

DOI: 10.11779/CJGE201912022

盐溶液中膨润土膨胀变形的计算方法

李晓月, 徐永福*

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 膨润土的膨胀变形特性会受到盐溶液的渗透吸力的影响, 其影响效果与在膨润土上施加外荷载产生的效果类似。因此, 用与渗透吸力相关的修正有效应力来表示膨润土实际受到的总外应力。由分形理论可推导出: 在双对数坐标下, 修正有效应力与膨润土的最大膨胀变形间的关系可用一条直线表示; 修正有效应力可利用溶液的渗透吸力和施加的外荷载求得。但不同浓度盐溶液的渗透吸力须通过较为复杂的试验获得, 给工程实际应用造成了困难。基于修正的 Debye-Hückel 公式求得 NaCl、NaNO₃、CaCl₂ 和 Ca(NO₃)₂ 四种溶液在不同浓度下的渗透系数, 结果经已有文献验证, 计算方法可靠。以此为基础, 进一步求得膨润土在不同浓度下所受到的修正有效应力。经试验数据验证, 同种膨润土在不同浓度、不同种类溶液下的最大膨胀变形与修正有效应力之间在双对数坐标下存在统一的线性关系, 符合理论公式。

关键词: 盐溶液; 膨胀变形; 分形; 修正有效应力; 渗透吸力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2353-07

作者简介: 李晓月(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事膨胀性土体基本性质的研究。E-mail: xiaoyueli@sjtu.edu.cn。

Method for calculating swelling deformation of bentonite in salt solution

LI Xiao-yue, XU Yong-fu

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A linear relationship between the maximum swelling deformation and the effective stress of bentonite under double logarithmic coordinates is derived based on the fractal theory. The effective stress of bentonite is related to the osmotic suction of concentration solution. However, the osmotic suction must be obtained through complicated tests, and it brings the difficulty to the practical application in projects. Based on the modified Debye-Huckel formula, the osmotic coefficients of CaCl₂, NaCl, NaNO₃ and Ca(NO₃)₂ solutions in different concentrations are obtained, and are proved to be reliable through other literatures. Then, the effective stress can be obtained by using the calculated osmotic suction. The maximum swelling deformations of the same kind of bentonite with different concentrations or different kinds of solutions have a unique linear relationship with the effective stress in log-log coordinates, which conforms to the theoretical formula.

Key words: salt solution; swelling deformation; fractal; modified effective stress; osmotic suction

0 引言

膨润土因其膨胀性、低渗透性和强吸附性等特点而通常被选做核废料处置库的回填/缓冲材料。处置库周围岩体中可能存在裂隙, 膨润土吸收裂隙水后体积膨胀, 可填充围岩裂隙、降低渗透性、避免核素向外界环境中迁徙造成污染。

膨润土的膨胀特性会受到膨润土干密度、蒙脱石所占比例、含水率等多种因素影响, 目前已有许多学者做过大量研究: 刘月妙等^[1]通过室内试验发现, 压实高庙子膨润土的最大膨胀力与压实密度相关; 张虎元等^[2]考虑掺砂率和初始干密度的影响, 建立了 GMZ01 膨润土-砂混合物的最大膨胀力归一化模型; 赖小玲等^[3]结合电镜扫描试验, 研究了膨润土的膨胀

力在不同含水率和干密度下的时效性; 陈宝等^[4]借助扫描电镜和透射电镜, 研究了高碱溶液侵蚀对膨润土膨胀力的影响。

裂隙溶液中所含溶质的浓度也会对膨润土垫层的膨胀性产生影响^[5]。Castellanos 等^[6]认为, FEBEX 膨润土的膨胀性受 NaCl 和 CaCl₂ 溶液的影响, 主要表现为 FEBEX 膨润土的最大膨胀力和最大膨胀应变均随盐溶液浓度的增加而减小; 秦冰等^[7]等利用试验发现, GMZ01 膨润土的膨胀性明显地受到浸泡溶液的浓度和成分影响; 叶为民等^[8]等利用泵压法发现, 在相同

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41630633, 41877211)

收稿日期: 2017-12-04

*通讯作者: (E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn)

