

# 基于 NMR 的饱和土渗透系数预测方法

赵晶<sup>1</sup>, 陈诚<sup>1\*</sup>, 杜棣宾<sup>1</sup>, 文桃<sup>2</sup>, 简涛<sup>2</sup>, 应赛<sup>2</sup>, 周继强<sup>3</sup>

(1.广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东广州 510010; 2.长江师范学院建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆涪陵 408100; 3.甘肃省有色金属地质勘查局自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 甘肃兰州 730030)

**摘要:**为改进现有基于核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)的饱和土渗透系数预测模型,提高 NMR 技术预测饱和土渗透系数的精度,在 NMR 弛豫时间  $T_2$  谱曲线及毛细管理论基础上,考虑毛细管迂曲度对渗透系数的影响,建立适用于饱和土体的渗透系数新模型。为验证该模型的准确性,对取自济南地铁裴家营站的粉质黏土试样进行固结渗透试验和核磁共振试验,分析固结过程中试样孔隙和渗透系数的变化规律,测定不同孔隙比状态下试样的渗透系数及  $T_2$  谱曲线,利用新模型对试样不同  $T_2$  谱曲线的饱和渗透系数进行预测,并与已有的 4 个核磁渗透系数模型预测结果进行比较。结果表明:本次试样的孔隙以小孔隙和中孔隙为主,固结中总孔隙的减小主要源自中孔隙的压缩;试样渗透系数随孔隙比降低而降低,两者间呈幂函数关系;在核磁  $T_2$  谱曲线和毛细管模型的基础上引入平均迂曲度可有效提高饱和土渗透系数预测精度,较已有模型,本研究新模型的预测值与实测值间的均方根误差降低 43.1%~67.0%。

**关键词:**核磁共振 NMR;饱和渗透系数;毛细管理论;平均迂曲度;  $T_2$  谱曲线

中图分类号:TU45

文献标志码:A

引用格式:赵晶,陈诚,杜棣宾,等.基于 NMR 的饱和土渗透系数预测方法[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):108-116.

ZHAO Jing, CHEN Cheng, DU Dibin, et al. NMR-based prediction method for saturated soil permeability coefficient[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):108-116.

## NMR-based prediction method for saturated soil permeability coefficient

ZHAO Jing<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1\*</sup>, DU Dibin<sup>1</sup>, WEN Tao<sup>2</sup>, JIAN Tao<sup>2</sup>, YING Sai<sup>2</sup>, ZHOU Jiqiang<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, Guangdong, China; 2. Engineering Research Centre for Whole Life Cycle Health Detection and Disaster Prevention of Buildings, Changjiang Normal University, Fuling 408100, Chongqing, China; 3. Natural Resources Ministry High-Cold Arid Zone Mine Geological Environment Restoration Engineering Technology Innovation Center, Gansu Provincial Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** In order to improve the prediction model of the permeability coefficient of saturated soil based on nuclear magnetic resonance (NMR), and to increase the accuracy of NMR in predicting the permeability coefficient of saturated soil. Based on NMR relaxation time  $T_2$  spectrum curve and capillary theory, a new prediction model of the permeability coefficient for saturated soil was established by considering the influence of capillary tortuosity on the permeability coefficient. To validate this model, consolidation permeability tests and NMR tests were conducted on silty clay samples from the Jinan Metro Peijiaying Station. The changes in porosity and permeability coefficients during consolidation were analyzed, and the permeability coefficients and  $T_2$  spectra for various porosity states were measured. The new model was used to predict the saturated permeability coefficients for different  $T_2$  spectra of the samples, and these predictions were compared with results from four existing NMR permeability models. The results indicated that the samples primarily consisted of small and medium pores, with the reduction in total porosity during consolidation mainly due to the compression of medium pores. The permeability coefficient decreased with a decrease in porosity, exhibiting a power function relationship. Introducing average tortuosity in the NMR  $T_2$  spectra and capillary model significantly improved the accuracy of

收稿日期:2024-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51679131);重庆市教委科学技术研究资助项目(KJQN202101447, KJQN202201426, KJQN202301401, KJQN202301424);自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心开放基金资助项目(HHGCKK2203)

第一作者简介:赵晶(1985—),男,江苏无锡人,高级工程师,硕士,主要研究方向为轨道交通工程结构岩土设计。E-mail:zhaojing@dtsjy.com

\*通信作者简介:陈诚(1990—),男,安徽安庆人,工程师,硕士,主要研究方向为轨道交通工程结构岩土设计。E-mail:chencheng@dtsjy.com

predicting the permeability coefficient of saturated soils. Compared to existing models, the root mean square error between the predicted and measured values of the new model was reduced by 43.1% to 67.0%.

**Keywords:** NMR; saturation permeability coefficient; capillary theory; mean tortuosity;  $T_2$  spectral curve

## 0 引言

在地下铁道、公路隧道、深基坑等工程中,地下临空面地层的稳定性、地下工程的设计和施工工艺都受到地下水渗流的严重影响,例如济南市轨道交通建设中,多个地铁站在第四纪沉积层的粉质黏土地层开挖基坑时均遇到了严重的地下水渗流问题,给工程施工带来了很大困难<sup>[1-2]</sup>。土渗透系数是涉水地下工程施工中的一个重要控制性参数,准确、快速地测定土体渗透系数对确保地下工程的安全施工和降低施工成本有着十分重要的意义<sup>[3-4]</sup>。

土体渗透系数与土体孔隙多少、孔径大小、孔径分布以及孔隙连通形式等孔隙结构特征密切相关<sup>[5-8]</sup>。基于多孔介质低场核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)弛豫理论,弛豫时间  $T_2$  谱可有效反映土中孔隙的孔径分布特征,与压汞法、氮气吸附法、扫描电子显微镜等微观孔隙结构测试方法相比,NMR 技术更加快速、环保、无损和准确,因此被大量应用于地下工程领域中的土体孔隙结构测试<sup>[9-11]</sup>。

