

# 土体持水特性及孔隙水分布特性的试验研究<sup>\*</sup>

谭龙<sup>①</sup> 韦昌富<sup>②③</sup> 田慧会<sup>②</sup> 王卉<sup>③</sup> 张芹<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>山东省城乡建设勘察设计研究院 济南 250031)

(<sup>②</sup>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 武汉 430071)

(<sup>③</sup>桂林理工大学土木与建筑工程学院 桂林 541004)

**摘要** 采用轴平移技术对砂土、粉质黏土、黏土 3 种土质的土-水特征曲线进行了测试分析,并结合核磁共振技术测得了试样在不同基质吸力加载步条件下的  $T_2$  时间(横向弛豫时间)分布曲线,从微观角度分析了脱湿过程中孔隙水在土体中赋存分布的情况。实验结果表明:3 种土质的体积含水率随着控制吸力的增大而减少,该脱湿曲线可分为边界效应区、过渡区与残余区 3 个区域。其中,黏土的持水特性明显大于粉质黏土和砂土。核磁共振的试验结果与压力板仪获得的脱湿过程是对应的,从微观角度展示了土体的排水过程。在排水过程中,总体上具有较大势能的大孔隙水先排出,随后小孔隙开始排水,但这一规律并不绝对,由于土体孔隙结构的复杂性,会出现大小孔隙同时排水以及土样中水分重分布的现象。

**关键词** 土-水特征曲线 非饱和土 核磁共振 孔隙水分布状态  $T_2$  分布

中图分类号: P642.11 文献标识码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF PORE WATER DISTRIBUTION AND WATER-HOLDING CAPACITY OF SOIL

TAN Long<sup>①</sup> WEI Changfu<sup>②③</sup> TIAN Huihui<sup>②</sup> WANG Hui<sup>③</sup> ZHANG Qin<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>Shandong Province Inv. & Sur. Design Institute of Urb. & Rur. Construction, Jinan 250031)

(<sup>②</sup>State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(<sup>③</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004)

**Abstract** The soil water characteristic curves of sand, silty clay and clay are measured by axis translation technique. The  $T_2$  distribution curve of specimens are tested under different matric suction loading steps combining with nuclear magnetic resonance (NMR) technique. The distribution of pore water in soil is discussed with the  $T_2$  distribution curve from the microscopic point of view during drying process. The results show that volumetric water content gradually reduces with the increase of the suction. The drying curve can be divided into three sections: boundary effect zone, transition zone and residual zone. In addition, the clay water-holding capacity is obviously higher than that of silt and sand. The tests of NMR are corresponded with drying process in the pressure plate apparatus. The results of NMR tests further show the drainage process of soil from the microscopic of perspective.

\* 收稿日期: 2015-11-21; 收到修改稿日期: 2016-06-16.

基金项目: 国家自然科学基金(11372078, 51309055), 含天然气水合物土的关键试验技术与工程力学特性研究(NSFC51239010<sup>#</sup>) 资助.

第一作者简介: 谭龙(1988-), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程测试技术应用研究. Email: tanlongaini123@163.com

通讯作者简介: 韦昌富(1966-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事多相孔隙介质理论及其应用方面的研究. Email: cfwei@whrsm.ac.cn

On the whole, the large pore water with large potential energy is discharged first in the drainage process of soil, and then the water in small pores begins to drain. However, this rule is not absolute, because of the complexity of the soil pore structure. There will be a phenomenon of simultaneous discharge of different size porosity of pore water and the redistribution of pore water in soil occurred during the drying process.

**Key words** Soil-water characteristic curve, Unsaturated soil, NMR, Pore-water distribution,  $T_2$  distribution

## 0 引言

非饱和土是一种由土颗粒、水和气组成的三相介质体,不同的三相介质比例,土的工程力学性质也不相同。其中,通常采用土-水特征曲线(SWCC)来表征非饱和土的水和气两相含量的高度非线性的函数关系(张雪东,2010)。非饱和土的土-水特征曲线是定义其吸力与体积含水率或有效饱和度之间的关系曲线(Lu et al.,2012)。诸多的试验研究表明:土-水特征曲线是用来描述非饱和土的强度、渗透、水力和变形特性的重要工具(李志清等,2007;林鸿州等,2009)。

