

DOI: 10.11779/CJGE201808012

基于 NMR 技术及分形理论预测 SWRC

陶高梁, 陈 银, 袁 波, 甘世朝, 吴小康, 朱学良

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 土-水特征曲线 (SWRC) 是非饱和土力学中的基础本构关系, 在研究非饱和土强度、体变及渗透系数等方面具有重要作用。通过试验直接测量 SWRC, 耗时较长, 且通常得到的只是离散数据点, 缺乏连续性, 不能完全满足非饱和土研究的需要, 因此, 通过间接方法快速预测 SWRC 的完整数学表达式具有实际意义。以无损的核磁共振 (nuclear magnetic resonance) 技术为基础, 结合 Young-Laplace 理论, 建立基质吸力 ψ 与 T_2 值的关系式; 利用分形理论, 推导出质量含水率 w 与 T_2 值的关系式, 最终建立了预测 SWRC 的数学模型, 研究结果表明其预测结果与实测值吻合较好。
关键词: 核磁共振; 分形理论; SWCC; 预测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)08 - 1466 - 07

作者简介: 陶高梁(1979 -), 男, 副教授, 主要从事土体孔隙结构及非饱和土等研究工作。E-mail: tgl1979@126.com。

Predicting soil-water retention curve based on NMR technology and fractal theory

TAO Gao-liang, CHEN Yin, YUAN Bo, GAN Shi-chao, WU Xiao-kang, ZHU Xue-liang

(School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: It has been recognized that the soil-water retention curve (SWRC) is a fundamental constitutive relationship of unsaturated soil mechanics, which plays a decisive role in the researches on the strength, volume change and permeability coefficient of unsaturated soils. The direct experimental methods for measuring the SWRC are time-consuming, and they usually provide some discrete data points which are short of sufficient continuity, thus they cannot completely meet the needs of researches on unsaturated soils. So, it is necessary to fast obtain the complete mathematical expression for SWRCs by using the indirect method. Based on the non-invasive nuclear magnetic resonance (NMR) technology, the relationship between matric suction ψ and relaxation time T_2 is established by using the Young-Laplace theory. Then, by using the fractal theory, an expression for the relationship between mass water content w and relaxation time T_2 is derived. On this basis, a specific NMR-fractal method is promoted to predict SWRCs. The experimental results show good agreement with the predicted values by the proposed fractal method.

Key words: nuclear magnetic resonance; fractal theory; soil-water retention curve; prediction

0 引 言

土-水特征曲线 (SWRC) 描述了基质吸力与含水率之间的关系, 是进行非饱和土力学理论研究的基础。SWRC 室内试验测量一般采用滤纸法、压力板仪法等方法, 这些方法较为耗时费力, 且所得试验数据较为离散, 一般不能直接应用于理论研究或工程应用, 往往需要利用 SWRC 数学模型 (如 Campbell 模型、Van Genuchten 模型等) 进行拟合。

Young-Laplace 方程表示了气-水交界面半径与基质吸力之间的关系, 理论上能将 SWRC 和微观结构联系起来, 已有大量研究表明从微观结构预测 SWRC 是可行的。Arya 等^[1]根据粒径分布和 SWRC 的曲线类似性建立了 AP 模型, 此模型中有一重要参数 α , 它能表示出土体真假形态的关系, 并且 Arya 等认为 α 的

值是不变的。刘士雨等^[2]在 AP 模型之上, 利用土壤物理特性扩展技术找到了一种更为简便和准确的方法计算参数 α , 使 AP 模型的预测作用更加精确。Simms 等^[3]通过模拟孔隙尺寸在脱湿过程中的变化, 提出了一种预测 SWRC 的模型, 该模型的预测精度在基质吸力小于 3000 kPa 时较高。Simms 等^[4]又利用压汞技术分析黏土在各向同性加载或减饱和和作用下孔隙尺寸分布 (PSD) 的变化规律, 并在此基础上提出了一个孔隙网络模型预测 SWRC。张雪东等^[5]从微观孔隙分布特征出发, 把 Brooks & Corey 模型中的两个参数 (进气值和孔隙分布指数) 和孔隙率联系起来, 提出了一

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209084); 湖北省教育厅科研计划项目 (D20161405) 及优秀中青年科技创新团队项目 (T201605)

