

DOI: 10.11779/CJGE2018S1015

三轴应力条件下原状黄土的渗气特性

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: 用改装的三轴渗气仪, 在三轴应力条件下对不同含水率原状黄土进行渗气试验, 分析了平均应力、偏应力及含水率变化对渗气系数与饱和度关系的影响, 提出了考虑三者影响的渗气函数。研究结果表明: 偏应力、平均应力及含水率对渗气系数与饱和度关系皆有较大的影响。平均应力(应力比相同)或偏应力(平均应力相同)作用引起饱和度增大时, 渗气系数线性减小, 且减小程度与含水率的大小有关; 含水率增大时渗气系数随饱和度增大而减小的速率比应力增大时的小。不同应力状态下, 相对渗气系数与饱和度关系, 渗气系数与修正气体饱和度幂函数(MAPL)模型描述, 但相比较而言, MAPL模型参数较少, 更便于实际工程应用。MAPL模型对渗气系数的预测结果与试验结果吻合较好。

关键词: 原状黄土; 偏应力; 平均应力; 含水率; 渗气系数

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0093-07

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。

Gas 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: The gas permeability tests on intact loess with various water contents are performed under triaxial stress conditions using the refitted triaxial gas permeability equipment. Influences of changes in the mean stress, deviator stress and water content on gas permeability as a function of liquid saturation are analyzed. The gas permeability function considering their effects is proposed. The results show that the relationships between gas permeability and liquid saturation are affected clearly by the deviator stress and mean stress as well as water content. The gas permeability decreases linearly with the increase of liquid saturation resulted from the mean stress with constant stress ratio or deviator stress with constant mean stress, and the decreasing degree is dependent on the value of water content. The decreasing rate of gas permeability with the increase of liquid saturation is smaller during the increasing water content than that during increasing stress. There are all unique relationships between the relative gas permeability and the liquid saturation between the gas permeability and the modified gas saturation at different stress states. These relationships can be predicted by the P-vG-M model in term of the total liquid saturation and proposed modified gas saturation power law (MAPL) model, respectively. In comparison with the P-vG-M model, the MAPL model with less parameters is more convenient for engineering application. The predicted results of gas permeability by MAPL model are in good agreement with the test ones.

Key words: intact loess; deviator stress; mean stress; water content; gas permeability

0 引言

渗气系数是非饱和土渗流及固结分析的重要参数之一, 其受到粒度、密度、湿度及结构等内在因素的影响, 已有较多相关研究的文献报道^[1-5]。应力的增大引起土体变形时, 渗气系数随之减小^[6-8], 即渗气系数还与应力有关, 但相关的研究较少, 且仅限于侧限应

力条件^[6]与等向压缩应力条件^[7-8]。实际工程中土处于

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)

三维应力状态,当外在因素引起土体应力或湿度改变时,一方面平均应力及偏应力作用不仅会引起土体积的收缩或膨胀,而且还会引发土变形的各向异性;另一方面水作用的增减湿变化,会改变土中的吸力、胶结力、胀缩力以及重力而引起变形,这两方面因素使得土中充气孔隙的挠曲度与连通性改变,进而会引起渗气系数的变化,但其变化规律尚不清楚,有必要通过三轴应力条件下渗气试验进行初步的研究。

本文选取一种典型的非饱和土——原状黄土作为研究对象,用改装的三轴渗气仪,在三轴应力条件下对不同含水率的原状黄土进行渗气试验,分析含水率变化、相同平均应力下偏应力变化及相同应力比下平均应力变化对渗气系数影响,探讨 Parker-van Genuchten-Mulaem (P-vG-M)模型^[9]适用性,提出可以考虑平均应力、偏应力及含水率的影响原状黄土渗气函数,为建立非饱和土渗流-固结耦合模型奠定基础。

1 试验仪器与方案

1.1 试验仪器与渗气试验原理

试验所用仪器在原有三轴渗气仪^[8]基础上,增设了主要由气压缸与传力轴组成的轴向加载装置(见图1)。通过气压加载装置(由调压阀与压力表组成)向气压缸施加气体压力,驱动传力轴以给试样施加轴向荷载(试验前需用量力环标定出气压力与轴向荷载之间关系);向双管体变装置(与压力室相连通)施加等于围压的气体压力,引起试样及仪器(压力室和管路)的体积变化,体变管中水体积的变化量即为总体变,总体变与仪器体变之差即为试样体变。

