

DOI: 10.11779/CJGE201911005

细粒迁移及组构变化对黏土渗透性影响的试验研究

杨德欢, 韦昌富*, 颜荣涛, 汤沁, 刘莉

(桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为进一步探究水化学环境下土体渗透性的变化规律及作用机理, 对饱和和重塑压实黏土样在不同水化学条件及渗流路径下进行了一系列变水头渗透试验, 分析了不同浓度的 NaCl 溶液在不同渗流路径下对饱和黏土渗透性的影响。结果表明: 不同干密度试样的渗透性随浓度增加展现出较大的差异, 干密度为 1.40 g/cm^3 时, 渗透系数呈先升后降, 而干密度为 1.50 g/cm^3 时, 渗透系数不断降低; 逆转渗流方向, 试样渗透系数发生突变; 孔隙盐溶液浓度周期性变化, 试样渗透性不可逆。基于核磁共振 (NMR) 分析技术, 测试了土体内部孔隙结构分布随孔隙盐溶液浓度的变化。最后基于上述试验结果从细粒迁移产生的孔隙堵塞效应和组构改变引起的孔隙封闭效应两个方面, 解释了孔隙盐溶液浓度变化对黏土渗透性的影响。

关键词: 黏土; 盐溶液; 渗透系数; 细粒迁移; 核磁共振

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-2009-09

作者简介: 杨德欢(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程方面研究。E-mail: ydh9008@126.com。

Experimental study on effects of fine particle migration and fabric change on permeability of clay

YANG De-huan, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, TANG Qin, LIU Li

(Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The permeability of soils is of importance in the engineering design and construction. For the clayey soils, the change law and mechanism of permeability in hydrochemical environment are not clear due to the complex physicochemical interactions between the clay minerals and pore water. To explore the effects of salt solution on the permeability, a series of variable head permeability tests are performed on the remolded clay samples. The results show that the variation of the permeability with the concentration depends upon the dry density. For the samples with the dry density of 1.4 g/cm^3 , the permeability increases firstly and then decreases as the concentration increases. However, the permeability of samples with the dry density of 1.5 g/cm^3 decreases continuously. When the direction of seepage is reversed, the permeability of the samples changes drastically. The change of permeability is irreversible under the periodical variation of the pore water concentration. In addition, the measurement of the variation of pore structure in the soils with the salt solution concentration is conducted by the nuclear magnetic resonance (NMR) analysis. Based on the above experimental results, the effects of salt solution concentration on the clay permeability are explained from two aspects: pore plugging effects caused by fine particle migration and pore sealing effects caused by fabric change.

Key words: clay; salt solution; coefficient of permeability; fine particle migration; nuclear magnetic resonance

0 引言

渗透性是岩土介质工程性质的重要组成部分, 对工程设计、施工和安全运营等都有重要影响^[1]。近年来, 环境污染和海咸水入侵等问题日益突出, 大量工业废水、海咸水及垃圾渗沥液等渗入周围土体, 导致土体宏观水理性质的改变, 衍生出一系列涉及化学-水力学耦合作用的工程问题^[2-4], 引起了不少学者的重视。

目前, 在环境、石油、岩土工程等领域, 研究人员从宏、微观层面和从化学-力学的角度已对孔隙水化

学条件变化下的岩土介质渗流问题展开了不同侧重点的深入研究。Goldenberg 等^[5]通过咸淡水交替的渗透试验发现, 当用淡水驱替含水介质(砂样)中的咸水时, 其渗透系数显著降低(即水敏感性), 而再用咸水

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572293, 11562007, 11372078); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198215)

收稿日期: 2019-04-23

*通讯作者(E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn)

驱替淡水时,其渗透系数几乎不可恢复。分析认为^[5-6],渗透性突变主要机制是驱替液浓度变化使含水介质中次生黏土矿物(包括膨胀性和非膨胀性)膨胀和其促使微小颗粒的松动与释放,引起颗粒重分布,堵塞了关键的导水孔隙通道。Goldenberg 等^[7]进一步指出,水化学条件一定时,砂样水敏感性突变幅度与含水介质中黏土矿物成分有关,具体表现为含蒙脱石时的变化幅度将明显大于含高岭石和伊利石的情况。

Jones^[8]和 Khilar 等^[9]研究了孔隙水浓度递减速率对岩心渗透性的影响,结果表明,浓度突变试验中渗透性的降低程度明显高于渐变试验中渗透性的变化,分析认为这与颗粒释放量和释放速度有关。Quirk^[10]和 Kia 等^[11]探究了在 NaCl 和 CaCl₂ 的混合液体系统中,细颗粒释放与溶液组分的关系,发现颗粒表面吸附的 Ca²⁺可极大地降低表面 z 电势,从而有效地阻止黏土颗粒的释放。Xiao^[12]通过理论模型和试验研究了细颗粒对砂土和土工织物的堵塞,指出堵塞程度应综合考虑颗粒大小和数量的影响。

与含黏粒砂样等相比,黏土内部包含的颗粒更细(表面作用强)且固相土骨架表面带电(因黏土矿物的同晶置换、晶格缺陷等)。当孔隙水化学条件变化时,固-液相间复杂的物理化学作用致使土结构发生改变,导致水理性质变化更为复杂。梁健伟等^[13]研究人工和天然极细颗粒黏土渗流的微电场效应,指出土颗粒表面的结合势(水膜)会显著影响土的渗透性能。Sridharan 等^[14]根据平板扩散双电层理论,建立了不同孔隙水化学条件下蒙脱石黏土渗透性与有效渗流孔隙比之间的经验关系。可以看出,孔隙水化学条件变化对黏土渗透性的作用机理,目前大多基于 Gouy-Chapman 理论,认为孔隙溶液浓度增加,抑制扩散双电层发育,使得有效渗流孔隙率增大,导致渗透性增加^[2, 13-16]。该理论可定性解释主要黏土矿物成分为蒙脱石的高液限黏土(CH)的变化情况,如膨润土。但对于低液限黏土(CL),Yilmaz 等^[17]研究发现,随电解质溶液浓度增加,其渗透性却呈现为降低。邓友生等^[18]、谌文武等^[19]也曾报道过类似的试验结果。很明显,孔隙溶液浓度变化对黏土渗透性的影响不能简单地用双电层理论来解释。根据前人对含黏粒砂样等的研究成果,孔隙水化学条件变化下黏土渗透性的改变可能同样与其内部细颗粒的迁移及微观孔隙结构

