

非饱和土的应力传递机理与有效应力原理

Stress transmission mechanism and effective stress principle of unsaturated soil

邢义川^{1,2}, 谢定义¹, 李 振²

(1. 西安理工大学 岩土所, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学 水电科研院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 回顾了几十年来非饱和土有效应力研究的主要成果。根据非饱和土的应力传递机理, 提出了土样中任一点三个有效主应力表示形式和有效应力参数确定方法。

关键词: 非饱和土; 有效应力

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)01-0053-05

作者简介: 邢义川, 男, 1956年生, 教授, 1988年在西安理工大学岩土所获硕士学位, 1998年在西安理工大学攻读在职博士学位。

XING Yi-chuan^{1,2}, XIE Ding-yi¹, LI Zheng²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Sciencetech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The main research results of effective stress principle of unsaturated soil several decades are reviewed. Based on the study of stress transmission mechanism of unsaturated soil, the description of three main effective stresses and the determination of effective stress parameters are also presented at any point in unsaturated soil body.

Key words: unsaturated soil; effective stress

1 引 言*

Terzaghi的饱和土有效应力原理成功应用于饱和土体以后, 人们就一直探索一种能很好反映非饱和土体的单变量有效应力原理, 取得的研究成果主要有:

1.1 Bishop 有效应力公式

1955年, Bishop根据饱和土有效应力原理以及土饱和状态和土干燥状态的特点, 用一个参数 x 构造出非饱和土有效应力公式:

$$\sigma' = \sigma - u_a + x(u_a - u_w) \quad (1)$$

式中 σ' , σ , u_a 和 u_w 分别为非饱和土的有效应力、总应力、孔隙气压力和孔隙水压力; x 为非饱和土有效应力参数, $0 \leq x \leq 1$ 。

从式(1)可以看出, 要确定 σ' 必须首先知道 x , 所以 x 一直是该问题研究中心, 几十年来提出的方法和得到 x 的形式五花八门, 具代表性的有以下几种:

(1) Bishop^[1]假定对于某一给定的起始孔隙比来说, c' 和 ϕ 与饱和度无关。于是从完全饱和试样的试验中取得 c' 和 ϕ 值代入有效应力强度式解出 x 。

(2) 沈珠江^[2]在1963年针对强度问题提出如下表达式:

$$x = \frac{B_a - 1 + \tan \phi_a / \tan \phi}{B_a - B_w} \quad (2)$$

式中 ϕ 为饱和土的有效内摩擦角; ϕ_a 为同一土体非饱和时测得的内摩擦角; $B_a = \Delta u_a / \Delta \sigma$, $B_w = \Delta u_w / \Delta \sigma$, B_a , B_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力系数。

(3) 陈正汉^[3]借助弹性理论, 导出有效应力参数为

$$x = K^n / K^{S_n} \quad (3)$$

式中 K^n 和 K^{S_n} 分别为孔隙率等于 n 和 S_n 的同一骨架的体积压缩模量。

(4) Blight^[4]在1967年利用两个试样均为非饱和或一个饱和一个非饱和, 从强度和体变两个方面研究了 x 值的变化特性。通过试验发现对于强度问题和体变问题 x 值不相等, 且 x 值可能大于1。

(5) 应力应变关系两点法^[5]将剪应力和轴向应变的归一化曲线线性化, 通过同顶点两个三角形相似性, 求出剪应力的有效应力参数 x_q 。同理, 根据侧向应变与轴向应变归一化曲线求出球应力的有效应力参数 x_p 。

尽管现有确定有效应力参数 x 的方法和公式还有很多种, 笔者认为以上5种方法具有代表性, 各有其特点和不足。其中共同的缺陷是孔隙气压力 u_a 和孔隙水压力 u_w 只影响有效球应力 p' 不影响剪应力 q' 的变化。

1.2 谢定义、刘奉银有效应力公式

在充分论述非饱和土水、气存在状态以及土体结构的影响的基础上将非饱和土有效应力原理写成如下形式^[6]:

$$\begin{cases} p' = (p - u_a) - x_p(u_a - u_w) \\ q' = q - x_q(u_a - u_w) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)描述了孔隙气压力 u_a 和孔隙水压力 u_w 不仅对球应力 p' 有影响, 而且对 q' 产生影响。

