

DOI: 10.11779/CJGE201905011

# 盐溶液中膨润土峰值剪切强度的计算方法

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:** 膨润土作为高放废物地质处置库的工程屏障材料, 在高放废物储存罐与围岩间起缓冲作用, 与地下围岩裂隙水接触, 膨润土的剪切强度产生变化, 危及核废物处置库缓冲层的安全。因此, 计算盐溶液中膨润土的剪切强度对保障核废物处置库缓冲层安全具有十分重要的意义。利用双电层理论, 从微观角度定性地解释了盐溶液浓度对膨润土峰值剪切强度影响的机理; 根据膨润土在盐溶液中的应力平衡, 提出考虑盐溶液的渗透吸力影响的修正有效应力概念, 反映盐溶液浓度对膨润土强度的影响; 基于膨润土表面的分形模型, 导出与渗透吸力对应的修正有效应力的表达式, 盐溶液的渗透吸力采用修正的 Debye-Hückel 公式计算; 根据 Mohr-Coulomb 准则, 膨润土在盐溶液中的峰值剪切强度 ( $\tau_f$ ) 由修正有效应力 ( $p^e$ ) 表示为统一线性关系:  $\tau_f = c' + p^e \tan \varphi'$ 。

**关键词:** 膨润土; 剪切强度; 盐溶液; 表面分形; 双电层

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)05-0885-07

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

## Calculation of peak shear strength of bentonite in salt solutions

LI Xiao-yue, XU Yong-fu

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Bentonite, as a barrier material for high-level waste disposal repositories, acts as a buffer material between waste storage tanks and surrounding rocks. The salt solutions in the cracks of the surrounding rock will affect the peak shear strength of the bentonite and interfere with the stability of the nuclear waste repository. Therefore, the determination of the peak shear strength of the bentonite in salt solutions is of great importance. The peak shear strength of the bentonite affected by salt solutions is analyzed from the perspective of electric diffuse double-layer theory. The concept of modified effective stress is proposed to express the peak shear strength of the bentonite incorporating with the osmotic suction of salt solutions. Based on the fractal model for bentonite surface, the expression for the modified effective stress is related to the osmotic suction based on the stress balance of bentonite in salt solutions. The osmotic suction is calculated by the modified Debye-Hückel equation. Considering the Mohr-Coulomb criterion, the peak shear strength ( $\tau_f$ ) of the bentonite is expressed by the modified effective stress ( $p^e$ ) in a uniform linear relationship as  $\tau_f = c' + p^e \tan \varphi'$ .

**Key words:** bentonite; shear strength; salt solution; fractal surface; diffuse double-layer

## 0 引言

膨润土具有吸水膨胀的特性, 可填充围岩裂隙, 阻止核素向外界迁移, 因此被选用作高放废料处置库的工程屏障材料<sup>[1]</sup>。膨润土垫层要有足够的剪切强度抵抗围岩地应力, 同时膨润土垫层的剪切强度受地下围岩裂隙水溶液的影响<sup>[2]</sup>。Di Maio<sup>[3]</sup>根据 Bisaccia 黏土在去离子水、NaCl 溶液、KCl 溶液、乙醇和乙二醇中的直剪和环剪试验结果, 发现孔隙流体成分对蒙脱石的峰值和残余剪切强度都有很大的影响。Man 等<sup>[4]</sup>指出, 孔隙溶液化学成分是影响膨润土的应力-应变关系的重要因素。Winterkorn 等<sup>[5]</sup>根据直剪试验和三轴试验结果发现, 黏土的峰值强度与孔隙溶液化学成

分和浓度有关; Zhang 等<sup>[6]</sup>利用直剪试验研究了 GMZ07 膨润土在不同浓度的 NaCl 溶液中的剪切强度特性, 发现 GMZ07 膨润土的峰值强度随 NaCl 溶液浓度增加而增加; Elkady 等<sup>[7]</sup>根据直剪试验结果发现, 浸泡在 4 M 海水中的膨润土的峰值剪切强度明显大于浸泡在 1 M 海水中。Anson 等<sup>[8]</sup>分析了膨润土在不同浓度盐溶液中剪切强度, 发现膨润土的峰值强度随孔隙溶液浓度增加而增加, 残余强度与孔隙溶液浓度之间不存在单调变化关系, 与土的自身性质相关。姚传

