

DOI: 10.11779/CJGE2016S2046

基于持水曲线预测非饱和土相对渗气系数的新方法

张 昭¹, 刘奉银^{*1}, 李荣建¹, 柴军瑞², 谷 雨¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地(西安理工大学), 陕西 西安 710048)

摘 要: 准确模拟非饱和土中的水、气运移规律需合理地描述其孔隙中的持水特性以及水、气两相的流动特性。借鉴预测相对渗水系数的已有方法, 提出了基于持水曲线预测相对渗气系数的新方法, 认为幂指数 η_a 随孔隙尺寸分布系数 ε (由持水曲线确定) 增大呈指数递减趋势。随后, 利用已有文献中22种试样和5种试样(从砂土至粉质黏壤土)的持水及渗气试验结果分别标定和验证该方法, 结果表明: 新方法在表征相对渗气系数与有效气相饱和度的关系时优于已有预测方法。

关键词: 非饱和土; 相对渗气系数; 持水曲线; 孔隙尺寸分布系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0280-06

作者简介: 张 昭(1983-), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土水力特性的研究工作。E-mail: zhangzhao_1983@126.com。

New approach to predict relative air permeability based on water retention curve for unsaturated soils

ZHANG Zhao¹, LIU Feng-yin¹, LI Rong-jian¹, CHAI Jun-rui², GU Yu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area (Xi'an University of Technology), Xi'an 710048, China)

Abstract: Accurate modeling of water and air flow in unsaturated soils requires the reasonable definition of water retention behavior and the permeability behavior of water and air in the pores. By means of the approach developed previously to estimate the relative water permeability, a new approach to predict the relative air permeability is proposed based on the water retention curve. The power value η_a in the approach can be considered as a decreasing exponential function of the coefficient ε , characterizing the pore-size distribution of the soil and derived from its water retention curve. The model is calibrated using the data from 22 samples and validated using the data from 5 samples ranging from sand to silty clay loam in the existing literatures. The proposed approach is superior to the available alternative approaches for describing the evolution of relative air permeability with effective air saturation.

Key words: unsaturated soil; relative air permeability; water retention curve; coefficient of pore-size distribution

0 引 言

准确模拟非饱和土中的水、气运移规律在岩土工程设计和性能评价过程中至关重要, 也是土力学、环境岩土工程等领域关注的热点课题。要认识水、气运移机理, 不仅要确定土样的持水曲线, 而且还需分别确定渗水系数和渗气系数与土中水、气两相含量的关系, 已有试验^[1-3]表明这两种关系均呈非线性趋势。在描述这两种关系时, 常常将渗水系数或渗气系数与这两个系数在土样完全饱和或完全干燥时的最大值作比值, 用这种处理方法得到的数学关系称为相对渗水系数函数或相对渗气系数函数。相对渗气系数函数的描述原理与相对渗水系数函数类似: Tuli等^[4]、Yang等^[5]以及Kuang等^[6]分别采用Kosugi模型^[7]和Van Genuchten

模型^[8]描述持水曲线, 而后均利用Mualem模型^[9]提出了相对渗水系数函数和相对渗气系数函数的描述方法(仅在幂指数取值上有所不同)。

已有文献[9~15]表明土孔隙的尺寸分布及其连通一弯曲程度会显著影响其中的水、气运移, Hunt^[16]试图采用孔隙网络以及逾渗理论模拟这种影响。然而, 由文献[17]可知, 持水曲线与土的孔隙尺寸分布密切

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402258, 41372304); 中国博士后科学基金项目(2015M57265XB); 陕西省自然科学基金计划-青年人才项目(2016JQ4002); 陕西省博士后科研项目(107-434016007); 陕西省重点实验室后补助项目(2015SZSJ-46); 陕西省“百人计划”项目(302-253051601)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者(E-mail: liufy@xaut.edu.cn)

