

DOI: 10.11779/CJGE202007003

饱和盐渍土渗透吸力的回顾及研究

周凤玺^{1, 2}, 王立业^{*1}, 赖远明²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了能够准确地计算不同含盐量、盐类和温度条件下饱和盐渍土中渗透吸力的大小, 首先从试验和理论方面对渗透吸力的研究成果做了简要的回顾; 其次通过不同温度条件下氯化钠和硫酸钠溶液的电导率试验, 探讨了两溶液饱和后土体渗透吸力与浓度的相互关系; 最后基于分形理论和溶质电离度分别对 EC 模型和 van't Hoff 方程进行了改进, 并对改进后的模型进行了相关的数值分析。试验结果表明氯化钠饱和后土体的渗透吸力与浓度呈幂函数增长关系, 而饱和硫酸盐渍土的渗透吸力随浓度的增大呈指数关系。因此表现出硫酸盐渍土的渗透吸力先大于氯盐渍土, 而在某一浓度之后氯盐渍土的渗透吸力大于硫酸盐渍土, 且浓度值 m_A 随温度的增大呈线性增长关系。数值分析结果表明改进后的模型能够实现复杂条件下的渗透吸力计算, 且优于传统模型。

关键词: 饱和盐渍土; 渗透吸力; 电导率; van't Hoff 方程; 分形理论; 电离度

中图分类号: TU43; TQ151 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2020)07 - 1199 - 12

作者简介: 周凤玺(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、复合材料结构力学方面的研究工作。E-mail: geolut@163.com。

Review and research on osmotic suction of saturated saline soils

ZHOU Feng-xi^{1, 2}, WANG Li-ye¹, LAI Yuan-ming²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to accurately calculate the osmotic suction in saturated saline soils under different salt contents, salt types and temperature conditions, firstly, a brief review is made of the research results of osmotic suction from the test and theoretical aspects. Secondly, through the electrical conductivity tests on sodium chloride and sodium sulfate solution under different temperature conditions, the relationship between the soil osmotic suction and the concentration after saturation of the two solutions is discussed. Finally, based on the fractal theory and solute ionization degree, the EC model and van't Hoff equation are improved, respectively, and the improved model is analyzed numerically. The test results show that the osmotic suction of the soil after sodium chloride saturation has an increase of power function with the concentration, while the osmotic suction of the soil after sodium sulphate exponentially increases with concentration. Therefore, the osmotic suction of sulphate saline soil is higher than that of chlorine saline soil at first, while that of chlorine saline soil is higher than that of sulphate saline soil after a certain concentration, and the concentration value m_A of intersection point A increases linearly with the increase of temperature. The numerical analysis results show that the improved model can calculate the osmotic suction under complex conditions and is superior to the traditional models.

Key words: saturated saline soil; osmotic suction; electrical conductivity; van't Hoff equation; fractal theory; ionization degree

0 引 言

由于地下水的迁移、海水的浸湿淋滤等一系列的自然活动导致土体中含有大量的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等电解质离子, 从而形成了典型的内陆盐渍土和滨海盐渍土。此外, 由于温度、含水率等条件的变化, 导致孔隙离子的形态发生变换, 使土体表现出不同的力学变形特性。对大深基坑、海底隧道、跨海、跨河工程及堤坝工程的安全性和耐久性造

成了一系列的影响^[1]。

在盐渍土处于饱和状态时, 土体内部的化学离子会与带负电的土颗粒相互吸引, 导致离子迁移缔合现象。在离子迁移缔合的过程中, 逐渐形成了渗透压, 从而产生了较大的渗透吸力, 对土体的固结特性、力

基金项目: 国家自然科学基金项目(11962016, 41230630, 51978320)

收稿日期: 2019 - 08 - 27

*通信作者 (E-mail: gwly1024@163.com)

学性能及抗剪强度产生了明显的影响^[2-7]。因此,学者们对渗透吸力的计算进行了一系列的研究,提出了基于孔隙溶液电导率^[8-10]及采用 van't Hoff 方程^[11-14]计算渗透吸力的数值模型,并应用所提出的模型描述了相应条件下的土体行为。值得注意的是,现有计算渗透吸力的模型都只是考虑了孔隙溶液的特性,而没有考虑土体内部中孔隙通道弯曲闭合程度的影响。即在离子迁移过程中,使迁移离子与孔壁、粒子发生摩擦、碰撞,对离子迁移速度产生影响导致渗透吸力的改变。除此之外,现有模型在计算不同盐类饱和后土体的渗透吸力时也存在些许问题。比如土体电导率测量过程中挤土压力或土体种类与测量结果的相关性,及 van't Hoff 方程中高含盐情况的不一致性。

因此,本文首先对估算渗透吸力的试验方法和理论模型进行了回顾分析。此外,根据氯化钠和硫酸钠溶液的电导率试验结果,对采用氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力与浓度的相互关系进行了讨论。然后基于上述分析结果,提出了采用分形理论和溶质电离度分别改进原有 EC (electrical conductivity) 模型和 van't Hoff 方程的建模思路,并对原有模型进行了相应的改进。再者,基于电导率试验结果对改进后的 EC 模型和 van't Hoff 方程进行了详细的数值分析。

1 研究进展

有关土体渗透吸力的研究始于 20 世纪 50 年代,即对电解质与黏土孔隙水接触效应的研究^[15-16]。此后,针对孔隙溶液化学效应引起的土体固结、渗透等现象,以及对剪切强度的影响机理展开了系列研究^[3, 5, 17-21]。例如结合孔隙溶液的浓度或质量分数提出的一系列化学-力学耦合模型^[4, 6-7, 22-25]。随着技术要求的不断提高,理论模型的不断完善,对土中水化学作用的合理描述愈加迫切。在尝试采用双电层理论来反映孔隙比与层间斥力的相互关系后,发展了采用渗透吸力这一宏观变量来反映孔隙溶液的土水化学特性。

土中的吸力由渗透吸力(溶质吸力)和基质吸力组成^[26]。渗透吸力是孔隙水自由能的溶质部分,表征了孔隙水化学特性及土-水体系中化学效应对土体力学特性的影响。因此,渗透吸力的大小主要由孔隙溶液浓度和含盐种类决定。然而 Arifin^[10]发现在高塑性黏土中渗透吸力小于总吸力与基质吸力的差值,并将多出的部分吸力命名为水化力。显然,Arifin 的观点对传统的吸力组成和渗透吸力的试验方法、理论计算造成了一定的影响。下面对于有关渗透吸力试验方法和理论计算的相关研究成果进行简单的综述。

1.1 试验研究进展

渗透吸力的试验原理是在上述理论的基础上,通过孔隙溶液的化学特性及相应状态下的相对蒸汽压来反映化学离子在土体中的活动机理,从而实现了借助渗透吸力这一宏观变量来描述孔隙溶液的离子类型和浓度。测试渗透吸力的试验方法主要有滤纸法和挤压法^[26]。滤纸法是基于渗透吸力等于总吸力减去基质吸力的理念,为测试非饱和土中的渗透吸力提供了帮助,并且试验的原理简单、成本低。挤压法是以挤压技术^[27-28]为前提,通过从土体中排出的溶液电导率并结合经验公式完成估算。

