

DOI: 10.11779/CJGE201910003

压实膨胀土非饱和渗水系数函数的密度与水力滞回效应

周葆春, 陈志

(信阳师范学院建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 为探讨密度与水力滞回对膨胀土非饱和渗水系数函数(hydraulic conductivity function, HCF)及非饱和渗流的影响, 以压实弱膨胀土为研究对象, 开展变水头渗透试验获得饱和渗透系数-孔隙比 e 关系。基于van Genuchten-Mualem(VGM)模型, 采用TRIM(transient release and imbibition method, 瞬态脱湿与吸湿)试验方法获得6种密度下脱/吸湿过程的HCF模型参数 α, n , 并构建 α, n 与 e 的经验公式。基于所获HCF模型参数在Hydrus中开展降雨入渗数值分析。结果表明: ①土体密度与水力滞回对 α, n 影响显著; 无论脱/吸湿过程, α, n 均随 e 增大而增大; 相同密度下, 脱湿过程 α, n 均小于吸湿过程对应值。②密度与水力滞回均对吸力表达的HCF影响显著; 不同 e 下HCF存在“交叉”现象: 相同吸力下, 交叉点前, 密度小的试样渗水系数 k 值大; 交叉点后, 密度大的试样 k 值大; 同一密度相同吸力下脱湿过程 k 值明显大于吸湿过程 k 值。③密度对体积含水率 θ 表达的HCF影响显著, 相同 θ 下, 密度大的试样 k 值小, 但不存在“交叉”现象; 水力滞回对 θ 表达的HCF影响微弱, 同一密度下脱/吸湿过程HCF接近。④数值分析表明, 土体密度对非饱和渗流影响显著, 但密度变化对湿润锋前进速度快慢影响不具单调性; 水力滞回对渗流分析结果影响明显; 采用形式简单的HCF模型如VGM模型, 采用 α, n 与 e 的经验公式, 对不同密度、不同脱/吸湿路径采用对应的模型参数值, 是综合考虑密度与水力滞回对非饱和渗流影响的可行方法。

关键词: 非饱和渗水系数函数; van Genuchten-Mualem模型; 水力滞回; TRIM试验方法; 渗流分析

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1800-09

作者简介: 周葆春(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学方面的研究。E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn。

Effects of density and hysteresis on hydraulic conductivity function of compacted expansive soil

ZHOU Bao-chun, CHEN Zhi

(College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The effects of density and hysteresis on the hydraulic conductivity function (HCF) of Jingmen compacted expansive soil are experimentally investigated. The saturated hydraulic conductivities over the range of void ratio from 0.476 to 1.624 are determined by the falling head permeability test. The parameters of the commonly adopted HCF model, van Genuchten-Mualem (VGM) model under six different densities and drying/wetting paths are measured by using the transient release and imbibition method (TRIM). The conclusions are drawn as follows: (1) The parameters α, n of the VGM model increase with the increase of void ratio, and their values under drying path are less than the corresponding ones under wetting path. (2) The effects of density and hysteresis on the relationship between hydraulic conductivity (k) and matric suction are significant. HCFs intersect under different densities. The value of k under lower density is larger before the intersection of HCFs, and that under higher density is larger after the intersection. The value of k under drying path is larger than that under wetting path. (3) The effects of density on the relationship between k and volumetric water content θ are significant. The value of k under higher density is smaller than that under lower density, and HCFs do not intersect under different densities. The effects of hysteresis on the relationship between k and θ are not significant. (4) One-dimensional vertical infiltration is simulated using the Hydrus with the above-mentioned parameters of VGM model. The results show that the effects of density on seepage are remarkable. But the influences of density on wetting front velocity are not monotonic. On the other hand, whether to account for hysteresis leads to significant difference of the simulated results. The empirical formulas for parameters α, n and e of VGM model under different wetting/drying paths can be used in seepage modeling to account for the effects of density and hysteresis.

Key words: hydraulic conductivity function; van Genuchten-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772290); 河南省高等学校重点科研项目(17A560008); 信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

收稿日期: 2018-07-02

Mualem model; hydraulic hysteresis; TRIM method; seepage analysis

0 引言

土体渗透系数控制了土中水的渗流速度, 是土体渗流分析的基本土性指标。围绕着饱和/非饱和渗透系数的试验研究^[1]、理论分析^[2]与数值反演^[3]是土力学、水文学、土壤学的基本问题。准确确定土体饱和/非饱和渗透系数在土木、水利、交通、农业、地质灾害防治等领域有广泛的应用需求。

由于工程性质复杂多变, 膨胀土对土木、水利、交通等领域的浅表层轻型工程有特殊的危害作用, 典型的有膨胀土渠道、库岸、路堤与路堑边坡失稳, 轻型建筑开裂, 路基沉陷, 路面变形等。膨胀土工程问题多由降水引发, 水的入渗导致浅层地表土体含水率上升、吸力降低、体积增大、抗剪强度降低, 诱发工程失稳。此外, 压实膨胀土常用作垃圾填埋场衬垫和高放射性核废料深地质处置库的缓冲与回填材料。因此, 准确确定膨胀土饱和/非饱和渗透系数, 对于相关工程设计与灾害预测预判十分重要。

渗透系数综合反映水在土体孔隙中流动的难易程度, 主要受土体粒度^[4] (矿物成分、粒径与级配)、密度 (可用孔隙比 e 表达)、湿度 (可用含水率/饱和度表达)、构度 (土的结构性)、水力路径的影响。在粒度与构度确定的情况下, 土体处于饱和状态时, 渗透系数 k_s 是 e 的函数, k_s 测定相对简单^[5]。

