

DOI: 10.11779/CJGE201812019

基于土壤转换函数 (PTF) 预测不同初始孔隙比 土的土-水特征曲线

叶云雪¹, 邹维列^{*1, 2}, 袁斐³, 刘家国⁴

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 西京学院土木工程学院, 陕西 西安 710123;

3. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200093; 4. 深圳地质勘查局, 广东 深圳 518015)

摘要: 提出了预测 van Genuchten (VG) 模型参数 n 的一个土壤转换函数 (pedotransfer function, PTF), 该函数是一个非线性回归方程, 结合 VG 模型参数 α 与初始孔隙比 e_0 的回归方程, 来预测不同初始孔隙比土的土-水特征曲线 (SWCC)。 n 和 α 回归方程中的拟合参数 (a, b 和 A, B) 只需通过 3 组常规的 SWCC 试验数据即可校正。将选取的具有代表性的各个文献中的试验数据均分成两部分: 一部分用于校正拟合参数 (a, b 和 A, B), 另一部分用于验证基于 PTF 预测 SWCC 方法的准确性。结果表明, 基于 PTF 所预测得 SWCC 与文献中的试验数据具有很好的一致性。PTF 只需引入一个预测变量即初始孔隙比 e_0 ; 它不仅适用于变形土, 也适用于非变形土。

关键词: 土壤转换函数; 土水特征曲线; VG 模型; 初始孔隙比

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)12-2305-07

作者简介: 叶云雪(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土特性方面的研究工作。E-mail: yeyunxue@163.com。

Predicating soil-water characteristic curves of soils with different initial void ratios based on a pedotransfer function

YE Yun-xue¹, ZOU Wei-lie^{1, 2}, YUAN Fei³, LIU Jia-guo⁴

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an 710123,

China; 3. Shanghai Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200093, China; 4. Shenzhen Geology Survey Bureau,
Shenzhen 518015, China)

Abstract: A pedotransfer function (PTF), which is a nonlinear regression equation, is proposed for predicting the parameter n of the van Genuchten (VG) model. Considering the regressive relationship between the parameter α of the VG model and the initial void ratio e_0 , the soil-water characteristic curves (SWCCs) of soil specimens with different initial void ratios can be accurately predicted. The fitting parameters (i.e., a, b and A, B) of the regression equations corresponding to the parameters n and α can be calibrated using the test data obtained from three sets of conventional SWCC tests. The test data in each reference available are divided into two parts. One part is used for the calibration of the fitting parameters (i.e., a, b and A, B), and the other part is employed for the verification of the predicted SWCCs based on PTFs. The results show that the SWCCs, which are predicted by using the proposed nonlinear regression equation (PTF) concerning the parameter n of the VG model, have good agreement with the test data in the references. Only one predictive variable (i.e., initial void ratio, e_0) is needed in the proposed PTF. This PTF is suitable for both rigid and deformable soils.

Key words: pedotransfer function; soil-water characteristic curve; VG model; initial void ratio

0 引言

在岩土工程中, 基质吸力与含水率 (质量含水率, 体积含水率或饱和度) 的关系被称为土-水特征曲线 (SWCC) 或者持水特性曲线 (SWRC)。SWCC 与非饱和土的强度、渗透系数、孔径分布及植物的蒸腾作用等有着密切的联系^[1-4], 并已逐渐应用到实际工程中^[5-6]。为了定量地描述 SWCC, 很多学者提出了 SWCC 的本

构模型^[7-8]。由于直接测量 SWCC 不仅需要专门的仪器, 而且耗时费力。本文着重介绍一种间接测量 SWCC 的方法。最常用的间接法是土壤转换函数 (pedotransfer functions, PTFs), 它将较容易获得的土壤理化性质指

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479148, 51779191)

收稿日期: 2017-10-24

*通讯作者 (E-mail: zwiliam@126.com)

标(如土的粒度成分、密度和有机质含量)与土壤水力特性(如 SWCC、渗透系数)通过不同的方法联系起来。PTFs 常用于点预测(如田间持水量(33 kPa), 萎蔫含水率(1500 kPa))和参数预测(如 Brook-Corey 模型和 VG 模型参数)。PTFs 的研究方法一般有回归分析法和人工神经网络法, 每种方法都有各自的优点。对于 VG 模型的参数预测, 非线性回归分析法被认为是最合适的^[9]。