荷载下,饱和膨胀的 GMZ01 膨润土的孔隙比会随溶液浓度增加而减小;孙德安等^[9]通过 GMZ01 膨润土在不同浓度盐溶液下的膨胀试验,得到膨润土膨胀力的对数与盐溶液浓度呈线性关系;Calvello 等^[10]从双电层理论角度分析,认为孔隙水浓度增大会减弱双电层斥力从而减弱膨胀力。受溶液浓度差异的影响,膨润土膨胀体积变化与施加的竖向外荷载之间无法用一条统一的曲线表示。

Rao 等^[11]认为,溶液浓度对膨润土膨胀性的影响类似于在膨润土上施加竖向荷载造成的影响。Barbour 等^[12]认为,膨润土膨胀体积变化受有效应力影响,并且有效应力与溶液的渗透吸力相关。Xu 等^[13]基于分形理论,表明不同浓度的溶液通过产生不同的渗透吸力来影响有效应力,从而进一步影响膨润土的膨胀性;并提出修正有效应力的概念,推导出蒙脱石孔隙比与修正有效应力在双对数坐标下的线性关系。

渗透吸力是求得不同浓度溶液中膨润土所受的修正有效应力的关键,但其会受溶种类、浓度、温度等多种因素影响^[14],与浓度之间并非简单的线性关系。利用试验的方法测得渗透吸力通常比较复杂^[15],再加上需要考虑多种因素的影响,不同浓度、不同温度下溶液的渗透吸力都需要分别利用试验测定,无疑为工程实践的应用造成了极大的不便。本文利用溶液的渗透系数计算公式,求得了不同种类、不同浓度溶液的渗透吸力,并结合分形模型,得到了不同溶液中膨润土的膨胀力及最大膨胀变形的计算方法,并经试验得到较好的验证。

1 计算理论

膨润土的膨胀变形会随所受的总外应力,即修正有效应力的增大而减小。在盐溶液中,膨润土受到的外应力除了施加的竖向荷载外,还有盐溶液作用在膨润土上的渗透应力。渗透应力与溶液的渗透吸力相关,且渗透吸力会随溶液浓度增大而非线性地增加。利用修正的 Debye-Hückel 公式可求得溶液的渗透系数,进而可求得不同溶液的渗透吸力。基于分形理论,可推得渗透吸力与修正有效应力、修正有效应力与膨胀变形间的计算公式,因此膨润土在盐溶液中的膨胀变形即可利用公式求得。

1.1 分形模型

Xu 等^[16]根据分形理论可推导出,膨润土的蒙脱石孔隙比与修正有效应力存在如下关系:

$$\frac{V_w}{V_m} = K(p^e)^{D_s-3}, \quad (1)$$

式中, V_w 为膨润土中含水体积, V_m 为蒙脱石体积, K

为膨润土膨胀系数,与膨润土表面离子种类及分布相关^[17], D_s 为膨润土表面分维,可用氮吸附试验测得^[18], p^e 为修正有效应力,与溶液的渗透吸力、膨润土上施加的外荷载都有关。由分形理论,得到修正有效应力 p^e 与竖向外荷载 p 和溶液渗透吸力 π 的关系如下^[13]:

$$p^e = p + \pi \left(\frac{p}{\pi} \right)^{2-D_s}. \quad (2)$$

同一种膨润土 (K 和 D_s 相同) 在不同浓度溶液下的蒙脱石孔隙比与修正有效应力的关系便可用双对数坐标下的同一条直线表示。事实上,修正有效应力即为膨润土的实际总膨胀力。因受溶液浓度影响,部分膨胀力被渗透吸力抵消 (式 (2) 第二项), 剩余的膨胀力,即净膨胀力,与竖向外荷载 p 相等。工程上,净膨胀力才是对膨润土垫层安全性起到重要作用的因素。若已知蒙脱石孔隙比 V_w/V_m 和溶液渗透吸力 π , 就可先通过式

(1) 得到修正有效应力 p^e ; 再根据式 (2) 利用迭代方法,即可求得竖向外荷载,即净膨胀力 p 。

在室内试验中通常是利用普通固结仪,在土样上施加一定竖向荷载 p 不变,观测最终膨胀稳定时,试样高度的最大变化 ΔH_{\max} 。根据土力学基本定义及相关知识可推导出试样最大应变和孔隙比的关系:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta H_{\max}}{H_0} = \frac{e - e_0}{1 + e_0}, \quad (3)$$