Witteveen 等^[4]采用滤纸法、湿度计^[29-30]分别测量了氯化钠溶液和黏土-氯化钠溶液混合物的渗透吸力。以渗透吸力为媒介讨论了饱和盐渍黏土的固结特性,建立了在盐溶液饱和后黏土的化学-力学耦合模型。根据试验结果,Witteveen 等指出氯化钠溶液的渗透吸力与黏土-溶液混合物的渗透吸力较为接近,即可以忽略黏土颗粒对渗透吸力的影响。此外还拟合出了渗透吸力 π (MPa) 与浓度 c (mol/L) 的关系式:

$$\pi = 0.407c^2 + 3.888c + 0.61 \quad (1)$$

根据 Fredlund^[26]给出 25℃ 时氯化钠溶液的渗透吸力,拟合给出了渗透吸力 π (MPa) 与浓度 c (mol/L) 的关系式 ($c=0$ 时, $\pi=0$):

$$\pi = 0.2348c^2 + 4.4133c \quad (2)$$

Mata 等^[8]根据 USDA^[31]拟合给出了土体孔隙溶液电导率与渗透吸力的数学表达式,促进了采用电导率来描述土体渗透吸力的研究。Rao 等^[32, 9, 33]讨论了氯化钠溶液和氯化钙溶液的电导率与浓度呈幂函数关系,并采用滤纸法和孔隙溶液电导率估算渗透吸力,从而分析了 van't Hoff 方程的适用性和盐溶液饱和后黏土的体变机理。Arifin 等^[10]结合滤纸法和挤压技术的试验结果,讨论了高塑性黏土的渗透吸力,并根据电导率测试结果与 USDA^[34]数据拟合出了电导率 EC (ms/cm) 与渗透吸力 (kPa) 的相互关系:

$$\pi = 38.54EC^{1.0489} \quad (3)$$

颜荣涛等^[6]在 Rao 等^[9]的基础上通过挤压技术测得孔隙溶液的电导率,以此来描述了土体的化学-力学耦合作用。

采用孔隙溶液提取物的电导率来衡量渗透吸力已经是被认可了的。土体孔隙溶液提取物的获取一般都采用挤压技术。但是,试验者们在同一挤压试验中都采用了相同的压力,似乎都不约而同地忽略了不同压力对提取物电导率的影响^[19, 35-36]。Manheim 等^[37]和 Engelhardt 等^[38]发现提取液浓度与土体颗粒种类(蒙脱土含量)、挤土压力有关。Mariano 等^[39]测量了挤土压力分别为 2, 5, 23.5 MPa 时提取液的电导率,并发

现提取物的电导率随着挤土压力的增大呈现出减小的趋势。Krahn 等^[40]发现采用挤压法得到的提取物电导率与孔隙流体电导率存在明显的差异, 而且两者的差异会随着饱和度的降低逐渐趋于明显。此外, Ridley 等^[41]指出吸力的复杂性导致了采用试验方法测量吸力时存在一定的误差。

现有测量渗透吸力的试验方法都是通过某一媒介来间接衡量渗透吸力的大小。图 1 为采用滤纸法和挤压法估算含氯化钠土体的渗透吸力情况。图 1 中的电导率数据为 25°C 时氯化钠溶液的电导率, 详见文中试验部分。根据图 1 发现, 采用滤纸法 (式 (1), (2)) 得到的渗透吸力大于挤压法 (式 (3)) 测量提取物电导率的结果, 且式 (1), (2) 的计算结果随浓度增大的量级明显大于式 (3)。Fredlund^[26]和 Witteveen 等^[4]采用滤纸法测量的结果也存在局部差异, 且认为该差异不是人为操作引起的试验误差。而 Mata 等^[8]、Rao 等^[9]和 Arifin 等^[10]采用挤压试验结果和 USDA (1950, 1954) 结果拟合给出 π -EC 关系式的变化率基本相等, 只是在整体上存在少许差异。

因此, 不论是滤纸法还是挤压法都能够实现渗透吸力的测量, 但是在高要求、高精度的案例中, 上述方法都存在着少许局限性。如 Arifin 等^[10]提出在高塑性黏土中的水化力归属问题; Mariano 等^[39]发现挤压压力对提取物电导率的影响; Krahn 等^[40]指出提取物与实际孔隙溶液电导率的差异性。再者, 土体孔隙结构、大小及弯曲程度对提出物的电导率是否有影响也值得进一步研究。

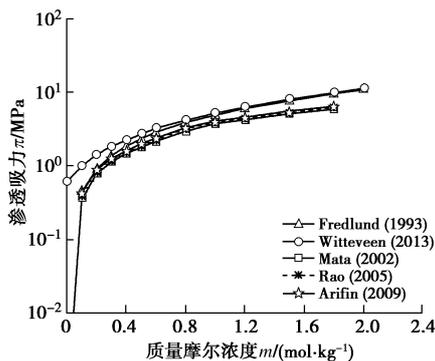


图 1 采用试验结果估算土体渗透吸力的情况

Fig. 1 Estimation of osmotic suction of soil using test results

1.2 理论研究进展

渗透吸力的理论研究一般是基于渗透压概念或热力学框架下进行的。主要的研究开始于 1887 年, van't Hoff^[42]第一次提出了计算液体渗透压的数学公式。即认为通过半透膜的压力是由溶质引起的附加压力。然而, 在此之后 Meyer^[43]和 Larr van^[44]几乎同时反驳了 van't Hoff 的结论。其中, Larr van^[44]认为有关渗透压的问题只能从热力学的角度来解决。虽然 van Larr 错

误地反驳了 van't Hoff 的观点, 但是 van Larr 也从热力学方面展开了对渗透压的讨论, 为后续通过热力学框架研究渗透吸力提供了良好的基础。

Dao 等^[45]在热力学理论的基础上推导了总吸力、渗透吸力与基质吸力的数学表达式。由 Dao 等提出的渗透吸力公式结合《osmotic pressure or osmotic suction?》^[46]一文中的讨论, 可以明确渗透吸力 π 与渗透压 Δp 的相互关系, 即

$$\pi = -\Delta p \quad (4)$$

Grasley 等^[47]在混合物理论的基础上结合热力学定律推导了非饱和地质材料的总吸力、渗透吸力和基质吸力。证明了 van't Hoff 和 van Larr 分别提出从线性动量守恒定律和热力学角度来推导渗透吸力都有效。Wei^[25]在 Donnan 渗透压力的基础上根据热力学理论给出了非饱和多孔介质的渗透压公式, 为构造非饱和多孔介质的电化学模型奠定了基础。

此外, Glasstone^[11]发现还可以采用 van't Hoff 方程计算渗透吸力 π (kPa), 即

$$\pi = iRTc \quad (5)$$

式中 c 为孔隙溶液的浓度 (mol/L); R 为气体常数, $R = 8.3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度 (K); i 为 van't Hoff 因子, 反映溶质溶解后离子成分对渗透吸力的贡献率, 即 $i = 1 + d(v - 1)$, d 为溶质的电离程度, v 为溶质溶解后的阴、阳离子总数。当溶质充分电离时 ($d = 1$), van't Hoff 因子 i 等于阴阳离子的总数 v 。在 Dao 等^[45]采用 van't Hoff 方程进行对比分析的过程中出现了明显的误差, 这是因为没有考虑 van't Hoff 因子 i 对渗透吸力的影响而造成的。根据 Rao 等^[9]的研究结果, 发现 van't Hoff 方程能够计算稀溶液的渗透吸力。但是在较高浓度时计算误差明显, 适用性受到了极大的限制。因此, 对 van't Hoff 方程进行了如下修正^[48-49]:

$$\pi = vRTc\phi \quad (6)$$

式中, ϕ 为渗透系数。Xu 等^[12]根据 Lang^[50]提出的渗透系数, 完善了方程 (6)。从而基于分形理论讨论了盐溶液浓度对黏土体积应变的影响机理。周凤玺等^[13-14]在式 (6) 中引入 Pitzer 电解质渗透系数^[51-52]估算渗透吸力, 并在 Fredlund 等^[26, 53]的基础上建立了饱和盐渍土的蠕变模型。其中, 渗透吸力 π (kPa) 的表达式为

$$\pi = vRTc \left[1 + |z^+ z^-| f_\phi + 2m \frac{v^+ v^-}{v} B_\phi + 2m^2 \frac{(v^+ v^-)^{3/2}}{v} C_\phi \right] \quad (7)$$

