

硫酸钠盐渍土渗透特性研究

刘力¹, 万旭升^{*1}, 王智猛², 邱恩喜¹, 龚富茂¹, 钟昌茂¹, 吴松波¹

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 盐渍土内部水分渗流过程是影响区域生态环境演变、水资源利用以及工程施工、使用安全的重要因素。为预测饱和硫酸钠盐渍土渗透系数曲线,通过修正土水势模型推导了饱和盐渍土渗透系数计算模型,并通过渗透试验验证该计算模型的可靠性;此外,通过室内渗透试验研究了微纳米材料对盐渍土渗透性的影响。结果表明:渗透系数计算模型可较好反映饱和硫酸钠盐渍土渗透系数的变化规律,渗透系数随着含盐量的增加而减小,当含盐量大于2%后变化很小。硫酸钠盐渍土的渗透系数随着纳米二氧化硅的掺量增加而减小,随着纳米碳酸钙的掺量增加先减小后增大,随着相变材料的掺量增加先增大后减小并趋于稳定。

关键词: 硫酸钠盐渍土;渗透系数;土水势模型;预测模型;微纳米材料

中图分类号: TU448

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202006010

0 引言

特殊土在工程建设中比较常见,其特有的性质和危害给工程建设带来了不少困难。盐渍土作为一种特殊土,是指易溶盐含量大于0.3%,并具有溶陷、盐胀和腐蚀等工程特性的岩土,它在我国分布范围很广,尤其是西北干旱地区^[1]。盐渍土的盐胀融沉引发的基础工程问题严重制约了该地区经济发展。土的渗透性是土体评价的一项重要内容,渗透系数则是衡量土体渗透性能的一项重要指标。研究盐渍土的渗透系数对防治和改良其病害有着重要的意义。

土体渗透系数的影响因素有很多,王双等^[2]采用神经网络研究了碎石土级配特征对渗透系数的影响,而Shafiee^[3]、朱崇辉等^[4]研究了混合黏土的级配对渗透系数的影响,发现颗粒的圆度越大,渗透系数越大。邵龙潭等^[5]提出了一种渗透系数的测量方法并给出了经验预测公式。Zhou等^[6]、邓友生等^[7]、孙大松等^[8]通过室内试验,得出了渗透系数与干容重、土颗粒大小和所受固结压力的关系,并推导了非饱和土渗透系数的理论

表达式。然而,渗透系数的测定非常依赖于仪器设备,由不同仪器设备测量而得到的结果区别较大,目前还没有建立盐渍土渗透系数理论模型。在土的渗透改良研究方面,张登武等^[9]发现硫酸盐水泥、石灰和粉煤灰不同比例的配合对盐渍土的改良效果比单独使用其中任何一种好,所以对其进行了冻融试验和渗透试验。用混合料改良后,盐渍土的渗透性很小。米海珍等^[10]研究了石灰土、二灰土和水泥土3种改良土的渗透性能,得出了防渗土料掺入料的最佳配比。随着纳米材料的兴起,很多学者都尝试利用纳米材料进行改性研究,Ren等^[11]、Rong等^[12]、陈学军等^[13]通过一系列试验研究,发现新型纳米材料可以改变土体的物理性质,纳米材料(纳米二氧化硅、纳米碳酸钙)可以提高黏土的单轴抗压强度和液塑限,减小其平均孔径,提高水泥抗压抗折强度并影响红黏土黏聚力、内摩擦角和抗剪强度,从而改变材料的强度特性。虽然微纳米材料在很多工程领域都有了应用成功的经验,但关于其对盐渍土渗透性能影响的研究并不多见。

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-05-11。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601068);西南石油大学科研起航计划资助项目(2015QHZ025);西南地区红层泥岩道路工程特性及修建技术研究(KYY2019140(19-20))。

作者简介: 刘力(1993-),男,硕士生, E-mail: 584076878@qq.com; 万旭升*(1987-),男,副教授, E-mail: xinyanwanxxusheng@163.com。

本文针对盐渍土渗透模型不健全及渗透特性改良方面存在的问题,通过建立颗粒级配曲线与孔径分布的关系,借助土水特征曲线建立渗透系数计算模型,并通过室内渗透试验,研究添加微纳材料(纳米二氧化硅、纳米碳酸钙和相变材料)后硫酸钠盐渍土渗透性能,进一步探究盐渍土中溶液迁移机理和渗透特性改良机理,以期对盐渍土地区工程实践提供一定的参考依据。