相关, 因此Assouline等^[18]在建立持水曲线模型时引入了孔隙尺寸分布参数 ε , 可由持水曲线推得。该参数与Assouline^[12]提出的相对渗水系数函数中表征土孔隙连通一弯曲程度影响的幂指数 η_w 密切相关^[19], 两者的关系表明持水曲线与相对渗水系数函数密切相关, 并可通过持水曲线所反映的土孔隙性质预测相对渗水系数, 而持水曲线所反映的土孔隙性质是否用来预测相对渗气系数同样也值得深入研究。

为此, 借鉴Assouline等^[12, 18]提出的持水曲线模型及其预测相对渗水系数的思路, 研究持水曲线与相对渗气系数函数的关系; 试图提出基于持水曲线预测相对渗气系数的新方法, 引入与 η_w 类似的幂指数 η_a , 分析 η_a 与孔隙尺寸分布系数 ε 的关系; 最后, 利用已有文献中 22 种试样和 5 种试样 (从砂土至粉质黏壤土) 的持水及渗气试验结果分别标定和验证该预测方法, 为研究非饱和土的渗气机理提供一条新途径。

1 基于持水曲线预测渗气系数的新方法

1.1 Assouline 持水曲线模型和相对渗水系数函数

Assouline等^[18]提出的持水曲线模型可表示为

$$S_w^c(\psi) = 1 - \exp[-\xi_w(1/\psi - 1/\psi_r)^{\mu_w}] \quad (0 \leq \psi \leq \psi_r) \quad (1)$$

式中 S_w^c 表示有效水相饱和度; ψ 表示基质吸力; ξ_w 和 μ_w 为拟合参数; ψ_r 表示残余体积含水率对应的残余基质吸力, 根据文献[8, 18]一般取 1500 kPa 左右。该模型的优点在于采用式 (1) 描述的持水曲线实质也是概率函数, 即 $F(1/\psi) = S_w^c(1/\psi)$, 而土样中的孔隙半径 r 又与 $1/\psi$ 成正比, 故 $F(1/\psi)$ 实质为描述 r 分布的概率密度函数 $f(r)$ ^[20]。 $f(r)$ 的分布变化规律可用孔隙尺寸分布参数 ε 描述^[20]:

$$\varepsilon = \frac{[\Gamma(1 + 2/\mu_w) - \Gamma^2(1 + 1/\mu_w)]^{1/2}}{\Gamma(1 + 1/\mu_w) + 1/\psi_r} \quad (2)$$

式中, Γ 表示 Gamma 分布函数。

基于持水曲线模型和 $f(r)$, 并结合Mualem模型^[9], Assouline^[12]提出了相对渗水系数函数:

$$k_w^r(S_w^c) = \left[\frac{\left(\int_0^{S_w^c} dF/\psi \right)}{\left(\int_0^1 dF/\psi \right)} \right]^{\eta_w} \quad (3)$$

式中, η_w 表示与土颗粒级配和结构有关的参数, 并与 ε 密切相关^[19]:

$$\eta_w = 1.10\varepsilon^{-0.624} \quad (R^2 = 0.88) \quad (4)$$

由此, $k_w^r(S_w^c)$ 的表达式可通过相应的持水曲线模型推得^[12]。

1.2 相对渗气系数的预测思路

当土样处于非饱和状态时, 有效水相饱和度 S_w^c 可定义为

$$S_w^c = (\theta_w - \theta_w^r) / (\theta_w^s - \theta_w^r) \quad (5)$$

式中 θ_w 表示体积含水率; θ_w^s 和 θ_w^r 分别表示饱和及残余体积含水率。同理, 有效气相饱和度 S_a^c 可定义为

$$S_a^c = (\theta_a - \theta_a^r) / (\theta_a^s - \theta_a^r) \quad (6)$$

式中 θ_a 表示体积含气率; θ_a^s 和 θ_a^r 分别表示最大和最小体积含气率。

众所周知, 饱和土样中一般仍残存气泡, 故饱和体积含水率 θ_w^s 小于土样的孔隙率 n , 且残余体积含水率 θ_w^r 亦很难直接测定。在确定最大体积含气率 θ_a^s 和最小体积含气率 θ_a^r 时也存在类似问题: 在持水曲线的毛细阶段 ($\psi \leq 1500$ kPa), θ_a^s 因 θ_w^r 而小于土样的孔隙率 n 。由Hunt^[16]研究的逾渗理论可知, θ_a^r 一般大于零。