收稿日期: 2017 - 07 - 25

个反映孔隙率作用的 SWRC 模型。胡冉等^[6]对变形前的 PSD 函数进行水平平移、垂直缩放得到变形后的 PSD 函数, 考虑了变形对 SWRC 的影响, 推导出了 SWRC 滞后模型。Noh 等^[7]考虑孔隙分布在成冰作用下的变化, 建立了基质吸力与未冻水量的关系式, 并根据统计孔径分布和 Mualem 模型求取式中的重要参数。侯晓坤等^[8]根据光学显微镜和图像处理软件获取土样的 PSD, 在此基础上阐述了不同深度处 SWRC 的区别, 得到了黄土的孔隙分布与 SWRC 的关系, 为预测 SWRC 提供了一个简单的方法。

另一方面, 颗粒和孔隙的大小形状各不相同, 且数量巨大, 同时在尺度上跨越多个数量级, 国内外大量研究资料表明土体颗粒及孔隙分布具有强烈的分形特性, 分形模型在 SWRC 研究中具有不可或缺的作用。徐永福等^[9]认为孔隙体积分布的分形模型可以准确地描述 SWRC, 并由此推算出 SWRC 表达式, 该式能同时描述干湿循环现象。Russell^[10]假设颗粒表面积和孔隙表面积相等且为常量, 将 SWRC 参数与颗粒和孔隙的几何信息(大小分布、形状、体积以及表面积)联系起来, 解释了分形土 SWRC 与微观结构的关系。Khalili 等^[11]提出了一种能考虑体积变化的分形模型, 该模型针对 PSD 和粒径分布采用不同的分维数, 并假设在无颗粒破碎的条件下, 粒径分布的分维数为常数, 而 PSD 的分维数随孔隙比变化。

值得探讨的是, 准确测量土体的孔隙分布特性一直是难点。SEM 只能观察孔隙二维尺寸且受人为影响较大, 观察区域还只限于很小的局部范围内; 压汞试验研究范围也不大, 且进汞压力容易造成孔隙结构破坏。核磁共振技术(NMR 技术)是 20 世纪 60 年代兴起的新型测试分析技术, 最初用于医疗诊断、石油勘探等领域^[12]。由于它高分辨率, 无损伤性的特点, 近年来被用于土体微观孔隙结构的研究中, 具有研究区域大, 人为影响小, 精度高, 测量快等优点。尽管, 横向弛豫时间 T_2 与孔隙孔径的对应关系较难准确建立, 但核磁共振 T_2 谱能较准确反映土体内部孔隙的孔径分布规律, 笔者认为该技术在土体微观孔隙研究中会扮演越来越重要的角色。

基于以上分析, 本文的目的在于通过核磁共振试验, 结合分形理论知识及 SWRC 数学模型, 期望给出一种参数意义明确、使用简便的 SWRC 预测方法。

1 核磁共振试验

本次试验材料选取非饱和黏性土, 该土为武汉市汉街土, 埋深为 9 m, 测量所得的土体基本物理指标见表 1^[13]。

表 1 土体的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of soil sample

天然密度 /(g·cm ⁻³)	土粒相对 密度	天然含水率 /%	液限 /%	塑限 /%
2.03	2.75	21.90	38.95	20.43

利用千斤顶制作两组平行试样, 每组试样 7 个, 干密度分别为 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50, 1.60, 1.71 g/cm³。一组用于本节核磁共振试验^[14], 另一组用于 3.2 节 SWRC 试验。值得说明, 根据文献[15], 可认为: 对于同一种土体, 相同的孔隙比土样孔隙结构及 SWRC 近似相同, 也就是说通过控制孔隙比可近似控制平行样的相似性。

制样步骤具体为: ①将试验土样进行风干、碾碎, 过 2 mm 筛后烘干备用; ②计算出含水率为 15% 的土样所需蒸馏水的质量, 用喷雾壶均匀喷洒在干土上并搅拌均匀; ③将搅拌均匀的土样放置在培养皿中 24 h, 复测其含水率; ④以复测的含水率作为最终的制样含水率, 称取不同干密度试样所需湿土的质量; ⑤放入环刀中(SWRC 试样为钢环刀; NMR 试样为塑料环刀), 利用千斤顶静压制样; ⑥抽真空饱和备用。