2 非饱和土的应力传递机理与有效应力公式

非饱和土与饱和土相比土中存在孔隙气压力, 就使问题变得相当复杂。使非饱和土由四相系(即土粒、水、空气和收缩膜)组成。收缩膜就是水气分界面, 只有相当几个分子层厚。其特点是将水和气分开, 在气相一侧为气压力, 在液相一侧为水压力。总有孔隙气压力大于孔隙水压力, 使收缩膜翘曲而产生表面张力 T_s 。对平面问题, 收缩膜翘曲和表面张力情况如图 1 所示。表面张力表示为

$$(u_a - u_w) = 2T_s/R_s \quad (5)$$

收缩膜的表面张力与孔隙气压力、孔隙水压力以及土颗粒作用力之间关系见图 2 所示。

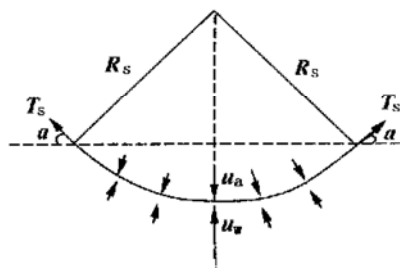


图 1 翘曲薄膜上的表面张力

Fig. 1 Surface tension on cocking film

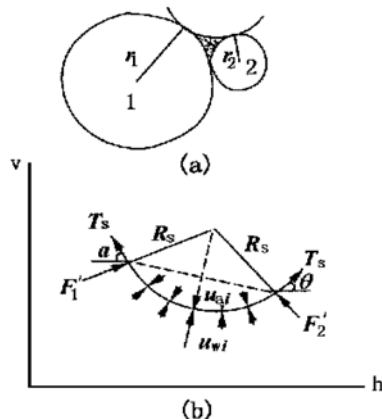


图 2 收缩膜上的作用力

Fig. 2 Force on contract film

如果拿两个圆球颗粒作为第 i 个土单元, 两个颗粒之间存在一定的水, 由于吸力 $(u_a - u_w)_i$ 的作用, 产生弯液面, 形成收缩膜(见图 2(a)), 若将收缩膜取出在平面上研究, 收缩膜受力情况见图 2(b)。严格地讲, 孔隙水压力和孔隙气压力只分别作用在土骨架颗粒与水相和气相直接接触的那部分表面上。尽管它们分别在液相和气相可以看作是各向均等, 但对土颗粒或土骨架却是法向作用, 即 T_s 与 F'_1, F'_2 相互垂直。 T_s, F'_1, F'_2 在水平方向和垂直方向的合力为:

$$H = \left[\frac{R_s}{2} (\cos \theta - \cos \alpha) + g_1 \right] (u_a - u_w)_i + F'_1 \sin \alpha - F'_2 \sin \theta \quad (6)$$

$$V = \left[\frac{R_s}{2} (\sin \alpha + \sin \theta) + g_2 \right] (u_a - u_w)_i + F'_1 \cos \alpha - F'_2 \cos \theta$$

水平方向与竖直方向的平衡方程为

$$\sigma_h - u_a = \frac{1}{A_h} \left[F'_1 \sin \alpha - F'_2 \sin \theta + (u_a - u_w)_i \times \left[\frac{R_s}{2} (\cos \theta - \cos \alpha) + g_1 \right] \right]$$

$$\sigma_v - u_a = \frac{1}{A_v} \left[F'_1 \cos \alpha + F'_2 \cos \theta + \left[\frac{R_s}{2} (\sin \alpha + \sin \theta) + g_2 \right] (u_a - u_w)_i \right]$$

$$\left[\frac{R_s}{2} (\sin \alpha + \sin \theta) + g_2 \right] (u_a - u_w)_i$$

(7)

式(7)中, $(F'_1 \sin \alpha - F'_2 \sin \theta)/A_h$ 实际是水平有效应力 σ'_h , $(F'_1 \cos \alpha + F'_2 \cos \theta)/A_v$ 实际是垂直有效应力 σ'_v , g_1 和 g_2 为沿收缩膜的积分常数, A_h 和 A_v 为收缩膜水平和竖直方向的面积。

$$\text{令 } \left| \frac{R_s (\cos \theta - \cos \alpha)}{2} + g_1 \right| / A_h = x_h, \quad \left| \frac{R_s (\sin \alpha + \sin \theta)}{2} + g_2 \right| / A_v = x_v,$$