综上, 笔者得到 θ_a , θ_a^s 和 θ_a^r 的表达式:

$$\left. \begin{aligned} \theta_a &= n - \theta_w^r \\ \theta_a^s &= n - \theta_w^r \\ \theta_a^r &= n - \theta_w^s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式 (7) 带入式 (6) 可得

$$S_a^c = 1 - S_w^c \quad (8)$$

由此可得到相对渗气系数 k_a^r 的限制条件:

$$\left. \begin{aligned} k_a^r &= 0 \\ S_a^c &= 0 \\ k_a^r &= 1 \\ S_a^c &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

故可采用式 (8) 以及式 (3) 表征的相对渗水系数函数确定相对渗气系数函数 (需注意: 由于空气对土样孔隙的分布以及连通一弯曲程度的影响与水分不同, 故在相对渗气系数函数中应采用参数 η_a 取代 η_w):

$$k_a^r(S_a^c) = k_a(S_a^c) / k_a^s = \left[\frac{\left(\int_0^{S_a^c} dF/\psi \right)}{\left(\int_0^1 dF/\psi \right)} \right]^{\eta_a} \quad (10)$$

式中 $k_a(S_a^c)$ 表示给定 S_a^c 对应的渗气系数; k_a^s 表示 $S_a^c=1$ 对应的饱和渗气系数。将该方法用于不同种土时需要确定不同的 ε 值, 故需确定 $\eta_a(\varepsilon)$ 的关系。

2 相对渗气系数预测方法的实现与验证

2.1 预测方法的实现

采用已有文献中 27 种试样的持水及渗气试验结果 (如表 1) 实现所提出的预测方法, 并对该方法进行验证。表 1 中的 22 种试样用于确定 $\eta_a(\varepsilon)$ 的关系, 另 5 种土样用于验证该预测方法。需注意: 表 1 中的编号 VS、FS、TSL、GB、CSL、OFS、HS、SCL、GS 依次表示火山砂、细砂、Touchet 粉质壤土、玻璃微珠、Columbia 砂质壤土、Oso Flaco 砂、Hygiene 砂岩、粉质黏壤土、Grenoble 砂。

由已有文献可得到不同种试样的 $\theta_w(\psi)$ 和 $k_a(\theta_w)$ 实测值, 这里可用相应文献中给出的饱和及残余体积

含水率 (θ_w^s 和 θ_w^r) 将 $\theta_w(\psi)$ 实测值转换为 $S_w^c(\psi)$ 实测值。需注意: Tuli 等^[21]未给出 θ_w^r , 这里先用 Or 等^[22]的方法根据每种试样的黏粒含量计算相应的比表面积, 再采用 Tuller 等^[23]的方法通过基质吸力为 1500 kPa 时的水膜厚度估算得 θ_w^r 。

对每种试样, 先用式 (1) 对 $S_w^c(\psi)$ 实测值进行拟合, 以确定相应的参数 ξ_w 和 μ_w , 再用式 (2) 算得相应的 ε 值。此外, 采用式 (8) 还可将 $k_a(\theta_w)$ 实测值转换为 $k_a(S_a^c)$ 。文献[21]未给出式 (10) 中所需的 k_a^s 值, 而该值可通过将Tuli等^[4]提出的幂函数与 $k_a(S_a^c)$ 实测值拟合确定:

$$k_a = k_a^s (S_a^c)^\gamma \quad (11)$$

式中, k_a^s 与 γ 均视为拟合参数。

随后, 借鉴Assouline^[12]将式 (1) 代入式 (3) 并通过积分算法拟合 $k_w^r(S_w^c)$ 实测值的思路, 将式 (1) 和式 (8) 代入式 (10) 对每种试样的 $k_a^r(S_a^c)$ 实测值进行拟合以确定相应的 η_a 值。这里采用文献[21]中重塑和原状样以及文献[10]中2种试样的实测值确定 $\eta_a(\varepsilon)$ 的关系, 并用于标定相对渗气系数的预测方法。文献[10]中另2种试样以及文献[4, 24]中的3种试样则用于验证基于 $\eta_a(\varepsilon)$ 关系的渗气系数预测方法。