多孔介质的孔隙流体 NMR 多孔弛豫模型研究表明<sup>[12]</sup>:弛豫时间  $T_2$  谱的特征值,包括几何平均值  $T_{2g}$  和算数平均值  $T_{2w}$  可以直接表征土体中孔隙的大小,束缚流体体积(bound fluid volume index, BVI)和可动流体体积(free fluid index, FFI)可直接表征土体中孔隙的连通性。基于上述 NMR 测试数据,国内外学者给出了一系列适用于多孔材料的 NMR 饱和渗透系数预测模型,从模型考虑的主要影响因素来看,现有的模型主要有考虑不可动流体影响和考虑孔径分布特征影响两类,其中前者应用较广的模型有 Coates 模型<sup>[13]</sup>,后者应用较广的模型有 SDR(schlumberger-doll research)模型<sup>[13]</sup>和  $KC_{T_{2w}}$  模型<sup>[14]</sup>,以上各模型的具体表达式如式(1)~式(3)所示。

### Coates 模型

$$k = \left( \frac{\varphi}{C_1} \right)^4 \left( \frac{F_{FI}}{B_{VI}} \right)^2, \quad (1)$$

式中, $F_{FI}$  为可动流体百分数, $B_{VI}$  为束缚流体百分数, $\varphi$  为土体孔隙度, $C_1$  为模型常数。

### SDR 模型

$$k_s = C_2 (\varphi)^4 T_{2g}^2, \quad (2)$$

式中, $C_2$  为模型常数, $T_{2g}$  为弛豫时间  $T_2$  谱的几何平均值。

### $KC_{T_{2w}}$ 模型

$$k_s = C_3 \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} (T_2^2)_w, \quad (3)$$

式中, $C_3$  为模型常数, $(T_2^2)_w$  为  $T_2^2$  的加权平均值。

目前基于 NMR 的多孔材料饱和和渗透系数预测模型仍存在一些不足,主要为考虑不可动流体影响的模型含有需要通过  $T_2$  截止值加以划分的  $F_{FI}$  和  $B_{VI}$  两个参数,而在实际测量中, $T_2$  截止值的合理选取具有一定困难;考虑孔径分布影响的模型均以表征孔径分布特征的  $T_2$  为变量,然而  $T_2$  特征值虽带有一定的孔径分布的信息,但未包括全部孔径分布信息。此外,上述两类模型均未充分考虑毛细管的渗流特性。因此,许多学者基于弛豫时间  $T_2$  谱曲线和毛细管渗流理论建立了改进的饱和土渗透模型。文献[15]利用经典的毛细理论和马歇尔模型<sup>[16-17]</sup>,将土体中的孔隙直径分布概率引入土体饱和和渗透系数计算模型,给出了更加全面反映孔径分布影响的基于 NMR 技术的饱和土体渗透系数预测方法。文献[18-19]在 NMR 技术基础上,引入流体力学理论和毛细管渗流理论,建立了基于 NMR 弛豫时间  $T_2$  谱曲线和微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数预测模型,模型中利用定标的方法考虑了微观孔隙通道渗流特性对土体渗透系数的影响。但现有的基于  $T_2$  谱曲线和毛细管渗流理论的改进饱和土渗透模型仍没有考虑土中孔隙通道迂曲度的影响,然而土中孔隙通道的迂曲度决定着水在土中渗流路径的长短,对土体的渗透性有着直接且显著的影响,不容忽视<sup>[20]</sup>。

为考虑土中孔隙通道迂曲度对饱和土渗透性的影响,本研究在 NMR 弛豫时间  $T_2$  谱曲线和毛细管渗流理论的基础上,进一步引入毛细管平均迂曲度,进而构建了考虑毛细管迂曲度影响的饱和土渗透系数预测新模型。为验证该新模型的准确性,以济南地铁裴家营站渗水基坑为工程背景,取该基坑中的粉质黏土作为试验用土,利用固结渗透试验和 NMR 试验测定不同孔隙比状态下试样的渗透系数

及弛豫时间  $T_2$  谱曲线,对不同孔隙比状态下土样的饱和渗透系数进行预测,并与实测结果和已有的4个 NMR 饱和土渗透系数模型预测结果进行对比分析,以期 NMR 技术测试饱和土渗透系数提供更为准确、可靠的新方法。

## 1 基于平均迂曲度和 NMR 的饱和土渗透系数模型

根据文献[19]中基于 NMR 建立的考虑了微观孔隙孔径大小影响的微观孔隙通道渗流模型,该模型假设土体中的孔隙由海量的连通孔隙通道组成,因此海量的连通孔隙通道的渗透系数叠加起来便是饱和土的渗透系数,即饱和土的渗透系数可表示为

$$k_s = \frac{Q}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho g d_i^2}{32\mu} \times A_i J}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho g d_i^2}{32\mu} \times A_i}{A}, \quad (4)$$

式中: $k_s$  为土的饱和渗透系数; $Q$  为单位时间流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $J$  为水力梯度,  $\text{cm}$ ;  $A$  为土样横截面总面积,  $\text{cm}^2$ ;  $\mu$  为黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\rho$  为水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $d_i$  为第  $i$  级孔隙通道的直径,  $\text{cm}$ ;  $A_i$  为第  $i$  级孔隙通道的横截面面积,  $\text{cm}^2$ 。

取迂曲度  $\tau_i = l_i/l$ , 则  $l_i = \tau_i l$ , 第  $i$  级孔隙的体积率为  $Q_i$ , 土样总体积为  $V_T$ , 则

$$A_i = \frac{Q_i V_T}{\tau_i l}, \quad (5)$$

式中  $A_i$  为第  $i$  级孔隙通道的横截面面积。

定义平均迂曲度

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i l}{nl} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}, \quad (6)$$

