

残留含气量影响的非饱和多孔介质流动过程

陈 盼, 韦昌富, 魏厚振, 马田田

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 多孔介质微观大小孔隙的分布及其连通具有随机性, 使得流体在实际孔隙中的流动与理想单孔隙中迥异, 当多孔介质中的含水量循环变化时, 毛细滞回和残留含气量效应极大地影响着多孔介质的渗流过程。基于对非饱和和孔隙介质干湿过程的分析, 提出能够考虑残留含气量影响的土水特征关系理论模型, 随后建立一个新的渗流理论模型, 该模型考虑残留含气量对流动过程的影响。在此基础上, 建立相应的数值分析模型, 并进行程序代码的实施。建立的模型能够用于模拟任意含水量变化条件下残留含气量对多孔介质中非饱和和渗流过程的影响。通过数值模拟结果与实测数据的比较, 证实残留含气量效应对非饱和孔隙介质中流体分布的重要影响。为更准确地预测多孔介质中的土水状态, 在非饱和渗流分析中考虑残留含气量与毛细滞回效应十分必要。

关键词: 土力学; 多孔介质; 渗流模型; 毛细滞回; 残留含气量; 数值模拟

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)07-1426-08

EFFECT OF RESIDUAL AIR ENTRAPMENT ON UNSATURATED FLOW IN POROUS MEDIA

CHEN Pan, WEI Changfu, WEI Houzhen, MA Tiantian

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The sizes and connectivity of the pores in porous media such as rock and soil are randomly distributed at microscopic level. Due to this characteristics, the flow of fluids in the porous media is significantly different from the flow characteristics in the ideal single pore model. As important features of seepage, capillary hysteresis and air entrapment generally occur in the porous media experiencing cyclic change of water content. Based on the analysis of drying/wetting progress in the porous media, a theoretical model of seepage is developed, in which the effect of air entrapment is taken into account in the soil-moisture retention constitutive relation. A numerical analysis method is developed and implemented into the computer code. The model can be used to simulate the unsaturated seepage in porous media with the effect of air entrapment under arbitrary change of water content. By comparing the numerical results with measured data, it is shown that the effect of air entrapment is significant to the fluid distribution. The effects of capillary hysteresis and air entrapment should be taken into account in unsaturated seepage analysis in order to accurately predict the soil-moisture state of porous media.

Key words: soil mechanics; porous media; seepage model; capillary hysteresis; air entrapment; numerical simulation

1 引言

复杂的自然环境(如间歇性降雨, 库水位的升

降, 污染物的泄露与迁移等)作用下, 非饱和孔隙介质中经历着激烈的渗流过程。由于毛细滞回效应的存在, 不同水力路径下非饱和和多孔介质的力学、水力学性质并不完全相同^[1-2], 这使得对非饱和多孔介

收稿日期: 2012-10-17; **修回日期:** 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072255); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金项目(11-KF-05); 广西自然科学基金重点项目(2011GXNSFE018004)

作者简介: 陈 盼(1984-), 博士, 2006年毕业于武汉科技大学土木工程专业, 现任助理研究员, 主要从事非饱和土力学与边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: pchen@whrsm.ac.cn。通信作者: 韦昌富(1966-), 男, 博士, 现任研究员。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

质流动过程的分析与评价更加复杂。当前，降雨、地下水位变化引起的地质灾害及造成的次生灾害，农田作物的有效灌溉，土壤水污染的防治等问题尤为突出，近年来，多孔介质中的渗流问题越来越受到研究者的关注与重视。这些问题的关键均与多孔介质中含水量的变化过程密切相关，而解决这类问题的关键在于探究多孔介质中非饱和流动机制，本文正是基于对孔隙介质微细观结构的分析与已有的实测数据进行非饱和和孔隙介质中含水量变化机制的分析。

对于非饱和渗流过程的分析，国内外学者已经作了较多的研究工作，并建立了诸多的非饱和土渗流分析模型，但这些模型很少考虑含水量变化的路径依赖性对渗流过程的影响。D. Canone 等^[3-4]的研究表明，非饱和孔隙介质中描述含水量(或饱和度)与基质吸力变化的土水特征关系并不是单调变化的，存在着滞回效应。由于滞回效应的存在，多孔介质的渗流过程与其所经历的水力路径密切相关。进一步的试验测试表明^[5-6]，土体在干湿循环作用下土水特征关系形成的滞回圈并不是完全闭合的。究其原因，在于岩土体的孔径大小差异及孔隙分布的不均匀性。具体表现在，孔隙介质脱湿之后的吸湿过程，小孔隙充注时将形成水相连续的流动路径，这类路径的形成将堵塞一部分孔隙通道，使得部分气体不能及时排出孔隙，残留于孔隙中被水相所包裹。这种滞留作用将影响多孔介质脱湿或吸湿过程中含水量的流动与分布^[7]，称为残留效应。