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41630633)

收稿日期: 2018-06-29

\*通讯作者: (E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn)

芹等<sup>[9]</sup>根据广西膨胀土在不同浓度盐溶液中的直剪试验结果发现, 随盐溶液浓度增加, 颗粒所受应力增大, 同时土结构从集聚状变为絮凝状, 这两种变化对土强度呈相反的影响趋势, 并共同作用决定土的强度。

Calvello 等<sup>[10]</sup>发现, 膨润土的残余内摩擦角会随盐溶液浓度增大而增大。Warkentin 等<sup>[11]</sup>在膨润土的直剪试验中发现,  $10^{-2}$  M NaCl 溶液中膨润土的残余强度比在 1 M NaCl 溶液中大。目前对膨润土在盐溶液中的剪切强度研究偏重于试验分析, 缺乏理论支持的定量计算。因此, 有必要从理论角度揭示盐溶液对膨润土剪切强度影响的机理, 提出盐溶液中膨润土剪切强度的计算方法。

本文从膨润土双电层的微观角度, 揭示膨润土峰值剪切强度受盐溶液影响的机理, 给出盐溶液渗透吸力的计算方法, 提出考虑渗透吸力影响的修正有效应力概念, 根据膨润土表面的分形模型, 导出修正有效应力的计算方法; 结合 Mohr-Columb 准则, 将膨润土在盐溶液中的峰值强度用修正有效应力表示为统一线性关系。最后, 对膨润土残余强度受盐溶液影响的机理进行了讨论。

## 1 盐溶液对峰值强度的影响机理

根据 Mohr-Columb 准则, 黏土的峰值强度随土体所受有效应力增加而增加。Sridharan 等<sup>[12]</sup>考虑到黏土颗粒间的排斥力和吸引力, 提出黏土颗粒所受有效应力为

$$p^e = \sigma' + \sigma'' \quad (1)$$

式中,  $p^e$  是控制剪切强度的有效应力,  $\sigma'$  是外部的有效应力,  $\sigma''$  为净吸引力, 等于颗粒间吸引力  $F$  与排斥力之差。黏土颗粒间吸引力  $F$  表示为

$$F = \frac{A}{6\pi h^3} \quad (2)$$

式中  $A$  是哈梅克常数, 水中取  $2.2 \times 10^{-20}$  J;  $h$  为两相邻黏土颗粒的间距。哈梅克常数  $A$  随溶液的介电常数减小而增加, 使膨润土所受吸引力增大, 净吸引力和有效应力增大。Sridharan 等<sup>[12]</sup>给出了不同介电常数(不同哈梅克常数)溶液中蒙脱石的净吸引力与峰值剪切强度关系的试验结果, 如图 1 所示。随净吸引力增加, 蒙脱石的峰值黏聚力增大, 摩擦角基本不变。

黏土颗粒间排斥力尚未有准确的计算方法, 可从微观角度, 利用晶层间的双电层理论进行定性分析<sup>[13]</sup>。膨润土颗粒表面带负电荷, 会吸引水分子和溶液中的离子在晶层表面定向排列并形成扩散层。扩散层叠加会产生双电层斥力, 晶层间电斥力  $F_r$  的计算公式为

$$F_r = 2cRT(\cosh u_m - 1) \quad (3)$$

式中  $c$  为孔隙水离子量浓度 (mol/L);  $R$  是广义气

体常数 (8.31 J/mol/K);  $T$  为绝对温度 (K);

$$u_m = \sinh^{-1} \left[ 2 \sinh u_{m,\infty} + \frac{4}{\kappa d} \sinh \left( \frac{u_{h,\infty}}{2} \right) \right], \quad (4)$$

其中,

$$u_{m,\infty} = 4 \tanh^{-1} \left[ \exp \left( \frac{-\kappa d}{2} \right) \tanh \left( \frac{z}{4} \right) \right], \quad (5)$$

$$u_{h,\infty} = 4 \tanh^{-1} \left[ \exp(-\kappa d) \tanh \left( \frac{z}{4} \right) \right], \quad (6)$$

$$z = 2 \sinh^{-1} \left( \frac{vF\sigma_0}{2\epsilon_0\epsilon_r\kappa RT} \right), \quad (7)$$

$$\kappa = \left( \frac{2cv^2F^2}{\epsilon_0\epsilon_r RT} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

