

DOI: 10.11779/CJGE2018S1008

三轴应力条件下原状黄土的吸湿渗水特性

张登飞^{1, 2}, 陈存礼^{*1, 2}, 陈惠³, 刘科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. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 4. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003)

摘要: 以原状黄土为研究对象, 用改装的非饱和土三轴剪切渗透仪, 在三轴应力条件下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, 分析了相同净平均应力 p 下偏应力 q 变化、相同应力比 η 下净平均应力 p 变化及饱和度 S_r 变化时对渗水系数的影响。研究结果表明: 偏应力 q 、净平均应力 p 及饱和度 S_r 对渗水系数皆有较大的影响, 且影响程度存在差异性。 p 、 q 一定, 随着 S_r 增大渗水系数呈先快速后缓慢增大的趋势。 S_r 一定, 随着 q 增大(p 相同)或 p 增大(η 相同)渗水系数皆呈近似线性减小趋势, 前者的斜率与 p 大小有关, 而与 S_r 大小无关; 后者的斜率与 η 大小无关, 而与 S_r 大小有关, 且皆小于前者。不同净平均应力下饱和渗水系数与应力比之间皆可用指数函数描述, 且仅一个参数随着净平均应力而变化。不同应力状态下相对渗水系数与饱和度关系可近似归一, 无法用 VG-M 模型来描述, 但可用本文提出的模型描述。该模型直接把净平均应力与应力比作为变量, 便于实际工程应用。模型预测与试验结果吻合较好。

关键词: 原状黄土; 净平均应力; 偏应力; 饱和度; 渗水系数

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0045-06

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。

Wetting permeability of intact loess under triaxial stress conditions

ZHANG Deng-fei^{1, 2}, CHEN Cun-li^{1, 2}, CHEN Hui³, LIU Ke⁴

(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. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 4. Northwest Research Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710003, China)

Abstract: A series of unsaturated infiltration tests on intact loess are performed using the refitted triaxial equipment for shearing and permeability measurement of unsaturated soil, whereby the suction is reduced incrementally by the direct addition of small amounts of water to the sample at constant triaxial stresses. Influences of changes in deviator stress q with constant mean net stress p , mean net stress p with constant stress ratio η and degree of saturation S_r on liquid permeability are analyzed. The results indicate that the deviator stress q , mean net stress p and degree of saturation S_r remarkably affect the coefficient of permeability, and these impacts are different. The coefficient of permeability exhibits first rapid and then slight increase in S_r with constant p and q . It decreases linearly with the increase in q with constant p or in p with constant η at the same S_r . The slope of the former is dependent on p , but irrelevant to S_r . That of the latter is dependent on S_r , but independent of η . Besides, the slope of the latter is lower than that of the former. The saturated coefficient of permeability as a function of stress ratio for different mean net stresses can be expressed by the exponential function, in which only one of parameters changes with the mean net stress. The relationship between the relative coefficient permeability and the degree of saturation can be considered as the unique at different stress states. These relationships are not described by VG-M model, but by the proposed models. The models taking the net mean stress and stress ratio as variables are more convenient for engineering application. The predicted results agree well with the test ones.

Key words: intact loess; net mean stress; deviator stress; degree of saturation; coefficient of permeability

0 引言

渗水特性是非饱和土力学研究的重要内容之一, 而渗水系数的确定又是其研究的重要任务。渗水

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)

系数是土中水相在其填充孔隙空间内流动的一种度量, 所以充水孔隙的比例是影响渗水系数的重要因素。当土的湿度(饱和度、体积含水率或吸力)及密度发生变化时, 充水孔隙的比例发生变化, 进而引起渗水系数的变化。因此, 对于非饱和土, 渗水系数是变数, 通常表达为湿度与初始干密度的函数, 并在此方面开展了较多的研究工作^[1-9]。应力作用会使土体密度及湿度发生变化, 进而引起渗水系数的变化。而有关应力对渗水系数影响的研究很少, 且仅限于侧限应力条件^[10]及等向压缩应力条件^[11-12]。实际工程中土体处三维应力状态, 偏应力作用不仅会引起体积的收缩或膨胀, 还会引发土变形的各向异性, 而有关三轴应力条件下非饱和土渗水特性的研究还未见诸报道。