式中 z^+ 和 z^- 分别为阳、阴离子的电荷数; v^+ 和 v^- 分别为阳、阴离子总数; f_ϕ , B_ϕ 和 C_ϕ 为相互作用系数, 其中 f_ϕ , B_ϕ 和 C_ϕ 的单位分别为 1, kg/mol 和

kg^2/mol^2 ，且在 25°C 时参数的具体值取自 Kim 等^[54] 的试验结果。

在两种理论的基础上推导提出的渗透吸力公式中，基于热力学角度的公式在形式上与 Dao 等^[45] 的结果基本相似，几乎都是通过相对蒸汽压来计算的。基于 van't Hoff 方程提出的表达式中，Xu 等^[12] 的推导结果能够回归于 Dao 等^[45] 的结果。由于在热力学框架内提出的理论公式都较为复杂，且在测量特定条件下的蒸汽压有一定的困难。所以主要对滤纸法（式（1）和式（2））、挤压法（式（3））和 van't Hoff 方程（式（5）~（7））提出的渗透吸力公式进行了分析。详细如图 2 所示。其中 van't Hoff 方程同时不考虑 van't Hoff 因子和渗透系数时，其计算误差较为明显，且小于式（3）的计算结果。van't Hoff 方程只考虑 van't Hoff 因子时（式（5））的计算结果基本上能够符合 Fredlund^[26] 和 Witteveen 等^[4] 的试验结果。当同时考虑 van't Hoff 因子和渗透系数时（式（7）），计算结果略小于式（5）的计算结果，但与 Fredlund 试验结果的一致性较高。值得注意的是，式（7）在式（5）基础上考虑了离子相互作用对渗透吸力的影响，明显地优化了 van't Hoff 方程。

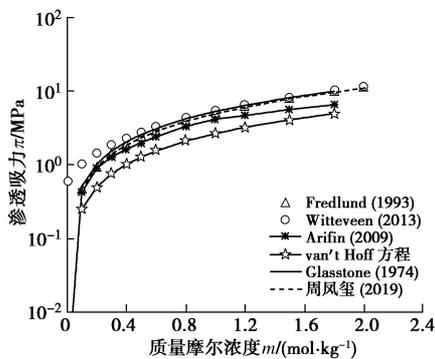


图 2 基于不同方法计算土体渗透吸力的情况

Fig. 2 Calculation of osmotic suction of soil based on different methods

总体上讲，现有渗透吸力的计算方法都能够完成一般状态下土体的渗透吸力计算。但是都忽略了空间中土体粒子、孔隙通道的弯曲程度及分布情况对渗透吸力的影响。因此，在构建渗透吸力的模型时，需要综合考虑宏微观因素对渗透吸力的贡献，从宏微观土力学^[55] 方面来开展有关土体渗透吸力的研究。从而形成宏微观一体化的研究理念，开发解决复杂条件下满足高要求、高精度的渗透吸力方法。

2 溶液的电导率试验

2.1 试验方案

根据溶液的化学组成主要将孔隙溶液分为 3 类，

即氯化钠溶液、硫酸钠溶液及氯化钠和硫酸钠的混合溶液。硫酸钠溶液浓度的最大值是根据硫酸钠在设定温度下的溶解度来确定的。具体温度下的浓度设置如表 1、2 所示。溶液浓度以质量摩尔浓度 m 为基准，其单位为 mol/kg 。电导率采用 HQ14d 电导率仪测量，测量时保证电极完全被溶液浸没且温度恒定。测量装置如图 3 所示。

表 1 单一盐溶液的浓度配置

10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
—	1.0	1.0	1.0	1.0
—	—	1.2	1.2	1.2
—	—	1.5	1.5	1.5
—	—	—	1.8	1.8

表 2 混合盐溶液的浓度配置

$y_1 = 0.8$		$y_1 = y_2 = 0.5$		$y_2 = 0.8$	
m_{NaCl}	$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$	m_{NaCl}	$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$	m_{NaCl}	$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$
0.6	0.15	0.1	0.1	0.05	0.2
0.8	0.20	0.2	0.2	0.075	0.4
1.0	0.25	0.6	0.6	0.20	0.8
1.2	0.30	0.8	0.8	0.25	1.0

注: $y_1 = m_{\text{NaCl}} / (m_{\text{NaCl}} + m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$, $y_2 = m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} / (m_{\text{NaCl}} + m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$ 。

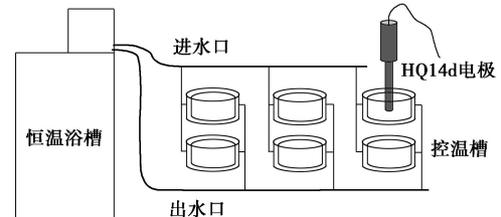


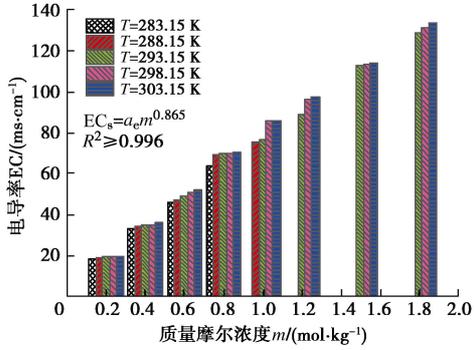
图 3 试验装置

Fig. 3 Test devices

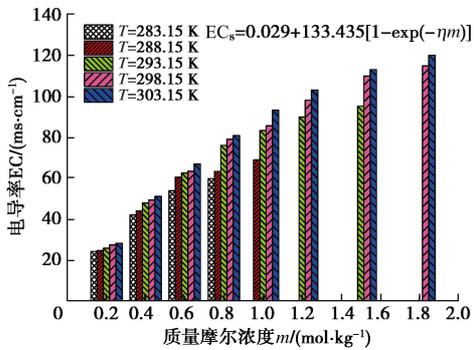
2.2 试验结果与分析

根据 Rao 等^[9] 提供的电导率与浓度的表达式，可以发现氯化钠溶液的电导率与浓度的关系式为幂次函数关系。图 4 是不同温度时氯化钠溶液、硫酸钠溶液及两者混合溶液电导率随浓度的变化情况。其中，图 4 (a) 给出了不同温度下氯化钠溶液电导率的分布情况。发现不同温度下的电导率随浓度的变化遵循幂次函数关系，与 Rao 等^[9] 的结果相符。在浓度较低时电导率随温度的变化不甚明显，如 $m=0.2$ 或 $0.4 \text{ mol}/\text{kg}$ 。图 4 (b) 为硫酸钠溶液电导率随浓度的演化情况。明显地，硫酸钠溶液的电导率与浓度可以用指数函数来描述，而且指数关系的系数也与温度保持着某种关系。图 4 (c) 为氯化钠和硫酸钠混合溶液的电导率分布情况。

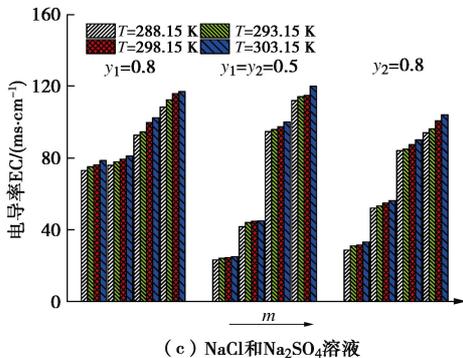
从图中发现混合溶液电导率的大小取决于占比较大的电解质, 且高于相同浓度时单一纯溶液的。如相同浓度下 $y_1=0.5$ 时的电导率大于 $y_1=0.8$ 和 $y_2=0.8$ 时。与此同时混合溶液的电导率也符合单一纯溶液的电导率演化规律。