D. A. Stonestrom 和 J. Rubin^[6]通过试验发现土体中残留含气量对流动过程的影响较大，同时能降低土体的渗透系数。评估污染物的迁移并进行有效的修复，准确地模拟残留非湿相有机流体(non-aqueous phase liquids, NAPL)的形成是关键。Van P. J. Geel 和 J. F. Sykes^[8]在滞回与非滞回条件下对轻质非湿相有机流体(light non-aqueous phase liquids, LNAPL)流动过程的模拟分析及实测结果表明，在滞回的数值模拟中考虑残余 LNAPL 含量与实测值最为接近。上述研究证实，流体的残留效应对非饱和和流动过程的影响较大，非饱和渗流分析中考虑这种残留效应显得尤为必要。J. C. Parker 等^[9]已研究了上述气体残留效应对非饱和多孔介质流动过程的影响，并提出了相应的模型，该类模型得到了一定的应用，但缺乏理论基础，模型较为复杂，且参数较多，限制了其在实际分析预测中的应用。因此，有必要对残留含气量作用下非饱和渗流过程的机制

进行分析，并建立能在实际分析中方便应用的渗流模型。

目前，考虑毛细滞回效应影响的非饱和两相流模型已经提出，模型的有效性与可靠性也已得到验证^[1]。本文在非饱和多孔介质毛细滞回模型的基础上考虑了气体残留效应，建立了能够考虑任意残留含气量影响的完全毛细滞回模型，随后建立了非饱和和渗流理论模型，使得该模型不仅能够考虑毛细滞回效应，同时能够考虑残留含气量的影响。本文建立了相应的数值分析模型，并将该模型在有限元分析程序中进行了数值代码实施；利用新建立的非饱和和渗流分析程序对实际问题进行了模拟，并与 R. J. Lenhard 等^[10]已有的试验数据进行了对比分析。

2 理论模型

2.1 土水特征关系理论模型

毛细滞回效应是非饱和多孔介质固有的物理表征。毛细滞回作用机制的研究长久以来一直受到研究者的关注，总结现有的研究成果发现，土水特征关系毛细滞回效应的机制主要在于以下几个方面^[11]：(1) 多孔介质的孔径大小的差异及孔隙连接的随机性；(2) 脱湿、吸湿过程中不同的固液接触角；(3) 非湿相流体残留作用；(4) 脱湿吸湿过程中土体膨胀与收缩变化引起。

在毛细滞回机制研究的基础上，H. Q. Pham 等^[12-13]已经提出了不同的毛细滞回模型，用来描述在含水量非单调变化条件下非饱和多孔介质中的土水状态。其中，C. F. Wei 和 M. M. Dewoolkar^[14]基于多孔介质的内变量热动力学理论，建立了一个能够有效地描述毛细滞回效应的循环土水特征关系模型(简称 ISVH 模型)。该模型能很好地描述多孔介质的毛细滞回效应。最近，该模型已经被运用到非饱和和两相流问题的分析，能较好地预测非饱和土体中含水量与基质吸力的变化^[1]。然而，ISVH 模型没有考虑残留含气量对渗流过程的影响，不能模拟干湿过程中存在残留含气量影响的土水状态的变化。建立的理论模型将进一步改进 ISVH 模型，使其能够考虑残留含气量效应对土水状态的影响。

N. C. Wardlaw 和 R. P. Taylor^[15]在岩石中进行水银注入与抽取试验，与气体的湿势相比，水银的湿势更小，水银相对于气体来说即为非湿相流体，研究发现，岩石孔隙中残留水银的含量与水银注入抽取转换时的水银饱和度密切相关。这种现象在土

体等孔隙介质中的气水两相流过程也有类似的发现^[16]。基于这类试验观察,提出以下 2 个假设:(1) 残留气体的含量只与多孔介质所经历的前期最大基质吸力(水相的饱和度)相关;(2) 多孔介质土水特征曲线滞回圈内扫描线水力路径的变化,可由前期最大基质吸力为边界点干湿循环形成的闭合滞回圈唯一确定,且闭合圈的形状不受残余含气量变化的影响。这 2 个假设可基于微观孔隙范围内的孔隙水变化得到合理的解释。在某一级吸力 s_{c1} 作用下,对应于大于孔径 r_1 中的孔隙水会排出,而小于 r_1 孔隙中的水并不会排出(见图 1),需要指出的是,这里只是以理想圆孔示意孔隙介质中的孔隙,但建立模型不仅适用于理想孔隙介质,同样适用于复杂孔隙介质。图 1 中给出了 3 种不同大小半径的孔隙,初始条件孔隙介质完全饱和,当施加吸力 s_{c1} 时,对应孔径 r_1 的孔隙中的水相将完全排干,如图 1(a)所示,介质中被水分填充的孔隙以黑色圆孔表示;当吸力进一步增加到下一级吸力 s_{c2} ,大于孔径 r_2 中的孔隙水才会排出(见图 1(b)),此时只有孔隙半径小于 r_2 的孔隙中仍然充满水相。由此可知,每一级吸力对应着一个等效的孔隙半径,在某一级吸力作用下,大于该孔隙半径的孔隙中的水才会排出。对于吸湿过程,在吸力 s_{c1} 作用稳定后,若吸力降低到 0,在 s_{c1} 作用下排水完成的孔隙又开始吸水,其余孔隙含水量并未发生变化;在更大一级吸力 s_{c2} 作用下,干湿过程只与对应的等效孔隙半径大于 r_2 的孔隙有关。基于上述分析,残留气体的含量只与前期最大吸力有关的推断是合理的。每一级吸力作用下的干湿循环过程,形成残留含气量的孔隙与总体孔隙体积相比只占很少部分,而且孔隙介质本身通道的连通性并不是很好,对下一级吸力作用下干湿过程的影响较弱^[17]。因此,主脱湿线以内的吸湿再脱湿次级扫描线的斜率由主滞回圈内相应的扫描线推得,而 ISVH 模型已经能很好预测主滞回圈内的干湿循环水力路径变化。