其中 e_0 是膨润土试样的初始空隙比, H_0 为试样初始高度。结合式 (1), 由 $e = V_w/V_s = C_m V_w/V_m$ 可进一步推导出膨润土的孔隙比与有效应力的如下关系:

$$e = C_m K (p^e)^{D_s-3}, \quad (4)$$

其中 V_s 是固体体积, C_m 是蒙脱石的体积分数。则膨润土在给定溶液浓度及外荷载下,最大体积应变为

$$\varepsilon_{\max} = \left(\frac{C_m K (p^e)^{D_s-3} + 1}{G_s} \rho_d - 1 \right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中, G_s 为膨润土相对密度, ρ_d 为膨润土干密度。由式 (5) 可见,同种膨润土试样的最大膨胀应变与修正有效应力在双对数坐标下应呈的线性关系,且线性关系不受溶液浓度、种类差异影响。

1.2 渗透系数的计算方法

膨润土的膨胀变形由修正有效应力大小决定,从式 (2) 知,修正有效应力与溶液的渗透吸力相关。不同浓度溶液的渗透吸力有如下计算公式:

$$\pi = \zeta R T c \phi, \quad (6)$$

其中, ζ 溶质可分解的离子数 (如: $\text{NaCl}=2$), R 为广义气体常数 (8.31 J/mol/K), T 为绝对温度, c 溶质的质量摩尔浓度 (mol/kg), ϕ 为渗透系数,可由如下公式计算^[19]:

$$\phi = -\frac{\rho_w}{\zeta c M_w} \ln \left(\frac{p_w}{p_0} \right), \quad (7)$$

$$f^\phi = -A^\phi \frac{I^{1/2}}{1 + bI^{1/2}}, \quad (11)$$

式中, M_w 为水的摩尔质量 (18.016 g/mol), ρ_w 为水的密度, p_w 为溶液表面的饱和蒸气压, p_0 为纯水表面的饱和蒸气压。溶液浓度越高, 溶液表面被溶质占据的位置越多, 则可逸出的水分子量减少, 导致饱和蒸气压降低^[20]。此外, 饱和蒸气压还会随温度升高而增加^[21]。

式中, b 是一个经验参数, 本文中取 1.2, A^ϕ 是 Debye-Hückel 参数, 可由以下公式求出^[24]:

$$A^\phi = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2\pi N_A d_s}{M_s}} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 D k T} \right)^{3/2}, \quad (12)$$

由于饱和蒸气压会受到溶液浓度、种类、温度等多种因素的影响^[14], 且需要通过较为复杂的试验测得, 从而不易得到。在工程实践中, 如果对每一种溶液情况都要通过复杂的试验测得, 显然会浪费大量人力物力。因此, 有必要寻求一种便于计算出不同浓度溶液的渗透系数的计算方法。

式中, N_A 为阿伏伽德罗常数, 等于 6.022×10^{23} /mol, d_s 为溶液密度, M_s 为摩尔质量 (kg/mol), e 为电子电量, 等于 $1.602176462 \times 10^{-19}$ C, ϵ_0 为真空介电常数, 等于 8.8542×10^{-12} F/m, D 为介电常数, 与溶液种类相关, k 为玻尔兹曼常数 $1.3806505 \times 10^{-23}$ J/K。由式 (12) 可见, A^ϕ 会受到溶液种类和温度的影响。在水溶液中 298 K 时, A^ϕ 等于 0.392^[22]; 在乙醇中 298 K 时, A^ϕ 等于 2.006^[24]。表 1 为不同种类的电解质在水溶液中 298 K 时参数的取值。

Pitzer 等^[22-23]通过优化 Debye-Hückel 理论, 提出一种计算渗透系数的方法, 可以较为准确地计算出不同浓度、不同溶质在不同温度下、不同溶液中的渗透系数, 极大地便于在工程实践中的应用。电解质 MX 的渗透系数的计算方法如下:

$$\phi = |Z_M Z_X| f^\phi + m \left(\frac{2V_M V_X}{V} \right) B_{MX}^\phi + m^2 \frac{2(V_M V_X)^{3/2}}{V} C_{MX}^\phi + 1, \quad (8)$$

