

含水量对非饱和黄土强度的影响*

党进谦 李 靖

(西北农业大学水利与建筑工程学院, 陕西杨陵 712100)

摘 要 试验和分析表明,在较大的含水量变化范围内,非饱和黄土的粘聚力和含水量之间呈幂函数关系。依据库伦-摩尔强度准则,非饱和黄土的抗剪强度随外部压力和含水量的变化规律可用强度曲面描述,提出了非饱和黄土强度的临界含水量计算式。

关键词 非饱和黄土,强度曲面,临界含水量

中图分类号 TU411.7, TU411.2

黄土的强度特性与黄土地区的工程建设密切相关。我国黄土多分布于干旱半干旱的西北地区,常呈非饱和状态。非饱和黄土的强度特性受含水量的影响很大^[1]。过去的研究成果认为黄土只有在含水量达到某些值(如接近或达到饱和含水量)时,强度才会发生突然骤降^[2]。事实上非饱和黄土的强度是随着含水量的逐渐增大而连续降低的。本文对陕西关中地区非饱和黄土进行了大量的试验测定和分析,试图找到非饱和黄土的抗剪强度随含水量变化的基本规律。

1 材料和方法

1.1 土样的基本物理性质

供试马兰黄土,取自陕西关中 10 个样点,取土深度 4~5 m,基本物理性质见表 1。

表 1 土样的基本物理性质

地点	w (%)	ρ (g/cm ³)	G_s	e	颗粒组成(mm)			w_L (%)	I_P
					0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005		
千阳	20.47	1.76	2.743	0.870	9.5	64.0	26.5	38.0	19.4
彬县	15.78	1.54	2.740	1.065	9.5	64.5	26.0	37.1	16.8
铜川	17.87	1.46	2.697	1.210	7.3	64.5	28.2	36.0	16.8
白水	16.09	1.50	2.695	1.086	8.4	62.4	29.2	33.3	14.2
合阳	14.41	1.38	2.705	1.242	7.5	66.7	25.8	32.2	13.6
岐山	25.74	1.63	2.746	1.145	9.0	63.0	28.0	35.5	17.5
宝鸡	20.99	1.89	2.738	0.742	4.5	66.5	29.0	36.5	16.5
咸阳	14.55	1.41	2.699	1.198	3.5	76.5	20.0	34.2	17.0
渭南	13.42	1.34	2.697	1.299	1.8	74.5	23.7	32.7	13.5
潼关	11.28	1.41	2.713	1.138	15.0	66.0	19.0	29.2	11.2

1.2 强度指标的测定

含水量对黄土强度的影响主要表现在粘聚力 c 值随含水量的增加而明显下降,而内摩擦角 φ 值的变化则较小^[3],因此本研究略去含水量对内摩擦角的影响,用各含水量下的平均内摩擦角表示。

收稿日期:1995-06-27
* 水利部水利水电科学基金资助项目。

将所取土样分别制成含水量为 12%,14%,16%,18%,20%,22%,24%,26% 的 8 种试样。各试样内部的含水量分布均匀。用 EDJ- I 型二速电动等应变直剪仪(南京土壤仪器厂生产)测定各土样的强度指标。采用快剪法,剪切速率为 12 r/min,剪切历时 3~5 min,垂直压力分别为 1,2,3,4 kg/cm²。试样在各级压力下的抗剪强度取峰值强度,对无明显峰值者,取应力应变硬化曲线上应变量为 4 mm 所对应的强度。

2 结果分析

2.1 强度指标 c 与含水量的关系

表 2 不同含水量下黄土的抗剪强度指标 kg/cm²

地 点	含水量(%)							
	12	14	16	18	20	22	24	26
千阳	1.64	1.33	1.08	0.89	0.75	0.63	0.54	0.47
彬县	1.21	1.01	0.83	0.70	0.57	0.44	0.38	0.31
铜川	0.73	0.61	0.49	0.40	0.34	0.26	0.24	0.19
白水	0.75	0.62	0.50	0.41	0.35	0.27	0.24	0.20
合阳	0.47	0.42	0.36	0.30	0.27	0.21	0.20	0.19
岐山	0.95	0.76	0.60	0.48	0.40	0.31	0.27	0.22
宝鸡	1.41	1.16	0.95	0.79	0.67	0.55	0.49	0.42
咸阳	0.63	0.55	0.56	0.38	0.33	0.27	0.24	0.21
渭南	0.47	0.38	0.33	0.28	0.25	0.19	0.18	0.16
潼关	0.29	0.26	0.21	0.16	0.14	0.10	0.09	0.07