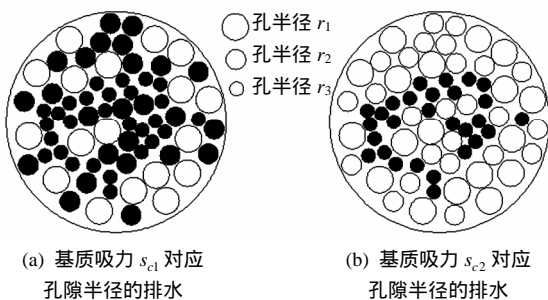


图 1 基质吸力作用下孔隙介质中排水变化示意图
Fig.1 Sketches of the draining progress of water in porous media under the change of matric suction

以上理论模型的表述见图 2。以下将结合图 2 进行进一步的机制揭示。已知主脱湿边界线 IDC, 主滞回圈的脱湿曲线 MDC、吸湿曲线 MWC, 主脱湿边界线 IDC 上一点 B 为一前期最大吸力点,由以上理论分析可知,由点 B 开始吸湿的水力路径 BGE 的获得,先将点 B 平移与 MDC 交于点 C, B, C 两点含水量的差别(θ_{BC})与含水量轴上 D, E 两点的含水量(θ_{DE})相同,由此求得前期最大吸力对应的残留气体的含量($\theta_{AE} = \theta_{AD} - \theta_{DE}$);由点 B 开始吸湿到吸力为 s_c , 利用 θ_{DE} 将该点平移至主滞回圈内,由 ISVH 模型获得相应的含水量与水力路径的变化,将得到的含水量再通过 θ_{DE} 平移即为所求的当前吸力 s_c 对应的含水量。对于吸湿到吸力为 0 后的再脱湿过程,亦可采用该方法进行平移求解。若并不吸湿到吸力为 0(而是 BGE 上中间任一点)或并未脱湿到前期最大吸力(EFB 上中间任一点),经历干湿过程转换,仍将以前期最大基质吸力确定的滞回圈(BGEFB)确定圈内更高阶扫描线的变化。

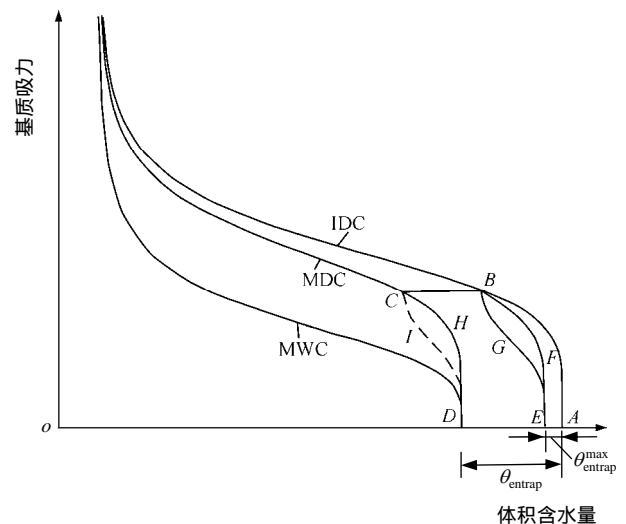


图 2 土水特征关系概念模型示意图
Fig.2 Sketch of conceptual model for soil-water characteristic curve(SWCC)

基于上述残留含气量影响的土水特征关系理论模型,以下将用数学描述来建立相应的理论模型:多孔介质中与其经历的前期最大基质吸力 s_c^{max} 对应的残留含气量 $\theta_{entrap}(s_c^{max})$ 为

$$\theta_{entrap}(s_c^{max}) = \theta_{entrap}^{max} - [\theta^{IDC}(s_c^{max}) - \theta^{MDC}(s_c^{max})] \quad (1)$$

式中: θ_{entrap}^{max} 为完全干湿循环后的最大残留气体的体积含量, $\theta^{IDC}(s_c^{max})$ 为主边界线上与前期最大吸力对应的含水量, $\theta^{MDC}(s_c^{max})$ 为 s_c^{max} 点平移到主滞回圈上的脱湿线(MDC)对应的含水量。

将主脱湿边界线 IDC(包括主脱湿线 IDC 在内)与主滞回圈脱湿线 MDC 之间包含区域内的任意已知吸力点平移到主滞回圈脱湿线(CHD)上或滞回圈内的扫描线(CID)上, 所得对应含水量为

$$\theta_{tran}(s_c) = \theta(s_c) - [\theta_{entrap}^{max} - \theta_{entrap}(s_c^{max})] \quad (2)$$

