

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2129-08

压实黏质砂土脱湿过程影响机制的核磁共振分析

田慧会¹, 韦昌富¹, 魏厚振¹, 陈 盼¹, 程方权²

(1. 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;

2. 长江岩土工程总公司, 武汉 430071)

摘 要: 通过对具有不同初始含水率和干密度的两种压实黏质砂土的脱湿曲线进行测试、分析和对比, 并结合核磁共振技术, 探讨了干密度、初始含水率和土样组分对压实黏质砂土脱湿过程的影响规律。利用核磁共振测得了试样在各级吸力下的 T_2 时间(横向弛豫时间)分布曲线, 定性地探讨了不同吸力下试样中的水分分布特征, 揭示了干密度、初始含水率和土样组分对试样脱湿过程的微观机制影响。试验结果表明: 干密度仅在低基质吸力条件下对试样脱湿过程产生重要影响, 而在高吸力条件下初始含水率和试样组分起主导作用; 核磁共振结果证实在压实黏质砂土中, 小孔隙结构主要由初始含水率和试样组分控制, 而大孔隙的结构主要取决于干密度; 试样组分对压实土的内部结构和孔隙大小分布的影响比初始含水率大。

关 键 词: 核磁共振; 压实土; 脱湿特性曲线; T_2 分布曲线; 持水性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

A NMR-based analysis of drying processes of compacted clayey sands

TIAN Hui-hui¹, WEI Chang-fu¹, WEI Hou-zhen¹, CHEN Pan¹, CHENG Fang-quan²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430071, China)

Abstract: Drying characteristic curves for two compacted clayey sands with different dry densities and initial moisture contents were measured, analyzed and compared. Based on the nuclear magnetic resonance (NMR) measurements, the effect of dry density, initial moisture content and soil composition on the drying characteristics of the compacted soils was investigated. The T_2 (spin-spin relaxation time) distribution curves at various suctions were measured and used to characterize the moisture distributions in the soils, and the effect of the dry density, initial moisture content and soil composition on the drying process of the compacted soils were analyzed. The results show that the effect of dry density on the drying process is significant only at low matric suction, and for the soils with high matric suction, the effect of the initial moisture content and soil composition becomes important; based on the analysis of the NMR measurements, it is also shown that in compacted clayey sands, the structure and content of micropores are mainly determined by the initial moisture content and soil composition, whereas those of macropores are controlled by the dry density; soil composition has more significant influence on the internal structure and pore-size distribution of compacted soils than initial moisture content.

Key words: nuclear magnetic resonance; compacted soil; drying characteristic curve; T_2 distribution curve; water-retention characteristic

1 引 言

土-水特征曲线(SWCC)是指非饱和土的基质

吸力($\Psi = u_a - u_w$)与含水率(饱和度 $S = V_w / V_v$ 或质量含水率 $w = m_w / m_s$)之间的关系。土-水特征曲线受土的孔隙和粒径形状及大小分布、土体密度、

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. NSFC #11072255); 中国科学院重要方向性项目(No. #KZCX2-YW-JS108); 广西自然科学基金重点项目(No. 2011GXNSFE018004)。

第一作者简介: 田慧会, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事低场核磁共振在研究岩土介质中水分含量与分布、相变等过程中的应用。

E-mail: huxiaolan721@163.com

通讯作者: 韦昌富, 1966 年生, 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工作。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

有机物含量、黏土含量和矿物持水特性等因素的影响,因此,土-水特征曲线包含了决定土体力学强度、水力和变形特性等的信息^[1-3]。众多试验研究表明,土-水特征曲线与非饱和土的渗透系数、抗剪强度、体应变及持水特性等都存在一定的联系,例如 Vanapalli 等^[4]基于土-水特征曲线求得了非饱和冰渍土的剪切强度,预测结果与试验数据相关性很好; van Genuchten^[5]早在 1980 年就利用土-水特征曲线推得了非饱和土的水力传导系数。因此,土-水特征曲线是描述非饱和土-水力特性的一个关键。

目前确定土-水特征曲线的方法主要分为直接测试方法和间接预测方法。传统的直接测试方法主要有轴平移技术法、张力计法、时域反射法(TDR)、滤纸法、离心机法、盐溶液法等^[1,6],但这些方法耗时长、成本高且适用的吸力范围有限,即超过其适用的吸力范围,精度就会大大降低。同时这些方法的精度受试验过程中具体操作的影响较大,且试验数据只对与试验土样处于同等条件下的土体有效,即适用性较差。因此,诸多学者开始寻求一些具有普适性且简单快速的间接预测土-水特征曲线的方法。目前间接预测方法主要有经验公式法,如 V-G 模型、土壤转换函数法(如利用土粒粒径或孔隙分布预测 SWCC)、分形几何法(利用土体粒径分布、孔径分布、孔隙连通状况等的分形特征来估计土-水特征曲线)。这些方法的优点是简单快速,但这些模型中要么将土体简单化,如假想土体中孔隙为平行毛细管,要么模型中参数没有明确的物理意义。另外,对不同土体或同一土体不同干密度的土-水特征曲线的变化并不能给出其微观机制,即这些模型的外推性较差。因此,弄清土-水特征曲线变化的微观机制具有重要的科学意义和工程价值。