当土体处于非饱和状态时, 其渗透行为既包括渗水, 也包括渗气, 本文研究集中于渗水行为。非饱和渗水系数 k 不仅与 e 相关^[2, 6], 且受土体含水率或吸力的强烈影响, 当含水率降低 (吸力增大) 时, k 会以数量级的幅度急剧下降, 因此 k 通常表达为含水率(或饱和度)或吸力的函数, 即非饱和渗水系数函数 HCF^[7]。HCF 的数学模型众多^[4, 8], 其中基于统计学孔径分布理论的 VGM 模型^[9-10]最为常用, 是采用 Hydrus^[11]、GeoStudio 等软件开展非饱和渗流分析时选取的主流模型。此外, 非饱和渗水系数还受水力滞回影响, 即脱/吸湿过程的 HCF 存在差别^[7-8]。考虑 HCF 滞回效应的方式有两种, 一种是采用较复杂的滞回模型, 如 Kool 等^[12]、Lenhard 等^[13]、Wei 等^[14]、Hu 等^[15]分别建议的模型; 另一种是采用形式简单的 HCF 模型如 VGM 模型, 对脱/吸湿路径采用不同的模型参数^[16]。

鉴于综合探讨土体密度与水力滞回对 HCF 影响规律的研究并不多见; 本文基于 VGM 模型, 试图研究密度与水力滞回分别对 HCF 模型参数、HCF、非饱和渗流分析 3 个层面的影响; 以期为综合考虑土体密

度与水力滞回影响的非饱和渗流分析提供依据和参考。

1 研究方案

以荆门弱膨胀土为研究对象, 开展变水头渗透试验, 获取常规工程密度范围的饱和渗透系数。基于 VGM 模型, 采用 TRIM 试验方法^[17-18]测定 HCF, 获取 6 种密度下脱/吸湿过程 VGM 模型参数。在此基础上, 探讨 VGM 模型参数与土体密度及水力滞回的关系规律并给出经验公式; 分析采用吸力与采用体积含水率表达的 HCF 密度与水力滞回效应的差别。最后, 基于所获 HCF 模型参数, 在 Hydrus 中开展一维降雨入渗数值模拟, 探讨密度与水力滞回对非饱和渗流的影响规律。

1.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门, 为弱膨胀土, 呈黄褐色、硬塑状态, 含黑色铁锰结核, 局部有白色填充物, 其物理性质指标、矿物成分与颗粒组成参见文献[19], 土样最优含水率为 15.5%, 最大干密度为 1.86 g/cm³。试验采用压实土样, 试样制备的控制重力含水率为 17%; 试样制备方法参见文献[20]。

1.2 变水头渗透试验 (测定饱和渗透系数)

饱和渗透系数 k_s 是确定非饱和渗水系数 k 的基础与基准。对同种压实黏土而言, k_s 主要受孔隙比 e (密度) 控制, 可看作 e 的函数 $k_s(e)$ 。本文采用《土工试验规程》^[5] 中“变水头渗透试验”方法测定 8 种不同 e 试样的 k_s 。

试验采用直径 61.8 mm, 高度 40 mm 的环刀试样, 8 个试样制样控制压实体积分别为 95%, 90%, 85%, 80%, 75%, 70%, 65%, 60%。制样完成后, 将环刀试样置于杠杆式固结仪的固结容器中浸水, 借助毛细作用饱和试样, 稳定标准为间隔 24 h 试样高度不变。饱和完成后, 用刮土刀将由于吸水膨胀高出环刀的部分切除, 刮平试样表面, 测定试样质量。将 8 个试样依次置入南京土壤仪器厂有限公司生产的 TST-55 型渗透仪中, 按《规程》方法^[5]测定 k_s 。试验结束后, 复测试样质量, 烘干后测干土质量, 以确定 8 个试样的实际孔隙比 (见表 1)。

1.3 TRIM 试验方法测定 HCF 工作原理

美国 Soil Water Retention 公司生产的 TRIM 试验系统见图 1。TRIM 试验方法^[17]是一种测定土体脱/吸湿过程对应土水特征曲线 SWCC 与非饱和渗水系数函数 HCF 的试验方法^[18]。

TRIM 试验方法工作原理^[18]如下：针对一维非饱和渗流问题，通过轴平移技术对试样施加一个较大的吸力变化（增大/减少）量，以获得试样中水的瞬态流出量/流入量-时间关系，以此作为反演模拟的目标函数，在 Hydrus-1D 程序^[11]中求解一维 Richards 方程，以获取脱/吸湿过程 SWCC 与 HCF 的模型参数。一维 Richards 方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta(h)}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式中， h 为吸力水头， θ 为体积含水率， $\theta(h)$ 为 SWCC，采用 van Genuchten 模型^[10]表示：

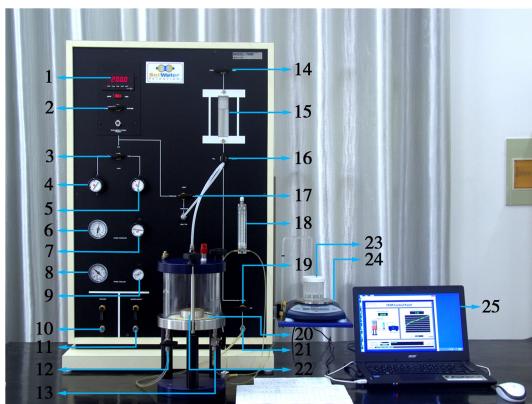
$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}}; \quad (2)$$

k 为非饱和渗水系数， $k(h)$ 为 HCF，采用 VGM 模型^[10]表示：

$$k = k_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha|h|)^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{2}-\frac{1}{2n}}}. \quad (3)$$

该模型是将 van Genuchten 模型代入 Mualem 模型^[9]获得的解析表达式； z 为正方向与重力方向一致的坐标位置， t 为时间。

式（2）与式（3）中： θ_s 为饱和体积含水率； θ_r 为残余体积含水率； S_e 为有效饱和度； α ， n 为 $\theta(h)$ ， $k(h)$ 的模型参数， α 与土体进气值相关， n 与土体孔径分布相关。在 Hydrus-1D 程序中反演模拟获取模型参数 α ， n ，即得到相应 SWCC 与 HCF。