1 理论研究模型

从微观孔隙角度出发,将土水特征曲线作为反映土体孔隙通道的间接指标,陶高粱等^[14]建立了饱和土的渗透模型:

$$k_s = \frac{\rho_w g \sigma \cos^2 \alpha}{2\tau\mu} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{\phi_m^2(\theta)} \quad (1)$$

式中: k_s 为饱和土的渗透系数; ρ_w 、 g 为水的密度和重力加速度(各取 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 、 9.8 m/s^2); σ 为表面张力,25℃时取 0.072 N/m ; α 为接触角(饱和土可取 $\alpha=0^\circ$); τ 为孔隙通道实际长度与土样长度的比值,即迂曲度,可视为常数 $2^{[15]}$; μ 为水的黏度,25℃时取 $0.8937 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$; ϕ_m 为基质吸力(kPa),其表达式为

$$\phi_m = 2\sigma \cos \alpha / r \quad (2)$$

其中 r 为孔隙半径; $\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$ 分别为最大(饱和)和最小体积含水率。

考虑到盐渍土中含有盐分,土体中不仅存在基质势,还会存在溶质势。当含盐量较高时,溶质势不可忽视,所以将式(2)中 ϕ_m 项修正为土水势 ψ ,其表达式为

$$\psi = \phi_m + \psi_s \quad (3)$$

ψ_s 为溶质势,在常温条件下,假定盐分充分溶解到孔隙水中,则溶质势可表示为^[16]

$$\psi_s = \rho_w RT \ln a_w / M_w \quad (4)$$

其中 R 为气体常数,取 $8.314\text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$; T 为温度(K); M_w 为水的摩尔质量,取 18 g/mol ; a_w 为盐溶液中的水分活度^[17-21]。故饱和土的渗透模型可修正为

$$k_s = \frac{\rho_w g \sigma \cos^2 \alpha}{2\tau\mu} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{(\phi_m(\theta) + \psi_s)^2} \quad (5)$$

土体中孔隙分布特征是决定其渗透性的关键。利用分形理论研究多孔介质孔隙分布是一种好方法,但是对于土体而言,更简洁有效的方法是从粒度分布的角度去研究孔隙分布,采用孔径、含

水量与粒度分布的关系^[22]:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i^{1-\gamma}/6} \quad (6)$$

式中: r_i 为第 i 个粒度组所对应的孔隙半径; e 为土体孔隙比; γ 为尺度参数,取 $1.4^{[22]}$; R_i 为第 i 个粒度组的平均粒径; n_i 为第 i 个粒度组的颗粒数量,可用下式计算:

$$n_i = 3w_i / 4\pi d_s R_i^3 \quad (7)$$

其中 w_i 为颗粒曲线中第 i 个粒度组含量, d_s 为土粒相对密度。对颗粒级配曲线划分微段,可建立 w_i 与 R_i 的关系,具体如图1所示。

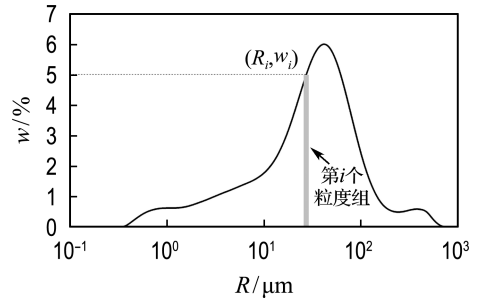


图1 土颗粒粒径分布曲线划分

Fig. 1 Division of soil particle size distribution curve

$$\theta_i = \Phi S_w \sum_{j=1}^i w_j \quad (8)$$

式中: θ_i 为小于第 i 个粒度组尺寸的累积体积含水率; Φ 为土体孔隙率; S_w 为饱和含水量测量值与孔隙率理论值的比值,取1。

对于特定孔隙半径 r_i 而言,其土水势可由下式计算:

$$\psi_i = \frac{2\sigma}{r_i} \quad (9)$$

为了建立含水量与土水势的关系,首先通过颗粒级配曲线建立不同粒径与其对应含水量之间的关系,然后基于孔径与粒径的半经验公式建立不同孔径与对应含水量的关系,进而得到土水特征曲线。具体步骤如图2所示。