除此之外,非饱和孔隙介质中含水量的分布状态对其力学与水力学性质也具有重要的影响。已有研究表明,即使在相同的含水量条件下,土体中水分分布不同,也会使得非饱和土的渗流和强度特性表现出较大的差异(陈盼等,2010;Chen et al.,2013)。导致土体中水分差异主要有两种情况:(1)不同土类土体内部孔隙大小及分布不同,导致即使在相同的水力边界等渗流过程中,含水量在各类非饱和土中的含水量大小及分布状态不同;(2)同一种土体,由于边界条件的变化较为复杂,脱湿和吸湿两个过程中含水量的分布状态也会不同(Coates et al.,2007)。一般来说,土质对孔隙水分布的影响大于水力路径。究其原因,主要在于土体内孔隙大小及分布的差异导致了含水量赋存状态的不同,从而使得即使在相同的边界条件变化下,非饱和土体的力学与水力学特性迥异。因此,开展非饱和土体孔隙大小及分布的研究工作,是从机理上探究非饱和孔隙介质所表现出的各种不同表现特性的主要途径之一。

然而,作为岩土工程的研究对象,非饱和土是一种多相的多孔介质材料,其工程性质具有复杂性和多变性。这种复杂性和多变性主要受其微观或细观结构的控制,因此,对其微观结构进行研究具有重要的意义(陶高梁,2010)。由于当前测试仪器及技术的限制,开展非饱和土体微细观的测试工作受限,主

要集中于微观孔隙大小及分布的测试工作。目前测试岩土多孔介质微观孔隙的方法主要有CT扫描,压汞试验,扫描电子显微镜,核磁共振法等(施斌等,2001;陶高梁,2010;陈宝等,2011;李克亮,2012)。通过分析上述微观孔隙的测试方法发现,压汞和扫描电镜均需要对试样进行一定处理方可测试孔隙,测试完成后试样被破坏。CT测试方法可以在三维空间内无损获得岩土介质的孔隙分布,但CT图像分辨率偏低,精度不高(陶高梁,2010)。核磁共振法(NMR)是利用非饱和土中不同赋存状态的水相介质的氢核,在不同射频磁场的作用下产生不同的横向弛豫时间( $T_2$ )的性质,进而通过回波反演得到试样中孔隙水的 $T_2$ 时间分布曲线,在该曲线上不同的 $T_2$ 时间对应着被孔隙水占据的孔隙半径的大小,曲线下方的面积对应该孔隙半径范围内的水分含量(汪红志等,2008)。由于核磁共振测试方法中测试的是土样中孔隙水的氢核,不需要对试样进行扰动破坏;并且测试时间短,测试完成后可以继续其他试验。因此,核磁共振法是一种快速、无损测试孔隙水含量与分布的方法。

本文基于NMR技术并结合轴平移技术测定不同土质在各基质吸力下土体中孔隙水的分布特点,并进行了初步的机理探究,从微细观角度对不同土类的土-水特征曲线实测数据进行了解释,同时也获得了不同基质吸力加载步条件下非饱和土体中含水量的演化规律。本文的主要目的在于从微观机制上,探究不同土类土-水特征关系的变化过程及不同基质吸力加载步条件下土体内孔隙水的释放规律,从实测的结果进行机理的解释,清晰明了,便于相关理论模型的建立;同时也有益于拓展NMR技术在岩土工程测试中的应用

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

本试验采用的压力板仪(图1),其最大施加吸力为1500kPa;Mini-NMR(图2)的型号PQ-001,磁

场强度 0.52T, 磁体环境温度  $32 \pm 0.01^\circ\text{C}$ , 试样管的尺寸  $60\text{mm} \times \Phi 60\text{mm}$  (田慧会等, 2011)。