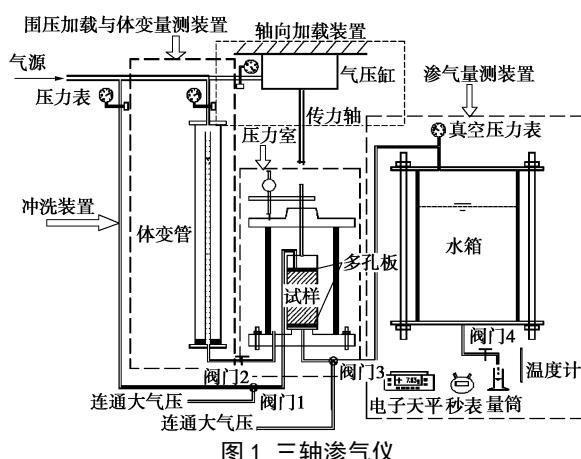


图1 三轴渗气仪

Fig. 1 Triaxial apparatus for gas permeability

对于渗气系数 k_G 的测定,通过水箱底部阀门4放水,在水箱上部及试样下部(上部与大气相通)形成一定的负压,即气体压力差 Δp (渗气压力,用真空压力表量测),从而确定出渗气压力梯度 i_G (式(1));通过一定时间 t 内水箱流出的水量 Q_w ,用波义耳定律

换算为标准状态(温度 $T_0=293.15\text{ K}$,大气压力 $p_a=101\text{ kPa}$)下流过试样的空气体积 Q_G (式(2)),进而由达西定律得到渗气系数 k_G (式(4))。具体的仪器结构及渗气系数测定原理详见文献[8]。

$$i_G = \Delta p / \rho_w g L , \quad (1)$$

$$Q_G = (p_a - \Delta p) T_0 Q_w / p_a T , \quad (2)$$

$$v_G = Q_G / (At) , \quad (3)$$

$$k_G = v_G / i_G = Q_G \rho_w g L / (\Delta p At) . \quad (4)$$

式中, L 、 A 为试样的高度(cm)与面积(cm^2), ρ_w 为水的密度(g/cm^3), g 为重力加速度(取 10 m/s^2), T 为试验时水的温度(K)。

1.2 试验用土及试样制备

试验用土取自西安北郊的原状 Q_3 黄土,取土深度 $3\sim 4\text{ m}$,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 8 cm 的三轴试样进行渗气试验。

表1 原状 Q_3 黄土的物理性质

相对密度 G_s	含水率 $w_0/\%$	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

1.3 试验方案及方法

为了研究含水率对渗气系数的影响,对1.5%(风干含水率),15.2%(天然含水率),16.6%,19.8%。21.8%共5个不同初始含水率 w_0 的试样进行渗气试验,其中对接近干燥状态的试样($w_0=1.5\%$)进行试验主要是为了探讨相对渗气系数与饱和度关系及验证P-vG-M模型的适用性。

为了研究偏应力 q ($q=\sigma_1-\sigma_3$, σ_1 , σ_3 分别为轴向应力与围压)对渗气系数的影响,按等应力比 η ($=q/p$)路径加载至相同平均应力 p ($p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$)而不同偏应力 q 的应力状态(图2“①”代表的点划线)后,对不同含水率 w_0 原状黄土进行渗气试验。

为了研究平均应力对渗气系数的影响,在相同应力比 η 路径下加载至不同平均应力 p 的应力状态(图2“②”代表的实线)后,对不同含水率 w_0 原状黄土进行渗气试验。具体试验方案见图2及表2所示。

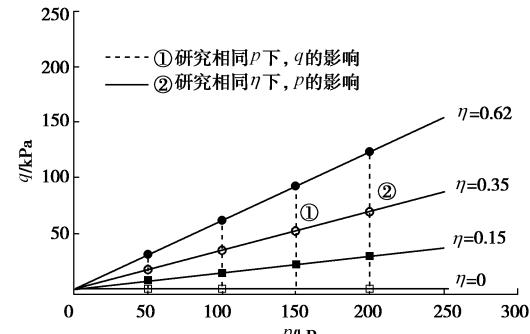


图2 三轴压缩应力状态示意图

Fig. 2 Illustration of triaxial compression stress states

表 2 三轴应力条件下渗气试验方案及结果

Table 2 Programs and results of gas permeability tests under triaxial stress conditions

