

## 基于 NMR 技术的土孔隙结构分形特性研究

魏蒿蒿<sup>1</sup>, 王晓伟<sup>2\*</sup>, 高 淦<sup>1</sup>, 瞿 怡<sup>1</sup>, 吴学栋<sup>1</sup>, 苏忠艳<sup>1</sup>, 潘 莹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江师范学院土木建筑工程学院 重庆

<sup>2</sup>重庆交通大学河海学院 重庆

**【摘要】**土孔隙结构特征是影响土渗透性的重要因素,以粉质黏土为研究对象,通过离心-NMR 试验和三轴固结-NMR 试验,基于分形理论对土孔隙结构的分形特性进行研究。结果表明:固结压力对土样大孔隙含量的影响显著,而对中小孔隙含量的影响甚小,固结压力对土体孔隙结构的影响主要取决于对大孔隙的改变。土样的孔隙结构呈双重分形特征,不同固结压力下,土样大孔隙、整体孔隙的分形维数均在[2,3]区间,满足分形特征且均与孔隙比 $e$ 呈良好的负相关线性关系。为基于孔隙比 $e$ 预测土体大孔隙、整体孔隙的结构分形特征提供了新途径。

**【关键词】**土孔隙结构; NMR 技术; 离心试验; 三轴固结试验; 分形

**【收稿日期】**2026 年 3 月 12 日

**【出刊日期】**2026 年 4 月 15 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20260022

### Study on the fractal properties of soil pore structure using NMR technology

Haohao Wei<sup>1</sup>, Xiaowei Wang<sup>2\*</sup>, Gan Gao<sup>1</sup>, Yi Qu<sup>1</sup>, Xuedong Wu<sup>1</sup>, Zhongyan Su<sup>1</sup>, Ying Pan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Architectural Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing

<sup>2</sup>School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

**【Abstract】** Soil pore structure characteristics constitute a crucial factor governing soil permeability. Using silty clay as the research object, centrifugal-NMR tests and triaxial consolidation-NMR tests were performed to investigate the fractal characteristics of soil pore structure within the framework of fractal theory. The results demonstrate that consolidation pressure exerts a significant influence on the macropore content of soil samples, whereas its effect on the content of mesopores and micropores is negligible. The impact of consolidation pressure on soil pore structure is primarily dominated by the modification of macropores. The pore structure of soil samples presents dual fractal characteristics. Under various consolidation pressures, the fractal dimensions of macropores and total pores in soil samples all lie within the interval [2, 3], satisfying fractal behavior and exhibiting a strong negative linear correlation with void ratio. This provides a novel method for predicting the fractal characteristics of macropore and total pore structures in soils based on void ratio.

**【Keywords】** Soil pore structure, NMR technique; Centrifugal test; Triaxial consolidation test; Fractal

### 1 引言

土体孔隙结构特征是影响土体渗透性的主要因素,科学地确定土体的孔隙结构特征是准确预测土体渗透系数关键<sup>[1]</sup>。目前土体孔隙结构特征研究主要采用电镜 SEM、压汞 MIP、薄片鉴定和 X 射线计算机断层扫描 CT 等显微测试方法,但上述方法存在获取定量孔隙信息图像处理复杂、客观性差、样品尺寸受限、无法对同一土样在不同压力下进行连续的孔隙结构测试等问题<sup>[2-3]</sup>。核磁共振 NMR 技术可有效克服上述问题,其横

向弛豫时间  $T_2$  谱能准确表征土中孔隙的孔径分布特征,具有精准、无损和三维空间测试的优点,是土体微观孔隙结构测试的有效新方法<sup>[4]</sup>。近年来,学者们基于 NMR 技术对土中孔隙结构分形特征做了大量研究,提出了一系列适用于土体孔隙结构分形特征分析的方法<sup>[5]</sup>。由于土体孔隙形态、孔径分布复杂,具有双重分形特征<sup>[6]</sup>。此外,固结压力对土体的孔隙结构特征影响显著。因此,本文以粉质黏土为研究对象,通过离心-NMR 试验、固结-NMR 试验,并结合分形理论对不同固结压力下土

第一作者简介:魏蒿蒿(2002-)女,重庆城口人,本科,研究方向:工程造价及管理;