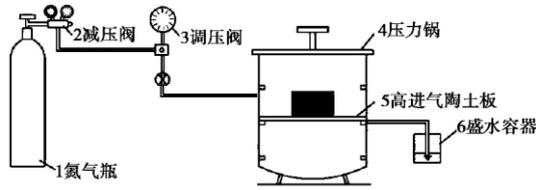


图 1 压力板仪示意图

Fig. 1 The sketch map of pressure plate apparatus

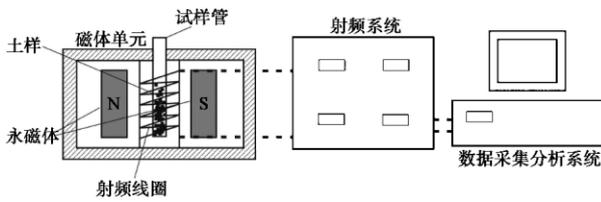


图 2 核磁共振测试示意图

Fig. 2 The sketch map of nuclear magnetic resonance

### 1.2 实验原理

压力板仪是运用轴平移技术, 即同时将土样中的气压和水压提高, 并保持其差值(基质吸力)不变。将土样中的负孔压提高至零, 从而避免了气蚀现象的发生。通过设定不同气压力值来测试土体中孔隙水的溢出量变化, 进而获得对应基质吸力下土体的含水量, 测试出土-水特征关系曲线(Lu et al., 2012)。

在核磁共振技术中, 主磁场施加到测试试样上, 其内不同赋存状态的氢核质子在刚开始的那一时刻的横向磁化矢量是最大的, 而后开始衰减至最大值的 37% 时所经历的时间为  $T_2$  (汪红志等, 2008)。

由于液态水的横向弛豫时间( $T_2$ ) 可以反映水分赋存位置的结构特征:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right)_{pore} \quad (1)$$

本文假定非饱和土中孔隙形状为球形, 则:

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right)_{pore} = \rho_2 \frac{3}{R} \quad (2)$$

式中,  $R$  为孔隙半径;  $\rho_2$  为与土质有关的常数 (Coates et al. 2007)。由公式 2 可知,  $T_2$  与  $R$  成正比。即在岩土介质中孔隙越大  $T_2$  值越大, 反之亦然。

### 1.3 试验土基本物性指标

本文的试验土为砂土、粉质黏土、黏土。其主要的物性参数(表 1) 粒径级配曲线如图 3 所示。

表 1 土的基本物性指标  
Table 1 Physical properties of soils

土质	风干含水率 /%	比重	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
黏土	4.60	2.72	34.2	23.5	10.7
粉质黏土	1.70	2.71	23.2	13.1	10.1
砂土	0.80	2.68	/	/	/

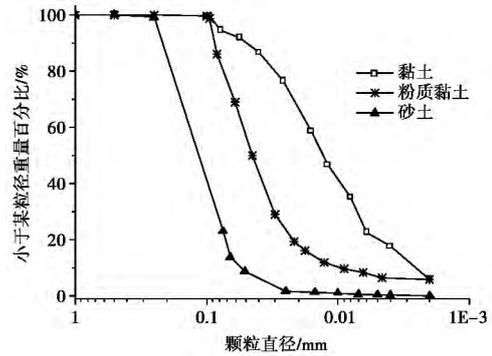


图 3 砂土、粉质黏土与黏土的粒径级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curves of sand, silty clay and clay

### 1.4 实验过程

采用砂土、粉质黏土、黏土 3 种土质制作试样, 通过添加蒸馏水配制初始质量含水率为 15.00% 的 3 组土样备用, 本试验采用的是聚四氟乙烯环刀, 千斤顶静压制样(田慧会等, 2014)。控制干密度均为  $1.70\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 然后将制备好的环刀试样抽真空饱和。将饱和试样取出称重, 保鲜膜密封后, 进行核磁测试。采集核磁数据后, 将去掉保鲜膜的试样放到压力板仪中进行脱湿试验, 在每一级控制吸力平衡后, 称重环刀试样, 保鲜膜密封并进行核磁测试, 而后进行下一级吸力的脱湿, 直至完成。脱湿试验分级吸力为:  $10\text{kPa} \rightarrow 20\text{kPa} \rightarrow 40\text{kPa} \rightarrow 80\text{kPa} \rightarrow 120\text{kPa} \rightarrow 200\text{kPa} \rightarrow 290\text{kPa} \rightarrow 400\text{kPa} \rightarrow 800\text{kPa} \rightarrow 1200\text{kPa}$ 。脱湿试验完成后, 对采集的核磁数据进行处理, 便可得到 3 组试样在各级吸力下的  $T_2$  时间分布曲线。