(a) NaCl溶液



(b) Na₂SO₄溶液



(c) NaCl和Na₂SO₄溶液

图 4 不同含盐状态下溶液电导率随温度的分布情况

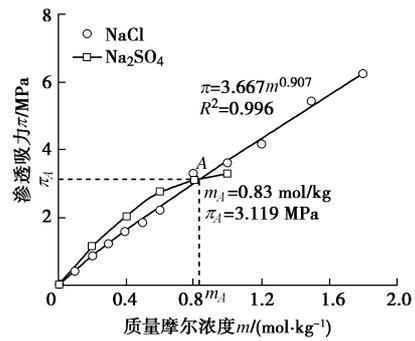
Fig. 4 Distribution of electrical conductivity of solution with temperature in different salt states

根据 Arifin 等^[10]的研究结果, 采用上述试验结果和式 (3) 计算了采用氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力。详细如图 5 所示。其中图 5 (a) ~ (d) 分别是温度在 15℃ (288.15 K)、20℃ (293.15 K)、25℃ (298.15 K) 和 30℃ (303.15 K) 下, 氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体渗透吸力随浓度的变化情况。

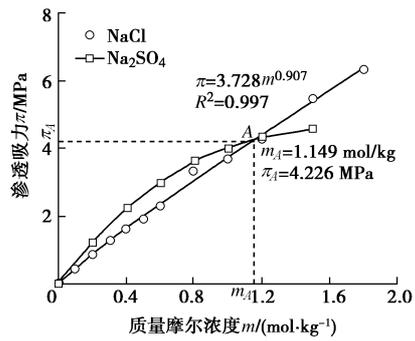
明显地, 氯化钠溶液饱和后土体的渗透吸力随浓度的增大呈现出幂函数增长趋势 ($\pi = a_\pi m^{0.907}$), 而硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力与浓度表现为指数增长关系。因此, 在同时分析氯化钠和硫酸钠溶液饱

和后土体渗透吸力时, 两曲线存在一个交点 A: 即在 $m < m_A$ 时, $\pi_{NaCl} < \pi_{Na_2SO_4}$; 而 $m > m_A$ 时, $\pi_{NaCl} > \pi_{Na_2SO_4}$ 。产生这种现象的原因是硫酸钠的电离程度与浓度的相关性所导致的。在稀溶液中硫酸钠充分电离, 且随着浓度的增大体积单元内的带电离子数增多, 渗透吸力随浓度近似符合线性增长。但随着浓度的继续增加, 体积单元内的离子总数迅速增加, 减缓了离子迁移速度, 导致渗透吸力缓慢增长。如果浓度继续增加, 渗透吸力甚至会出现减小的趋势。相比硫酸钠的电离效应, 氯化钠的电离度与浓度的相关性较低, 且在高浓度时也能够保持较为充分的电离程度。因此, 在低浓度时硫酸盐渍土的渗透吸力大于氯盐渍土的, 但在浓度大于 m_A 后, 氯盐渍土的渗透吸力会大于硫酸盐渍土的。

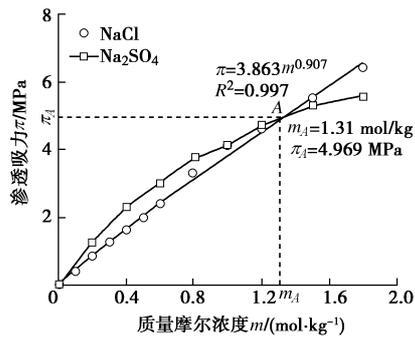
图 5 (e) 是系数 a_π 和横坐标 m_A 与温度 T (°C) 的关系图。根据图 5 (a) ~ (d) 的分析结果, 发现系数 a_π 和横坐标 m_A 都随着温度的增大而增大。系数 a_π 和横坐标 m_A 与温度 T 的相互关系都可以采用线性关系描述, 详细的拟合公式和相关系数如图 5 (e) 所示。



(a) T=288.15 K



(b) T=293.15 K



(c) T=298.15 K

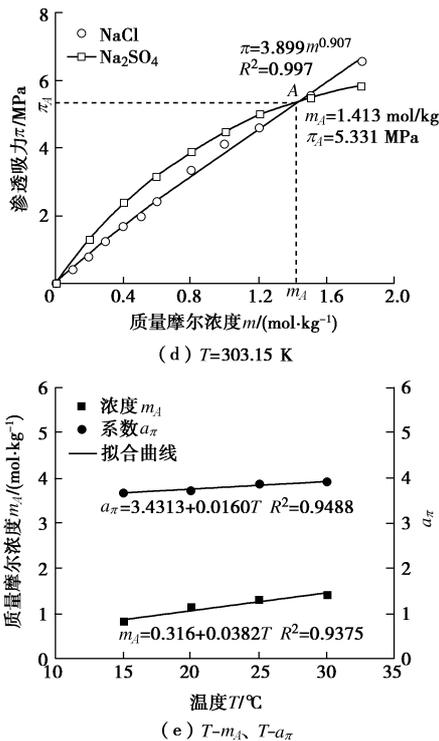


图5 基于电导率试验结果的渗透吸力分析

Fig. 5 Analysis of osmotic suction based on test results of electrical conductivity

3 渗透吸力的估算

3.1 EC模型的改进

Wyllie 等^[56]基于 Archie^[57]的研究结果继续深化了多孔介质与孔隙溶液的电阻率模型，分析了孔隙率 n ($n = V_v / V$) 和孔隙管道的弯曲度 τ 对多孔介质电阻率的影响机理。根据其研究结果得到土体电导率与孔隙溶液电导率的关系式为

$$EC_{\text{soil}} = EC_s \frac{n}{\tau} \quad (8)$$

式中， EC_{soil} 和 EC_s 分别为土体和孔隙溶液的电导率，弯曲度 τ 为孔隙管道的弯曲长度 L 与直线长度之比 L_0 ， $\tau = L / L_0$ 。此外，弯曲度的定义与所处的环境状态也有关。比如几何弯曲度 (geometric tortuosity) τ_{GT} 、电-弯曲度 (electrical tortuosity) τ_{ET} 、分散弯曲度 (diffusive tortuosity) τ_{DT} 和水力弯曲度 (hydraulic tortuosity) τ_{HT} ^[58]。其中 Coleman 等^[59]给出了饱和介质中电-弯曲度与孔隙率的分形关系式：

$$\tau_{\text{ET}} = n^{(D_w - 2)/(D_f - D_E)} \quad (9)$$

式中 D_w 为随机游动维数， $D_w > 2$ ； D_f 为土体的孔隙分形维数，且在二维和三维空间中 D_f 的取值范围分别为 $1 < D_f < 2$ 和 $2 < D_f < 3$ ； D_E 为 Euclidean 维数，且在二维和三维空间中 D_E 分别取 2 和 3。

因此，在考虑盐溶液与孔隙结构时，需要引入电-弯曲度来完善电化学机理的描述。即将式 (9) 代入式

(8) 得到

$$EC_{\text{soil}} = EC_s n^{1 - (D_w - 2)/(D_f - D_E)} \quad (10)$$

Wei 等^[60]根据有效弯曲度对式 (10) 进行了修正，将其进行了推广。但由于采用近似条件，导致修正结果丧失了一般性，在理论上不能进行合理的退化。Meng 等^[61]通过引入临界孔隙率，给出了考虑微观参数的电导率模型，也暗示了介质渗透性的宏微观描述。但由于引入参数的不确定性，所以本文仍采用式 (10) 进行讨论。