核磁共振试验选用中科院武汉岩土力学研究所的纽迈 PQ-001 核磁共振分析仪, 该设备为低磁场, 反演软件为仪器的自带软件。

因为核磁共振技术是利用氢原子核的自旋进行检测, 脉冲让试样中所有氢原子都受到激励, 所以得到的波谱反映的是所有氢原子弛豫信号的叠加, 难以有效区分不同成分间弛豫时间的区别, 所以必须用软件对所得信号进行反演操作, 获取与不同成分相对应的信号幅度和弛豫时间构成的反演谱。此外因低磁场的核磁共振信号较弱, 易被外界噪音所干扰, 故最好是进行多次测量并把所得数据累加起来, 可有效减少误差。最终通过 NMR 试验得到反演后的横向弛豫时间 T_2 谱。在已知孔隙率的条件下, 将 T_2 谱的总面积换算并标定为单位颗粒质量对应的孔隙体积(相当于饱和和质量含水率), 进行简单转换后可得单位颗粒质量(1 g)对应的累积孔隙体积与横向弛豫时间的关系, 见图 1。

2 基于 NMR 谱的分形模型

2.1 基质吸力与横向弛豫时间的关系式

核磁共振试验中, 横向弛豫时间 T_2 不仅与饱和土样中的孔隙水有关, 还受到土样孔隙结构的影响, 主要影响因素包括体积弛豫 T_{2B} , 表面弛豫 T_{2S} 和扩散弛豫 T_{2D} 。根据文献[16]的研究结果, T_2 为 3 种影响因素的叠加, 其表达式为

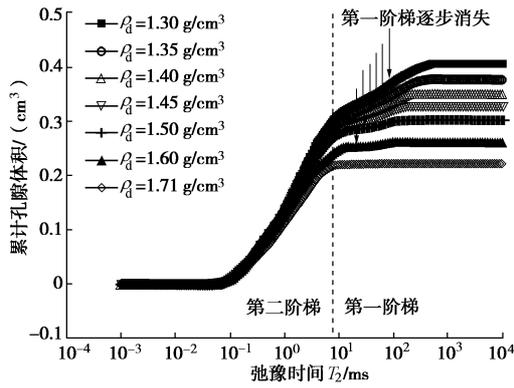


图1 不同干密度黏性土累计孔隙体积-弛豫时间图

Fig. 1 Relationships between cumulative pore volume and relaxation time of clay samples with different dry densities

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1)$$

式中, T_{2B} 为孔隙水的体积弛豫时间, T_{2S} 为表面相互作用产生的弛豫时间, T_{2D} 为梯度磁场下扩散作用产生的弛豫时间。

对完全为液态的水而言, 体积弛豫时间会显著高于表面弛豫时间, 因此 T_2 可近似看作与 $1/T_{2B}$ 无关, 若磁场梯度很小, 孔隙水扩散迅速时, T_2 也可近似看作与 $1/T_{2D}$ 无关。因此式 (1) 可以转化为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2S}} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中 ρ 为横向弛豫率; S 表示孔隙表面积; V 表示孔隙体积。

若把孔隙形状近似当作球形, 式 (2) 可简化为

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{3}{r} \quad (3)$$

根据 Young-Laplace 方程, 基质吸力 ψ 与有效孔径 r 成反比:

$$\psi = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (4)$$

式中, T_s 为表面张力, α 为接触角, 由温度一定时, $2T_s \cos \alpha$ 可看作定值。

根据式 (3)、(4), 可得

$$\psi = \frac{2T_s \cos \alpha}{3T_2 \rho} = \frac{A}{T_2} \quad (5)$$

式中, $A=2T_s \cos \alpha / (3\rho)$ 。

2.2 质量含水率与横向弛豫时间的分形模型

文献[17]中推导出了描述土样内部孔隙分布的累计孔隙率模型:

$$\phi(>r) = 1 - (r/r_{\max})^{3-D} \quad (6)$$

式中, D 为分维数, $\phi(>r)$ 为孔径大于 r 的孔隙率。

以 r 为界限, 若非饱和土中孔径小于或等于该值的孔隙均填满水, 则有 $\theta_s = \phi(>r) + \theta$, 其中 θ 是体积含

水率, θ_s 是饱和土的体积含水率, 也可理解为总孔隙率。同时由式 (3) 可知, 孔径 r 与横向弛豫时间 T_2 成正比, 则式 (6) 可变为

$$\theta_s = \theta + 1 - (T_2/T_{2m})^{3-D} \quad (7)$$

式中, T_{2m} 为最大孔径 r_{\max} 对应的横向弛豫时间。

式 (6) 中, 若取孔径 r 为最小孔径 r_{\min} , 则可近似取 $\phi(>r)$ 为总孔隙率 θ_s , 即

$$\theta_s = 1 - (r_{\min}/r_{\max})^{3-D} \quad (8)$$

同理根据孔径 r 与横向弛豫时间 T_2 的正比例关系, 式 (8) 可作如下变换:

$$\theta_s = 1 - (T_{2n}/T_{2m})^{3-D} \quad (9)$$

式中, T_{2n} 为最小孔径 r_{\min} 对应的横向弛豫时间。

将式 (9) 代入式 (7) 得到 θ 后, 再除以式 (9) 的 θ_s , 可以得到

$$\theta/\theta_s = (T_2^{3-D} - T_{2n}^{3-D}) / (T_{2m}^{3-D} - T_{2n}^{3-D}) \quad (10)$$

假设 r_{\min} 趋向于 0, 可认为其对应的横向弛豫时间 $T_{2n} = 0$ 。又因为体积含水率 θ 等于质量含水率 w 和干密度 ρ_d 的乘积, 总孔隙率 $\theta_s = e/(1+e)$, 则可得 $\theta/\theta_s = w\rho_d(1+e)/e$, 其中 e 为土样孔隙比。式 (10) 可转化为

$$w = e(T_2/T_{2m})^{3-D} / [\rho_d(1+e)] \quad (11)$$

通过以上分析, 由 NMR 试验的横向弛豫时间 T_2 作为中间值, 联立式 (5)、(11), 便可得到基质吸力 ψ 和质量含水率 w 的关系模型:

$$w = \frac{e}{\rho_d(1+e)} \left(\frac{A}{\psi T_{2m}} \right)^{3-D} \quad (12)$$

3 相关参数的求解方法

3.1 求解分形维数 D

文献[18]利用 Menger 海绵模型, 得到土体孔隙体积的分形模型:

$$V(>r) = V_a \left[1 - \left(\frac{r}{L} \right)^{3-D} \right] \quad (13)$$

式中, $V(>r)$ 为孔径大于 r 的孔隙体积, V_a 为研究范围内土体的体积, L 为研究范围尺度。

已知核磁共振中横向弛豫时间 T_2 和孔径 r 成正比例关系, 将式 (3) 代入式 (13), 消去 r 后得

$$\frac{V_a - V(>r)}{V_a} = M \cdot T_2^{3-D} \quad (14)$$

式中, $M=(3\rho/L)^{3-D}$ 为常数。

对含单位颗粒质量 (1 g) 的土体进行分析, 一般可近似认为水的密度为 1 g/cm^3 , 若假设孔径小于或等于 r 的孔隙全部饱和, 则此时的质量含水率 $w=V(\leq r)$, 则式 (14) 可转化为

$$\frac{V_a - V(>r)}{V_a} = \frac{V_s + V(\leq r)}{V_a} = \frac{1/G_s + w}{1/\rho_d} \quad (15)$$

式中, V_s 为土颗粒体积, G_s 为土粒的相对密度。

结合式 (14) 进一步化简可得到

$$1/G_s + w = NT_2^{3-D} \quad (16)$$

式中, $N=M/\rho_d$ 为常数。对式 (16) 两边同时取对数, 可以得到

$$\ln(1/G_s + w) = (3 - D)\ln T_2 + \ln N \quad (17)$$

由式 (17), 根据不同干密度黏性土的核磁共振试验数据 (图 1), 以 $\ln T_2$ 为横坐标, $\ln(1/G_s + w)$ 为纵坐标作散点图, 如图 2 所示。从图中可以发现数据表现出较为明显的线性关系, 故对这些数据采用线性拟合的方法, 即拟合直线为 $y=ax+b$ 。若拟合直线的斜率为 a , 可求得分维数 $D=3-a$ 。拟合表达式及参数取值如表 2 所示, 其中 R 为拟合相关系数, D 为计算后的分维数。