## 2 试验结果与分析

本次试验对试样的土-水特征关系曲线的实测结果采用 V-G 模型进行数据的拟合 (Van, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (3)$$

式3中,  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  为经验参数, 为了简化参数, 其中  $m = 1 - 1/n$ 。

## 2.1 不同土质对土-水特征曲线的影响

土-水特征曲线的试验结果如图4所示, 本次实验采用砂土、粉质黏土、黏土3组试样为研究对象。其中砂土、粉质黏土、黏土3种土质的饱和体积含水率分别为40.68%、41.31%、47.60%。采用V-G模型对试验数据进行拟合(图4中实线所示), 拟合获得的参数(表2)。从拟合结果来看, V-G模型能够较好地拟合试样的土-水特征曲线。

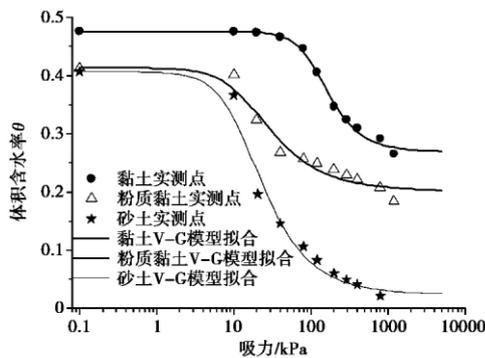


图4 不同土质类土的土-水特征关系曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves of different soils

表2 V-G模型参数表

Table 2 Parameters of V-G model

土质	$\alpha$	$n$	$m$	$\theta_r / \%$	$\theta_s / \%$	$R^2$
黏土	0.01	2.45	0.59	26.90	47.60	0.96
粉质黏土	0.07	1.81	0.45	20.10	41.31	0.96
砂土	0.08	1.94	0.49	2.40	40.68	0.97

从图4可知, 3种土质的体积含水率随着控制吸力的增大而不断减少, 并逐渐趋于稳定。脱湿曲线是一条高度非线性的函数曲线, 该脱湿曲线可明显分为边界效应区、过渡区与残余区3个区域(White et al., 1970; 张雪东, 2010)。

以砂土为例, 在0~10kPa曲线段, 砂土中孔隙完全被水充满, 吸力的变化对土中含水量的影响较小, 此区域即为边界效应区。另外, 吸力在10kPa附近时, 试样开始少量排水, 说明砂土试样的进气值近似为10kPa。在10~200kPa曲线段, 达到砂土试样进气值后, 随着吸力的增大, 气泡开始进入到最大孔

隙中, 孔隙水开始排出。由于大孔隙的水其毛细效应较小, 此时孔隙水排出较快, 脱湿曲线进入过渡区。而后在200~1200kPa曲线段, 由于部分孔隙水封存在小孔隙里, 孔隙水的排出速度逐渐减缓, 并趋于稳定, 此阶段即为脱湿曲线的残余区。

从图4中可以看出, 粉质黏土的土-水特征曲线的第一部分即边界效应区与砂土的结果类似, 随着吸力的进一步增大, 该粉质黏土的持水能力明显大于砂土。该试验现象可以通过下面的核磁共振试验来说明, 根据孔隙水的  $T_2$  时间分布曲线图5可知, 当土样饱和时, 粉质黏土的大孔径分布(10~100ms范围)和砂土的类似。但是, 当孔隙水的弛豫时间在0.1~1ms的范围内时(即较小孔隙), 粉质黏土中所含的孔隙明显多于砂土。也就是说, 尽管两者土样的孔隙率较接近, 但是粉质黏土中小孔隙占据的部分很大, 因此对应的持水性也较强。