式中: $\theta_{tran}(s_c)$ 为对应于基质吸力为 s_c 时平移到主滞回圈内含水量的变化。

基质吸力变化下主滞回圈内含水量的变化为

$$\dot{\theta} = -\dot{s}_c / K_p(\theta(s_c), s_c, \hat{n}) \quad (3)$$

式中: \dot{s}_c 为基质吸力的变化率; K_p 为含水量变化的斜率, 关于 K_p 的求取参见陈 盼等^[1]的研究; \hat{n} 为含水量的变化方向(脱湿或吸湿过程)。吸力变化后主滞回圈内对应的含水量为

$$\theta_{tran}(s_c + \dot{s}_c) = \theta(s_c) + \dot{\theta} \quad (4)$$

基于上述理论模型平移得到真实的含水量, 即

$$\theta(s_c + \dot{s}_c) = \theta_{tran}(s_c + \dot{s}_c) + (\theta_{entrap}^{max} - \theta_{entrap}) \quad (5)$$

以上土水特征曲线模型的边界曲线方程^[18]表述为

$$s_c = b \left(\frac{S_r^i - S_r}{S_r - S_r^{irr}} \right)^{1/a} \quad (6a)$$

其中,

$$S_r^i = \begin{cases} 1.0 & \text{(IDC)} \\ S_r^{MDC} & \text{(MDC)} \\ S_r^{MWC} & \text{(MWC)} \end{cases} \quad (6b)$$

式中: S_r , S_r^{irr} 分别为多孔介质的饱和度与残余饱和度; a, b 均为经验参数, 通过对实测数据的拟合获得。

以上建立的完全的土水特征关系模型简称为 ISVH-TRAP 模型。该模型考虑了残留含气量对渗流过程的影响, 能够模拟预测任意含水量变化路径下, 非饱和多孔介质中水力状态的变化。

2.2 理论模型的验证

为了验证上述理论模型的有效性, 将该理论模型转化为程序代码, 运用编制的程序进行了模拟分析, 并将模拟结果与 A. Poulouvassilis^[5]的试验数据进行了比较(见图 3), 模型参数见表 1。从图 3 中可以看出, 建立的模型能较好地预测残留含气量影响下, 非饱和孔隙介质中水力路径的变化过程。从而证实本模型用于预测循环含水量变化条件下的土水特征关系的有效性。进一步分析可以看出, 主脱湿线 IDC、主滞回圈的边界线 MDC 与 MWC 构成了土水特征关系曲线的三大特征线, 主脱湿线上每一个前期最大基质吸力对应唯一的封闭滞回圈, 残余含气量大小是前期最大基质吸力对应滞回圈的关键控制因子。建立的模型能够巧妙地描述主脱湿线与主滞回圈吸湿线之间整个区域内含水量反复变化条件下多孔介质中土水状态的演化。

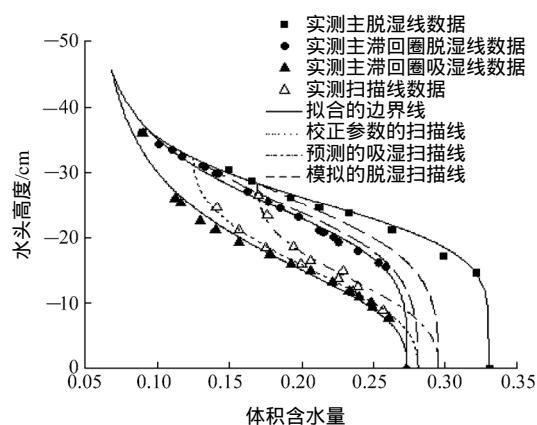


图 3 考虑残留含气量影响的含水量增减变化条件下多孔介质中的水力路径

Fig.3 Hydraulic path in a porous medium subjected to wetting/drying cycles considering entrapped air effect

非饱和多孔介质中水力状态(含水量和基质吸力)受残留含气量的影响较大, 水力状态的变化必将影响非饱和土中含水量的分布与基质吸力的大小, 进而对非饱和土的力学行为产生影响。因此, 为了准确预测非饱和多孔介质的水力、力学特性的变化, 在其渗流分析中需要考虑残留含气量的影响。

表 1 烧结玻璃珠的模型参数

Table 1 Model parameters of sintered glass beads

孔隙率 n_0	残余饱和度 $S_r^{irr} / \%$	最大残留含气量 $S_r^{max} / \%$	最大饱和度/ $\%$			模型参数 b/cm			模型参数 a			主滞回圈内扫描线参数 c/cm
			MDC	MWC	IDC	MDC	MWC	IDC	MWC	MDC		
0.33	15.15	17.27	82.73	82.73	26.92	26.86	19.44	5.56	4.59	2.84	500	

3 数值模型的建立及其验证

3.1 数值模型的建立

将节 2 中建立的考虑残留含气量影响的土水特征关系模型 ISVH-TRAP 与非饱和土渗流-变形耦合分析的初边值问题的数学描述^[1]相结合,建立考虑残留含气量影响的非饱和流动-变形耦合问题的数值模型,并依据建立的数值模型进行了程序代码的开发。基于有限元程序 U-DYSAC2 求解含水量循环变化条件下非饱和多孔介质渗流的初始边值问题,该程序可用于有关三相多孔介质准静态和动态问题的分析,其有限元格式的空间、时域离散和数值求解及其程序的有效性已在陈盼等^[1,19]的研究中详细论述过,本文不再赘述。

