

DOI: 10.11779/CJGE201807023

等向压缩应力条件下原状黄土的吸湿持水特性

张登飞^{1,2}, 陈存礼^{*1,2}, 张洁³, 刘科⁴, 游子龙¹, 陈成¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 北京理正软件股份有限公司, 北京 100044; 4. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003)

摘要: 用改装的非饱和土三轴剪切渗透仪, 在不同等向压缩应力作用下对天然状态的原状黄土进行了分级浸水试验, 分析了应力对吸湿持水曲线的影响, 提出了可以直接考虑等向压缩应力影响, 以饱和度及含水率与吸力关系表征的持水特性模型。研究表明: 应力对饱和度与吸力关系的影响较大; 对含水率与吸力间关系的影响与吸力大小有关, 当吸力大于阈值时几乎没有影响, 可近似归一, 当吸力小于阈值时影响较大。随着应力增大, 脱气吸力值增大, 饱和含水率减小, 且可分别用线性函数及对数函数描述之。不同应力下, 饱和度及含水率比(含水率与饱和含水率之比)与吸力比(吸力与脱气吸力值之比)关系皆可以归一, 且可用提出的模型描述。该模型直接把等向压缩应力作为变量, 与以应力作用下孔隙比作为变量的持水曲线模型相比, 更便于实际工程应用。模型对饱和度及含水率与吸力关系的预测结果与试验结果吻合较好。

关键词: 原状黄土; 等向压缩应力; 分级浸水; 吸湿持水特性

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)07-1344-06

作者简介: 张登飞(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土水力与力学特性研究。E-mail: dfzhang1987@163.com。

Wetting water retention behaviors of intact loess under isotropic compression stress

ZHANG Deng-fei^{1,2}, CHEN Cun-li^{1,2}, ZHANG Jie³, LIU Ke⁴, YOU Zi-long¹, CHEN Cheng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Leading Software Co., Ltd., Beijing 100044, China; 4. Northwest Research Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710003, China)

Abstract: The wetting tests by stages on intact loess with natural state are performed under different isotropic compression stresses by using the refitted triaxial equipment for shearing and permeability measurement of unsaturated soil. The influences of stresses on wetting water retention curves are analyzed. The models describing the water retention behaviour expressed by the degree of saturation and water content versus the suction are proposed, in which the effects of isotropic compression stress are directly considered. The results show that the stress has remarkable influence on degree of saturation as a function of suction. Its effect on the relationship between water content and suction depends on the magnitude of suction. When the suction is higher than a certain threshold value, the effect is much less pronounced, and the data appear to lie on a curve. When it is lower than the threshold value, the effect is obvious. The air-occlusion suction increases and the saturated water content decreases with the increasing stress, and the relations between them can be described by linear and logarithm functions respectively. There are all unique relationships of both degree of saturation and water content ratio (defined as water content to saturated water content ratio) versus suction ratio (defined as suction to air-occlusion suction ratio) under different stresses. Moreover, these can be described by the proposed models. Compared with the water retention models taking void ratio at applied stress as variable, the models taking isotropic compression stress as variable are more convenient for engineering application. The predicted results of both liquid saturation and water content against functions of suction are in good agreement with the test results.

Key words: intact loess; isotropic compression stress; wetting test in stage; wetting water retention behaviour

0 引言

土的持水特性是描述吸力与湿度(饱和度, 含水率或体积含水率)之间的关系, 它与非饱和土的变形、强度及渗透特性密切相关。考虑应力对持水特性的影

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878183); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目(14JS063); 西安理工大学博士创新基金项目(310-252071509)

收稿日期: 2017-06-11

***通讯作者** (E-mail: chencl@xaut.edu.cn)

响是建立非饱和土力水耦合模型的关键之一,也是近年来研究的热点^[1-8]。基于试验成果,提出考虑应力影响的持水曲线模型主要有两类:一类是直接以应力为变量,如陈正汉等^[1]基于常应力脱湿试验,提出了考虑净平均应力和偏应力影响的广义持水曲线模型;李永乐等^[2]及陈存礼等^[3]分别基于常含水率等向压缩试验及侧向压缩试验,建立了持水曲线模型。另一类是以应力作用下孔隙比为变量,如Huang等^[4]基于不同预应力下脱湿试验,建立了修正Brooks-Corey模型;Tarantino等^[5]基于常含水率侧限压缩试验,张昭等^[6]基于常竖向应力脱湿试验及张登飞等^[7]基于常竖向应力吸湿试验,建立了修正van Genuchten模型;孙德安等^[8]基于不同三轴应力条件下常应力吸湿试验,常吸力等向压缩及三轴剪切试验,建立了持水曲线增量模型。

