

DOI: 10.11779/CJGE201803006

等向应力条件下非饱和原状黄土增湿渗水特性试验研究

张登飞^{1, 2}, 陈存礼^{1, 2}, 张洁³, 贾亚军^{1, 4}

(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. 甘肃林业职业技术学院, 甘肃 天水 741020)

摘要: 渗水系数是非饱和土固结分析的关键参数之一。用自制的非饱和土三轴剪切渗透仪, 在无应力及不同等向应力下分别对不同和相同孔隙比的原状黄土进行了直接向试样分级注水使吸力逐渐减小的增湿渗透试验, 分析了孔隙比、应力与饱和度及吸力对增湿渗水系数的影响, 对比分析了无应力与应力作用下的渗水特性, 提出了可以考虑应力与饱和度或吸力影响的非饱和原状黄土增湿渗水的渗透性函数。研究结果表明: 孔隙比和应力对渗水系数与饱和度关系及渗水系数与吸力关系皆有影响, 吸力较大时对后者几乎没有影响, 可近似归一。无应力及不同应力条件下, 只要孔隙比相同, 则渗水系数与饱和度或吸力关系相同; 相对渗水系数与吸力的关系不能归一, 同一吸力对应的相对渗水系数随孔隙比的减小或应力的增大而增大, 而相对渗水系数与饱和度及吸力比(吸力与脱气值之比)关系皆可以归一。vG-M模型不适用于描述常孔隙比下原状黄土的渗水系数; 提出的渗透函数可以预测一定等向应力作用下增湿过程中饱和度增大及吸力减小时原状黄土的渗水系数, 预测结果与试验结果吻合较好。

关键词: 原状黄土; 增湿; 孔隙比; 等向应力; 饱和度; 吸力; 渗水系数

中图分类号: TU475.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)03 - 0431 - 10

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

Experimental study on wetting water permeability of unsaturated intact loess under isotropic stress

ZHANG Deng-fei^{1, 2}, CHEN Cun-li^{1, 2}, ZHANG Jie³, JIA Ya-jun^{1, 4}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, 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. Gansu Forestry Technological College, Tianshui 741020, China)

Abstract: The unsaturated water permeability is one of the key parameters in performing consolidation analysis for unsaturated soil systems. A series of unsaturated infiltration tests are performed on the intact loess with various void ratios at null stress and with the same void ratio at different isotropic stresses using the independently developed triaxial equipment for shearing and permeability measurement of unsaturated soils, whereby the suction is reduced incrementally by the direct addition of small amount of water to the sample at a constant isotropic stress. The influences of void ratio, stress, degree of saturation and suction on the water permeability are analyzed. The water permeability at null stress is compared with that at applied stress. The permeability functions to describe the relationships of water permeability versus degree of saturation and suction are respectively proposed for the intact loess at applied stress. The results show that the void ratio and stress have the effect on the relationships of the water permeability versus degree of saturation and suction, and little influences are found on the latter as the suction value is higher than certain threshold suction. The water permeability as functions of both degree of saturation and suction is the same as long as the void ratio is the same at both null stress and different stresses. The relative water permeability versus suction can not be normalized, and the relative water permeability increases with the decreasing void ratio or increasing stress for the same suction. Interestingly, there are all unique relationships of relative water permeability as functions of both degree of saturation and suction ratio (defined as suction to air-occlusion suction ratio). The wetting water permeability for the intact loess is not described by the vG-M model at a given void ratio. The proposed permeability functions can predict the water permeability for the intact loess with both the increase of degree of saturation and the decrease of suction during wetting

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: 2016 - 11 - 09

*通讯作者(E-mail: chencl@xaut.edu.cn)

at a constant isotropic stress. The predicted results are in good agreement with the test ones.

Key words: intact loess; wetting; void ratio; isotropic stress; degree of saturation; suction; water permeability

0 引言

降雨、地下水位上升或下降时,土体的渗流及变形计算分析等,需要饱和与非饱和土的渗水性参数——渗水系数。渗水系数与土的湿度,密度,结构性及应力状态等因素有关。渗水系数与这些因素的关系,即为渗水的渗透性函数^[1]。非饱和土的渗水系数可以用间接法和直接法确定。间接法属于经验推断方法,通常利用土水特征曲线间接求得,其精度如何有待试验验证。通过试验测定渗水系数的直接法有稳态试验法,瞬态试验法等。

无应力条件下,一些渗水试验结果揭示了湿度(吸力,饱和度)对重塑土渗水系数的影响^[2-4],湿度和密度对原状^[5]及重塑土^[6-11]渗水系数的影响。非饱和土的特性(包括孔隙比的变化)主要取决于净应力和吸力(含水率)两个应力状态变量。应力及吸力变化时,土体产生变形,导致孔隙结构变化,进而引起渗水特性变化。而关于应力对渗水特性的影响,仅有相对较少的试验研究^[12-15]。

黄土是干旱半干旱地区的沉积物,是一种典型的非饱和土。无应力条件下,已有文献主要揭示了密度与湿度对非饱和重塑黄土渗水系数的影响^[8-11],仅姚志华等^[5]揭示了二者对原状黄土渗水特性的影响。天然黄土通常为一定应力作用下的原状黄土,且降雨或生活生产用水入渗时,力水耦合作用使土体产生变形,进而引起渗水特性的变化。因此,研究应力作用下增湿时原状黄土的渗水特性具有重要的理论和实际意义。然而,仅李永乐等^[13]通过非饱和土渗透试验研究了等向应力对重塑黄土渗水特性的影响,有关应力对原状黄土渗水特性影响的研究还鲜有报道。

渗透函数中引入应力引起的孔隙比变化是考虑应力对非饱和土渗水特性影响的常用方法之一。Huang等^[12]建立了考虑应力引起孔隙比变化的渗透函数。对于同一孔隙比,水力作用路径对原状黄土渗水特性是否有影响的研究还鲜有报导。

基于上述认识,本文用自制的非饱和土三轴剪切渗透仪,在无应力及不同等向应力下分别对不同和相同孔隙比的原状黄土进行分级浸水渗透试验,分析孔隙比、应力与饱和度及吸力变化对渗水系数的影响,并结合电镜扫描试验分析渗水机理,对比分析同一孔隙比下不同水力作用路径下的渗水特性,提出可以考虑应力与饱和度或吸力影响的非饱和原状黄土增湿渗水的渗透性函数,为建立非饱和土渗流-固结耦合本构

关系奠定基础。

1 试验仪器及试验方案

1.1 试验仪器与渗水试验原理

试验仪器为基于改进型水气运动联合测定仪^[9]的原理及方法自行研制的三轴剪切试验渗透仪,如图1所示。该仪器能进行不同应力条件下渗水试验,不同应力路径三轴剪切试验,仪器原理如图2所示,具体的功能详见文献^[16]。