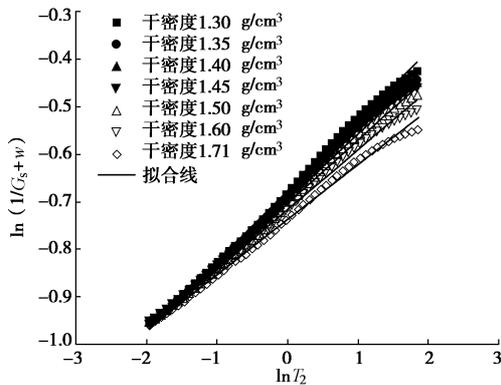


图 2 分维数计算

Fig. 2 Calculation of fractal dimension

表 2 线性拟合结果

Table 2 Linear fitting results

干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	a	b	R	D
1.30	1.115	0.147	-0.676	0.998	2.853
1.35	1.037	0.142	-0.686	0.997	2.858
1.40	0.964	0.142	-0.686	0.997	2.859
1.45	0.897	0.138	-0.694	0.996	2.862
1.50	0.833	0.136	-0.703	0.998	2.865
1.60	0.719	0.126	-0.716	0.998	2.874
1.71	0.613	0.116	-0.737	0.997	2.884

值得说明的是, 图 2 计算时舍去了图 1 中明显不规则的部分数据。分析图 1 可知, 对于干密度较小的试样而言, 压实度也相对较小, 其曲线表现出明显的“二阶阶梯状”, 随着干密度增大, “第一阶阶梯”逐渐消失。分析认为, “第一阶阶梯”产生及消失的原因可能是: 压实度或干密度较小时, 大孔隙分布尺度范围较大, 数量相对小孔隙较少, 从而导致其分布规

律出现非分形现象, 而小孔隙具有天然的分形特性, 大小孔隙的不同分布规律造成了孔隙累计分布图中出现“二阶阶梯状”; 随着压实度提高 (干密度变大), 大孔隙逐渐消失, 变为较小孔隙, 其分布越来越具有分形现象, 上述“二阶阶梯状”也逐渐消失。也即是说: 上述压实过程实际就是分形现象的完善过程。大孔隙所处的“第一阶阶梯”一般处于进气值附近, 对应的基质吸力范围较窄, 故本文计算时近似舍掉大孔隙对应的“第一阶阶梯”的试验数据点。另一方面, 当 T_2 值很小时, 对应于最小孔径范围内的这部分水分, 可近似看作残余含水率对应的孔隙水, 一般认为是结合水, 不适合毛细理论描述, 故计算分维数时将这部分水分对应的数据也要剔除 (残余含水率参考文献[19]确定, 本文不再赘述)。

从表 2 中可以发现相关系数 R 都大于 0.99, 根据线性拟合理论可知, R 为拟合优度, 越接近 1 说明拟合结果越好, 由此可证明上文给出的分维数计算方法是合理可行的。

3.2 求解关键参数 T_{2m} 及 A

T_{2m} 为土样中最大孔径 r_{max} 所对应的横向弛豫时间, 其值等于累计孔隙体积不再随着横向弛豫时间 T_2 的增大而增加时的横向弛豫时间。根据 T_{2m} 的定义和图 1 的数据, 可以得到干密度为 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50, 1.60, 1.71 g/cm^3 的黏性土的 T_{2m} 值分别为 1431.46, 748.81, 636.83, 188.97, 126.04, 91.16, 12.03 ms。

已知 A 的值等于 $2T_{scos} \alpha / (3\rho)$, 在温度不变时本文将大孔隙对应的 A 值视为常数。直接求解 A 的值较为困难, 而由式 (5) 可知 A 等于基质吸力 ψ 与对应的弛豫时间 T_2 值的乘积, 即基质吸力 ψ 和横向弛豫时间 T_2 成反比关系, 按此法标定 A 值较为容易。对于本文而言, 只需预测进气值, 因此此处特别将 A 定义为最大孔径对应的弛豫时间 T_{2m} 与进气值 ψ_a 之间的转换系数, 即 $A=\psi_a T_{2m}$ 。下面先开展 SWRC 试验, 要确保试验数据具有一定的可比性, 需取出与核磁共振试验同期制作的七组饱和试样, 选用压力板仪进行试验, 分别得到不同吸力条件下试样对应的质量含水率^[13]。然后以基质吸力为横坐标, 质量含水率为纵坐标将试验数据绘制成散点图, 如图 3 所示。