的变化有关。然而,目前这方面的研究颇少且不够深入,有待进一步的试验验证。

基于此,首先,笔者选取主要黏土矿物成分为高岭石的高液限黏土作为研究对象,以 NaCl 溶液为代表,利用改进的渗透仪,开展室内变水头试验测试,系统地研究了孔隙水浓度变化对黏土渗透性的影响规律。然后,选取代表试样进行核磁共振测试分析,探究饱和土体孔隙结构随盐溶液浓度变化的演化规律。最后,从内部颗粒的迁移堵塞渗流喉道和颗粒间物理化学作用力变化引起土组构的改变两个方面,探讨了孔隙水浓度变化对黏土渗透性的影响机理。

1 试验概况

1.1 土样的预处理和性质

试验用土取自广西南宁五象新区某工地地下 6.5~8.0 m 处。因天然土体中往往含易溶盐或杂质,可能影响试验结果,为此对土样进行洗盐预处理。参照文献[20, 21],具体洗盐操作如下:将 300 g 风干黏土粉末(粒径<2.0 mm)倒入容积为 2 L 的量筒内,向量筒中注入蒸馏水(导电率 1.8 μs/cm)至 2 L 刻度处;用搅拌器混合均匀后,静置 48 h 使漂浮于水中的细微颗粒充分沉淀;量测上层清液导电率后吸出(倒虹吸原理),再重新向量筒中注入新鲜蒸馏水使之混合。重复上述操作直至上层清液导电率趋于稳定,认为土样中不含电解质。最后,无电解质的土样被烘干、碾碎、过筛(2.0 mm),取筛下土储存于塑料桶中,供试验用。需要说明的是,洗盐过程中,滤除的上层清液为清澈透明的液体,可认为没有黏土矿物滤出。

表 1 呈现了试验土样的基本物理化学性质^[22]。由表 1 可知:其比表面积(亚甲基蓝法)为 34.42 m²/g,液限为 54.4%,塑性指数为 29.5;土样中分别含有 4.37%, 28.63%和 67.00%的砂粒、粉粒和黏粒。可确定该试验用土为高液限黏土(CH),其黏土矿物成分中以高岭石(占 94%)为主,含少量伊利石(占 6%)。

1.2 试验仪器

为实现渗透液在土中双向渗流,笔者基于南 55 型渗透仪原理^[23],对渗透仪进行了改进,如图 1 所示。图 1 中,通过拧紧螺栓,挤压氟胶 O 型垫片,封堵顶盖、底座与环刀之间的缝隙,形成密闭腔体,使渗透

表 1 土样的物理参数和黏土矿物成分

Table 1 Physical parameters of soil sample and mineralogical composition of clay

土体相对 密度 G _s	塑限/%	液限/%	塑性指数	类别	总比表面积 (m ² ·g ⁻¹)	颗粒组成/%			黏土矿物含量/%		
						砂粒组	粉粒组	黏粒组	蒙脱石	伊利石	高岭石
2.73	24.9	54.4	29.5	CH	34.42	4.37	28.63	67.00	0	6	94

注:取下沉深度为 10 mm 所对应的含水率为液限值。

液只能经土体流动。试样与上、下透水石之间均垫有中速定量滤纸, 以尽可能减少由渗流等因素引起的细微颗粒迁移而堵塞透水石通道对试验结果所造成的影响。考虑到 Cl^- 具有一定的腐蚀性, 文中渗透仪和环刀均采用抗腐蚀性能优良的 316 不锈钢加工而成。

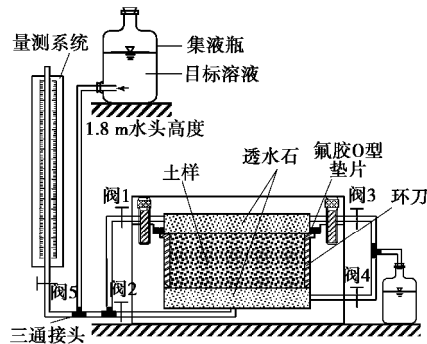


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental devices

1.3 试样制备和溶液配制

渗透环刀样 ($d=61.8 \text{ mm}$, $h=40 \text{ mm}$) 制备与傅鑫晖等^[24]的制样方法类似。首先, 用蒸馏水拌匀湿土, 装入自封袋中密封保存, 待水分迁移平衡后, 复测湿土含水率, 其值控制在 $23.5\% \pm 0.5\%$ 内。然后, 根据设定的干密度 1.40 g/cm^3 和 1.50 g/cm^3 , 称取相应的湿土质量, 采用静压法, 分 3 层 (每层土料质量相等) 压实成样。为保证各土层间接触良好, 每层压实后, 将其表面刨毛。要求各试样间干密度变化幅值小于 0.02 g/cm^3 。最后, 将制备的环刀样装入叠式饱和器中, 抽气, 灌入目标溶液浸泡饱和。

本次研究中, 孔隙盐溶液 (渗透液) 采用分析纯级 NaCl 晶体与实验室自制蒸馏水配制而成^[22]。之所以选用 NaCl 溶液作为渗透液是因为其性质稳定, 不与黏土矿物反应形成新的化合物, 且 Na^+ 和 Cl^- 在自然界中广泛存在, 能较好地模拟天然真实情况。文中盐溶液浓度 C_i 共设定 8 级, 分别为 0 (蒸馏水), 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 mol/L 。其设定依据是杨德欢^[22]前期对试验用土开展的液塑限试验结果: 在低浓度阶段 (小于 1.0 mol/L), 液限随浓度变化十分显著, 而随浓度增加后, 液限变化幅度很小。需要说明的是, 制备的环刀试样中已含有少量水, 配制指定浓度的盐溶液时, 需考虑这一部分水量。