同种浓度的同种溶质在不同溶剂中, 由于部分参数值不同而计算得到的渗透系数不同, 但计算的方法相同。根据以上公式, 求得 298 K 时不同浓度下的 NaCl 和 NaNO₃ 在水溶液中的渗透系数及不同浓度下的 CaCl₂ 和 Ca(NO₃)₂ 在乙醇溶液中的渗透系数, 并与现有文献[24~27]对比, 如图 1。对比结果表明, 利用本文所提出的方法计算得到的结果与现有文献中通过试验或其它算法得到的结果基本一致, 证明本文所提出的计算方法可靠。表 2 为利用本文所提的方法得到的不同种类的电解质在水溶液中 298 K 时, 不同浓度下的渗透系数。

式中, V_M 和 V_X 是化学式中 M 和 X 离子所对应的个数, $V = V_M + V_X$, Z_M 和 Z_X 所对应的化学价, m 为摩尔数, C_{MX}^ϕ 为经验参数, 对于一种或者两种离子都是单价离子的强电解质有

$$B_{MX} = \beta_{MX}^{(0)} + \beta_{MX}^{(1)} e^{-aI^{1/2}}, \quad (9)$$

2 结果对比与分析

根据本文所提到的计算渗透系数的方法, 计算出不同溶液的渗透系数后, 可进一步依据式 (6), 求得不同浓度溶液的渗透吸力 π 。将计算出的 π 代入式 (2), 即可求得修正有效应力 p^e 。图 2 是利用 Castellanos 等^[28]和 Alawaji^[29]的试验数据, 得到的膨润土最大体积应变与修正有效应力的关系图。根据前文所述理论, 同一种膨润土, 只要 K 和 D_s 相同, 即使在不同浓度、不同种类的溶液中, 其最大体积应变与修正有效应力均可在双对数坐标下用同一条直线表示。

式中, $\beta_{MX}^{(0)}$, $\beta_{MX}^{(1)}$ 都是经验参数, 和 C_{MX}^ϕ 一样都可以通过查表得到^[22-23], I 为离子强度, $I = \sum m_i z_i^2 / 2$, a 也为经验参数, 本文取 2 可满足所提到的所有溶质^[20]。对于 2-2 型强电解质 (如: CaSO₄) 及溶剂非水的溶液有

$$B_{MX} = \beta_{MX}^{(0)} + \beta_{MX}^{(1)} e^{-a_1 I^{1/2}} + \beta_{MX}^{(2)} e^{-a_2 I^{1/2}}, \quad (10)$$

式中 $\beta_{MX}^{(0)}$, $\beta_{MX}^{(1)}$, $\beta_{MX}^{(2)}$ 均可以通过查表得到, $a_1=1.4$, $a_2=12$ 可满足所提到的溶质^[23]。 f^ϕ 可由以下公式算得

表 1 盐在水溶液中的参数 (298 K)

Table 1 Parameters of salts in water at 298 K

盐类	V_M	V_X	Z_M	Z_X	$\beta_{MX}^{(0)}$	$\beta_{MX}^{(1)}$	C_{MX}^ϕ	A^ϕ	b	a
NaCl	1	1	1	1	0.076500	0.02664	0.00127	0.392	1.2	2
KCl	1	1	1	1	0.048350	0.21220	-0.00084	0.392	1.2	2
CaCl ₂	1	2	2	1	0.315900	1.61400	-0.00033941	0.392	1.2	2
MgCl ₂	1	2	2	1	0.352350	1.68150	0.00519193	0.392	1.2	2
NaNO ₃	1	1	1	1	0.006800	0.17830	-0.00072	0.392	1.2	2
Ca(NO ₃) ₂	1	2	2	1	0.210825	1.20747833	-0.02014194	0.392	1.2	2
Na ₂ SO ₄	2	1	1	2	0.019575	1.11300000	0.02584824	0.392	1.2	2

表 2 溶质在水中不同浓度下的渗透系数 (298 K)
Table 2 Osmotic coefficients of salts with different concentrations in water (298 K)