黄土地区天然地基与边坡等土体通常为一定应力作用下存在大孔隙与垂直孔洞的原状黄土,使得持水特性与重塑黄土存在差异^[9],当地下水位上升或降雨入渗等引起土体产生增湿变形时,会使土体的持水特性发生变化。因此,研究常应力作用下原状黄土吸湿持水特性具有重要的理论和实际意义。已有研究主要以重塑黄土为对象,揭示了应力或应力作用引起孔隙比变化对持水特性的影响^[1-2, 6-7]。而对于原状黄土,相关的研究很少,且仅基于常含水率或常吸力下侧限压缩试验^[3, 10]及等向压缩试验^[11]研究了应力对持水特性的影响,有关常应力作用下吸湿持水特性的研究还鲜有报导。

基于上述认识,本文用改装的非饱和土三轴剪切渗透仪,在不同等向压缩应力作用下对天然状态原状黄土进行分级浸水试验,分析等向压缩应力对原状黄土吸湿持水特性的影响,提出直接以等向压缩应力为参量的原状黄土吸湿持水曲线模型,为建立原状黄土力水耦合本构关系奠定基础。

1 试验方案及方法

1.1 试验用土及试样制备

试验用土为西安某基坑的原状Q₃黄土,取土深度3~4 m,物理性质指标见表1。用削样器制备直径约3.91 cm,高度为4 cm的三轴试样(为了缩短浸水稳定所需时间,试样高度为4 cm)进行试验。

表1 原状Q₃黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact Q₃ loess

相对密度 G_s	含水率 $w_p/\%$	干密度 $\rho_{d0}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	颗粒组成/%		
					>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.70	15.2	1.28	30.9	19.8	4	73	23

1.2 试验仪器

试验仪器为西安理工大学岩土工程研究所改装的非饱和土三轴剪切渗透仪(见图1)。该仪器主要由三轴双层压力室,围压加载与体变量测装置,轴向应力或应变控制的加荷装置,浸(排)水装置及数据采集系统等组成。该仪器可进行不同应力路径下非饱和土三轴试验,不同应力条件下分级浸水与干湿循环试验;可测定的精度:试样的体变与排水量为 0.01 cm^3 ,轴向变形为 0.01 mm ,孔隙水压力为 1 kPa 。具体的仪器结构详见文献[12]。



图1 非饱和土三轴剪切渗透仪

Fig. 1 Triaxial equipment for shearing and permeability measurement of unsaturated soil

1.3 试验方案及方法

为了研究等向压缩应力对原状黄土持水特性的影响,在不同净等向压缩应力下对天然含水率(初始吸力 s_0 为 175 kPa)原状黄土进行分级浸水试验。控制的净等向压缩应力 p (等于净围压 σ_3)分别为 $0, 50, 100, 200, 300, 400\text{ kPa}$ 。为简便起见,下文把净等向压缩应力简称为应力。

试验主要包括吸力平衡,常吸力等向压缩及常应力分级浸水3个阶段。

在吸力平衡阶段,给试样施加 5 kPa 的净围压(使乳胶膜紧贴试样)和与初始吸力 s_0 相等的孔隙气压力 u_a ,打开排水阀(三通),待排水达到稳定后,即完成吸力平衡。

在常吸力等向压缩阶段,排水阀处于开通状态,施加围压至目标应力,待试样体变、轴向变形与排水皆稳定后,即完成等向压缩。根据压缩稳定后体变及排水量分别计算出浸水前孔隙比 e_c 与含水率 w_c ,进而得到饱和度 S_{rc} ($S_{rc}=G_s w_c/e_c$, G_s 为相对密度,其值见表1),不同应力下 e_c 及 S_{rc} 值见表2。