η	p /kPa	q /kPa	$w_0=1.5\%$		$w_0=15.2\%$		$w_0=16.6\%$		$w_0=19.8\%$		$w_0=21.8\%$	
			e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$	e	$w/\%$
0	0	0	1.115	1.5	1.115	15.2	1.115	16.6	1.115	19.8	1.115	21.8
	50	0	1.104	1.5	1.084	15.1	1.086	16.5	1.078	19.7	1.075	21.6
	100	0	1.097	1.5	1.075	15.0	1.075	16.4	1.067	19.6	1.059	21.4
	200	0	1.089	1.5	1.028	14.8	1.002	16.1	0.993	19.2	0.990	21.2
0.15	50	8	1.105	1.5	1.083	15.2	1.080	16.6	1.076	19.8	1.071	21.7
	100	15	1.094	1.5	1.073	15.0	1.069	16.5	1.060	19.6	1.056	21.5
	150	23	1.090	1.5	1.065	14.9	1.058	16.4	1.054	19.6	1.035	21.4
	200	30	1.049	1.5	0.999	14.8	0.997	16.3	0.981	19.5	0.974	21.2
0.35	50	18	1.102	1.5	1.081	15.1	1.077	16.5	1.074	19.7	1.070	21.6
	100	35	1.085	1.5	1.072	15.0	1.066	16.5	1.059	19.6	1.051	21.5
	150	53	1.075	1.5	1.063	14.9	1.054	16.3	1.052	19.5	1.029	21.4
	200	70	1.045	1.5	1.038	14.8	0.991	16.2	0.978	19.4	0.972	21.2
0.62	50	31	1.101	1.5	1.076	15.0	1.072	16.4	1.069	19.6	1.068	21.5
	100	62	1.072	1.5	1.063	14.9	1.054	16.4	1.051	19.5	1.029	21.4
	150	93	1.063	1.5	1.059	14.8	1.051	16.3	1.049	19.4	1.023	21.3
	200	124	1.039	1.5	0.989	14.7	0.980	16.2	0.972	19.3	0.967	21.1

三轴应力条件下渗气试验主要包括预吸(脱)湿, 三轴压缩及常应力下渗气三个阶段。

在预吸(脱)湿阶段, 对天然含水率 $w_n=15.2\%$ 的试样, 通过风干或滴定注水方法, 得到不同目标初始含水率 w_0 的试样后, 在保湿缸中密闭放置 72h 以上, 使水分扩散均匀。

在三轴压缩阶段, 依据试验方案(图 2 或表 2), 同步施加平均应力 p 与偏应力 q 至目标应力状态(p, q), 待试样的体变与轴向变形皆达到稳定标准后, 即完成三轴压缩, 其中稳定标准为体变增量小于 $0.01 \text{ cm}^3/2\text{h}$, 轴向变形增量小于 0.005 mm/h 。根据压缩稳定后的体变量计算出试样的孔隙比 e , 其值见表 2。

在常应力下渗气阶段, 保持应力状态(p, q)不变, 通过改变阀门 4 的开度放水, 控制水流量及渗气速度, 以在试样上下两端形成至少 4 个不同气压差(渗气压力梯度)。一定压力梯度下渗气量测时, 先在一定的阀门开度下放水, 当经过试样进入水箱上部气体流速与从水箱下部流出水的流速达到动态平衡时, 真空压力表指针保持恒定, 即在试样两端形成一定的气压差 Δp 。然后, 用量筒接水, 同时打开秒表, 量测一定水量 $Q_w (>5\text{ml})$ 对应的时间 t 。根据量测的气压差 Δp , 水量 Q_w 及其历时 t , 确定出渗气压力梯度 i_G 及渗气速度 v_G , 进而确定出渗气系数 k_G (式(1)~(4))。

不同试验条件下完成渗气试验后拆样, 皆测定试样的含水率 w , 其值见表 2 所示。可见, 在 $p \leq 200 \text{ kPa}$, $q \leq 124 \text{ kPa}$, $w_0 \leq 21.8\%$ 时, 加载稳定后试样的含水率 w 与初始含水率 w_0 相差很小($\leq 1.1\%$), 可以近似取 $w=w_0$, 下文皆称为含水率 w 。由此, 通过含水率 w 与孔隙比 e 计算出饱和度 $S_f (=G_s w/e)$ 。