本文在前人研究的基础上, 基于 PTFs 提出了 VG 模型参数 n 的非线性回归方程。该方程只需要考虑初始孔隙比 e_0 这一个变量, 且只引入两个参数 a 和 b 。VG 模型的参数 α 可通过线性方程进行预测, 同样也只引入两个参数 A 和 B 。这 4 个参数 a , b , A 和 B 可以通过 3 组常规的 SWCC 试验数据进行校正。将每个文献的 SWCC 试验数据分成两部分, 一部分用于回归方程中参数的校正, 另一部分用于验证回归方程预测 SWCC 的准确性。结果表明本文所提出的回归模型具有较为广泛的适用性。

本文研究的主要目的是利用 3 组已知的 SWCCs, 对该土样在其它初始孔隙比下的 SWCC 进行预测, 从而解决下面两种情况: ①对某一种土样, 需要若干个不同孔隙比的 SWCC, 避免所有孔隙比的试样全部都做 SWCC 试验; ②对某一种土样, 目前可能只需要三组不同孔隙比的 SWCC, 但是未来可能会需要该土样在其它孔隙比下的 SWCC。

1 VG 模型及其参数 α

在已有的 SWCC 模型中, VG 模型是较早提出且可以涵盖整个吸力范围内的连续封闭方程。VG 模型

的表达式如下所示:

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left[1 + \left(\frac{S}{\alpha} \right)^n \right]^{-m} \quad (1)$$

式中 S 为饱和度; S_r 为残余饱和度; S_e 为有效饱和度; α 约等于进气值(kPa); s 为基质吸力(kPa); n 为与孔隙大小分布有关的参数; m 为与 SWCC 整体几何形状有关的参数, 且 $m=1-1/n$ 。饱和度还可以用质量含水率或体积含水率代替。

已有学者研究发现, 参数 α 与初始孔隙比 e_0 成幂函数关系^[10], 通过对数变换, 其表达式如下:

$$\lg \alpha = \lg A - B \lg e_0 \quad (2)$$

式中, A , B 为参数。

对于同一种土样, 如果已知两组不同初始孔隙比试样的 SWCC 试验数据, 那么利用式(2)可求出参数 A 和 B , 进而可利用该式预测与初始孔隙比有关的参数 α 。然而, 式(2)需要不少于 3 组不同初始孔隙比试样的 SWCC 试验数据。其原因在于: ①保证必要的预测精度。理论上, 两组 SWCC 试验数据就能确定式(2)中的参数 A 和 B , 但增加 SWCC 试验数据组数可以提高预测精度。②同时考虑模型要简单实用。参考的 SWCC 试验数据组数增多, 所提高的预测精度却有限, 得不偿失。