根据 Rao 等^[9]和 Arifin 等^[10]给出电导率与渗透吸力的关系式，将式 (3) 中的电导率变换为土体的电导率公式，得到考虑粒子在空间中分形特征的渗透吸力公式：

$$\pi = \alpha \left[EC_s n^{1 - (D_w - 2)/(D_f - D_E)} \right]^\beta \quad (11)$$

式中， α 和 β 为拟合系数。

3.2 考虑电离度的 van't Hoff 方程

根据图 4, 5 所示的试验结果，发现浓度在 $0 < m < m_A$ 和 $m_A < m < m_{\text{max}}$ 时，硫酸钠和氯化钠溶液饱和后土体的渗透吸力表现出相反的结果。因此，基于上述试验结果对 van't Hoff 方程展开了讨论。

结合现有的研究发现，对于渗透吸力的研究多数都只考虑了含氯盐的情况，没有详细考虑含不同盐类土体的渗透吸力。周凤玺等^[13-14]在 van't Hoff 方程的基础上，考虑了溶质电离后的离子作用，优化了 van't Hoff 方程对不同类盐渍土渗透吸力的描述能力。图 6 是在选用浓度和质量摩尔浓度作为控制参量时，方程 (7) 计算的氯盐渍土和硫酸盐渍土在 25℃ 时的渗透吸力。如图 6 所示，采用浓度 c 与质量摩尔浓度 m 做控制参量的结果在形态上基本保持一致。但是在数量级上存在着局部差异，比如交点 A 的渗透吸力分别为 7.0, 14.67 MPa。此外，采用质量摩尔浓度 m 计算的交点 A 明显超出了硫酸钠的有效溶解度范围，与实际情况不相符。产生这种现象的原因是由于在式 (7) 中同时需要孔隙溶液的浓度 c 和质量摩尔浓度 m 而造成的。在选择其中之一作为控制量时，需要该状态下溶液的密度作为系数进行参数的相互转换，而两者的差异正是由于所考虑密度不同而导致的。再者，图 7 中的 m_A 值都大于图 5。显然，式 (7) 虽然能够合理地计算饱和盐渍土的渗透吸力，但是在计算硫酸钠等盐类的渗透吸力时还存在一定的局限性。

Glasstone^[11]给出了 van't Hoff 因子的表达式，并在其中考虑了溶质的电离程度，反映了电离离子与未电离离子对渗透吸力的影响。但是在之后的研究中，学者们都假设了一个理想命题——容许范围内的溶质都完全电离，即 $d = 1$ 。因此，导致在使用 van't Hoff

方程计算渗透吸力时出现了部分误差。Bates^[62]详细讨论了浓度与电离程度的关系, 并基于不同的假设条件计算了相应状态下的电离度。此外, 还在原有的基础上提出了 3 个新的假设: ①电离度由电导黏度比决定; ②离子遵循 van't Hoff 方程; ③van't Hoff 方程适用于未电离的离子。

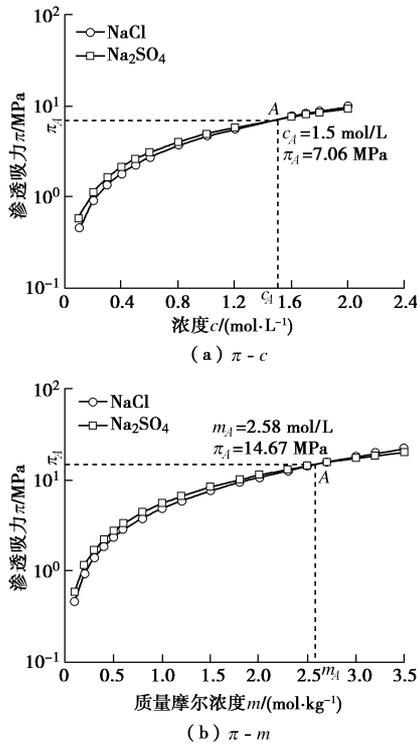


图 6 不同控制参量下渗透吸力的计算结果 ($T = 25^{\circ}\text{C}$)
Fig. 6 Calculated results of osmotic suction under control parameters ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

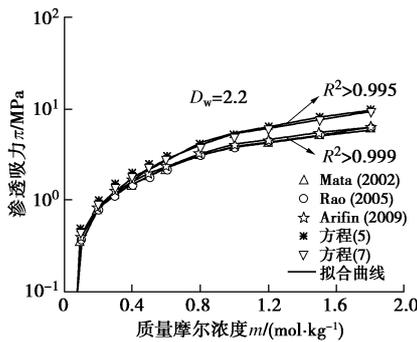


图 7 改进后 EC 模型的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of improved EC model

根据 Bates^[62]的基本假设, 认为硫酸钠溶液的电离度 d 与浓度的表达式可以依据电导率随浓度的变化机理来确定。根据图 4 的结果发现硫酸钠溶液的电导率与浓度的作用机理可以采用指数函数来描述, 详细如图 4 (b) 所示。

基于对硫酸钠溶液的电导率分析, 认为电离度 d 与质量摩尔浓度 m 的关系式可以表示为

$$d = \exp(-\lambda m) \quad (12)$$

式中, λ 为拟合参数, 与溶质的类型、所处的温度环境有关。

在 van't Hoff 因子中考虑电离度式(12), 得到 van't Hoff 因子 i 的表达式:

$$i = 1 + (v - 1)\exp(-\lambda m) \quad (13)$$

将完善后的 van't Hoff 因子式 (13) 代入式 (7) 得到改进后的 van't Hoff 方程:

$$\pi = iRTc \left[1 + |z^+ z^-| f_{\phi} + 2m \frac{v^+ v^-}{v} B_{\phi} + 2m^2 \frac{(v^+ v^-)^{3/2}}{v} C_{\phi} \right] \quad (14)$$

4 数值分析

结合已有的研究结果, 针对上述改进后的 EC 模型和 van't Hoff 方程 (式 (11), (14)) 进行了分析, 讨论了这两种计算方法的适用性和可行性。

4.1 基于 EC 理论的分析结果

根据式 (11) 计算渗透吸力时, 需要考虑土体的孔隙率 n 与孔隙分形维数 D_f 。通过孔隙率和孔隙分形维数可以反映孔隙溶液离子在空间中的迁移缩合路径和范围。因此, 可以减小采用挤压法测量提取物电导率时由于挤压压力、土体孔隙等干扰因素引起的误差。

结合 Mata 等、Rao 等和 Arifin 等对电导率与渗透吸力相互关系的研究结果及 van't Hoff 方程, 对式(11)的可行性进行了分析讨论。即采用式 (11) 对上述结果进行了拟合分析, 拟合参数如表 3 所示。

表 3 拟合参数值 (π , MPa)

Table 3 Values of fitting parameters (π , MPa)					
被拟合项		α	β	n	D_f
EC - π 关系	Mata			0.34	2.61
	Rao	0.1976	1.0489	0.34	2.588
	Arifin			0.34	2.55
van't Hoff	式(5)	0.1239	1.2986	0.34	2.51
	式(7)			0.34	2.55

图 7 是采用式 (11) 对已有计算渗透吸力方法的拟合情况。从图 7 中发现式 (11) 能够较好地拟合传统 EC 模型和 van't Hoff 方程的计算结果, 并能够保持很好的一致性。再者, 结合表 3 可以发现, 拟合得到的参数都较为统一且符合一般压实土体的孔隙规律。因此, 认为改进后的 EC 模型不仅能够反映空间中介质粒子对渗透吸力的影响, 还能够很好地计算特定条件下的渗透吸力。

图 8 给出了温度为 25°C 时, 改进后 EC 模型的分析结果。其中, 图 8 (a), (b) 为 D_f 和 D_w 分别作为控制变量时渗透吸力随孔隙率的变化情况, 从图中可