1.4 试验思路 and 过程

自然条件下, 土体中孔隙水浓度可因海咸水入侵等作用而升高, 也可因降雨等作用而降低。为探究孔隙水浓度变化对天然黏土渗透性的影响规律及其作用机制, 笔者开展了以下试验研究。试验中, 渗透系数

每 24 h 量测一次, 每次连续读记 3 次, 取其平均值作为试验值, 具体操作参见文献[23]。当渗透系数随时间的变化基本保持不变时, 认为试样达到渗流稳定状态。取每一级浓度渗流稳定后的渗透系数作为试样在该浓度 C_i 时的渗透系数。所有渗透试验均在室温约 20°C 的条件下进行。

(1) 盐渍化试验

该试验目的在于研究天然黏土遭受盐溶液侵蚀, 其渗透系数的变化情况以及盐溶液与土体作用方式的不同对渗透系数的影响。

路径一, 用蒸馏水制样并浸泡饱和, 之后将试样装入渗透仪中。向试样通蒸馏水进行渗流, 待渗流稳定后, 用浓度为 C_i 的 NaCl 溶液驱替蒸馏水。再次等待渗流稳定后, 换用下一级更高浓度的 NaCl 溶液驱替。重复上述步骤, 直到渗透液浓度增至 4.0 mol/L 。因上述渗透液浓度的逐级提升是在同一试样中进行, 为便于区分, 后文称其为“连续渗流”。

路径二, 用蒸馏水制样抽气后, 直接灌入目标浓度的 NaCl 溶液浸泡饱和。为使反应充分, 密封浸泡 1 个月后, 再将试样装入渗透仪中, 并向试样通入与浸泡液相同浓度的 NaCl 溶液进行渗流。因试验是在不同试样中进行, 故后文将其称为“分开渗流”。

(2) 去盐渍化渐变试验

该试验目的是探究渗透液浓度分级淡化对黏土渗透性的影响。具体做法是用低浓度溶液驱替原孔隙中高浓度溶液, 观察试样渗透系数的变化。考虑到土体渗透性随浓度周期性变化是否可逆这一规律可用于判定浓度淡化引起渗透性改变的主导机制。为此, 待渗透液浓度降至蒸馏水且渗流稳定后, 再换用去盐渍化前的同级高浓度渗透液驱替蒸馏水。

本次研究选取盐渍化试验路径二中, 在浓度为 0.2 mol/L 和 0.5 mol/L 的渗透液作用下渗流稳定后的土样作为去盐渍化渐变试验的初始状态, 然后向试样中逐级通入浓度为 C_i 的 NaCl 溶液。

(3) 渗流逆转试验

为探究孔隙水浓度增加引起黏土渗透性的改变是否与土中细粒 (主要指黏粒) 迁移堵塞渗流孔隙喉道有关, 调研文献[25, 26]发现, 在渗透试验过程中逆转渗透液流动的方向, 当其渗透性发生突变 (增加或减小), 可认定是细粒迁移降低渗透性的证据。为此, 笔者利用改进的渗透仪, 开展渗流逆转试验。首先进行正向流动, 即图 1 中开阀 2 和阀 3 进行渗流; 待渗流稳定后, 进行逆向流动, 即关阀 2 和阀 3, 将渗透仪翻转 180° , 然后开阀 1 和阀 4。因试样置于渗透仪的正中, 且渗透液始终从试样底部注入, 顶部排出,

故试验中可消除水力梯度变化对试验结果造成的影响。

此次研究选取盐渍化试验路径二中，在浓度为 0.05, 0.1 mol/L 的渗透液作用下正向渗流稳定之后，再翻转仪器，进行逆向渗流。

(4) 核磁共振分析试验

为从细微观层面探讨孔隙水浓度增加对土体渗透性的影响，选取代表性土样，进行核磁共振（NMR）分析测试，探究饱和试样孔隙结构分布随孔隙溶液浓度的变化规律。NMR 分析技术是基于核磁共振信号的谱峰面积正比于氢质子数，可用于含水率的定量测试；信号衰减的快慢（由弛豫时间表征）能够反映孔隙水所处的环境，进而反演出多孔介质孔径大小及分布^[27]。

本研究选取盐渍化试验路径二中，以 0, 0.05, 0.1, 1.0, 4.0 mol/L 的 NaCl 溶液为渗透液，分开渗流稳定后的试样，进行 NMR 测试。试验仪器采用苏州纽迈公司研制的 MacroMR12-150H-I 型大口径核磁共振成像分析仪，其主频率为 12.8 MHz。