在常应力分级浸水阶段,保持应力 p 及孔隙气压力 u_a 不变,关闭排水阀,给浸(排)水装置(图1)施加稍大于 u_a 的压力。微开排水阀,使浸(排)水装置只与试样帽上进水管路相连通,则水缓慢注入试样上端,待注水量达到目标含水率对应的加水量时,关

闭排水阀，当体变、轴向变形及孔隙水压力皆达到稳定，即达到浸水稳定后，则完成本级浸水。不同应力下分级浸水至饱和的级数均大于 6，每级含水率的增量 $\Delta w \geq 2\%$ 。每级浸水稳定后，根据孔隙水压力 u_w 计算出吸力 s ($s = u_a - u_w$)，由体变及注水量分别计算出孔隙比 e 与含水率 w ，进而得到饱和度 S_r 。增湿至饱和时 $S_r = 1$ ，相应的孔隙比为 e_s 。

表 2 等向压缩应力作用下分级浸水试验方案及结果

Table 2 Programs and results of wetting tests by stages under constant isotropic compression stress

e_0	初始		应 力 p /kPa	等向压缩后		浸水 饱和 e_s	脱气吸 力值 s_c /kPa
	S_{r0} /%	s_0 /kPa		e_c	S_{rc} /%		
1.115	36.8	175	0	1.115	36.8	1.115	3
1.115	36.8	175	50	1.105	37.1	1.063	4
1.115	36.8	175	100	1.094	37.3	0.999	7
1.115	36.8	175	200	1.054	38.0	0.898	10
1.115	36.8	175	300	0.967	40.9	0.827	12
1.115	36.8	175	400	0.875	43.6	0.761	14

试验过程中，采集系统测记轴向变形，体变及孔隙水压力（或排水）。以体变与排水的增量小于 0.01 cm³ / (2 h)，轴向变形小于 0.005 mm/h，吸力增量小于 1 kPa / (2 h) 作为吸力平衡，等向压缩及浸水的稳定标准。

2 等向压缩应力对持水特性的影响

2.1 等向压缩应力对饱和度与吸力关系的影响

不同应力 p 下吸湿的饱和度 S_r 与吸力 s 关系如图 2 所示，可以看出：

(1) 分级浸水至饱和过程中，含水率 w 及饱和度 S_r 增大，吸力 s 减小， $S_r - s$ 曲线皆呈先陡变后缓变的上升趋势，转折处对应的吸力为脱气吸力值 s_c (air-occlusion suction value^[13])。不同 p 下 s_c 值见表 2。

(2) p 对 $S_r - s$ 曲线陡变段斜率影响较小，对 s_c 影响较大，且随着 p 增大，平缓段范围增长， s_c 增大， $S_r - s$ 曲线向右移动。反映了等向压缩应力对以吸湿 $S_r - s$ 关系表征原状黄土的持水特性影响较大，且主要反映在脱气吸力值的变化。这与应力引起孔隙比变化对重塑 Saskatchewan 粉土^[4]持水特性的影响，及应力对珍珠土^[8]、重塑黄土^[7]持水特性的影响规律相一致。

(3) 无应力 ($p=0$) 时，浸水前孔隙比 e_c 与饱和后孔隙比 e_s 相等 (e_c, e_s 值见表 2)，即在分级浸水过程中试样没有产生增湿变形，孔隙比保持不变。反映了无应力时 $S_r - s$ 关系表征了常孔隙比下的持水特性。这与 Pereira 等^[14]的研究结果相一致。这是由于水和力是黄土产生增湿变形的必要条件，虽然浸水使黄土的物理状态和结构强度发生变化（内因变化），但没有力的作用（外因不变），浸水也不会使黄土产生增湿变形。

(4) 常应力作用下，分级浸水至饱和时孔隙比 e_s 皆小于浸水前孔隙比 e_c （见表 2），即在分级浸水过程中孔隙比逐渐减小。表明常应力作用下 $S_r - s$ 及 $w - s$ 关系（下文）表征了变孔隙比下的持水特性。