\*通讯作者:王晓伟(1999-)男,重庆开州人,硕士,主要从事岩土工程方面的研究。

试样的孔隙结构分形特征进行研究, 为准确分析土中孔隙结构分形特征提供科学依据。

## 2 土体孔隙结构特征的分形理论

土体孔隙结构的复杂程度可用孔隙结构分形维数来定量表征, 根据文献<sup>[7]</sup>, 土中孔径小于  $r$  的累计孔隙体积百分比  $S_V$  与  $T_2$  和  $T_{2\max}$  存在以下关系式:

$$\lg(S_V) = (3-D)\lg(T_2) + (D-3)\lg(T_{2\max}) \quad (1)$$

式中:  $T_2$ ,  $T_{2\max}$  分别为孔径  $r$ 、 $r_{\max}$  对应的横向弛豫时间,  $ms$ 。

式(1)表明, 若土样孔隙结构具有分形性质, 则 NMR 测试中的  $\lg S_V$  与  $\lg T_2$  应呈线性关系, 则可根据  $\lg S_V$  与  $\lg T_2$  双对数曲线斜率计算分形维数  $D$ , 令斜率为  $k$ , 则孔隙结构分形维数  $D$  表达为:

$$D = 3 - k \quad (2)$$

## 3 土孔隙结构特征试验

### 3.1 试验材料

本次试验采用重塑的粉质黏土, 具体物理性质指标见表 1。

表 1 土样的基本物理性质指标

土样	天然密度 ( $g/cm^3$ )	比重 $G_s$	天然含水量/%	塑限含水量/%	液限含水量/%	塑性指数 $I_p$
粉质黏土	2.04	2.71	20.4	19	35	16

### 3.2 试验仪器

三轴仪, 固结压力  $0 \sim 1200 kPa$ , 精度  $0.1 kPa$ , 能精确测定固结中的孔隙比变化量。离心试验仪, 最大转速  $9000 rpm$ , 最大离心力  $10600 \times g$ , 转速调节范围  $300 \sim 9000 rpm$ , 温控区间  $-9^\circ C \sim +40^\circ C$ 、精度  $\pm 0.5^\circ C$ , 采用 24# 转子, 配套 50 ml 圆底离心管。核磁共振仪, 采用 PQ-001 型核磁共振分析仪, 永久磁体磁场强度为  $0.5 \pm 0.08 T$ , 共振频率为  $18 \sim 24 MHz$ , 探头内径为  $28.6 mm$ , 磁体均匀区为直径  $61 mm$ 、高  $100 mm$  的圆柱体。

### 3.3 试验方案

离心-NMR 试验。先将重塑粉质黏土制成饱和泥浆并置于离心试验管中, 在  $5 kPa$  竖向压力下固结  $24 h$ , 固结后进行核磁共振试验并称取质量, 再进行离心转速为  $2000$ 、 $4000$ 、 $6000$ 、 $7000$ 、 $8000$ 、 $8500$ 、 $9000 r/min$  的离心试验, 温度为  $20^\circ C$ , 各级离心转速下等间隔  $20 min$  称取一次质量, 当相邻两次质量差  $\Delta m < 0.01 g$  时认为离心稳定, 再进行 NMR 试验, 如此依次完成各级离心转速的离心试验。

三轴固结-NMR 试验。将试验用土配置为含水量为 10% 的土料, 在密封袋中静置  $72 h$ , 然后采用分层击实法制成高  $100 mm$ 、直径  $50 mm$ 、初始干密度为  $1.42 g/cm^3$  的三轴固结试样; 在三轴仪上对试样进行饱和, 饱和度达到 95% 以上, 开展固结压力为  $0$ 、 $50$ 、 $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400$ 、 $600 kPa$  的三轴固结试验, 当等间隔  $10 min$  的排水体积  $v < 1 ml$  后认为固结稳定, 再进行 NMR 试验, 如此依次完成各级固结压力的三轴固结试验。