浓度 /(mol·kg ⁻¹)	溶质种类						
	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂	NaNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	Na ₂ SO ₄
0.01	0.7930	0.9672	0.9070	0.9081	0.8983	0.9037	0.9665
0.05	0.7901	0.9401	0.8634	0.8679	0.8283	0.8500	0.9554
0.10	0.9320	0.9262	0.8550	0.8629	0.7936	0.8315	0.9478
0.20	0.9231	0.9129	0.8609	0.8749	0.7555	0.8198	0.7982
0.30	0.9202	0.9062	0.8753	0.8949	0.7312	0.8176	0.9665
0.40	0.9199	0.9022	0.8936	0.9187	0.7136	0.8193	0.9369
0.50	0.9210	0.8998	0.9145	0.9453	0.7005	0.8234	0.9203
0.60	0.9229	0.8984	0.9377	0.9743	0.6910	0.8290	0.9018
0.70	0.9255	0.8976	0.9628	1.0054	0.6846	0.8359	0.8903
0.80	0.9285	0.8974	0.9894	1.0382	0.6808	0.8436	0.8818
0.90	0.9319	0.8976	1.0175	1.0727	0.6794	0.8520	0.8749
1.00	0.9356	0.8980	1.0468	1.1087	0.6802	0.8608	0.8692
2.50	1.0135	0.9242	1.5706	1.7582	0.8845	0.9841	0.8642
3.00	1.0454	0.9369	—	2.0029	1.0167	—	0.8597
4.00	1.1152	0.9649	—	2.5180	1.3634	—	0.8557
4.50	1.1527	0.9798	—	2.7863	0.7930	—	—
4.80	1.1758	0.9888	—	—	0.7901	—	—
6.00	1.2729	—	—	—	0.8174	—	—

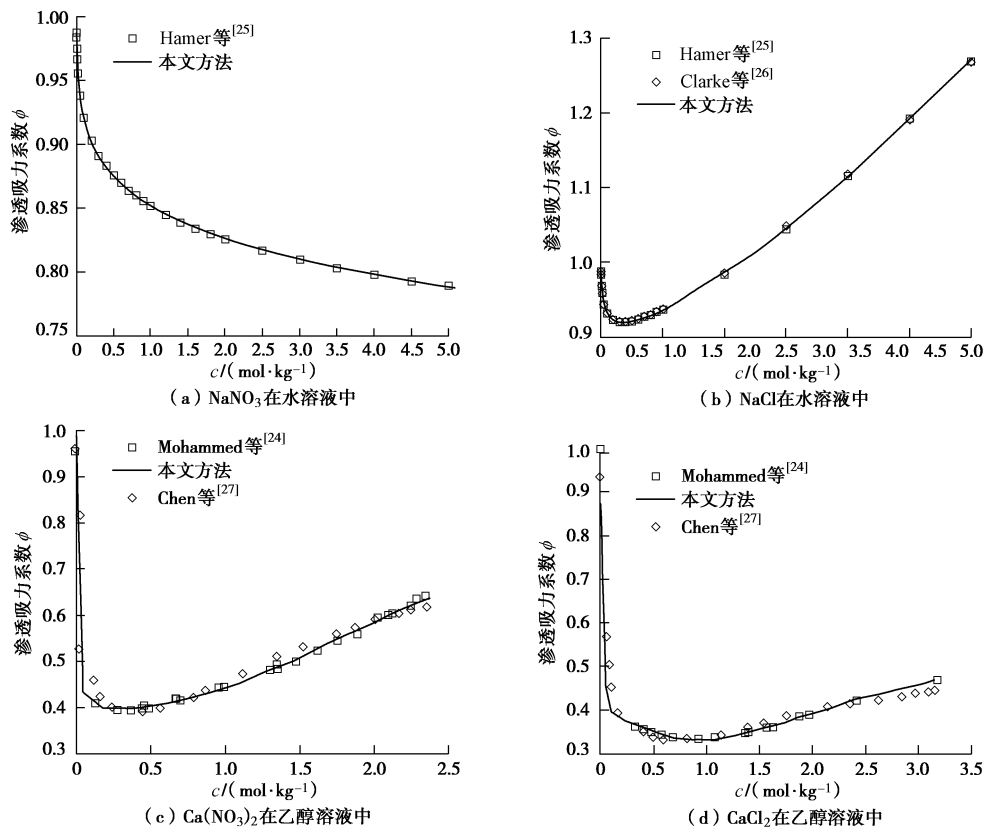


图 1 渗透吸力与溶质浓度的关系(298 K)

Fig. 1 Relationship between ϕ and c (298 K)