其中,  $d$  为两相邻蒙脱石晶层平均间距的一半,  $\sigma_0$  是膨润土表面电荷密度 ( $C/m^2$ ),  $F$  为 Faraday 常数,  $v$  是交换阳离子平均化合价,  $\epsilon_0$  为真空介电常数, 取  $8.8642 \times 10^{-12}$  F/m,  $\epsilon_r$  为相对介电常数, 取 78.54。 $d$  取  $2.5 \times 10^{-9}$  m, 计算出 NaCl 溶液中晶层电斥力随浓度的变化关系, 如图 2 所示。盐溶液浓度越高, 双电层厚度越薄, 晶层间电斥力减小, 有效应力增大, 因此膨润土的峰值强度应随溶液浓度增加而增大。

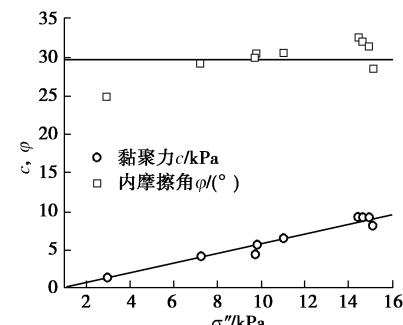


图 1 峰值剪切强度参数随净吸引力变化关系

Fig. 1 Relationship between peak shear strength parameters and net electric suction

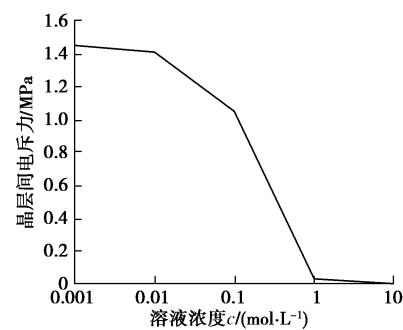


图 2 晶层间电斥力随溶液离子浓度变化

Fig. 2 Variation of electrical repulsion with concentration of solutions

扩散双电层理论要求晶层间距须达到一定距离, 晶层表面吸附的离子才能形成扩散电层<sup>[13]</sup>。当蒙脱石

干密度大于  $1.5 \text{ g/cm}^3$  时, 晶层平均间距将小于  $1.08 \text{ nm}^{[14]}$ 。因此, 双电层理论不适用于高压实度的膨润土。另外, 扩散双电层理论只适合从微观角度定性分析膨润土力学性能, 很难做到定量计算膨润土的峰值剪切强度。

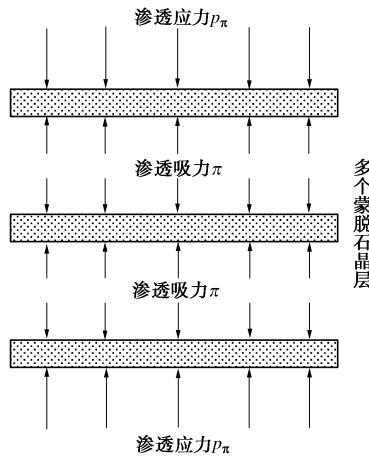


图 3 作用于膨润土晶粒上的渗透吸力与渗透应力

Fig. 3 Osmotic suctions and stresses borne by bentonite particles

## 2 考虑渗透吸力的修正有效应力

### 2.1 修正有效应力原理

膨润土的力学性质与其表面分形特性相关<sup>[15]</sup>。Xu 等<sup>[16]</sup>根据分形理论推导出, 膨润土的蒙脱石孔隙比  $V_w/V_m$  与所受竖向外荷载  $p$  存在如下关系:

$$\frac{V_w}{V_m} = Kp^{D_s-3} \quad (9)$$

式中  $V_w$  是膨润土中含水体积;  $V_m$  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和分布相关<sup>[17]</sup>;  $p$  为竖向外荷载;  $D_s$  为膨润土的表面分维, 可用氮吸附试验测得<sup>[18]</sup>。膨润土在盐溶液中的峰值强度会受盐溶液浓的影响。Rao 等<sup>[19]</sup>认为, 盐溶液产生的渗透吸力对黏土峰值剪切强度的影响类似于施加了竖向外荷载。因此, 将膨润土在盐溶液中所受的总竖向外荷载表示为

$$p^e = p + p_\pi \quad (10)$$

式中,  $p^e$  为修正有效应力,  $p_\pi$  为盐溶液渗透吸力产生的作用在黏土颗粒上的渗透应力。如图 3 所示, 根据膨润土颗粒的应力平衡, 盐溶液的渗透吸力  $\pi$  与作用在黏土颗粒上的渗透应力  $p_\pi$  满足

$$p_\pi = \pi \left( \frac{L}{l} \right)^{2-D_s} \quad (11)$$

式中,  $L$  为膨润土颗粒表面的测量尺度,  $l$  为膨润土凝胶胶粒表面的测量尺度。膨润土凝胶吸附水的体积与竖向外荷载之间满足

$$\frac{V_w^L}{V_m} = Kp^{D_s-3} \quad (12)$$

式中,  $V_w^L \propto L^{3-D_s}$ ,  $V_w^L$  为胶粒中吸附水的体积。施加的竖向荷载由渗透吸力平衡, 黏土颗粒内部存在

$$\frac{V_w^I}{V_m} = K\pi^{D_s-3} \quad (13)$$

式中,  $V_w^I \propto l^{3-D_s}$  为蒙脱石晶层周围吸附的水体积。将式 (12)、(13) 相比可得

$$\frac{V_w^L}{V_w^I} = \left( \frac{L}{l} \right)^{D_s-3} = \left( \frac{\pi}{p} \right)^{D_s-3} \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (11), 渗透吸力对膨润土颗粒产生的有效应力  $p_\pi$  与盐溶液渗透吸力  $\pi$  的关系为

$$p_\pi = \pi \left( \frac{p}{\pi} \right)^{2-D_s} \quad (15)$$

盐溶液的渗透吸力  $\pi$  根据范德华公式计算:

$$\pi = \zeta RTm\phi \quad (16)$$

式中,  $\zeta$  为溶质可分解的离子数 (如:  $\text{NaCl}=2$ ),  $R$  是广义气体常数 ( $8.31 \text{ J/mol/K}$ ),  $T$  为绝对温度,  $m$  为溶质的质量摩尔浓度 ( $\text{mol/kg}$ ),  $\phi$  为渗透吸力系数,

$$\phi = \frac{\rho_w}{\zeta m M_w} \ln \left( \frac{P_w}{P_0} \right) \quad (17)$$

其中,  $M_w$  是水的摩尔质量 ( $18.016 \text{ g/mol}$ ),  $\rho_w$  是水的密度,  $P_w$  和  $P_0$  分别是孔隙水溶液和纯水的饱和蒸气压。渗透吸力系数 ( $\phi$ ) 通常利用差压计测量盐溶液的蒸气压和纯溶剂的蒸气压的试验方法获得<sup>[20]</sup>。但由于盐溶液的饱和蒸汽压受溶质类型、浓度和温度等多种因素影响<sup>[21]</sup>, 用试验方法测量盐溶液的渗透吸力系数非常复杂, 不便于实际工程应用。也有学者基于溶液的剩余自由能理论给出渗透吸力系数的解析表达式, 导出含有多个经验参数的渗透吸力系数的偏微分公式<sup>[22-23]</sup>。求解偏微分方程的计算复杂, 难以应用。以下基于 Debye-Hückel 理论, 提出渗透吸力计算的简化方法。

### 2.2 渗透吸力的计算方法

Pitzer 等<sup>[24-25]</sup>基于 Debye-Hückel 理论, 给出一个能够简单、准确地计算渗透吸力系数  $\phi$  的公式。对于含有单价离子的电解质, 渗透吸力系数  $\phi$  表示为

$$\phi = |Z_M Z_X| f^\phi + m \left( \frac{2V_M V_X}{V} \right) B_{MX} + m^2 \frac{2(V_M V_X)^{3/2}}{V} C_{MX} + 1 \quad (18)$$

