

DOI: 10.11779/CJGE2018S1039

基于颗粒级配曲线预测非饱和土持水曲线的物理方法

张 昭¹, 刘奉银^{*1}, 齐吉林^{1, 2}, 柴军瑞^{3, 4}, 李会勇⁵, 李建军⁶

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 3. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学), 陕西 西安 710048; 4. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 5. 中国水电基础局有限公司, 天津 301700; 6. 中交西北投资发展有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 持水曲线模型中若含有未知经验参数, 则可能会降低对持水曲线预测的可靠度。为此, 对土样颗粒级配曲线上划分的粒组分别构建形如立方体的天然土颗粒以及理想球体颗粒集合体, 依据这两者的几何特征和物理性质推得其比例关系; 基于粒组信息、干密度以及土粒密度提出了计算土孔隙半径和持水曲线的物理方法, 无需引入未知经验参数。最后, 利用非饱和土水力特性数据库 UNSODA 中 40 个土样的持水试验结果对该方法进行了验证, 通过计算基质吸力预测值及其实测值之间的均方根残差 (RMSR) 发现物理方法的 RMSR 在 0.179~0.833 范围内变化, 并对其中 37 个土样的持水曲线预测精度优于含有两个未知经验参数的传统 Arya 模型。

关键词: 非饱和土; 持水曲线; 土孔隙; 颗粒级配曲线; 球体颗粒

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0241-06

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

Physical approach to predict water retention curves for unsaturated soils based on particle-size distribution

ZHANG Zhao¹, LIU Feng-yin¹, QI Ji-lin^{1, 2}, CHAI Jun-rui^{3, 4}, LI Hui-yong⁵, LI Jian-jun⁶

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China (Xi'an University of Technology), Xi'an 710048, China; 4. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 5. Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China; 6. CCCC Investment Development Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Unknown empirical parameters in water retention models may reduce the reliability of prediction. The cube-shaped assemblages of natural soil and idealized spherical particles are developed according to the fractions from particle-size distribution. On the basis of geometry and physical properties, a relationship of proportionality between them is then proposed to provide a physical approach for computing pore radii and water retention curves of soils from particle-size fractions, bulk density and particle density without incorporating unknown empirical parameters. Finally, the physical approach is validated against the test data of water retention for a total of forty soil samples from the hydraulic property database UNSODA. The results of RMSR between the predicted and the measured values of matric suction show that the distribution of RMSR values ranges from 0.179 to 0.833. This physical approach is also superior to the traditional Arya model which requires two unknown empirical parameters for describing the water retention curves for thirty seven of the forty soil samples.

Key words: unsaturated soil; water retention curve; soil pore; particle-size distribution; spherical particle

0 引 言

土的持水特性可用持水曲线(亦称土水特征曲线)描述, 表示基质吸力 ψ (土中水相的土水势)与湿度(体积含水率 θ_w 、重量含水率 w 或饱和度 S_r)的关系, 而持水特性的模型描述也是非饱和土水力特性的重要问题。土壤学和岩土工程领域的学者们从土样的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402258, 41372304, 51679198); 中国博士后科学基金项目(2015M572657XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划-青年人才项目(2016JQ4002); 陕西省博士后科研项目(107-434016007); 陕西省“百人计划”项目(302-253051601)

收稿日期: 2018-02-24

*通讯作者 (E-mail: liufy@xaut.edu.cn)