## 4 试验结果分析

### 4.1 离心-核磁试验结果分析

各级离心转速下质量稳定后试样的 NMR 试验  $T_2$  谱曲线, 见图 1。转速在  $0 \sim 4000 r/min$  时,  $T_2$  谱的双峰值和曲线以下积分面积均快速减小, 同时双峰快速向左移; 转速在  $4000 \sim 8000 r/min$  时,  $T_2$  谱的双峰值和曲线以下积分面积的减小速度均显著变缓, 第一峰右侧上限  $T_2$  值基本稳定; 当离心转速大于  $8500 r/min$  后,  $T_2$  谱趋于重合, 第一峰右侧  $T_2$  值趋于一定值。因此, 本试验土样的最佳离心转速为  $8500 r/min$ 。根据文献<sup>[8]</sup>, 可采用  $8500 r/min$  离心转速  $T_2$  谱累计孔隙度曲线来获取试样大孔隙与中小孔隙的分界横向弛豫时间  $T_{2c}$  值, 如图 2 所示。在图 2 中做最佳离心转速  $T_2$  累计曲线水平段的反向延长线与初始饱和泥浆试样  $T_2$  累计曲线相交于一点, 该点对应的  $T_2$  值即为试样大孔隙与中小孔隙的分界  $T_{2c}$  值, 本试样  $T_{2c} = 1.39 ms$ 。

### 4.2 三轴固结-NMR 实验结果分析

取  $T_{2c} = 1.39 ms$  作为大孔隙与中小孔隙的分界值, 不同固结压力下试样大孔隙与中小孔隙划分的  $\lg S_V - \lg T_2$  双对数曲线图, 见图 3。图 3 表明, 表征土体孔隙结构特征的  $\lg S_V - \lg T_2$  双对数关系为曲线, 具有双重分形特性。以  $T_{2c} = 1.39 ms$  为界, 分别对中小孔隙、大孔隙、整体孔隙曲线线性拟合得到拟合直线斜率  $K_m$ 、 $K_b$  和  $K_{NMR}$ , 图 4 为固结压力  $0 kPa$  试样的拟合图。由式(2)可分别得到试样的中小孔隙分形维数  $D_m$ 、大孔隙分形维数  $D_b$  以及整体孔隙分形维数  $D_{NMR}$ , 计算结果表明  $D_b$  和  $D_{NMR}$  值均在  $[2, 3]$  范围内, 表明大孔隙和整体孔隙的结构满足分形特征。