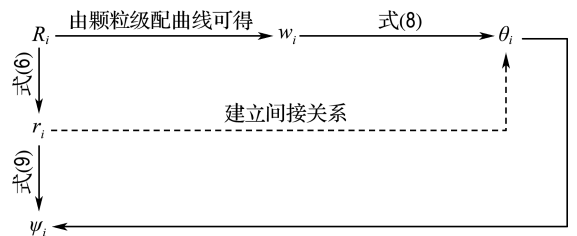


图2 变量关系图

Fig. 2 Variable relation graph

2 试验与方法

2.1 试验材料和试验装置

试验用土取自甘肃兰州地区,取土深度为 0.5~1.0 m,土性为粉质黏土,土样基本物理性质见表 1,土样粒度分布如图 3 所示.掺加的微纳材料为纳米二氧化硅、纳米碳酸钙和相变材料,3 种材料外形均为白色粉末,粒径分别为 (30 ± 10) nm、40~80 nm 和 1~50 μm . 纳米二氧化硅比表面积 150~300 m^2/g ,含量 $\geq 99.5\%$,堆积密度 0.057 g/cm^3 . 纳米碳酸钙主含量 $>97\%$,pH 8.0~11.0,沉降体积 >2.4 mL/g. 相变材料为保温材料,主要成分为改性芯材、甲苯二异氰酸酯、聚乙二醇,相变热 165 J/g. 本次试验采用人工配制硫酸钠盐渍土,以消除试验差异并控制土样含盐量. 试验用土经过脱盐、烘干、碾碎和过筛,最后进行密封保存.

表 1 土样基本物理性质

Tab. 1 Physical properties of soil sample

土性	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	质量含水量/%	液限/%
粉质黏土	1.6	18.5	26.3
塑限/%	d_s	e	饱和度 S_r /%
18.3	2.7	0.706	70.8

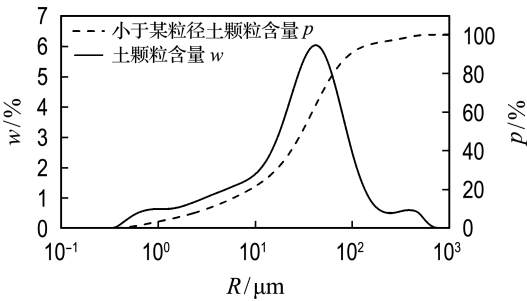


图 3 土样颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve of soil sample

本次试验采用变水头渗透试验方法,试验装置为 TST-55 型渗透仪,如图 4 所示. 渗透容器由环刀、透水石、套环、上盖和下盖组成,环刀内径 61.8 mm、高 40 mm,透水石的渗透系数大于 0.001 cm/s;变水头装置由渗透容器、变水头管、供水瓶、进水管等组成,变水头管内径 6.6 mm、长 2.0 m,满足《土工试验方法标准》^[23]的要求.

2.2 试验方法

试验土样设置含盐量为 0、1%、2%、3% 和 4%,由此探寻含盐量对土样渗透性的影响规律.



图 4 TST-55 型渗透仪

Fig. 4 TST-55 permeameter

再取高含盐量(3%)土样,分别掺加不同含量(1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%)的纳米二氧化硅、纳米碳酸钙和相变材料. 文中涉及含量的数据均为质量分数.

制样时,控制土样含水量为 18.5%,首先按计算数据配制硫酸钠盐溶液,需要掺加掺料时,先将称量好的土和掺料充分混合后,再均匀地喷入盐溶液,将盐溶液和土样充分拌和,装入密封袋并放置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中稳定 24 h,进一步使盐溶液和土样均匀混合. 装样时取试样干密度为 1.6 g/cm^3 . 记录试验数据时,需要同时记录时间、水柱高度和出水温度,当水柱下降一定高度(大于 10 cm)后再次记录. 最后改变水柱高度,对同一试样重复 5 次试验,以便计算得出渗透系数平均值,减小试验误差. 其余具体试验方法和步骤均按照《土工试验方法标准》进行. 试验装置简图如图 5 所示.