式中: $l$  为土样的总长度,  $\text{cm}$ ;  $n$  为所有孔隙通道数。

由于各级孔隙通道的迂曲度不同,计算时难以分别确定各级孔隙通道的迂曲度  $\tau_i$ 。为简化计算,对于同一种土试样,取平均迂曲度  $\tau$  来替代各级孔隙通道迂曲度  $\tau_i$ , 则式(5)可改写为

$$A_i = \frac{Q_i V_T}{\tau l}. \quad (7)$$

通过 NMR 试验可获得土样的弛豫时间  $T_2$  谱曲线,该曲线表征着信号幅度和弛豫时间的对应关系。文献[15]研究成果表明弛豫时间  $T_2$  与土孔隙特性间存在以下直接关系

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{S}{V} = \frac{\lambda \rho_2}{d}, \quad (8)$$

式中: $S$  为土孔隙的表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $V$  为土孔隙的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $\rho_2$  为横向弛豫强度,  $\text{Hz}$ , 其与土颗粒表面物理化学性质有关;  $d$  为土孔隙直径,  $\text{cm}$ ;  $\lambda$  为与土孔隙形状相关的因子,柱状孔隙为4,球形孔隙为6。

将式(8)取近似值并简化可得

$$d = \lambda \rho_2 T_2. \quad (9)$$

联立式(4)(7)和式(9), 则

$$k_s = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n \frac{\rho g \lambda^2 \rho_2^2 T_{2i}^2 \theta_i}{32\mu}. \quad (10)$$

根据文献[21]的研究,在引入平均迂曲度的基础上,通过泊肃叶方程以及达西公式可以得到平均迂曲度和渗透系数间的关系表达式为

$$\tau^2 = \frac{\varphi r^2}{8k_s}, \quad (11)$$

式中, $\varphi$  为孔隙度,  $k_s$  为渗透系数,  $r$  为平均孔隙半径。

将式(11)带入式(10), 进行化简可得

$$k_s = \frac{(\rho g)^2 \lambda^4 \rho_2^4}{128 r^2 \varphi \mu^2} \left( \sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i \right)^2. \quad (12)$$

令  $k_c = \frac{(\rho g)^2 \lambda^4 \rho_2^4}{128 r^2 \varphi \mu^2}$ , 对于同一种土的相同孔隙度和平均孔隙半径状态下为常数。则式(12)可简写为

$$k_s = k_c \left( \sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i \right)^2. \quad (13)$$

式(13)表明,土体的饱和渗透系数与  $T_2$  谱曲线数据  $\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i$  的二次方成正比关系。

## 2 模型验证试验简介

### 2.1 试验材料

本次试验土样取自济南地铁裴家营站基坑内8~10 m 处,取样如图1所示。土样液限含水率为35%,塑限含水率为19%,塑性指数为16,为粉质黏土,基本物理性质指标如表1所示。



图1 试验用土  
Fig.1 Soil for the test

表 1 土体基本物理性质指标表

Table 1 Indicators of basic physical properties of soils

取样点	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	天然 含水量/%	天然密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
裴家营	19	35	16	20.4	2.04

2.2 试验仪器

(1) 固结渗透试验

渗透试验在西安康拓力动三轴试验系统上进行,配备两台压力体积控制器分别连接试样顶底两端,可精准控制试样两端水头并精确记录输出、输入水的体积,试验设备如图 2 所示。

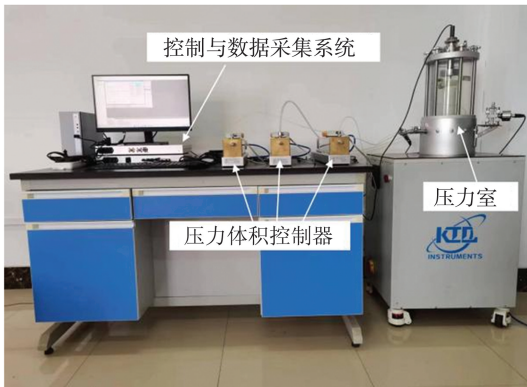


图 2 动三轴试验系统

Fig.2 Dynamic triaxial test system

(2) 核磁共振设备

采用纽迈分析仪器股份有限公司生产的 PQ-001 核磁共振分析仪进行弛豫时间  $T_2$  谱测试。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  $0.5 \pm 0.08$  T,共振频率为  $18 \sim 24$  MHz,探头内径为 28.6 mm,接收机死时间为  $30 \mu s$ ,磁体均匀区范围为直径 61 mm、高 100 mm 的圆柱体,为了保证主磁场的均匀性与稳定性,磁体温度维持在  $32 \pm 0.01$   $^{\circ}C$ 。

2.3 试验方法

根据原状土干密度制备重塑土样,在饱和度达到 95% 以上后进行常水头的固结渗透试验(见图 3)。固结试验为等压固结,即  $\sigma'_1 = \sigma'_3$ ,固结压力为 0、50、100、200、300、400、600 kPa,每级压力下固结 24 h,固结过程中排出水的体积即为试样固结压缩体积。固结过程中排水体积随时间的变化曲线如图 4 所示,由图 4 可以看出:在每级压力加载初期,排出水体积急剧增加,随后逐渐趋于稳定直到不再有水排出,也即试样固结变形稳定。在每一级固结压力下试样变形稳定后保持固结压力不变进行渗透试验,通过连接试样顶底两端的压力体积控制器控制试样两端的孔隙水压力,  $u_B = u_T + \Delta u$ ,试验设置  $\Delta u = 20$  kPa,即以 2 m 的恒定水头由下至上进行渗