图1 非饱和土三轴剪切渗透仪

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

通过改变#1三通阀门的方向,可使浸(排)水管与试样上端的进水管路相连通(从试样上端浸水时),或与陶土板下端的一个出口相连通(从试样下端排水时),或关闭(测定孔隙水压力时,三者之间皆不连通)。通过改变#2三通阀门的方向,可使陶土板下端的另一个出口与水罐相连通(测定孔隙水压力时冲刷陶土板下方螺旋槽水中气泡),或与滴定管相连通(测定排水时冲刷水中气泡),或关闭(测定孔隙水压力时,三者之间皆不连通)。#3阀门处于开通状态时,孔隙气压管路把气压加载装置与陶土板外侧环形多孔板相连通,这样既可用于轴平移法测量及控制吸力时施加给试样孔隙气压 u_a ,又可使试样在加载及浸水过程中排气。

进行渗水试验时,通过浸(排)水管直接向试样上端分级注水进行增湿,逐级浸水直至试样饱和,浸水级数大于6,以每级含水率的增量 $\Delta w \geq 2\%$ 控制加水量。在加载及浸水过程中,#3阀门始终处于开通状态,通过气压加载装置施加的孔隙气压 u_a ($u_a = s_0$)保持不变,采用轴平移技术测定吸力(测量孔隙水压力 u_w ,吸力 $s = u_a - u_w$),试样通过孔隙气压管路排气。

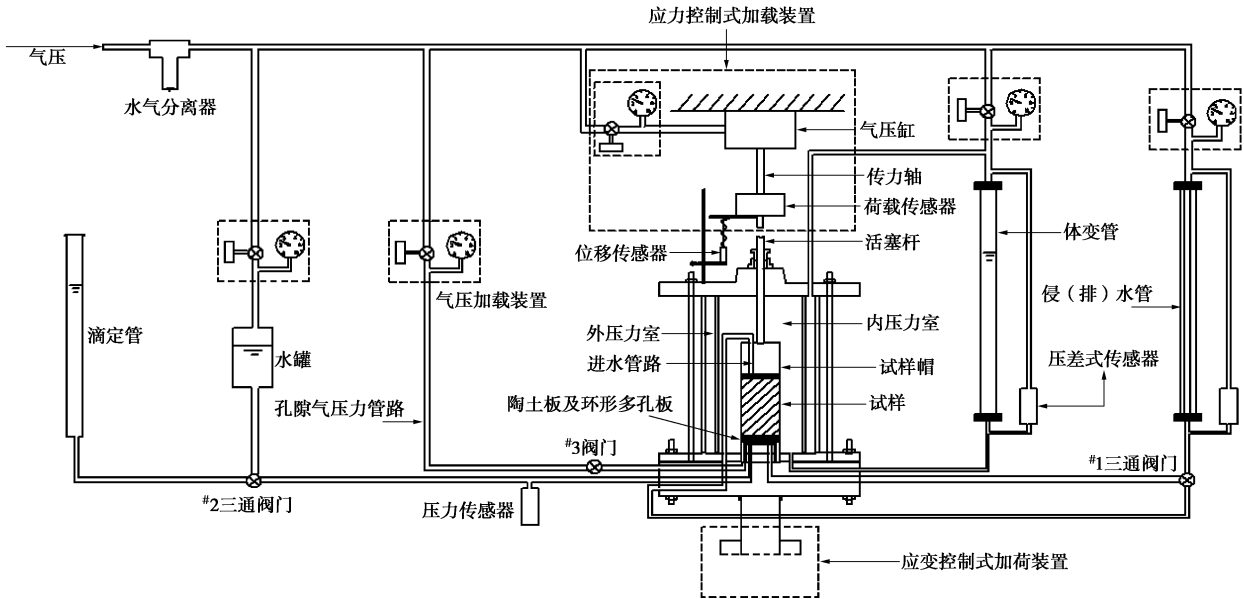


图2 非饱和土三轴剪切渗透仪的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of triaxial equipment for shearing and permeability measurement of unsaturated soil

注入一定水量 Q_L 后, 在力水耦合作用下, 水逐渐从上向下渗透, 增湿引起试样的体变、轴向变形及孔隙水压力 u_w 逐渐增大, 吸力 $s (s=u_a-u_w)$ 逐渐减小, 并皆逐渐趋于稳定。当三者皆达到稳定标准时, 则认为渗水达到稳定, 即水停止转移运动。由于渗水过程中, 体变和轴向变形比孔隙水压力 (吸力) 更容易达到稳定, 故把由浸水开始至吸力达到稳定 (渗水运动停止) 的历时作为渗透历时 t 。随着浸水级数的增大, 试样的含水率 w , 饱和度 S_r 及孔隙水压力 u_w 逐渐增大, 吸力 s 逐渐减小。逐级浸水至饱和时, $u_w \approx u_a, s \approx 0$ 。

虽然在渗水过程中, 吸力并非定值, 而是逐渐减小并趋于稳定, 但可以按常水头法确定力水耦合作用下变形及吸力稳定后土样的平均渗水系数 k_L ^[1, 9]。根据每级浸水前与渗透稳定时试样的吸力 s_1 与 s_2 (通过测记浸水前及渗水稳定时的孔隙水压力 u_{w1}, u_{w2} , 确定 $s_1=u_a-u_{w1}, s_2=u_a-u_{w2}$) 之差 Δs 计算水力梯度 i_w , 其表达式为

$$i_w = (s_1 - s_2) / \rho_w g L \quad (1)$$

式中 L 为试样的高度 (cm); ρ_w 为水的密度 (g/cm^3); g 为重力加速度 (取 $10 m/s^2$)。根据达西定律, 一定浸水量 Q_L (cm^3) 下平均渗水系数 k_L 的表达式为

$$k_L = \frac{Q_L}{i_w t A} = \frac{Q_L \rho_w g L}{(s_1 - s_2) t A} \quad (2)$$

式中, A 为试样的面积 (cm^2)。

根据该方法测定渗水系数时, 无需测定渗水量, 仅需测定每级浸水量 Q_L 下渗透历时 t 及吸力 s_1 与 s_2 , 与稳态法相比, 既加速了测试进程, 又避免了少量渗水准确量测的困难^[1]。

1.2 试验土样及试验方案

(1) 试验土样

试验用土为西安北郊某基坑侧壁的原状 Q_3 黄土, 取土深度 3~4 m, 物理性质指标见表 1。用专门的削样器制备直径约 3.91 cm, 高度为 4 cm 的三轴试样 (为了缩短水的渗透历时, 试样高度为 4 cm)。

表 1 原状 Q_3 黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact Q_3 loess

相对密度 G_s	含水率 $w_0/\%$	干密度 $\rho_{d0}/(g \cdot cm^{-3})$	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	1.23~1.35	30.9	19.8	4	73	23

(2) 试验方案及方法

为了研究孔隙比, 等向应力与饱和度及吸力对原状黄土渗水特性的影响, 并探讨同一孔隙比下水力作用路径的影响, 对天然湿度状态 (含水率 $w_n=15.2\%$, 初始吸力 $s_0=175 kPa$) 试样进行无应力-渗水 (NSW) 试验及等向应力-渗水 (ICW) 试验。