上述最大孔径对应的 T_{2m} 已根据 NMR 谱获得, 再由图 3 得到 SWRC 进气值, 基于 $A=\psi_a T_{2m}$ 便很容易标定 A 。本文以干密度 1.3 g/cm^3 为标定试样, 通过计算得到 $A=1073.6$ 。文献[14]认为在全吸力范围内, 不同干密度试样, A 不是简单的定值, 但仅对进气值或最大孔径对应的 T_{2m} 而言 (本文预测仅需预测进气值

及分维数)，本文研究发现 A 变化范围并不大，其他干密度试样的 A 值基本在 1073.6 的半数或倍数范围内，故本文近似取 $A=1073.6$ 为定值进行预测，计算所得进气值的误差在可接受范围之内。需要说明的是本文进气值是利用分形的方法获得。

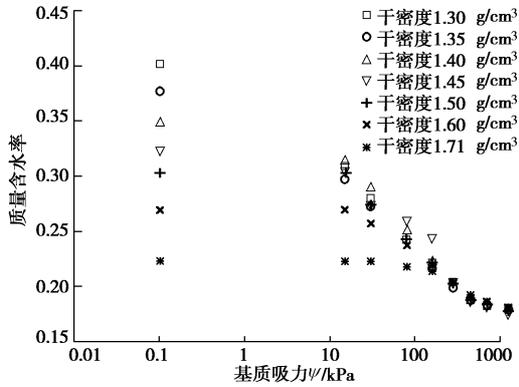


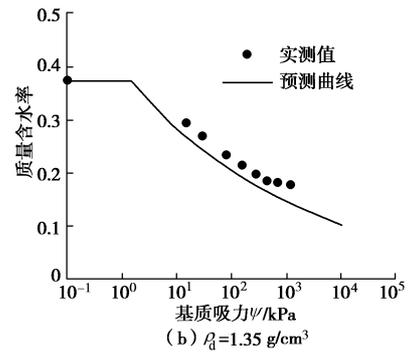
图3 不同干密度黏性土 SWRC 试验数据^[13]

Fig. 3 Experimental results of SWRCs of clay samples with different dry densities

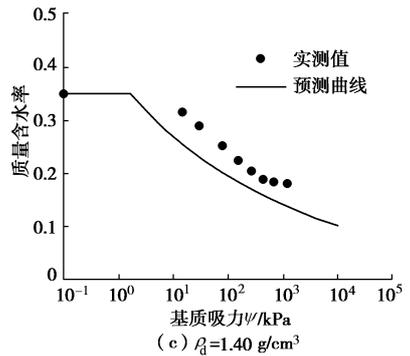
4 SWRC 预测及分析

根据 3.1 节所求分维数 D 值及 3.2 节所求参数 T_{2m} , A 值、不同干密度下的孔隙比 e , 利用式 (12) 便可预测出 SWRC。图 4 将预测曲线与图 3 中实测数据进行对比分析。

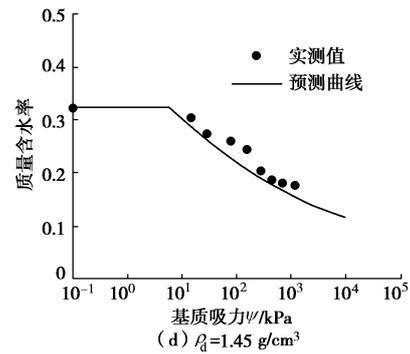
由图 4 可以发现，本文提出的 NMR-fractal 预测方法的预测效果总体较好，但小干密度试样的预测误差相对较大。3.1 节对“二阶阶梯”现象产生的原因进行了初步分析，认为：干密度较小时，大孔隙的存在减弱了孔隙的分形特性，而本文 SWRC 预测的基石就是孔隙具有分形分布特征，“第一阶阶梯”所包含的“大孔隙”势必会影响预测精度（尽管在计算分维数时，本文对“大孔隙”产生的影响进行了弱化）。随着干密度增大，“第一阶阶梯”逐步消失，预测精度因此会有所提高。虽然有一些预测误差，但在可接受范围内，因此以核磁共振试验和分形理论为基础，式 (12) 建立了 SWRC 预测的基本模型，该方法为 SWRC 预测提供了新思路，值得探讨。