2 试验结果与分析

根据量测的气体压力差 Δp , 水箱流出的水量 Q_w

及其对应时间 t , 由式(1)、(3)计算出渗气压力梯度 i_G 及渗气速度 v_G 。含水率 w 及应力比 η 相同时, 不同平均应力 p 下典型的 $v_G - i_G$ 关系见图 3 所示。可见不同试验条件下 $v_G - i_G$ 关系皆呈线性, 即三轴应力条件下, 不同含水率原状黄土的渗气特性符合达西定律, 直线的斜率即为渗气系数 k_G 。

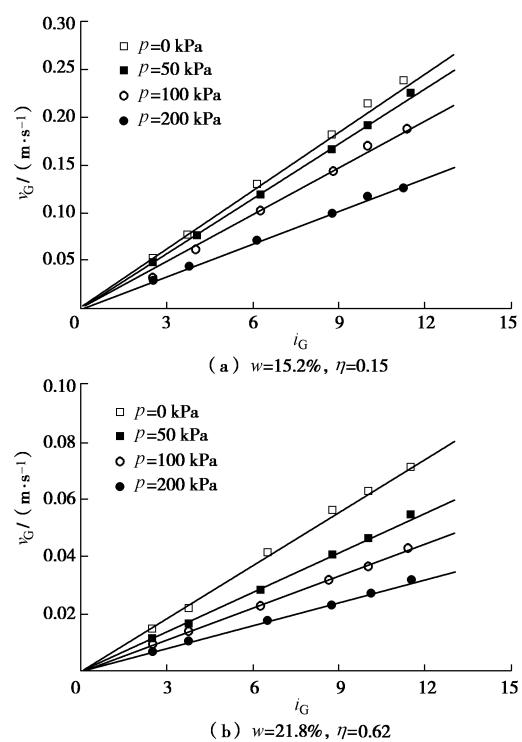


图 3 含水率 w 及应力比 η 相同, 平均应力 p 不同时 $v_G - i_G$ 关系
Fig. 3 Relationship between gas flow rate v_G and pressure gradient i_G at the same water content w and stress ratio η , but different mean stresses p

2.1 三轴应力条件下渗气系数与饱和度关系

平均应力 p 相同, 偏应力 q 不同条件下, 渗气系数 k_G 与饱和度 S_f 典型曲线如图 4 所示。可以看出:

(1) q 一定时, 随着 w 增大(吸湿), S_r 增大, k_G 减小, k_G-S_r 曲线(图4实线)皆呈非线性降低趋势; q 愈大时, 曲线坡度愈缓, 渗气系数减小的速率愈小。换言之, 虽然偏应力愈大, 含水率的作用引起饱和度增大程度愈大, 但对渗气系数的影响程度却愈小。反映出含水率对原状黄土 k_G-S_r 曲线有较大的影响, 且影响程度与偏应力大小有关。

(2) w 一定时, 随着 q 增大, e 减小(表2), S_r 小幅增大, k_G 较明显的减小, k_G-S_r 曲线(图4中虚线)皆近似呈线性下降趋势; w 愈大时, 曲线坡度愈缓, 渗气系数减小的速率愈小。反映出偏应力对原状黄土 k_G-S_r 曲线有较大的影响, 且影响程度与含水率的大小有关。

(3) w 一定, q 增大时 k_G-S_r 曲线减小的斜率明显大于 q 一定, w 增大时的速率, 即偏应力作用引起饱和度增大对渗气系数的影响更大。反映了 k_G-S_r 曲线型式与饱和度增大的机理有关。

(4) 对比图4(a), (b)发现, p 愈大, w 增大(q 不变)或 q 增大(w 不变)时 k_G-S_r 曲线的坡度愈缓, 渗气系数减小程度愈小。说明偏应力或含水率对 k_G-S_r 曲线的影响程度与平均应力大小有关。