核磁共振(NMR)技术是一种研究单位体积材料中质子(即氢核)含量与分布的无损探测技术。核磁共振技术通过利用位于一个均匀磁场(主磁场)中具有自旋磁矩的质子群在干扰射频磁场的作用下发生偏转、失去平衡、当射频干扰停止后质子群从非平衡态恢复到平衡状态这一过程,测定核磁信号自由衰减(即 FID)曲线。由于 FID 曲线上的第 1 个点(即峰值点)与试样所含质子数成正比^[7],因此, FID 峰值点可用于测定土样含水率。目前已有大量试验证实了此方法的可行性及精度^[8-9]。同时, FID 曲线的形状与质子横向弛豫时间(T_2)有关, T_2 能反映质子周围的物理化学环境。通过傅里叶转换,可以得到土样中孔隙水的 T_2 时间分布曲线,该分布曲线下方的峰面积代表对应 T_2 范围内的核磁

信号,也即含水率^[10-11]。假设材料满足快速扩散的条件^[12],则土体中孔隙水的 T_2 值与其所处的土体内部孔隙结构直接相关,即

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{S}{V} \quad (1)$$

式中: ρ_2 为横向弛豫率,与土的物理化学性质有关^[13]; S 、 V 分别为水分所处的孔隙表面积与体积大小。假设土体中孔隙形状为柱形,则式(1)又可简写为

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{2}{R} \quad (2)$$

上式表明,孔隙水 T_2 值与孔隙半径 R 成正比,即束缚水或小孔隙中水的 T_2 值比大孔隙中水的 T_2 值小。基于此理论基础,土样的 T_2 时间分布曲线就能反应岩土介质中孔隙水分布特征^[12,14]。

本文基于核磁共振技术测量水分含量与孔隙水分布的应用,首次联合轴平移技术测定了黏质砂土脱湿过程中各吸力下水分在土体中的分布特点,分析了土体脱湿特性及其随干密度、初始含水率、土样组成等因素变化的规律,从微观角度为系统研究土-水特征曲线提供参考资料,同时也为核磁共振技术在岩土工程领域中的应用提供一些借鉴性的操作方法和分析思路。

2 试验方法与过程

2.1 试验设备

本试验所涉及的仪器包括压力板仪和核磁共振仪。后者为苏州纽迈公司研制的型号为 PQ-001 的 MiniNMR 核磁共振分析仪,其结构组成如图 1 所示。核磁共振分析仪主要由永磁体、试样管、射频系统和数据采集分析系统组成。永久磁体磁场强度为 0.52 T (特斯拉),为了保证主磁场的均匀性与稳定性,磁体温度维持在 32 ± 0.01 °C,试样管的有效测试区域为 $\phi 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。有关压力板仪的介绍详见文献[15]。

2.2 试验材料及步骤

采用砂粒和黏粒按 30%黏 70%砂(A)以及 50%黏 50%砂(B)配制两组土样,添加去离子蒸馏水(自制)至设定的初始含水率(A组为 10%和 15%,B组为 15%)。为了排除铁磁物质对主磁场均匀性的影响,这里采用规格为 $\phi 45 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的聚四氟乙烯环刀取代不锈钢环刀制样。利用千斤顶压制 3 种干密度为 1.6、1.7、1.8 g/cm³ 土样。为了讨论初始含水率对脱湿过程的影响,对 A 样配置了 2 种初始含水率分别为 10%和 15%和 3 种干密度为 1.6、

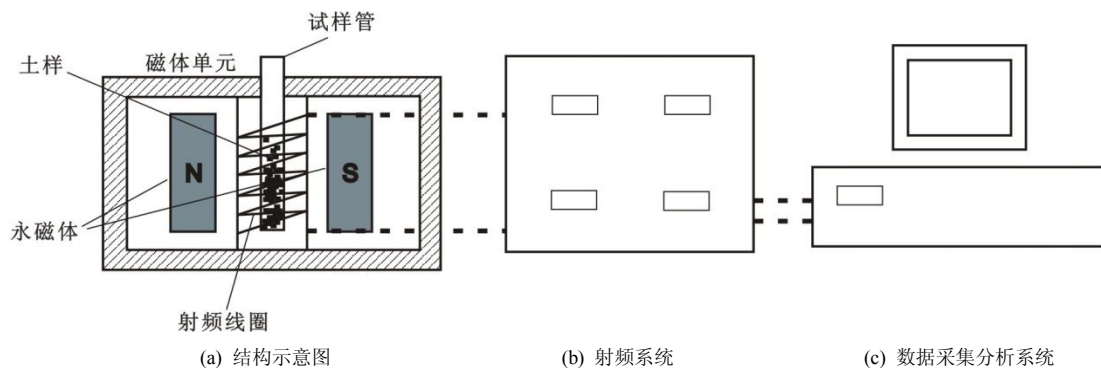


图 1 核磁共振测试系统
Fig.1 Nuclear magnetic resonance test system

1.7、1.8 g/cm³ 的 6 个试样, 编号分别为 A6-10、A7-10、A8-10 和 A6-15、A7-15、A8-15; 对 B 组配置了初始含水率为 15% 的 3 种干密度为 1.6、1.7 和 1.8 g/cm³ 的 3 个试样, 编号为 B6-15、B7-15 和 B8-15。以编号 A6-10 为例, A 代表是 A 组试样, 6 对应于干密度 1.6 g/cm³, 10 表明初始含水率为 10%。