持水试验结果出发,利用试验分析和理论推导等手段较为系统地研究了持水曲线模型。主要有5种模型:①经验模型:Van Genuchten^[1]、Fredlund等^[2]、Kosugi^[3]、Hwang^[4]结合不同种土的孔隙尺寸统计规律与相应的持水试验规律后提出;②考虑应力和孔隙比的模型:方祥位等^[5]、张雪东等^[6]、Zhou等^[7]、Hu等^[8]提出了考虑净平均应力、偏应力、初始孔隙比以及应力引起孔隙尺寸分布变化的持水曲线模型;③低含水率范围的模型:Khlosi等^[9]、Rudiyanto等^[10]引入残余体积含水率与基质吸力的关系,改进了Kosugi^[3]模型在较低体积含水率范围内的适用性。④理论模型:栾茂田等^[11]、Yang等^[12]以等径球体颗粒为研究对象,徐炎兵等^[13]、蔡国庆等^[14]、秦冰等^[15]基于热力学理论,提出的模型分别考虑了基质吸力有效作用面积、固-液接触角、滞回特性以及温度的影响;⑤基于颗粒级配曲线的预测模型:Fredlund等^[16]、Chiu等^[17]建立了颗粒级配曲线与持水曲线的统计关系;Arya等^[18]引入比例参数,推得了计算土孔隙半径和持水曲线的半经验方法(下文简称传统Arya模型)。

上述持水曲线模型研究虽已取得了很多有价值的研究成果,却不同程度地引入了未知经验参数,而估算这些参数时可能存在显著的不确定性,影响对持水曲线预测的可靠度。值得注意:传统Arya模型^[18]虽以土样的颗粒级配曲线和孔隙比为基础,仅含有两个未知经验参数,但Arya等^[19]在评价传统Arya模型^[18]对粗砂持水曲线的预测效果时发现:当该模型的两个经验参数取值偏差在±10%范围内变化时,对持水曲线的预测误差将在-50%~280%范围大幅波动。

为此,对土样颗粒级配曲线上划分的粒组分别构建形如立方体的天然土颗粒和理想球体颗粒集合体,力图推导这两者的内在关系,提出土孔隙半径和持水曲线的物理方法,无需引入未知经验参数;利用非饱和和土水力特性数据库 UNSODA^[20]中40个土样的持水试验结果对比分析物理方法和传统Arya模型对持水曲线的预测效果,为研究非饱和土的持水机理提供一条新途径。

1 基于颗粒级配曲线计算土孔隙半径的物理方法

1.1 传统Arya模型引入的未知经验参数

Arya等^[18]在持水曲线的预测过程中提出了比例参数 α_i (该参数随颗粒级配曲线变化)的计算方法:先将颗粒级配曲线分为20~30个粒径较均匀的粒组,每个粒组中土粒的质量为 m_i ,孔隙比 e 和土粒密度 ρ_s (可由土样测得)均保持不变,相应的孔隙半径 r_i 采

用如下关系计算:

$$r_i = R_i \sqrt{2en_i^{1-\alpha_i}/3} \quad (1)$$

式中, R_i 为每个粒组的土粒平均半径, n_i 为依据土粒质量及土粒平均半径所生成的球体颗粒数, $n_i = 3m_i / (4\pi\rho_s R_i^3)$, $\alpha_i = \lg N_i / \lg n_i$, N_i 为第 i 个粒组中要满足 n_i 个天然土颗粒排列形成的总孔隙长度所需半径为 R_i 的球体颗粒数,由如下经验关系确定:

$$\lg N_i = a + b \lg n_i \quad (2)$$

式中, a 和 b 即为传统Arya模型中的未知经验参数。值得注意:如引言所述,在求取 α_i 的过程中,这两个未知参数会降低对持水曲线预测的可靠度。因此,与传统Arya模型不同,笔者将从天然土颗粒和理想球体颗粒集合体的内在关系出发,提出基于颗粒级配曲线计算土孔隙半径的物理方法,避免引入未知经验参数,旨在改进传统Arya模型的可靠度和预测精度。