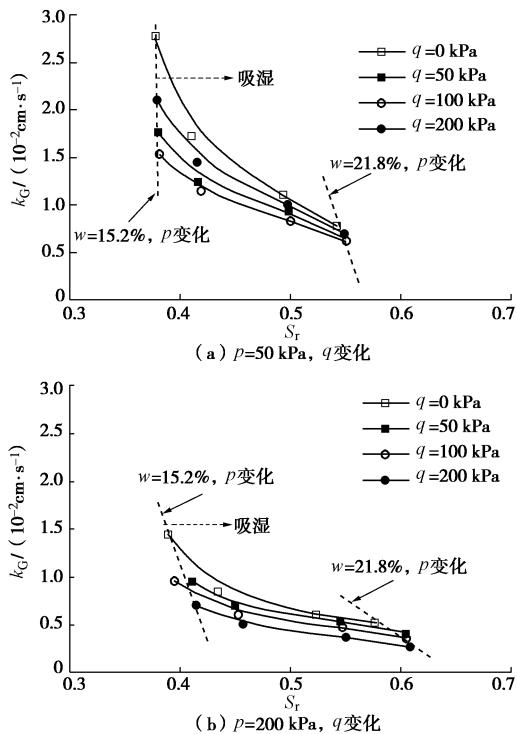


图4 平均应力相同, 偏应力对 k_G-S_r 关系的影响

Fig. 4 Influences of deviator stresses on k_G-S_r curves at constant mean stress

应力比 η 相同, 平均应力 p 不同条件下, 渗气系数 k_G 与饱和度 S_r 典型曲线如图5所示, 可以看出:

(1) p 一定, w 增大时的 k_G-S_r 曲线与 q 一定 w

增大时(图4实线)的变化规律相似, 皆呈非线性减小趋势; 随着 p 的增大, 曲线下移, 渗气系数减小的速率变小。

(2) w 一定时, 随着 p 增大, e 减小(表2), S_r 小幅增大, k_G 较明显减小, k_G-S_r 曲线皆呈线性减小趋势(图5虚线), 且减小的速率明显大于 p 一定, w 增大时的速率, 即平均应力作用引起饱和度的增大对渗气系数的影响更大; 含水率 w 愈大时, 曲线坡度愈缓, 平均应力对渗气系数影响程度愈小。

(3) 对比图5(a), (b)发现, η 愈大, w 增大(p 不变)或 p 增大(w 不变)时的 k_G-S_r 曲线的坡度愈缓, 即渗气系数减小程度愈小。说明平均应力或含水率对 k_G-S_r 曲线的影响程度与应力比大小有关。

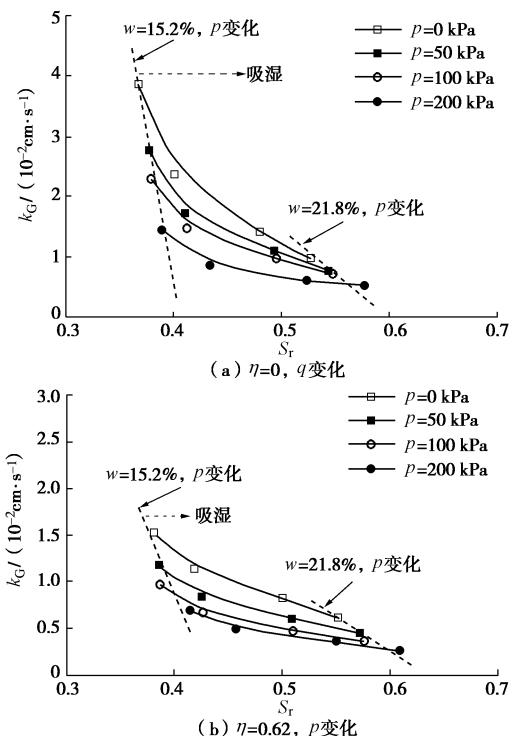


图5 应力比相同, 平均应力对 k_G-S_r 关系的影响

Fig. 5 Influences of mean stresses on k_G-S_r curves at constant stress ratio

综上所述, 偏应力, 平均应力及含水率对原状黄土 k_G-S_r 关系皆有影响, 建立 k_G-S_r 关系的渗透函数时需要考虑三者作用引起饱和度变化对渗气系数的影响。由于不同应力状态下 k_G-S_r 关系试验点(图4, 5)对应的孔隙比并非定值(表2), 无法直接基于试验结果建立常孔隙比下 k_G-S_r 关系的渗气函数, 再通过孔隙比变化来反映应力的影响。

2.2 三轴应力条件下渗气系数的描述及比较

为描述非饱和土的渗气特性, 通常建立相对渗气系数 k_G/k_d 与饱和度关系^[4, 6-7]。把 $w_0=1.5\%$ 试样近似为气体饱和试样, 其渗气系数假定为干土渗气系

数 k_d , 当绘出不同应力状态下相对渗气系数 k_{rG} 与饱和度 S_r 关系(图 6)时发现, 试验点分布在较为狭窄范围内, 可近似归一。反映了虽然偏应力(相同平均应力)及平均应力(相同应力比)变化时对 $k_{rG}-S_r$ 曲线皆有较为明显的影响, 但对 $k_{rG}-S_r$ 关系的影响却很小, 且可用相同的渗气函数来描述。这与不同竖向应力^[7]及不同埋置深度^[12]下垃圾土的相对渗气系数与饱和度关系可归一的研究结果相一致。