透试验,测试不同压力固结稳定后粉质黏土的渗透系数。

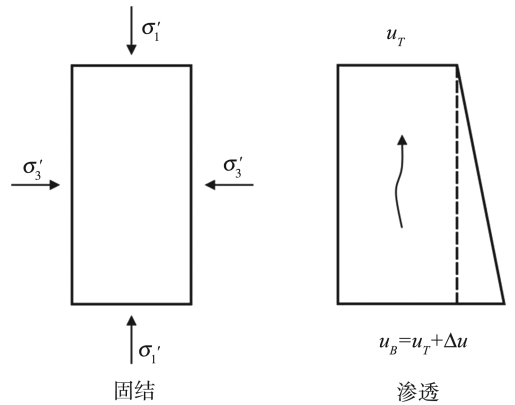


图 3 固结渗透应力状态示意图

Fig.3 Schematic diagram of consolidation penetration stress state

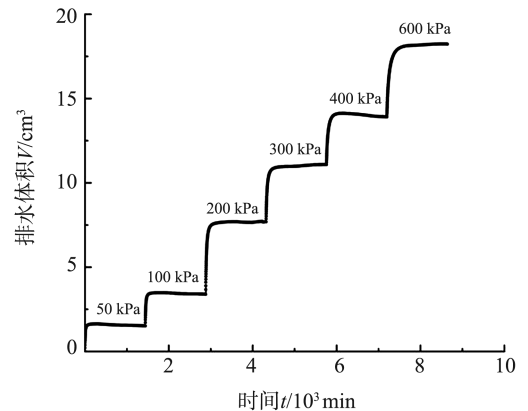


图 4 固结过程中排出水体积随时间变化曲线

Fig.4 Curve of the volume of discharged water with time during the consolidation process

渗流试验过程中,水从试样底部流入,从试样顶部流出,两端的压力体积控制器可测试水的入流量和出流量,计算得到两端的渗透系数。渗透试验开始时,由于入水端体积压力控制器注入的水增加孔隙水压力,故此时两端测试的渗透系数有较大差异。另外固结导致试样高度和直径发生变化,故根据固结排水体积和轴向应变,计算每级压力固结稳定后试样的实际高度和直径,以修正渗透系数。渗透系数随时间的变化曲线如图 5 所示,由图 5 可以看出:在每级压力下试样两端测试的渗透系数随时间增长逐渐稳定并趋于一致,取每级压力下稳定段进水端和出水端渗透系数的平均值为该固结压力下的渗透系数。

每一级压力固结渗透试验结束后,取出试样进行 NMR 试验,测试试样的弛豫时间  $T_2$  谱曲线。NMR 测试序列采用 CPMG 序列,参数设置为:采样点数  $T_D = 12796$ ,采样频率  $S_w = 200$  kHz,采样间隔时间  $T_w = 600$  ms,回波个数  $N_{ECH} = 800$  个,回波时间

$T_E = 0.08 \text{ ms}$ , 累加次数  $N_S = 16$  次。

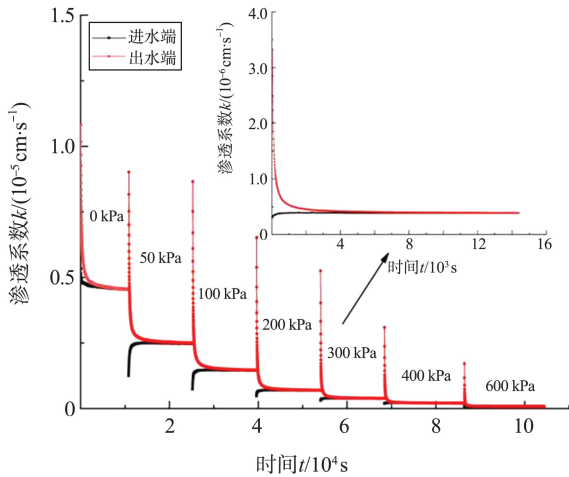
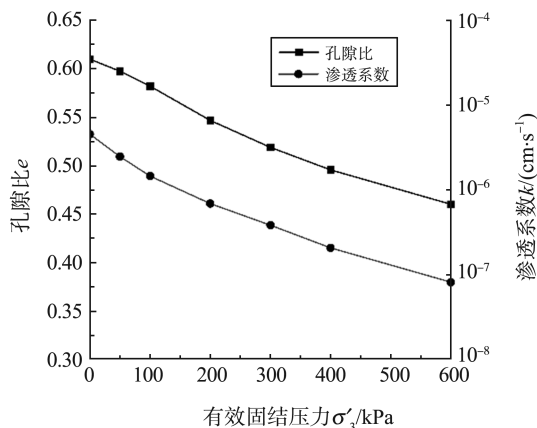


图5 渗透系数随时间变化

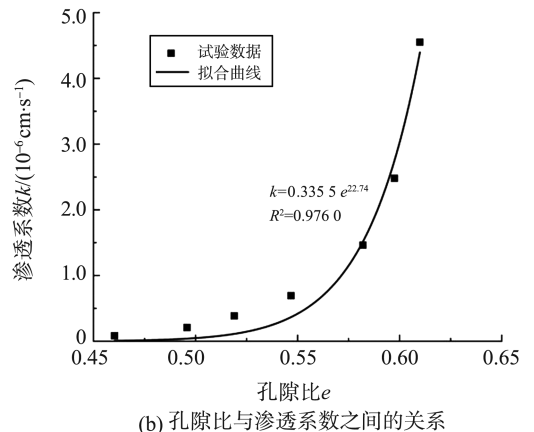
Fig.5 Variation of permeability coefficient with time

### 3 试验结果与分析

重塑粉质黏土孔隙比和渗透系数随有效固结压力的变化如图6(a)所示。从整体上看,随着有效固结压力的增大,孔隙比和渗透系数都逐渐减小。重塑粉质黏土的初始孔隙比为0.61,最终固结完成后的孔隙比为0.46,孔隙比降低24.6%,渗透系数从  $4.55 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  降低为  $8.22 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ,降低近180倍。渗透系数的降低主要是由于固结作用导致土样的内部孔隙被压缩,渗流通道面积减少,土样渗流阻力增强。孔隙比与渗透系数之间的关系如图6(b)所示,随着孔隙比减小渗透系数逐渐降低,这与其他黏性土渗透性试验结果相一致。采用幂函数对渗透系数与孔隙比之间的关系进行拟合,得到  $k = 0.335 \cdot 5e^{22.74}$ , 相关性系数  $R^2 = 0.976 \ 0$ , 说明两者具有极强的相关性,表明粉质黏土的渗透性取决于其孔隙体积的大小。