进行两种类型渗水试验时, 由于不同试样的含水率略有差异, 使其初始吸力不完全等于 175 kPa, 故皆需先进行吸力平衡, 以使吸力皆达到相同的初始值。分级浸水时, #2 三通阀门关闭, #3 阀门开通, 保持孔隙气压力 u_a 不变, 先关闭 #1 三通阀门, 通过压力传感器测定浸水前试样的孔隙水压力 u_{w1} , 则可确定浸水前吸力 s_1 ; 再通过气压加载装置给浸 (排) 水管施加稍大于 u_a 的压力后, 微开 #1 三通阀门, 使浸 (排) 水管与进水管路相连通, 水缓慢浸入试样的上端, 待浸水量 Q_L 达到目标含水率对应的加水量时, 关闭 #1 三通阀门。从每级浸水开始起, 测定不同时间试样的体变、轴向变形及孔隙水压力 (吸力) 的变化, 直到稳定为止。

a) 无应力 - 渗水 (NSW) 试验

NSW 试验是在无应力时对不同孔隙比 e 试样进行分级浸水至饱和的渗水试验, 以研究孔隙比对渗水特性的影响。包括 2 个天然孔隙比 e_0 , 3 个预应力作用后孔隙比 e 的试样, 具体的孔隙比 e 见表 2。

表 2 分级浸水渗透试验试样的体积质量特性

Table 2 Volume-mass properties of specimens for infiltration tests in stages

试验 编号	初始		浸水应 力 p /kPa	预应力作用/等向 压缩后		浸水 饱和 e_s	脱气值 s_c /kPa
	e_0	$S_{r0}/\%$		e	$S_r/\%$		
NSW	1.115	36.8	0	1.115	36.8	1.115	3
	1.002	40.9	0	1.002	40.8	1.002	5
	1.115	36.8	0	0.945	42.5	0.945	7
	1.115	36.8	0	0.815	47.8	0.815	10
	1.115	36.8	0	0.710	54.2	0.710	14
	1.115	36.8	60	1.102	37.2	1.060	4
ICW	1.115	36.8	100	1.094	37.3	0.999	5
	1.115	36.8	178	1.074	37.6	0.914	7
	1.115	36.8	200	1.054	38.0	0.898	10
	1.115	36.8	300	0.967	40.9	0.827	12
	1.115	36.8	400	0.875	43.6	0.761	14

预应力作用后不同孔隙比试样是通过天然状态 ($e_0=1.115$) 试样进行常吸力 ($s_0=175$ kPa) 等向压缩及三轴剪切后卸载的方法得到。施加的预固结净等向应力皆为 300 kPa, 偏应力分别为 150, 275, 350 kPa。根据加卸载稳定后试样的体变, 计算预应力作用后试样的孔隙比。

NSW 试验主要包括吸力平衡, 常吸力等向压缩与三轴剪切及卸载 (对天然孔隙比试样无此阶段), 无应力分级浸水 3 个阶段。在前两个阶段, #1 三通阀门转到从试样下端排水的方向。在吸力平衡阶段, 给试样施加 5 kPa 的等向应力 (使乳胶膜紧贴试样) 和与初始吸力 s_0 ($s_0=175$ kPa) 相等的孔隙气压力 u_a , 待排水达到稳定时, 即完成吸力平衡。在常吸力等向压缩, 三轴剪切及卸载阶段, 先施加一定的净等向应力, 再加一定的偏应力, 待试样的体变、轴向变形与排水稳定后卸载, 直到三者皆达到卸载稳定标准为止。在无应力分级浸水阶段, 逐级向试样上端注入一定量的水, 当增湿引起的体变、轴向变形及孔隙水压力 (吸力) 达到稳定, 即渗水达到稳定后, 进行下一级浸水, 直至试样饱和。

b) 等向应力 - 渗水 (ICW) 试验

ICW 试验是不同净等向应力 p 作用下, 对天然状态试样 ($s_0=175$ kPa) 进行分级浸水至饱和的渗水试验, 以研究应力对渗水特性影响。控制的净等向应力 p (等

于净围压 σ_3) 分别为 60, 100, 178, 200, 300, 400 kPa。为简便起见, 下文把净等向应力 p 简称为应力 p 。

ICW 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。在前 2 个阶段, #1 三通阀门转到从试样下端排水的方向。在常吸力等向压缩阶段, 施加一定的净等向应力, 待试样的体变、轴向变形与排水稳定为止。在常应力分级浸水阶段, 保持等向应力 p 不变, 分级浸水, 浸水方法如上所述。

在 NSW 及 ICW 试验过程中, 为了提高试样的排水量及孔隙水压力的测量精度, 在加卸载及每级渗水稳定后, 冲刷陶土板下方螺旋槽水中的气泡, 具体的冲刷方法参见文献[16]。以试样的体变及水体积变化增量小于 $0.01 \text{ cm}^3/(2 \text{ h})$ 作为体变及排水的稳定标准, 以轴向变形增量小于 0.005 mm/h , 吸力增量小于 $1 \text{ kPa}/(2 \text{ h})$ 分别作为轴向变形及孔隙水压力 (吸力) 的稳定标准。

2 原状黄土的渗水特性

对于 NSW 及 ICW 试验, 根据加载卸载及等向压缩稳定后试样的体变及排水量, 计算出预应力作用及等向压缩后试样的孔隙比 e 、含水率 w 、饱和度 S_r ($S_r=G_s w/e$); 根据每级的浸水量 Q_L 及增湿引起的体变量, 计算出力水耦合作用下渗水稳定时试样的含水率 w 与孔隙比 e , 进而确定出力水耦合作用下饱和度 S_r 。不同预应力作用及等向压缩后 (即浸水前) 的 e , S_r 及浸水至饱和时 (湿陷后) 的 e_s 值见表 2。根据每级浸水时测定的浸水量 Q_L , 渗水开始与稳定时吸力差 Δs 及渗透历时 t , 由式 (2) 确定出力水耦合作用下渗水系数 k_L , 分级浸水至饱和时, k_L 即为饱和渗水系数 k_s 。

2.1 渗水系数与饱和度关系

由图 3 所示的无应力及不同应力条件下, 渗水系数 k_L 与饱和度 S_r 曲线可以看出:

(1) 无应力作用时, 不同孔隙比 e 下, $k_L - S_r$ 曲线皆呈先快后缓慢上升的型式 (图 3 (a)), 转折处对应的 S_r 基本上皆为 0.8, 这与王勇等^[4]对含浅层气砂土, 刘奉银等^[9]对不同干密度重塑黄土的研究结果相一致。曲线随着 e 的减小而下移, 不能归一, 说明孔隙比对原状黄土 $k_L - S_r$ 关系有明显的影响。