2 试验结果

2.1 盐渍化路径黏土渗透系数的变化规律

图 2 给出了标准温度（20℃）下，试样在各级浓度的盐溶液渗流稳定之后，渗透系数 k_{20} 值随渗透液浓度的变化曲线。

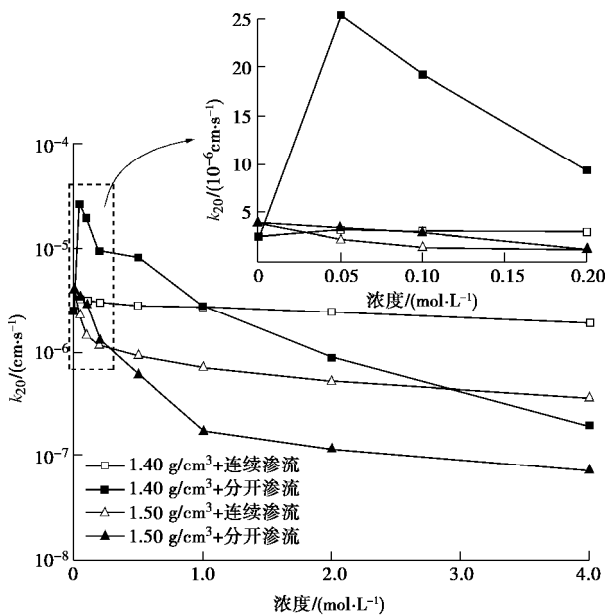


图 2 盐溶液浓度对渗透系数的影响

Fig. 2 Effects of NaCl concentration on coefficient of permeability

由图 2 可知，同一干密度试样，不同的盐渍化路径（分开渗流和连续渗流）的渗透系数随渗透液浓度

的变化规律是相似的。具体表现为：干密度为 1.40 g/cm³ 试样的 k_{20} 值呈先增大后减小，而干密度为 1.50 g/cm³ 试样的 k_{20} 值呈单调降低。相比而言，分开渗流的变化幅度比连续渗流的更大。上述结果表明：相同干密度，经不同路径，系统达到同一浓度时，其渗透性差异明显；而相同路径下，不同干密度试样渗透性随浓度的变化趋势也不尽相同。这说明孔隙水浓度对黏土渗透性的影响与干密度和渗流路径相关。另外，从图 2 中还可以看出，以蒸馏水作为渗透液渗流至稳定状态，干密度为 1.40 g/cm³ 试样的 k_{20} 值从 9.28×10^{-5} cm/s 降至 2.48×10^{-6} cm/s，而干密度为 1.50 g/cm³ 试样的 k_{20} 值从 9.12×10^{-6} cm/s 降至 3.88×10^{-6} cm/s。对比可知，干密度大的试样渗流稳定后的 k_{20} 值却略大，这与常见的土体干密度越大，渗透系数越小有所不同。

此外，试验用土为高液限黏土（CH）（见表 1），但其渗透系数随浓度的变化与 Yilmaz 等^[17]对高液限黏土（CH）的研究结果不同，而类似于低液限黏土（CL）的变化情况。其原因可能与试样的黏土矿物成分有关，将在第 3.3 节中进行讨论。

2.2 去盐渍化路径黏土渗透系数的变化规律

图 3 是以低浓度溶液驱替高浓度溶液时，土体渗透系数随替换时间的变化曲线。

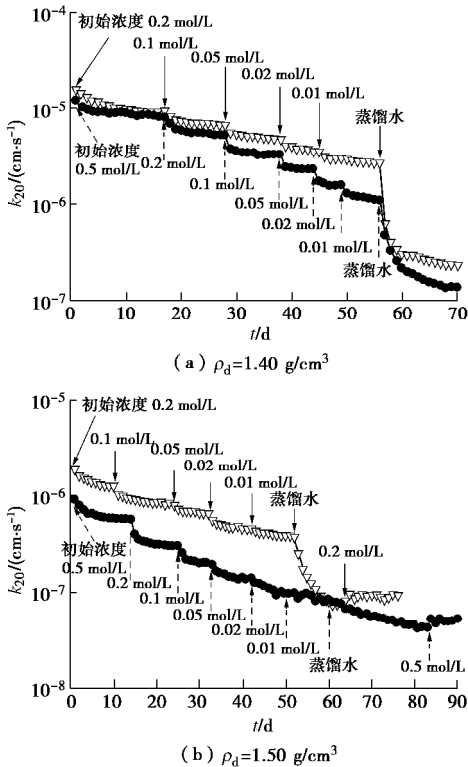


图 3 渗透系数随浓度渐变的时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of coefficient of permeability changing with concentration

由图 3 可见，随低浓度渗透液的渗入， k_{20} 值逐渐

降低。尤其是当渗透液浓度降至蒸馏水时, k_{20} 值陡降近 1 个数量级。而 Mungan^[25]对含黏粒砂岩的浓度渐变试验发现, 渗透性仅降低了 3%。这表明岩土介质渗透性随孔隙水浓度渐变的改变幅度与土中黏粒的含量有关。

图 3 (b) 中, 在蒸馏水渗流稳定后, 重新通入初始盐溶液 (分别为 0.2, 0.5 mol/L), k_{20} 值仅略有回升, 分别从 7.75×10^{-8} cm/s 增至 9.45×10^{-8} cm/s 和从 4.31×10^{-8} cm/s 增至 5.34×10^{-8} cm/s。说明随孔隙水浓度周期性变化, 土体渗透系数的改变是不可逆的。Mcneal 等^[28]描述了类似的试验现象。

2.3 渗流方向逆转黏土渗透性的变化规律

图 4 显示了在浓度为 0.05, 0.1 mol/L 的渗透液作用下, 试样渗透系数随渗流方向改变的时程曲线。

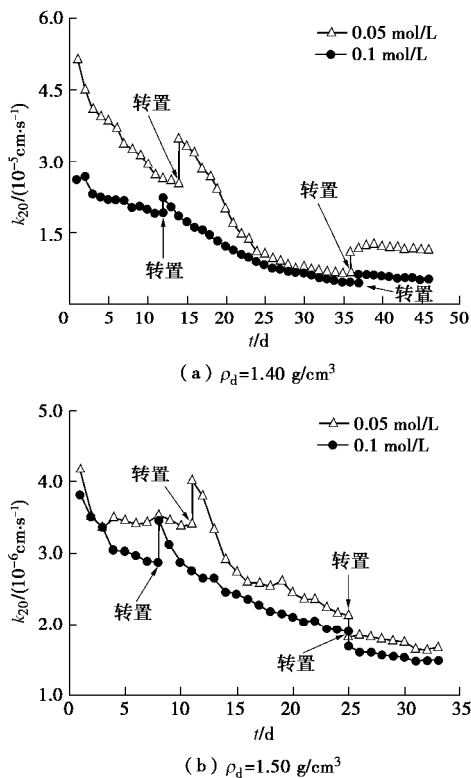


图 4 渗透系数随渗流方向变化的时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of coefficient of permeability varying with seepage direction