1.2 理想球体颗粒集合体内孔隙的几何特征和物理性质

对形如立方体的天然土颗粒集合体,构建每个粒组对应的若干个球体颗粒(球体颗粒质量同土粒质量)按立方体排列形成的理想集合体,这两种集合体如图1所示(其边长可由干密度 ρ_d 、土粒质量 m_i 、球体颗粒半径 R_i 、球体颗粒数 n_i 确定),分析这两种集合体的几何特征和物理性质(表1)之间的差异即可发现将理想球体颗粒集合体转化为天然土颗粒集合体时其结构的变化。表1中对理想集合体的孔隙率及其正方形面的孔隙数和孔隙半径分别依据(1)、(2)、(3)计算:

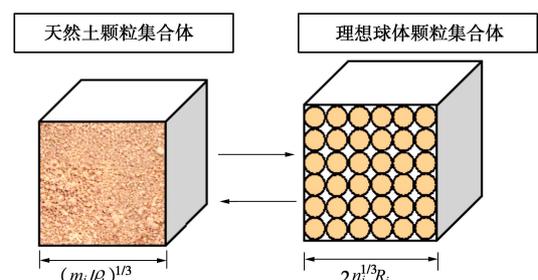


图1 形如立方体的天然土颗粒集合体和理想球体颗粒集合体
Fig. 1 Geometry of cube-shaped assemblages of natural soil and idealized spherical particles

(1) 计算理想孔隙率:理想球体颗粒集合体中的颗粒数 $n_i = 3m_i / (4\pi\rho_s R_i^3)$,而其立方体边长 $= 2n_i^{1/3} R_i$ (图1),则集合体的总体积 $= 8n_i R_i^3$;又球体颗粒的总体积 $= (4\pi/3)n_i R_i^3$,故其孔隙体积 $\approx 3.811 n_i R_i^3$,其孔隙率 ≈ 0.476 。

(2) 计算正方形面的孔隙数:正方形面的总面积为 $4n_i^{2/3} R_i^2$,则其孔隙面积 $= 1.904 n_i^{2/3} R_i^2$;又单个孔隙面积为 $0.858 R_i^2$,故正方形面的孔隙数 $\approx 2.219 n_i^{2/3}$ 。

(3) 计算正方形面的孔隙半径:在理想集合体中,

若从任意一层球体颗粒的中心切开, 即可得到球体颗粒与孔隙截面, 如图2所示, 该截面上的单个孔隙面积为 $ABCD$ 面积 $-a\sim d$ 面积之和 $\approx 0.858 R_i^2$, 这里将图2中的孔隙截面等效为半径 $r_{i(c)}$ 的圆形孔隙(下标(c)表示按照立方体排列的理想球体颗粒集合体), 即 $\pi r_{i(c)}^2 = 0.858 R_i^2$, 故 $r_{i(c)} \approx 0.523 R_i$ 。

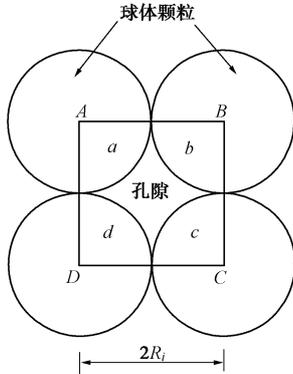


图2 按照立方体排列的球体颗粒与孔隙截面

Fig. 2 Cross section of cube-packed spherical particles and pore

1.3 天然土颗粒与理想球体颗粒集合体的内在关系以及土孔隙半径的计算

由于无法直接依据1.2节对理想球体颗粒集合体的思路计算图1中形如立方体的天然土颗粒集合体内的孔隙特征, 故以构成这两种集合体的正方形面为研究对象, 并作如下假定: ①这两者正方形面上的孔隙均等效为圆形孔隙; ②这两者形成的孔隙尺寸平方比与这两者正方形面的孔隙面积之比成正比。