3.2 模型验证

本节主要在于验证上述建立的数值模型的有效性,探讨在任意含水量变化条件下非饱和多孔介质中土水状态的演化规律及证实残留含气量大小对非饱和渗流过程的重要影响。基于节 3.1 已经建立的有限元分析程序对现有文献中的试验数据进行模拟和分析,并与模型预测的结果进行比较。采用的试验数据来自 R. J. Lenhard 等^[10]在砂柱中进行干湿循环试验所得的测试结果。试验砂柱的高度 72 cm,定义水平方向为 x 方向,砂柱高度方向为 z 正方向,砂柱底部设为 $z = 0$,顶部 $z = 72$ cm,如图 4 所示。

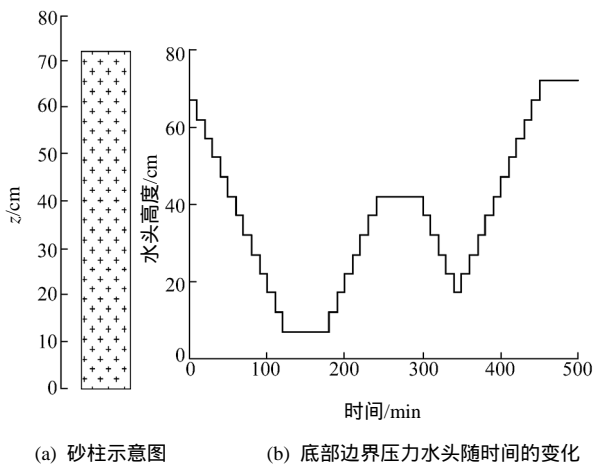


图 4 砂柱示意图与底部边界压力水头随时间的变化
Fig.4 Sketch of sand column and change of pressure head at the lower bottom with time

已知砂柱的边界条件为：

顶部边界： $u_x = 0.0$ cm, $q_z^w = 0.0$ cm/h, $p^N = 1$ atm；

侧边界： $u_x = 0.0$ cm, $q_x^w = 0.0$ cm/h, $p^N = 1$ atm；

底部边界： $u_x = u_z = 0.0$ cm, $p_z^w = p(t)$, $q^N = 0.0$ cm/h。 u_x, u_z 分别为 x, z 方向的位移, q_x^w, q_z^w 分别为 x, z 方向的水相的流量, p_z^w 为 z 方向的水压力, p^N 为气压力, q^N 为气相的流量。

砂样初始浸水饱和,并在底部水位高度 72 cm 条件下保持约 12 h 后,开始试验。试验开始后土柱底部边界压力水头 $p(t)$ 的反复变化过程见图 4。数值模型中的物理力学参数及模型参数分别见表 2, 3。图 5 为采用 ISVH-TRAP 模型及相应的模型参数对实测土水特征关系曲线模拟的结果。

当砂柱底部水头高度升降变化作用下,砂柱不同高度处土样的土水状态经历着干湿循环变化,采用节 3.1 建立的数值分析模型及试验给定的初边值条件对该渗流问题进行了模拟。砂柱不同高度处水相饱和度随时间变化的预测值与实测值的比较见图 6。

图 6 中同时给出了考虑残留含气量影响的滞回模型(ISVH-TRAP)分析、不考虑残留含气量的滞回模型(ISVH)分析和不考虑滞回条件的单支主脱湿线(IDC)模型的预测结果。通过与实测数据的比较可以看出,采用 ISVH-TRAP 模型模拟的在高度 70, 60, 50 cm 处含水量随时间的变化与实测结果较为接近,尤其是高度 50 cm 处的模拟结果与实测结果很好地吻合,在高度为 40 和 30 cm 处初期预测结果较好,而在干湿循环后的再次循环过程中预测的含水量变化与实测结果偏差稍大。综合而言,采用 ISVH-TRAP 模型能较好地预测干湿循环作用下,残留含气量影响的非饱和多孔介质内含水量状态的演化过程。通过比较考虑残留含气量影响的滞回模型、考虑滞回效应与不考虑残留含气量影响、不考虑滞回效应的单调土水特征关系模型的模拟结果可见,底部水位降低,试样从完全饱和开始经历第一次脱湿过程,ISVH-TRAP 模型、ISVH 模型和 IDC 模型模拟的结果基本相同,原因在于初次脱湿过程,水力路径将沿主脱湿线(IDC)变化,3 类模型的水力路径变化完全相同。脱湿完成之后底部水头升高,砂样底部开始基质吸力降低,含水量增加(见图 6(d), (e));而砂样上部由于暂未获得下部土样水分的补给,仍然经历以重力势为主导的脱湿过程,含水量持续降低(见图 6(a), (b))。

毛细滞回效应的存在和残留含气量的影响,使得孔隙中的渗流过程变得复杂,脱湿之后再吸湿的

表 2 砂的物理力学特性

Table 2 Physico-mechanical properties of sand

土颗粒的 密度 ρ^S / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水相的 密度 ρ^W / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	气相的 密度 ρ^N / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量 K / kPa	剪切模 量 G / kPa	水相的体积 模量 K_W / kPa	饱和和渗透 系数 k_{sat} / m^2	水相的动力 黏滞系数 ν_W / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	气相的动力 黏滞系数 ν_N / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	孔隙 率 n_0	残余饱 和度 S_r^{irr} / %
2.65×10^3	1.0×10^3	1.2	8.33×10^3	6.25×10^3	2.20×10^6	3.37×10^{-11}	1.00×10^{-3}	1.80×10^{-5}	0.36	16.94