1-气压显示屏，2-两通阀（通大气/气压），3-高/低转换阀，4-低压调节器，5-高压调节器，6-供气压力表，7-供气压力调节器，8-真空表，9-负压调节器，10-抽真空端口，11-供水端口，12-连接冲刷端口，13-连接气泡收集管，14-储水罐上方两通阀（抽真空/通大气），15-储水罐，16-储水罐下方三通阀（冲刷/注水/排水），17-三通阀（抽真空/通大气/加气压），18-气泡收集管，19-冲刷开关阀，20-陶土板，21-冲刷端口，22-试样，23-储水瓶，24-电子天平，25-数据采集系统

图 1 TRIM 试验系统

Fig. 1 Apparatus used in TRIM method

1.4 TRIM 试验方法测定 HCF 试验步骤

(1) 试样准备。TRIM 试验采用直径 61.8 mm、

高度 10 mm 的环刀试样（环刀直径 61.8 mm、高度 20 mm），6 个试样制样控制压实度分别为 95%，90%，85%，80%，75%，70%。制样完成后，将环刀试样置于杠杆式固结仪的固结容器中浸水，借助毛细作用饱和试样，稳定标准为间隔 24 h 试样高度不变。饱和完成后，测定试样高度、质量（待整个 TRIM 试验结束后，烘干试样得到干土质量，以获取试样饱和后的孔隙比 e 、饱和体积含水率 θ_s ）。

(2) 系统饱和。对整个 TRIM 试验系统进行饱和，包括进气值为 3 bar 的陶土板、陶土板底水槽、气泡收集管、系统管路。

(3) 脱湿过程试验。将饱和后带有环刀的试样置于陶土板中央。对试样施加 20 kPa 的吸力增量，通过电子天平量测、TRIM 数据采集软件采集瞬态水流出量-时间关系，一般 24 h 后水流出量达到稳定。然后，对试样施加 190 kPa 的吸力增量（吸力达到 210 kPa），采集该吸力下瞬态水流出量-时间关系，一般 72 h 后水流出量达到稳定。

(4) 冲刷气泡。为获得准确的瞬态水流出量-时间关系，需考虑气体通过陶土板的扩散。脱湿过程试验结束后，冲刷管路，将陶土板板底析出的气泡冲刷到气泡收集管进行定量测量。假定气泡析出速度恒定，修正天平量测获得的瞬态水流出量-时间关系。冲刷气泡完成后，饱和管路。将吸力从 210 kPa 卸载到 0，取出试样，测质量，目的是校核水流出量数据。

(5) 吸湿过程试验。再将试样置于陶土板中央，将电子天平读数置零，维持吸力为 0（不施加气压），通过电子天平量测、TRIM 数据采集软件采集瞬态水流入量-时间关系，一般 48 h 后水流入量达到稳定。试验结束后，取出试样，测质量，目的是校核水流入量数据。再烘干试样，获得干土质量。

(6) 脱-吸湿过程标定试验。不安装试样，按上述试验步骤（2）～（5），进行脱-吸湿试验，标定无试样条件下的瞬态水流出量-时间关系、气泡体积、瞬态水流入量-时间关系。

(7) 脱湿过程试验结果修正。根据无试样条件下瞬态水流出量-时间关系、气泡体积、脱湿过程前后试样质量，修正瞬态水流出量-时间关系。

(8) 吸湿过程试验结果修正。根据无试样条件下瞬态水流入量-时间关系、吸湿过程前后试样质量，修正瞬态水流入量-时间关系。

2 试验结果分析

2.1 饱和渗透系数-孔隙比关系

表 1 为采用变水头渗透试验测得的 8 种 e 相应 k_s ，

可见 k_s 随 e 增大 (密度降低) 而增大, e 变化范围为 0.929~1.624, k_s 相应变化范围为 6.16×10^{-8} ~ 6.00×10^{-6} cm/s。将表 1 中 $k_s - e$ 关系与文献[21]测定同种压实膨胀土 $e=0.476$ ~0.807 范围内 5 种密度下的 k_s 同时绘制在图 2 中, 采用式(4)给出的幂函数描述 $k_s - e$ 关系, 取得了较好的拟合效果 ($R^2=0.938$)。

$$k_s = 2.0 \times 10^{-7} e^{6.33}, \quad (4)$$

式(4)的适用范围为 $e=0.476$ ~1.624。

饱和状态下该压实膨胀土即使压缩至 4000 kPa, 孔隙比也只能低至 0.49^[20]; 所以式(4)给出了该压实膨胀土在常规工程密度范围的 $k_s - e$ 关系。

表 1 $k_s - e$ 关系 ($e=0.929$ ~1.624)

Table 1 Relationship between k_s and e ($e=0.929$ ~1.624)

饱和后孔隙比	饱和渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和后孔隙比	饱和渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.929	6.16×10^{-8}	1.295	1.43×10^{-6}
1.004	2.79×10^{-7}	1.429	4.10×10^{-6}
1.113	1.96×10^{-7}	1.481	8.83×10^{-7}
1.140	4.30×10^{-7}	1.624	6.00×10^{-6}

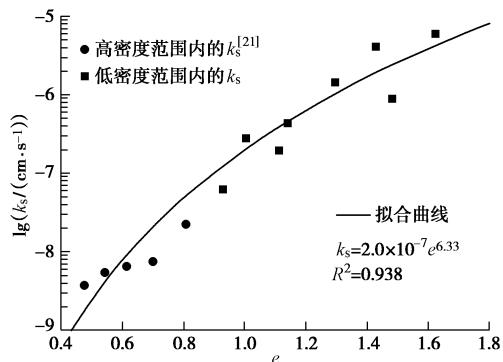


图 2 荆门压实弱膨胀土的 $k_s - e$ 关系 ($e=0.476$ ~1.624)

Fig. 2 Relationship between k_s and e of Jingmen compacted expansive soil

2.2 密度与水力滞回对 HCF 模型参数的影响

图 3 为按 TRIM 试验步骤 (先脱湿, 再吸湿, 见 1.4 节) 获得的试样瞬态水流出量/流入量-时间关系。6 个试样孔隙比分别为 1.316, 1.209, 1.127, 1.030, 0.987, 0.901。从图 3 中可看出, 孔隙比小 (密度大) 的试样, 在脱湿过程中排出了较少的水量 (水流出量), 在随后的吸湿过程中亦吸入了较少的水量 (水流入量), 这是密度对非饱和渗流的影响所致。需要说明的是, TRIM 试验中, 脱湿过程施加的最大吸力为 210 kPa, 吸湿过程是将吸力从 210 kPa 卸载到 0, 整个过程中试样体积变化很小, 因此不考虑 TRIM 试验过程中试样的体积变形。