由表1可知, 天然土颗粒集合体中正方形面上的孔隙面积为 $\phi_{(n)}(m_i/\rho_d)^{2/3}$, 其中 $\phi_{(n)}$ 为天然孔隙率; 正方形面上单个孔隙面积为 $\pi r_{i(n)}^2$, 其中 $r_{i(n)}$ 为土孔隙半径, 下标(n)表示天然土颗粒集合体。对按照立方体排列的理想球体颗粒集合体, 其正方形面上的孔隙面积为 $0.476(4n_i^{2/3}R_i^2)$, 其单个孔隙面积为 $\pi r_{i(c)}^2$, 其中 $r_{i(c)}$ 为土孔隙半径; 由1.2节可知, 理想球体颗粒集合体的孔隙率为0.476。由此, 利用假定①和②可得到这两种集合体孔隙半径的平方与其面积的正比关系:

$$\pi r_{i(n)}^2 / [\pi r_{i(c)}^2] \propto \phi_{(n)}(m_i/\rho_d)^{2/3} / [0.476(4n_i^{2/3}R_i^2)] \quad (3)$$

要将式(3)表征的比例关系变为恒等式以计算土孔隙半径 $r_{i(n)}$, 则需确定这两种集合体正方形面的孔隙数。由表1可知, 理想球体颗粒集合体正方形面的孔隙数为 $2.219 n_i^{2/3}$ 。然而, 目前无法确定天然土颗粒集合体正方形面的孔隙数。由文献[18, 19]可知, 当天然土颗粒集合体的土粒质量与理想球体颗粒集合体的颗粒质量相同时, 前者的孔隙数目多于后者, 而前者的孔隙尺寸小于后者。这两种集合体的重要特征就是颗粒的形状和长度, 而其孔隙长度又取决于颗粒长度。在球体颗粒转化为天然土颗粒的过程中, 必须改变每个颗粒的形状, 产生的孔隙长度较理想球体颗粒

集合体更长, 而形状改变后的颗粒必须遵循天然土颗粒集合体的干密度重新排列。因此, 若给定天然土颗粒集合体的干密度和孔隙体积, 则随着孔隙长度的增长, 其孔隙的半径和个数分别趋于减小和增多。

由此, 笔者在土孔隙半径计算过程中提出考虑长度因素的比例系数。由表1可知, 理想球体集合体的正方形面上共有 $n_i^{2/3}$ 个半径为 R_i 的球体颗粒, 将这些颗粒首尾相连后的总长度为 $2n_i^{2/3}R_i$ 。若将理想球体颗粒集合体转化为天然土颗粒集合体, 其颗粒总长度既要配合天然土颗粒集合体正方形面的总面积进行调整, 又不能超过天然土颗粒集合体的边长 $(m_i/\rho_d)^{1/3}$ 。因此, 总长度为 $2n_i^{2/3}R_i$ 的理想球体颗粒必须在不超过 $(m_i/\rho_d)^{1/3}$ 的长度范围内反复折叠, 故需改变球体颗粒的形状并在边长为 $(m_i/\rho_d)^{1/3}$ 的立方体空间内按照天然土颗粒集合体的干密度调整其排列方式。由此可见, 在理想球体颗粒集合体转化为天然土颗粒集合体的过程中, 可引入比值 $(m_i/\rho_d)^{1/3}/(2n_i^{2/3}R_i)$ 以描述改变球体颗粒的形状及其排列方式的影响, 并将其作为式(3)中的比例系数, 则可将式(3)重新写为

$$\frac{\pi r_{i(n)}^2}{\pi r_{i(c)}^2} = \frac{\phi_{(n)}(m_i/\rho_d)^{2/3}}{0.476(4n_i^{2/3}R_i^2)} \cdot \frac{(m_i/\rho_d)^{1/3}}{2n_i^{2/3}R_i} \quad (4)$$