以发现渗透吸力随着孔隙率的增加而增加，且在孔隙率为 0 或 1 时渗透吸力值都分别回归于一点。该现象正好释义了饱和土体孔隙率分别为 0 和 1 时的极限介质和完全溶液性。此外， D_f 和 D_w 的变化，只改变了曲线的曲率，并没有改变其影响机理。值得注意的是，上述结论与 Meng 等^[61]研究结果相一致。图 8 (c) 表示孔隙率分别为 0.25, 0.35, 0.45 且 $D_w = 2.2$ 时，分形维数对三维空间中土体渗透吸力的影响机理，从图中可以发现渗透吸力随着分形维数的增大而减小，且在分形维数接近 3 时渗透吸力值趋向于 0。因此，认为采用分形理论改进传统 EC 模型在理论上是合理的。

图 8 (d), (e) 分别是在不同的孔隙率和分形维数情形下，氯化钠溶液饱和后土体渗透吸力的分布情况。根据图示结果发现孔隙率与分形维数对渗透吸力的贡献是可描述的，即曲线的变化趋势是相同的，不存在突变等不可预料的现象。其次，相对渗透吸力而言，分形维数的灵敏度明显低于孔隙率的。而压实土体的孔隙率基本都是一个稳定值，且随着土体结构的变化不会出现较大的突变。因此，认为采用式 (11) 计算不同孔隙条件下饱和盐渍土的渗透吸力是可行的。

图 8 (f) 是采用式 (11) 计算的氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力。其中选用的参数为表 3 中拟合 Arifin 的研究结果得到的参数。将图 8 (f) 与图 5 (c) 进行对比分析，发现式 (11) 的计算结果与式 (3) 的结果基本一致。该现象的产生恰好证明了式 (11) 只是对 EC 模型进行了理论改进，并没有脱离原有的理论基础。

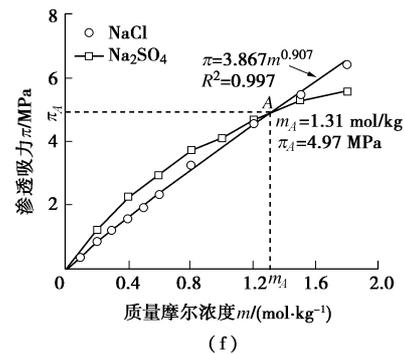
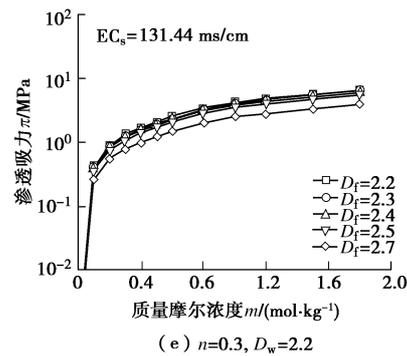
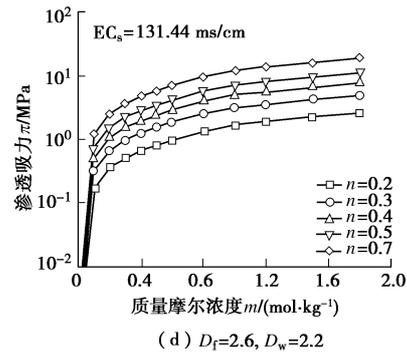
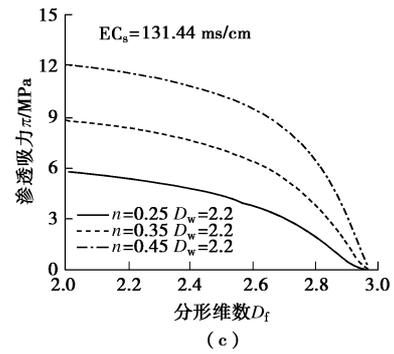
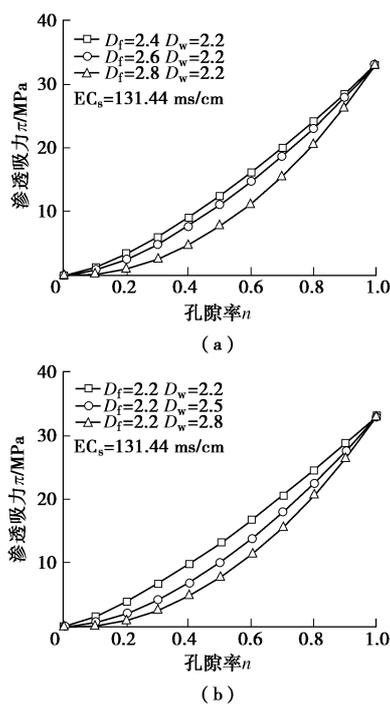


图 8 改进后 EC 模型的数值分析 ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Numerical analysis of improved EC model ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

根据上述分析结果，发现采用分形理论改进的 EC 模型不仅完善了传统模型在理论方面的缺陷，而且还反映了空间介质粒子对溶液离子迁移缔合的影响。除此之外，该模型可直接采用特定温度条件下溶液的电导率来计算不同土体的渗透吸力。避免了采用挤压法测量土体渗透吸力时由于挤压压力、土体孔隙等因素引起的误差。

4.2 考虑电离度后 van't Hoff 方程的数值分析

通过 van't Hoff 因子将溶质的电离度引入了 van't Hoff 方程。试图通过不同溶质的电离程度与浓度的相互关系, 以修正 van't Hoff 方程在计算不同电解质饱和后土体渗透吸力时出现的误差。图 9 是改进后 van't Hoff 方程的数值计算结果。其中依托 25°C 下氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力, 对改进后的 van't Hoff 方程进行了讨论。图 9 (a) 是式 (14) 的计算结果, 即在原有基础上考虑了渗透系数对渗透吸力的影响。计算时采用的参数 λ 分别为 $\lambda_{\text{NaCl}} = 0.16$, $\lambda_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 0.22$ 。从图 9 (a) 发现式 (14) 能够实现对不同溶液饱和后土体的渗透吸力计算, 并且能够真实地反映溶质特性。

图 9 (b) 为式 (5) 的计算结果, 也就是 Glasstone (1974) 的研究结果。在拟合参数 $\lambda_{\text{NaCl}} = 0.22$, $\lambda_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 0.89$ 时, 计算了与图 9 (a) 具有相同条件的土体渗透吸力。发现采用考虑溶质电离度修正后的式 (5) 也能够计算不同电解质溶液饱和后土体的渗透吸力。对比图 9 (a), (b) 发现采用式 (5), (14) 计算的渗透吸力在数量级上存在少许差异, 详细如图中交点 A 的渗透吸力值。

除此之外, 需要注意的是参数 λ 的取值方法。此处只是为了满足特定条件 (对 A 点横坐标的描述) 时近似取值的。因此, 对参数 λ 的具体取值情况还需要结合特定条件下的试验结果来标定。

图 9 (c) 在图 9 (a), (b) 的基础上研究了电离度在不同参数 λ 的控制下随浓度的分布情况。结合图 9 (c) 的分析结果, 发现在 van't Hoff 方程中不考虑渗透系数时, 为使计算结果满足硫酸钠的特殊要求, 需要较低的电离度来补偿。而在计算氯化钠饱和后土体的渗透吸力时, 渗透系数的影响不是特别明显。即不考虑渗透系数时, 需要的电离度补偿值较小。结合上述分析结果, 认为在 van't Hoff 方程中同时考虑电离度和渗透系数能够较好地实现不同盐渍土的渗透吸力计算。