基于上述认识, 以典型的非饱和土——原状黄土作为研究对象, 用改装的非饱和土三轴剪切渗透仪, 在三轴应力条件下进行渗水试验, 分析相同净平均应力下偏应力变化、相同应力比下净平均应力变化对吸湿的渗水系数与饱和度关系影响, 探讨 Van Genuchten-Mularem (VG-M) 模型^[13]描述原状黄土渗水特性的适用性, 提出可以考虑净平均应力、偏应力及饱和度影响的原状黄土吸湿渗水的渗透性函数, 为建立非饱和土渗流-固结耦合模型奠定基础。

1 试验仪器及方案

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^[3]的原理及方法, 由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压缩试验, 不同应力条件下分级浸水与干湿循环试验, 具体的仪器结构详见文献[14]。

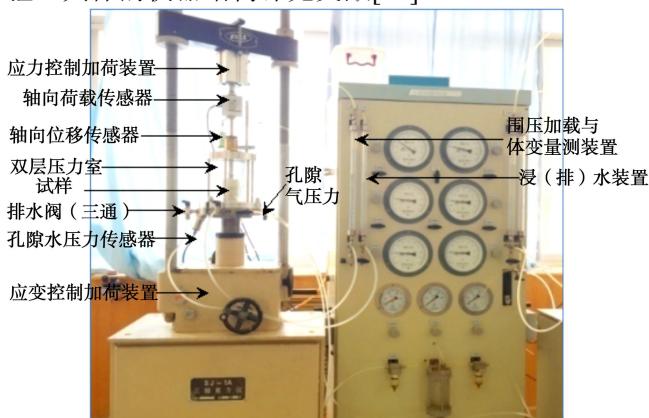


图1 非饱和土三轴剪切渗透仪

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

采用分级浸水的方法进行渗水试验。通过浸(排)水装置(图1)向试样上端注入一定量的水 Q_L , 在水渗透转移逐渐均匀化过程中, 连续测量试样的体变、轴向变形和吸力(轴平移法)。由于吸力达到稳定标准所需的时间最长, 故当吸力达到稳定时即认为水完全停止转移运动, 渗水达到稳定。把浸水开始时刻起到吸力稳定时刻的历时作为渗透历时 t , 用开始与稳定时对应的试样吸力 s_1 与 s_2 之差 Δs 来计算水力梯度 i_w , 其表达式为^[3, 15]

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

式中, L 为试样的高度(cm), ρ_w 为水的密度(g/cm³), g 为重力加速度(取 10 m/s²)。根据达西定律, 近似按常水头法确定一定注水量 Q_L (cm³)下土样的平均渗水系数 k_L , 其表达式为

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

式中, A 为试样的面积(cm²)。用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 下渗水稳定时的吸力及历时, 与稳态法相比, 既加速了测试进程, 又避免了对少量渗水准确量测的困难^[3, 15]。

1.2 试验用土与试样制备

试验用土为西安北郊原状 Q_3 黄土, 取土深度 3~4 m, 物理性质指标见表1。用制样器制备直径 3.91 cm、高度 4 cm 的原状三轴试样(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 Q_3 黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact Q_3 loess

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

1.3 试验方案及方法

为了研究三轴应力条件下原状黄土渗水特性, 用净平均应力 p ($p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$, σ_1 , σ_3 分别为净轴向应力与净围压) 与偏应力 q ($q=\sigma_1-\sigma_3$) 描述三轴应力状态, 在两类常应力状态下对天然含水率原状黄土(初始吸力 $s_0=175$ kPa) 进行分级浸水试验:

(1) 按等应力比 η ($\eta=q/p$) 路径加载至相同净平均应力 p 而不同偏应力 q 的应力状态后进行分级浸水试验, 以探讨相同 p 下, q 对渗水特性的影响。