2 VG 模型参数 n 的 PTFs

表 1 总结了近几十年来文献中已有的 VG 模型参数 n 的 PTFs。

从表 1 中可以看出, 研究 VG 模型参数的 PTFs 预测或输入变量主要集中在土的粒度成分和密度。

表 1 VG 模型参数 n 的 PTFs

Table 1 PTFs of parameter n in VG model

| 参考文献 | PTFs |
|---------------------------------|--|
| Wösten 等 ^[11] | $\ln(n-1) = a_0 + a_1 \text{Cl} + a_2 \text{Cl}^2 + a_3 \text{Sa} + a_4 \text{Sa}^{-1} + a_5 \ln(\text{Sa}) + a_6 \text{D} + a_7 \text{D}^{-1} + a_8 \text{D}^2 + a_9 \ln(\text{D}) + a_{10} \text{OM} + a_{11} \text{OM}^2 + a_{12} \text{OM}^{-1} + a_{13} \ln(\text{OM}) + a_{14} \text{D} \cdot \text{Cl} + a_{15} \text{D} \cdot \text{OM} + a_{16} \text{topsoil} \cdot \text{Cl}$ |
| Hodnett 等 ^[12] | $\ln(n-1) = A_0 + A_1 \text{Sa} + A_2 \text{Si} + A_3 \text{Cl} + A_4 \text{OC} + A_5 \text{BD} + A_6 \text{CEC} + A_7 \text{pH} + A_8 \text{Sa} \cdot \text{Si} + \dots + A_i \text{Si} \cdot \text{Cl} + A_{i+1} \text{Sa}^2 + \dots + A_n \text{Cl}^2$ |
| Rajkai 等 ^[13] | $\ln(n) = b_0 + b_1 \text{BD} + b_2 \text{OM} + b_3 \text{Cl}^2 + b_4 \ln(\text{Cl}) + b_5 \text{BD} \cdot \text{Sa} + b_6 \text{BD}^2 \cdot \text{Cl} + b_7 \text{Sa} / \text{Si} + b_8 \text{BD}^2 \cdot \text{Cl}^2$ |
| Matula 等 ^[14] | $\ln(n-1) = c_0 + c_1 \text{Cl} + c_2 \text{Cl}^2 + c_3 \text{Sa} + c_4 \text{Sa}^{-1} + c_5 \ln(\text{Sa}) + c_6 \text{D} + c_7 \text{D}^{-1} + c_8 \text{D}^2 + c_9 \ln(\text{D}) + c_{10} \text{OM} + c_{11} \text{OM}^{-1} + c_{12} \ln(\text{OM}) + c_{13} \text{D} \cdot \text{OM} + c_{14} \text{topsoil} \cdot \text{Cl}$ |
| Tirzah 等 ^[15] | 输入变量: Cl, Si, Sa, P , P_d , BD |
| Ebrahim-Zadeh 等 ^[16] | 输入变量: Cl, Si/Sa, BD, OC, TS |

注: Sa 为砂粒含量(%); Si 为粉粒含量(%); Cl 为黏粒含量(%); BD 为密度 (kg/cm³); D 为干密度 (kg/cm³); OM 为有机质含量(%); OC 为有机碳含量(%); CEC 为阳离子交换量(cmol/kg); topsoil 为 0 或 1; ln 为自然对数; P 为总孔隙率; P_d 为颗粒密度; Si/Sa 为粉粒含量与砂粒含量的比; TS 为抗拉强度; 其余参数均为拟合值。

表 2 不同初始孔隙比下简化 VG 模型的参数值

Table 2 Values of parameters of simplified VG model under different initial void ratios

| 土的类型 | 砂粒/% | 粉粒/% | 黏粒/% | e_0 | α/kPa | n | R^2 |
|------------------------------|------|------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| 尾矿粉砂 ^[18] | 30.1 | 55.7 | 14.2 | 0.695 | 46.470 | 1.610 | 0.980 |
| | | | | 0.746 | 39.000 | 1.630 | 0.958 |
| | | | | 0.802 | 33.725 | 1.541 | 0.970 |
| Columbia 砂壤土 ^[19] | 54.0 | 35.0 | 11.0 | 0.845 | 7.866 | 5.633 | 0.987 |
| | | | | 0.984 | 6.197 | 3.726 | 0.992 |
| | | | | 1.075 | 4.917 | 3.542 | 0.985 |
| Barcelona 粉土 ^[10] | 25.3 | 52.5 | 22.2 | 1.193 | 4.298 | 3.556 | 0.988 |
| | | | | 0.500 | 552.240 | 1.328 | 0.984 |
| | | | | 0.540 | 432.339 | 1.335 | 0.983 |
| 冰碛土 ^[20] | 52.5 | 37.5 | 10.0 | 0.620 | 122.400 | 1.211 | 0.986 |
| | | | | 0.444 | 347.254 | 1.202 | 0.973 |
| | | | | 0.474 | 185.982 | 1.183 | 0.980 |
| 钙质膨润土 ^[21] | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.514 | 79.017 | 1.162 | 0.987 |
| | | | | 0.517 | 66.732 | 1.159 | 0.992 |
| | | | | 0.940 | 1265.918 | 1.288 | 0.992 |
| Tirzah 等 ^[15] | | | | 1.126 | 471.501 | 1.261 | 0.987 |
| | | | | 1.765 | 93.158 | 1.271 | 0.976 |