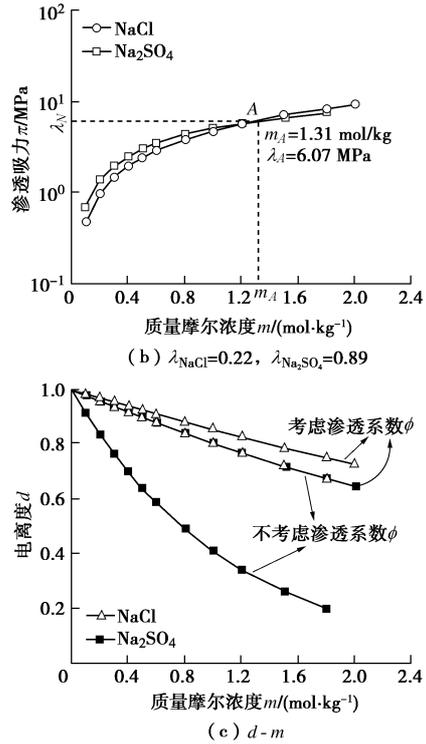
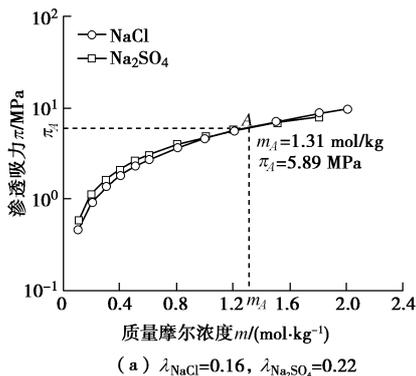


图 9 改进后 van't Hoff 方程的数值分析 ($T = 25^\circ\text{C}$)
 Fig. 9 Numerical analysis of improved van't Hoff equation ($T = 25^\circ\text{C}$)

5 结 论

针对土体渗透吸力的试验成果和理论成果进行了总结分析。其次依托氯化钠和硫酸钠溶液的电导率试验, 探究了氯化钠和硫酸钠溶液饱和后土体渗透吸力与浓度、温度的相互关系。然后采用分形理论和电离度分别改进了 EC 模型和 van't Hoff 方程, 并进行了详细的数值分析。得到以下 3 点结论。

(1) 氯化钠溶液饱和后土体的渗透吸力与含盐浓度呈幂函数分布, 而硫酸钠溶液饱和后土体的渗透吸力与浓度呈指数关系。此外, 随着浓度的增大, 硫酸钠溶液饱和后的土体渗透吸力先大于氯化钠溶液饱和后的, 而在浓度大于 m_A 后硫酸钠溶液饱和后的土体渗透吸力小于氯化钠溶液饱和的。再者, m_A 随温度的增大呈线性增长关系。

(2) 改进的 EC 模型不仅能够反映孔隙溶液的化学特性, 而且还反映了空间中介质粒子对溶质离子迁移速度的影响。此外, 还可在溶液电导率的基础上形成统一的计算模型, 避免了由于挤压法测量提取物电导率时由于挤压压力和土体孔隙等因素引起的误差。

(3) 改进的 van't Hoff 方程能够反映不同溶质离子引起的渗透吸力差异, 完善了 van't Hoff 方程在描述含不同盐渍土渗透吸力时所表现出的局部缺陷。

参考文献:

- [1] GENS A. Soil–environment interactions in geotechnical engineering[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(1): 3 – 74.
- [2] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, **21**(3): 518 – 529.
- [3] 高红波, 梁卫国, 杨晓琴, 等. 高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(5): 935 – 943. (GAO Hong-bo, LIANG Wei-guo, YANG Xiao-qin, et al. Experimental study of mechanical property of gypsum rock soaked in hot saturated brine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(5): 935 – 943. (in Chinese))
- [4] WITTEVEEN P, FERRARI A, LALOU L. An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behaviour of a clay[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(3): 244 – 255.
- [5] 张彤炜, 邓永锋, 刘松玉, 等. 渗透吸力对重塑黏土的压缩和渗透特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(12): 2260 – 2266. (ZHANG Tong-wei, DENG Yong-feng, LIU Song-yu, et al. Experimental investigation of osmotic suction effect on hydro-mechanical behaviour of remolded clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(12): 2260 – 2266. (in Chinese))
- [6] 颜荣涛, 纪文栋, 陈星欣, 等. 盐溶液饱和黏土的力学行为模拟[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(2): 546 – 552. (YAN Rong-tao, JI Wen-dong, CHEN Xing-xin, et al. Modeling mechanical behaviors of clayey soil saturated by salt solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(2): 546 – 552. (in Chinese))
- [7] LORET B, HUECKEL T, GAJO A. Chemo-mechanical coupling in saturated porous media: elastic-plastic behaviour of homoionic expansive clays[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2002, **39**(10): 2773 – 2806.
- [8] MATA C, ROMERO E, LEDESMA A. Hydro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures[C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soil*. Recife, Brazil: Swets & Zeitlinger, 2002: 283 – 288.
- [9] RAO M S, SHIVANANDA P. Role of osmotic suction in swelling of salt-amended clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, **42**(1): 307 – 315.
- [10] ARIFIN Y F, SCHANZ T. Osmotic suction of highly plastic clays[J]. *Acta Geotechnica*, 2009, **4**(3): 177 – 191.
- [11] GLASSTONE S. *Textbook of Physical Chemistry*[M]. 2nd ed. New Delhi: Macmillan India, 1974.
- [12] XU Y F, XIANG G S, JIANG H, et al. Role of osmotic suction in volume change of clays in salt solution[J]. *Applied Clay Science*, 2014, **101**: 354 – 361.
- [13] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土的一维蠕变试验与模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(1): 142 – 149. (ZHOU Feng-xi, WANG Li-ye, LAI Yuan-ming. One-dimensional creep test and model study on saturated saline soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(1): 142 – 149. (in Chinese))
- [14] 王立业, 周凤玺, 秦虎. 饱和盐渍土分数阶蠕变模型及试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(2): 543 – 551. (WANG Li-ye, ZHOU Feng-xi, QIN Hu. Fractional creep model and experimental study of saturated saline soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(2): 543 – 551. (in Chinese))
- [15] BOLT G H, MILLER R D. Compression studies of illite suspensions I[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1955, **19**(3): 285 – 288.
- [16] BOLT G H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays[J]. *Géotechnique*, 1956, **6**(2): 86 – 93.
- [17] MESRI G, OLSON R E. Consolidation characteristics of montmorillonite[J]. *Géotechnique*, 1971, **21**(21): 341 – 352.
- [18] SRIDHARAN A, RAO G V. Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept[J]. *Géotechnique*, 1973, **23**(3): 359 – 382.
- [19] SRIDHARAN A, RAO G V. Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(2): 177 – 193.
- [20] MARINE I W, FRITZ S J. Osmotic model to explain anomalous hydraulic heads[J]. *Water Resources Research*, 1981, **17**(1): 73 – 82.
- [21] FRITZ S J. Ideality of clay membranes in osmotic processes: a review[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1986, **34**(2): 214 – 223.
- [22] GAJO A, LORET B, HUECKEL T. Electro-chemo-mechanical couplings in saturated porous media: Elastic-plastic behaviour of heteroionic expansive clays[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, **39**(16): 4327 – 4362.
- [23] GAJO A, LORET B. Finite element simulations of chemo-mechanical coupling in elastic–plastic homoionic expansive clays[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, **192**(31/32): 3489 – 3530.