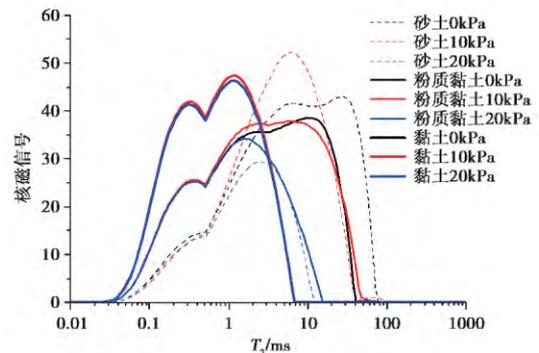


图5 不同土质类在0~20kPa吸力下的  $T_2$  分布曲线

Fig. 5  $T_2$  distribution curves of different soils for 0~20kPa suction

通过对比3种土质的脱湿曲线可知, 砂土、粉质黏土、黏土的同一流阶段对应的基质吸力范围并不一致, 相同吸力下, 3种土质的体积含水量: 黏土>粉质黏土>砂土。这是因为土颗粒比表面积及孔隙分布不同, 造成了土颗粒中孔隙水的赋存状态和土颗粒的持水性有所差异。从图4可知, 黏土的持水性明显大于粉质黏土和砂土, 进气值较大(高达40kPa), 而砂土的进气值仅为几个kPa左右。由于砂土和粉质黏土脱水相对容易, 在较小的吸力范围, 即可获得一个形状较为完整的土-水特征曲线, 而黏土由于持水性好, 排水速度慢, 绘制完整的土-水特征曲线需要更大的吸力范围。

## 2.2 不同压力条件下孔隙水的分布规律

由NMR试验原理可知在岩土介质中孔径越

大  $T_2$  值越大。此外,  $T_2$  时间分布曲线的纵坐标为核磁信号(无量纲), 核磁信号对应的是孔隙水中的氢核, 也即孔隙水。以图 5 为例, 图中单个曲线与横坐标围成的区域定义为峰面积, 峰面积代表试样中此刻吸力下孔隙水的赋存量(谭龙等, 2015)。因此本次实验采用脱湿曲线结合砂土、粉质黏土、黏土的  $T_2$  时间分布曲线, 来分析土体在脱湿过程中孔隙水的微观变化过程。

图 6 所示是砂土脱湿过程中孔隙水的分布情况。从图 6 可知, 随着吸力的增大,  $T_2$  时间分布曲线的峰面积不断减小, 也即孔隙水含量不断减少。在 0~10kPa 吸力段, 10kPa 时的  $T_2$  曲线的大孔隙(10~100ms) 的峰面积在减少, 说明大孔隙水在排出, 而在小孔隙(对应图中的  $T_2$  时间 0.1~10ms) 的峰面积相对 0kPa 时的峰面积不是减少而是增加。针对这一现象, Bird et al.(2005) 分析认为试样中的气体产生的影响, 同时也与土体收缩相关。田慧会等(2014) 判断为气体进入饱和和试样后, 大孔隙中部分水被气体置换, 从而增加了相对小孔隙水的含量, 进而出现了大孔隙排水, 小孔隙峰面积增加的现象。

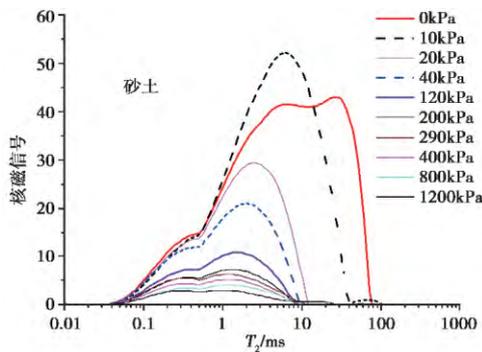


图 6 砂土在各级吸力下的  $T_2$  时间分布曲线  
Fig. 6  $T_2$  distribution curves of sand for each suction

从图 6 可知, 在 10~200kPa 的吸力段,  $T_2$  时间分布曲线的峰面积快速下降, 孔隙水快速排出这一趋势与脱湿曲线的过渡区是一致的, 并且在 10~100ms 范围内的核磁信号随着吸力的增大快速变为零, 位于 0.01~10ms 范围内的核磁信号同时也在降低。说明大小孔隙的水都在排出, 并且较大孔隙中的水分先排完。

从图 6 可知, 在 120~1200kPa 的吸力段,  $T_2$  时间分布曲线的峰面积随着吸力的增加, 降幅逐渐减小。此阶段排水的孔隙位于  $T_2$  时间分布曲线的 0.1~10ms 范围内, 每增加一级吸力, 大吸力的  $T_2$  时间分布曲线覆盖在小吸力的  $T_2$  时间分布曲线之上。