由图 4 可知, 试样经第一次逆转时, k_{20} 值均突然增大, 随后逐渐减小, 最终低于逆转前的数值。当再次逆转试样, 干密度为 1.40 g/cm^3 试样的 k_{20} 值又突然增大, 而干密度为 1.50 g/cm^3 试样的 k_{20} 值突然降低, 两者之后随时间变化不明显。图 4 的试验结果表明, 改变渗流方向引起的渗透系数变化也不可逆。

分析认为, 改变渗流方向引起渗透系数的变化与孔隙的解堵和堵塞有关^[25-26]。首先, 进行反渗时, 前期 (正向渗流) 被细粒迁移堵塞的孔喉解堵, 使孔隙

连通性增强, 渗透系数突然增大。随后, 在渗透力^[29]的作用下, 黏粒会在流道中迁移, 直至在孔喉处沉积, 再次堵塞渗透通道, 使土体的渗透性逐渐降低。该试验结果较好地说明了黏土渗透性改变与其内部细颗粒迁移阻塞渗流通道有关。

2.4 水-土化学作用下土体孔隙分布的演化规律

基于 NMR 的工作原理, 溶液中的盐分会降低水分子的活性, 可能影响核磁测试结果。为评价孔隙溶液中盐分对核磁测试结果的影响, 试验中对纯溶液的情况进行了标定, 如图 5 所示。横坐标为氢核横向弛豫时间 (T_2), 其值正比于孔隙半径 R , 故饱和土样 T_2 分布曲线能够反映土体孔隙分布曲线; 纵坐标为核磁信号幅值, 代表孔隙的体积^[30]。图中的核磁信号幅值是按体积归一化处理后的值, 即每毫升溶液的核磁信号。由图 5 可见, 随盐溶液浓度的增加, 其信号峰值逐渐降低, 但信号峰值点对应的 T_2 值却几乎没有改变。这说明无机盐的存在不会影响核磁对土体的孔隙分布测试。

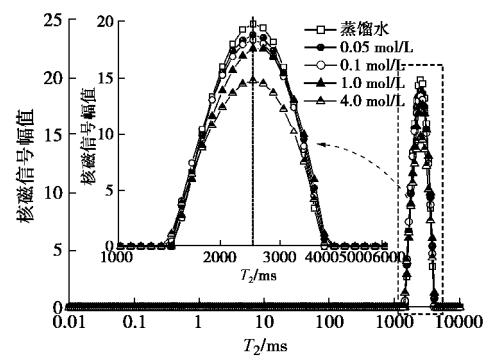


图 5 不同浓度纯盐溶液的 T_2 分布曲线

Fig. 5 T_2 -distribution curves of bulk salt solution with different concentrations

图 6 (a), (b) 分别为干密度 $1.40, 1.50 \text{ g/cm}^3$ 代表性试样的 NMR 测试结果。由图 6 可知, 压实黏土试样经饱和、渗流后内部存在弱双峰孔隙结构 (峰 1 和峰 2)。这与 Li 等^[31]利用压汞试验测得压实试样饱和和后存在弱双峰孔隙结构的结论相一致。

从图 6 还可看出, 随孔隙水浓度的增加大孔径分布曲线的峰值点 (峰 1) 向左偏移, 在低浓度 (小于 1.0 mol/L) 阶段, 峰 1 偏移明显, 之后偏移趋势减缓 (见图 6 中详图)。小孔径分布曲线的峰值点 (峰 2) 在干密度为 1.50 g/cm^3 时略向左偏移, 而干密度为 1.40 g/cm^3 时无明显偏移。大孔径分布曲线的变化规律与谌文武等^[19]以压汞法探究含盐量对土体孔径分布的研究成果相吻合, 即随含盐量的增加, 孔径分布曲线的峰值点逐渐向左偏移。

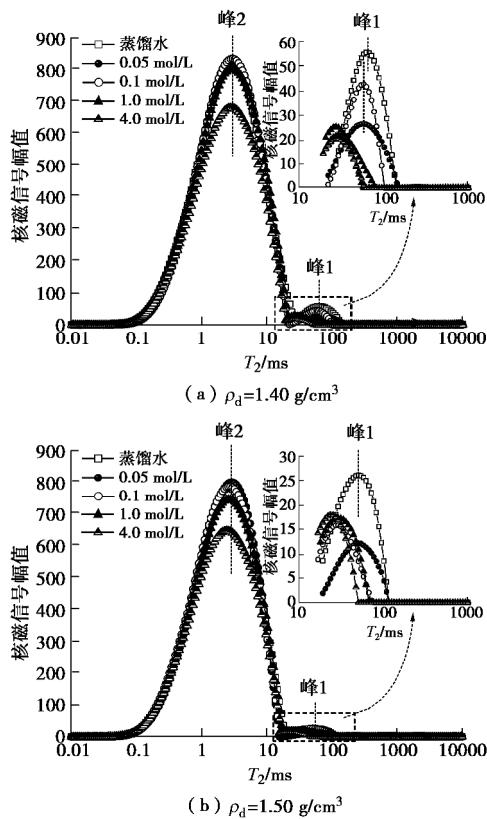
图6 不同浓度盐溶液对试样 T_2 分布曲线的影响

Fig. 6 Effects of salt solution with different concentrations on T_2 -distribution curves of samples

3 分析与讨论

3.1 孔隙水盐渍化对黏土渗透系数的影响

Mitchell 等^[1]指出,黏土的渗透性是有效孔隙空间和比表面积的函数。通常,孔隙水化学条件变化不会对比表面积产生较大影响,但会显著改变土体的孔隙结构^[14, 32-34]。此外,渗透力作用下内部细颗粒的迁移会影响有效渗流通道。因此,后文将重点从有效孔隙空间变化的角度,探析孔隙水浓度变化对黏土渗透性的影响机制,即考虑孔径大小及分布和孔隙连通性对土体渗透性的影响。