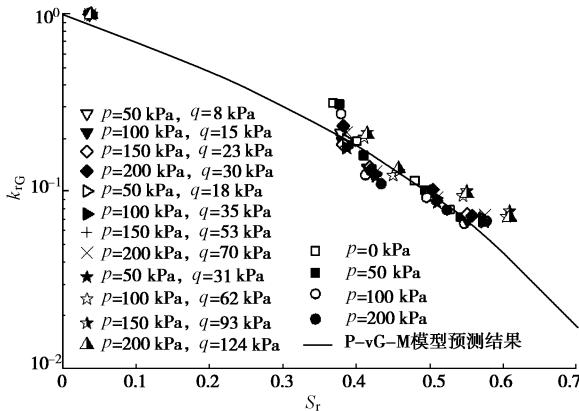


图 6 不同应力状态下相对渗气系数与饱和度的关系

Fig. 6 Relationship between relative gas permeability and liquid saturation at different stress states

通常用 P-vG-M 模型^[9]描述常孔隙比下土的渗气特性, 其表达式为

$$k_{rG} = (1 - S_{re})^\gamma (1 - S_{re}^{1/m})^{2m}, \quad (5)$$

式中 S_{re} 为有效饱和度, γ 为反映多孔介质挠曲程度影响的土性参数, 一般统计值为 0.5; m 为 V-G 持水特性模型(式(6))的参数, 且 $m=1-1/n$;

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

用总饱和度 S_r 作为式(5)及式(6)的自变量时, 对于本文研究的原状黄土, 参数 $m=0.15$ ^[10], 用式(5)对图 6 的试验点进行拟合时, 最小二乘法拟合得到参数 $\gamma=3.14$, 拟合结果为图 6 中实线。图 6 的拟合程度较好, 表明 P-vG-M 模型不仅可以描述常孔隙比下相对渗气系数与饱和度关系, 而且可描述三轴应力条件下偏应力及平均应力作用引起孔隙比变化时的相对渗气系数与饱和度关系。对于本文研究的原状黄土参数 γ 值大于 0.5, 并与 Xu 等^[11]针对垃圾土的结果 ($\gamma=2.7$) 相近, 但小于 Stoltz 等^[6]针对垃圾土的结果 ($\gamma=5.2$)。说明参数 γ 与土类型及结构有关。

Kozeny-Carman 模型^[12]常用于描述粗粒土饱和渗透系数, 其表达式为

$$k_L = C_L e^3 / (1 + e), \quad (7)$$

式中, C_L 为土性参数。

借鉴上述方法, 为考虑应力作用引起孔隙比变化对干土渗气系数 k_d 的影响, 绘出 $w_0=1.5\%$ 时不同应力比

η 下压缩稳定后, $k_d - e^3 / (1 + e)$ 关系如图 7 所示。可以看出:

(1) 试验点分布在较为狭窄范围内, 近似归一, 即可用相同的函数描述。说明三轴应力条件下应力状态对干土渗气系数的影响可通过孔隙比的变化来反映。

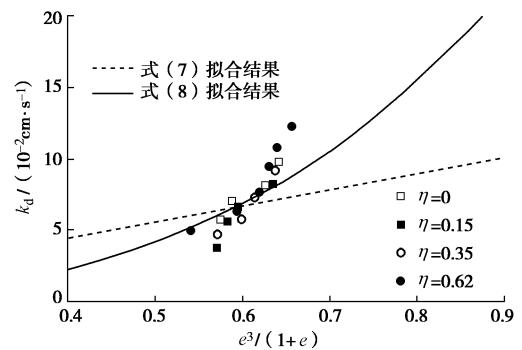


图 7 $w_0=1.5\%$ 时, 不同应力比下干土渗气系数与孔隙比关系

Fig. 7 Gas permeability with gas saturation ($w_0=1.5\%$) versus void ratio at different stress ratios