2.2 $\eta_a(\varepsilon)$ 关系的确定

每种试样的饱和及残余体积含水率 (θ_w^s 和 θ_w^r)、式 (1) 中的拟合参数 μ_w 值、 ε 的计算值以及 η_a 的拟合值如表1所示。例如, 采用式 (1) 和式 (10) 对FS和TSL试样的拟合结果如图1 (a) 和 (b) 所示, 由图可知, 式 (1) 能较为准确地描述试样用 $S_w^c(\psi)$ 表征的持水曲线, 且式 (10) 对 $k_a^r(S_a^c)$ 实测值的拟合效果也很好。

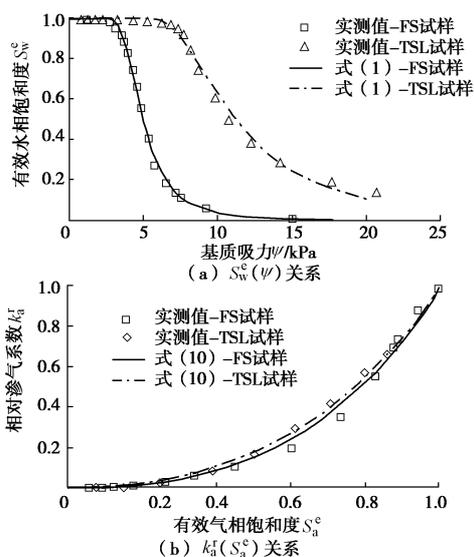


图1 采用式 (1) 和式 (10) 对 FS 试样和 TSL 试样的 $S_w^c(\psi)$ 和 $k_a^r(S_a^c)$ 实测值的拟合结果

Fig. 1 The fitting results of measured data of $S_w^c(\psi)$ and $k_a^r(S_a^c)$ for FS and TSL samples using Eqs. (1) and (10)

由表1描述的 $\eta_a(\varepsilon)$ 关系如图2所示, 由图可知, η_a 随 ε 增大呈指数递减趋势, 与 $\eta_w(\varepsilon)$ 关系^[12, 19]呈类似趋势。对表1中 $\eta_a(\varepsilon)$ 可用指数关系描述:

$$\eta_a = m_a \exp(-p_a \varepsilon) \quad (R^2=0.890) \quad (12)$$

式中 拟合参数 m_a 与 p_a 分别取 2.798 和 1.148; R^2 为相关系数。由表 1 可知, 原状样的 ε 值均高于重塑样, 这与 Tuli 等^[21]的研究结论一致, 因为重塑样的土颗粒结构遭到破坏, 故其 ε 值偏低。表 1 中用于验证预测方法的 5 种试样的 η_a 数据以及采用式 (12) 以描述 $\eta_a(\varepsilon)$ 关系的拟合曲线亦如图 2 所示, 这 5 种试样的 η_a 值均落在拟合曲线置信水平为 90% 的置信区间内。由图 2 和表 1 可知, 式 (12) 中的拟合参数 $m_a=2.798$ 与 $p_a=1.148$ 适用于土样的 $\eta_a=0\sim 3.0$, $\varepsilon=0\sim 3.5$, $\theta_w^s=0.312\sim 0.556$ 的范围。

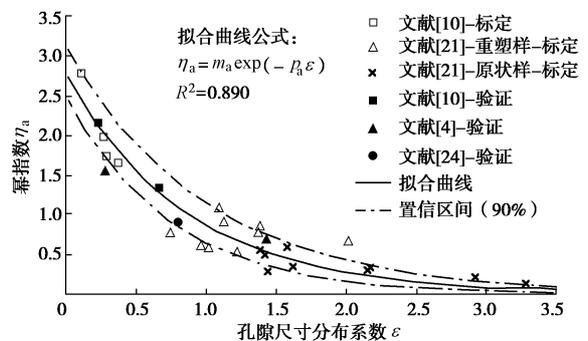


图2 表 1 中 $\eta_a(\varepsilon)$ 的数据及式 (12) 的拟合曲线和水平为 90% 的置信区间

Fig. 2 Data of $\eta_a(\varepsilon)$ in Table 1, fitting curves of Eq. (12) and confidence intervals of 90%