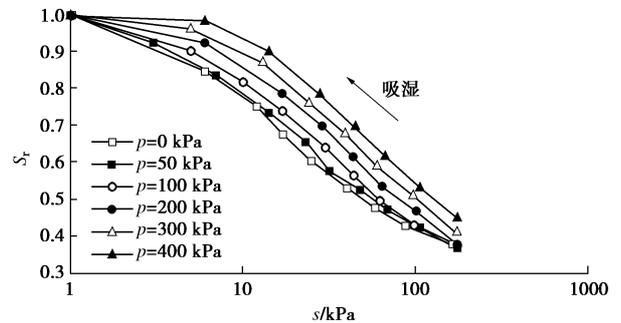


图 2 等向压缩应力对吸湿 $S_r - s$ 曲线的影响

Fig. 2 Effects of isotropic compression stresses on wetting $S_r - s$ curves

脱气吸力值 s_c （见表 2）与等向压缩应力 p 关系如图 3 所示。可见， $s_c - p$ 关系近似呈直线，其表达式为

$$s_c = s_{c0} + bp \quad (1)$$

式中， s_{c0} 、 b 为土性参数，分别为 $s_c - p$ 关系直线的截距和斜率，且 s_{c0} 为无应力 ($p=0$) 时脱气吸力值， b 为 s_c 随 p 增大而增大的速率。对于本文试验研究的原状黄土， $s_{c0}=3$ kPa， $b=0.03$ 。

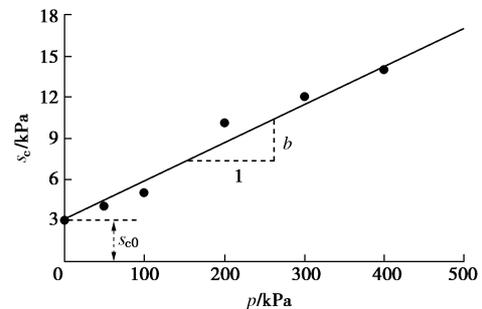


图 3 脱气吸力值 s_c 与等向压缩应力 p 关系

Fig. 3 Air-occlusion suction value s_c versus isotropic compression stress p

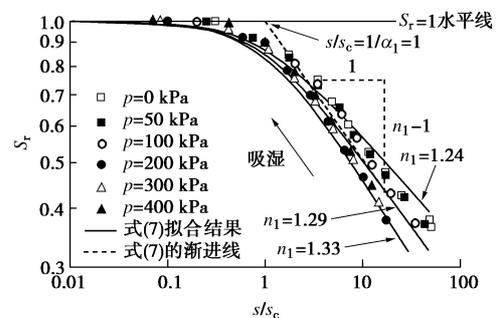


图 4 不同等向压缩应力下饱和度 S_r 与吸力比 s/s_c 关系

Fig. 4 Degree of saturation as a function of suction ratio under different isotropic compression stresses

综上所述，等向压缩应力对吸湿 $S_r - s$ 曲线影响主要通过脱气吸力值的变化来反映，当用吸力比 s/s_c

对吸力 s 进行规格化处理, 由图 2 及表 2 结果绘出在双对数坐标系上吸湿的饱和度 S_r 与吸力比 s/s_c 关系如图 4 所示。可见, 不同应力下试验点分布在较狭窄的范围内, 可以近似归一; 随着吸力比 s/s_c 的减小, $S_r - s/s_c$ 关系呈先陡变后缓变的型态。反映出虽然浸水前及浸水过程中孔隙比皆随应力的增大而减小, 但对不同应力作用下吸湿的 $S_r - s/s_c$ 关系影响很小, 且可用同一函数来描述。

2.2 等向压缩应力对含水率与吸力关系的影响

不同应力 p 下吸湿的含水率 w 与吸力 s 关系如图 5 所示, 可以看出:

(1) 不同应力下分级浸水至饱和过程中, 含水率 w 增大, 吸力 s 减小, $w - s$ 曲线皆呈先快速后缓慢上升趋势, 转折处对应的吸力 s 为脱气吸力值 s_c 。当把不同应力下由 $S_r - s$ 曲线确定的 s_c 值 (见表 2) 用符号 “ Δ ” 点绘在对应的 $w - s$ 曲线上时, 发现 s_c 点与 $w - s$ 曲线的转折点基本重合。说明以 $S_r - s$ 及 $w - s$ 关系表征的吸湿持水曲线具有相等的脱气吸力值。