由表 2 可知,各土样的粘聚力 c 值随含水量的逐渐增大而连续降低。由图 1 可见,各土样的粘聚力与含水量之间均呈幂函数关系,可用下式表示:

$$c(w) = aw^{-b}$$

(1)

式中, $c(w)$ ——不同含水量下黄土的粘聚力,kg/cm²; a, b ——试验参数。

用 SYSTAT 统计绘图软件包对图 1 所示土样拟合(1)式,其结果见表 3。

表 3 c - w 曲线的拟合参数及相关系数

地点	a	b	R	地点	a	b	R
千阳	87.185	1.592	0.990	岐山	79.216	1.772	0.991
宝鸡	64.748	1.531	0.990	白水	42.300	1.615	0.987
彬县	58.687	1.503	0.978	咸阳	19.932	1.357	0.989

2.2 非饱和黄土的抗剪强度规律

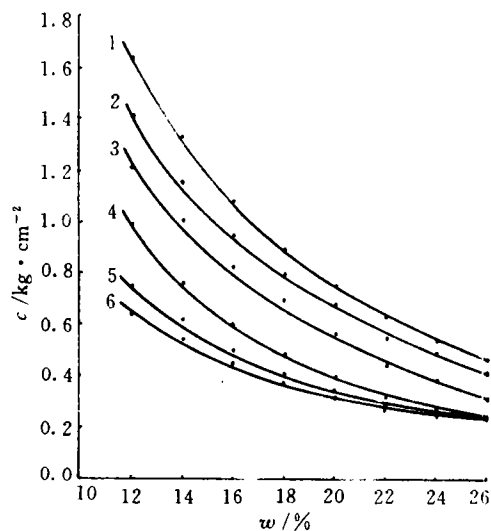
依据库伦-摩尔强度准则,粘性土的抗剪强度规律为 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$,该式表明粘性土的抗剪强度由摩擦力和粘聚力两部分组成^[4]。非饱和黄土的粘聚力 c 值随含水量 w 变化,其关系用(1)式表示,则非饱和黄土的抗剪强度规律可表示为:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + aw^{-b}$$

(2)

式中, τ_f ——土的抗剪强度,kg/cm²; σ ——垂直压力,kg/cm²; φ ——平均内摩擦角,度。

(2)式表明,非饱和黄土的抗剪强度 τ_f 随外部压力 σ 及含水量 w 的变化过程,可用三维坐标系中的空间曲面表示(图 2),该曲面可表征为不同含水量条件下非饱和黄土强度的一种临界状态,称其为非饱和黄土的强度曲面。

图1 c - w 拟合曲线

1. 千阳; 2. 宝鸡; 3. 彬县; 4. 岐山; 5. 白水; 6. 咸阳

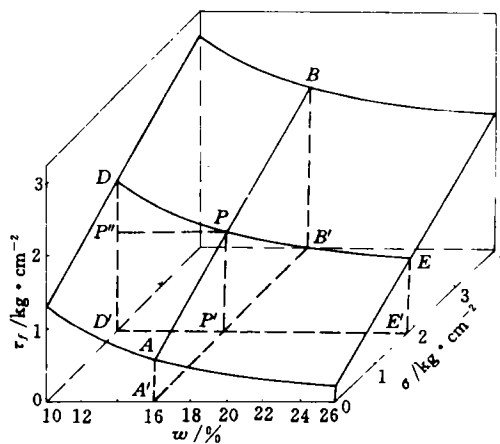
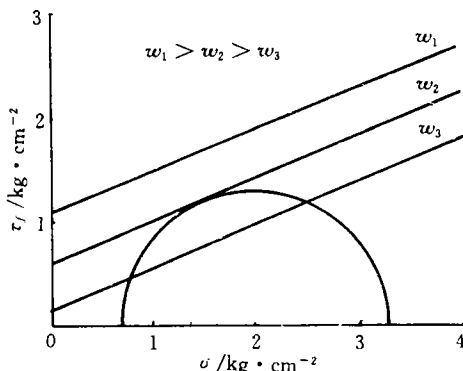