根据 Mitchell 等^[1]对土体内部孔隙的划分及 NMR 测试结果(弱双峰孔隙结构)的启示。笔者认为,经重塑压实及饱和制备的试样,主要存在颗粒间及集聚体内部的微观孔隙和集聚体间或与砂粒、粉粒间的细观孔隙。因集聚体内部的微观孔隙大多是封闭的,很少与外界连通,故细粒土的渗透性主要受控于细观孔隙的改变^[1]。

对比图 6(a), (b) 中孔隙溶液为蒸馏水时的 NMR 测试结果可知,试样干密度增大,细观孔隙明显减小(见图 6 中的详图)。Li 等^[31]利用压汞试验也指出土体压实过程中以集聚体间(interaggregate)孔隙的改

变为主。故在蒸馏水渗流的初期,干密度 1.40 g/cm^3 (k_{20} 值为 $9.28 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$) 试样的渗透系数高于干密度 1.50 g/cm^3 (k_{20} 值为 $9.12 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) 的试样。但由表 1 得知,试验用土的黏土矿物包含高岭石和伊利石,它们的多孔介质中极易产生迁移^[35]。当渗透液为蒸馏水时,颗粒间斥力占主导,且此时渗透液的浓度可能低于黏粒释放的临界矿化度,使得土中黏粒大量释放并处于分散状态,如图 7(a) 所示。在渗透力作用下,黏粒向上迁移,在孔喉处架桥沉积,堵塞渗流通道^[36],称孔隙堵塞效应。相比而言,试样干密度越小,颗粒间约束越弱,空间自由度越大,黏粒越易迁移,孔隙堵塞效应越严重,致使孔隙连通性越差。进而出现图 2 所示现象,蒸馏水渗流稳定后,干密度 1.40 g/cm^3 (k_{20} 值为 $2.48 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) 试样的渗透系数低于干密度 1.50 g/cm^3 (k_{20} 值为 $3.88 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) 试样的渗透系数。

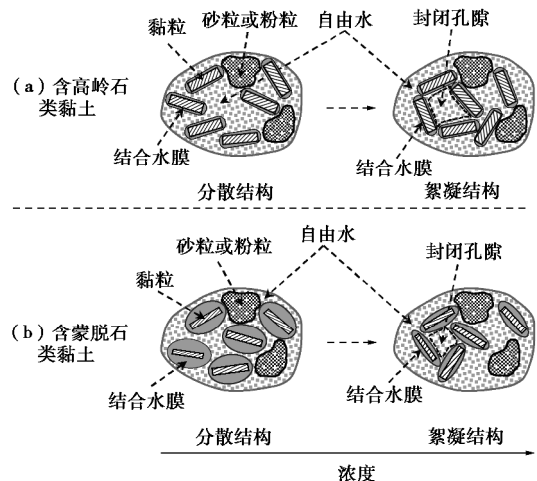


图7 饱和土样微观结构变化示意图

Fig. 7 Schematic of microstructural change of saturated soil samples

一方面,孔隙水浓度增加,颗粒表面扩散双电层被压缩,粒间净引力增强,片状颗粒相互吸引形成絮凝结构的集聚体,如图 7(a) 所示。絮凝的集聚体颗粒相对粗大且连接较强,从而抑制了土中黏粒的释放与迁移,孔隙堵塞效应减弱。另一方面,由图 6 中 T_2 分布曲线向左偏移得知,原来的一些开放孔隙被包裹(水受颗粒表面影响的增强使得其活性降低,即 T_2 减小)。即絮凝结构的形成,使得部分原始渗流孔隙转变为集聚体内部的封闭孔隙(以下称孔隙封闭效应)而不能被利用,有效渗流孔隙率减小。上述二者随浓度变化对渗透性的贡献正好相反。

图 2 表明,孔隙水浓度影响渗透性的规律受到干密度的影响。结合前面的分析,笔者认为:干密度较低时,蒸馏水渗流稳定后产生的孔隙堵塞效应较严重,

致使渗透系数较低;而当渗透液浓度增至 0.05 mol/L 时,迁移的黏粒变大且连接增强使得孔隙堵塞效应显著减弱,而此时絮凝组构形成引起的孔隙封闭效应不突出,综合作用下使得渗透系数增大;浓度在 $0.05 \sim 4.0 \text{ mol/L}$ 区段,组构的絮凝程度随浓度增加而增强,孔隙封闭效应逐渐突出并占主导,使得渗透系数降低。故干密度为 1.40 g/cm^3 时,渗透系数随浓度增加呈先升后降。而干密度增大(即 1.50 g/cm^3 时),颗粒间约束增强,孔隙堵塞效应减弱,由组构变化(絮凝)引起的孔隙封闭效应占据主导,使得其渗透系数随浓度增加而单调降低。

图 2 还表明,同一干密度试样,分开渗流与连续渗流两种路径的渗透系数随孔隙溶液浓度的变化规律虽相似,但变化幅度差异明显。原因在于,连续渗流试验是在蒸馏水渗流到达稳定的基础上进行的,其受前期的孔隙堵塞效应的影响。干密度为 1.40 g/cm^3 时,黏粒迁移造成的孔隙堵塞效应较为严重,后续提升渗透液浓度对土体有效渗流孔隙的改变不明显,故渗透系数只是略有改变。但干密度为 1.50 g/cm^3 时,孔隙堵塞效应相对较弱,之后随渗透液浓度的提升,组构变化显著,故渗透系数变化趋势仍较大。