把制备好的环刀样装入饱和器中, 同进气值为 300 kPa 的陶土板一起利用抽真空法饱和 4 h, 然后浸泡 24 h。将完全饱和的试样从饱和器中取出, 称好重量, 放入核磁共振仪试样管中进行核磁试验, 然后快速取出放置于压力板仪内安放好的饱和陶土板上, 为了保证脱湿过程中试样水力路径的连续性, 必须要确保环刀样底部与陶土板之间接触良好。密封压力锅, 施加设定的吸力, 出水平衡后, 开锅取出试样, 快速称重并放入核磁共振仪试样管中进行核磁试验, 然后取出试样重新放入压力锅内的陶土板上, 密封压力锅施加下一级吸力。重复上述步骤, 直至试验完成。本试验设计施加的吸力序列为 0、10、20、30、50、80、120、170、220、280 kPa。试验完成后, 对所有试样的 FID 曲线进行反演分析, 得出试样在各级吸力下的 T_2 时间分布曲线。

3 试验结果与分析

试验测得了 A、B 两组 9 个试样的脱湿曲线和各级吸力下的 T_2 时间分布曲线。

图 2 给出了 A 组试样的脱湿曲线。根据各试样脱湿曲线在 $w-(u_a - u_w)$ 空间中的位置与形状的变化规律可以将试样脱湿曲线分为 3 个阶段: ①在吸力范围 0~10 kPa 之间, 相同干密度试样的脱湿曲线具有相似的变化趋势且进气值近似相等, 即此吸力范围内, 干密度对脱湿曲线的影响大于初始含水率, 且干密度小的试样脱湿曲线更陡, 排水更快; ②在 10~50 kPa 范围内, 所有脱湿曲线的位置与形状差别较小; ③在 50~280 kPa 范围内, 相同初始

含水率试样的脱湿曲线基本重合, 即此阶段的初始含水率是影响脱湿曲线的关键因素, 初始含水率为 15% 的试样脱湿曲线较平缓, 具有更好的持水性, 同一吸力下, 两种不同初始含水率试样的重量含水率相差约 1.35%。因此, 10~50 kPa 阶段可以解释为是对脱湿曲线起主导作用的因素由干密度转变为初始含水率的过程。总体来说, 干密度与初始含水率较大的试样始终具有较好的持水性, Vanapalli 等^[16]和伊盼盼等^[15]也曾发现干密度和初始含水率较大的试样脱湿曲线较平缓, 持水性较好, 但并未指出两者对脱湿曲线起主导作用的具体吸力范围。

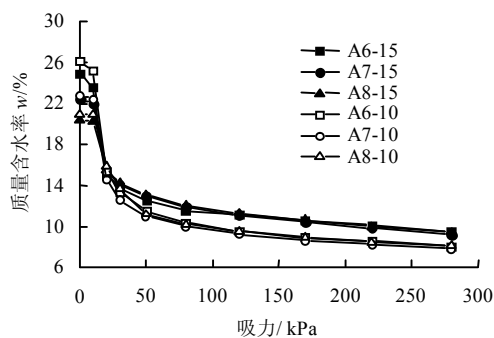


图 2 A 组试样在不同干密度和初始含水率下的脱湿曲线
Fig.2 Drying curves of Group A with different dry density and initial water content

为了考察组分对土体脱湿曲线的影响, 图 3 给出了 A、B 两组试样初始含水率为 15%、干密度为 1.6、1.7、1.8 g/cm³ 的 6 个试样的脱湿曲线。可见, 类似 A 组所有试样的进气值变化范围, B 组试样的进气值也在 0~10 kPa 之间, 脱湿曲线可分为 2 个阶段: ①0~10 kPa, 两组试样中具有相同干密度的试样脱湿曲线较接近并具有类似的变化趋势, 在本试验所涉及的干密度变化范围内, 干密度对进气值的影响不是很明显; ②10~280 kPa, 两组试样脱湿曲线差别明显, 同组试样的脱湿曲线基本重叠, 即

在本试验所涉及的干密度变化范围内,干密度对此吸力范围的脱湿曲线基本没有影响,Baker 等^[17]通过对诸多土样脱湿试验数据的总结也得出在一定吸力范围内(具体的吸力范围与土体组分有关),基质吸力与重量含水率的关系不受干密度影响。对比 A、B 两组试样在 10~280 kPa 的脱湿曲线发现,黏粒含量较高的 B 组试样始终具有更好的持水性,同一吸力下重量含水率比 A 组试样高约 3.5%。对比 A 组试样初始含水率在此吸力范围内对脱湿曲线的影响(同一吸力下,不同初始含水率试样相差 1.35%)可发现,在本试验涉及的干密度与初始含水率范围内,试样组分对脱湿过程的影响比初始含水率大。