图2 抗剪强度曲面示意图

强度曲面实质上是库伦定律 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ 所表示的 τ - σ 关系曲线在 w 坐标轴方向上变化所形成的轨迹曲面。库伦定律表征为土强度的一种临界值, 即当应力水平增长到强度包线时表示达到极限平衡状态, 超出强度包线时表示已经破坏。则强度曲面表征为土的强度随含水量变化的一种临界状态。图2中的 P 点是强度曲面上的一个点, 在 $\tau = D'P''$ 、 $\sigma = OD'$ 、 $w = OA'$ 情况下, 该点应力处在极限平衡状态。如 $w = OA'$ 不变, 则 τ 和 σ 将以直线 AB 为其临界状态线; 如 $\sigma = OD'$ 不变, 则 τ 和 w 将以 DE 曲线为其临界状态线。由此可知, 在给定的应力水平下, 非饱和黄土的应力极限平衡状态取决于其含水量的大小, 当含水量小于某一值时, 给定的应力水平在强度曲面之下, 非饱和黄土处于稳定状态; 当含水量大于该值时, 给定的应力水平在强度曲面之上, 非饱和黄土发生破坏。该含水量即为临界含水量, 用 w_c 表示。如图2中的 P 点, 其应力水平一定 ($\tau = D'P''$ 、 $\sigma = OD'$), 当土的含水量较低 ($w = 10\%$) 时, 处于 P'' 点的位置上, 位于强度曲面之下, 应力水平未达到极限平衡状态。如果土的含水量逐渐增大, 而应力水平不变, 则土的极限强度将沿着强度曲面上的 DP 线降低, P'' 点将水平地沿着 w 轴方面移动与逐渐降低的强度曲面交于 P 点, 达到应力极限平衡状态, 则 P 点所对应的含水量即为给定应力水平下的临界含水量。

2.3 临界含水量的确定

图2所示的强度曲面在 τ - σ 平面上的投影如图3, 呈现为随含水量变化的一系列平行

图3 不同含水量下的 τ - σ 曲线

直线(因未考虑摩擦角随含水量的变化),其中每一直线表示为在一定含水量下,非饱和黄土的抗剪强度关系线,随含水量的增大,抗剪强度关系曲线的位置降低。对处于某种应力状态(图 3 中的应力圆)的土来说,当含水量增大到某一值时,抗剪强度关系线降低到与应力圆相切而达到极限平衡状态,则临界含水量与大、小主应力的关系可表示为:

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3) + 2aw_{cr}^{-b} \cdot \operatorname{ctg}\varphi} \quad (3)$$

整理(3)式,即得到临界含水量的计算式为:

$$w_{cr} = \left[\frac{2a \operatorname{tg}(45^\circ + \frac{\varphi}{2})}{\sigma_1 - \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})} \right]^{1/b} \quad (4)$$

3 结 论

- 1) 非饱和黄土的强度指标 c 随含水量的变化过程可用 $c(w) = aw^{-b}$ 式描述。
- 2) 非饱和黄土的抗剪强度随含水量的逐渐增大而连续降低,抗剪强度与外部压力和含水量之间的关系表示为 $\tau_f = \sigma \operatorname{tg}\varphi + aw^{-b}$ 。
- 3) 对处于某一应力状态的非饱和黄土来说,其稳定性可用临界含水量判断。

参 考 文 献

- 1 王永森,林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质. 北京:科学技术出版社,1990:194~199
- 2 郑建国,张苏民. 湿陷性黄土在增湿时的强度特性. 水文地质工程地质,1989(2):6~9
- 3 西北水利科学研究所. 西北黄土的性质. 西安:陕西人民出版社,1959:96~103
- 4 冯国栋. 土力学. 北京:水利电力出版社,1986:111~116
- 5 刘祖典,李 靖. 黄土的物理力学性质和变形特征. 中国第四纪研究,1986,7(1):1~5
- 6 黄文熙. 土的工程性质. 北京:水利电力出版社,1983:227~301
- 7 卢肇钧,张惠明,陈建华等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力. 岩土工程学报,1992,14(3):1~8
- 8 张 炜,张苏民. 非饱和黄土的结构强度特性. 水文地质工程地质,1990(4):22~25

Effect of Water Content on the Strength of Unsaturated Loess

Dang Jinqian Li Jing

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering,
Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract The study, based on measurement and analysis, shows that, in a fairly big water content change range, there is a power function relationship between water content and the cohesion force of unsaturated loess. According to the Coulomb-Mohr's strength law, the regulation of unsaturated loess anti-shear strength with the change of external pressure and water content can be depicted by using curved strength surface. So, the formula for computing the critical water content of unsaturated loess strength is put forward in this paper.

Key words unsaturated loess, curved strength surface, critical water content