(a) 孔隙比和渗透系数随有效固结围压的变化



(b) 孔隙比与渗透系数之间的关系

图6 固结渗透试验结果

Fig.6 Results of consolidation penetration test

为了验证固结对粉质黏土渗透性的影响是来自土体内部孔隙结构的变化,对每级压力固结渗透后的试样进行NMR试验,测试得到不同固结压力下粉质黏土的  $T_2$  谱曲线如图7所示。从图7可以看出:重塑粉质黏土的  $T_2$  谱曲线有2个峰,大致集中在  $0.1 \sim 1.0 \text{ ms}$  和  $5 \sim 10 \text{ ms}$ 。研究表明,根据弛豫时间大小可将岩土体的孔隙分为三类<sup>[22-23]</sup>:小孔隙( $0.01 \sim 3.00 \text{ ms}$ )、中孔隙( $3 \sim 33 \text{ ms}$ )和大孔隙( $33 \sim 505 \text{ ms}$ ),由此可知本次试样的孔隙以小孔隙和中孔隙为主。在较小固结压力下(小于100 kPa),  $T_2$  谱曲线变化不大,中孔隙对应峰值幅度略有降低,而小孔隙对应的峰值幅度略微增加,说明在较小固结压力下少量中孔隙压缩转变为小孔隙;在固结压力大于200 kPa后,中孔隙对应的峰值幅度显著降低,当固结压力增加至600 kPa时,中孔隙对应的峰值基本消失,而小孔隙对应的峰值幅度有所增加,表明在较高的固结压力下,重塑粉质黏土的中孔隙大多压缩转变为小孔隙。在200 kPa和600 kPa两个固结压力下,  $T_2$  谱分布曲线形状变化最为显著,此时的渗透系数降低幅度也最大。

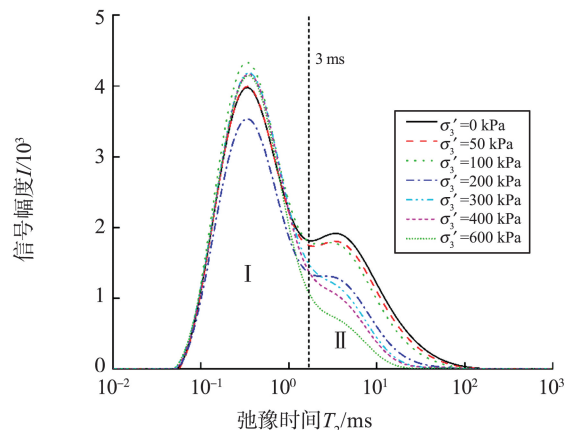


图7 不同固结压力下的  $T_2$  分布曲线

Fig.7  $T_2$  distribution curves at different consolidation pressures

根据弛豫时间的孔隙大小分类,以弛豫时间 3 ms 为界将粉质黏土的  $T_2$  谱曲线分为 I、II 两部分,获得  $T_2$  谱曲线总面积、I 峰面积和 II 峰面积随固结压力的变化如图 8 所示。总体上看, $T_2$  谱总面积随着固结压力的增加逐渐减小,表明孔隙体积逐渐减小,与孔隙比随固结压力增加而减小的变化相一致。代表小孔隙的 I 峰面积随固结压力增加变化较小,而代表中孔隙的 II 峰面积显著减小。这是由于小孔隙结构相较于大孔隙更加稳定,所以当固结压力增加时,大中孔隙更容易被压缩,其内部大量长弛豫的水分被排出, $T_2$  谱中代表中孔隙含量的长弛豫的水分峰面积显著减小 (II 峰面积)。而小孔隙的变形较小, $T_2$  谱中代表小孔隙含量的短弛豫的水分峰面积变化较小 (I 峰面积)。此外,固结过程中相应地渗透系数不断降低,表明渗透系数的降低也主要受中孔隙减少的影响。

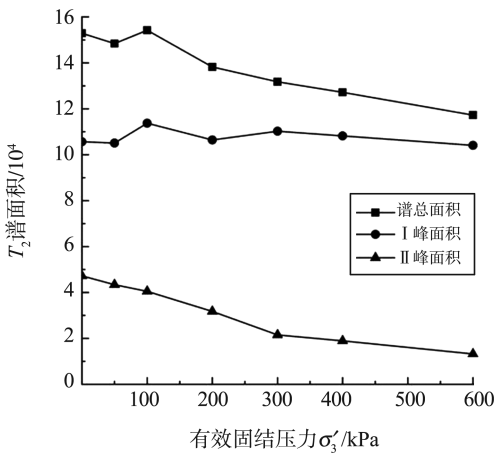


图 8  $T_2$  谱面积图  
Fig.8  $T_2$  spectrum area plot

## 4 基于平均迂曲度和 NMR 的饱和土渗透系数模型验证

### 4.1 模型验证

根据固结渗透试验实测的渗透系数  $k_s$  和 NMR 测试参数  $\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i$ , 基于式 (13) 给出了饱和试样渗透系数  $k_s$  与 NMR 测试参数  $\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i$  二次函数的关系图,如图 9 所示。

公式 (13) 表明  $k_s$  与  $(\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i)^2$  之间的关系为无常数项的一次函数,即为过原点的一条斜直线。由于试验误差,试验实测数据拟合得到关系曲线为含常数项的一次函数,为确保与理论模型一致,因

此在数据拟合处理时,对拟合的斜直线截距 (常数项) 取值做取 0 处理 (见图 9),文献 [19] 中也有相同的处理方式。处理后得到的  $k_s$  与  $(\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i)^2$  的关系表达式为式 (14)。从式 (14) 可以看出济南地铁裴家营站粉质黏土的  $k_c = 2.25 \times 10^{-9}$ , 相关性系数高达 0.981 1, 表明本研究引入平均迂曲度建立的基于平均迂曲度和  $T_2$  谱曲线的饱和土渗透系数理论预测模型科学、准确,并且对于同一种土来说  $k_c$  可视为一常数。

$$k_s = 2.25 \times 10^{-9} (\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i)^2 \quad (14)$$