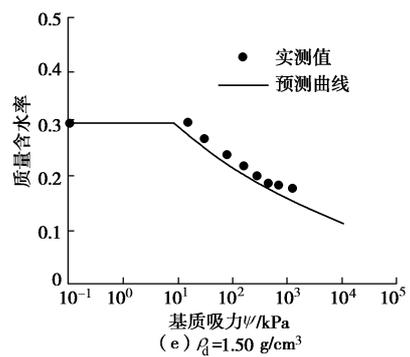
(b) $\rho_d=1.35 \text{ g/cm}^3$



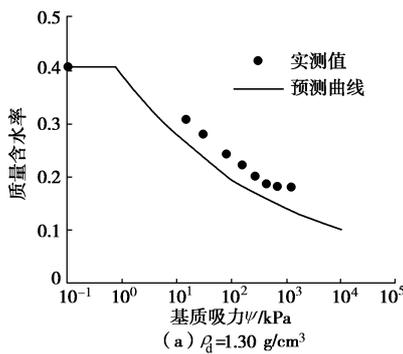
(c) $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$



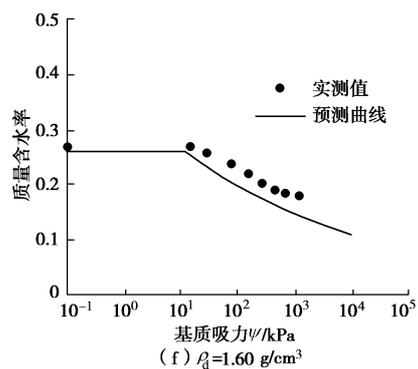
(d) $\rho_d=1.45 \text{ g/cm}^3$



(e) $\rho_d=1.50 \text{ g/cm}^3$



(a) $\rho_d=1.30 \text{ g/cm}^3$



(f) $\rho_d=1.60 \text{ g/cm}^3$

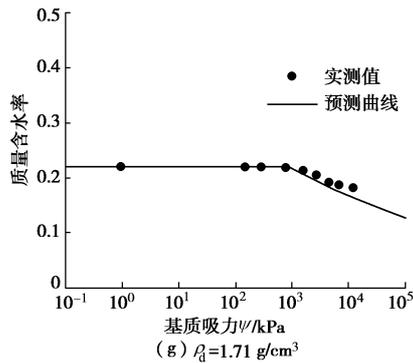


图 4 不同干密度黏性土 SWRC 的预测值和实测值

Fig. 4 Predicted and measured SWRCs of clay samples with different dry densities

5 结 语

核磁共振技术和分形理论可分别用来测量及表征土体微观孔隙分布特性, 而 SWRC 又主要受孔隙分布特性的控制, 因此将两种方法结合在一起预测 SWRC 是一种值得探索的方法。

根据 NMR 试验可获取 T_2 谱, 简单的计算可将 T_2 谱转换为单位颗粒质量对应的累计孔隙体积 - T_2 图。干密度较小时, 该图明显存在“二阶阶梯”形状, 随着压实度的提高, “第一阶阶梯”逐渐消失。分析认为“第一阶阶梯”的存在是由于干密度较小时, 大孔隙尺度分布范围较大, 数量较少引起, 它的存在会降低孔隙分布的分形行为。

基于 NMR 试验结果, 根据式 (17) 可计算孔隙分布特性的分维数, 计算时需要舍去“第一阶阶梯”和残余含水率相应的数据。

关键参数 T_{2m} 可直接通过 NMR 试验结果求得, A 值需要结合 SWRC 试验标定, 研究显示: 对于最大孔径对应的 T_{2m} 及以分形理论求得的进气值而言, 二者相乘得到的 A 值可近似认为是常量。在此基础之上, 依托式 (12) 可预测 SWRC, 试验结果显示其预测效果总体较好, 且干密度越大, 预测精度越高。