(2) 应力 p 对 $w - s$ 曲线的影响与吸力大小有关, 存在吸力阈值 s_{cr} ($s_{cr}=35$ kPa)。当 $s > s_{cr}$ 时, 不同应力下试验点分布在较狭窄带内, 可近似归一, 说明对于原状黄土, 应力的影响很小。当 $s \leq s_{cr}$ 时, 随着 p 的增大, 脱气吸力值 s_c 增大, 饱和孔隙比 e_s 减小 (见表 2), 进而饱和含水率 w_s 减小, 使 $w - s$ 曲线下移, 即应力的影响较大。这与不同竖向应力下重塑黄土^[6-7]与压实黏土^[13]的持水特性研究结果相一致。

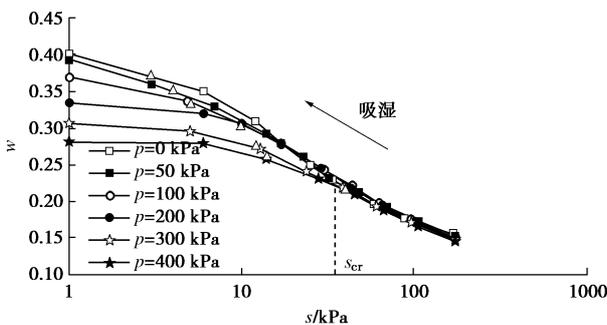


图 5 等向压缩应力对吸湿 $w - s$ 曲线的影响

Fig. 5 Effects of isotropic compression stresses on wetting $w - s$ curves

把无应力作用时浸水饱和的孔隙比及含水率分别用 e_{s0} 及 w_{s0} 表示。根据不同 p 下 e_s (表 2), 绘出饱和土的 $e_s - \ln p$ 等向压缩曲线如图 6 所示。可见, 曲线呈先平缓后陡变的下降趋势, 且可基于姚仰平等^[15]的思路, 由式 (2) 描述。其表达式为

$$e_s = e_{s0} - \lambda \ln[(p + p_s)/(1 + p_s)] \quad (2)$$

式中 λ 为 $e_s - \ln p$ 曲线渐近线的斜率; p_s 为压硬性参数, 可反映曲线的弯曲程度, 描述土的压硬规律, 其计算式为

$$p_s = \exp[(N - e_{s0})/\lambda] - 1 \quad (3)$$

式中, N 为 $e_s - \ln p$ 曲线渐近线上平均应力为 1 kPa 时所对应的孔隙比, 决定了渐近线在 $e_s - \ln p$ 空间内的位置。

式(2)可以统一描述屈服前后饱和土的压缩特性, 且满足 $p=1$ 时, $e_s=e_{s0}$ 的边值条件。对于本文研究的原状黄土, 通过最小二乘法拟合得到 $\lambda=0.255$, $N=2.380$, 对应的 $p_s=142$ kPa。

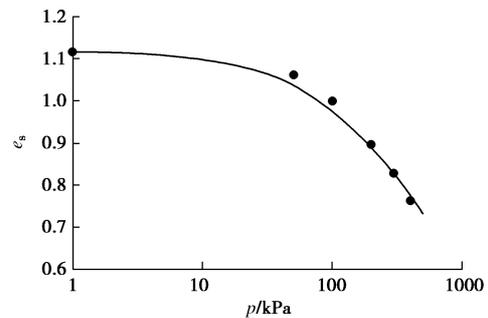


图 6 饱和原状黄土的 $e_s - \ln p$ 曲线

Fig. 6 $e_s - \ln p$ curve of saturated intact loess

$S_r=1$ 时, 由 $S_r=G_s w/e$ 得到饱和含水率 w_s 与孔隙比 e_s 关系为

$$w_s = e_s / G_s \quad (4)$$

则将式 (4) 代入式 (2), 得

$$w_s = w_{s0} - \lambda / G_s \ln[(p + p_s)/(1 + p_s)] \quad (5)$$

式中, $w_{s0}=e_{s0}/G_s$, 由于 $e_{s0}=e_0$ (见表 2), 则 $w_{s0}=e_0/G_s$ 。利用式 (5) 可确定不同等向压缩应力 p 下浸水饱和含水率 w_s 。