随着吸力的进一步增加, 最终达到残余状态, 则此时对应的  $T_2$  分布曲线的面积即为残余含水量。该核磁共振试验获得的土样中的水分变化规律与压力板仪中获得的脱湿过程是一致的。

图 7 所示是粉质黏土脱湿过程中孔隙水的分布情况。在 0~10kPa 吸力段, 与砂土类似, 在 10kPa 时的  $T_2$  曲线的大孔隙(10~100ms) 的峰面积在减少, 而在小孔隙(0.1~10ms) 的峰面积在增加。在 10~120kPa 的吸力段, 随着吸力的增大,  $T_2$  时间分布曲线的峰面积不断快速下降, 说明孔隙水快速排出, 特别是孔径在 10~100ms 的核磁信号变为零, 说明此对应这部分的孔隙水已完全排出。在 120~1200kPa 吸力段, 孔隙水分布在 0.1~10ms 之间, 随着吸力的增加, 孔隙逐渐排出, 并且大小孔隙的水分是同时排出的。Bird et al.(2005) 在测试孔隙水分布时, 不同吸力作用下同样发生了类似现象。这一现象表明对于孔隙结构复杂的土体, 大孔隙中水并不总是比小孔隙中水先排出。

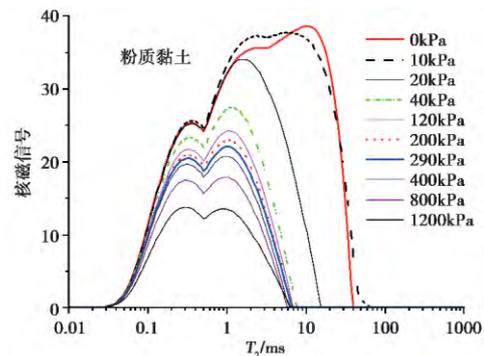


图 7 粉质黏土在各级吸力下的  $T_2$  分布曲线  
Fig. 7  $T_2$  distribution curves of silt clay for each suction

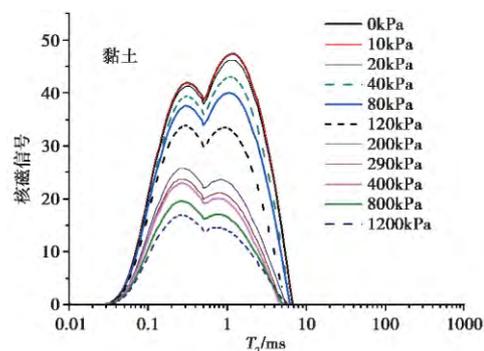


图 8 黏土在各级吸力下的  $T_2$  分布曲线  
Fig. 8  $T_2$  distribution curves of clay for each suction

图 8 所示的是黏土脱湿过程中  $T_2$  时间分布曲线。从图 8 可知, 在 0~40kPa 吸力段, 并未出现大

孔隙排水,小孔隙中水增加的现象,我们认为这与黏土的颗粒粒径较小有关系。吸力在 40kPa 时,其  $T_2$  时间分布曲线的峰面积才开始降低,说明黏土具有较大的进气值。在 40~200kPa 吸力段,随着吸力的增加,峰面积快速降低。在 200~1200kPa 吸力段,随着吸力的增加, $T_2$  时间分布曲线的峰值面积降幅逐渐减小。在 0~1200kPa 吸力段,每加载一级吸力值, $T_2$  时间分布曲线出现规律性的层叠下降现象,这与砂土和粉质黏土的孔隙位于  $T_2$  时间分布曲线的 0.1~10ms 范围内的变化规律是一致的。

图 9 所示的是不同土质在 0~1200kPa 吸力下的  $T_2$  时间分布曲线。从图 9 可知,在饱和(0kPa)状态下,黏土试样中孔隙水的弛豫时间在 0.01~10ms 范围内,而砂土和粉质黏土的在 0.01~100ms 范围内。这是与黏土的土性有关,同样干密度情况下,黏土的粒径更小,比表面积更大,试样中的孔隙半径也会比较小。