(2) 不同应力 p 作用下, $k_L - S_r$ 曲线的型式与无应力条件下相似, 即 k_L 皆随 S_r 的增大亦呈先陡变后缓变的上升趋势 (图 3 (b))。应力对 $k_L - S_r$ 曲线有明显的影响, 曲线随着 p 增大而下移, 即对于相同饱和度, 渗水系数随应力的增大而减小。这是由于随着应力增大, 力水耦合作用引起试样孔隙比减小 (见表 2), 使

得孔隙水的渗透通道变得弯曲细小, 流程的挠曲度增大, 流动阻力增大所致。这与 Ng 等^[15]对压实粉质黏土的增湿和减湿渗水试验结果相一致, 而与李永乐等^[13]对黄河大堤非饱和和压实黄土及崔颖等^[14]对压实膨胀土的增湿渗水试验结果不同。反映出应力对 $k_L - S_r$ 关系的影响规律与土的类型, 结构等有关。

(3) 无应力作用下分级浸水至饱和时, 试样均未产生湿陷, 孔隙比保持不变 ($e_s=e$, 见表 2), 则不同孔隙比 e 下 $k_L - S_r$ (图 3 (a)) 及 $k_L - s$ (下文, 图 5 (a)) 曲线对应的孔隙比为常值; 常应力作用下分级浸水至饱和时, 力水耦合作用引起孔隙比减小 ($e_s < e$, 见表 2), 则不同应力 p 下 $k_L - S_r$ 及 $k_L - s$ (图 5 (b)) 曲线对应的孔隙比并非定值。

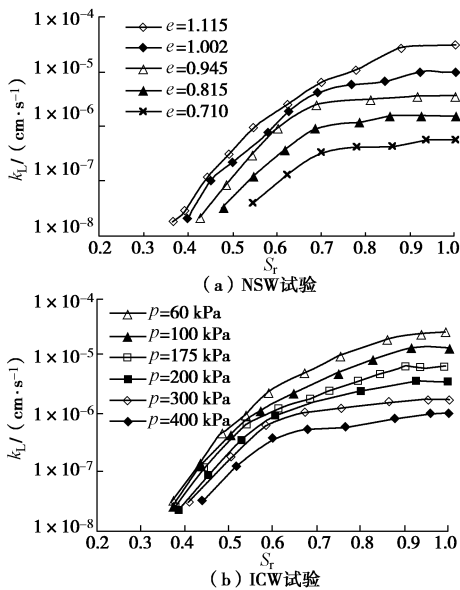


图 3 NSW 与 ICW 试验的渗水系数与饱和度关系

Fig. 3 Relationship between water permeability and degree of saturation from NSW and ICW tests

由图 3 绘出相对渗水系数 k_{rL} ($=k_L/k_s$) 与饱和度 S_r 的关系如图 4 所示。可见, 不同孔隙比 (无应力时) 及不同应力下, 试验点分布在同一较狭窄的范围, 可近似归一; 随着饱和度 S_r 增大, $k_{rL} - S_r$ 关系皆呈先陡变后缓变的型态。表明孔隙比及应力对原状黄土的相对渗水系数与饱和度关系的影响很小, 可用相同的渗水函数描述。这与 Lobbezoo 等^[17]基于不同应力状态下初始泥浆状态粉土^[12]、不同深度 Lakeland 砂土^[18]及不同孔隙比 Touchet 粉壤土^[6]的渗水试验结果整理得到 $k_{rL} - S_r$ 关系具有良好归一性的研究结果相一致。

2.2 渗水系数与吸力关系

无应力及不同应力条件下, 渗水系数 k_L 与吸力 s 曲线如图 5 所示, 可以看出:

(1) 无应力及不同应力 p 下分级浸水时, 吸力 s 逐渐减小, $k_L - s$ 曲线皆呈先快速后缓慢上升两个阶

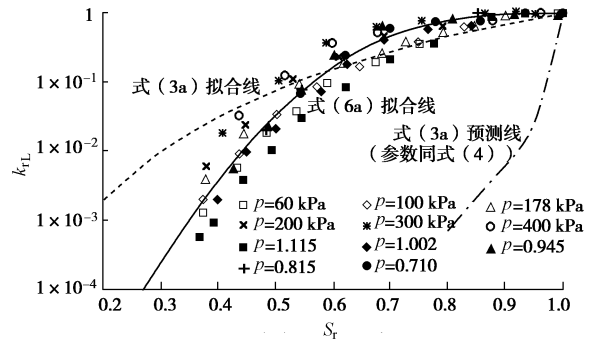
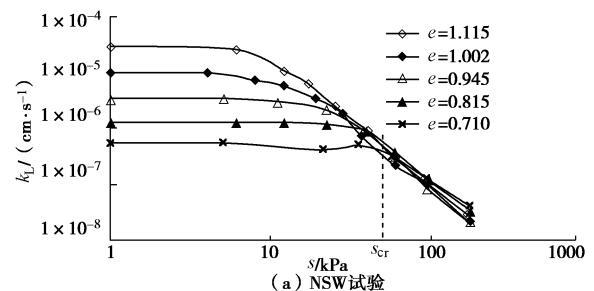


图 4 NSW 与 ICW 试验的相对渗水系数与饱和度关系

Fig. 4 Relationship between relative water permeability and degree of saturation from NSW and ICW tests

段, 且转折处的吸力值随孔隙比的减小或应力的增大而增大。不同应力作用下渗水特性与 Huang 等^[12]基于初始泥浆状粉砂土减湿渗透试验揭示的转折点处吸力随应力的增大而增大的研究结果一致; 而与 Ng 等^[15]对压实粉质黏土减湿及增湿渗透试验揭示的转折点处吸力随应力的增大而基本不变的研究结果不一致, 表明应力对 $k_L - s$ 关系的影响与土类有关。

(2) 孔隙比或应力对 $k_L - s$ 关系的影响程度与吸力 s 大小有关, 存在一个相同的吸力阈值 s_{cr} ($s_{cr}=50$ kPa)。当 $s > s_{cr}$ 时, $k_L - s$ 关系试验点皆分布在较狭窄带内, 可近似归一; 当 $s \leq s_{cr}$ 时, $k_L - s$ 曲线随孔隙比 e 减小或应力 p 增大而下移, 即渗水系数随着孔隙比减小或应力增大而减小。这与赵彦旭等^[10]、Huang 等^[12]分别针对压实黄土及初始泥浆状粉砂土减湿渗透试验结果相一致。这可能是由于天然状态原状黄土由集聚体间孔隙和集聚体内孔隙的双孔隙结构组成 (图 6 (a), 孔隙为黑色, 颗粒为白色), 预应力作用 (图 6 (b)) 与力水耦合作用 (图 6 (c)) 引起孔隙比的变化主要是集聚体间宏观孔隙的减小, 集聚体内微观孔隙几乎没有变化所致。 $s > s_{cr}$ 时, 浸水主要引起集聚体内孔隙中吸附水量的改变, 故应力或孔隙比的影响很小, 具有较好的归一性; $s \leq s_{cr}$ 时, 集聚体内微观孔隙被水充满而处于饱和状态, 浸水主要引起集聚体间宏观孔隙中水量增大^[7], 从而使孔隙比或应力有较大的影响。