那么式(7)变为

$$\begin{cases} \sigma'_h = \sigma_h - u_a - x_h (u_a - u_w) \\ \sigma'_v = \sigma_v - u_a - x_v (u_a - u_w) \end{cases} \quad (8)$$

对三维问题, 同理可推得侧向有效应力:

$$\sigma'_L = \sigma_L - u_a - x_L (u_a - u_w) \quad (9)$$

式(8)和式(9)就是有效应力公式。对主应力面来说, x_v, x_h, x_L 分别为 x_1, x_3, x_2 。

3 有效应力参数确定方法

3.1 x_1, x_3 的确定

参数 x_1, x_3 与收缩膜曲率半径, 以及表面张力在 σ_3 方向的夹角有关。而这两个值无法直接确定, 必须另辟途径。用三轴试验来确定土的强度和变形, 将主应力 σ'_1, σ'_3 转换成剪应力 q' 和球应力 p' , 通过 $q' - \varepsilon_1, \varepsilon_3/p' - \varepsilon_1$ 关系曲线来确定 x_1 与 x_3 的值。

引入 p', q' , 有效应力公式可表示为

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3} = p - u_a - x_p (u_a - u_w) \quad (10)$$

$$x_p = \frac{x_1 + 2x_3}{3} \quad (11)$$

$$q' = \sigma'_1 - \sigma'_3 = q - x_q (u_a - u_w) \quad (12)$$

$$x_q = x_1 - x_3 \quad (13)$$

将式(11), (13) 联立求解得

$$\begin{cases} x_3 = (3x_p - x_q)/3 \\ x_1 = (3x_p + 2x_q)/3 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可见, 只要求出 x_p 和 x_q 就可方便地得到 x_1, x_3 。

3.2 x_p, x_q 的确定

前述两点法^[5]的缺陷是只考虑吸力对球应力的贡献, 未考虑吸力对剪应力的贡献。但是将应力应变关系曲线线性化后再确定 x_p 和 x_q 的思想仍可借鉴, 以下所述方法是在两点法基础上提出确定 x_p, x_q 的三点法。

(1) x_q 确定

仍然认为土的 $\varepsilon_1 - q$ 曲线符合双曲线, 并将该曲线线性化, 见图3。

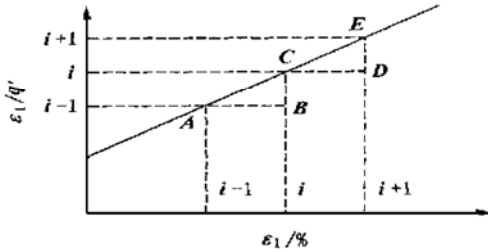


图3 $\varepsilon_1 - \varepsilon_1/q'$ 曲线

Fig. 3 $\varepsilon_1 - \varepsilon_1/q'$ curve

由 $\triangle ABC \sim \triangle CDE$ 得

$$\frac{\frac{\varepsilon_{i+1}}{q_i} - \frac{\varepsilon_{i-1}}{q_{i-1}}}{\frac{q_i}{\varepsilon_{i-1}} - \frac{q_{i-1}}{\varepsilon_{i-1}}} = \frac{\frac{\varepsilon_{i+1}}{q_{i+1}} - \frac{\varepsilon_i}{q_i}}{\frac{q_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}} - \frac{q_i}{\varepsilon_{i+1}}} \quad (15)$$

通过整理得

$$\varepsilon_{i+1} q_i q_{i-1} - (1 + f_i) \varepsilon_{q_{i+1}} q_{i-1} + f_i \varepsilon_{i-1} q_{i+1} q_i = 0 \quad (16)$$

令 $\frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} = f_i$, $\varepsilon_{i+1} = A_i$, $(1 + f_i) \varepsilon_i = B_i$, $f_i \varepsilon_{i-1} = C_i$ 。由式(12)得

$$q_i q_{i-1} = q_i q_{i-1} - x_{qi} (u_a - u_w)_i q_{i-1} - x_{qi-1} (u_a - u_w)_{i-1} q_i + x_{qi} x_{qi-1} (u_a - u_w)_i (u_a - u_w)_{i-1} \quad (17)$$

$$q_{i+1} q_{i-1} = q_{i+1} q_{i-1} - x_{qi+1} (u_a - u_w)_{i+1} q_{i-1} - x_{qi-1} (u_a - u_w)_{i-1} q_{i+1} + x_{qi+1} x_{qi-1} (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_{i-1} \quad (18)$$

$$q_{i+1} q_i = q_{i+1} q_i - x_{qi+1} (u_a - u_w)_{i+1} q_i - x_{qi} (u_a - u_w)_i q_{i+1} + x_{qi+1} x_{qi} (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_i \quad (19)$$