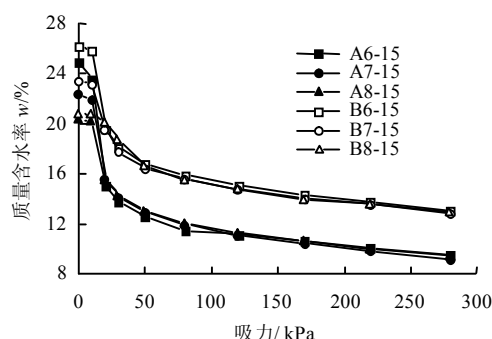


图3 A 和 B 两组试样在不同干密度下的脱湿曲线
Fig.3 Drying curves of Group A and B with different dry density

上述主要针对脱湿曲线的特性随干密度、初始含水率和试样组分的变化规律进行了讨论。在本试验所涉及的条件下,所有试样的进气值均在 0~10 kPa 之间。干密度只在低吸力范围内影响脱湿曲线,而初始含水率与试样组分在高吸力范围内影响脱湿曲线,且试样组分的影响大于初始含水率。总体来说干密度、初始含水率和黏粒含量较高的试样持水性更好。为了从微观的角度探讨以上 3 个因素对试样脱湿过程的影响机制,下面将基于试样的 T_2 时间分布曲线,从各级吸力下试样中水分分布的角度展开讨论。为了验证基于核磁共振测量的试样水分含量的精度,这里首先给出了 A6-15 和 B8-15 试样 FID 峰值点 P 与试样饱和度 S 的线性拟合结果(如图 4 所示)。

如图 4 所示,对于干密度相同但组分构成不同的土样,FID 峰值点 P 与饱和度 S 的关系并不相同,但单个试样的 P 与 S 都呈很好的线性关系。尽管不少学者曾利用核磁共振技术成功测得过冻土中未冻水含量^[6-8],上述试验结果进一步证实了利用核磁共振仪测定土体水分含量的可行性。为了探讨在整

个脱湿过程中土样水分分布特征随吸力变化的规律,图 5 给出了试样 A6-15 在试验吸力序列下的 T_2 时间分布曲线。

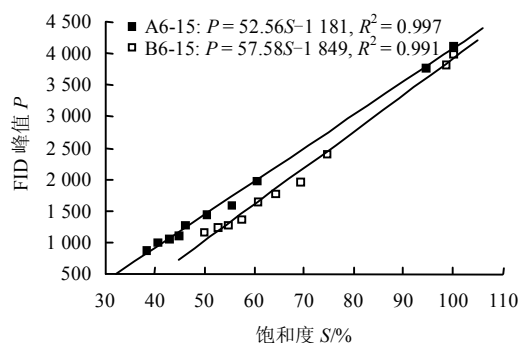


图4 FID 峰值点 P 与试样饱和度 S 线性拟合
Fig.4 Linear fit of peak value P of FID with specimen saturation S

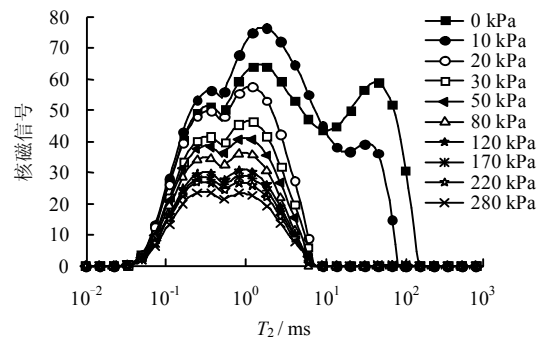


图5 试样 A6-15 在各级吸力下的 T_2 分布曲线
Fig.5 T_2 distribution curves of specimen A6-15 for each suction

从图 5 可以看出, T_2 时间分布曲线随着吸力的增加呈现出一定的规律。这里根据曲线的变化趋势,将脱湿过程分为 0~10、10~20 和 20~280 kPa 3 个阶段讨论。

(1) 在 0~10 kPa 吸力阶段, T_2 时间分布曲线上对应较大 T_2 值 ($T_2 = 10 \sim 100$ ms) 的核磁信号略微下降,而较小 T_2 值 ($T_2 = 0.04 \sim 10$ ms) 的核磁信号上升。因为 T_2 值能够反应孔隙水在试样中的赋存位置,即大孔隙水的 T_2 值比小孔隙水和束缚水的 T_2 值大,所以上述试验结果表明:部分大孔隙水被排出,而小孔隙中水分含量却意外地增加。理论上这是不可能出现的。Bird 等^[11]在试验中也发现过同样的现象,他将此现象归结为非饱和土体中气体对 T_2 时间分布曲线的影响,推测这与非饱和土中水的摆动区相关。笔者认为,在 0~10 kPa 过程中水分发生了重分布,小部分大孔隙中的水被排出(0~10 kPa 过程中, T_2 分布曲线的峰面积,也即试样含水率并

未发生大的变化), 气体开始进入试样, 土体中开始出现气水界面, 其存在的结果引起了类似于土颗粒与孔隙水之间的界面效应(例如大孔隙中间的水被气体取代, 但孔隙壁会赋存一层薄膜水, 被限于气-水界面与孔隙壁之间), 导致了对应较小 T_2 值的核磁信号量增加。从 0、10 kPa 的 T_2 时间分布曲线的变化还可以推测出试样 A6-15 的进气值应该是略小或约等于 10 kPa, 因为 10 kPa 的 T_2 时间分布曲线表明, 气体已进入试样, 但排出的水量不大, 且主要集中在较大孔隙(对应 $T_2 = 90 \sim 120$ ms)。

