱和黄土的强度随含水率的变化规律。

1 研究方法

1.1 试样制备

本次试验用土取自西安市月登阁附近的 Q₃ 原状黄土,土样呈黄褐色,均取自地表以下 8 m 处的土层中。选取干密度误差小于 0.01 g/cm³ 的土样,切割成 7 cm×7 cm×14 cm 的长方体试样,其物理性质指标如表 1 所示。

表 1 土的物理性质指标
Tab.1 Physical parameters of loess

天然含水率 / %	干密度 / (g/cm ³)	比重	初始孔隙比 e ₀	液限 w _L / %	塑限 w _p / %	塑性指数 I _p
16.1	1.35	2.7	1.007	31.67	20.91	10.76

为了研究真三轴条件下非饱和原状黄土的强度随含水率的变化关系,整个试验过程中含水率保持不变,即本次试验为常含水率试验。对天然含水率的试样,通过增湿或减湿分别制备成含水率为 12.8% (饱和度 S_r = 34.32%)、16.1% (S_r = 43.16%)、17.8% (S_r = 47.72%)、20.3% (S_r = 54.42%)、36.2% (饱和含水率) 的 5 种试样。对低于天然含水率的试样,采用自然风干的方法,对高于天然含水率的试样,采用喷雾洒水的方法。达到配制所需含水率后,为了保证水分扩散均匀以及含水率保持不变,将试样密闭放置在保湿缸中 96 h 以上。饱和样采用抽气饱和的方法制备,最终饱和度均达到 95% 以上。

1.2 试验仪器和试验方案

试验仪器采用由西安理工大学水利水电学院岩土工程研究所邵生俊教授负责研制的真三轴仪。与常规三轴仪相比,该仪器最大的优点是能够实现

3 个轴向分别施加大小不同的主应力,且 3 个轴向分别产生应变,既能够真实地模拟土体的主应力状态,又可以在不同的应力路径下测试土体的力学特性。具体仪器结构及功能详见文献[6]。

西安理工大学真三轴仪具有一室四腔、竖向刚性加载和侧向液压囊柔性加载的特点,由主机、伺服步进电机液压加载系统和计算机自动控制系统三部分组成。主机的压力室呈长方体(70 mm×70 mm×140 mm),试样置于压力室中央,底部和顶盖均为刚性。压力室的侧面分别对应两组梯形侧压腔,用于放置柔性液压囊给试样侧向加压,且与液压/体变控制器连接。在压力室的竖向采用刚性板施加大主应力 σ_1 ,在水平面内的两个侧向分别采用两对柔性液压囊施加中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 (即净围压)。并在压力室四个棱角处和侧压腔之间设置能够径向弹性伸缩、水平向弹性转动的隔板,以使液压囊能够有效的适应试样的变形,在试验过程中可以分别独立地给试样施加荷载,达到互不干扰的目的。

对饱和试样,进行固结排水真三轴试验;对非饱和试样,进行常含水率真三轴试验。控制固结净围压分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa,试验过程如图 1 所示。

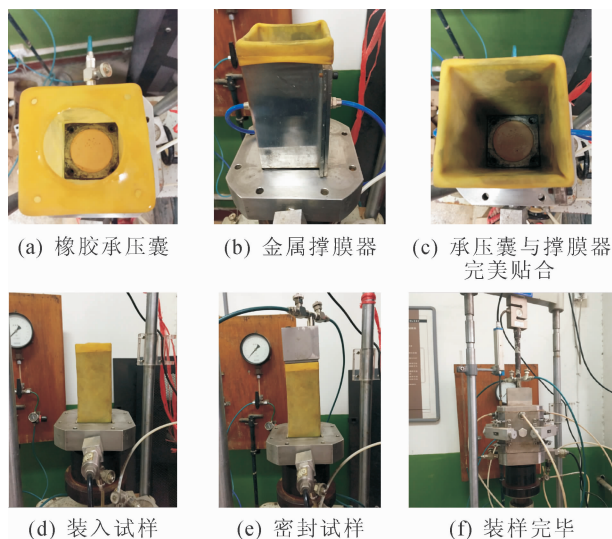


图 1 试验过程

Fig.1 Experiment process

通过查阅大量文献资料,并结合之前多次试验摸索,发现 20 h、24 h 和 30 h 吸力变化量均小于 0.5 kPa/h,故认为 20 h 以后吸力已经达到稳定。因此,本试验设定非饱和土 24 h 固结完成,吸力达到稳定。固结完成且吸力达到稳定后(吸力变化量小于 0.5 kPa/h),进入剪切阶段,设定中主应力比值分别为 0、0.25、0.5、0.75、1。为了保证非饱和土