图 2 (a) 源于 Castellanos 等^[28]的试验数据。试验中，膨润土被浸泡在不同浓度的氯化钠和氯化钙溶液中，并施加 0.5 和 2.0 MPa 两种竖向荷载。结果表明，

不同竖向荷载、不同溶液浓度的情况下，同种膨润土的最大体积应变与修正有效应力在双对数坐标下存在较为明确的线性关系。外荷载、溶液浓度及种类的差

异都通过修正有效应力得到统一。

图 2 (b) 和 2 (c) 源于 Alawaji^[29] 的试验数据。此试验中, 试样的最大体积应变与修正有效应力在双对数坐标下, 大体存在线性关系, 但具有一定的离散性。造成离散的可能原因, 主要可考虑为: 蒙脱石表面离子与浸泡溶液中的离子发生交换, 使蒙脱石表面的离子种类和分布发生改变, 造成蒙脱石膨胀系数 K 发生变化。

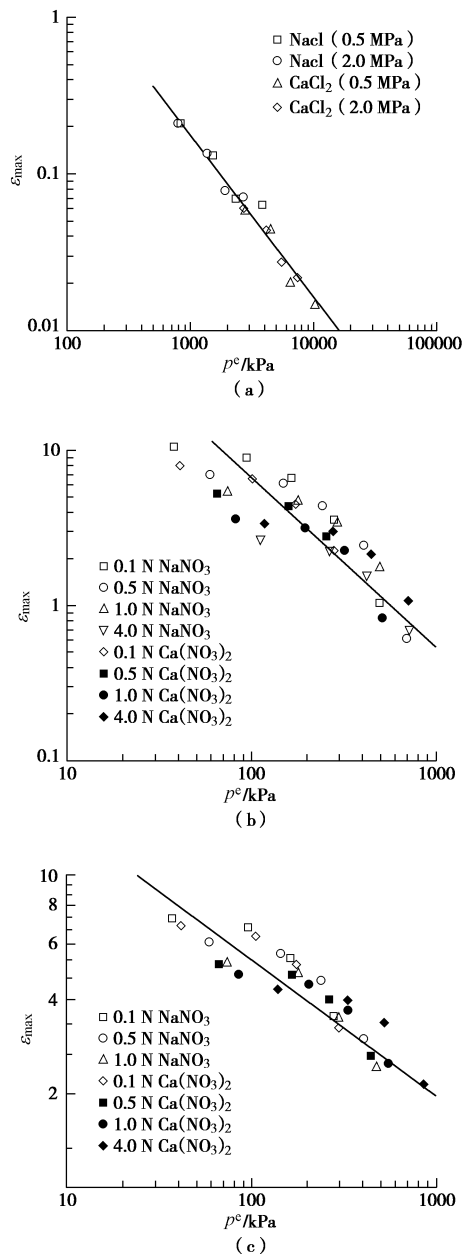


图 2 最大体积应变 ε_{\max} 与修正有效应力的关系

Fig. 2 Relationship between maximum swelling strain and modified effective stress

Mesri 等^[30]通过对膨润土进行处理, 将表面全为钠离子的蒙脱石浸泡在氯化钠溶液中; 将表面全为钙离子的蒙脱石浸泡在氯化钙溶液中, 避免了浸泡溶液

中的离子与蒙脱石表面的离子发生离子交换造成误差。图 3 是通过 Mesri 等^[30]的数据整理得到的蒙脱石孔隙比与修正有效应力的关系。由于避免了离子交换造成的误差, 图 3 所示的试验结果与理论符合良好, 同种膨润土在不同浓度的盐溶液中, 蒙脱石孔隙比与修正有效应力在双对数坐标下可用一条统一的线性关系表示。