Tirzah 等^[15]利用神经网络对 10 种不同的 SWCC 模型 (包括 VG 模型) 进行敏感性分析, 发现密度和粒组含量对 SWCC 的形状参数 (如 α , n 和 m) 的预测具有大致相同的贡献。其他一些学者所提出的 SWCC 模型中, 也只引入了密度或孔隙比这一个变量^[17]。由此可见密度或孔隙比对 SWCC 模型构建的重要性。

对于相同地点的土样, 若假设其粒组含量、矿物质成分和有机质含量等为常数, 仅考虑密度或孔隙比对 VG 模型参数 n 的影响, 则表 1 中所列出的 PTFs^[11, 13-14]将是密度或孔隙比的非线性回归方程。通过观察这些 PTFs, 可以发现主要以 4 种数学形式存在, 即: 线性、平方、倒数和对数。为了防止过拟合, 本文提出 VG 模型参数 n 的 PTFs 如下所示:

$$\ln[n + \exp(1)] = a \left(1 + e_0 + \frac{\delta}{e_0} \right) + b \left[e_0^2 + \frac{\delta}{e_0^2} + \ln(e_0) \right]. \quad (3)$$

式中 $\delta=0$ 或 1, 与土的埋置深度有关; a 和 b 是模型参数, 与粒度成分和有机质含量等有关, 其余同上。

由于 PTFs 本身是一种经验公式, 因此式 (3) 被看成是左右两个近似相等的函数。需要注意的是, 在拟合参数时, 不要对其进行任何化简; 为了提高预测精度, 同样需要不少于 3 组不同初始孔隙比的 SWCC 试验数据。

3 模型的验证

3.1 参数 α 和 n 的拟合效果

为了验证本文所提出的 VG 模型参数 n 的 PTFs 的可靠性, 式 (3) 需要具备两种基本特性: ①能较好地拟合已有的数据; ②合理地预测未知的数据。为此, 要求选用的数据范围广泛, 即从粗粒土 (砂土) 到细粒土 (黏土)。

表 2 中列出了 5 种土的 VG 模型参数值 α (依据式 (2)) 和 n (依据式 (3))。图 1 是表 2 中所有土的 VG 模型参数 α 与初始孔隙比 e_0 以对数的形式在直角坐标系上的关系。可见, 对于同一种土, 它们均成明显的线性关系, 验证了式 (2) 的合理性。

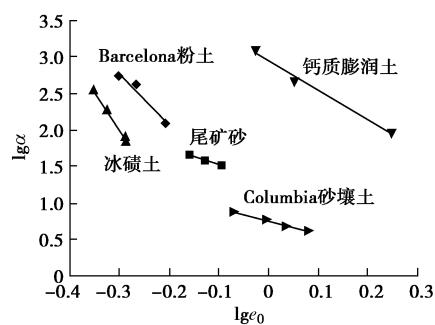
图 1 $\lg e_0$ 与 $\lg \alpha$ 的关系Fig. 1 Relationship between $\lg e_0$ and $\lg \alpha$

图 2 给出了表 2 中所有土在不同初始孔隙比条件下, 参数 n 的计算值与拟合值的比较。可见式 (3) 能够较好地拟合已有的参数 n 。

3.2 不考虑体变的预测效果

为了检验式 (3) 是否能够合理地预测 VG 模型参

数 n , 本文选取文献中的试验数据, 按照如下步骤进行:

(1) 利用式(1)对任意3组不同初始孔隙比的SWCC试验数据进行拟合并获得3对参数 α 和 n 。

(2) 将所获得的参数 α 和相应的初始孔隙比 e_0 带入式(2)中, 得参数 A 和 B 。

(3) 将所获得的参数 n 和相应的初始孔隙比 e_0 , 分别代入到 $\delta=0$ 和 $\delta=1$ 的式(3)中, 进行非线性拟合, 得到两对参数 a 和 b 。