(2) k_d 随着 $e^3 / (1 + e)$ 的减小而呈非线性减小趋势, 即 $k_d - e^3 / (1 + e)$ 不是直线关系, 无法用 Kozeny-Carman 模型^[12](式(7), 参数 $C_L=1.12 \times 10^{-1}$ cm/s, 拟合结果图 7 虚线) 描述, 这与不同竖向应力作用下干燥时垃圾土的研究结果相一致; 当用幂函数(称之为幂函数模型)描述时, 其表达式为:

$$k_d = \beta [e^3 / (1 + e)]^\zeta, \quad (8)$$

式中, β , ζ 为土性参数, 且具有明确物理意义, β 为孔隙比 $e \approx 1.324$ ($e^3 / (1 + e)=1$) 时干土的渗气系数, ζ 为干土渗气系数随孔隙比减小而减小的速率。用最小二乘法拟合得到参数 $\beta=2.85 \times 10^{-1}$ cm/s, $\zeta=2.79$, 拟合结果见图 7 实线, 发现效果较好。将式(8)代入式(5), 即得到三轴应力状态下不同含水率原状黄土的渗气函数, 其表达式为

$$k_G = \beta [e^3 / (1 + e)]^\zeta (1 - S_r)^\gamma (1 - S_r^{1/m})^{2m}. \quad (9)$$

Mitchell 等^[13]在 Kozeny-Carman 模型^[12]的基础上, 提出了考虑变形对非饱和土的渗水系数 k_L 影响的预测模型, 其表达式为

$$k_L = C_L e^3 / (1 + e) S_r^3. \quad (10)$$

借鉴上述方法, 为考虑应力作用引起孔隙比变化对渗气系数的影响而引入表达式 $e^3 / (1 + e)$, 绘出不同应力状态下渗气系数 k_G 与修正气体饱和度 $e^3 / (1 + e)(1 - S_r)$ 关系如图 8 所示。可见, $k_G - e^3 / (1 + e)(1 - S_r)$ 关系试验点皆分布在狭窄的范围内, 可近似归一。说明偏应力及平均应力对原状黄土的渗气系数与修正气体饱和度关系的影响很小, 可用相同的渗气函数描述。

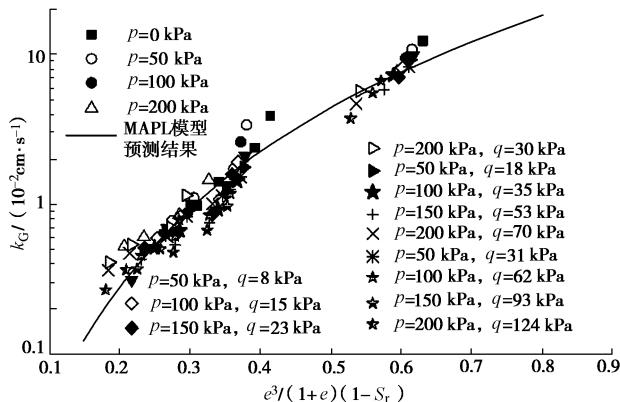


图 8 不同应力状态下渗气系数与修正气体饱和度关系

Fig. 8 Relationship between gas permeability and modified gas saturation at different stress states

当用幂函数(称之为修正气体饱和度幂函数模型,简称 MPAL 模型)对 $k_G - e^3/(1+e)(1-S_r)$ 关系试验点进行描述时,其表达式为

$$k_G = \beta \left[(1 - S_r) e^3 / (1 + e) \right]^\xi \quad (11)$$

式(11)可以满足 $S_r=1$ 时, $k_G=0$, $S_r=0$ 时, 退化为式(8)的特定情况。选用 $k_d - e^3/(1+e)$ 关系(式(8))确定的参数 β , ξ 值时, 其预测结果见图 8 实线。可见, 预测效果较好, 说明 MPAL 模型可以描述三轴应力条件下不同含水率原状黄土的渗气系数, 且与 P-vG-M 模型(式(8))相比而言, 模型参数少(仅为 2 个), 更便于实际工程应用。

用式(11)及相关参数, 确定出不同应力状态及含水率条件下渗气系数, 绘出预测与实测渗气系数关系如图 9 所示, 可见预测效果较好。

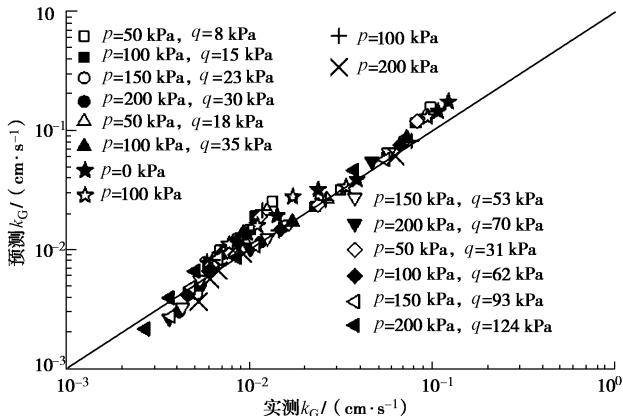


图 9 不同应力状态下渗气系数实测值与的预测值比较

Fig. 9 Comparison between predicted and measured gas permeabilities at different stress states