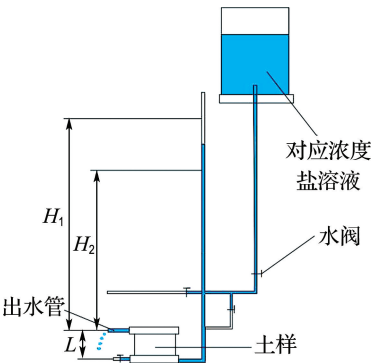


图 5 试验装置简图

Fig. 5 Diagram of test device

试验过程中盐溶液不断填充孔隙进而发生渗透,故在计算过程中可认为土样是饱和的. 不同含盐量土样对应盐溶液浓度见表 2.

由于土样孔隙在渗流过程中不断填充,可近似认为有水流流出时为饱和状态,可根据式(1)~(4)计算盐渍土渗透系数.

表 2 不同含盐量土样对应盐溶液浓度
Tab.2 Salt solution concentration of soil samples
with different salt contents

含盐量/%	盐溶液浓度/(mol·kg ⁻¹)
0	0
1	0.38
2	0.76
3	1.41
4	1.52

处理数据时按变水头渗透系数计算公式进行计算^[18].

$$k=2.3 \frac{aL}{A(t_1-t_2)} \lg \frac{H_1}{H_2} \tag{10}$$

式中： a 、 A 分别为变水头管和土样的断面面积 (cm²)；2.3 为 ln 和 lg 的变换因数； L 为渗径，即试样高度 (cm)； t_1 、 t_2 分别为测读水头的起始和终止时间 (s)； H_1 、 H_2 分别为起始和终止水头。

按照式(10)计算得出渗透系数，进行温度校正后对 3 个在允许误差值范围内的数据取平均值，作为一个试样在标准水温(20 ℃)下的渗透系数。

2.3 颗粒级配划分方法

在土样颗粒分析中，对图 3 中累积含量曲线进行拟合，得出前 i 组累积含量 $\sum_{j=1}^i w_j$ 与土颗粒粒径的关系，如式(11)所示：

$$\sum_{j=1}^i w_j = \frac{100.022\ 21}{[1+(0.007\ 02/2R_i)^{2.789\ 74}]^{0.276\ 75}} - 0.022, \tag{11}$$
$$R^2=0.999\ 6$$

为了获取高精度，需要土颗粒级配曲线拟合函数，对土颗粒粒径取对数之后再按间隔 0.065 分组，即

$$\lg R_{i-1}=\lg R_i-0.065 \tag{12}$$

对土颗粒粒径取对数后再进行均匀分组，所得土颗粒含量分布与试验值非常接近，如图 6 所示。

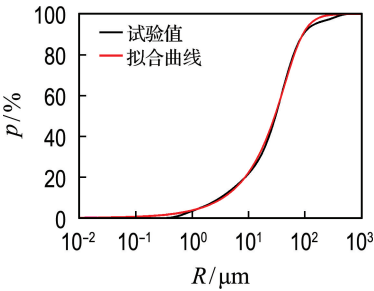


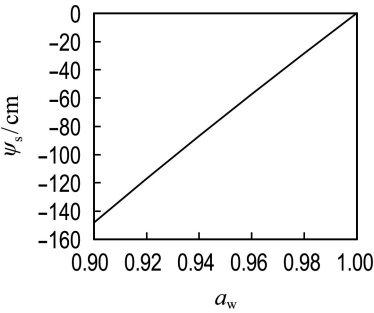
图 6 土颗粒含量拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of soil particle content

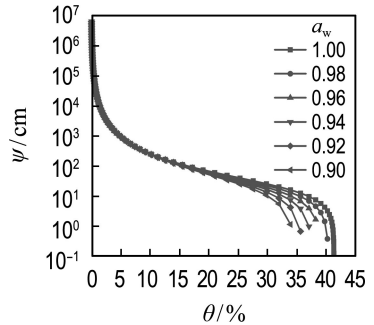
3 结果与分析

3.1 土水势影响因素

修正后土水势、溶质势与水分活度的关系如图 7 所示. 由图 7(a)可知，溶质势随着水分活度增大而增大；由图 7(b)可知，土水势随着含水量增加而降低，当土体含水量较低时，溶质势对土水势的影响较小，当土体趋于饱和时，溶质势对土水势的影响较明显。



(a) 溶质势与水分活度的关系



(b) 不同水分活度土水势与含水量的关系

图 7 修正后土水势、溶质势与水分活度的关系
Fig.7 Relationship between soil water potential, solute potential and water activity after modification