(4) 将每一对参数 a 、 b 及所对应的 δ 值分别带入式(3)中, 并对第(1)步所选的3个初始孔隙比进行反算, 得到3个不同的 n 值。

(5) 将第(4)步与第(1)步所得到的3个 n 值分别进行比较, 选取误差较小的那组参数 a 和 b 及所对应的 δ 值。

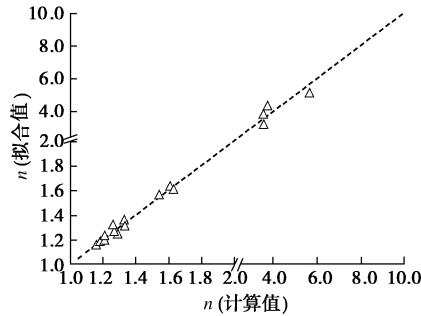


图2 参数 n 的计算值与拟合值的比较

Fig. 2 Comparison between estimated and fitted values of parameter n

表3中列出了所选取文献中土的类型, 参考文献及参数 a 、 b 、 δ 、 A 和 B 的值。

表3 土的类型、参考文献及参数 a 、 b 、 A 和 B 的值

Table 3 Soil types, references and values of corresponding parameters a , b , A and B

| 土的类型 | A | B | a | b | δ |
|------------------------------|-------|--------|-------|-------|----------|
| 冰碛土 ^[20] | 0.052 | 10.887 | 0.812 | 0.316 | 0 |
| 粉质砂土 ^[22] | 1.678 | 4.511 | 0.899 | 0.839 | 0 |
| Columbia 砂壤土 ^[19] | 5.912 | 1.759 | 1.319 | 0.684 | 0 |

(1) 冰碛土

冰碛土是一种砂质黏土。试样在固结仪中获得不同的初始孔隙比。图3是利用式(1)对其中3组SWCC试验数据进行拟合并获得参数 α 和 n 。

对于孔隙比 $e_0=0.514$ 的试样, 利用式(2)、(3)可分别得参数 $\alpha=72.819$ kPa 和 $n=1.161$ 。图4即为SWCC预测曲线与 $e_0=0.514$ 试验数据的比较, 可以发现拟合精度很高。

同理, 对于文献[20]中的4组SWCC试验数据, 任选其中3组对模型参数进行校正, 并将每种组合剩

余的一组试验数据与预测的SWCC曲线进行对比。从图5可见, 拟合精度很高。

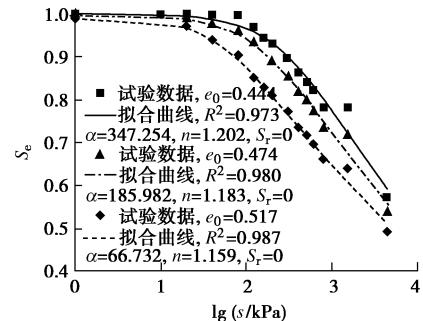


图3 SWCC模型的参数校准

Fig. 3 Calibration of parameters of SWCC model

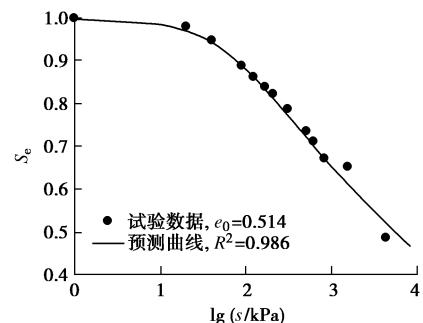


图4 预测的SWCC与实测数据的比较

Fig. 4 Comparison between predicted SWCCs and measured data

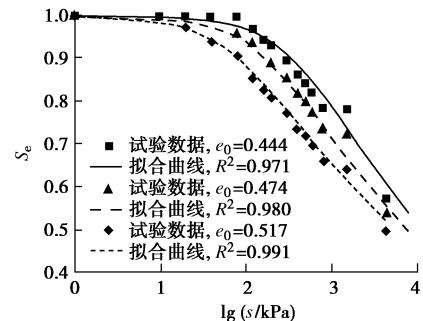


图5 预测的SWCC与试验数据的比较

Fig. 5 Comparison between predicted SWCCs and measured data

(2) 粉质砂土

试样在三轴仪中完成固结, 然后在压力板中施加竖向应力获得不同初始孔隙比的SWCC。

图6是利用式(1)对任意3组SWCC试验数据进行拟合获得参数 α 和 n 。对于初始孔隙比 e_0 为0.483, 0.501, 0.54的试样, 利用式(2)、(3)可分别得参数 α 为44.721, 37.917, 27.038 kPa 及 n 为3.029, 2.863, 2.528。图7为预测曲线与试验数据的对比, 可见拟合精度也很高。