2.3 新方法与已有方法的对比验证

联立式(10)和式(12)对这5种试样预测的 $k_a^r(S_a^c)$ 关系及其实测值如图3所示, 图中预测的 $k_a^r(S_a^c)$ 关系及其实测值的吻合程度采用均方根误差 RMSE 描述。由图3可知, 本文提出的预测方法对相对渗气系数的预测总体较好, 尤其对 OFS、HS 和 SCL 这3种试样预测良好(如图3 (b)、(c)和 (d)); 而对 CSL 和 GS 两种试样预测相对较差(如图3 (a)和 (e)), 原因在于这两种试样缺少 $S_w^c=0.35$ ($S_a^c=0.65$) 附近的 $S_w^c(\psi)$ 实测值, 故式 (1) 对该值附近的持水曲线拟合效果较差, 因此基于式 (1) 预测的 $k_a^r(S_a^c)$ 关系在 $S_a^c=0.65$ 附近与其实测值吻合度也较差。

此外, 由引言可知, Tuli等^[4]和Yang等^[5]在Mualem模型^[9]中令幂指数为2, 并引入修正系数 $(1-S_w^c)^{1/2}$ 亦得到描述 $k_a^r(S_w^c)$ 关系的表达式:

$$k_a^r(S_w^c) = (1-S_w^c)^{1/2} \left[\int_{S_w^c}^1 (\psi^{-1} dS_w^c) / \int_0^1 (\psi^{-1} dS_w^c) \right]^2 \quad (13)$$

不仅如此, Kuang等^[6]认为式 (13) 中幂指数应取 4, 方可提高预测精度:

$$k_a^r(S_w^e) = (1 - S_w^e)^{1/2} \left[\int_{S_w^e}^1 (\psi^{-1} dS_w^e) / \int_0^1 (\psi^{-1} dS_w^e) \right]^4 \quad (14)$$

表 1 用于标定和验证预测方法的试样编号及相应的 θ_w^s 值, θ_w^r 值, 式 (1) 中的拟合参数 μ_w 值, ε 值, η_a 拟合值

Table 1 Samples used to calibrate and validate proposed approach and corresponding values of θ_w^s , θ_w^r , fitting μ_w in Eq. (1), ε , fitting η_a

用途	试样编号	θ_w^s	θ_w^r	μ_w	ε	η_a (拟合值)	参考文献
预测 方法 的标定	VS	0.351	0.055	3.762	0.288	1.75	文献[10]
	FS	0.377	0.063	4.206	0.268	2.00	
	TSL	0.485	0.131	2.956	0.359	1.67	
	GB	0.370	0.031	9.596	0.100	2.80	
	D44	0.447	0.002	0.604	1.378	0.90	文献[21] -重塑样
	D59	0.421	0.005	0.423	1.012	0.62	
	D126	0.465	0.005	0.504	1.220	0.55	
	D128	0.467	0.005	0.452	1.085	1.10	
	D129	0.442	0.005	0.512	1.122	0.92	
	D132	0.462	0.005	0.446	0.739	0.80	
	D134	0.449	0.005	0.486	0.956	0.65	
	D140	0.442	0.005	0.643	1.374	0.83	
	D142	0.556	0.006	0.403	2.014	0.70	
	UD128	0.414	0.005	0.419	1.443	0.30	文献[21] -原状样
UD129	0.406	0.005	0.426	1.413	0.50		
UD131	0.403	0.005	0.399	1.378	0.55		
UD134	0.402	0.005	0.357	1.621	0.35		
UD137	0.412	0.005	0.361	1.575	0.60		
UD138	0.415	0.006	0.372	2.906	0.20		
UD139	0.405	0.006	0.397	2.168	0.33		
UD140	0.413	0.006	0.401	2.164	0.31		
UD142	0.501	0.006	0.297	3.296	0.13		
预测 方法 的验证	CSL	0.427	0.098	0.756	1.434	0.70	文献[4]
OFS	0.406	0.073	3.771	0.277	1.57	文献[10]	
HS	0.250	0.144	5.485	0.206	2.20		
SCL	0.441	0.121	3.525	0.666	1.35		
GS	0.312	0.027	2.463	0.801	0.91	文献[24]	