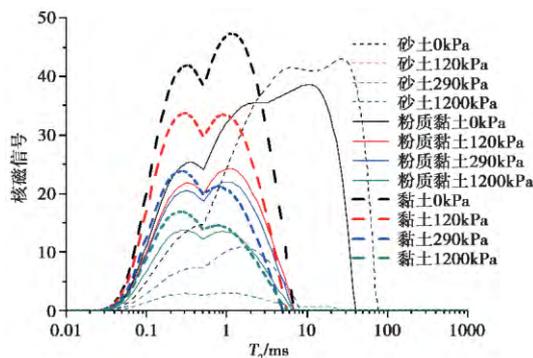


图 9 不同土质在 0~1200kPa 吸力下的  $T_2$  分布曲线  
Fig. 9  $T_2$  distribution curves of different soils for 0~1200kPa suction

随着吸力的增加,3 种土质的峰面积都开始下降。同样吸力条件下,砂土和粉质黏土的分布在大孔隙(10~100ms)之间的孔隙水降幅明显,相对在小孔隙(0.1~10ms)的孔隙水下降较小;黏土的孔隙水分布在相对较小(0.1~10ms)的孔隙,同样优先排出相对大一点孔隙的水(1~10ms)。3 种土质总体上具有较大势能的大孔隙水先排出,随后小孔隙开始排水,但这一规律并不是绝对的,由于土体孔隙结构的复杂性,会出现大小孔隙同时排水。

### 3 结 论

本文采用压力板仪测定了砂土、粉质黏土、黏土 3 组土质在 0~1200kPa 基质吸力范围内进行了土-

水特征关系曲线测试,同时采用了核磁共振技术测试了各基质吸力下试样的  $T_2$  时间分布曲线,基于  $T_2$  值反演获得了各土类土体中孔隙水的赋存状态。在此基础上获得了以下有益结论:

(1) 3 种土质的排水过程主要分为 3 个阶段:边界效应区、过渡区、残余区。不同土类同一排水阶段对应的基质吸力范围并不一致;相同基质吸力下,黏土的含水率最高,粉质黏土次之,砂土最少,黏土的持水性最强。

(2) 砂土、粉质黏土、黏土的  $T_2$  分布曲线有其共同点,也有其各自不同的特点。主要在于,在排水过程中,总体上具有较大势能的大孔隙水先排出,随后小孔隙开始排水,但这一规律并不是绝对的,由于土体孔隙结构的复杂性,会出现大小孔隙同时排水以及土样中水分重分布的现象;所不同的是,各种土类的大小孔隙所占的比例和分布不同,造成了排水过程中  $T_2$  分布曲线呈现不同的变化规律,反映了不同土质中水分的排出特性。

(3) 核磁共振测试技术获得的  $T_2$  分布曲线能够反应土体孔隙中水分的赋存状态及其变化规律,验证了土体本身的物理性质以及孔隙大小及分布对孔隙水的赋存特性有重要影响。因此根据该微观测测试可对宏观现象的机理进行解释,并进一步将核磁共振技术在岩土工程领域中的应用进行了推广。

### 参 考 文 献

- Bird N R A, Preston A R, Randall E W, et al. 2005. Measurement of the size distribution of water-filled pores at different matric potentials by stray field nuclear magnetic resonance [J]. *European Journal of Soil Science*, **56**(1): 135~143.
- Cadoret T, Mavko G, Zinszner B. 1998. Fluid distribution effect on sonic attenuation in partially saturated limestones [J]. *Geophysics*, **63**(1): 154~160.
- Chen B, Zhu R, Chang F Z. 2011. Microstructural characteristics of volumetric deformation of clay under different compression stresses [J]. *Rock and Soil Mechanics*, **32**(S1): 95~99, 369.
- Chen P, Wei C F, Liu J, et al. 2013. Strength Theory Model of Unsaturated Soils with Suction Stress Concept [J]. *Journal of Applied Mathematics*, **8**: 245~262.
- Chen P, Wei H Z, Li H, et al. 2010. Effect of capillary hysteresis on two-phase flow in porous media [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **29**(10): 2148~2158.
- Coates G, Xiao L Z, Prammer M, et al. 2007. NMR logging principles and applications [M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Dong Q, Hou L, Zhao B Y. 2012. Influence of matric suction on shear