(2) 在相同应力比 η 路径下加载至不同净平均应力 p 的应力状态后进行浸水试验, 以探讨相同 η 下, p 对渗水特性的影响。具体试验方案见表2所示。简便起见, 下文把净平均应力 p 简称平均应力 p 。

常应力状态下浸水试验主要包括吸力平衡, 常吸

力三轴压缩, 常应力状态分级浸水三个阶段。

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)和与初始吸力相等的孔隙气压力 u_a , 打开排气及排水阀(三通), 待排水稳定, 即完成吸力平衡。

在常吸力三轴压缩阶段, 排气与排水阀处开通状态, 依据试验方案(表 2), 同步施加平均应力与偏应力至目标应力状态, 待试样体变、轴向变形与排水皆稳定, 即完成三轴压缩。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} ($S_{rc}=G_S w/e$)。不同应力状态下 e_c 及 S_{rc} 值见表 2。

表 2 三轴应力条件下分级浸水试验方案及结果

Table 2 Programs and results of infiltration tests in stages under triaxial stress conditions

应力比 η	应力状态		三轴压缩后		浸水饱和 e_s
	p/kPa	q/kPa	e_c	$S_{rc}/\%$	
0	0	0	1.115	36.8	1.115
	50	0	1.094	37.3	1.063
	100	0	1.074	37.7	0.999
	150	0	1.072	37.8	0.961
	200	0	1.054	37.9	0.898
0.15	50	8	1.084	37.9	1.026
	100	15	1.066	38.0	0.950
	150	23	1.055	38.1	0.883
	200	30	1.032	38.7	0.845
0.35	50	18	1.072	38.0	1.005
	100	35	1.058	38.3	0.894
	150	53	1.028	39.1	0.829
	200	70	1.009	39.6	0.780
0.62	50	31	1.056	38.4	0.945
	100	62	1.038	39.0	0.850
	150	93	0.985	40.8	0.788
	200	124	0.967	41.0	0.741

在常应力状态浸水阶段, 保持孔隙气压力 u_a 及应力状态(p, q)不变, 排气阀处开通状态, 排水阀处关闭状态。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、轴向变形及吸力达到稳定, 即达到渗水稳定后, 则完成本级浸水。常应力状态下分级浸水至饱和的级数皆大于 6, 每级含水率的增量 $\Delta w \geq 2\%$ 。每级渗水稳定后, 根据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 , 由注水量 Q_L 、渗水开始与稳定时吸力差 Δs 及历时 t 得到渗水系数 k_L (式(2))。

试验过程中, 由采集系统连续测记试样的体变、轴向变形及吸力(或排水)。以试样的体积及水体积变化增量小于 $0.01 \text{ cm}^3/\text{h}$, 轴向变形小于 0.005 mm/h , 吸力增量小于 $1 \text{ kPa}/\text{h}$ 作为吸力平衡, 三轴压缩及分级浸水的稳定标准。

2 试验结果与分析

2.1 三轴应力条件下渗水特性

平均应力 p 相同偏应力 q 不同, 及应力比 η 相同平均应力 p 不同试验条件下吸湿的渗水系数 k_L 与饱和度 S_r 关系的变化特性基本一致。限于篇幅, 仅列出典型的 $\ln k_L - S_r$ 曲线如图 2 所示。可以看出:

(1) 分级浸水至饱和过程中, w 及 S_r 增大, k_L 增大, $\ln k_L - S_r$ 曲线皆呈先陡变后平缓上升的型态。这可能是由于吸湿过程中, 试样由双连通状态逐渐向气封闭状态过渡, 土中气相逐渐以封闭气泡存在, 当饱和度增大到一定程度后, 对水相连通程度的影响逐渐较小, 引起渗水系数增大速率逐渐变缓。这与不同竖向应力下压实粉质黏土^[10]及不同干密度重塑黄土^[3]的研究结果相一致。

(2) 常应力(>0)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 $k_L - S_r$ 关系表征了变孔隙比下的渗水特性, 无法直接基于试验结果建立常孔隙比下 $k_L - S_r$ 关系的渗水函数, 再通过孔隙比变化来反映应力的影响。