采用式 (13) 和式 (14) 对 $k_a^r(S_a^e)$ 关系的预测结果及其 RMSE 亦如图 3 所示, 由图亦可知, 式 (13) (幂指数取 2) 在 3 种方法中预测效果最差, 均较 $k_a^r(S_a^e)$ 实测值偏大, 这与 Kuang 等^[6]的研究结论一致, 将 Mualem 模型中的幂指数由 2 替换为 4 可提高其预测精度。

然而, 本文提出的方法 (式 (10) 和式 (12)) 在 3 种方法中预测效果最好, 原因在于 η_a 与 ε 的关系消除了式 (13) 和 (14) 对幂指数取常数的限制, 发挥

了对不同种试样预测 $k_a^r(S_a^e)$ 时的灵活性。

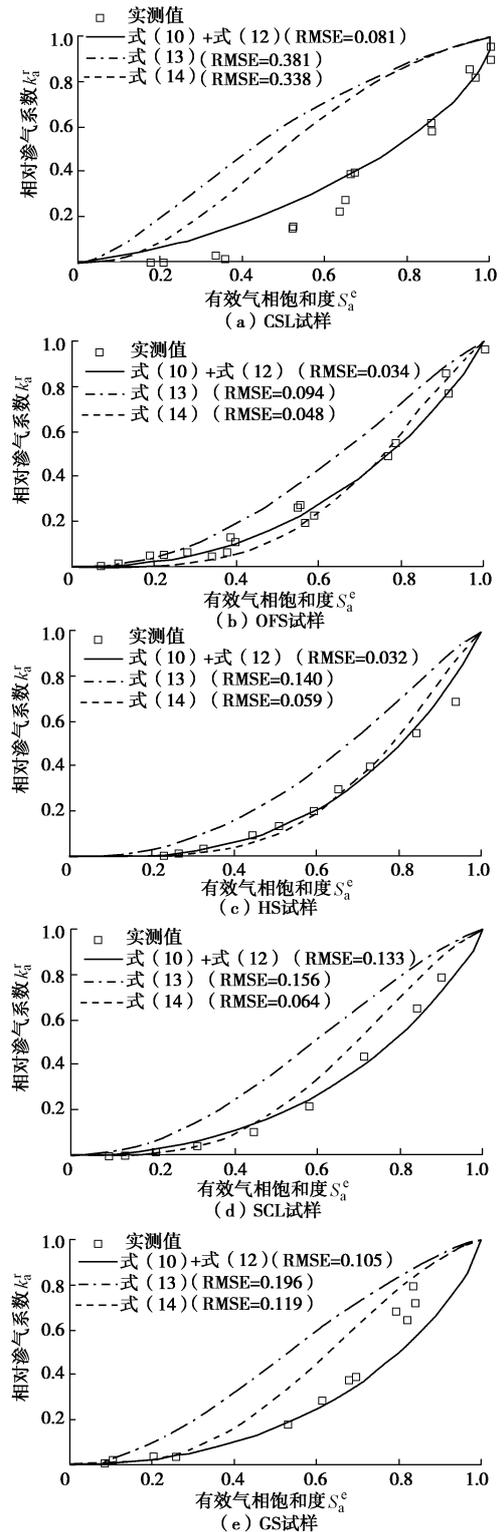


图 3 采用新方法 (式 (10) 和式 (12)) 以及式 (13) 和式 (14) 对 5 种试样的 $k_a^r(S_a^e)$ 实测值的预测结果

Fig. 3 Predicted values of $k_a^r(S_a^e)$ functions for five samples by new approach (Eqs. (10) and (12)) and Eqs. (13) and (14) versus corresponding measured data