再将式(17), (18), (19)代入式(16)得

$$A_i q_i q_{i-1} - B_i q_{i+1} q_{i-1} + C_i q_{i+1} q_i + (B_i q_{i+1} - A_i q_i) \cdot x_{i-1} (u_a - u_w)_{i-1} - (A_i q_{i-1} + C_i q_{i+1}) x_i (u_a - u_w)_i + (B_i q_{i-1} - C_i q_i) x_{i+1} (u_a - u_w)_{i+1} + A_i x_i x_{i-1} (u_a - u_w)_i (u_a - u_w)_{i-1} - B_i x_{i+1} x_{i-1} (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_{i-1} + C_i x_{i+1} x_i (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_i = 0 \quad (20)$$

a) 初始值

取 $x_{i+1} = x_i = x_{i-1}$, 式(20)为

$$a x_{i+1}^2 + b x_{i+1} + c = 0 \quad (21)$$

式中

$$a = A_i (u_a - u_w)_i (u_a - u_w)_{i-1} - B_i (u_a - u_w)_{i+1} \cdot (u_a - u_w)_{i-1} + C_i (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_i$$

$$b = (B_i q_{i+1} - A_i q_i) (u_a - u_w)_{i-1} - (A_i q_i + C_i q_{i+1}) \cdot (u_a - u_w)_i + (B_i q_i - C_i q_i) (u_a - u_w)_{i+1}$$

$$c = A_i q_i q_{i-1} - B_i q_{i+1} q_{i-1} + C_i q_{i+1} q_i$$

由式(21)解得

$$x_{i+1} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad i = 2 \quad (22)$$

b) 后续值

若 $x_{i+1} \neq x_i \neq x_{i-1}$, 式(20)为

$$x_{i+1} = D_i / Q_i, \quad i = 3, 4, 5 \dots \quad (23)$$

式中

$$D_i = A_i q_i q_{i-1} - B_i q_i q_{i-1} + C_i q_{i+1} q_i + (B_i q_{i+1} - A_i q_i) x_{i-1} (u_a - u_w)_{i-1} - (A_i q_{i-1} + C_i q_{i+1}) x_i (u_a - u_w)_i - u_w)_{i+1} + A_i x_i x_{i-1} (u_a - u_w)_i (u_a - u_w)_{i-1}$$

$$Q_i = B_i x_{i-1} (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_{i-1} - C_i x_i (u_a - u_w)_{i+1} (u_a - u_w)_i - (B_i q_{i-1} - C_i q_i) (u_a - u_w)_{i+1}$$

(2) x_p 的确定

$\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 归一化曲线为双曲线, 线性化后见图4所示。

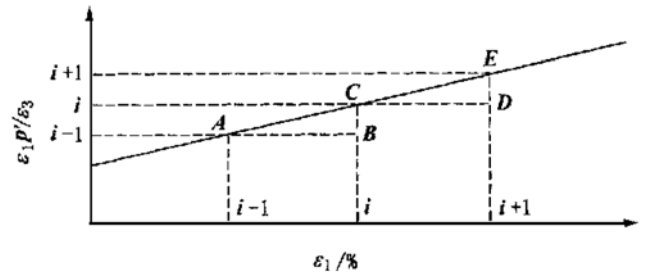


图4 $\varepsilon_1 - \varepsilon_1 p' / \varepsilon_3$ 曲线

Fig. 4 $\varepsilon_1 - \varepsilon_1 p' / \varepsilon_3$ curve

表1 武功黄土的物理指标

Table 1 Physical indices of Wugong loess

比重 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	天然含水率 $w / \%$	天然干密度 $\rho_s / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	颗粒组成 / %			液限 $w_L / \%$	塑限 $w_P / \%$
			2~0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm		
2.72	17.5	1.29	16.5	62.8	20.7	28.7	17.5