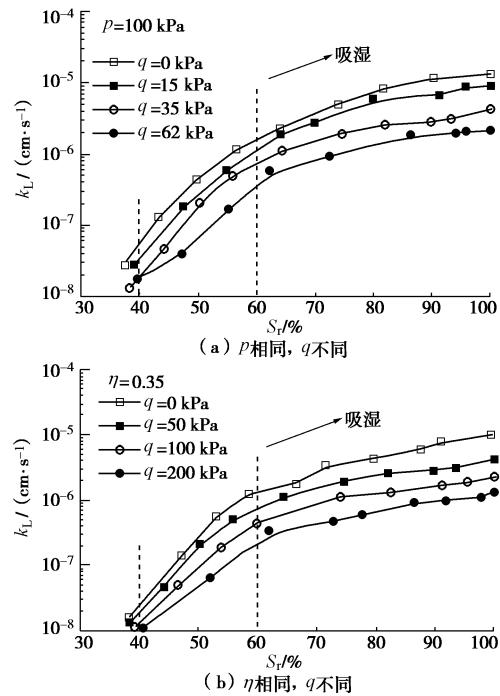


图 2 三轴应力条件下渗水试验的 $\ln k_L - S_r$ 曲线

Fig. 2 $\ln k_L - S_r$ curves from liquid permeability tests under triaxial stress conditions

为反映 q 与 p 对 k_L 的影响程度, 由图 2 绘出 S_r 一定时, 相同 p 下 $\ln k_L - q$ 与相同 η 下 $\ln k_L - p$ 典型的关系分别如图 3(a), (b) 所示。

从图 3(a) 可以看出:

(1) q 对 k_L 影响较为明显, 随着 q 增大, $\ln k_L - q$ 关系皆呈近似线性减小趋势。这可能是由于偏应力增大, 浸水前及其过程中孔隙比减小(表 2), 导致渗水通道变细, 流程的挠曲度增大所致。这与压实粉质黏土的渗水系数随着竖向应力增大而减小^[10]的结果相一致。

(2) 随着 S_r 增大, $\ln k_L - q$ 曲线近似平行上移, 即曲线的斜率 β 基本保持不变(见表 3)。说明随着饱和度 S_r 增大, 偏应力对渗水系数的影响程度却基本保持不变。

(3) 相同 S_r 下, 随着 p 增大, $\ln k_L - q$ 曲线坡度愈缓, 斜率 β 减小(见表 3)。说明偏应力对原状黄土渗水系数的影响程度与平均应力大小有关, 平均应力愈大, 偏应力对渗水系数的影响程度却愈小。

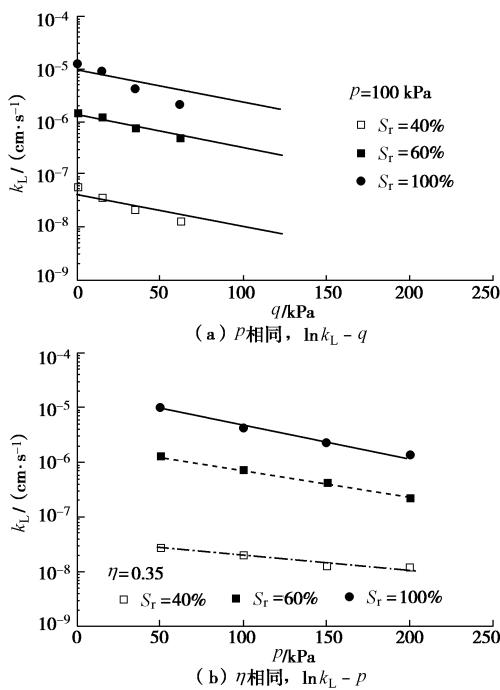


图 3 相同饱和度下, $\ln k_L - q$ 与 $\ln k_L - p$ 曲线

Fig. 3 $\ln k_L - q$ and $\ln k_L - p$ curves with constant degree of saturation from coefficient of permeability under triaxial stress conditions

从图 3(b) 可以看出:

(1) p 对 k_L 影响较为明显, 随着 p 增大, $\ln k_L - p$ 关系皆呈近似线性减小趋势。这可能是由于浸水前及其过程中孔隙比随平均应力增大而减小(表 2)所致。

(2) 随着 S_r 增大, $k_L - p$ 曲线上移, 坡度变陡, 即曲线的斜率 β_1 变大(见表 3)。说明饱和度愈大, 平均应力对原状黄土渗水系数的影响程度愈明显。

(3) 不同 η 下 $\ln k_L - p$ 曲线斜率 β_1 值相差不大(见表 3), 可近似相等, 即渗水系数随平均应力增大而减小的速率基本相同, 但皆比 β 值小。说明相同饱和度

下偏应力比平均应力对渗水系数的影响程度大。

表 3 不同试验条件下渗水系数减小率 β , β_1

Table 3 Summary of estimated decrease rates of coefficient of permeability

p/kPa	β/kPa^{-1}			η	β_1/kPa^{-1}			
	S_r	40%	60%		100%	S_r	40%	60%
50	0.052	0.051	0.052	0	0.006	0.009	0.012	
100	0.024	0.023	0.024	0.15	0.005	0.010	0.012	
150	0.013	0.014	0.014	0.35	0.006	0.009	0.011	
200	0.013	0.014	0.013	0.62	0.005	0.008	0.011	

把饱和($S_r=100\%$)时渗水系数用 k_s 表示, 当 $\eta=0$ 时 k_s 为 k_{sp} 。半对数坐标系中, k_{sp} 随 p 增大而减小的关系可用线性拟合(图 3), 其表达式为

$$\ln k_{sp} = \ln k_{s0} - \beta_1 p , \quad (3)$$

式中, $\ln k_{s0}$ 为无应力作用时原状黄土饱和渗水系数, 对于本文试验研究的原状黄土, $k_{s0}=3.02 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

由图 2 绘出不同 p 下饱和渗水系数 k_s 与应力比 η 的半对数关系如图 4 所示, 可见, $\ln k_s - \eta$ 关系皆呈近似平行直线, 即不同平均应力下饱和渗水系数随应力比增大而减小的速率基本相同。其表达式为

$$\ln k_s = \ln k_{sp} - C_1 \eta , \quad (4)$$

式中 C_1 为土性参数, 反映了饱和渗水系数随应力比增大而减小的速率。对于本文试验研究的原状黄土, $C_1=2.74$ 。则将式(3)代入式(4)中并整理, 得

$$k_s = k_{s0} \exp(-\beta_1 p - C_1 \eta) . \quad (5)$$

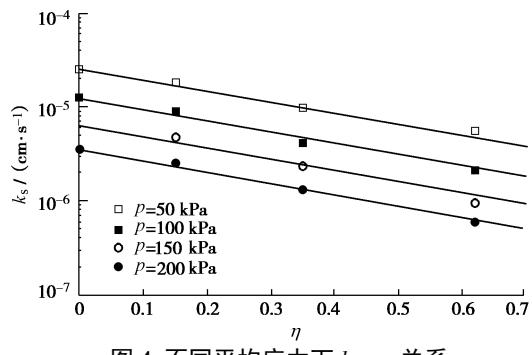


图 4 不同平均应力下 $k_s - \eta$ 关系

Fig. 4 $k_s - \eta$ curves under different mean stresses

2.2 三轴应力条件下渗水系数的描述及试验验证

为描述非饱和土的渗水特性, 通常建立相对渗水系数 k_{rl} ($k_{rl}=k_L/k_s$) 与饱和度或吸力关系^[3, 6-10]。当绘出不同应力状态下吸湿 $k_{rl} - S_r$ 关系(图 5)时发现, 试验点分布在狭窄范围内, 可近似归一化; 随着饱和度 S_r 增大, $k_{rl} - S_r$ 关系呈先陡变后缓变的型态。反映出虽然偏应力(相同平均应力)及平均应力(相同应力比)变化时对 $k_L - S_r$ 曲线皆有较为明显的影响, 且二者的影响程度存在差异性, 但对 $k_{rl} - S_r$ 关系的影响却很小, 且可用相同的渗水函数来描述。这与不同应力状态下 Indian Head 冰砾土^[16]、不同深度 Lakeland 砂土^[17]及不同孔隙比 Touchet 粉壤土^[18]的相对渗水系