(2) 在 10~20 kPa 吸力阶段, 试样 T_2 时间分布曲线位于 10~100 ms 范围内的核磁信号迅速减小至 0, 说明试样中对应此 T_2 值范围的大孔隙中水已经排尽。

(3) 在吸力大于 20 kPa 阶段, 试样 T_2 时间分布曲线的核磁信号主要集中在较小 T_2 值范围内, 即 0.04~10 ms, 说明试样中仅存在小孔隙水和束缚水。其中, 在 20~280 kPa 吸力范围内, 随着吸力增加, T_2 时间分布曲线的变化很有规律, 小吸力值的 T_2 时间分布曲线覆盖在大吸力值的 T_2 时间分布曲线之上; 在整条 T_2 时间分布曲线上, 核磁信号都有所降低, 意味着对应不同 T_2 值的束缚水或小孔径范围内孔隙中的水都在减少, 亦即不同孔径的孔隙开始同时排水, 这与平行毛细管模型中不同孔径逐级排水, 即大孔隙水排尽后小孔隙才开始排水的假设是相冲突的。因此, 上述核磁试验结果表明, 不考虑相互连通性的平行毛细管模型是存在明显缺陷的。

为了从微观角度分析土体脱湿曲线随干密度和初始含水率变化的规律, 图 6 给出了 A 组 6 个试样在具有代表性的 6 个吸力值下的 T_2 时间分布曲线。从图可以看到, 在小吸力范围(0~10 kPa)内, 同一初始含水率下不同干密度试样的 T_2 时间分布曲线具有相似的峰形, 即: 根据峰形, T_2 时间分布曲线可以分为(A6-15、A7-15、A8-15)和(A6-10、A7-10、A8-10)两组。初始含水率为 10% 的试样的 T_2 时间分布曲线存在一大一小两个峰, 而初始含水率为 15% 试样的 T_2 时间分布曲线存在 3 个峰。前者的大峰处于后者的中间和右边的两峰之间, T_2 值的范围为 0.4~100 ms。从整体上看, 对应于 10% 含水率的大峰峰面积比对应于 15% 含水率的中间和右边的两峰峰面积之和, 但前者最左端峰面积值比后者最左端的峰面积值小。这说明初始含水率为 15% 的试样具有相对较少的大孔隙和较多的小孔隙, 即初始含水率对压实试样的孔隙大小分布及其微观结

构产生重要的影响, 这与传统的压实试验结果完全一致。

但在 0~10 kPa 吸力范围内, 试样干密度对 $T_2 = 2 \sim 100$ ms(对应于试样中较大的孔隙)范围内的核磁信号影响比较明显, 干密度小的试样包含更多的大孔隙, 表明干密度主要影响到土样中大孔隙结构。以上对试样 T_2 分布曲线的分析表明, 初始含水率与干密度相比能更大程度地影响土样中整体的水分分布。关于不同初始含水率下土体的孔隙分布问题, Vanapalli 等^[16]认为, 一般细粒土里会存在两元结构即宏观结构和微观结构(Mitchell^[18]将微观结构定义为土体中颗粒间的联接, 而宏观结构为集合体之间的联接), 在试样的组成和干密度等保持一致的条件下, 初始含水率会很大程度地影响土样的孔隙结构, 谈云志等^[19]通过研究压实作用对红黏土孔隙分布的影响发现, 常规压实作用只能改变土体某一较大孔径范围的孔隙, 这与本试验所揭示的干密度与初始含水率对试样孔隙分布的影响规律是相符的。

在 0~10 kPa 的脱湿过程中, T_2 分布曲线上核磁信号的减小主要发生在 $T_2 = 30 \sim 100$ ms, 亦即由于干密度控制的大孔隙范围内, 因而此阶段的脱湿过程发生在大孔隙, 并主要受干密度影响, 这与图 2 中在 0~10 kPa 阶段内脱湿曲线主要受干密度的影响是一致的, 同时也可推测所有 A 组试样的进气值在 0~10 kPa 之间。随着吸力增加至 20 kPa, 对应于 $T_2 = 10 \sim 100$ ms 范围的大孔隙中的水全部排尽。在 20~50 kPa 范围内, 随着吸力的增加核磁信号不断衰减, 所有试样的 T_2 分布曲线比较相似, 核磁信号集中分布在 $T_2 = 0.04 \sim 10$ ms 范围, 表明土样中孔隙水处于束缚状态或仅存于小孔隙中, 干密度对试样孔隙水分布的影响越来越小, 初始含水率对孔隙水分布开始起决定作用。因此, 20~50 kPa 是一个过渡阶段, 影响孔隙水分布形态的主控因素由干密度转变为初始含水率。随着吸力的进一步增加, 特别当吸力达到 50 kPa 以后, 干密度对试样水分分布的影响很小, 这时初始含水率影响土样所有孔径范围内的孔隙结构, 初始含水率为 10% 和 15% 试样的水分分布差别越来越来明显。

总的来说, 干密度和初始含水率较大的试样始终具有较好的持水性。干密度对脱湿过程的影响主要在低基质吸力范围, 而在高吸力条件下初始含水率是关键的影响因素。由于在高吸力条件下水分主要存在于小孔隙中, 根据上述核磁共振观测结果可以推定: 在压实的黏质砂土中, 小孔隙结构(即微