参考文献:

- [1] ARYA L M, PARI J F. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, **45**(6): 1023 - 1030.
- [2] 刘士雨, 俞 缙, 蔡燕燕, 等. 基于土壤物理特性扩展技术的土水特征曲线预测方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 924 - 931. (LIU Shi-yu, YU Jin, CAI Yan-yan, et al. Prediction of soil water characteristic curve using physically based scaling technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 924 - 931. (in Chinese))
- [3] SIMMS P H, YANFUL E K. Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil water characteristic curve tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(4): 741 - 754.
- [4] SIMMS P H, YANFUL E K. A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(2): 499 - 514.
- [5] 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(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(7): 119 - 126. (in Chinese))
- [6] 胡 冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (in Chinese))
- [7] NOH J H, LEE S R, PARK H. Prediction of cryo-SWCC during freezing based on pore-size distribution[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, **12**(4): 428 - 438.
- [8] 侯晓坤, 李同录, 谢 萧, 等. 甘肃 Q3 原状黄土的微观结构对其土-水特征曲线的影响[J]. 水利学报, 2016, **47**(10): 1307 - 1314. (HOU Xiao-kun, LI Tong-lu, XIE Xiao, et al. Effect of undisturbed Q3 loess's microstructure on its SWCC[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(10): 1307 - 1314. (in Chinese))
- [9] 徐永福, 董 平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 400 - 405. (XU Yong-fu, DONG Ping. Fractal model for the soil-water characteristics of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 400 - 405. (in Chinese))
- [10] RUSSEL A R. How water retention in fractal soils depends on particle and pore sizes, shapes, volumes and surface areas[J]. Géotechnique, 2014, **64**(5): 379 - 390.
- [11] KHALILI N, KHOSHGHALB A, PASHA A Y. A fractal model for volume change dependency of the water retention curve[J]. Géotechnique, 2015, **65**(2): 1 - 6.
- [12] 张超谟, 陈振标, 张占松, 等. 基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J]. 石油天然气学报, 2007,

- 29(4): 80 - 86. (ZHANG Chao-mo, CHEN Zhen-biao, ZHANG Zhan-song, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80 - 86. (in Chinese))
- [13] 陶高梁, 孔令伟, 肖衡林, 等. 土-水特征曲线的分形特性及其分析拟合[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2443 - 2447. (TAO Gao-liang, KONG Ling-wei, XIAO Heng-lin, et al. Fractal characteristics and fitting analysis of soil-water characteristic curves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2443 - 2447. (in Chinese))
- [14] 陶高梁, 柏亮, 袁波, 等. 土-水特征曲线与核磁共振曲线的关系[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 943 - 948. (TAO Gao-liang, BAI Liang, YUAN Bo, et al. Study of relationship between soil-water characteristic curve and NMR curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 943 - 948. (in Chinese))
- [15] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3217 - 3231. (SUN De-an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3217 - 3231. (in Chinese))
- [16] KORRINGA J, SEEVERS D O, TORREY H C. Theory of spin pumping and relaxation in systems with a low concentration of electron spin resonance centers[J]. Physical Review, 1962, 127(4): 1143 - 1150.
- [17] 张季如, 陶高梁, 黄丽, 等. 表征孔隙孔径分布的岩土体孔隙率模型及其应用[J]. 科学通报, 2010, 55(27): 2761 - 2770. (ZHANG Ji-ru, TAO Gao-liang, HUANG Li, et al. Porosity models for determining the pore-size distribution of rocks and soils and their applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(27): 2761 - 2770. (in Chinese))
- [18] TAO G L, ZHANG J R. Two categories of fractal models of rock and soil expressing volume and size-distribution of pores and grains[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(23): 4458 - 4467.
- [19] 陶高梁, 李进, 庄心善, 等. 利用土中水分蒸发特性和微观孔隙分布规律确定 SWCC 残余含水率[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1256 - 1262. (TAO Gao-liang, LI Jin, ZHUANG Xin-shan, et al. Determination of the SWCC residual water content based on the soil moisture evaporation properties and micro pore characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1256 - 1262. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compindex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)