3.2 渗透系数与含盐量的关系

试验测试并计算得出最终渗透系数，取其平均值的数据点绘制成图，从图 8 中可以看出，在同一干密度下，随着含盐量的增加，盐渍土的渗透系数呈减小趋势，与邓友生等^[7]所得结论保持一致。

试验中兰州粉质黏土渗透系数首先随着含盐量的增加大幅度降低，当含盐量大于 2% 后，其渗透系数随着含盐量的变化很小. 通过计算值与试验值对比可知，本文修正的计算模型可较好地计算硫酸钠盐渍土渗透系数. 土样渗透系数随含盐量增加而减小，是因为硫酸钠盐的存在降低了盐渍土土水势，而当含盐量较高时，盐分达到饱和状态致使其水分活度基本不变. 但是高含盐量硫酸

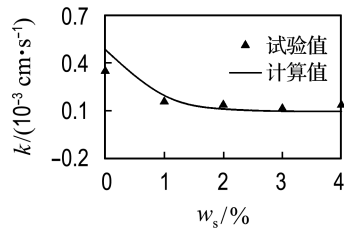


图 8 含盐量对盐渍土渗透系数的影响
Fig. 8 Effect of salt content on permeability coefficient of saline soil

钠盐渍土中部分盐晶体的析出会造成土中孔隙减小,致使渗透系数微弱减小从而降低了土体渗透特性.

3.3 微纳米材料对盐渍土渗透系数的影响分析

微纳米材料对盐渍土渗透系数影响如图 9 所示. 纳米二氧化硅和相变材料可以降低盐渍土的渗透系数,并随着掺量增加,渗透系数降低更多,掺加相变材料的盐渍土其渗透系数变化幅度较大. 低掺量时,掺加相变材料的盐渍土与无掺加土样的渗透系数相差范围很小,而掺加纳米二氧化硅后的土样渗透系数则比无掺加时明显减小. 当掺量大于 2.5% 时,掺加两种材料后的渗透系数相差不大,均比无掺加时有明显减小. 掺料为纳米碳酸钙时,随掺量增加,土样渗透系数总体呈上升趋势,掺量为 1.0% 时,其渗透系数比无掺加时有微量减小,其余掺量对土样渗透系数均为增加作用.

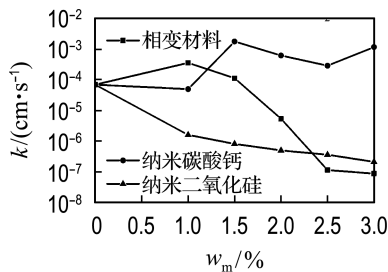


图 9 各掺料对 3% 含盐量盐渍土渗透系数的影响
Fig. 9 Influence of each admixture on permeability coefficient of 3% saline soil

掺加纳米材料后,相当于降低了土样的初始含水量,在掺料适量添加后,纳米材料形成团聚体,起到较好的填充作用,如图 10 所示. 由于纳米二氧化硅堆积密度较小,随着其掺量增加,土样密度减小,从而渗透系数变小减缓. 纳米碳酸钙作为亲水材料在用量增大后,表面活性剂的浸润和增

塑作用更加显著,加大了纳米粒子的流动分散^[24],而且纳米碳酸钙纳米级的较细粒径,表面能高,具有较强的吸附作用,变相减小了试样含盐量,使得试样的渗透系数增大;随着渗流进行,在吸附作用影响下含盐量增大,使得试样渗透系数减小. 当相变材料的掺量较低时,相变材料会释放热量,在一定程度上影响土样内部温度从而减小水的黏滞系数,使渗透系数增大. 作为疏水材料的相变材料,在大量添加后起到了较好的填充作用,有效降低了渗透系数.