由表1可知, $r_{i(c)} \approx 0.523 R_i$, 将其代入式(4), 并进一步整理为土孔隙半径的表达式:

$$r_{i(n)} = 0.268 \sqrt{\phi_{(n)}(m_i/\rho_d)/(n_i^{4/3}R_i)} \quad (5)$$

利用式(5)即可计算土样颗粒级配曲线上每个粒组构成的土孔隙半径, 无需引入未知经验参数。

2 物理方法对持水曲线的预测和验证

2.1 物理方法对持水曲线预测的实现

在采用式(5)算得每个粒组的土孔隙半径后, 即可根据毛细管原理确定该粒组的基质吸力 ψ_i :

$$\psi_i = 2\sigma_w \cos\theta / r_{i(n)} \quad (6)$$

式中, σ_w 表示水分的表面张力, θ 表示固-液接触角, 这里认为毛细管被水分完全浸润, 故 $\theta=0^\circ$ 。此外, 对每个粒组的体积含水率 θ_{wi} 采用如下关系计算:

$$\theta_{wi} = \theta_{w-\max} \left(\frac{\sum_{j=1}^i m_j}{\sum_{i=1}^k m_i} \right) \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

式中, $\theta_{w-\max}$ 为土样接近饱和状态的体积含水率, 这里取实测持水曲线上基质吸力 $\psi=0.01\sim 0.1$ kPa对应的体积含水率, k 表示对土样颗粒级配曲线所分的粒组数, 由1.1节可知, k 一般取20~30。

利用非饱和土水力特性数据库 UNSODA^[20]中40个土样(包括11个砂土样、8个砂质壤土样、12个壤土样和9个黏土样)的减湿持水试验结果(并包含相应的颗粒级配曲线)对物理方法进行验证。此外, 如

表1 天然土颗粒和理想球体颗粒集合体的几何特征和物理性质

Table 1 Geometry and physical properties of assemblages of natural soil and idealized spherical particles

天然土颗粒集合体		理想球体颗粒集合体	
粒组中的土粒质量/g	m_i	粒组中的颗粒质量/g	m_i
干密度/(g·cm ⁻³)	ρ_d	颗粒半径/cm	R_i
土粒密度/(g·cm ⁻³)	ρ_s	球体颗粒数 n_i	$3m_i/(4\pi\rho_s R_i^3)$
立方体的体积/cm ³	m_i/ρ_d	立方体的体积/cm ³	$8n_i R_i^3$
土粒体积/cm ³	m_i/ρ_s	颗粒体积/cm ³	$(4\pi/3)n_i R_i^3$
天然孔隙体积/cm ³	$(m_i/\rho_d) - (m_i/\rho_s)$	孔隙体积/cm ³	$3.811n_i R_i^3$
天然孔隙率 $\phi_{(n)}$	$1 - (\rho_d/\rho_s)$	理想孔隙率 $\phi_{(c)}$	0.476
土孔隙半径/cm	$r_{i(n)}$	理想孔隙半径 $r_{i(c)}/\text{cm}$	$0.523R_i$
正方形面的土粒数	未知	正方形面的颗粒数	$n_i^{2/3}$
立方体的边长/cm	$(m_i/\rho_d)^{1/3}$	正方形面的孔隙数	$2.219n_i^{2/3}$
正方形面的总面积/cm ²	$(m_i/\rho_d)^{2/3}$	立方体的边长/cm	$2n_i^{1/3}R_i$
正方形面的孔隙面积/cm ²	$\phi_{(n)}(m_i/\rho_d)^{2/3}$	正方形面的总面积/cm ²	$4n_i^{2/3}R_i^2$
正方形面的土粒面积/cm ²	$(1 - \phi_{(n)})(m_i/\rho_d)^{2/3}$	正方形面的孔隙面积/cm ²	$0.476(4n_i^{2/3}R_i^2)$
正方形面的土粒总长度/cm	未知	正方形面的颗粒面积/cm ²	$2.096(n_i^{2/3}R_i^2)$
		正方形面的颗粒总长度/cm	$2n_i^{2/3}R_i$