以图 3 给出的瞬态水流出量/流入量-时间关系作为 TRIM 试验方法反演模拟的目标函数, 采用

Hydrus-1D 程序的反演模拟功能, 基于试样脱/吸湿过程的初值与边值条件, 设定 SWCC/HCF 模型参数初值, 对一维 Richards 方程进行求解, 获得脱/吸湿过程的水流出量/流入量-时间关系的预测结果, 对比预测结果与目标函数, 采用 Levenberg-Marquardt 算法进行 SWCC/HCF 模型参数的迭代调整与优化, 直至预测结果与目标函数间的误差满足精度要求。利用 Hydrus-1D 反演 SWCC/HCF 模型参数的具体方法与步骤, 在 TRIM 用户手册中有详细说明。需要说明的是, 反演吸湿过程 SWCC/HCF 模型参数前, 需将脱湿过程结束时的吸力水头分布作为吸湿过程的初始边界条件。

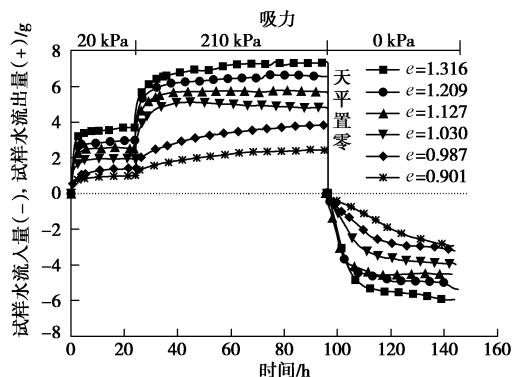


图 3 试样瞬态水流出量/流入量-时间关系

Fig. 3 Relationship between water outflow/inflow and time

对每个试样的脱/吸湿过程依序分别反演模拟, 获得脱/吸湿 SWCC/HCF 模型参数见表 2。表 2 中: θ_s^d 为脱湿开始时试样的饱和体积含水率, 为实测值; k_s^d 为脱湿过程相应饱和渗透系数, 根据 e 由式(4)计算获得; α^d , n^d 为反演获得的脱湿过程 SWCC/HCF 模型参数; θ_s^w 为吸湿过程结束时试样的体积含水率, 为实测值; k_s^w 为反演获得的吸湿过程相应饱和渗透系数; α^w , n^w 为反演获得的吸湿过程 SWCC/HCF 模型参数。

需要说明的是, 由于 SWCC、HCF 均存在水力滞回效应, 吸湿过程的 θ_s^w , k_s^w 值通常低于脱湿过程的 θ_s^d , k_s^d 值^[18], 主要原因是吸湿过程中会产生一定量的封闭气泡 (entrapped air) 导致 0 吸力时吸湿过程对应的饱和体积含水率与饱和渗透系数均低于脱湿过程相应值。此外, 经反演模拟尝试, 无论脱/吸湿过程, 残余体积含水率 θ_r 取 0 可取得更好的拟合效果, 这一点与文献[22]的建议一致。

将表 2 中由 TRIM 方法反演获得的 α^d , n^d , α^w , n^w , k_s^w 与 e 的关系绘制在图 4 中。由图 4 结合表 2 可得出以下认识: ①无论脱/吸湿过程, α , n 均与孔隙比正相关, 即随孔隙比增大而增大; ②相同孔隙比下, 脱湿过程的 α^d , n^d 均小于吸湿过程的 α^w , n^w ;

表 2 SWCC/HCF 模型参数 (VGM 模型)

Table 2 Parameters of SWCC/HCF model (VGM model)

e	脱湿过程				吸湿过程			
	θ_s^d	$k_s^d / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\alpha^d / (\text{kPa}^{-1})$	n^d	θ_s^w	$k_s^w / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\alpha^w / (\text{kPa}^{-1})$	n^w
0.901	0.474	1.03×10^{-7}	0.010	1.14	0.478	6.60×10^{-9}	0.011	1.16
0.987	0.497	1.84×10^{-7}	0.069	1.16	0.473	2.52×10^{-8}	0.093	1.20
1.030	0.507	2.41×10^{-7}	0.123	1.27	0.474	5.02×10^{-8}	0.214	1.30
1.127	0.530	4.26×10^{-7}	0.134	1.29	0.460	1.65×10^{-7}	0.243	1.33
1.209	0.547	6.65×10^{-7}	0.174	1.32	0.476	8.57×10^{-8}	0.270	1.36
1.316	0.569	1.14×10^{-6}	0.190	1.35	0.473	9.80×10^{-8}	0.310	1.41

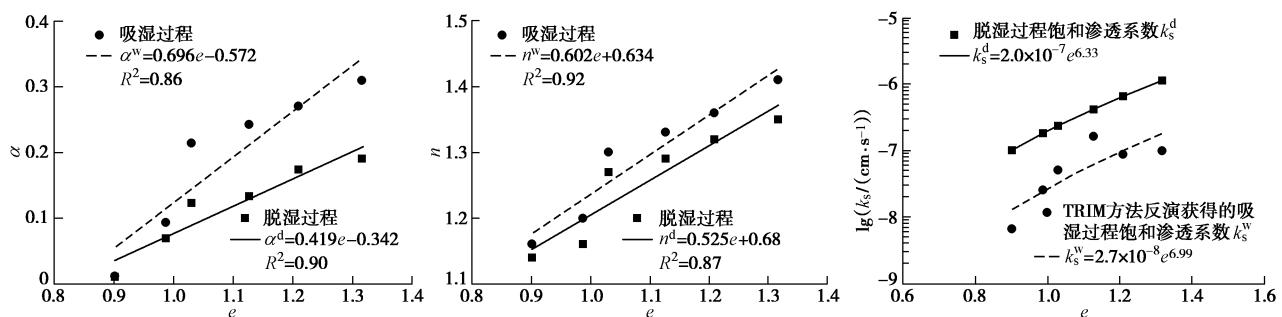


图 4 SWCC/HCF 模型参数与孔隙比/水力路径的关系

Fig. 4 Relationship among parameters of SWCC/HCF model, void ratio and wetting/drying paths