孔隙压力的均匀消散,剪切速率应非常缓慢,设定为 0.005 mm/min。试验采用应变控制,设定试验结束条件为轴向应变达到 12%,吸力稳定后,试验结束。剪切过程符合非饱和土水相、气相运动缓慢而且突变的试验要求,具有合理性。

试样变形误差的控制:由于液压囊与加载器连通管路中存在气泡,随着加载压力增大,加载系统会产生自身压缩变形,因此,采用长方体钢样标定中主应力方向变形 ϵ_2 和小主应力方向变形 ϵ_3 ,并从试验数据中减去该变形,以此来修正仪器加载系统自身引起的体变误差。

2 试验结果及分析

为后文叙述方便,将本文所用中主应力参数 b 值的基本公式描述如下:

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

式中, σ_1 为大主应力, σ_2 为中主应力, σ_3 为小主应力。

对含水率为 12.8%,16.1%,17.8%,20.3%,36.2% 共计 100 个试样,进行真三轴剪切试验,其剪切试验方案如表 2 所示。

表 2 真三轴剪切试验方案

Tab. 2 True triaxial shear experiment scheme

净围压 σ_3 /kPa	w /%	b 值				
		0	0.25	0.5	0.75	1
50	12.8	✓	✓	✓	✓	✓
100	12.8	✓	✓	✓	✓	✓
200	12.8	✓	✓	✓	✓	✓
300	12.8	✓	✓	✓	✓	✓
50	16.1	✓	✓	✓	✓	✓
100	16.1	✓	✓	✓	✓	✓
200	16.1	✓	✓	✓	✓	✓
300	16.1	✓	✓	✓	✓	✓
50	17.8	✓	✓	✓	✓	✓
100	17.8	✓	✓	✓	✓	✓
200	17.8	✓	✓	✓	✓	✓
300	17.8	✓	✓	✓	✓	✓
50	20.3	✓	✓	✓	✓	✓
100	20.3	✓	✓	✓	✓	✓
200	20.3	✓	✓	✓	✓	✓
300	20.3	✓	✓	✓	✓	✓
50	36.2	✓	✓	✓	✓	✓
100	36.2	✓	✓	✓	✓	✓
200	36.2	✓	✓	✓	✓	✓
300	36.2	✓	✓	✓	✓	✓

2.1 不同中主应力参数 b 值条件下非饱和原状黄土广义剪应力与广义剪应变关系

图 2 为不同含水率的非饱和原状黄土在净围压一定时,不同 b 值条件下的广义剪应力 q 与广义剪应变 ϵ_s 的关系曲线(由于篇幅有限,故只列出了 $w=20.3\%$ 和 $w=12.8\%$ 的试样的 $q-\epsilon_s$ 关系曲线)。