引言和 1.1 节所述, 利用传统 Arya 模型^[18]中的比例参数 α 并结合式 (1) 同样可预测土孔隙半径和持水曲线。为了定量评价物理方法和传统 Arya 模型对持水曲线的预测精度, 可分别计算基质吸力实测值及其预测值的均方根残差 RMSR:

$$\text{RMSR} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\lg \psi_i^{\text{预测}} - \lg \psi_i^{\text{实测}})^2 / (L - 1)} \quad (8)$$

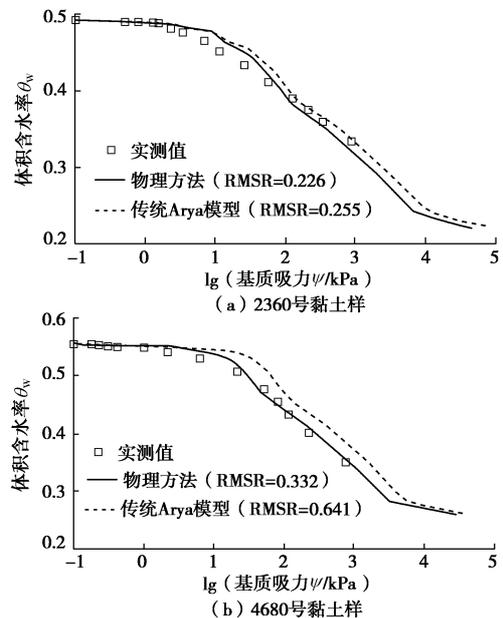
式中, $\psi_i^{\text{预测}}$ 和 $\psi_i^{\text{实测}}$ 分别为基质吸力的预测值和实测值, L 为对比分析所用的数据点数。由于基质吸力的变化范围较大, 故式 (8) 中对基质吸力取 \lg 型对数。

2.2 物理方法对持水曲线的验证结果与分析

在 40 个土样中分别取典型的砂土样、砂质壤土样、壤土样以及黏土样共 6 个, 绘制物理方法和传统 Arya 模型对这 6 个土样持水结果的预测曲线及其实测值, 如图 3 所示, 虽然物理方法与传统 Arya 模型预测的持水曲线形态相似, 但前者在土样接近饱和和至较高的基质吸力 (超过 1000 kPa) 范围内与持水实测数据的吻合程度优于后者。物理方法和传统 Arya 模型 (表 2 中简称传统模型) 对 40 个土样基质吸力的预测值及其实测值的均方根残差 RMSR 如表 2 所示 (图 3 中亦有描述), 物理方法对 40 个土样持水曲线预测的 RMSR 在 0.179~0.833 范围内变化, 而传统 Arya 模型的 RMSR 在 0.188~1.309 范围内变化, 这与图 3 的分析结果一致, 物理方法对 UNSODA 数据库中从黏

土至砂土的 37 个土样持水试验结果的预测精度优于传统 Arya 模型, 而传统 Arya 模型对 4681 号黏土样、1054 号和 1460 号砂土样持水试验结果的预测精度优于物理方法。

持水实测数据在土样的采取、制备、处理以及试验步骤等环节均可能产生误差, 而传统 Arya 模型的参数依据持水实测数据拟合确定, 故对持水实测数据的吻合度有可能高于物理方法, 但实测数据产生的误差对传统 Arya 模型影响较大, 而对物理方法影响较小。