③吸湿过程饱和渗透系数 k_s^w 随孔隙比增大而增大, 低于相同孔隙比下的脱湿过程饱和渗透系数 k_s^d 。

以上结果清晰表明, 土体密度(此处用 e 表达)与水力滞回行为(脱湿过程还是吸湿过程)对 HCF 模型参数有显著影响, 进而影响 HCF。鉴于 α , n 与孔隙比的关系具有较好的规律性, 在非饱和渗流分析中, 可采用 α , n 与 e 的经验公式(见图 4), 描述密度与水力滞回对非饱和渗流的影响。

2.3 密度与水力滞回对 HCF 的影响

在非饱和渗流分析时, 为适应不同的应用问题, 根据自变量的不同, 非饱和渗水系数 k 主要有 2 类表达形式: 一类是采用吸力 ψ 的表达 $k(\psi)$; 另一类是采用体积含水率 θ 的表达 $k(\theta)$ 或采用有效饱和度 S_e 的表达 $k(S_e)$ 。

采用 ψ 的 HCF 表达 $k(\psi)$:

$$k(\psi) = k_s \frac{\left\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{\frac{1}{n-1}}\right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{\frac{1-1}{2-2n}}} \quad (5)$$

与式(3)的区别是, 式(5)中吸力 ψ 用压力单位表达, 如 kPa, 式(3)中吸力 h 用水头单位表达, 如 m 或 cm。式(5)中, $k(\psi)$ 与 3 个模型参数 k_s , α , n 相关。

根据式(5)与表 2 绘制 $k(\psi)$ 示于图 5。由图 5 可见:

(1) 水力滞回对 $k(\psi)$ 影响显著。表现在同一密度相同吸力下脱湿过程 k 值明显大于吸湿过程 k 值。其原因^[8]在于 SWCC 的水力滞回效应, 即相同吸力下脱湿路径的体积含水率 θ 高于吸湿路径 θ , 而非饱和渗水系数 k 与 θ 正相关。

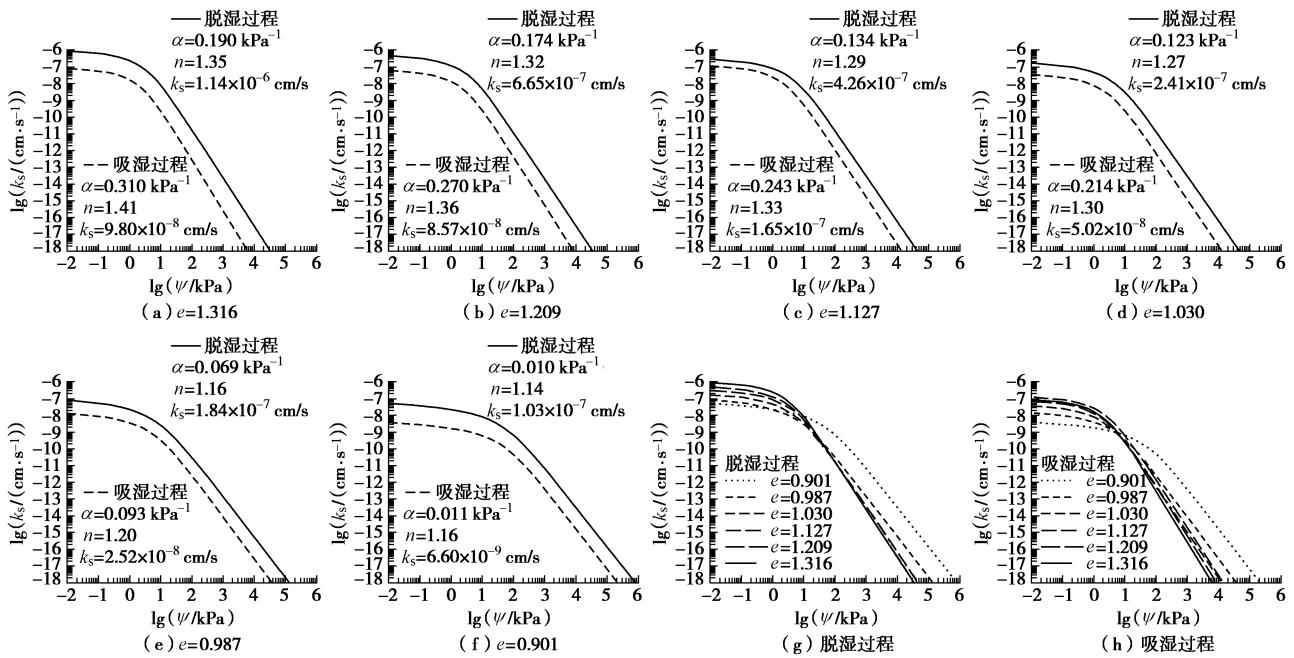
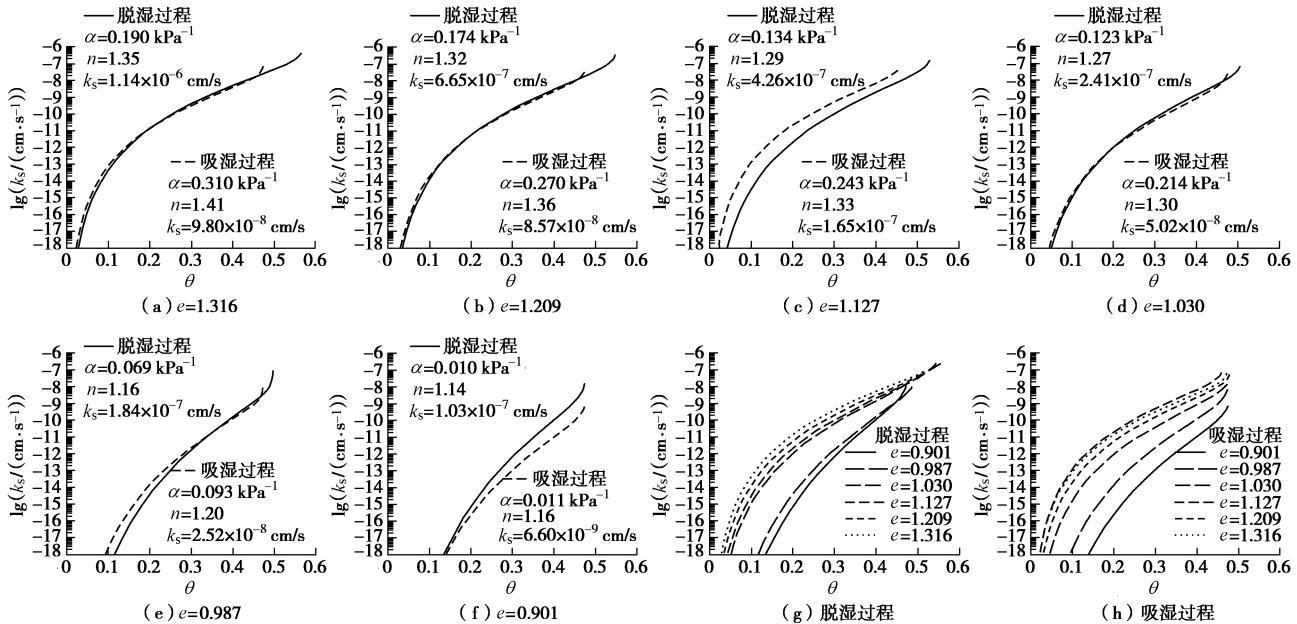
(2) 土体密度对 $k(\psi)$ 影响显著。表现在不同孔隙比下的 k 存在“交叉”现象: 高密度(低孔隙比)下试样饱和渗透系数 k_s 小, 但随吸力增大其降幅较小; 导致在交叉点前, 密度较小的试样 k 值较大, 交叉点后, 密度较大的试样 k 值较大。这是采用 VGM 模型值得注意的问题。