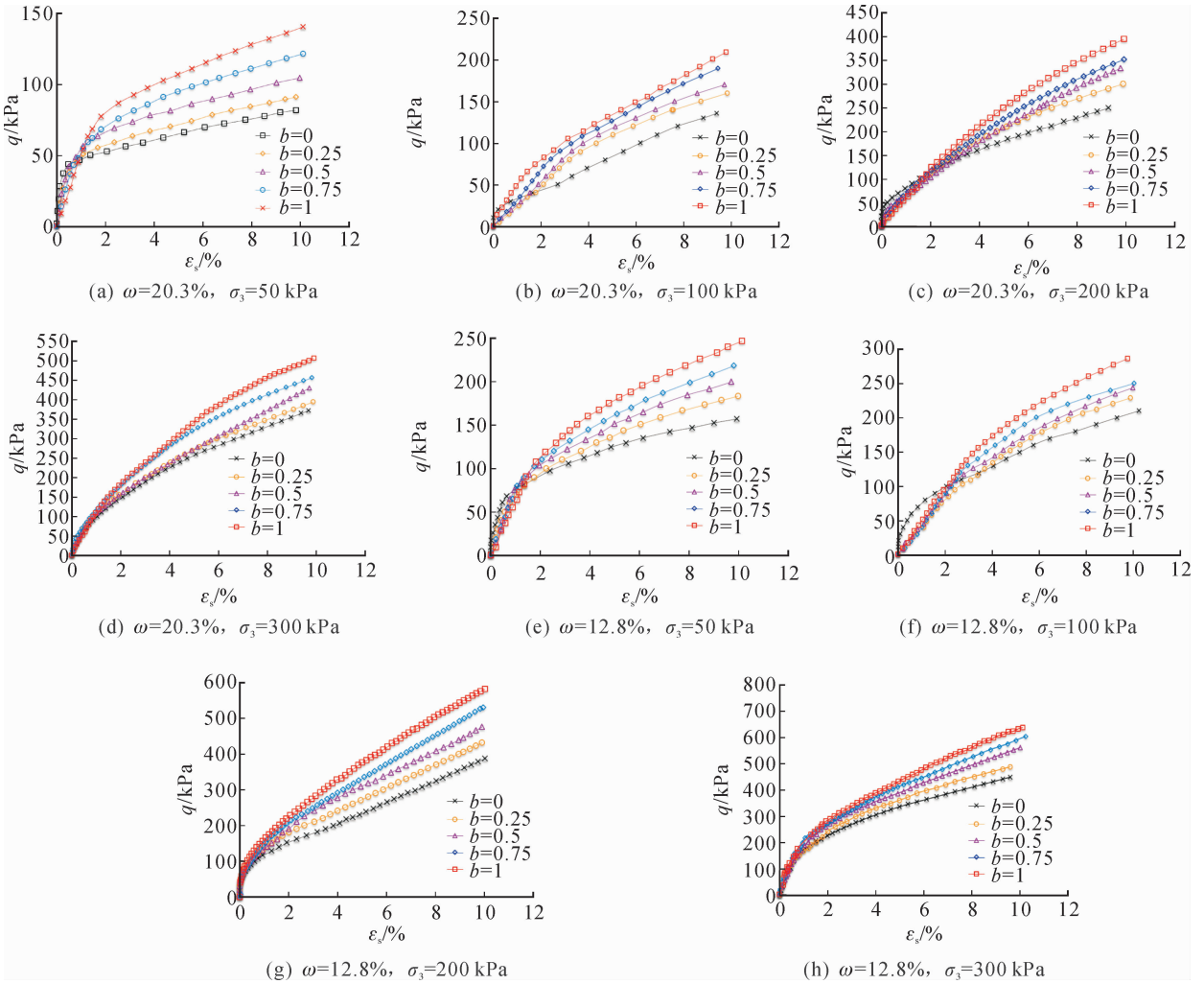
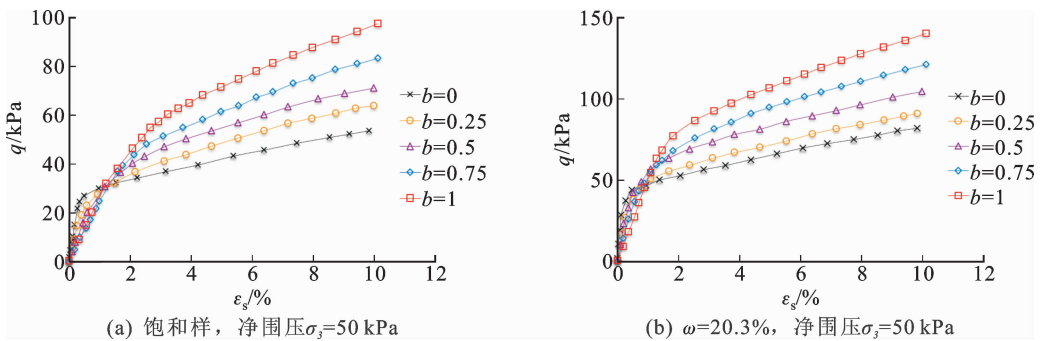
1) 由(a)可知,含水率和净围压一定时,随着 b 值的增大, $q-\epsilon_s$ 关系曲线呈上升趋势,即同一广义剪应变条件下,土体的抗剪强度随着 b 值的增大而增大;比较(a)和(b)可以看出,含水率和 b 值一定时,随着净围压的增大,土体抗剪强度增大。由此表明含水率一定时,土体的抗剪强度随着净围压和 b 值的增大而增大。