表 3 砂的模型参数

Table 3 Model parameters of sand

最大残留含气量 $S_{\text{entrap}}^{\text{max}}$ /%	最大饱和度/%		模型参数 b/cm			模型参数 a		主滞回圈内扫描线参数 c/cm	
	MDC	MWC	IDC	MDC	MWC	IDC	MDC		MWC
25	75	75	25.58	25.58	12.56	4.78	4.78	4.47	200

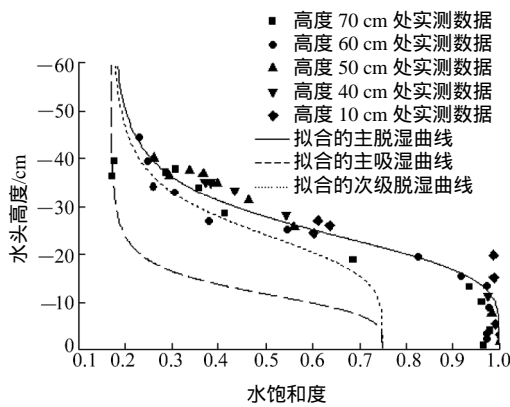
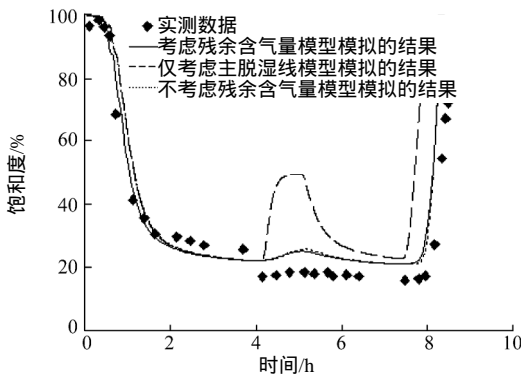
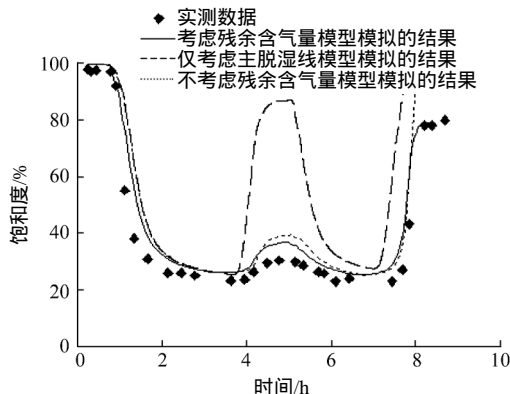