综上所述, 在 $s \leq s_{cr}$ 时, 等向压缩应力对原状黄土 $w - s$ 曲线的影响较大, 且主要反映在脱气吸力值 s_c 及饱和含水率 w_s 的变化上。当用吸力比 s/s_c 及含水率比 w/w_s 分别对吸力 s 及含水率 w 进行规格化处理, 由图 5 及表 2 的结果在双对数坐标系上绘出 $w/w_s - s/s_c$ 关系如图 7 所示。可见, 不同应力 p 下, $w/w_s - s/s_c$ 关系试验点分布在狭窄范围内, 可以近似归一, 且与 $S_r - s/s_c$ 的曲线型式相似, 皆呈先陡后缓变的特性。说明等向压缩应力对原状黄土 $w/w_s - s/s_c$ 关系影响很小, 且可用相同的函数来描述。

3 原状黄土持水特性的描述

3.1 持水特性的描述

广泛应用于描述常孔隙比下土的持水特性模型为 Van Genuchten 模型^[16] (简称 VG 模型), 该模型用总饱和度 S_r 表示^[5, 17-18]为

$$S_r = [1 + (\alpha s)^n]^{-m} \quad (6)$$

式中, α , n , m 为土性参数, $m=1-1/n$ 。在双对数坐标系中, mn ($mn=n-1$) 为 $S_r - s$ 曲线渐进线斜率, 即 n 反映了脱 (吸) 湿率; $1/\alpha$ 为渐进线与直线 $S_r=1$ 交

点, 对应的吸力即为进气(脱气)吸力值 $s_d(s_c)^{[18]}$ 。

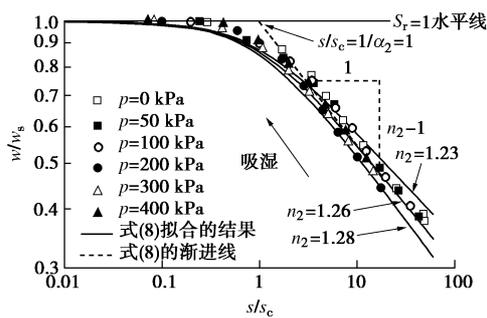


图7 不同等向压缩应力下含水率比与吸力比关系

Fig. 7 Water content ratio versus suction ratio under different isotropic compression stresses

由于不同应力下归一化的吸湿 $S_r - s/s_c$ (图4) 及 $w/w_s - s/s_c$ (图7) 曲线皆与 $S_r - s$ 曲线(图2)的型式相似, 纵坐标轴的量级相同, 横坐标轴的量级相差不大, 则尝试用类似于 VG 模型的方程(简称为类 VG 模型)对其进行描述, 其表达式为

$$S_r = [1 + (\alpha_1 s / s_c)^{n_1}]^{-(1-1/n_1)} \quad (7)$$

$$w/w_s = [1 + (\alpha_2 s / s_c)^{n_2}]^{-(1-1/n_2)} \quad (8)$$

式中, $\alpha_1, n_1, \alpha_2, n_2$ 为土性参数。由于式(7)、(8)与式(6)的型式相同, 则在双对数坐标系中, n_1-1, n_2-1 分别为吸湿 $S_r - s/s_c$ 及 $w/w_s - s/s_c$ 曲线的渐近线斜率; $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ 分别为渐近线与直线 $S_r=1$ 及 $w/w_s=1$ 交点对应的吸力比 s/s_c 值, 由于交点对应的吸力为 s_c , 则 $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ 皆等于 1, 即 $\alpha_1=\alpha_2=1$ 。对试验结果拟合, 得到参数 n_1, n_2 取值范围分别为 1.24~1.33, 1.23~1.28, 对应的平均值为 1.29, 1.26, 拟合曲线分别如图4与图7实线, 可见, 当 n_1, n_2 取其范围内的平均值时, 拟合结果最好。