由 $\triangle ABC \sim \triangle CDE$, 令 $\varepsilon_i/\varepsilon_3 = \alpha$, $\varepsilon_i = \varepsilon$ 可得

$$\frac{\alpha_{i-1}p_{i-1} - \alpha p_i}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} = \frac{\alpha p_i - \alpha_{i+1}p_{i+1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \quad (24)$$

通过整理得

$$(f_i + 1)\alpha p_i - f_i\alpha_{i+1}p_{i+1} - \alpha_{i-1}p_{i-1} = 0 \quad (25)$$

式中, $f_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}$ 。并令 $(f_i + 1)\alpha_i = A_i$, $f_i\alpha_i = B_i$, $\alpha_{i-1} = c_i$ 。由有效应力公式(10)可得 $A_i(p_i - u_{ai}) - B_i(p_{i+1} - u_{ai+1}) - c_i(p_{i-1} - u_{ai-1}) - A_iX_i(u_a - u_w)_i + B_iX_{i+1}(u_a - u_w)_{i+1} + c_iX_{i-1}(u_a - u_w)_{i-1} = 0$ (26)

a) 初始值

取 $X_i = X_{i+1} = X_{i-1}$, 代入式(26)可得

$$X_{i+1} = [B_i(p_{i+1} - u_{ai+1}) + c_i(p_{i-1} - u_{ai-1}) - A_i(p_i - u_{ai})]/[-A_i(u_a - u_w)_i + B_i(u_a - u_w)_{i+1} + c_i(u_a - u_w)_{i-1}], i = 2 \quad (27)$$

b) 后续值

若 $X_i \neq X_{i+1} \neq X_{i-1}$, 则

$$X_{i+1} = \frac{Ap_i - Cp_{i-1} - B_i(P_{i+1} - u_{ai+1})}{-B_i(u_a - u_w)_{i+1}} \quad (28)$$

$i = 3, 4, 5 \dots$

4 试验资料整理

4.1 试验资料简介

土样为武功二阶地地面下 3 m 左右的原状黄土, 土性指标见表 1。试样由土样削制而成高 8 cm, 直径 3.91 cm, 采用水膜转移法制成所需不同饱和度的试样。在三轴仪上采用应变式加载, 剪切速率为 0.0107 mm/min, 试验过程中, 先测初始吸力, 施加围压时, 不排水, 不排气, 测定孔隙水压力、孔隙气压力和体变。剪切时也不排水不排气。剪切过程测定 $\sigma_1 - \sigma_3$, ε_v , ε_1 , u_a , u_w , 试验方法详见文献[7], 应力应变关系曲线见图 5。

4.2 有效剪应力

(1) X_q 变化规律

将图 5 中围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300, 400$ kPa 的每条 $q - \varepsilon_1$ 曲线取 75 个点。同时将对应的 u_a , u_w 都代入式(22), (23) 得到有效应力参数与轴向应变计算曲线 $\varepsilon_1 - X_q$, 见图 6。

(2) $\varepsilon_1 - q'$ 关系曲线

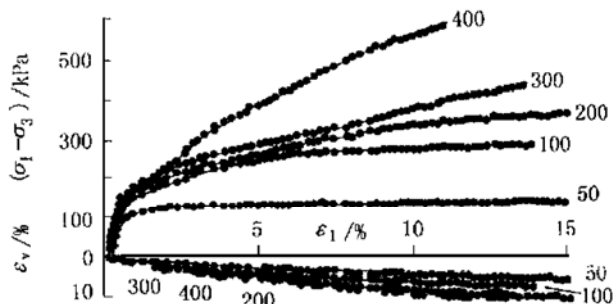
将每一围压 σ_3 下的 ε_1 , q , u_a , u_w 和图 6 中 X_q 代入式(12), 可以得到 $\varepsilon_1 - q'$ 计算曲线, 见图 7 所示。

4.3 有效球应力

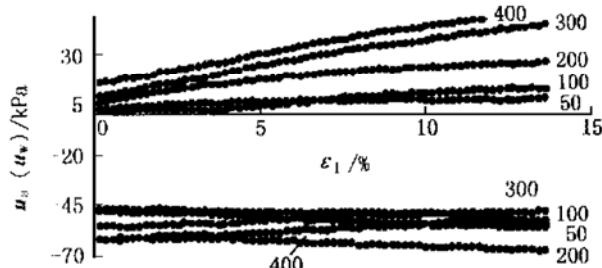
(1) X_p 变化规律

将图 5 中围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300, 400$ kPa 的 $\varepsilon_1 - \varepsilon_v$, $\varepsilon_1 - u_a$ 和 $\varepsilon_1 - u_w$ 曲线相应的点代入式(27),