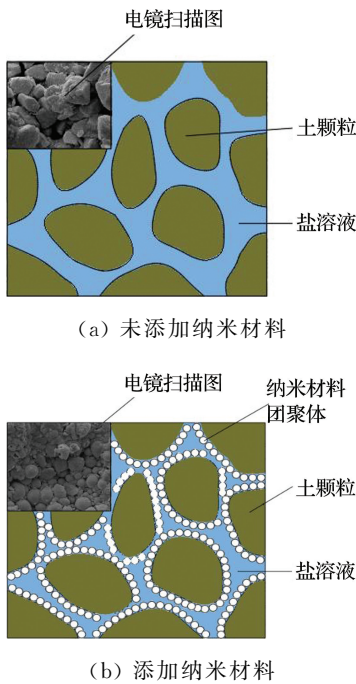


图 10 添加纳米材料前后孔隙特征^[25]
Fig. 10 Pore characteristics before and after adding nano materials^[25]

但是,当土体含水量较低时,溶质势对土水势的影响较小,故在非饱和土渗透系数的计算中可忽略溶液的影响. 本研究中未考虑环境温度变化对硫酸钠盐渍土渗透特性的影响,对硫酸钠盐渍土而言,在温度降低时会生成十水硫酸钠晶体引发土体盐胀,故盐胀变形引发的孔隙变化对土体渗透特性的影响会在以后的工作中继续探究.

4 结 论

(1)随着土体趋于饱和,溶质势对土水势的影响越来越大,故针对饱和盐渍土渗透系数进行土水势修正极为必要;推导得到的饱和盐渍土渗透系数计算模型的计算值与试验值接近,该模型符

合饱和和硫酸钠盐渍土渗透系数的变化规律。

(2)当含盐量在4%以内时,硫酸钠盐渍土中土水势随着含盐量的增加而逐渐减小。同样,渗透系数随着含盐量的增加逐渐减小,当含盐量大于2%后,渗透系数变化很小。

(3)对于高含盐量硫酸钠盐渍土,掺加纳米二氧化硅和相变材料可以降低渗透系数,随掺量增加渗透系数减小更多。当纳米碳酸钙掺量大于1%后,渗透系数随着其含量的增加而大幅度增加。硫酸钠盐渍土渗透系数随着相变材料的增加先增大后减小,当掺量大于2.5%后变化很小。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(1): 1-19,95.
ZHOU Youwu, GUO Dongxin. Principal characteristics of permafrost in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, **4**(1): 1-19, 95. (in Chinese)
- [2] 王双,李小春,王少泉,等. 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(S2): 4394-4402.
WANG Shuang, LI Xiaochun, WANG Shaoquan, et al. Study of gravel-soil gradation characteristics influence [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(S2): 4394-4402. (in Chinese)
- [3] SHAFIEE A. Permeability of compacted granule - clay mixtures [J]. *Engineering Geology*, 2008, **97**(3/4): 199-208.
- [4] 朱崇辉,刘俊民,王增红. 粗粒土的颗粒级配对渗透系数的影响规律研究[J]. 人民黄河, 2005, **27**(12): 79-81.
ZHU Chonghui, LIU Junmin, WANG Zenghong. Study on the influence of particle size distribution on permeability coefficient of coarse-grained soil [J]. *Yellow River*, 2005, **27**(12): 79-81. (in Chinese)
- [5] 邵龙潭,温天德,郭晓霞. 非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 806-812.
SHAO Longtan, WEN Tiande, GUO Xiaoxia. Direct measurement method and prediction formula for permeability coefficient of unsaturated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(5): 806-812. (in Chinese)
- [6] ZHOU Hui, FANG Yingguang, GU Renguo, et al. Microscopic analysis of saturated soft clay in Pearl River Delta [J]. *Journal of Central South University*, 2011, **18**(2): 504-510.
- [7] 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): 772-775.
DENG Yousheng, HE Ping, ZHOU Chenglin, et al. Experimental study of permeability coefficient of saline soils [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(5): 772-775. (in Chinese)
- [8] 孙大松,刘鹏,夏小和,等. 非饱和土的渗透系数[J]. 水利学报, 2004, **35**(3): 71-75.
SUN Dasong, LIU Peng, XIA Xiaohe, et al. Permeability coefficient of unsaturated soils [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(3): 71-75. (in Chinese)
- [9] 张登武,赖天文,方建生. 改良盐渍土的工程特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2012(9): 81-83.
ZHANG Dengwu, LAI Tianwen, FANG Jiansheng. Experimental study on engineering characteristics of improved saline soil [J]. *Railway Engineering*, 2012(9): 81-83. (in Chinese)
- [10] 米海珍,杨泽平. 三种改良土的渗透性试验研究[J]. 建筑科学, 2011, **27**(11): 41-43.
MI Haizhen, YANG Zeping. Experimental study on permeability of three kinds of improved loess [J]. *Building Science*, 2011, **27**(11): 41-43. (in Chinese)
- [11] REN Xiaochuan, HU Kai. Effect of nanosilica on the physical and mechanical properties of silty clay [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2014, **6**(11): 1010-1013.
- [12] RONG Zhidan, SUN Wei, XIAO Haijun, et al. Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, **56**: 25-31.
- [13] 陈学军,胡舒伟,黄耀意,等. 纳米碳酸钙影响下红黏土强度特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(5): 1293-1298.
CHEN Xuejun, HU Shuwei, HUANG Yaoyi, et al. Experimental study on strength characteristics of red clay under influence of nano-CaCO₃ [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(5): 1293-1298. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 刘伟,范爱武,黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