把 $\alpha_1=1$ 及式(1)代入式(7), $\alpha_2=1$ 及式(1)代入式(8)得到

$$S_r = [1 + (s/(s_{c0} + bp))^{n_1}]^{-(1-1/n_1)} \quad (9)$$

$$w = w_s [1 + (s/(s_{c0} + bp))^{n_2}]^{-(1-1/n_2)} \quad (10)$$

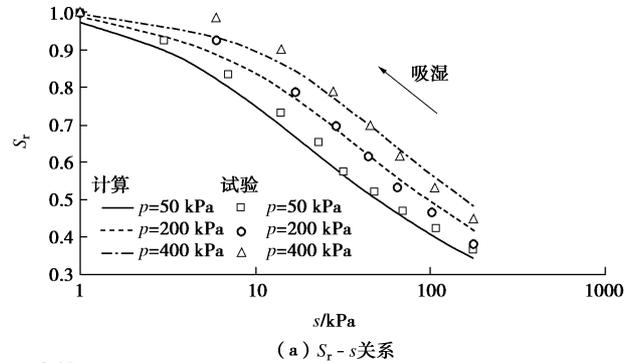
式(9)、(10)与式(5)分别为描述等向压缩应力条件下以 $S_r - s$ 及 $w - s$ 关系表征的吸湿持水曲线模型, 与以应力作用下孔隙比作为变量的持水曲线模型^[4-8]相比, 该模型直接以应力 p 为变量, 且模型参数皆可通过室内试验确定, 更便于实际工程应用。

3.2 模型参数的确定及试验验证

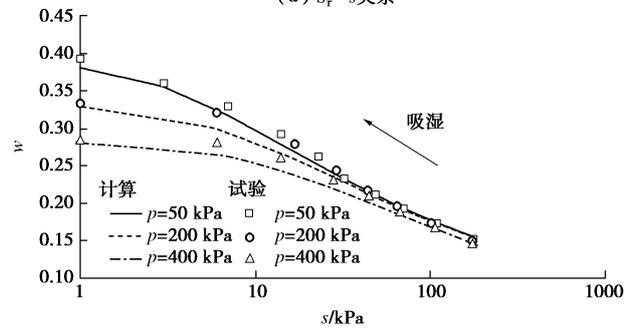
前文可知, 描述吸湿 $S_r - s$ 持水曲线的式(9)包括 s_{c0}, b, n_1 , 共3个参数; 描述吸湿 $w - s$ 持水曲线的式(10)与式(5)包括 $s_{c0}, b, n_2, \lambda, N$, 共5个参数。通过在3~5个不同应力 p (含 $p=0$) 下进行分级浸水试验, 即可确定这些参数。

对于本文研究的西安原状 Q₃ 黄土, 用式(9)、

(10)、(5)及其模型参数 (n_1, n_2 取其平均值), 计算出 $p=50, 100, 200$ kPa 下吸湿 $S_r - s$ 及 $w - s$ 曲线如图8所示。可见, 预测与实测结果吻合较好。说明本文模型皆可较好地预测等向压缩应力条件下原状黄土的吸湿持水曲线。



(a) $S_r - s$ 关系



(b) $w - s$ 关系

图8 不同应力下吸湿 $S_r - s$ 与 $w - s$ 关系的计算与试验结果比较

Fig. 8 Comparisons between calculated and measured results of wetting $S_r - s$ and $w - s$ curves of intact loess under different isotropic compression stresses

4 结 论

在不同等向压缩应力作用下对天然状态原状黄土进行了分级浸水试验, 分析了等向压缩应力对吸湿持水特性的影响, 得到了以下3点结论。

(1) 不同应力 (>0) 下, 从天然状态浸水至饱和过程中, 力水耦合作用使孔隙比逐渐减小, 饱和度 S_r 及含水率 w 与吸力 s 关系皆呈先陡变后平缓上升的趋势, 且以二者表征的吸湿持水曲线具有相等的脱气吸力值。