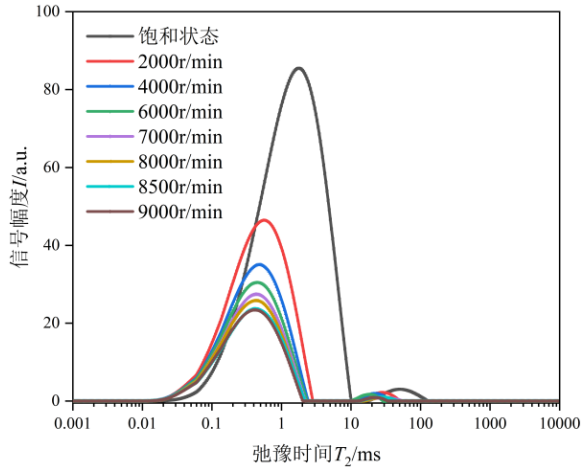


图 1 不同离心转速下试样稳定后  $T_2$  谱

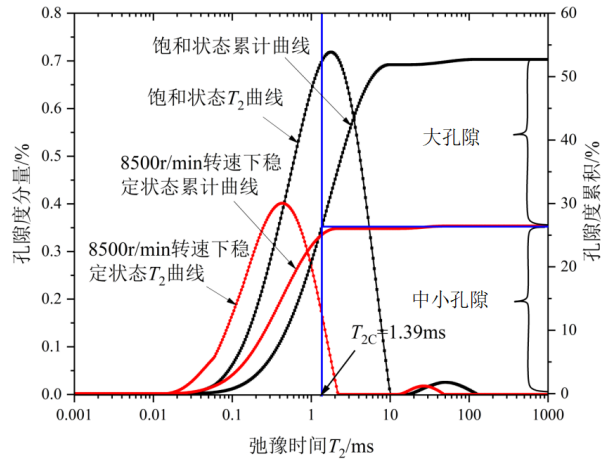


图 2 核磁共振  $T_{2c}$  截止值模型

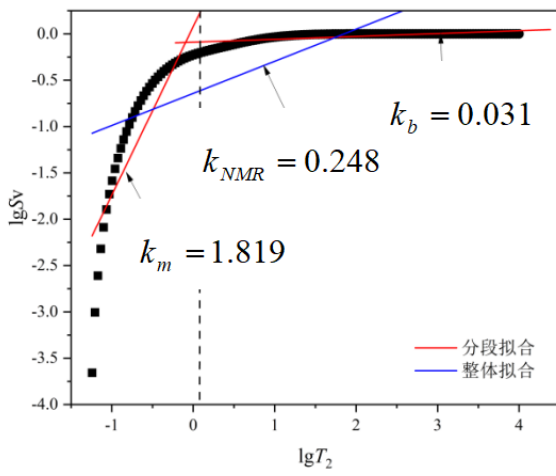
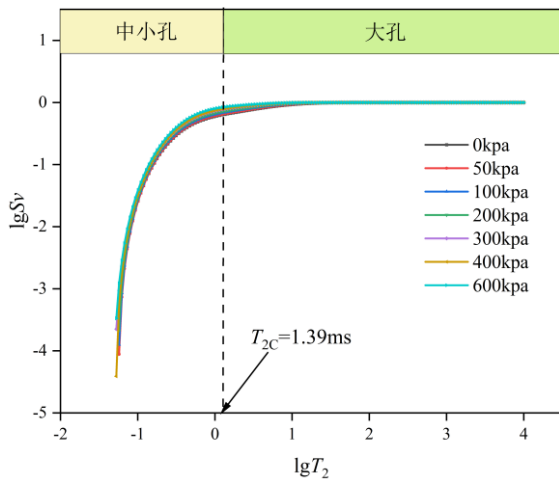


图 3 不同固结压力下  $\lg S_v - \lg T_2$  曲线

试样的  $e$  与  $D_{NMR}$  呈良好负相关线性关系,  $R^2=0.67$ ; 与  $D_b$  呈强负相关线性关系,  $R^2=0.98$ , 且  $D_b$  减小更快。表明固结压力使土中孔隙结构变得复杂, 并且以大孔隙变化为主, 这为基于孔隙比  $e$  预测土体孔隙结构分形维数提供有效方法。

### 5 结论

- 离心-核磁试验可有效测定土体大孔隙与中小孔隙的分界横向弛豫时间  $T_{2c}$  值, 本文试样土样  $T_{2c} = 1.39ms$ 。
- 土样孔隙结构具有双重分形特征, 不同固结压力下, 土样大孔隙和整体孔隙的分形维数均在  $[2, 3]$  之间, 满足分形特征。
- 土样大孔隙、整体孔隙的结构分形维数均与孔隙比  $e$  呈良好的负相关线性关系, 这为基于孔隙比  $e$  预测土体大孔隙、整体孔隙的结构分形维数提供有效方法。

### 参考文献

- [1] 路林海, 武朝军, 孙捷城, 等. 强竖向渗透济南红黏土的微观孔隙特征及 CT 渗流试验[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(09):1218-1226.
- [2] 胡海峰, 李鹏, 陈明浩, 等. 基于核磁共振技术的水压作用下砂岩孔隙结构变化研究 [J]. 矿业科学学报, 2025, 10(06):1130-1139.
- [3] 郭勇义, 高亚斌, 曹敬, 等. 基于修正压录法的不同瓦斯含量煤样孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(06):1075-1083.
- [4] 郭玉涵. 含水率和干密度影响下非饱和重塑黄土微观孔隙结构分形特征研究[D]. 兰州交通大学, 2024.
- [5] 谢艳华, 徐继成, 刘帅宇, 等. 结构性黏土扰动劣化过程及微观结构演化机制研究 [J/OL]. 水利水电技术(中英

- 文), 2026, (04):1-15
- [6] Hou X ,Zhu Y ,Chen S , et al.Investigation on pore structure and multifractal of tight sandstone reservoirs in coal bearing strata using LF-NMR measurements[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,(187):106757.
- [7] Daigle H ,Johnson A ,Thomas B .Determining fractal dimension from nuclear magnetic resonance data in rocks with internal magnetic field gradients[J]. Geophysics,2014, 79(6):425-431.

- [8] 董均贵, 吕海波, 陈国强. 基于核磁共振技术的孔隙水形态及土壤渗透性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 74-80.

**版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