3.2 孔隙水去盐渍化对黏土渗透性的影响

孔隙水浓度减小引起土体渗透系数降低的原因主要有两个^[35]:一是由黏粒的膨胀引起有效渗流孔隙变小,其本质上是一个可逆过程;二是在去絮凝作用下,黏粒分散迁移堵塞渗流孔隙通道,具有不可逆性。结合试验用土包含的黏土矿物成分(高岭石为主,少量伊利石)极易迁移和浓度周期性变化渗透系数的不可逆性(见图 3(b)),认为本文去盐渍化过程渗透性降低的主导机制是在去絮凝作用下,黏粒分散迁移造成的孔隙阻塞导致渗透系数减小。

另外,黏粒释放与沉积的速率受黏土颗粒和孔壁间相互作用力的控制,与渗透液浓度密切相关。根据前人^[10,37]对含黏粒砂岩的研究,黏粒大量释放要求渗透液浓度低于相应临界矿化度,其值在 $0.035 \sim 0.05 \text{ mol/L}$ 之间。基于图 3,笔者推测,本文用土中黏粒释放对应的临界矿化度可能低于 0.01 mol/L ,故在此之后以蒸馏水入渗时,渗透性改变显著。同时,该试验结果印证了前面分析,在蒸馏水渗流稳定时,干密度 1.40 g/cm^3 试样的渗透系数异常低于干密度 1.50 g/cm^3 试样的渗透系数,是由于严重的孔隙堵塞效应所致。

3.3 讨 论

由表 1 可知,本文试验用土同属 CH 类土,但渗透性随孔隙溶液浓度的变化规律与文献[14, 17]中报道的结果截然相反,该现象可能与试验用土中的黏土矿物成分有关。在文献[14, 17]中,CH 类土的黏土矿

物成分以蒙脱石为主,具有较强的表面活性,在黏土颗粒的表面可形成较厚的结合水膜,如图 7(b)所示。结合水膜具有较大的黏滞性,将阻碍水在土中流动。孔隙溶液浓度增加,将压缩结合水膜的厚度,使部分结合水转化为自由水,在不考虑渗流过程中试样体积改变的情况下,这相当于增大了试样的有效渗流孔隙率^[2-14];虽然孔隙溶液浓度增加也将促使黏土颗粒絮凝,使部分原始渗流孔隙转变为集聚体内部的封闭孔隙而不能被利用,有效渗流孔隙率降低。但对于含蒙脱石类 CH 的情况,可能是双电层厚度变化引起的有效孔隙率改变占据主导,掩盖了土中组构改变和黏粒迁移对渗透性所产生的影响,最终宏观上呈现为土体渗透系数随渗透液浓度增加而增大。Yu 等^[38]通过 NMR 测试发现随孔隙溶液浓度的增加,膨胀土的 T_2 分布曲线向右偏移,证实了膨胀土的有效导水通道随孔隙溶液浓度增加而增大。

对于含高岭石和伊利石类 CH 的情况,其黏土矿物的阳离子交换量、比表面积和表面负电荷量等都远低于蒙脱石^[1, 39]。因此,与蒙脱石类 CH 相比,孔隙溶液浓度增加,其表面结合水膜厚度变化相对较小,如图 7(a)所示。此时,颗粒间组构变化(絮凝)引起的有效渗流孔隙空间减小占主导地位,另外,高岭石和伊利石容易发生迁移,堵塞孔喉。在上述因素的共同作用下,导致渗透系数随渗透液浓度的增加而降低。Sridharan^[39]也曾报道了高岭土和蒙脱土随孔隙介质化学性质的变化往往呈现出截然相反的工程特性。

4 结 论

本文以天然黏土为研究对象,采用改进的渗透仪测试了孔隙水浓度变化下试样渗透性的变化规律,分析总结得到以下结论:

(1) 孔隙溶液浓度的改变显著影响黏土的渗透性,其影响规律受到干密度的制约。具体表现为,随浓度增加,干密度较低时,渗透系数呈先升后降,而干密度较大时,渗透系数单调降低。

(2) 改变渗流方向,试样渗透系数具有突变性;随孔隙水浓度周期性变化,试样渗透性不可逆。其原因与土体内部包含的黏土矿物产生的颗粒迁移有关。

(3) 核磁共振技术可用于分析水-土化学作用下,饱和黏土孔隙结构的变化规律。结果表明,重塑压实样的孔隙分布呈弱双峰孔隙结构。随孔隙溶液浓度增加, T_2 分布曲线向左偏移,意味着孔隙水浓度增加引起的组构变化使得有效渗流孔隙空间减小。