(3) Columbia 砂壤土

Columbia 砂壤土是一种混合矿物、超活性和非酸性的粗壤土。图8是利用式(1)对任意3组SWCC

试验数据进行拟合并获得参数 α 和 n 。

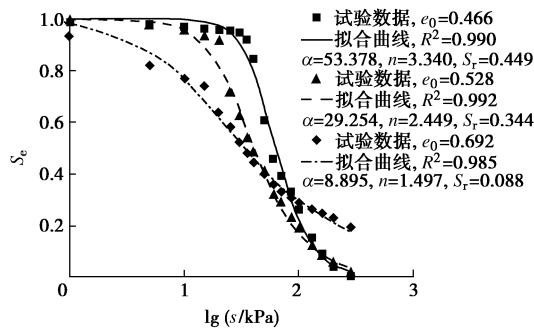


图 6 SWCC 模型的参数校准

Fig. 6 Calibration of parameters of SWCC model

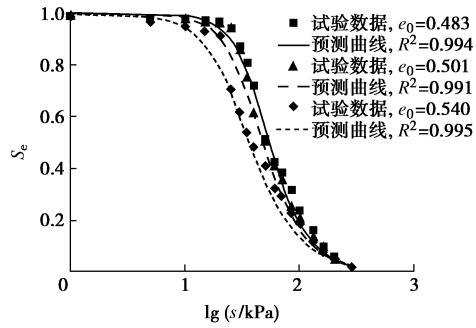


图 7 预测的 SWCCs 与试验数据的比较

Fig. 7 Comparison between predicted SWCCs and measured data

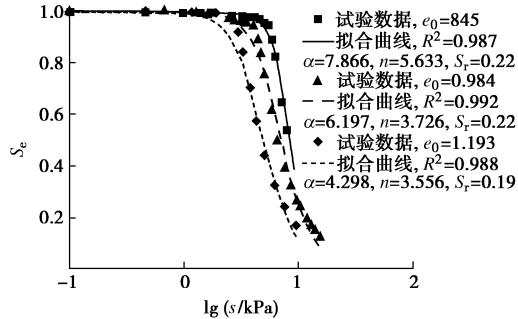


图 8 SWCC 模型的参数校准

Fig. 8 Calibration of parameters of SWCC model

对于初始孔隙比 $e_0=1.075$ 的试样, 利用式 (2)、(3) 可分别得参数 $\alpha=5.205$ 及 $n=3.942$ 。图 9 为预测曲线与试验数据的比较, 可以发现拟合精度很高。

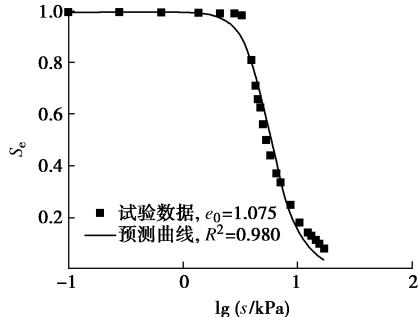


图 9 预测的 SWCC 与试验数据的比较

Fig. 9 Comparison between predicted SWCCs and measured data

综上所述, 式 (2)、(3) 可以很好地预测 VG 模型参数 α 和 n 。

在使用的过程中有一点需要注意: 为了保证参数 α 的预测精度, 在选择 3 组常规的 SWCC 试验数据时, 尽可能选择一组较小孔隙比和一组较大孔隙比的 SWCC 试验数据, 第三组 SWCC 试验数据的孔隙比则可以在已选定的较小和较大孔隙比之间任意选择。