2) 由(a)、(b)、(e)、(f)可知,当净围压较小($\sigma_3 \leq 100$ kPa)且广义剪应变 ϵ_s 较小时, $b=0$ 时的 $q-\epsilon_s$ 关系曲线皆与其它 b 值条件下的曲线有交叉,且初始段坡度最陡,这是由于净围压较小($\sigma_3 \leq 100$ kPa)且 $b=0$ 时,剪切开始阶段非饱和土的体变变化非常缓慢。

3) 比较(a)与(e)、(b)与(f)、(c)与(g)、(d)与(h)可知,净围压相同时,土体的抗剪强度随着含水率的减小而增大。这是由于含水率越小,土颗粒之间的胶结作用越强,非饱和土中水、气之间的收缩膜搭接在土骨架上的加固作用越大,使得土体的强度相应提高。

4) 不同试验条件下, $q-\epsilon_s$ 关系曲线皆呈现硬化型。含水率和净围压一定时,硬化程度皆随着 b 值的增大而增大;含水率和净围压不同时,硬化程度随着净围压和含水率的增大而增大。这是由于等向固结后,非饱和原状黄土的结构随着净围压和含水率的增大而减小所致,净围压越大,土体内部土颗粒之间的排列方式变化越大,土颗粒之间的联结强度越低,固结后黄土结构性破坏越大,且含水率越大,土体的结构稳定性越差。因此,随着净围压和含水率的增大,土体的结构性变弱,对于弱结构性的黄土,表现出应变硬化特征^[7-11]。

在净围压 $\sigma_3 = 50$ kPa 作用下,饱和土($w = 36.2\%$)和含水率 $w = 20.3\%$ 的原状黄土在 5 个不同 b 值条件下的 $q-\epsilon_s$ 关系曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,净围压相同时,含水率 $w = 20.3\%$ 的原状黄土的抗剪强度明显高于饱和土,表明非饱和土的强度大于饱和土的强度。 $q-\epsilon_s$ 关系曲线皆随着 b 值的增大呈上升趋势,表明饱和土和非饱和土的强度皆随着 b 值的增大而增大。

图2 不同 b 值条件下 q - ε_s 关系曲线Fig. 2 q - ε_s relationship curves with different intermediate principal stress ratios of b 图3 q - ε_s 关系曲线Fig. 3 q - ε_s relationship curves

2.2 非饱和黄土的强度变化特性

本文试验中 Q_3 黄土的应力-应变关系曲线呈塑性破坏,取广义剪应变 $\varepsilon_s = 12\%$ 时的应力为破坏应力。 b 值一定时,不同含水率的试样在不同的净围压作用下剪切得到的 p - q 平面(子午平面)内的临界状态线如图4所示(由于篇幅有限,故只列出了 $b=0$ 和 $b=0.25$ 的强度包线)。从图4中可以看出:① b

值一定时,在 p - q 平面内,不同含水率试样的临界状态线皆近似呈线性平行状态,且临界状态线随着含水率的增大呈平行向左下方移动的趋势,表明土体的抗剪强度和净平均应力皆随着含水率的增大而降低;②随着 b 值的增大,不同含水率试样的强度和净平均应力均相应增大,表明中主应力对土体的强度有一定的影响;③不同含水率试样的临界状态线与

饱和土的临界状态线平行,表明不同含水率的非饱和和黄土的内摩擦角与饱和黄土的有效内摩擦角相等,这与文献^[7,8]的研究结果相一致。

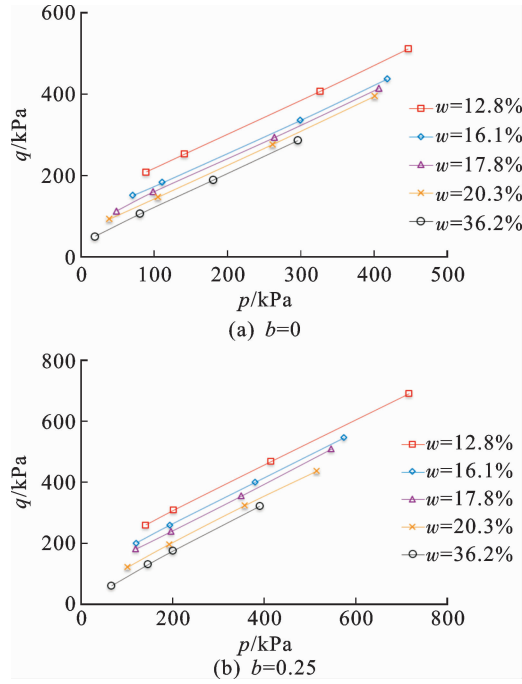


图 4 相同 b 值条件下 p - q 平面内的临界状态线
Fig. 4 Critical state lines on p - q plane with the same intermediate principal stress ratio of b