采用 θ 的 HCF 表达 $k(\theta)$:

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \\ = k_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 = k(S_e) \quad (6)$$

根据 θ 与 S_e 的关系(式(2)), 可以得到 S_e 的 HCF 表达 $k(S_e)$ 。式(5), (6) 均为 VGM 模型的等效 HCF 表达形式。

式(6)中, $k(\theta)$ 与 4 个模型参数 k_s , θ_s , θ_r , n 相关, 根据式(6)与表 2 绘制 $k(\theta)$ 示于图 6。由图 6 可

图5 密度与水力滞回对非饱和渗水系数函数 $k(\psi)$ 的影响Fig. 5 Effects of density and hysteresis on $k(\psi)$ 图6 密度与水力滞回对非饱和渗水系数函数 $k(\theta)$ 的影响Fig. 6 Effects of density and hysteresis on $k(\theta)$

见：①水力滞回对 $k(\theta)$ 影响不明显。相同 θ 下，脱湿过程 k 可能稍大于吸湿过程 k (e 为 0.901 的试样)、也可能稍小于吸湿过程 k (e 为 1.127, 0.987 的试样)、亦可能与吸湿过程 k 接近重合(e 为 1.316, 1.209, 1.030 的试样)。总体而言，脱/吸湿过程的 $k(\theta)$ 较为接近，其水力滞回效应可忽略，此现象 Fredlund 等^[8]已进行说明。②密度对 $k(\theta)$ 影响显著。无论脱/吸湿过程，相同 θ 下，密度大(低孔隙比)的试样渗水系数 k 小。与 $k(\psi)$ 有区别的是， $k(\theta)$ 不存在“交叉”现象，在此

分析二者存在差别的原因。根据式(2)与表 2 绘制 $\theta(\psi)$ 表明，不同密度下 $\theta(\psi)$ 存在“交叉”现象(限于篇幅未在文中列出)，原因是，密度大的试样饱和体积含水率小、持水能力强，密度小的试样饱和体积含水率大、持水能力弱，所以呈现出“交叉”行为。不同密度下 $\theta(\psi)$ 表现出的“交叉”行为，可解释不同密度下 $k(\theta)$ 不存在“交叉”现象而 $k(\psi)$ 存在“交叉”现象的原因。

式(6)中， $k(S_e)$ 与 $k(\theta)$ 表达形式一致，因此 $k(S_e)$

与 $k(\theta)$ 的密度与水力滞回效应规律大体一致, 此处不再赘述。需要指出的是, 即使式(5), (6) 均为 VGM 模型的等效 HCF 表达形式, $k(\psi)$ 与 $k(\theta)/k(S_e)$ 的密度效应规律与水力滞回效应规律尚存在显著差异, 表明密度与水力滞回对 HCF 的影响规律与其表达形式密切相关。

3 密度与水力滞回对非饱和渗流分析的影响

为探讨 HCF 的密度与水力滞回效应对非饱和渗流分析的影响, 采用表 2 获得的 SWCC/HCF 模型参数, 在 Hydrus-1D 中开展一维降雨入渗的数值模拟。

数值模拟的对象是地下水位以上 2 m 厚的均质非饱和土瞬态入渗问题, SWCC 与 HCF 选取 VGM 模型, 采用表 2 中的 12 组模型参数分别模拟, 12 组模型参数对应 6 种密度 (孔隙比) 与 2 种水力路径 (脱/吸湿路径) 的组合, 在此基础上, 对比分析土体密度与水力滞回对非饱和渗流分析的影响。初始状态, $t = 0$ 时, 设定为静水状态且地表无入渗。降雨强度设置为 2 cm/d。 $t > 0$ 时, 均质非饱和土层上边界设定为带径流的大气边界, 下边界设定为定水头边界 (自由水面边界, 吸力水头为 0 cm)。模拟时长设定为 100 d。