3.3 考虑体变的预测效果

土样来自德国, 名称分别记为黑钙土 (SC), 典型黑土 (HP) 和不饱和潜育土 (DG) [23]。表 4 给出了 3 种土样的类型、取样深度及粒组含量。

表 4 土样的类型、取样深度及粒组含量

Table 4 Soil types, sample depths and particle-size fractions

| 土的 类型 | 取样深度 /cm | 砂粒 /% | 粉粒 /% | 黏粒 /% |
|-------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|
| SC (A _p) | 0~30 | 2.9 | 78.8 | 18.3 |
| SC (A _h) | 30~50 | 2.1 | 78.6 | 19.2 |
| HP (A _p) | 0~25 | 74.5 | 19.5 | 6.0 |
| HP (A _{sh}) | 30~48 | 71.5 | 20.5 | 8.0 |
| HP (B _v C _v) | >70 | 75.0 | 19.0 | 6.0 |
| DG (A _h) | 0~5 | 63.0 | 33.4 | 3.6 |

图 10 表示在表 4 中所有土的 $\lg\alpha$ 和 $\lg e_0$ 的线性关系, 验证了式 (2) 的合理性。

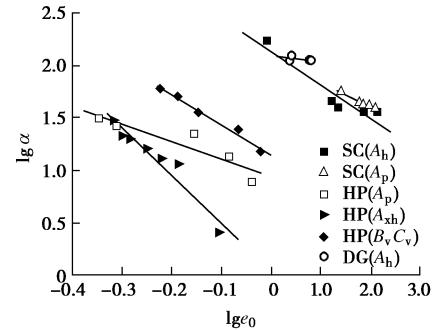
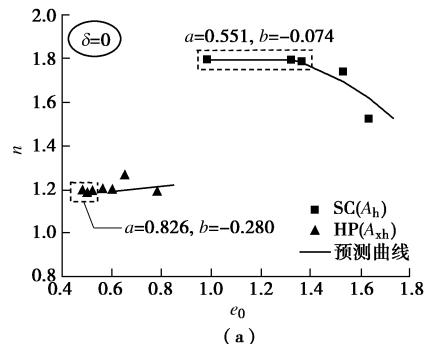


图 10 表 4 中 $\lg\alpha$ 和 $\lg e_0$ 的线性关系

Fig. 10 Linear relationship between $\lg\alpha$ and $\lg e_0$ in Table 4

图 11 (a) ~11 (c) 是表 4 中所有土在不同初始孔隙比下, 参数 n 的计算值与预测值的比较 (符号表示来自文献[23]中表 4 的计算值)。利用式 (3) 对参



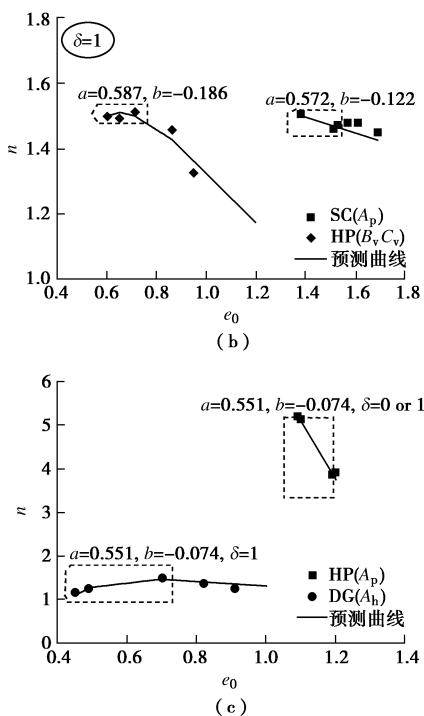


图 11 表 4 中所有土的参数 n 的计算值与预测值的比较

Fig. 11 Comparison between estimated and predicted values of parameter n for all soils in Table 4

数 n 的计算值 (虚线框中的符号所代表) 进行拟合, 获得校正参数 a 和 b , 然后对不同初始孔隙比的参数 n 进行预测。可见参数 n 的预测曲线与计算值有很好的一致性。这说明式 (3) 同样也可以预测变形土的 VG 模型参数 n 。结合表 4 和图 11, 证实了 δ 的取值与土样的埋置深度有关。

4 结 论

(1) 本文提出了基于土壤转换函数 (pedotransfer functions, PTF) 预测不同初始孔隙比土的土-水特征曲线 (SWCC) 的简单方法。对于既定的土样, 只需获取 3 组常规的 SWCC 试验数据即可校正 VG 模型参数 α 和 n 的回归方程参数, 进而对具有不同初始孔隙比土的 SWCC 进行预测。