图 5 砂样的土水特征曲线

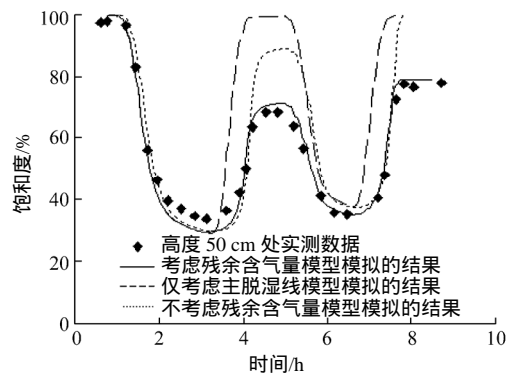
Fig.5 SWCC of sand specimen



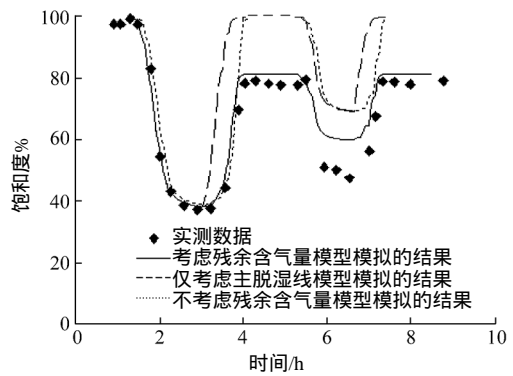
(a) 高度 70 cm 饱和度随时间变化



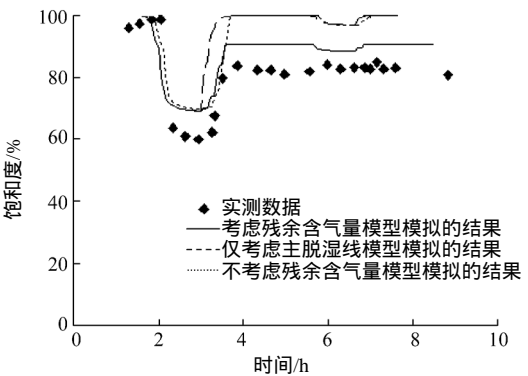
(b) 高度 60 cm 饱和度随时间变化



(c) 高度 50 cm 饱和度随时间变化



(d) 高度 40 cm 饱和度随时间变化



(e) 高度 30 cm 饱和度随时间变化

图 6 饱和度变化模拟结果与实测结果的比较

Fig.6 Comparisons of saturations obtained by simulations and experiment

水力路径不再沿着土水特征关系曲线脱湿主边界的单一路径变化,而是进入 IDC 与 MWC 之间的区域内的扫描线变化。一段时间的底部注水之后,土体顶部也开始吸湿;在第一阶段的干湿循环完成后,土体下部单元的饱和度在一定时间基本不变,即达到吸湿饱和状态(见图 6(d), (e)),但这 2 处的饱和度并未达到完全饱和状态 $S_{sat} = 1.0$, 其与 S_{sat} 的差异即为该深度处的残留含气量的大小。在经历第二次干湿循环后,土体不同高度处的含水量均保持稳定,从顶部至底部最终的饱和度逐渐升高,但都未达到完全饱和状态,残留含气量在砂样顶部最大,底部最小。原因在于,第一次干湿循环过程中的脱湿过程完成后,土体不同深度处的基质吸力并不相同,在土样顶部范围的脱湿过程最强烈、经历的脱湿时间最长,最终的基质吸力也最大,而从砂柱底部往下基质吸力逐渐减低,与残留含气量大小成正相关性。同时验证了节 2 理论模型中的假设,残留含气量的大小取决于多孔介质所经历的前期最大基质吸力。

总体而言,ISVH-TRAP 模型模拟的结果最接近真实值,而采用 ISVH 模型预测的结果较差,IDC 模型所得结果偏离实测值较大。在第二次含水量的干湿循环变化中,ISVH 模型、IDC 模型均不能较好地预测含水量的实际变化过程,尤以 IDC 模型模拟的结果偏差甚大。据此可知,非饱和多孔介质孔隙分布的不均匀性及其孔隙连通的复杂性,是造成含水量干湿循环过程中出现毛细滞回效应与气相残留现象的主要原因。而单一孔隙的理想孔隙介质并不真实存在,孔隙大小差异明显及分布的不均匀性、孔隙之间连通的随机性是多孔介质的基本特性,因此,在含水量反复变化的非饱和渗流问题的分析中,考虑这 2 类效应显得尤为重要。

为了更加清晰地阐明砂柱内土水状态的变化过程,图 7 给出了不同高度处饱和度和孔隙水压力的路径的演化,并与实测数据进行了比较。从图 7 中可以清楚地看出,残留含气量和毛细滞回效应对非饱和多孔介质土水状态的重要影响。通过与实测数据的对比,高度 70, 60 cm 处经历了一次明显的脱吸湿过程和一次较小含水量变化的脱吸湿过程,采用 ISVH-TRAP 模型预测的孔隙水压力、含水量接近实测数据。而在高度为 50 和 40 cm 处却经历了干湿后再脱湿、吸湿的 2 次明显的干湿循环变化。如图 7(c)所示,高度为 50 cm 处经历了 2 次不完全脱湿(未脱湿到残余含水量状态)之后的再吸湿过程。第一次脱湿之后的再吸湿曲线即进入主边界线内的扫描线路径而非沿主脱湿边界线变化,再次脱湿与吸湿路径将进入更小滞回圈的扫描线变化,含水量和