- strength of unsaturated silty sand[J]. Journal of Central South University( Science and Technology) **43**( 10) : 4017~4021.
- Li K L. 2012. Microstructure of silica Fume - Metakaolin based Geopolymer[J]. Journal of Building Materials **15**( 4) : 553~556.
- Li Z Q ,Li T ,Hu R L ,et al. 2007. Methods for testing and predicting of SWCC in unsaturated soil mechanics[J]. Journal of Engineering Geology **15**( 5) : 700~707.
- Lin H Z ,Yu Y Z ,Li G X ,et al. 2009. On application of Soil - Water characteristic curves to landslide forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **28**( 12) : 2569~2576.
- Lu N ,Likos W J ,Wei C F ,et al. 2012. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Beijing: China Higher Education Press: 127~136.
- Shi B ,Jiang H T. 2001. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **20**( 6) : 864~870.
- Tan L ,Wei C F ,Tian H H ,et al. 2015. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low - field nuclear magnetic resonance[J]. Rock and Soil Mechanic **36**( 6) : 1566~1572.
- Tao G L. 2010. Fractal approach on pore structure of rock and soil porous media and its applications[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology.
- Tian H H ,Wei C F ,Wei H Z ,et al. 2014. A NMR -based analysis of drying processes of compacted clayey sands[J]. Rock and Soil Mechanic **35**( 8) : 2129~2136.
- Tian H H ,Wei H Z ,Yan R T ,et al. 2011. Application of low -field NMR to the studies of the THF hydrate formation process[J]. Natural Gas Industry **31**( 7) : 97~100.
- Van Genuchten M T. 1980. A closed -form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal **44**( 5) : 892~895.
- Wang H Z ,Zhang X L ,Wu J. 2008. Test guide for magnetic resonance imaging[M]. Beijing: Science Press: 3~10.
- White N F ,Duke H R ,Sunada D K ,et al. 1970. Physics of desaturation in porous materials[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division , **96**: 165~191.
- Zhang X D. 2010. Research on the principle problem relating to soil - water characteristic curve and its application in unsaturated soil mechanics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University.
- 陈宝 朱嵘 ,常防震. 2011. 不同压应力作用下黏土体积变形的微观特征[J]. 岩土力学 **32**( 增刊) : 95~99 ,369.
- 陈盼 魏厚振 李幻 等. 2010. 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 **29**( 10) : 2148~2158.
- Coates G ,肖立志 ,Prammer M ,等. 2007. 核磁共振测井原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 董倩 侯龙 赵宝云. 2012. 基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报( 自然科学版) **43**( 10) : 4017~4021.
- 李克亮. 2012. 硅粉 - 偏高岭土基聚合物微观结构分析[J]. 建筑材料学报 **15**( 4) : 553~556.
- 李志清 李涛 胡瑞林 等. 2007. 非饱和土土水特征曲线( SWCC) 测试与预测[J]. 工程地质学报 **15**( 5) : 700~707.
- 林鸿州 于玉贞 李广信 等. 2009. 土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J]. 岩石力学与工程学报 **28**( 12) : 2569~2576.
- Lu N ,Likos W J ,韦昌富 等. 2012. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社: 127~136.
- 施斌 姜洪涛. 2001. 黏性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报 **20**( 6) : 864~870.
- 谭龙 韦昌富 田慧会 等. 2015. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学 **36**( 6) : 1566~1572.
- 陶高梁. 2010. 岩土多孔介质孔隙结构的分形研究及其应用[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- 田慧会 韦昌富 魏厚振 等. 2014. 压实黏质砂土脱湿过程影响机制的核磁共振分析[J]. 岩土力学 **35**( 8) : 2129~2136.
- 田慧会 魏厚振 颜荣涛 等. 2011. 低场核磁共振在研究四氢呋喃水合物形成过程中的应用[J]. 天然气工业 **31**( 7) : 97~100.
- 汪红志 张学龙 武杰. 2008. 核磁共振成像技术试验教程[M]. 北京: 科学出版社: 3~10.
- 张雪东. 2010. 土水特征曲线及其在非饱和土力学中应用的基本问题研究[D]. 北京: 北京交通大学