观结构)主要由初始含水率控制,而大孔隙结构(宏观结构)主要取决于干密度;同时,干密度和初始

含水率对压实土的内部结构和孔隙大小分布均有重要的影响。

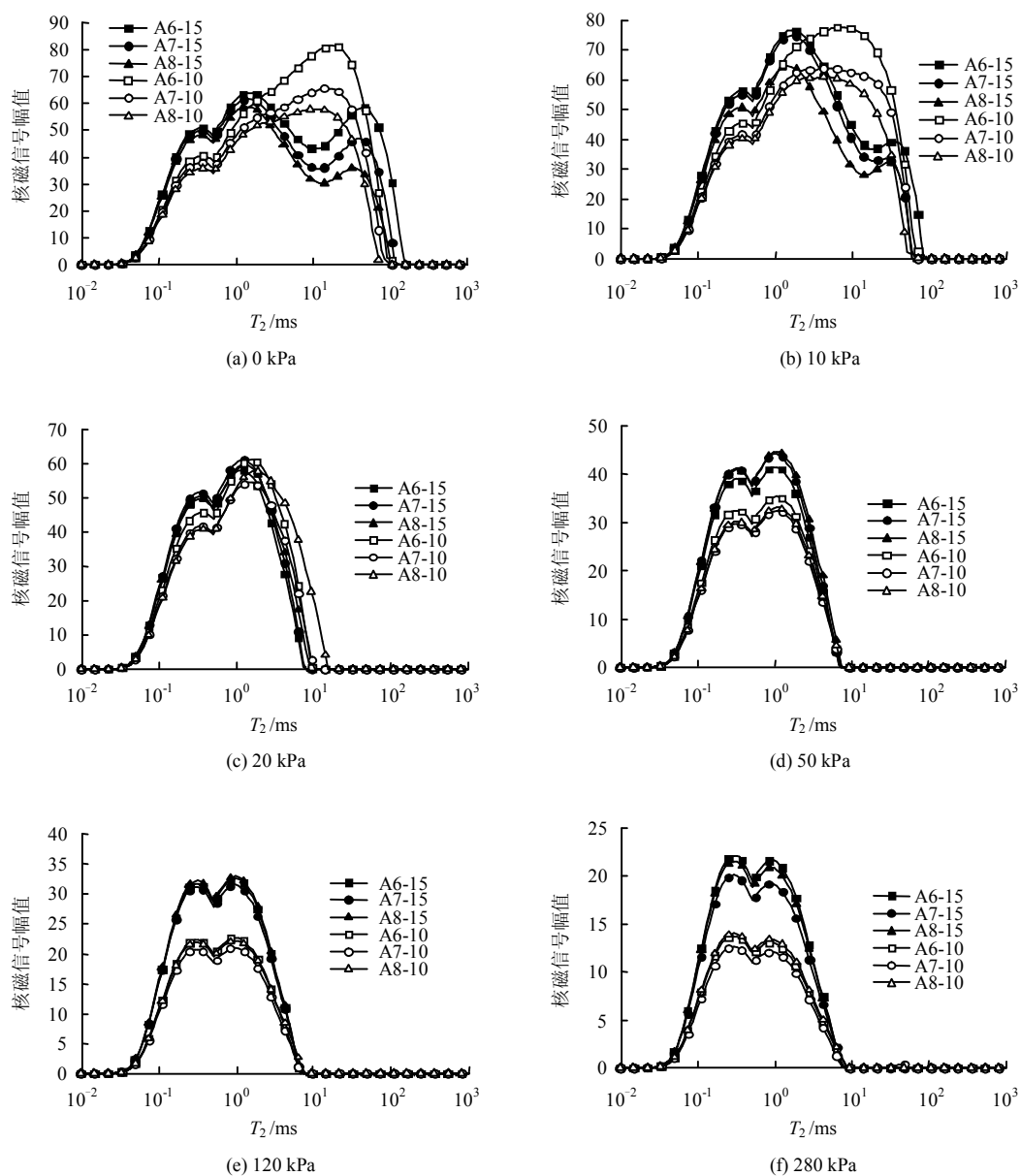


图6 A组试样在各级吸力下的 T_2 分布曲线

Fig.6 T_2 distribution curves of specimens in Group A for each suction

为了考察土样组分对试样脱湿过程的影响,图7展示了A和B两组初始含水率为15%,3种干密度试样的 T_2 时间分布曲线。从图中可看出,两组饱和试样的 T_2 时间分布曲线均有3个峰,不同的是,黏粒含量较高的B组试样左端与中间两个峰($T_2 = 0.04 \sim 110$ ms)的峰面积大于A组试样,而右端峰的峰面积小于A组试样,表明B组试样比A组试样具有更多的小孔隙和更少的大孔隙。这是一个预料中的结果,因为B组试样的黏粒含量高于A组试样。