2.4 $\eta_w(\varepsilon)$ 和 $\eta_a(\varepsilon)$ 关系的对比分析

式 (4) 描述的 $\eta_w(\varepsilon)$ 关系从数学角度认为 $\varepsilon \rightarrow 0$

时, $\eta_w \rightarrow +\infty$, 而若从物理角度来看, $\varepsilon = 0$ 时土样内仅存一种半径的孔隙, 因此 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, η_w 应趋于有限值而非 $+\infty$ 。由此可见, 采用式 (12) 拟合 $\eta_a(\varepsilon)$ 数据是合理的, 原因在于该式允许幂指数 η 在 $\varepsilon = 0$ 时取有限值。因此, 笔者采用与式 (12) 类似的指数函数拟合 $\eta_w(\varepsilon)$ 数据 (用于确定式 (4)):

$$\eta_w = m_w \exp(-p_w \varepsilon) \quad (R^2=0.872) \quad (15)$$

式中, 拟合参数 m_w 与 p_w 分别取 3.370 和 0.994。 $\eta_a(\varepsilon)$ 和 $\eta_w(\varepsilon)$ 的数据及式 (12) 和式 (15) 分别对其拟合的曲线如图 4 所示, 由图可知, 当 ε 一定时, η_w 值均高于 η_a 值。从统计角度来看, 式 (12) 和式 (15) 的拟合参数在其置信水平为 90% 时的置信区间会有重叠, 故两式的拟合参数从统计角度可认为是相同的。由此可见, 图 4 中的所有数据可视为一个样本, 这意味着当 ε 一定时, η_a 和 η_w 是相同的。形如式 (12) 或式 (15) 的 $\eta(\varepsilon)$ 统一拟合公式亦如图 4 所示。从物理角度来看, 这种统一拟合公式的假定对应着最简单的土样孔隙结构, 此时土样可简化为一簇相互平行且彼此不连通的圆柱形毛细管集合体, 这种情况下可假定渗气系数和渗水系数仅存在很小的差异 (差异仅源于毛细管壁的杂质及粗糙度), 而且在实际应用中亦可假定 $\eta_a = \eta_w = \eta$ 。

然而, 实际应用中对土样概化模型的研究往往更为复杂, 需要考虑毛细管间的连通、允许空气和水分共存的三角形孔隙^[25]及采用对数正态分布的球体颗粒集合体^[26] (取代毛细管集合体)。在这些情况下, 渗气系数和渗水系数的差异较大, 因为空气和水分可以在相互连通的孔隙网络中选择不同的路径运移, 这一点在 Hunt^[16]应用逾渗理论时得以证实。由于式 (3) 或式 (10) 中的 η 值描述了孔隙连通—弯曲程度对渗水系数或渗气系数的影响^[12], 可见水相和气相的 η 值不同, 而且由图 4 亦可知, 若给定 ε , 则 $\eta_w > \eta_a$, 这与 Tuli 等^[21]的研究结论以及 Molddrup 等^[11]得出的水相弯曲程度高于气相的结论一致。

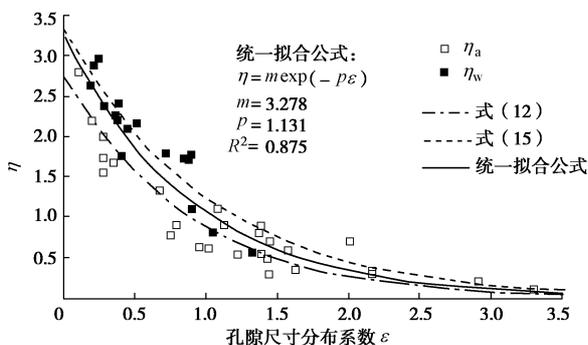


图 4 采用式 (12) 和式 (15) 对 $\eta_a(\varepsilon)$ 和 $\eta_w(\varepsilon)$ 数据的拟合
Fig. 4 Fitting of data of $\eta_a(\varepsilon)$ and $\eta_w(\varepsilon)$ using Eqs. (12) and (15)

3 结 论

(1) 借鉴 Assouline 持水曲线模型和相对渗水系数函数的预测思路, 提出了基于持水曲线预测相对渗气系数的新方法, 并引入了与 η_w (用于描述相对渗水系数函数) 类似的幂指数 η_a , 用于相对渗气系数的预测。