数与饱和度关系可归一化的研究结果相一致。

VG-M 模型^[13]广泛用于描述常孔隙比下相对渗水系数与饱和度关系, 其表达式为

$$k_{rl} = (S_{re})^{0.5} \left[1 - (1 - S_{re}^{1/m})^m \right]^2, \quad (6)$$

式中, S_{re} 为有效饱和度, α , n , m 为描述 V-G 持水模型(式(7))的土性参数, 且 $m=1-1/n$ 。

$$S_{re} = [1 + (\alpha s)^n]^{-m}. \quad (7)$$

以总饱和度 S_r 作为式(6)及式(7)的自变量时, 对于本文研究的原状黄土, 参数 $m=0.15$ ^[14]。当用 VG-M 模型及其参数预测不同应力状态下归一化的 k_{rl} - S_r 关系时, 预测结果见图 5 的虚线。可见, 预测与试验结果相差很大。说明原状黄土的相对渗水系数与饱和度关系不能用 VG-M 模型(参数同 V-G 模型)来预测。这与 VG-M 模型能较好描述不同深度垃圾土^[6]及不同孔隙比下不同类型砂土^[7]的渗水特性研究结果不同, 可能是该模型较适宜于粗粒土^[19]所致。

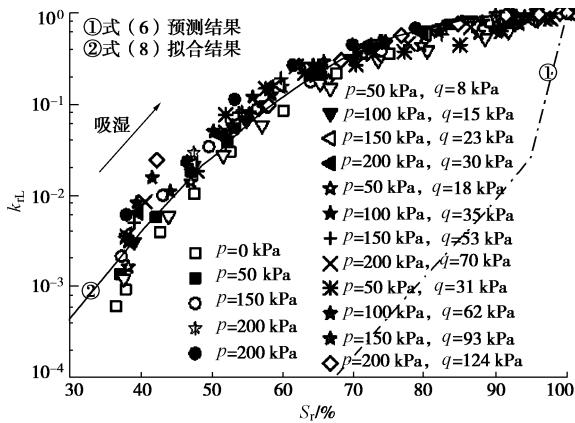


图 5 不同应力状态下相对渗水系数与饱和度关系

Fig. 5 Relationship between relative coefficient permeability and degree of saturation at different stress states

用式(8)对不同应力状态下归一化的吸湿 k_{rl} - S_r (图 5)关系试验点进行描述, 其表达式为

$$k_{rl} = \left\{ 1 + [\alpha_L (1 - S_r)]^{n_L} \right\}^{-m_L}, \quad (8)$$

式中, α_L , n_L , m_L 为土性参数。式(8)满足 $S_r=1$, $k_{rl}=1$ 的边值条件。用最小二乘法对其试验点进行拟合, 得到参数 $\alpha_L=1.62$, $n_L=2.65$, $m_L=15.85$, 拟合曲线见图 5 中实线。可见, 拟合结果较好。

综上所述, 式(5), (8)即为描述三轴应力条件下以 k_{rl} - S_r 关系表征的吸湿渗透性函数, 包括 β_1 , C_1 , α_L , n_L , m_L 共 5 个参数。该函数直接以平均应力 p 及应力比 η 为变量, 且参数皆可通过室内试验(在 3~5 个不同应力 p 及 η 下的分级浸水试验)确定, 便于实际工程应用。

对于本文研究的西安原状 Q₃ 黄土, 用式(5), (8)

及其模型参数, 计算出不同应力状态下 k_{rl} - S_r 关系, 绘出典型的实测与预测吸湿 k_{rl} - S_r 曲线($p=100$ kPa, q 变化及 $\eta=0.35$, p 变化)如图 6 所示。可见, 预测与实测结果吻合较好。说明本文提出的渗透性函数可较好地预测三轴应力条件下原状黄土的吸湿渗水系数。