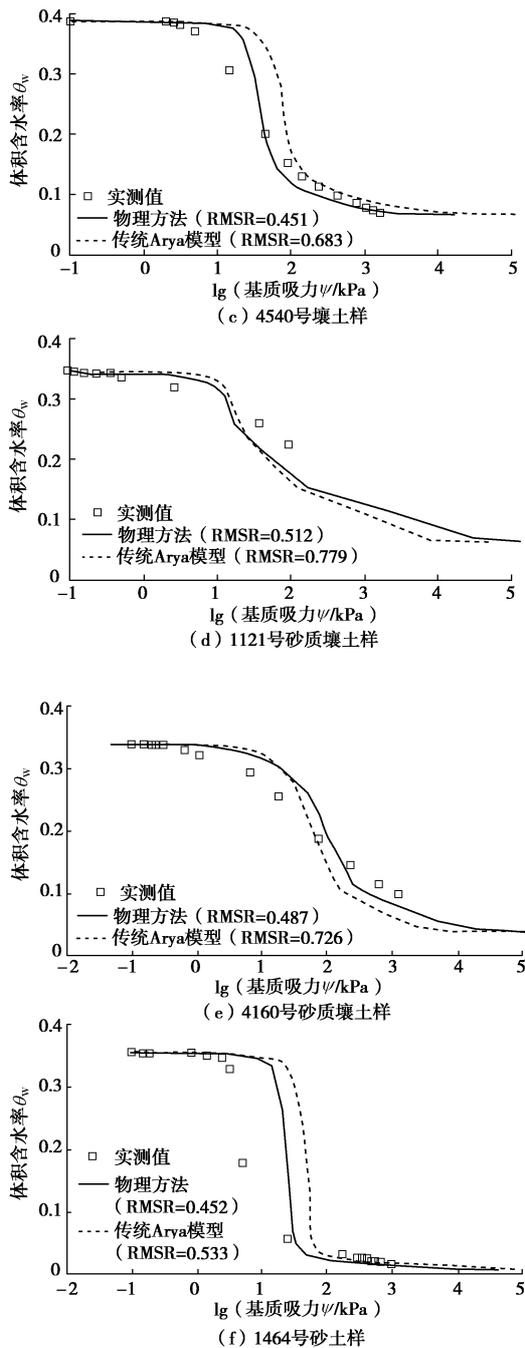


图 3 典型黏土、壤土、砂质壤土和砂土样的持水实测数据与物理方法、传统 Arya 模型的预测曲线

Fig. 3 Water retention data versus predicted curves by physical approach and traditional Arya model for typical samples of clay, loam, sandy loam and sand

相比于传统 Arya 模型, 笔者提出的物理方法为刻画理想球体颗粒与天然土颗粒集合体之间的内在关系提供了一条新思路。然而, 应用这种物理方法时, 毛细管原理虽可将土孔隙半径换算为基质吸力, 却未考虑吸附水效应, 这对体积含水率很低的黏土持水特性影响显著, 因此在该方法中如何考虑该效应有待深入探讨。

表 2 物理方法和传统 Arya 模型对基质吸力的预测值及其实测值之间的 RMSR

Table 2 RMSR of experimental matrix suctions versus those predicted by physical approach and traditional Arya model

土样	编号	传统模型	物理方法
黏土样	1163	0.312	0.187
	1400	1.021	0.326
	2360	0.255	0.226
	2361	1.223	0.221
	2362	0.357	0.270
	4120	1.309	0.366
	4121	1.115	0.292
	4680	0.641	0.332
砂质壤土样	4681	0.213	0.219
	1121	0.779	0.512
	1130	0.461	0.288
	1131	0.611	0.254
	1380	0.695	0.443
	1381	0.699	0.404
	1440	0.531	0.315
	4160	0.726	0.487
	4162	0.890	0.635
	壤土样	1370	0.677
2530		0.411	0.331
2531		0.215	0.194
3190		0.188	0.179
3192		0.424	0.265
3303		0.755	0.472
4101		0.830	0.543
4102		1.080	0.833
4540		0.683	0.451
4600		0.687	0.405
4610		0.656	0.360
4620		0.207	0.181
砂土样	1043	0.477	0.323
	1050	0.561	0.429
	1054	0.504	0.572
	1061	0.549	0.460
	1063	0.487	0.223
	1460	0.508	0.530
	1464	0.533	0.452
	4000	0.628	0.343
	4171	1.051	0.228
	4650	0.446	0.326
4661	0.894	0.779	