由图 4 可知,含水率相同的一组试验点近似位于一条直线上,故有表达式:

$$q_t = \xi + p_t \tan \omega \quad (2)$$

式中, q_t 为土体破坏时的剪应力, p_t 为土体破坏时的球应力, ξ 和 $\tan \omega$ 分别是临界状态线的截距和斜率,用最小二乘法确定。

土体的内摩擦角 φ 和土体的黏聚力 c 可分别表述为:

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \quad (3)$$

$$c = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \quad (4)$$

由式(2)、(3)、(4)所确定的土体强度参数值如表 3 所示。

不同 b 值条件下,非饱和黄土的黏聚力 c 与含水率 w 的关系曲线,如图 5 所示。

由图 5 可以看出, b 值一定时,非饱和土的黏聚力随着含水率的增大而降低。不同 b 值条件下的 c - w 关系曲线皆呈线性关系,其函数表达式为:

$$c = m w + d \quad (5)$$

式中, n 、 d 均为土性参数。

b 取 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 时,所对应的土性参

数如表 4 所示。从表 4 中可以看出,土性参数 n 随着 b 值的增大而减小, d 随着 b 值的增大而增大。

表 3 非饱和和原状黄土的强度参数

Tab. 3 Strength parameters of unsaturated intact loess

$w/\%$	b	c/kPa	$\varphi / (^\circ)$
12.8	0	55.0	21.8
16.1	0	41.1	21.3
17.8	0	36.1	21.5
20.3	0	30.2	21.5
12.8	0.25	68.0	19.4
16.1	0.25	53.5	19.7
17.8	0.25	47.8	19.9
20.3	0.25	41.0	19.7
12.8	0.5	80.1	17.1
16.1	0.5	63.6	17.1
17.8	0.5	57.3	17.2
20.3	0.5	50.7	17.0
12.8	0.75	90.9	15.6
16.1	0.75	73.5	15.8
17.8	0.75	67.8	15.5
20.3	0.75	60.9	15.7
12.8	1	99.8	14.4
16.1	1	83.6	14.4
17.8	1	76.9	14.6
20.3	1	68.4	14.7

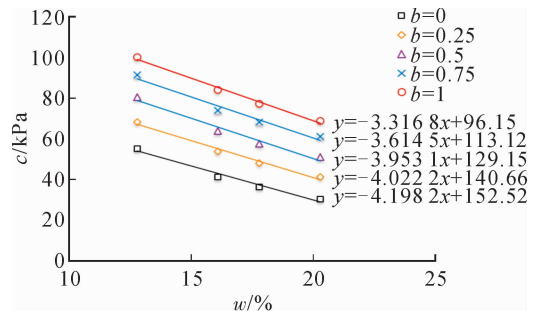


图 5 c - w 关系曲线

Fig. 5 c - w relationship curves

表 4 土性参数

Tab. 4 Parameters of loess

b	n	d
0	-3.316 8	96.15
0.25	-3.614 5	113.12
0.5	-3.953 1	129.15
0.75	-4.022 2	140.66
1	-4.198 2	152.52

图6为含水率 ω 一定时,黏聚力 c 随 b 值的变化关系曲线。从图6可以看出,随着 b 值的增大, c - b 关系曲线皆呈线性增大趋势,表明含水率一定时,黏聚力随着 b 值的增大而增大。其函数表达式为:

$$c = kb + m \quad (6)$$

式中, k 、 m 均为土性参数。

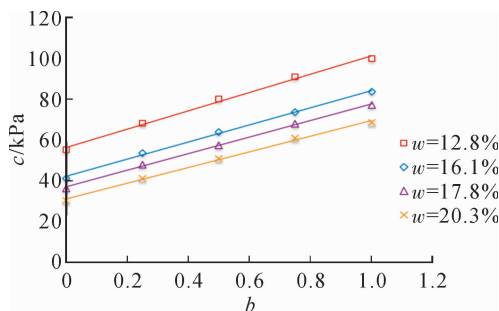


图6 c - b 关系曲线

Fig. 6 c - b relationship curves

含水率 ω 取12.8%、16.1%、17.8%、20.3%时,所对应的土性参数如表5所示。从表5中可以看出,土性参数 k 和 m 均随着含水率的增大而减小。根据式(5)和式(6)就可以近似求得不同 b 值条件下不同含水率土体的黏聚力,方便实用。