- [24] GUIMARAES L D N, GENS A, OLIVELLA S. Coupled thermo-hydro-mechanical and chemical analysis of expansive clay subjected to heating and hydration[J]. *Transport in Porous Media*, 2007, **66**(3): 341 – 372.
- [25] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemomechanical behavior of unsaturated soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, **13**(9): 1 – 21.
- [26] FREDLUND, RAHARDJO D G. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*[M]. New York: Wiley, 1993.
- [27] TRIPATHY S, LEONG E C, RAHARDJO H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(2): 173 – 182.
- [28] PERONI N, TARANTINO A. Measurement of Osmotic Suction Using the Squeezing Technique[M]// *Unsaturated Soils: Experimental Studies*, 2005.
- [29] LEONG E C, TRIPATHY S, RAHARDJO H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(2): 173 – 182.
- [30] CARDOSO R, ROMERO E, LIMA A, et al. A Comparative Study of Soil Suction Measurement Using Two Different High-Range Psychrometers[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2007.
- [31] USDA. *Agriculture handbook 60, Diagenesis and Improvement of Saline and Alkali Soils*[M]. California: United States Salinity Laboratory, 1954.
- [32] RAO S, REVANASIDDAPPA K. Role of soil structure and matric suction in collapse of a compacted clay soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, **26**(1): 1 – 9.
- [33] RAO S M, THYAGARAJ T. Swell-compression behaviour of compacted clays under chemical gradients[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(5): 520 – 532.
- [34] USDA. *Agricultural Handbook 60, Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*[M]. Washington D C: United States Salinity Laboratory, 1950.
- [35] IYER B, HODDINOTT K B, LAMB R O. Pore Water Extraction-Comparison of Saturation Extract and High-Pressure Squeezing[M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990: 159 – 170.
- [36] SACCHI E, MICHELOT J L, PITSCH H, et al. Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterisation: Methods, processes and current understanding[J]. *Hydrogeology Journal*, 2001, **9**(1): 17 – 33.
- [37] MANHEIM F T. A Hydraulic Squeezer for Obtaining Interstitial Water from Consolidated and Unconsolidated Sediments[R]. Virginia: US Geological Survey, 1966: 256 – 261.
- [38] ENGELHARDT W V, GAIDA K H. Concentration changes of pore solutions during compaction of clay sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1963, **33**(4): 919 – 930.
- [39] MARIANO A D, AIRÒ F C, VALORE C. Retention curves and 1-D behaviour of a compacted tectonised unsaturated clay[C]// *International Workshop on Unsaturated Soils*, 2000, Rotterdam.
- [40] KRAHN J, FREDLUND D G. On total, matric and osmotic suction[J]. *Soil Science*, 1972, **114**(5): 339 – 348.
- [41] RIDLEY A M, WRAY W K. Suction measurement: a review of current theory and practices[C]// *International Conference on Unsaturated Soils/UNSAT 95*, 1996, Paris: 1293 – 1322.
- [42] van't HOFF J H. Die rolle des osmotischen druckes in der analogie zwischen lösungen und gasen[J]. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 1887, **1**(1): 481 – 508. (van't HOFF J H. The role of osmotic pressure in the analogy between solutions and gases[J]. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 1887, **1**(1): 481 – 508. (in Germany))
- [43] MEYER L. Über das wesen des osmotischen druckes[J]. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 1889, **5**(1): 174 – 176. (MEYER L. About the essence of osmotic printing[J]. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 1889, **5**(1): 174 – 176. (in Germany))
- [44] LAAR van J J. Zur Thermodynamik der elektrolytischen Dissociation[J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1982, **10U**(1): 242 – 254. (LAAR van J J. The thermodynamics of electrolytic dissociation[J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1982, **10U**(1): 242 – 254. (in Germany))
- [45] DAO V N T, MORRIS P H, DUX P F. On equations for the total suction and its matric and osmotic components[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, **38**(11): 1302 – 1305.
- [46] T M L. Osmotic pressure or osmotic suction?[J]. *Nature*, 1916, **97**(2423): 122 – 123.
- [47] GRASLEY Z C, RAJAGOPAL K R. Revisiting total, matric, and osmotic suction in partially saturated geomaterials[J]. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 2012, **63**(2): 373 – 394.
- [48] SPOSITO G. *The Thermodynamics of Soil Solution*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1981.
- [49] SUN D A, CUI H, SUN W. Swelling of compacted

- sand-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2009, 43(3/4): 485 - 492.
- [50] LANG A R G. Osmotic coefficients and water potential of sodium chloride solutions from 0 to 40 degrees C[J]. Australian Journal of Chemistry, 1967, 20(9): 2017 - 2023.
- [51] PITZER K S. Thermodynamics of electrolytes: I theoretical basis and general equations[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 1973, 77(2): 268 - 277.
- [52] PITZER K S, MAYORGA G. Thermodynamics of electrolytes: II activity and osmotic coefficients for strong electrolytes with one or both ions univalent[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1973, 77(19): 2300 - 2308.
- [53] BARBOUR S L, FREDLUND D G. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 551 - 562.
- [54] KIM H T, FREDERICK W J. Evaluation of Pitzer ion interaction parameters of aqueous electrolytes at 25°C: 1 Single salt parameters[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1988, 33(2): 177 - 184.
- [55] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195 - 254. (JIANG Ming-jing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195 - 254. (in Chinese))
- [56] WYLLIE M R J, ROSE W. Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(4): 105 - 118.
- [57] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1946(1): 54 - 62.
- [58] 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.
- [59] COLEMAN S W, VASSILICOS J C. Transport properties of saturated and unsaturated porous fractal materials[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(3): 035504.
- [60] WEI W, CAI J C, HU X Y, et al. An electrical conductivity model for fractal porous media[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(12): 4833 - 4840.
- [61] MENG H, SHI Q, LIU T Y, et al. The percolation properties of electrical conductivity and permeability for fractal porous media[J]. Energies, 2019, 12(6): 1 - 15.
- [62] BATES S J. Osmotic pressure and concentration in solutions of electrolytes, and the calculation of the degree of ionization[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 37(6): 1421 - 1445.

2020年黄文熙讲座（第23讲）学术报告会成功举行

2020年7月11日，由《岩土工程学报》编委会主办，河海大学承办的第23讲黄文熙讲座学术报告会在河海大学科学会堂举办。由于新冠肺炎防控要求，本届黄文熙讲座采用线上与线下相结合的方式举行。本届黄文熙讲座主讲人分别为南京水利科学研究院蔡正银教高和中国地震局兰州地震研究所王兰民研究员。

河海大学副校长郑金海教授和南京水利科学研究院院长、《岩土工程学报》编委会主任陈生水教高先后致辞。黄文熙讲座主讲人南京水利科学研究院蔡正银教高做了题为“板桩结构土压力理论的创新发展”，中国地震局兰州地震研究所王兰民研究员做了题为“黄土地层大规模地震液化滑移的机理和风险评估”的报告。他们的精彩演讲得到现场同行们的高度评价。本届黄文熙讲座设河海大学现场报告会、采用腾讯会议和微信会议直播。2385位岩土工程同行参与交流，参会代表人数创历

史记录，其中河海大学科学会堂有85位代表参加现场报告会，300位代表在腾讯会议平台与现场互动，2000余人在微信会议平台听取报告。

黄文熙讲座是1998年为纪念黄文熙先生诞辰90周年而开设的我国岩土力学与工程领域最高学术水平的讲座。黄文熙先生是著名的水工结构和岩土工程专家，我国土力学学科奠基人之一，新中国水利水电科学研究事业的开拓者，在水利水电工程、结构工程和岩土工程领域都取得了杰出的成就。黄文熙先生致力于水利水电工程教育事业60多年，培养了大批工程技术人才，被推崇为土力学界的一代宗师。黄文熙讲座主讲人每年由《岩土工程学报》六个主办学会推荐候选人，再由《岩土工程学报》全体编委投票选举产生。目前，黄文熙讲座已举办了23讲，已经成为我国岩土工程界重要的学术交流平台。