(28), 得到 $\varepsilon_1 - X_p$ 曲线, 见图 8。



(a) 应力应变关系曲线



(b) 孔压变化曲线

图 5 $S_r = 45\%$ 三轴压缩试验曲线

Fig. 5 Triaxial compression test curve ($S_r = 45\%$)

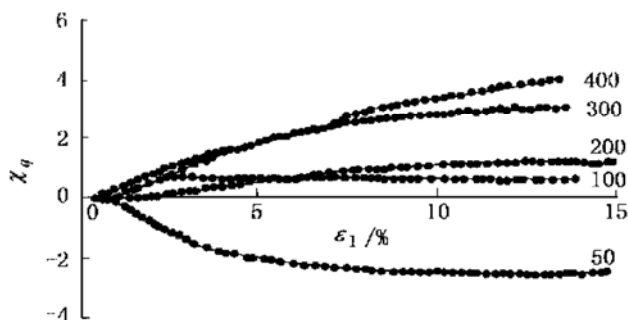


图 6 $\varepsilon_1 - X_q$ 曲线

Fig. 6 $\varepsilon_1 - X_q$ curve

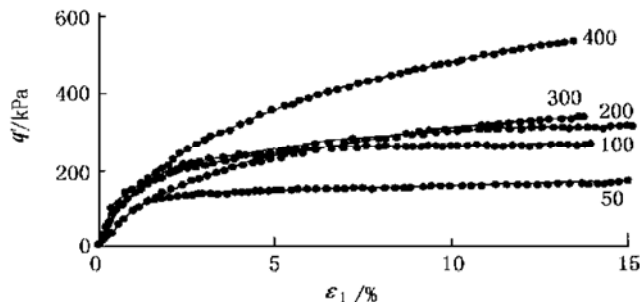


图 7 $\varepsilon_1 - q'$ 曲线

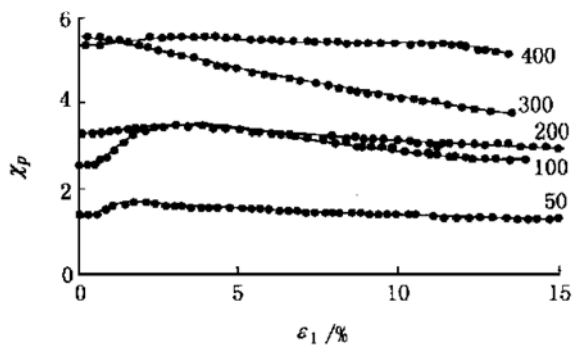
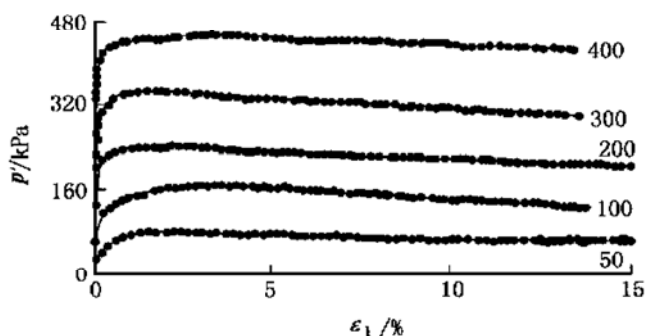
Fig. 7 $\varepsilon_1 - q'$ curve

(2) $\varepsilon_1 - p'$ 关系曲线

将每一围压 σ_3 下的 ε_1 , p , u_a , u_w 和图 8 中 X_p 代入式(10), 可以得到 $\varepsilon_1 - p'$ 计算曲线, 见图 9 所示。

4.4 强度表示

土的强度是土变形的最终结果, 这里仍采用莫尔

图8 $\varepsilon_1 - \chi_p$ 曲线Fig. 8 $\varepsilon_1 - \chi_p$ curve图9 $S_r = 45\%$ 的 $\varepsilon_1 - p'$ 曲线Fig. 9 $\varepsilon_1 - p'$ curve ($S_r = 45\%$)