3 结 论

(1) 对土样颗粒级配曲线上划分的粒组分别构建形如立方体的天然土颗粒以及理想球体颗粒集合体, 依据这两者的几何特征和物理性质建立了其内在关系, 即天然土颗粒与理想球体颗粒集合体形成的孔隙尺寸平方比与这两种集合体正方形面的孔隙面积之比成正比。

(2) 在 (1) 提出的比例关系中引入比值 $(m_i / \rho_d)^{1/3} / (2n_i^{2/3} R_i)$, 以描述理想球体颗粒集合体向天然土颗粒集合体转化过程中改变球体颗粒的形状及其排列方式产生的影响, 推得了土孔隙半径和持水曲线的物理方法, 无需引入未知经验参数。

(3) 采用均方根残差 RMSR 对比分析了物理方

法与含有两个未知经验参数的传统 Arya 模型对非饱和和土水力特性数据库 UNSODA 中 40 个土样持水实测数据的预测效果, 结果发现物理方法的 RMSR 值在 0.179~0.833 范围内变化, 并对其中 37 个土样的预测精度优于传统 Arya 模型。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] FREDLUND D G, XING A. Equation for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [3] KOSUGI K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention[J]. Water Resource Research, 1994, **30**(4): 891 - 901.
- [4] HWANG S I, POWERS S E. Lognormal distribution model for estimating soil water retention curves for sandy soils[J]. Soil Science, 2003, **93**(6): 405 - 412.
- [5] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 剪切对非饱和土土-水特征曲线影响的探讨[J]. 岩土力学, 2004, **25**(9): 1451 - 1454. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. A study on effect of shear on soil-water characteristic curve of an unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(9): 1451 - 1454. (in Chinese))
- [6] 张雪东, 赵成刚, 刘 艳, 等. 变形对土水特征曲线影响规律模拟研究[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(7): 119 - 126. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Modeling study of the relationship between deformation and water retention curve[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(7): 119 - 126. (in Chinese))
- [7] ZHOU A N, SHENG D C, CARTER J P. Modelling the effect of initial density on soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2012, **62**(8): 669 - 680.
- [8] 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.
- [9] KHLOSI M, CORNELIS W M, GABRIELS D, et al. Simple modification to describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(11): W11501.
- [10] RUDIYANTO, SAKAI M, VAN GENUCHTEN M T, et al. A complete soil hydraulic model accounting for capillary and adsorptive water retention, capillary and film conductivity, and hysteresis[J]. Water Resources Research, 2015, **51**(11): 8757 - 8772.
- [11] 栾茂田, 李顺群, 杨 庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 611 - 615. (LUAN Mao-tian, LI Shun-qun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 611 - 615. (in Chinese))
- [12] YANG S, LU T H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model[J]. Pedosphere, 2012, **22**(1): 103 - 111.
- [13] 徐炎兵, 韦昌富, 陈 辉, 等. 任意干湿路径下非饱和岩土介质的土水特征关系模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 1046 - 1052. (XU Yan-bing, WEI Chang-fu, CHEN Hui, et al. A model of soil-water characteristics for unsaturated geotechnical materials under arbitrary drying-wetting paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 1046 - 1052. (in Chinese))
- [14] 蔡国庆, 赵成刚, 刘 艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (in Chinese))
- [15] 秦 冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] CHIU C F, YAN W M, YUEN K V. Estimation of water retention curve of granular soils from particle-size distribution-a Bayesian probabilistic approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(9): 1024 - 1035.
- [18] ARYA L M, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T, et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(3): 510 - 519.
- [19] ARYA L M, BOWMANN D C, THAPA B, et al. Scaling soil water characteristics of golf course and athletic field sands from particle-size distribution[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, **72**(1): 25 - 32.
- [20] LEIJ F J. UNSODA unsaturated soil hydraulic database[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 1996.