(a) NSW 试验

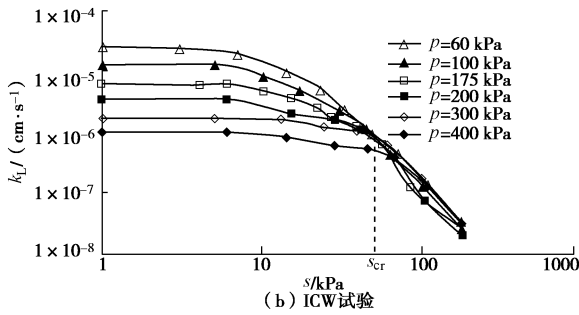
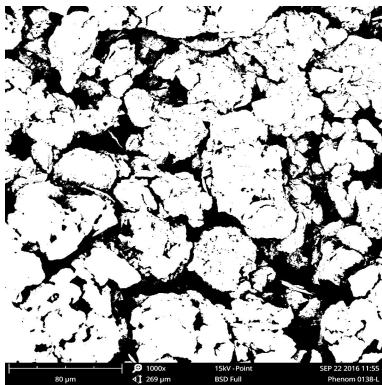
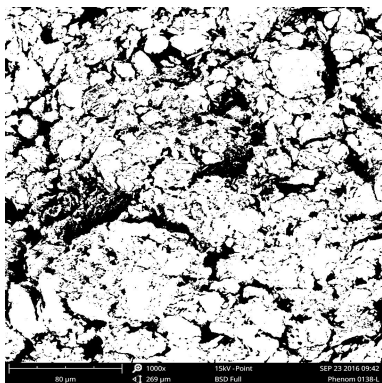


图5 NSW与ICW试验的渗透系数与吸力的关系

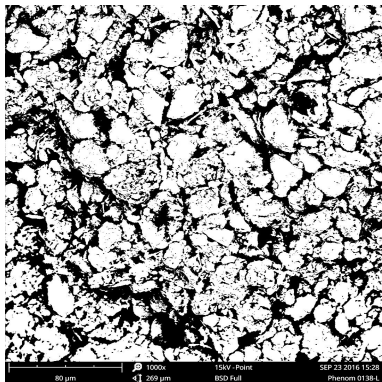
Fig. 5 Relationship between water permeability suction from NSW and ICW tests



(a) 天然含水率, $\rho_d=1.28 \text{ g/cm}^3$, $S_r=37\%$



(b) 预应力 ($p=300 \text{ kPa}$, $q=275 \text{ kPa}$) 作用后



(c) 力水耦合 ($p=100 \text{ kPa}$) 作用至饱和后

图6 不同应力条件作用后黄土的电镜扫描照片(放大1000倍)
Fig. 6 Microscope pictures of loess under different applied stresses (magnification of 1000 times)

由图5绘出相对渗透系数 k_{rL} 与吸力 s 的关系如图7所示。可见, 无应力及不同应力 p 下分级浸水时, 随着吸力的减小, $k_{rL} - s$ 关系曲线皆呈先陡变后缓变两个上升阶段。随着 e 减小或 p 增大, 陡变段斜率基本不变, 而转折处吸力值增大, 平缓段范围增长, 曲线向上移动, 即同一吸力下, 相对渗透系数随孔隙比的减小或应力的增大而增大。这与 Laliberte 等^[6]对不同类型土及 Huang 等^[12]对初始泥浆状粉砂土的试验结果相一致。说明孔隙比及应力对 $k_{rL} - s$ 关系有较大的影响。

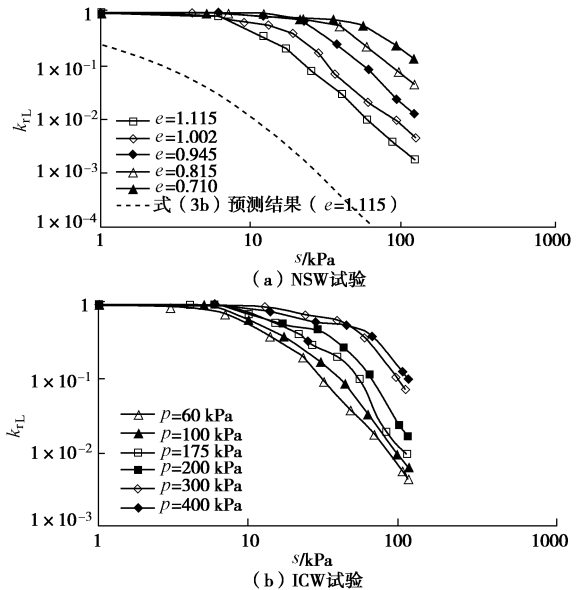


图7 NSW与ICW试验的相对渗透系数与吸力的关系
Fig. 7 Relationship between relative water permeability and suction from NSW and ICW tests

无应力及不同应力 p 条件下, 以饱和度 S_r 与吸力 s 关系表征的持水曲线如图8所示。可见, 增湿 $S_r - s$ 曲线皆呈先陡变后缓变两个上升阶段, 转折处所对应的吸力为脱气值 s_c (其值见表2)。孔隙比 e 及应力 p

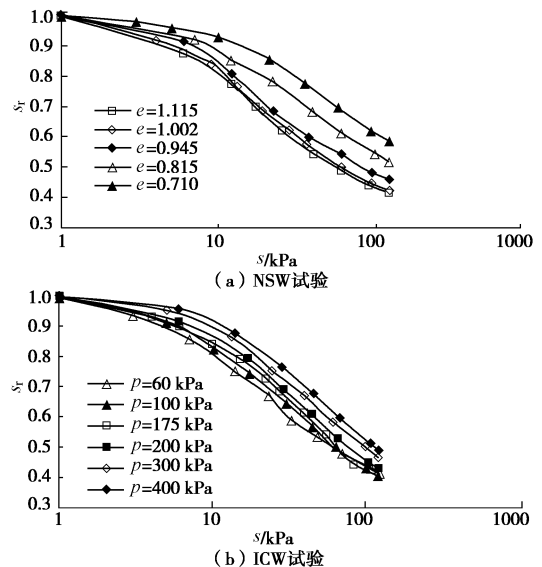


图8 NSW与ICW试验的土水特征曲线
Fig. 8 Water retention curves from NSW and ICW tests

对陡变段斜率的影响较小, 对脱气值 s_c 影响较大, 且随着 e 减小或 p 的增大, 脱气值 s_c 增大, 平缓段的范围增长, $S_r - s$ 曲线向右移动。