3.1 土体密度对非饱和渗流分析的影响

图 7 为采用表 2 中孔隙比 e 分别为 0.901, 0.987, 1.030, 1.127, 1.209, 1.316 的脱湿 SWCC/HCF 模型参数, 进行一维降雨入渗数值模拟, 获得的降雨时长为 100 d 时的水头分布。

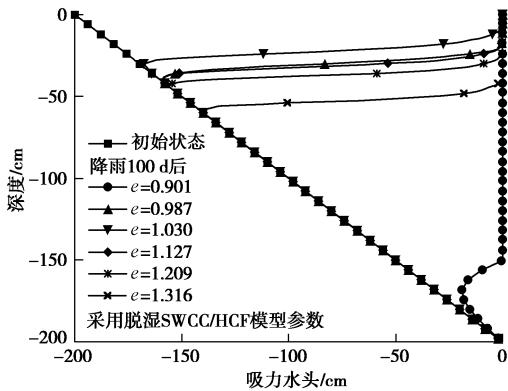


图 7 降雨 100 d 后的水头分布

Fig. 7 Profiles of suction head after 100 days of rainfall

由图 7 可见: e 为 0.901 时湿润锋前进速度最快; e 为 1.316 时湿润锋前进速度其次; e 为 1.209, 1.127, 0.987, 1.030 时, 湿润锋前进速度逐次降低。图 7 一方面表明, 土体密度不同, SWCC/HCF 模型参数不同, 降雨入渗的预测结果存在显著差异, 密度对非饱和渗流存在显著影响。另一方面, 土体密度对降雨入渗的影响不具单调性, 湿润锋前进速度既不随土体密度增

大而单调加快, 亦不随土体密度增大而单调减缓。

为进一步探讨非饱和渗流分析中土体密度对降雨入渗的影响规律, 采用表 2 给出的模型参数 θ_s , k_s , α , n 做单因素变化分析, 进行一维降雨入渗数值模拟的结果见图 8。

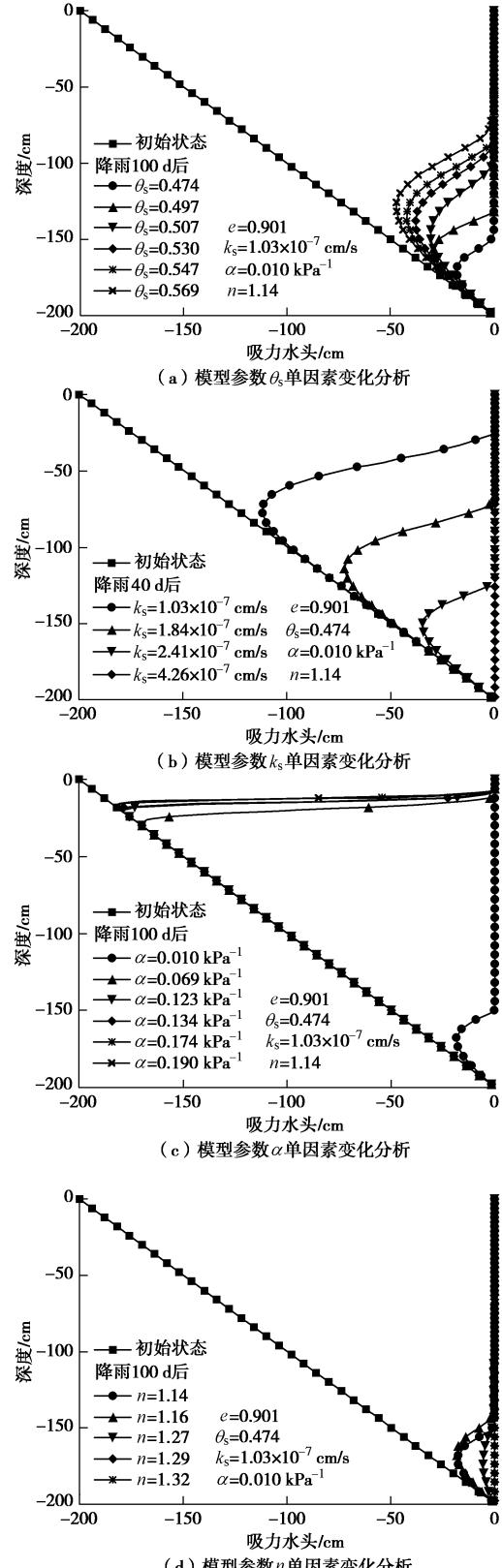


图 8 模型参数 θ_s , k_s , α , n 单因素变化分析

Fig. 8 Single-factor analysis of θ_s , k_s , α and n

由图8可见, 仅模型参数 θ_s 变化时, 饱和体积含水率 θ_s 值越小(意味着土体密度越大), 湿润锋前进速度越快。仅模型参数 k_s 变化时, 饱和渗透系数 k_s 越小(意味着土体密度越大), 湿润锋前进速度越慢; 当 k_s 增加到 4.26×10^{-7} cm/s, 降雨40 d后, 吸力水头分布达到稳定状态。仅模型参数 α 变化时, α 越小(意味着土体密度越大, 见图4), 湿润锋前进速度越快。仅模型参数 n 变化时, n 越小(意味着土体密度越大, 见图4), 湿润锋前进速度越慢; 当 n 增加到1.32, 降雨100 d后, 吸力水头分布达到稳定状态。综合起来看, 在土体密度增大的前提下: θ_s 降低, 湿润锋前进速度加快; k_s 降低, 湿润锋前进速度减缓; α 降低, 湿润锋前进速度加快; n 降低, 湿润锋前进速度减缓。

以上单因素变化分析可解释图7中土体密度对降雨入渗影响不具单调性的原因: 土体密度增大, 模型参数 θ_s , k_s , α , n 值均降低, 但各模型参数值降低导致的湿润锋前进速度加快/减缓效应不同, 各效应的共同作用导致土体密度增大对降雨入渗快慢的影响不具单调性。