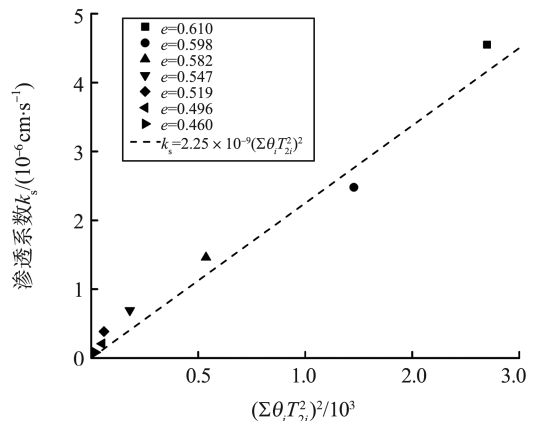


图 9 不同密实度试样饱和渗透系数  $k_s$  与

$$(\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i)^2$$

Fig.9 Relationship between saturated permeability coefficient  $k_s$  and  $(\sum_{i=1}^n T_{2i}^2 \theta_i)^2$  for samples with different compaction levels

### 4.2 模型对比分析

基于 Coates 模型、SDR 模型、 $KC_{T_{2w}}$  模型、毛细管模型和本研究模型 (毛细管改进模型) 的理论公式,结合试样的孔隙率、 $T_2$  谱数据 (见表 2) 以及不同孔隙比状态下试样的固结渗透试验实测值拟合得到各模型公式和均方根误差 (root mean square error,  $R_{MSE}$ ) 值,如表 3 所示。各 NMR 饱和土渗透模型预测值与实测值对比图,如图 10 所示。

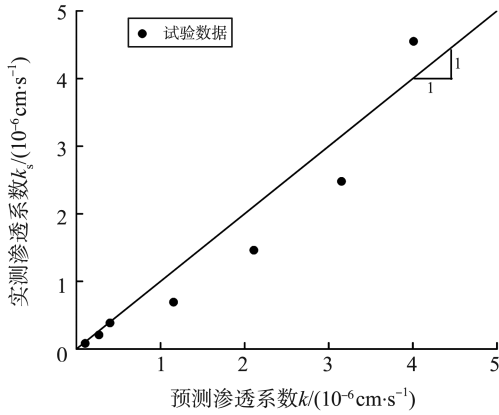
表 2 孔隙率与  $T_2$  谱数据  
Table 2 Calculated data for NMR  $T_2$  spectrum data

围压 / kPa	孔隙比 $e$	孔隙率 $\varphi$	$T_{2g}$ / ms	$F_{H1}$ / %	$B_{V1}$ / %	$F_{H1} / B_{V1}$
30	0.610	0.38	0.93	30.88	69.12	0.45
50	0.598	0.37	0.88	30.46	69.54	0.41
100	0.582	0.36	0.79	29.22	70.79	0.36
200	0.547	0.34	0.69	25.20	74.80	0.30
300	0.519	0.32	0.60	26.24	73.76	0.19
400	0.496	0.31	0.57	22.98	77.02	0.18
600	0.460	0.29	0.49	16.31	83.69	0.13

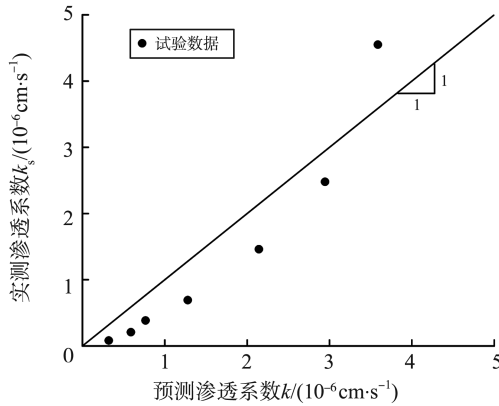
表3 基于 NMR 的饱和土渗透系数预测模型拟合公式

Table 3 NMR based permeability prediction model fitting equations

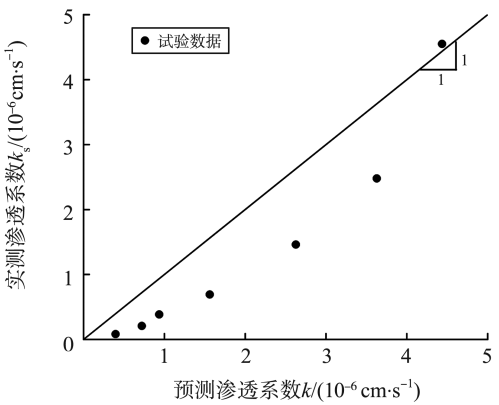
模型	拟合公式	均方根误差 $R_{MSE}$
Coates 模型	$K = \left(\frac{\varphi}{5.67}\right)^4 \cdot \left(\frac{F_{FI}}{B_{V1}}\right)^2$	$4.45 \times 10^{-7}$
SDR 模型	$K = 2 \times 10^4 \varphi^4 T_{2g}^2$	$5.73 \times 10^{-7}$
KC <sub>T<sub>2w</sub></sub> 模型	$K = 3.62 \times 10^{-5} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} T_{2g}^2$	$7.67 \times 10^{-7}$
毛细管模型	$K = 1.04 \times 10^{-7} \sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2$	$6.92 \times 10^{-7}$
本研究模型	$K = 2.25 \times 10^{-9} \left(\sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2\right)^2$	$2.53 \times 10^{-7}$