由图 7 及表 2 整理出相对渗水系数 k_{rL} 与吸力比 s/s_c (吸力 s 与脱气值 s_c 之比) 的关系如图 9 所示。可见, 无应力 (不同孔隙比) 及不同应力条件下, 试验点分布在同一较为狭窄的范围, 可以近似归一; 随着吸力比 s/s_c 的减小, $k_{rL} - s/s_c$ 关系皆呈先陡变后缓变的型态。反映出孔隙比及应力对相对渗水系数与吸力比关系的影响很小, 可用相同的渗水函数描述。

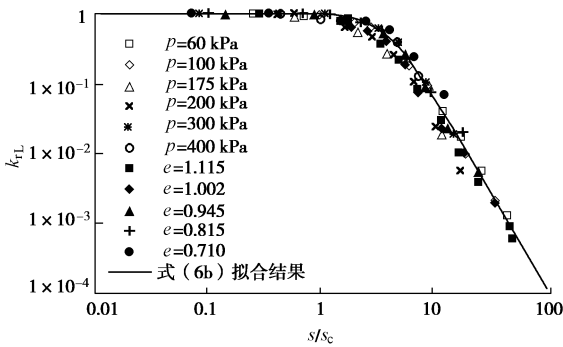


图 9 NSW 与 ICW 试验的相对渗水系数与吸力比关系

Fig. 9 Relationship between relative water permeability and suction ratio from NSW and ICW tests

2.3 水力作用路径对渗水特性的影响

由图 3, 5 得到相同孔隙比下 $k_L - S_r$, $k_L - s$ 典型曲线如图 10。可见, 同一孔隙比下, 无应力及应力作用时两种关系试验点皆分布在很窄的范围内, 即只要孔隙比相同, 一定饱和度或吸力条件下渗水系数近似相同, 可以近似地用同一渗透函数描述。这表明原状黄土的渗水特性 ($k_L - S_r$, $k_L - s$) 主要与孔隙比有关, 而与无应力浸水 NSW 试验的预固结应力-水作用路径, 常应力浸水 ICW 试验的力-水耦合作用路径下引起孔隙比变化的水力作用路径无关, 孔隙比是直接影响因素, 应力状态为间接因素, 应力的影响可以用力水耦合作用引起的孔隙比变化来反映。

3 原状黄土渗水特性的描述及预测

不同常孔隙比下, 通常用 van Genuchten-Mualem (vG-M) 模型^[19]和 Parkervan-Genuchten-Mualem (P-vG-M) 模型^[20]描述非饱和土的水气渗透特性, 其表达式分别为

$$k_{rL} = (S_{er})^\gamma \left[1 - (1 - S_{er}^{1/m})^m \right]^2, \quad (3a)$$

$$k_{rL} = \frac{\left\{ 1 - (\alpha s)^{n-1} [1 + (\alpha s)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha s)^n]^{m/2}}, \quad (3b)$$

$$k_{rG} = (1 - S_{er})^\gamma (1 - S_{er}^{1/m})^{2m}. \quad (4)$$

式中 S_{er} 为有效饱和度; k_{rG} ($=k_G/k_d$, k_G , k_d 分别为一定含水率及风干状态下渗气系数) 为相对渗气系数; α , n , m 为描述持水特性的 V-G 模型 (式 (5)) 的参数, 且 $m=1-1/n$; γ 为反映多孔介质绕曲程度影响的土性参数, 一般统计值为 0.5; 式 (3a) 及式 (4) 的参数 m , γ 相同。

$$S_{er} = \left[1 + (\alpha s)^n \right]^{-m}. \quad (5)$$

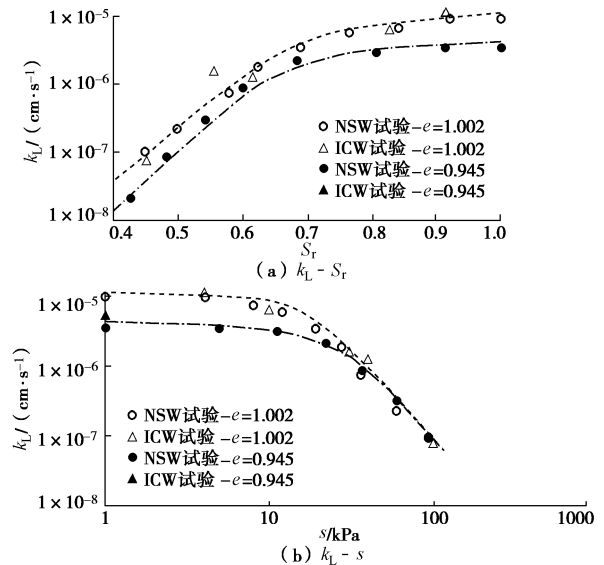


图 10 同一孔隙比不同水力作用路径下 $k_L - S_r$ 与 $k_L - s$ 关系

Fig. 10 $k_L - S_r$ and $k_L - s$ curves at same given void ratio but with different hydro-mechanical paths

用总饱和度 S_r 作为式 (3a)、(4)、(5) 的自变量时, 对于本文的原状黄土, 参数 $m=0.15$ ^[21], 基于 $k_{rG} - S_r$ 关系确定出式 (3a)、(3b) 的参数 $\gamma = 2.94$ ^[22]。当采用与式 (4) 相同的参数, 由式 (3a) 预测的 $k_{rL} - S_r$ 关系曲线 (见图 4 点划线) 与试验结果相差很大。这与 Xu 等^[23]用式 (3a)、(4) 能同时较好地描述垃圾土的水气渗透性的研究结果不同, 可能是由于 vG-M 模型较适宜于粗粒土所致^[24]。当用式 (3a) 的表达式对不同孔隙比下 $k_{rL} - S_r$ 关系的试验数据进行拟合时, 最小二乘法拟合得到参数 $m=1.287$, $\gamma = 2.563$, 拟合曲线如图 4 中虚线所示。可见, 当 $S_r \geq 0.55$ 时, 拟合效果较好, 当 $S_r < 0.55$ 时, 拟合效果很差。上述反映出 vG-M 模型 (式 (3a)) 不适用于描述无应力时常孔隙比下原状黄土相对渗水系数与饱和度的关系。

当用 vG-M 模型 (式 (3b)) 及以总饱和度 S_r 作为变量的 V-G 模型 (式 (5)) 的参数^[21]预测常孔隙比下相对渗水系数与吸力关系时, 预测值与实测值相差很大。如对于天然状态试样, $e=1.115$ 时, 参数 $\alpha = 0.15$, $m=0.15$, $n=1.18$ ^[21], 预测的 $k_{rL} - s$ 关系如图 7 (a) 中虚线, 而符号 “□” 表示的试验点远在预测曲线之上。表明不同的常孔隙比下, 原状黄土的相对渗水系数与

吸力关系不能用 vG-M 模型 (式 (3b)), 参数同 V-G 模型 (式 (5)) 来预测。这与蔡国庆等^[25]用 vG-M 模型能较好描述不同孔隙比下不同类型砂土的相对渗透系数与吸力关系的结果不同。