表5 土性参数

Tab. 5 Parameters of loess

$\omega/\%$	k	m
12.8	45.059	56.223
16.1	42.029	42.058
17.8	40.665	36.866
20.3	38.534	30.991

图7为不同 b 值条件下的内摩擦角 φ 与含水率 ω 的关系曲线。

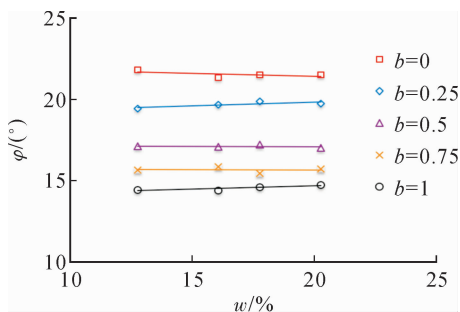


图7 φ - ω 关系曲线

Fig. 7 φ - ω relationship curves

从表3和图7可以看出, b 值一定时,不同含水率试样的内摩擦角差别很小,表明土体的内摩擦角受含水率的影响不大,这与文献[3, 11~16]的研究结果相一致。随着 b 值的增大, φ - ω 关系曲线呈下

降趋势,表明含水率一定时,内摩擦角随着 b 值的增大而减小。这是由于 b 值越大,土体的净平均应力越大,土体的压硬性使得土体的结构发生改变,土颗粒发生重新排列,导致土颗粒之间的摩擦力减小。

3 结论

1) 含水率一定时,土体的抗剪强度随着净围压和 b 值的增大而增大;净围压和 b 值一定时,土体的抗剪强度随着含水率的减小而增大。

2) 非饱和土的强度比饱和土的强度大;非饱和黄土的内摩擦角与饱和黄土的有效内摩擦角相等。

3) b 值一定时,非饱和土的黏聚力随着含水率的增大而降低;含水率一定时,黏聚力随着 b 值的增大而增大。

4) 土体的内摩擦角受含水率的影响不大;含水率一定时,内摩擦角随着 b 值的增大而减小。

参考文献:

- [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] 黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2600-2604.
HUANG Kun, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2600-2604.
- [4] 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, 26(7): 1499-1503.
LING Hua, YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1499-1503.
- [5] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水率的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71-75.
MIAO Linchang, ZHONG Xiaochen, YIN Zongze. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 71-75.
- [6] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179.

- SHAO Shengjun, LUO Aizhong, DENG Guohua. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172-1179.
- [7] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 1-6.
- XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 1-6.
- [8] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形-强度的关系[J]. 水利学报, 1999, (10): 1-6.
- XIE Dingyi, QI Jilin, ZHU Yuanlin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (10): 1-6.
- [9] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
- SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.
- [10] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1387-1393.
- SHAO Shengjun, WANG Liqin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1387-1393.
- [11] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, 7(7): 79-84.
- DANG Jinqian, LI Jing. Structure strength and shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 7(7): 79-84.
- [12] 李永乐, 张红芬, 余小光, 等. 原状非饱和黄土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2859-2863.
- LI Yongle, ZHANG Hongfen, SHE Xiaoguang, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2859-2863.
- [13] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q_2 黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 383-389.
- FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan, SHEN Chunni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess Q_2 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 383-389.
- [14] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 660-664.
- HU Shengxia, ZHOU Yundong, CHEN Zhenghan. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 660-664.
- [15] 陈存礼, 张登飞, 董玉柱. 常含水率三轴条件下非饱和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1195-1202.
- CHEN Cunli, ZHANG Dengfei, DONG Yuzhu. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1195-1202.
- [16] 骆亚生, 谢定义, 陈存礼. 黄土不同湿度状态下破坏强度的试验分析[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(4): 403-407.
- LUO Yasheng, XIE Dingyi, CHEN Cunli. Test analysis of dynamic failure strength of loess under different moisture conditions [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(4): 403-407.

(责任编辑 周 蓓)