3 结 论

(1) 偏应力、平均应力及含水率对渗气系数与饱和度关系皆有较大影响。应力一定, 含水率的作用引起饱和度增大时, 渗气系数随之非线性减小, 且减小

程度与偏应力及平均应力的大小有关; 含水率一定, 偏应力(相同平均应力)或平均应力(相同应力比)的作用引起饱和度增大时, 渗气系数随之线性减小, 且减小程度与含水率的大小有关。

(2) 渗气系数随饱和度而变化的程度与引起其变化的机理有关, 含水率一定、偏应力(相同平均应力)或平均应力(相同应力比)增大时, 渗气系数随饱和度增大而减小的程度要比应力一定、含水率增大时大。

(3) 不同应力状态下相对渗气系数(渗气系数与干土渗气系数之比)与饱和度关系呈良好的归一性, 且可用以总饱和度为参量的 P-vG-M 模型来描述。

(4) 不同应力状态下, 渗气系数与修正气体饱和度之间关系可归一, 且可用提出的修正气体饱和度幂函数(MPAL)模型来描述。对于该模型, 当饱和度为 0 时, 退化为可以描述干土渗气系数的幂函数模型; 与 P-vG-M 模型相比时, 参数较少(仅为 2 个), 更便于实际工程应用。

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] 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气渗水函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1907–1914. (LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong. Density-saturation-dependent gas-water permeability function of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1907–1914. (in Chinese))
- [3] ZHAN T L T, YANG Y B, CHEN R, et al. Influence of clod size and water content on gas permeability of a compacted loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(11): 1468–1474.
- [4] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q₃ 黄土渗气特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1264–1273. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Experimental research on gas permeability of unsaturated Q₃ loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1264–1273. (in Chinese))
- [5] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 城市生活垃圾的气体渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1408–1415. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Experimental study on gas permeability of municipal solid

- waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1408 – 1415. (in Chinese))
- [6] STOLTZ G, GOURE J P, OXARANGO L. Liquid and gas permeabilities of unsaturated municipal solid waste under compression[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2010, **118**: 27 – 42.
- [7] LIU J F, SKOCZYLAS F, TALANDIER J. Gas permeability of a compacted bentonite-sand mixture: coupled effects of water content, dry density, and confining pressure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(2): 1159 – 1167.
- [8] 陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力条件下原状 Q₃ 黄土的渗气特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 280 – 294. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, ZHANG Jie, et al. Gas permeability of intact Q₃ loess under isotropic stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 287 – 294. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] 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))
- [11] 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.
- [12] CARMAN P C. Permeability of saturated sands, soils and clays[J]. Journal of Agricultural Science, 1939, **29**(2): 262 – 273.
- [13] MITCHELL J K, HOOPER D R, CAMPANELLA R G. Permeability of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1965, **91**: 41 – 65.

(本文责编 明经平)

(上接第 251 页)

- [9] 丁明武, 徐泽友, 卢廷浩. 土与混凝土板接触面剪切试验研究[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 32 – 35. (DING Ming-wu, XU Ze-you, LU Ting-hao. Experimental study on shear tests of contact face of soil with concrete slab[J]. China Harbour Engineering, 2012(1): 32 – 35. (in Chinese))
- [10] 朱彦鹏, 魏升华. 深基坑支护桩与土相互作用的研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2840 – 2844. (ZHU Yan-peng, WEI Sheng-hua. Research on interaction between deep excavation supporting pile and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2840 – 2844. (in Chinese))
- [11] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 – 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Deformation and mathematical simulation of the soil and structural material interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, **16**(3): 14 – 22. (in Chinese))
- [12] 武亚军, 栾茂田, 杨敏. 土与结构间一种新的接触单元模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(4): 432 – 435. (WU Ya-jun, LUAN Mao-tian, YANG Min. New contact element of interface between soil and structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, **33**(4): 432 – 435. (in Chinese))
- [13] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)