不同孔隙比 (无应力) 及不同应力下近似归一的 $k_{rL} - S_r$ (图 4) 及 $k_{rL} - s/s_c$ (图 9) 关系试验点可分别由式 (6a), 式 (6b) 较好地拟合, 结果分别见图 4, 9 中实线, 其表达式为

$$k_{rL} = \left\{ 1 + [\alpha_L (1 - S_r)]^{n_L} \right\}^{-m_L}, \quad (6a)$$

$$k_{rL} = [1 + \alpha_R (s/s_c)^{n_R}]^{-1}, \quad (6b)$$

式中, $\alpha_L, n_L, m_L, \alpha_R, n_R$ 为土性参数。式 (6) 满足 $S_r=1$ 与 $s=0$ 时, $k_{rL}=1$ 的边值条件。对于本文研究的原状黄土, 参数 $\alpha_L=1.23, n_L=3.12, m_L=16.83, \alpha_R=0.025, n_R=2.76$ 。

由 ICW 的试验结果得到浸水饱和时的渗透系数 k_s 与应力 p 关系如图 11 所示。可见, 在半对数坐标系中, 饱和渗透系数 k_s 随应力 p 的增大而线性减小, 其表达式为

$$k_s = k_{s0} \exp(-C_1 p), \quad (7)$$

式中, k_{s0}, C_1 为土性参数, 分别等于半对数坐标系中 $k_s - p$ 关系直线的截距和斜率, 且皆有明确的物理意义, k_{s0} 为无应力作用时原状黄土饱和渗透系数, C_1 为饱和渗透系数随应力增大而减小的速率。对于本文试验研究的原状黄土, $k_{s0}=3.02 \times 10^{-5} \text{ cm/s}, C_1=0.01 \text{ kPa}^{-1}$ 。

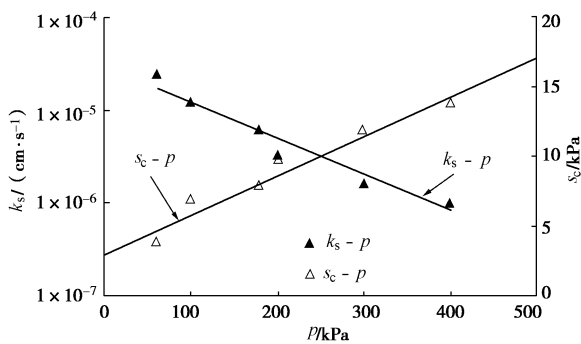


图 11 ICW 试验的 $k_s - p, s_c - p$ 曲线

Fig. 11 $k_s - p$ and $s_c - p$ curves from ICW tests

由表 2 可以整理出脱气值 s_c 与应力 p 关系 ($s_c - p$) 曲线如图 11 所示, 可见, $s_c - p$ 关系可用直线描述, 其表达式为

$$s_c = s_{c0} + C_2 p, \quad (8)$$

式中, s_{c0}, C_2 为土性参数, 分别等于 $s_c - p$ 关系直线的截距和斜率, 且皆有明确的物理意义, s_{c0} 为无应力作用时原状黄土 $S_r - s$ 关系曲线对应的脱气值, C_2 为脱气值随应力增大而增大的速率。对于本文试验研究的原状黄土, $s_{c0}=3 \text{ kPa}, C_2=0.028$ 。

分别把式 (7) 代入式 (6a), 式 (7)、(8) 代入式 (6b) 中, 可得

$$k_L = k_{s0} \exp(-C_1 p) \left\{ 1 + [\alpha_L (1 - S_r)]^{n_L} \right\}^{-m_L}, \quad (9a)$$

$$k_L = \frac{k_{s0} \exp(-C_1 p)}{1 + \alpha_R [s/(s_{c0} + C_2 p)]^{n_R}}. \quad (9b)$$

式 (9a)、(9b) 为不同应力下增湿时, 描述力水耦合作用引起变形时渗透系数 k_L 与饱和度 S_r 或吸力 s 关系的渗透性函数, 它可以直接确定应力与饱和度及吸力变化对非饱和和原状黄土渗透系数的影响, 便于实际工程应用。

在 $k_L - S_r$ 与 $k_L - s$ 关系的渗透性函数 (分别见式 (9a), 式 (9b)) 中, 参数 $\alpha_L, n_L, m_L, \alpha_R, n_R$ 与应力 (孔隙比) 无关, 可通过无应力条件下对天然状态原状黄土的分级浸水试验确定; 参数 C_1, C_2 与应力有关, 可通过对不同应力下原状黄土进行分级浸水试验 (增湿至饱和) 确定。

不同应力作用下分级浸水时, 用式 (9) 分别对不同饱和度及吸力下原状黄土的增湿渗透系数进行预测, 实测的 $k_L - S_r, k_L - s$ 关系及预测结果如图 12 所示 (图中实线为预测结果)。可见, 预测效果较好。说明两种渗透性函数皆可较好地预测不同等向应力作用下饱和度增大或吸力减小时原状黄土的渗透系数。

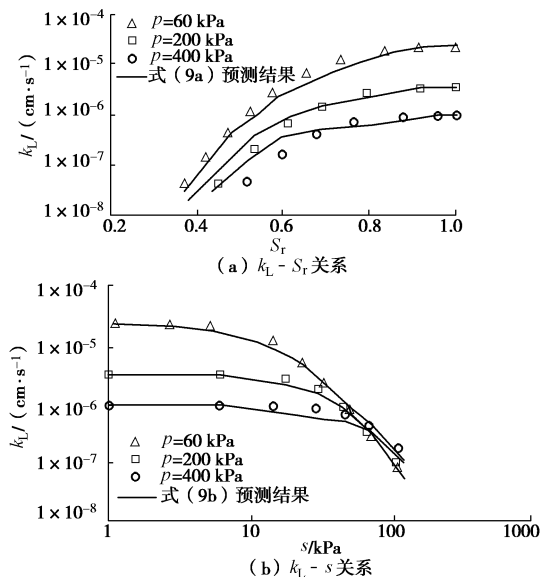


图 12 模型预测与本文试验结果对比

Fig. 12 Comparison between predicted values and results of ICW tests

为了验证本文提出的两种渗透性函数对其它土的适用性, 对不同等向应力 p 作用下初始泥浆状态粉砂土的减湿渗透试验结果^[12]进行预测。根据文献^[12]的试验结果得到饱和渗透系数 k_s 及进气值 s_c 与应力 p 的关系也可用式 (7)、(8) 描述, 参数 $C_1=0.01 \text{ kPa}^{-1}, k_{s0}=2.34 \times 10^{-7} \text{ cm/s}, C_2=0.03, s_{c0}=6 \text{ kPa}$; 由 $k_L - s$ 关