- LIU Wei, FAN Aiwu, HUANG Xiaoming. **Theory and Application of Heat and Mass Transfer in Porous Media** [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [16] WU Daoyong, LAI Yuanming, ZHANG Mingyi. Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics [J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2017, **133**: 94-107.
- [17] WAN Xusheng, YOU Zhemin, WEN Haiyan, *et al.* An experimental study of salt expansion in sodium saline soils under transient conditions [J]. **Journal of Arid Land**, 2017, **9**(6): 865-878.
- [18] PRAUSNITZ J M. Molecular thermodynamics for some applications in biotechnology [J]. **Pure and Applied Chemistry**, 2003, **75**(7): 859-873.
- [19] PITZER K S. Thermodynamics of electrolytes. V. Effects of higher-order electrostatic terms [J]. **Journal of Solution Chemistry**, 1975, **4**(3): 249-265.
- [20] STEIGER M. Crystal growth in porous materials - I: The crystallization pressure of large crystals [J]. **Journal of Crystal Growth**, 2005, **282**(3/4): 455-469.
- [21] CLEGG S L, WHITFIELD M. Activity coefficients in natural waters [M] // PITZER K S, ed. **Activity Coefficients in Electrolyte Solutions**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [22] ARYA L M, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T, *et al.* Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data [J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1999, **63**(3): 510-519.
- [23] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [24] 吴绍吟, 练恩生. 纳米碳酸钙的特点与应用 [J]. 橡胶工业, 1999, **46**(3): 18-23. WU Shaoyin, LIAN Ensheng. Characteristics and application of nano calcium carbonate [J]. **China Rubber Industry**, 1999, **46**(3): 18-23. (in Chinese)
- [25] 龚富茂, 万旭升, 钟昌茂, 等. 纳米材料对硫酸盐渍土盐胀的影响 [J]. 工业建筑, 2020, **50**(1): 118-124. GONG Fumao, WAN Xusheng, ZHONG Changmao, *et al.* Effect of nanometer material on salt expansion of sulfate saline soil [J]. **Industrial Construction**, 2020, **50**(1): 118-124. (in Chinese)

Study of permeability of sodium sulfate saline soil

LIU Li¹, WAN Xusheng^{*1}, WANG Zhimeng², QIU Enxi¹,
GONG Fumao¹, ZHONG Changmao¹, WU Songbo¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chengdu 610031, China)

Abstract: The process of water seepage in saline soil is an important factor affecting the evolution of regional ecological environment, the utilization of water resources, and the safety of engineering construction and use. In order to predict the permeability coefficient curve of saturated sodium sulfate saline soil, the calculation model of the permeability coefficient of saturated saline soil is deduced by modifying the soil water potential model, and the reliability of the calculation model is verified by permeability test. In addition, the influence of micro nano materials on the permeability of saline soil is studied by indoor permeability test. The results show that the calculation model of permeability coefficient can better reflect the change rule of permeability coefficient of saturated sodium sulfate saline soil. The permeability coefficient decreases with the increase of salt content, and changes little when the salt content is more than 2%. The permeability coefficient of sodium sulfate saline soil decreases with the increase of nano silica content. However, as the content of nano calcium carbonate increases, the permeability coefficient of sodium sulfate saline soil decreases first and then increases. In addition, the permeability coefficient of sodium sulfate saline soil increases first and then decreases with the content of phase change materials and tends to stabilize.

Key words: sodium sulfate saline soil; permeability coefficient; soil water potential model; prediction model; micro nano materials