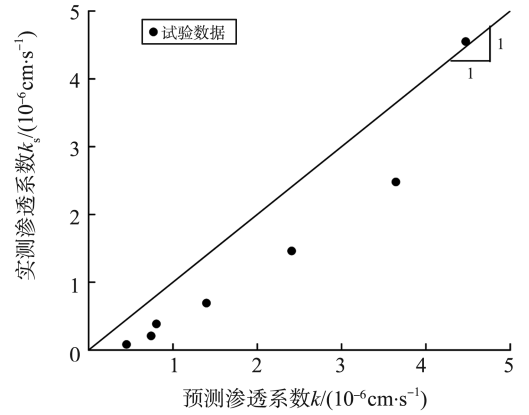
(a) Coates模型



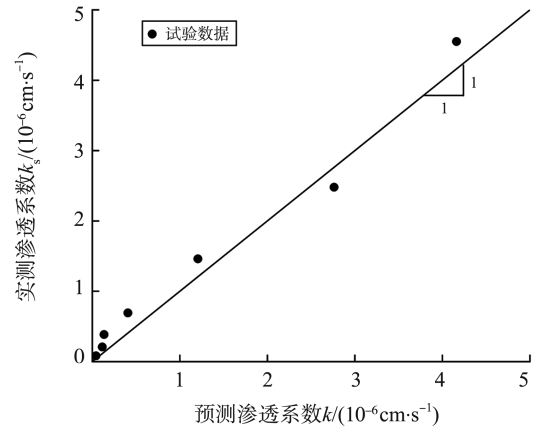
(b) SDR模型



(c) KC<sub>T<sub>2w</sub></sub>模型



(d) SDR毛细管模型



(e) 毛细改进模型

图10 基于 NMR 饱和土渗透模型预测值与实测值对比图  
Fig.10 Comparison of predicted and measured values based on NMR permeability models

从图10可以看出:各核磁渗透模型的理论值与实测值之间均具有较好的一致性,理论值与实测值均方根误差都在  $8 \times 10^{-7}$  以内,说明基于核磁技术的渗透模型可实现对土体渗透系数的良好预测。

具体从已有各模型与本研究新建模型的对比来看:相较于毛细管模型,本研究模型进一步考虑毛细管迂曲度的影响,引入平均迂曲度进行修正,有效提高了预测精度,实测值与预测值间的均方根误差降低了63.4%,仅为  $2.53 \times 10^{-7}$ 。Coates 模型中考虑了不可动流体的影响,  $F_{FI}$  和  $B_{V1}$  两个参数需要通过  $T_2$  截止值加以划分。由于该土样核磁共振  $T_2$  弛豫时间谱为双峰特征,根据经验判断法,取双峰的凹点作为  $T_2$  截止值<sup>[24]</sup>,如图11所示。本研究模型同时考虑了不同孔隙孔径和迂曲度的影响,预测精度更高,实测值与预测值间的均方根误差降低了43.1%;相较于 SDR 模型和 KC<sub>T<sub>2w</sub></sub> 模型,本研究模型虽然采用了  $\theta_i$  和  $T_{2i}^2$  双核磁参数,计算上较以上两个模型的  $T_{2g}$  单核磁参数计算更复杂,但是因表征孔隙分布的信息更详细,且进一步考虑了孔隙的迂曲度影响,预测精度大幅提高,本研究模型预测值与实

测值间的均方根误差相较于以上两个模型分别降低了55.8%和67.0%。

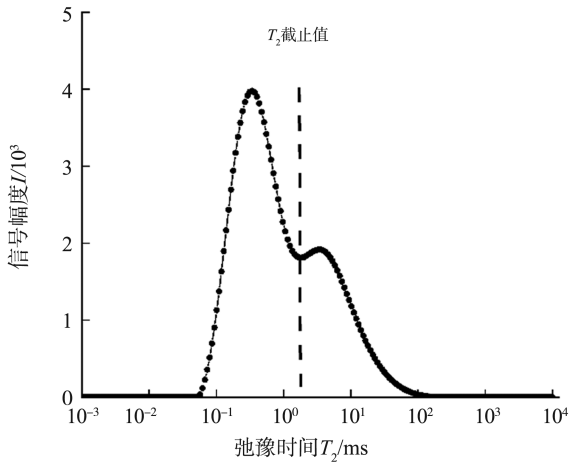


图11 可动流体与不可动流体划分示意图

Fig.11 Schematic division of movable and immovable fluids

从上述分析可以看出,饱和土渗透系数与孔隙分布、孔隙迂曲度间具有很强的相关性,由于 $T_2$ 谱具有全孔径分布的信息,所以基于 $T_2$ 谱的毛细管模型具有良好预测效果,本研究模型在毛细管模型的基础上引入平均迂曲度,进一步考虑毛细管迂曲度对土体渗透的影响,可有效提升模型预测精度,是提升NMR技术在饱和土渗透系数测试应用中的有效方法。

## 5 结论

本研究通过三轴渗透试验系统测试了重塑粉质黏土在不同固结压力下的渗透系数,结合核磁共振技术获取横向弛豫时间 $T_2$ 曲线,分析不同固结状态下粉质黏土孔隙结构的变化,从细观角度讨论了固结对粉质黏土渗透性的影响,在NMR弛豫时间 $T_2$ 谱曲线和毛细管渗流理论的基础上,进一步引入毛细管平均迂曲度,构建了考虑毛细管迂曲度影响的饱和土渗透系数预测新模型,得到如下结论。

(1)粉质黏土的孔隙比和渗透系数都随着固结压力的增大而减小,渗透系数随孔隙比降低而降低,两者之间呈幂函数变化关系。

(2)粉质黏土的 $T_2$ 分布曲线在弛豫时间0.1~1.0 ms(I峰)和5~10 ms(II峰)出现两个峰,表明其孔隙以小孔隙和中孔隙为主。随着固结压力的增大, $T_2$ 谱总面积、II峰峰值强度和面积降低明显,表明在固结过程中总孔隙的减小主要来源于中孔隙的压缩,所以粉质黏土渗透系数的降低主要源于中孔隙的减少。

(3)本研究模型在NMR技术和毛细管渗流模

型的基础上进一步考虑了孔隙通道迂曲度对土体渗透性的影响,相较已有模型,其预测值与实测值间的均方根误差降低43.1%~67.0%,有效提高了饱和土渗透系数的预测精度,为NMR技术更精准预测饱和土渗透系数提供了新的有效途径。

(4)本研究模型未考虑土体中孔隙的孔径分布和孔隙通道迂曲度的复杂程度对饱和土渗透性的影响,后期可引入分形理论进一步研究,以提高NMR技术预测饱和土渗透系数的准确性。