(2) 利用 22 种试样的持水及渗气试验结果研究了幂指数 η_a 与孔隙尺寸分布系数 ε 的关系, 结果表明: η_a 随 ε 增大呈指数递减趋势; 并发现幂指数 $\eta_w(\varepsilon)$ 与 $\eta_a(\varepsilon)$ 的关系相同, 仅 $\eta_w > \eta_a$ 。

(3) 采用 5 种试样 (从砂土至粉质黏壤土) 的持水及渗气试验结果对比验证了该预测方法的有效性, 结果表明: 该方法在表征相对渗气系数与有效气饱和度的关系时优于已有预测方法。

参考文献:

- [1] 叶为民, 钱丽鑫, 白云, 等. 由土-水特征曲线预测上海非饱和软土渗透系数[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1262 - 1265. (YE Wei-min, QIAN Li-xin, BAI Yun, et al. Predicting coefficient of permeability from soil-water characteristic curve for Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1262 - 1265. (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 air-water permeability function of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1907 - 1914. (in Chinese))
- [3] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q₃ 黄土渗气特性试验研究[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))
- [4] TULI A, HOPMANS J W. Effect of degree of fluid saturation on transport coefficient in disturbed soils[J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55(1): 147 - 164.
- [5] YANG Z, MOHANTY B P. Effective parametrizations of three nonwetting phase relative permeability models[J]. Water Resource Research, 2015, 55(8): 6520 - 6531.
- [6] KUANG X, JIAO J J. A new model for predicting relative nonwetting phase permeability from soil water retention

- curves[J]. *Water Resource Research*, 2011, **47**(8): 427 - 438.
- [7] KOSUGI K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention[J]. *Water Resource Research*, 1994, **30**(4): 891 - 901.
- [8] 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.
- [9] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, **12**(3): 513 - 522.
- [10] BROOKS R H, COREY. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [11] MOLDRUP P, OLESEN T, KOMATSU T, et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(3): 613 - 623.
- [12] ASSOULINE S. A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve[J]. *Water Resources Research*, 2001, **37**(2): 265 - 271.
- [13] 徐永福, 黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(5): 635 - 638. (XU Yong-fu, HUANG Yin-chun. Fractal-textured soils and their unsaturated mechanical properties[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(5): 635 - 638. (in Chinese))
- [14] HU R, CHEN Y F, LIU H H, et al. A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: consideration of the change in pore size distribution[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(16): 1389 - 1405.
- [15] HU R, CHEN Y F, LIU H H, et al. A relative permeability model for deformable soils and its impact on coupled unsaturated flow and elasto-plastic deformation processes[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2015, **58**(11): 1971 - 1982.
- [16] HUNT A G. Continuum percolation theory for saturation dependence of air permeability[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**(4): 134 - 138.
- [17] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(5): 1103 - 1117.
- [18] ASSOULINE S, TESSIER D, BRUAND A. A conceptual model of the soil water retention curve[J]. *Water Resources Research*, 1998, **34**(2): 223 - 231.
- [19] ASSOULINE S. On the relationships between the pore size distribution index and characteristics of the soil hydraulic functions[J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**(7): 301 - 320.
- [20] ASSOULINE S. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, **5**(2): 554 - 563.
- [21] TULI A, HOPMANS J W, ROLSTON D E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(5): 1361 - 1371.
- [22] OR D, WRAITH J M. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model[J]. *Water Resources Research*, 1999, **32**(2): 371 - 383.
- [23] TULLER M, OR D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**(9): 319 - 335.
- [24] TOUMA J, VAUCLIN M. Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil[J]. *Transport in Porous Media*, 1986, **1**(1): 27 - 55.
- [25] TULLER M, OR D. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space[J]. *Water Resources Research*, 2001, **37**(5): 1257 - 1276.
- [26] CHAN T P, GOVINDARAJU R S. Estimating soil water retention curve from particle-size distribution data based on polydisperse sphere systems[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, **3**(4): 1443 - 1454.