(4) 基于核磁共振测试结果和渗透系数的突变性,认为在水-土化学作用引起组构变化产生的孔隙封

闭效应和渗透力作用下黏粒迁移引起的孔隙堵塞效应的综合作用下, 黏土渗透性随浓度增加而减小。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005.
- [2] 朱伟, 徐浩青, 王升位, 等. CaCl_2 溶液对不同黏土基防渗墙渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1224 - 1230. (ZHU Wei, XU Hao-qing, WANG Sheng-wei, et al. Influence of CaCl_2 solution on the permeability of different clay-based cutoff walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1224 - 1230. (in Chinese))
- [3] 杨玉玲, 杜延军, 范日东, 等. 膨润土系隔离墙材料渗透特性研究综述[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 2): 210 - 216. (YANG Yu-ling, DU Yan-jun, FAN Ri-dong, et al. Advances in permeability for bentonite-based hydraulic containment barriers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S2): 210 - 216. (in Chinese))
- [4] 汤文, 姚志宾, 李邵军, 等. 水化学作用对滑坡滑带土的物理力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2885 - 2892. (TANG Wen, YAO Zhi-bin, LI Shao-jun, et al. Effect of pore water chemistry on physical and mechanical properties of sliding-zone soil: an experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(10): 2885 - 2892. (in Chinese))
- [5] GOLDENBERG L C, MAGARITZ M, MANDEL S. Experimental investigation on irreversible changes of hydraulic conductivity on the seawater-freshwater interface in coastal aquifers[J]. Water Resources Research, 1983, **19**(1): 77 - 85.
- [6] KHILAR K C, FOGLER H S. The existence of a critical salt concentration for particle release[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1984, **101**(1): 214 - 224.
- [7] GOLDENBERG L C, MAGARITZ M, AMIEL A J, et al. Changes in hydraulic conductivity of laboratory sand-clay mixtures caused by a seawater-freshwater interface[J]. Journal of Hydrology, 1984, **70**(1): 329 - 336.
- [8] JONES JR F O. Influence of chemical composition of water on clay blocking of permeability[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, **16**(4): 441 - 446.
- [9] KHILAR K C, FOGLER H S. Water sensitivity of sandstones[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, **23**(1): 55 - 64.
- [10] QUIRK J P, SCHOFIELD R K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability[J]. Journal of Soil Science, 1955, **6**(2): 163 - 178.
- [11] KIA S F, FOGLER H S, REED M G. Effect of salt composition on clay release in Berea sandstones[J]. SPE Production Engineering, 1987, **2**(4): 277 - 283.
- [12] XIAO M. Modeling fine particles clogging in filters and drainage layers[D]. Kansas: Kansas State University, 2001.
- [13] 梁健伟, 房营光, 谷任国. 极细颗粒黏土渗流的微电场效应分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3043 - 3050. (LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang, GU Ren-guo. Analysis of microelectric field effect of seepage in tiny-particle clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3043 - 3050. (in Chinese))
- [14] SRIDHARAN A, CHOUDHURY D. Computation of hydraulic conductivity of montmorillonitic clays by diffuse double layer theory[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **2**(1): 1 - 10.
- [15] SHARIATMADARI N, SALAMI M, KARIMPOUR F M. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers[J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, **9**(2): 103 - 110.
- [16] STUDDS P G, STEWART D I, COUSENS T W. The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures[J]. Clay Minerals, 1998, **33**(4): 651 - 660.
- [17] YILMAZ G, YETIMOGLU T, ARASAN S. Hydraulic conductivity of compacted clay liners permeated with inorganic salt solutions[J]. Waste Management & Research, 2008, **26**(5): 464 - 473.
- [18] 邓友生, 何平, 周成林, 等. 含盐土渗透系数变化特征的试验研究[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 772 - 774. (DENG You-sheng, HE Ping, ZHOU Cheng-lin, et al. Experimental study of permeability coefficient of saline soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(5): 772 - 774. (in Chinese))
- [19] 谌文武, 吕海敏, 吴国鹏, 等. 盐分对遗址土体渗透性及孔径的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(8): 2747 - 2751. (CHEN Wen-wu, LÜ Hai-min, WU Guo-peng, et al. Influence of salt in site soils on permeability and pore diameter [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(8): 2747 - 2751. (in Chinese))
- [20] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of Kaolinite soils: I surface charges and structural characterizations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(6): 587 - 600.
- [21] CHEN J, ANANDARAJAH A. Influence of pore fluid

- composition on volume of sediments in Kaolinite suspensions[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1998, **46**(2): 145 - 152.
- [22] 杨德欢. 孔隙水溶液对高岭土变形特性的影响机理[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2016. (YANG De-huan. Influencing mechanism of pore water chemistry on volume change behavior of Kaolinite[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [23] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [24] 傅鑫晖, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 非饱和红黏土的强度特性研究[J]. *岩土力学*, 2013, **32**(增刊 2): 204 - 209. (FU Xin-hui, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Research on strength characteristics of unsaturated red clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **32**(S2): 204 - 209. (in Chinese))
- [25] Mungan N. Permeability reduction through changes in pH and salinity[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1965, **17**(12): 1449 - 1453.
- [26] GKAY D H, REX R W. Formation damage in sandstones caused by clay dispersion and migration[C]// *Clays and Clay Minerals: Proceedings of the Fourteenth National Conference*. 1966: 355 - 366.
- [27] COATES G R, XIAO L L, PRAMMER M G. NMR logging principles and application[M]. Houston: Halliburton Energy Services Publication, 1999.
- [28] MCNEAL B L, COLEMAN N T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, **30**(3): 308 - 312.
- [29] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(8): 1522 - 1528. (LI Guang-xin. On soil skeleton and seepage force[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(8): 1522 - 1528. (in Chinese))
- [30] 田慧会, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 粉土中二氧化碳水合物分解过程的核磁试验研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, **49**: 034615. (TIAN Hui-hui, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. A NMR-based analysis of carbon dioxide hydrate dissociation process in silt[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, **49**: 034615. (in Chinese))
- [31] LI X, ZHANG L M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(2): 129 - 141.
- [32] ANANDARAJAH A. Mechanism controlling permeability change in clays due to changes in pore fluid[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(2): 163 - 172.
- [33] SUZUKI S, PRAYONGPHAN S, ICHIKAWA Y, et al. In situ observations of the swelling of bentonite aggregates in NaCl solution[J]. *Applied Clay Science*, 2005, **29**(2): 89 - 98.
- [34] MONTORO M A, FRANCISCA F M. Soil permeability controlled by particle-fluid interaction[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2010, **28**(6): 851 - 864.
- [35] 林国庆. 咸淡水过渡带渗透性突变的机理与效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. (LIN Guo-qing. Mechanism and application of abrupt changes of hydraulic conductivity on the seawater-freshwater interface[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese))
- [36] 宋林辉, 黄强, 闫迪, 等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(9): 1635 - 1641. (SONG Lin-hui, HUANG Qiang, YAN Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(9): 1635 - 1641. (in Chinese))
- [37] SHARMA M M, CHAMOUN H, SARMA D S H S R, et al. Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, **149**(1): 121 - 134.
- [38] YU H H, SUN D A, TIAN H H. NMR-based analysis of shear strength of weakly expansive clay in sodium chloride solution[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2019, **58**: 6 - 13.
- [39] SRIDHARAN A. Fourth IGS-Ferroco Terzaghi Oration: 2014[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2014, **44**(4): 371 - 399.