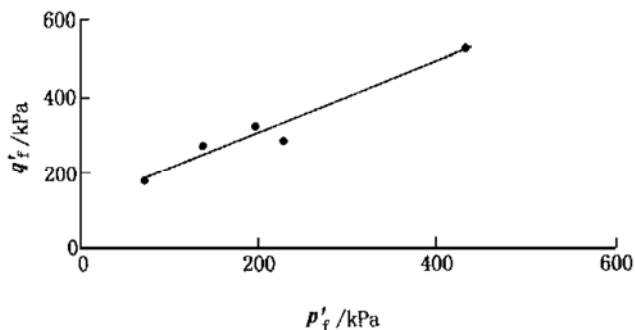
库仑破坏准则。表达方式可以采用破坏广义剪应力 q_f 表示,也可以用破坏面剪应力 τ_f 表示。

(1) 用 q_f 表示强度

用 $q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 表示强度公式为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = d' + [p - u_a - \chi_p(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (29)$$

式中, $(\sigma_a - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f - \chi_q(u_a - u_w)_f$ 将围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300, 400$ kPa 相应的破坏值 q'_f, p'_f 计算出,点绘曲线见图 10。

图10 $p'_f - q'_f$ 曲线($S_r = 45\%$)Fig. 10 $p'_f - q'_f$ curve ($S_r = 45\%$)

从图 10 中得 $d' = 121.5$ kPa, $\tan \phi' = 0.9627$, 如果采用土力学常用公式:

$$\tan \phi' = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}, d' = \frac{6c' \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (30)$$

可以直接计算出 $c' = 57.533$ kPa, $\phi' = 24.506^\circ$

(2) 用 τ_f 表示强度

用 τ_f 表示的强度公式为

$$\tau_f = c' + [\sigma - u_a - \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (31)$$

式中, $\chi = (\chi_1 + \chi_3)/2$ 。

将围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300, 400$ kPa 相应的破坏值 $\sigma'_{1f}, \sigma'_{3f}$ 计算出,并绘莫尔库仑包线,见图 11。从而可得 $c' = 51$ kPa, $\phi' = 23.96^\circ$ 。

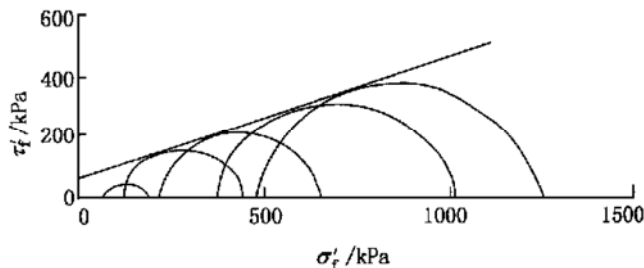


图11 武功黄土莫尔库仑包线

Fig. 11 Mohr's envelope of Wugong loess

5 结 论

非饱和土由于收缩膜的存在,使基质吸力对土体任一点三个主应力影响不一样。在此基础上推导出非饱和土的有效应力公式,基质吸力对三个主应力影响各异,主要反映在有效应力参数 χ_1, χ_2, χ_3 上。在三轴应力状态下提出了有效应力参数 χ_1, χ_3 的确定方法。用武功非饱和原状黄土资料对所提方法进行了验证,发现具有较好的规律性。

参考文献:

- [1] 比肖普 A W, 等. 决定非饱和粘性土强度的因素[A]. 粘性土抗剪强度译文集[C]. 北京: 科学出版社, 1965. 346~ 376.
- [2] 沈珠江. 土体强度和变形理论中的有效应力原理: 水利水运专题述评第五辑[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1963.
- [3] 陈正汉, 王永胜, 谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报. 1994. 16(3): 62~ 69.
- [4] Blight G E. Effective stress, evaluation for unsaturated soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1967(SM2): 125 ~ 128.
- [5] 邢义川, 谢定义, 李 振. 非饱和土的有效应力参数研究[J]. 水利学报, 2000(12): 82~ 87.
- [6] 刘奉银. 非饱和土力学基本试验设备的研制与新有效应力原理的探讨[D]. 西安: 西安理工大学, 1999.
- [7] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和原状黄土三轴试验方法研究[J]. 水利学报, 1996(1): 47~ 52.