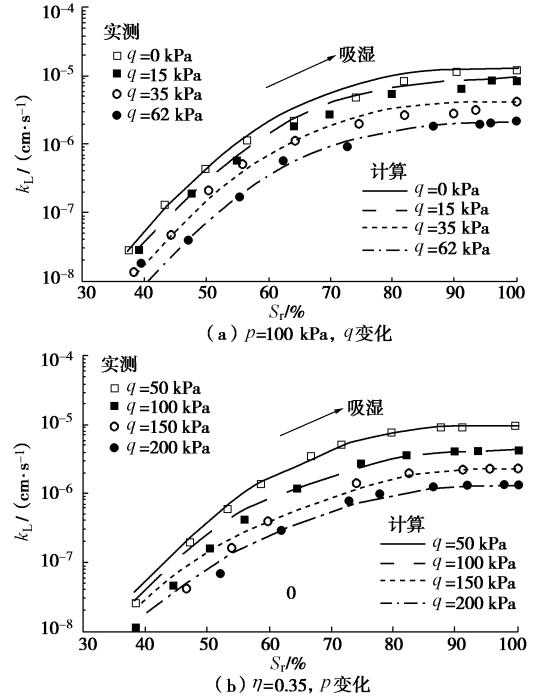


图 6 三轴应力条件下原状黄土吸湿 k_{rl} - S_r 计算与试验结果比较

Fig. 6 Comparison between calculated and measured results of wetting k_{rl} - S_r curves for intact loess under triaxial stress conditions

3 结 论

(1) 不同应力(>0)状态下, 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 与渗水系数 k_{rl} 关系皆呈先陡变后缓慢上升的型态。

(2) 偏应力与平均应力对 k_{rl} - S_r 曲线皆有较大的影响。同一饱和度下, 平均应力相同, 偏应力增大时, 渗水系数呈线性减小趋势, 减小的速率随平均应力增大而降低, 随饱和度增大而基本不变; 应力比相同, 平均应力增大时, 渗水系数亦呈线性减小趋势, 减小的速率随应力比的增大而基本不变, 随饱和度增大而增大, 且皆比平均应力相同偏应力增大时的速率小。

(3) 不同应力状态下, 相对渗水系数与饱和度呈良好的归一化关系, 且可用相同渗水函数描述, 但无法用 VG-M 模型来描述。提出的由渗水系数与饱和度关系表征的渗透性函数直接以平均应力及应力比作为参量, 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] 王铁行, 卢 靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (in Chinese))
- [3] 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]. 2010, **41**(9): 1054 - 1060. (in Chinese))
- [4] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和原状和重塑 Q₃ 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 Q₃ loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] CAI G Q, ZHOU A N, SHENG D C. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical journal, 2014, **51**(12): 1456 - 1467
- [8] 胡 冉, 陈益峰, 周创兵. 考虑变形效应的非饱和土相对渗透系数模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(6): 1279 - 1287. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A relative hydraulic conductivity model for unsaturated deformable soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(6): 1279 - 1287. (in Chinese))
- [9] 张 昭, 刘奉银, 张国平. 土在全含水率范围内持水及非饱和渗透特性的模型描述[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2069 - 2077. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHANG Guo-ping. Models for water retention and unsaturated permeability in full range of water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2069 - 2077. (in Chinese))
- [10] NG C W W, LEUNG A 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.
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 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.
- [14] 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))
- [15] 谢定义. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [16] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Comparison of saturated-unsaturated shear strength and hydraulic conductivity behavior of a compacted glacial till[C]// 50th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, 1997: 20 - 22.
- [17] ELZEFTAWY A, CARTWRIGHT K. Evaluating the saturated and unsaturated hydraulic conductivity in soils[J]. In Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM International, 1981: 168 - 181.
- [18] LALIBERTE G E, COREY A T, BROOKS R H. Properties of unsaturated porous media[J]. Hydrology Paper (Colorado State University), 1966, **17**.

(本文责编 明经平)