类似前面的分析结果,干密度对试样孔隙结构的影响主要表现在大孔隙范围(即 T_2 较大的区域,这里 $T_2 = 10 \sim 100$ ms),其中在 $T_2 = 30 \sim 100$ ms范围内,干密度的影响大于土样组分的影响。在 $0 \sim 10$ kPa内, T_2 分布曲线上核磁信号的减小主要集中在 $T_2 = 30 \sim 100$ ms内,所以此吸力范围内的脱湿过程主要受干密度的影响,这与图3在此吸力段相同干密度脱湿曲线较接近且趋势一致的结果是相符的,因为有部分大孔隙开始排水,所以可以推测两组试样的进气值均在 $0 \sim 10$ kPa内。随着吸力的增

加,对于两组试样,大孔隙中的水分将逐渐排尽, T_2 时间分布曲线的差异主要表现在 $T_2 = 0.04 \sim 10$ ms 之间。B 组试样的曲线始终位于 A 组曲线之上,表明 B 组小孔隙水与束缚水的含量始终高于 A 组,主要是因为 B 组试样黏粒含量高,表面束缚水和小孔隙水更多,从而使得 B 组试样持水性更好(如图 3 所示)。总体来说,在小吸力 ($0 \sim 10$ kPa) 范围内,干密度是影响脱湿过程的关键,但在高吸力范围内 ($20 \sim 280$ kPa),试样组分是主要影响因素。

综上所述,所有试样的进气值均在 $0 \sim 10$ kPa 内,表明在试验所涉及的条件范围内,进气值受干密度、初始含水率和组分的影响较小,这与所有饱和试样 T_2 分布曲线上最大 T_2 值均为 100 ms 左右是

一致的,表明所有试样中最大孔隙孔径相近,干密度、初始含水率与组分仅影响大孔隙体积而不影响孔隙孔径,笔者推测大孔隙应为砂粒之间的孔隙。由于干密度很大程度地影响大孔隙结构,因此,只在小吸力范围 ($0 \sim 10$ kPa) 影响试样脱湿曲线,而初始含水率与试样组分同时影响试样的宏观和微观结构,因此,在整个试验吸力范围内都会影响试样脱湿曲线,尤其是在高吸力范围内随着干密度的影响越来越小,两者对试样水分分布的影响越来越明显,但总体来说,试样组分对微观结构的影响大于初始含水率,从而脱湿曲线上同一吸力下不同组分试样的含水率差别要大于不同初始含水率试样的含水率差别。