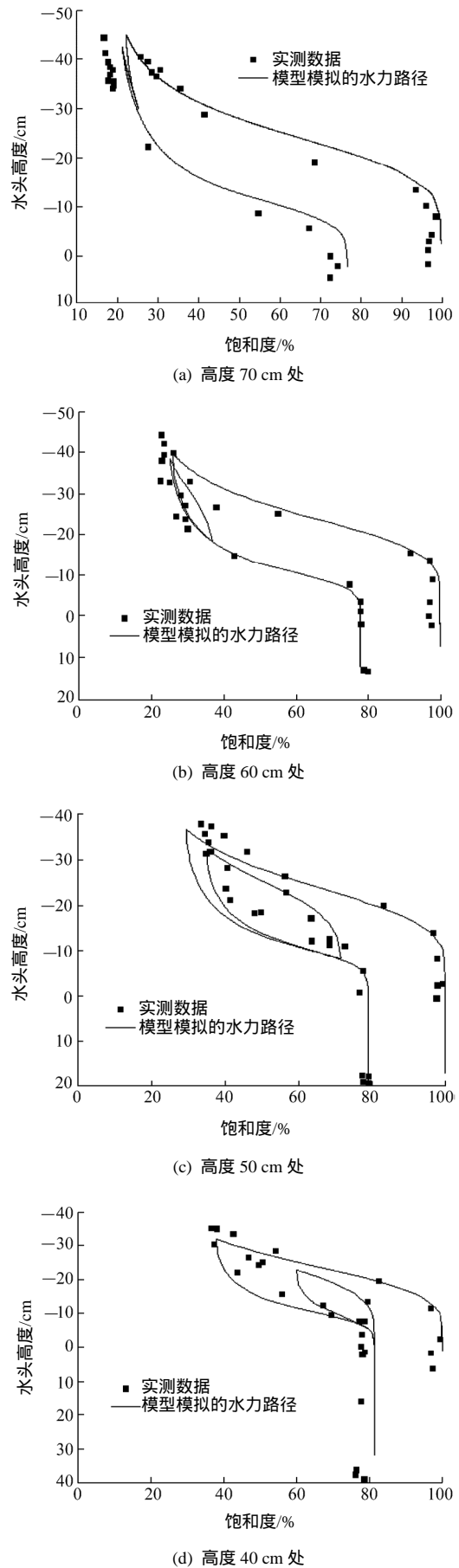


图 7 不同高度处水力路径变化
Fig.7 Variation of hydraulic paths at different heights

孔隙水压力的变化路径更加偏离主边界线。因此，采用主脱湿边界线路径(如 IDC)进行该类问题的模拟，所得结果必将偏离实测数据。考虑水力路径的滞回效应与残留含气量的影响，在这 60, 50, 40 cm 三个高度处模拟的路径与实测结果虽稍有偏差，但基本吻合，证实所建数值模型是可靠的。值得一提的是，在水力路径变化的模拟中砂样底部的正孔隙水压力的预测较好，证实上述建立的非饱和渗流有限元数值分析方法可作为饱和-非饱和多孔介质流动问题分析的有效手段。

4 结 论

本文基于毛细循环内变量土水特征关系滞回模型，通过多孔介质流动过程微观机制的分析，建立了能够考虑残留含气量影响的土水特征关系模型，建立了一个新的渗流理论模型，通过有限元数值分析手段对所建数值模型进行了验证，得到如下结论：

(1) 建立的 ISVH-TRAP 模型能够更加准确地模拟干湿循环水力路径变化下，非饱和多孔介质中土水状态的演化规律。

(2) 基于建立的土水特征关系模型，建立了能够考虑毛细滞回效应与残留含气量效应影响的非饱和土渗流理论模型。随后建立了渗流分析的数值模型，利用开发的有限元分析程序 U-DYSAC2，进一步将数值模型转化为程序代码，使得该代码能够进行任意含水量变化条件下非饱和多孔介质渗流问题的模拟分析。

(3) 通过与实测数据的分析比较，证实残留含气量对含水量的分布及水压力的大小有重要影响，在含水量反复变化的非饱和渗流分析中考虑残留含气量的毛细滞回模型显得十分重要。尽管本模型基本能够描述实测的结果，但仍有一定的偏差，需要进一步的完善。

参考文献(References)：

[1] 陈 盼, 魏厚振, 李 幻, 等. 多孔介质中两相流动过程的毛细滞回效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(10): 2 148-2 158. (CHEN Pan, WEI Houzhen, LI Huan, et al. Effect of capillary hysteresis on two-phase flow in porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 29(10): 2 148-2 158.(in Chinese))

[2] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.(ZHANG Fangzhi, CHEN Xiaoping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41-46.(in Chinese))

[3] CANONE D, FERRARIS S, SANDER G, et al. Interpretation of water

retention field measurements in relation to hysteresis phenomena[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4). doi: 10.1029/2008WR007068.

[4] YANG C, SHENG D C, CARTER J P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 41: 36-56.

[5] POULOVASSILIS A. The effect of the entrapped air on the hysteresis curves of a porous body and on its hydraulic conductivity[J]. Soil Science, 1970, 109(3): 154-162.

[6] STONESTROM D A, RUBIN J. Water-content dependence of trapped air in two soils[J]. Water Resources Research, 1989, 25(9): 1 947-1 958.

[7] MOHAMED M H A, SHARMA R S. Role of dynamic flow in relationships between suction head and degree of saturation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3): 286-294.

[8] VAN GEEL P J, SYKES J F. The importance of fluid entrapment, saturation hysteresis and residual saturations on the distribution of a lighter-than-water non-aqueous phase liquid in a variably saturated sand medium[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1997, 25(3/4): 249-270.

[9] PARKER J C, LENHARD R J, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous-media[J]. Water Resources Research, 1987, 23(4): 618-624.

[10] 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): 2 113-2 124.

[11] LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6): 646-655.

[12] PHAM H Q, FREDLUND D G, BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1 548-1 568.

[13] 李 幻, 韦昌富, 陈 辉, 等. 孔隙介质毛细滞回简化模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2 635-2 639.(LI Huan, WEI Changfu, CHEN Hui, et al. A simplified capillary hysteresis model of porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2 635-2 639.(in Chinese))

[14] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research, 2006, 42(7). doi: 10.1029/2005WR004594.

[15] WARDLAW N C, TAYLOR R P. Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behaviour in reservoir rocks[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1976, 24(2): 225-262.

[16] GERHARD J I, KUEPER B H, HECOX G R. The influence of waterflood design on the recovery of mobile DNAPLs[J]. Groundwater, 1998, 36(2): 283-292.

[17] LENHARD R J, PARKER J C. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow :2. permeability-saturation relations[J]. Water Resources Research, 1987, 23(12): 2 197-2 206.

[18] FENG M, FREDLUND D G. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements. in proceeding from theory to the practice of unsaturated soil mechanics[C]// Proceedings of the 52nd Canadian Geotechnical Conference. [S.l.]: [s.n.], 1999: 651-657.

[19] 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): 1 046-1 052.(XU Yanbin, WEI Changfu, 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): 1 046-1 052.(in Chinese))