### 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(9):1218-1226.  
LU Linhai, WU Chaojun, SUN Jiecheng, et al. Micropore characteristics and CT seepage test of Jinan red clay with a strong vertical permeability[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(9): 1218-1226.
- [2] 朱晓天.渗流作用下粉质黏土地层超深基坑危害数值模拟分析[J].隧道与地下工程灾害防治,2022,4(2):98-106.  
ZHU Xiaotian. Numerical simulation analysis of ultra-deep foundation pit in silty clay formation under seepage[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(2): 98-106.
- [3] 孙文斌,曹震博,董法旭.断层破碎带岩石裂隙渗透性的表征方法[J].隧道与地下工程灾害防治,2023,5(1):1-7.  
SUN Wenbin, CAO Zhenbo, DONG Faxu. Characterization method of rock fracture permeability in fault fracture zone[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(1): 1-7.
- [4] 刘松玉,詹良通,胡黎明,等.环境岩土工程研究进展[J].土木工程学报,2016,49(3):6-30.  
LIU Songyu, ZHAN Liangtong, HU Liming, et al. Environmental geotechnics: state-of-the-art of theory, testing and application to practice[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 6-30.
- [5] 杨忠翰,李明宝,张旭.孔隙度对黏性土渗透系数影响的试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(3):1152-1156.  
YANG Zhonghan, LI Mingbao, ZHANG Xu. Experimental research on the influence of porosity on permeability coefficient of clay soil[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3): 1152-1156.
- [6] 房营光,徐亚飞,谷任国,等.基于有效孔隙分布特征的黏土渗透系数公式推导[J].人民长江,2023,54(1):227-232.  
FANG Yingguang, XU Yafei, GU Renguo, et al. Formula derivation of clay permeability coefficient based

- on effective pore distribution characteristics [J]. Yangtze River, 2023, 54(1): 227-232.
- [7] 陶东新, 梧松, 刘洪涛, 等. 考虑有效孔隙率变化的淤泥固化土渗透性研究 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(11): 136-143.
- TAO Dongxin, WU Song, LIU Hongtao, et al. Study on the permeability characteristics of sludge soil considering the variation of effective porosity [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(11): 136-143.
- [8] ZENG L L, CAI Y Q, CUI Y J, et al. Hydraulic conductivity of reconstituted clays based on intrinsic compression [J]. Géotechnique, 2020, 70(3): 268-275.
- [9] 杨周洁, 于海浩, 汤沁, 等. 氯化钠溶液对膨胀土膨胀力及孔隙分布影响的研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊2): 77-80.
- YANG Zhoujie, YU Haihao, TANG Qin, et al. Effects of sodium chloride solution on swelling pressure and pore distribution of expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Suppl.2): 77-80.
- [10] 李彰明, 曾文秀, 高美连, 等. 典型荷载条件下淤泥孔径分布特征核磁共振试验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(5): 057401.
- LI Zhangming, ZENG Wenxiu, GAO Meilian, et al. Nuclear magnetic resonance experimental study on the characteristics of pore-size distribution in muck under several typical loading cases [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 057401.
- [11] LIANG W Y, YAN R T, XU Y F, et al. Swelling pressure of compacted expansive soil over a wide suction range [J]. Applied Clay Science, 2021, 203: 106018.
- [12] 邓克俊 著, 谢然红 编. 核磁共振测井理论及应用 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.
- [13] KENYON W E, DAY P I, STRALEY C, et al. A three-part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(3): 622-636.
- [14] 张娜, 王若晨, 张婧雯, 等. 基于 NMR 的煤系泥页岩储层渗透率预测及影响因素分析 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(3): 148-154.
- ZHANG Na, WANG Ruochen, ZHANG Jingwen, et al. Prediction of coal measure shale reservoir permeability and analysis of influencing factors based on NMR [J]. Coal Technology, 2023, 42(3): 148-154.
- [15] 吴广水, 田慧会, 郝丰富, 等. 基于核磁共振  $T_2$  时间分布快速预测不同干密度土体的渗透系数 [J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊1): 513-520.
- WU Guangshui, TIAN Huihui, HAO Fengfu, et al. Rapid prediction of the permeability coefficient for soil of different dry densities with NMR  $T_2$  distribution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 ( Suppl. 1 ): 513-520.
- [16] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE N. The permeability of porous materials [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1950, 201(1066): 392-405.
- [17] MARSHALL T J. A relation between permeability and size distribution of pores [J]. Journal of Soil Science, 1958, 9(1): 1-8.
- [18] 陶高梁, 孔令伟. 基于微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数模型及其应用 [J]. 水利学报, 2017, 48(6): 702-709.
- TAO Gaoliang, KONG Lingwei. A model for determining the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils based on micro pore channel and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 702-709.
- [19] 陶高梁, 彭寅杰, 陈银, 等. 基于 NMR 的非饱和土相对渗透系数快速预测新方法 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 470-479.
- TAO Gaoliang, PENG Yinjie, CHEN Yin, et al. A new fast prediction method for relative permeability coefficient of unsaturated soils based on NMR [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 470-479.
- [20] 蒯文博, 宁贵霞, 马丽娜, 等. 非饱和重塑弱膨胀土微观孔结构特征与水力迂曲度研究 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(4): 124-130.
- LIN Wenbo, NING Guixia, MA Lina, et al. Study on micro-pore structure characteristics and hydraulic tortuosity of unsaturated remolded weak expansive soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(4): 124-130.
- [21] GHANBARIAN B, HUNT A G, EWING R P, et al. Tortuosity in porous media; a critical review [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1461-1477.
- [22] JIA H L, DING S, WANG Y, et al. An NMR-based investigation of pore water freezing process in sandstone [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 168: 102893.
- [23] 林键, 杨溢, 曹广勇, 等. 静水压作用下砂岩渗透特性及渗透率模型改进 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(3): 776-787.
- LIN Jian, YANG Yi, CAO Guangyong, et al. Study on the permeability characteristics of sandstone under hydrostatic pressure and model improvement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(3): 776-787.
- [24] 刘卫, 邢立. 核磁共振录井 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.