3.2 水力滞回对非饱和渗流分析的影响

图9为在 $e=0.901$ 的密度下, 分别采用脱/吸湿SWCC/HCF模型参数(表2)进行一维降雨入渗数值模拟, 获得的降雨时长分别为20, 40, 60, 80, 100 d的水头分布。

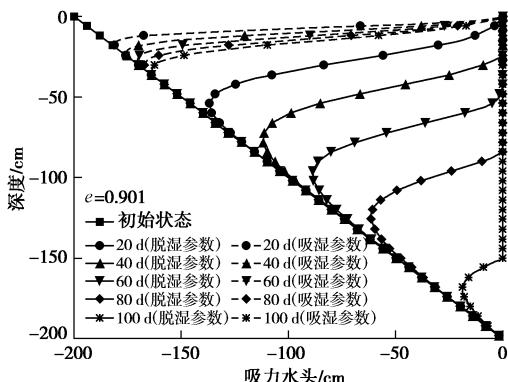


图9 孔隙比为0.901的降雨入渗水头分布

Fig. 9 Profiles of suction head when $e=0.901$

由图9可见, 采用不同水力路径下的模型参数, 湿润锋前进速度有较大差别。采用脱湿过程模型参数, 100 d后, 湿润锋已靠近土层底部, 吸力水头分布接近稳定状态。采用吸湿过程模型参数, 湿润锋前进速度缓慢。这表明非饱和渗流分析中, 是否考虑水力滞回, 会导致模拟结果的显著差异。

目前, 由于脱湿过程试验相对吸湿过程试验简单、历时短, 导致吸湿过程试验结果远少于脱湿过程试验结果。然而, 正如图9所示, 当考虑一个以降水作为环境作用的湿化过程时, 采用由脱湿过程试验获得的模

型参数, 可能导致数值模拟结果难以准确预测实际状况。而采用形式简单的HCF模型如VGM模型, 对脱/吸湿路径采用相应模型参数值, 是考虑滞回效应的可行方法。

4 结 论

(1) 采用幂函数描述常规工程密度范围($e=0.476\sim 1.624$)的压实膨胀土饱和渗透系数取得了较好的拟合效果。

(2) 土体密度与水力滞回对VGM模型参数影响显著: 无论脱/吸湿过程, VGM模型参数 α , n 均随 e 增大而增大; 相同密度下, 脱湿过程 α , n 均小于吸湿过程对应值。

(3) 密度与水力滞回均对吸力表达的HCF影响显著; 不同 e 下HCF存在“交叉”现象: 相同吸力下, 交叉点前, 密度小的试样渗水系数 k 值大; 交叉点后, 密度大的试样 k 值大; 同一密度相同吸力下脱湿过程 k 值明显大于吸湿过程 k 值。

(4) 密度对体积含水率 θ 表达的HCF影响显著, 相同 θ 下, 密度大的试样 k 值小, 但不存在“交叉”现象; 水力滞回对 θ 表达的HCF影响微弱, 同一密度下脱/吸湿过程HCF接近。

(5) 密度与水力滞回对HCF的影响规律与其表达形式(吸力表达还是体积含水率表达)密切相关。

(6) 土体密度对非饱和渗流影响显著, 但密度变化对湿润锋前进速度快慢的影响不具单调性。非饱和渗流分析中是否考虑水力滞回, 数值模拟结果差异明显。

(7) 非饱和渗流分析中, 采用形式简单的HCF模型如VGM模型, 采用 α , n 与 e 的经验公式, 对不同密度、脱/吸湿路径采用相应模型参数值, 是综合考虑密度与水力滞回对非饱和渗流影响的可行方法。

参考文献:

- [1] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1901-1907.
(CHENG Peng, LI Jin-hui, SONG Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: experimental study[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1901-1907. (in Chinese))
- [2] 陶高梁, 孔令伟. 基于微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数模型及其应用[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 702-709.
(TAO Gao-liang, KONG Ling-wei. A model for determining the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils based on micro pore channel and its application[J]. Journal of

- Hydraulic Engineering, 2017, **48**(6): 702 – 709. (in Chinese))
- [3] 倪沙沙, 迟世春. 基于粒子群支持向量机的高心墙堆石坝渗透系数反演[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 727 – 734. (NI Sha-sha, CHI Shi-chun. Back analysis of permeability coefficient of high core rockfill dam based on particle swarm optimization and support vector machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4): 727 – 734. (in Chinese))
- [4] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [5] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [6] CAI G, ZHOU A, SHENG D. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(12): 1456 – 1467.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM D7664—10 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils[S]. 2010.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [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] 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.
- [11] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the hydrus computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, **15**(7): 1 – 25.
- [12] KOOL J B, PARKER J C. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1987, **23**(1): 105 – 114.
- [13] LENHARD R J, PARKER J C, KALUARACHCHI J J. Comparing simulated and experimental hysteretic two-phase transient fluid flow phenomena[J]. Water Resources Research, 1991, **27**(8): 2113 – 2124.
- [14] WEI C, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(7): W07405.
- [15] 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.
- [16] LIKOS W J, LU N, GODT J W. Hysteresis and uncertainty in soil water-retention curve parameters[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(4): 04013050.
- [17] WAYLLACE A, LU N. A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, **35**(1): 103 – 117.
- [18] LU N, GODT J W. 斜坡水文与稳定[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014. (LU N, GODT J W. Hillslope hydrology and stability[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014. (in Chinese))
- [19] 孔令伟, 周葆春, 白 颖, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3036 – 3042. (KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3036 – 3042. (in Chinese))
- [20] 周葆春, 张彦钧, 汤致松, 等. 不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀—压缩特性[J]. 岩土力学, 2014, **35**(5): 1275 – 1283. (ZHOU Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, et al. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(5): 1275 – 1283. (in Chinese))
- [21] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 荆门弱膨胀土的胀缩与渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 424 – 429. (ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental study of swelling-shrinkage behaviour and permeability characteristics of Jingmen weak expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 424 – 429. (in Chinese))
- [22] LIKOS W J, YAO J. Effects of constraints on van Genuchten parameters for modeling soil-water characteristic curves[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(12): 06014013.