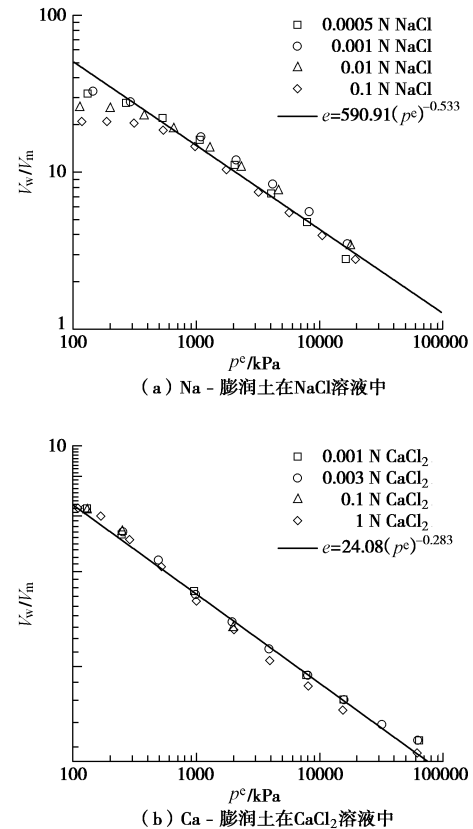


图 3 蒙脱石孔隙比与修正有效应力的关系

Fig. 3 Relationship between bentonite void ratio and modified effective stress

现有试验大多是针对氯化钠和氯化钙溶液, 结果仅表明了氯化钠和氯化钙溶液中, 最大膨胀应变与修正有效应力在双对数坐标下存在线性关系。针对硝酸钠、硝酸钙或是其它溶液的试验数据甚少。但目前尚未有明确理论表示不同的阴离子会对膨润土的膨胀性产生影响。研究中通常只考虑阳离子的影响, 认为阴离子只是平衡电荷, 对膨润土的膨胀性的膨胀性不产生影响^[5-6]。因此, 本文中对不同阴离子种类也只考虑其对溶液渗透吸力的影响, 不考虑将阴离子种类的差异作为产生离散型的原因。

3 结 论

提出了盐溶液渗透吸力的计算方法, 结合分形理论, 得到了计算膨润土在盐溶液中膨胀变形的计算方

法, 并主要得到以下结论:

(1) 基于修正的 Debye-Hückel 公式求得 CaCl_2 、 NaCl 、 NaNO_3 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 四种溶液在不同浓度下的渗透系数, 经已有文献验证, 计算方法可靠。

(2) 利用由修正的 Debye-Hückel 公式算得的渗透系数求得渗透吸力及修正有效应力。经试验验证, 修正有效应力在双对数坐标下与蒙脱石孔隙比、最大体积应变均呈线性关系。

(3) 由于未考虑蒙脱石表面离子交换对蒙脱石膨胀系数 K 及溶液浓度的影响, 因此数据结果存在部分偏差, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47. (LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen, et al. Study on compactibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, 17(1): 44 - 47. (in Chinese))
- [2] 张虎元, 崔素丽, 刘吉胜, 等. 混合型缓冲回填材料膨胀力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 31(10): 3087 - 3095. (ZHANG Hu-yuan, CUI Su-li, LIU Sheng-jie, et al. Experimental study of swelling pressure of compacted bentonite-sand mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 31(10): 3087 - 3095. (in Chinese))
- [3] 赖小玲, 叶为民, 刘毅, 等. 高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 574 - 579. (LAI Xiao-ling, YE Wei-min, LIU Yi, et al. Experimental investigation on ageing effects on swelling pressure of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 574 - 579. (in Chinese))
- [4] 陈宝, 张会新, 陈萍. 高碱溶液对高庙子膨润土侵蚀作用的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 181 - 186. (CHEN Bao, ZHANG Hui-xin, CHEN Ping. Erosion effect of hyper-alkaline solution on Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 181 - 186. (in Chinese))
- [5] PUSCH R. Stability of bentonite gels in crystalline rock physical aspects[R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1983.
- [6] CASTELLANOS E, VILLAR M V, ROMERO E, et al. Chemical impact on the hydro-mechanical behavior of high-density FEBEX bentonite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33: 516 - 526.
- [7] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1005 - 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behavior of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [8] 叶为民, 黄伟, 陈宝, 等. 双电层理论与高庙子膨润土的体变特征[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1889 - 1903. (YE Wei-min, HUANG Wei, CHEN Bao, et al. Diffuse double layer theory and volume change behavior of densely compacted Gaomiaozi bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1889 - 1903. (in Chinese))
- [9] 孙德安, 张龙. 盐溶液饱和和高庙子膨润土膨胀特性及预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2790 - 2795. (SUN De-an, ZHANG Long. Swelling characteristics of Gaomiaozi bentonite saturated by salt solution and their prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2790 - 2795. (in Chinese))
- [10] CALVELLO M, LASCO M, VASSALLO R, et al. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents[J]. Riv Ital Geotec, 2005, 1: 34 - 46.
- [11] RAO S M, THYAGARAJ T. Swelling compression behavior of compacted clays under chemical gradients[J]. Can Geotech J, 2007, 44: 520 - 532.
- [12] BARBOUR S, FREDLUND D. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils[J]. Can Geotech J, 1989, 26: 551 - 562.
- [13] XU Y F, XIANG G S, JIANG H. Role of osmotic suction in volume change of clays in saline solution[J]. Appl Clay Sci, 2014, 102: 354 - 361.
- [14] WIJMANS J G, BAKER R W. The solution-diffusion model: a review[J]. Journal of Membrane Science, 1995, 107(1/2): 1 - 21.
- [15] 周俊. 渗透系数和活度系数的等压法测定及其在铝酸钠溶液体系中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2004. (ZHOU Jun. Isopiestic determination of the osmotic and activity coefficients and its application in the sodium aluminate solution system[D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese))
- [16] XU Y F, MATSUOKA H, SUN D A. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures[J]. Appl Clay Sci, 2003, 22(4): 197 - 209.
- [17] 项国圣, 姜昊, 徐永福. 压实膨润土膨胀变形的分形计