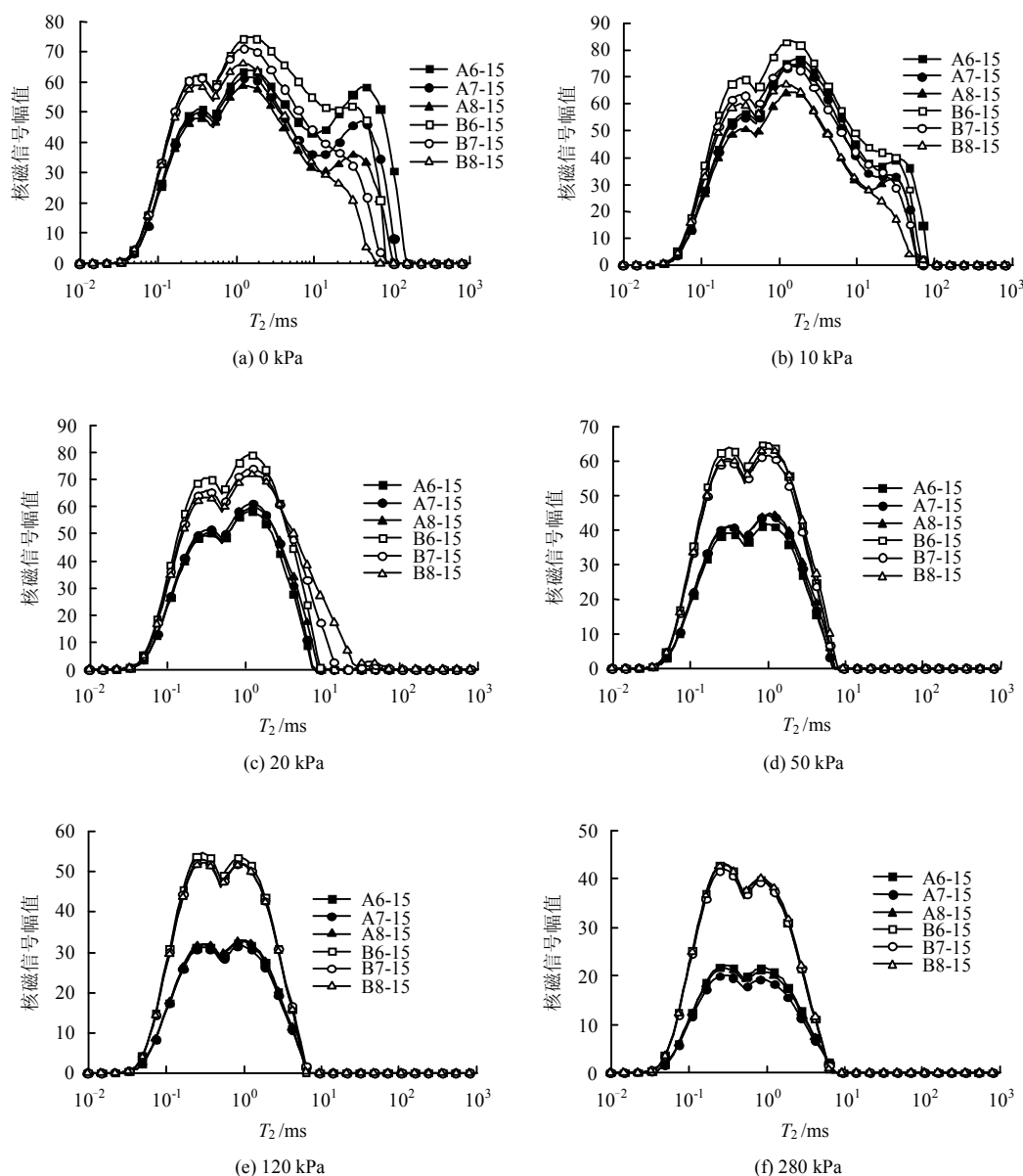


图 7 A 和 B 两组初始含水率为 15% 的试样在各级下的 T_2 分布曲线

Fig.7 T_2 distribution curves of specimens in Group A and B with initial water content of 15% for each suction

4 结 论

(1) 在试验所涉及的试验范围内, 试样的进气值受初始含水率、干密度和试样组分的影响不大, 均在 0~10 kPa 之间, 这与饱和试样 T_2 分布曲线上最大 T_2 值均为 100 ms 左右是一致的, 表明所有试样最大孔隙的孔径相同, 笔者推测最大孔隙应该是砂粒之间的孔隙。

(2) 初始含水率、干密度和试样组分都会影响试样的脱湿过程, 但 3 种因素作用的吸力范围及大小并不相同。干密度主要影响试样孔隙的宏观结构, 因此, 在小吸力范围内干密度控制试样的脱湿过程。随着吸力的增加, 初始含水率与试样组分开始占主导作用, 且在本试验涉及条件下, 试样组分产生的影响大于初始含水率。因为初始含水率与试样组分同时影响孔隙的宏观和微观结构, 且试样组分对试样微观结构的影响大于初始含水率。但总体来说, 初始含水率、干密度和黏粒含量高的试样具有更好的持水性。

参 考 文 献

- [1] 弗雷德隆德, 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 译. 北京: 建筑工程出版社, 1997.
- [2] 马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. 非饱和土毛细滞回与变形耦合弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3263—3270.
MA Tian-tian, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. An elastoplastic constitutive model of unsaturated soils with capillary hysteresis and deformation coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3263—3270.
- [3] 陈盼, 韦昌富, 李永和, 等. 结构性黏土的压缩变形特性[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 29—36.
CHEN Pan, WEI Chang-fu, LI Yong-he, et al. Compression deformation characteristics of structural clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.2): 29—36.
- [4] VANAPALL S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 379—392.
- [5] VAN GENUCHTEN. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892—895.
- [6] GENS S. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. **Geotechnique**, 2010, 60(1): 3—74.
- [7] ISHIZAKI T, MARUYAMA M, FURUKAWA Y, et al. Premelting of ice in porous silica glass[J]. **Journal of Crystal Growth**, 1996, 163(4): 455—460.
- [8] A R 泰斯, J L 奥利丰特, 朱元林, 等. 用脉冲核磁共振法及物理解吸试验测定的冻土中冰和未冻水之间的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 37—46.
- [9] TICE A R, OLIPHANT J L, ZHU Yuan-lin, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soils as determined by pulsed nuclear resonance and physical desorption data[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1983, 5(2): 37—46.
- [10] BLACK P B, TICE A R. Comparison of soil freezing curve and soil water curve data for Windsor sandy loam[J]. **Water Resources Research**, 1989, 25(10): 2205—2210.
- [11] GAO S Q, CHAPMAN G, HOUSE W. Application of low field NMR T_2 measurements to clathrate hydrates[J]. **Journal of Magnetic Resonance** 2009, 197(2): 208—212.
- [12] BIRD N R A, PRESTON A R, Randall E W, et al. 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**, 2005, 56(1): 135—143.
- [13] JAEGER F, SHCHEGOLIKHINA A, AS H V, et al. Proton NMR relaxometry as a useful tool to evaluate swelling processes in peat soils[J]. **The Open Magnetic Resonance Journal**, 2010, (3): 27—45.
- [14] COATES G R, XIAO L L, PRAMMER M G. NMR Logging principles and application[M]. Houston: Halliburton Energy Services Publication, 1999.
- [15] JAEGER F, BOWE S, VANAS H, et al. Evaluation of ^1H NMR relaxometry for the assessment of pore-size distribution in soil samples[J]. **European Journal of Soil Science**, 2009, 60(6): 1052—1064.
- [16] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富, 等. 非饱和重塑黏土在不同击实条件下的土水特征曲线试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (9): 82—85.
YI Pan-pan, NIU Sheng-kuan, WEI Chang-fu, et al. An experimental study of soil water characteristic curve of remolded unsaturated clay considering the influence of compaction[J]. **China Rural Water and Hydropower**, 2011, (9): 82—85.
- [17] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(2): 143—159.
- [18] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1—2): 26—39.
- [19] MITECHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [20] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1427—1430.
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Research on the effect of compaction on pore size distribution of laterite soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1427—1430.