(2) 应力对 $S_r - s$ 曲线的影响较大, 且主要表现为脱气吸力值随着应力增大而增大。应力对 $w - s$ 曲线的影响与吸力大小有关, 存在吸力阈值 s_{cr} ; 当 $s \geq s_{cr}$ 时影响很小, 可近似归一; 当 $s < s_{cr}$ 时影响明显, 且主要通过脱气吸力值及饱和含水率随着应力增大而分别增大及减小来反映。脱气吸力值及饱和含水率与等向压缩应力关系可分别用线性函数及对数函数描述。

(3) 不同应力下饱和度及含水率比(含水率与饱和含水率之比)与吸力比(吸力与脱气吸力值之比)

之间皆呈良好的归一化关系, 且可分别用类 VG 模型描述。与以应力作用下孔隙比作为变量的持水曲线模型相比, 该模型直接以等向压缩应力作为变量, 便于实际工程应用。

参考文献:

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [2] 李永乐, 刘汉东, 刘海宁, 等. 黄河大堤非饱和土土水特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(3): 347 - 350. (LI Yong-le, LIU Han-dong, LIU Hai-ning, et al. Test and study on soil water curve of unsaturated soil of Yellow River dyke[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(3): 347 - 350. (in Chinese))
- [3] 陈存礼, 褚峰, 李雷雷, 等. 侧限压缩条件下非饱和原状黄土的土水特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(3): 610 - 615. (CHEN Cun-li, CHU Feng, LI Lei-lei, et al. Soil-water characteristics of unsaturated undisturbed loess under confined compression condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(13): 610 - 615. (in Chinese))
- [4] HUANG S, BARBOUR S, FREDLUND D. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 411 - 425.
- [5] TARANTINO A. A water retention model for deformable soils[J]. Géotechnique, 2009, **59**: 751 - 762.
- [6] 张昭, 刘奉银, 赵旭光, 等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. 水利学报, 2013, **44**(5): 578 - 585. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHAO Xu-guang, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(5): 578 - 585. (in Chinese))
- [7] 张登飞, 陈存礼, 杨炯, 等. 侧限条件下增湿时湿陷性黄土的变形及持水特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(3): 604 - 612. (ZHANG Deng-fei, CHEN Cun-li, YANG Jiong, et al. Deformation and water retention behaviour of collapsible loess during wetting under lateral confinement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(3): 604 - 612. (in Chinese))
- [8] SUN D A, SHENG D, XU Y F. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**: 673 - 686.
- [9] 袁中夏, 王兰民, 严耿升. 黄土土水特征曲线试验研究[J]. 工程勘察, 2012, **5**: 10 - 14. (YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, YAN Geng-sheng. Study on soil-water characteristic curves of loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, **5**: 10 - 14. (in Chinese))
- [10] 韦峰, 姚志华, 苏立海, 等. 非饱和 Q₃ 原状黄土及其重塑土的持水特性研究[J]. 工程勘察, 2015, **43**(8): 1 - 5. (WEI Feng, YAO Zhi-hua, SU Li-hai, et al. Study on water holding capacity of unsaturated undisturbed and remolded loess of Q₃[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, **43**(8): 1 - 5. (in Chinese))
- [11] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 各向均等压缩条件下原状黄土的吸力特征[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(增刊 1): 1502 - 1506. (CHU Feng, SHAO Sheng-jun, CHEN Cun-li. Soil-water characteristics of undisturbed loess under isotropic compression condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(S1): 1502 - 1506. (in Chinese))
- [12] 张洁. 三轴应力条件下原状黄土的增湿变形土水特征及渗透特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015. (ZHANG Jie. Deformation and soil water characteristics as well as permeability properties of unsaturated intact loess during wetting under triaxial stress[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [13] ROMERO E, VECCHIA G D, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. Géotechnique, 2011, **61**(4): 313 - 328.
- [14] PEREIRA H F J, FREDLUND D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **126**(10): 907 - 916.
- [15] 姚仰平, 刘林, 罗汀. 砂土的 UH 模型[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2147 - 2153. (YAO Yang-ping, LIU Lin, LUO Ting. UH model for sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2147 - 2153. (in Chinese))
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [17] GALLIPOLI D, WHEELER S, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 105 - 112.
- [18] GALLIPOLI D A. hysteretic soil-water retention model accounting for cyclic variations of suction and void ratio[J]. Géotechnique, 2012, **62**(7): 605 - 616.