- 算方法[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 1009 - 1014. (XIANG Guo-sheng, JIANG Hao, XU Yong-fu. Fractal calculation method for swelling deformation of compacted bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1009 - 1014. (in Chinese))
- [18] 项国圣, 徐永福, 姜 昊. 膨润土表面分维的试验确定[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**: 369 - 373. (XIANG Guo-sheng, XU Yong-fu, JIANG Hao. Test determination for the surface fractal dimension of bentonite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**: 369 - 373. (in Chinese))
- [19] MILLER D J, NELSON J D. Osmotic suction in unsaturated soil mechanics[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soil. Arizona, 2006: 1382 - 1393.
- [20] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 955 - 960. (SUN De-an, ZHANG Yi, SONG Guo-sen. Swelling characteristics of Gaomiaozi bentonite saturated by salt solution and their prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **34**(4): 955 - 960. (in Chinese))
- [21] ALEXANDER, MARIANA D, JAIME W, et al. The vapor pressure of water over saturated aqueous solutions of malic, tartaric, and citric acids, at temperatures from 288 K to 323 K[J]. J Chemical Thermodynamics, 1995, **27**(1): 35 - 41.
- [22] PITZER K S, GUILLERMO M. Thermodynamics of electrolytes: II activity and osmotic coefficients for strong electrolytes with one or both ions univalent[J]. Journal of Physical Chemistry, 1972, **77**(19): 2300 - 2308.
- [23] PITZER K S, GUILLERMO M. Thermodynamics of electrolytes: III activity and osmotic coefficients for 2-2 electrolytes[J]. Journal of Solution Chemistry, 1973, **3**(7): 539 - 546.
- [24] MOHAMMED T Z M, JABER J S. Measurement and correlation of osmotic coefficients and evaluation of vapor pressure for solutions of CaCl_2 and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ in ethanol at 298K[J]. Fluid Phase Equilibria, 2000, **172**: 221 - 235.
- [25] HAMER W J, WU Y C. Osmotic coefficient and mean activity coefficients of uni-univalent electrolytes in water at 25°C[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1972, **1**(4): 1047 - 1099.
- [26] CLARKE E C W, GLEW D N. Evaluation of thermodynamic function for aqueous sodium chloride from equilibrium and calorimetric measurements below 154°C[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1985, **14**(2): 489 - 610.
- [27] CHEN C C, EVANS L B A. A local composition model for the excess Gibbs energy of aqueous electrolyte systems[J]. AIChE J, 1986, **32**: 444 - 454.
- [28] CASTELLANOS E, GENS A, LLORET A, et al. Influence of water chemistry on the swelling capacity of a high-density bentonite[C]// Proceedings of Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Carefree, USA, 2006: 962 - 971.
- [29] ALAWAJI H A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids[J]. Applied Clay Science, 1999, **15**: 411 - 430.
- [30] MESRI G, OLSON R E. Consolidation characteristic of montmorillonite[J]. Géotechnique, 1971, **21**(4): 341 - 352.