(2) 通过已有文献中的数据, 验证了本文所提出的预测 VG 模型参数 n 的 PTF 方程的合理性和准确性。

(3) VG 模型参数 n 的 PTFs 方程不仅适用于非变形土的 VG 模型参数 n 的预测, 而且适用于变形土。

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] 施建勇, 赵义. 气体压力和孔隙对垃圾土体气体渗透系数影响的研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 586–593. (SHI Jian-yong, ZHAO Yi. Influence of air pressure and void on permeability coefficient of air in municipal solid waste (MSW) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 586–593. (in Chinese))
- [3] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351–356. (SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 351–356. (in Chinese))
- [4] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1–47. (CHARLES Wang-Wai Ng. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1–47. (in Chinese))
- [5] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065–1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065–1073. (in Chinese))
- [6] 谢妮, 邹维列, 严秋荣, 等. 黄土路基边坡降雨响应的试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 31–36. (XIE Ni, ZOU Wei-lie, YAN Qiu-rong, et al. Experimental research on response of a loess subgrade slope to artificial rainfall [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(4): 31–36. (in Chinese))
- [7] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战 [J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3521–3540. (ZHAO Cheng-gang, WEI Chang-fu, CAI Guo-qing. Development and challenge for soil mechanics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3521–3540. (in Chinese))
- [8] VAN Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil [J]. Soil Science Society American Journal, 1980, 44: 892–898.
- [9] MINASNY B, MCBRATNEY A B, BRISTOW K L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves [J]. Geoderma, 1999, 93(3/4): 225–253.

- [10] TARANTINO A. A water retention model for deformable soils[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(9): 751 – 762.
- [11] WÖSTEN J H M, LILLY A, NEMES A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of europeansoils[J]. *Geoderma*, 1999, **90**(3/4): 169 – 185.
- [12] HODNETT M G, TOMASELLA J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils[J]. *Geoderma*, 2002, **108**(3/4): 155 – 180.
- [13] RAJKAI K, KABOS S, GENUCHTEN M T V. Estimating the water retention curve from soil properties: comp-arison of linear, nonlinear and concomitant variable methods[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, **79**(2): 145 – 152.
- [14] MATULA S. Pedotransfer function application for estimation of soil hydrophysical properties using parametric methods[J]. *Plant Soil & Environment*, 2007, **53**(4): 149 – 157.
- [15] TIRZAH M D M, CORREA P O. Artificial neural networks for estimating soil water retention curve using fitted and measured data[J]. *Applied & Environmental Soil Science*, 2015: 1 – 16.
- [16] EBRAHIM-ZADEH G, BAYAT H, SINEGANI A A S, et al. Investigating the correlation between soil tensile strength curve and soil water retention curve via modeling[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, **167**: 9 – 29.
- [17] ASSOULINE S. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, **5**(2): 554 – 563.
- [18] AUBERTIN M, RICARD J F, CHAPUIS R P. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(35): 55 – 69.
- [19] LALIBERTE G E, COREY A T, BROOKS R H. Properties of unsaturated porous media[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1966.
- [20] VANAPALLI S K, PUFAHL D E, FREDLUND D G. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till[J]. *Géotechnique*, 1999, **49**(2): 143 – 159.
- [21] SUN W J, LIU S, SUN D, et al. Hydraulic and mechanical behavior of GMZ Ca-bentonite[J]. *Geotechnical Special Publication*, Reston, VA, 2014, **236**: 125 – 134.
- [22] HUANG S, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(3): 426 – 432.
- [23] STANGE C F, HORN R. Modeling the soil water retention curve for conditions of variable porosity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**(3): 602 – 613.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊,是中国科技论文统计源期刊,中国地质文摘引用期刊,中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大16开本,双月20日出版。每期定价10.0元,全年60元。邮发代号18-153。全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址:河北省保定市东风中路1285号《勘察科学技术》编辑部邮编:071069, Tel:0312-3020887, 3094054, Fax:0312-3034561, E-mail: kckxjs@163.com, kckxjs@126.com。

(《勘察科学技术》编辑部 供稿)