系及 $S_r - s$ 持水曲线得到不同应力下 $k_{rL} - S_r$ 及 $k_{rL} - s/s_c$ 也具有较好的归一性, 且可分别用式 (6a) 及式 (6b) 拟合, 参数 $\alpha_L = 1.23$, $n_L = 2.03$, $m_L = 16.83$, $\alpha_R = 0.025$, $n_R = 3.42$ 。根据这些参数, 用式 (9) 预测不同应力下初始泥浆状态粉土的减湿渗水系数, 预测结果 (用实线表示) 与文献[12]的试验结果对比如图 13 所示。可见, 预测结果与试验结果比较吻合。表明本文提出的渗水模型不仅能较好地预测等向应力条件下原状黄土的渗水系数与饱和度及吸力关系, 而且能较好预测初始泥浆状态粉土的减湿渗水系数, 即可以预测不同土的渗水系数, 具有较好的适用性。

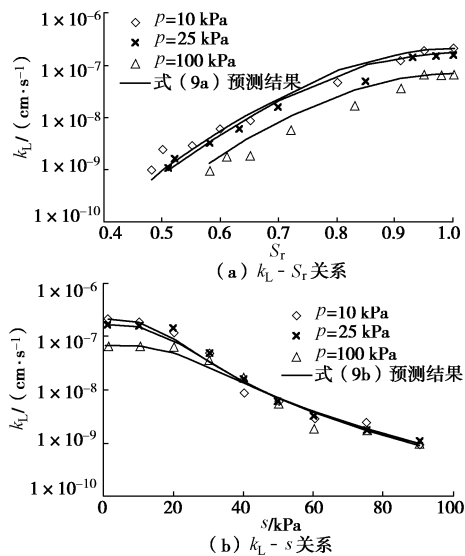


图 13 模型预测与文献[12]试验结果对比

Fig. 13 Comparison between calculated results and measured ones from tests of Reference [12]

4 结 论

无应力与等向应力条件下分别对不同和相同孔隙比的原状黄土进行了分级浸水渗透试验, 研究了孔隙比、应力、饱和度及吸力对渗水特性的影响, 探讨了同一孔隙比下水力作用路径的影响, 得到了以下 4 点结论。

(1) 孔隙比及应力对渗水系数与饱和度关系影响较大, 相同饱和度下渗水系数随着孔隙比减小或应力增大而减小。其对渗水系数与吸力关系的影响与吸力大小有关, 皆存在一个相同的吸力阈值 s_{cr} , 当 $s \geq s_{cr}$ 时影响较小, 可近似归一; 当 $s < s_{cr}$ 时影响较大, 相同吸力下渗水系数随着孔隙比减小或应力增大而减小。

(2) 只要孔隙比相同, 不同水力作用路径 (无应力下预应力-水路径, 常应力下力-水耦合路径) 下渗水系数与饱和度及吸力关系相同。孔隙比是直接影响因素, 应力为间接因素, 可以用水力耦合作用引起

的孔隙比变化来反映应力的影响。

(3) 不同应力条件下, 相对渗水系数与吸力关系不能归一, 同一吸力对应的相对渗水系数随孔隙比的减小或应力的增大而增大; 相对渗水系数与饱和度及吸力比 (吸力与脱气值之比) 之间皆呈良好的归一化关系, 且可分别用相同函数描述。

(4) vG-M 模型不适用于描述常孔隙比下原状黄土的渗水系数; 提出的考虑应力与饱和度或吸力变化的渗透性函数, 其参数皆可通过室内试验确定, 可以较好地预测等向应力作用下原状黄土增湿过程饱和度增大或吸力减小时的渗水系数, 便于实际工程应用。

参考文献:

- [1] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [2] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(12): 1431 - 1445.
- [3] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 侧限状态下高压实高庙子膨润土非饱和和渗透性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 105 - 108. (YE Wei-min, QIAN Li-xin, CHEN Bao, et al. Laboratory test on unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted Gaomiaozi bentonite under confined conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 105 - 108. (in Chinese))
- [4] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 含浅层气砂土的赋存特征及其非饱和和参数预测[J]. 岩土力学, 2010, 32(7): 1945 - 1950. (WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence characteristics and unsaturated parameters prediction of shallow gassy sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(7): 1945 - 1950. (in Chinese))
- [5] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和和原状和重塑 Q_3 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1020 - 1027. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q_3 loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [6] LALIBERTE G E. Properties of unsaturated porous media[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1966.
- [7] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 117 - 127.
- [8] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其

- 工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 9 - 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [9] 刘奉银, 张 昭, 周 冬. 湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗透函数[J]. 水利学报, 2010, **41**(9): 1054 - 1060. (LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong. Saturation-density dependent permeability function for unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(9): 1054 - 1060. (in Chinese))
- [10] 赵彦旭, 张虎元, 吕擎峰, 等. 压实黄土非饱和渗透系数试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1809 - 1902. (ZHAO Yan-xu, ZHANG Hu-yuan, LÜ Qing-feng, et al. Experimental study of unsaturated permeability coefficient of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1809 - 1902. (in Chinese))
- [11] GALLAGE C, KODIKARAA J, UCHIMURA T. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**(3): 417 - 430.
- [12] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 411 - 425.
- [13] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (LI Yong-le, LIU Cui-ran, LIU Hai-ning, et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (in Chinese))
- [14] 崔 颖, 缪林昌. 非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2007 - 2012. (CUI Ying, MIAO Lin-chang. Testing study of permeability characteristics of unsaturated compacted expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2007 - 2012. (in Chinese))
- [15] NG C W W, LEUNGA K. Measurements of drying and wetting permeability functions using a new stress-controllable soil column[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(1): 58 - 68.
- [16] 陈存礼, 张登飞, 张 洁, 等. 等向应力下原状黄土的压缩及增湿变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(7): 1731 - 1747. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, ZHANG Jie, et al. Research on the compression and wetting deformation behavior of intact loess under isotropic stress[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(7): 1731 - 1747. (in Chinese))
- [17] LOBBEZOO J P, VANAPALLI S K. A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils[C]// Proceedings of 55th Canadian Geotechnical Conference. Canada, 2002: 1277 - 1284.
- [18] ELZEFTAWY A, CARTWRIGHT K. Evaluating the saturated and unsaturated hydraulic conductivity in soils[C]// Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM, International, 1981: 168 - 181
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [20] PARKER J C, LENHARD J C, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media[J]. Water Resources Research, 1987, **23**(4): 618 - 624.
- [21] 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))
- [22] CHEN C L, ZHANG D F, ZHANG J. Influence of stress and water content on air permeability of intact loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(19): 1221 - 1230.
- [23] XU X B, ZHAN L T, CHEN Y M, et al. Intrinsic and relative permeabilities of shredded municipal solid wastes from the Qizishan landfill, China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(4): 1243 - 1252.
- [24] AGUS S S, LEONG E C, SCHANZ T. Assessment of statistical models for indirect determination of permeability functions from soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 279 - 282.
- [25] CAI G Q, ZHOU A N, SHENG D C. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**: 1456 - 1467.