式中  $V_M$  和  $V_X$  是化学式中离子 M 和 X 的个数,  $V=V_M+V_X$ ;  $Z_M$  和  $Z_X$  是离子 M 和 X 的化学价;  $m$  是质量摩尔浓度;  $B_{MX} = \beta_{MX}^{(0)} + \beta_{MX}^{(1)} e^{-\alpha l^{1/2}}$ ,  $\alpha=2$ ,  $\beta_{MX}^{(0)}$ 、 $\beta_{MX}^{(1)}$  和  $C_{MX}$  均为与溶质种类相关的经验参数<sup>[25]</sup>,  $f^\phi$

的计算公式为

$$f^\phi = -A^\phi \frac{I^{1/2}}{1 + bI^{1/2}} \quad (19)$$

式中  $I$  为离子强度,  $I = \sum (m_i Z_i^2)/2$ ;  $b$  是经验参数, 等于 1.2;  $A$  为 Debye-Hückel 参数, 水在 298 K 时,  $A = 0.392^\circ$ 。对于 NaCl 溶液,  $\beta_{MX}^{(0)}$  取 0.0765,  $\beta_{MX}^{(0)}$  取 0.2664,  $C_{MX}$  取 0.00127, 由式 (18) 算得溶液在 298 K 的渗透吸力系数。将透吸力系数的计算结果与已有文献中的试验结果对比于表 1 中, 二者基本一致, 验证了修正 Debye-Hückel 公式的正确性。

孙德安等<sup>[28]</sup>采用滤纸法测量了 NaCl 溶液在 298 K 时的渗透吸力。利用计算得到的渗透吸力系数, 通过式 (16) 进一步得到 NaCl 溶液的渗透吸力。图 4 对比了 NaCl 溶液渗透吸力的计算结果与试验结果, 二者符合良好, 验证了盐溶液渗透吸力计算方法 (式 (16)、(18)、(19)) 的正确性。

表 1 氯化钠溶液渗透吸力系数

Table 1 Osmotic coefficients of sodium chloride solution

溶液浓度 /(mol·kg <sup>-1</sup> )	本文计算 结果	Colin 等 <sup>[26]</sup>	Hamerr 等 <sup>[27]</sup>
0.001	0.988	0.988	0.988
0.002	0.984	0.984	0.984
0.01	0.968	0.968	0.968
0.02	0.958	0.958	0.959
0.05	0.943	0.944	0.944
0.1	0.932	0.933	0.933
0.2	0.923	0.924	0.924
0.3	0.920	0.921	0.921
0.4	0.920	0.921	0.920
0.5	0.921	0.922	0.921
0.6	0.923	0.924	0.923
0.7	0.926	0.927	0.926
0.8	0.929	0.930	0.929
0.9	0.932	0.934	0.932
1	0.936	0.937	0.936
2	0.984	0.987	0.984
3	1.045	1.048	1.045
4	1.115	1.118	1.116
5	1.191	1.192	1.191
6	1.273	1.269	1.270

对于 2-2 型电解质 (如 CaSO<sub>4</sub>) 的溶液,  $B_{MX}$  需增加一项, 表示为<sup>[25]</sup>

$$B_{MX} = \beta_{MX}^{(0)} + \beta_{MX}^{(1)} e^{-\alpha_1 I^{1/2}} + \beta_{MX}^{(2)} e^{-\alpha_2 I^{1/2}} \quad (20)$$

式中,  $\beta_{MX}^{(2)}$  是与溶质类型相关的经验参数,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为经验参数, 分别取 1.4 和 12。Rockland<sup>[29]</sup>利用蒸汽平衡法, 通过测得饱和盐溶液相对湿度, 得到饱和盐溶液

的渗透吸力。如图 5 将蒸汽平衡法得到的吸力值与计算值对比, 计算结果与测试结果一致, 验证了盐溶液渗透吸力计算方法的正确性。如表 2 列出了 4 种不同种类的溶质在 298 K 水溶液中的渗透吸力, 不同溶质的溶解度不同, 所能计算得到渗透吸力的浓度范围不同。

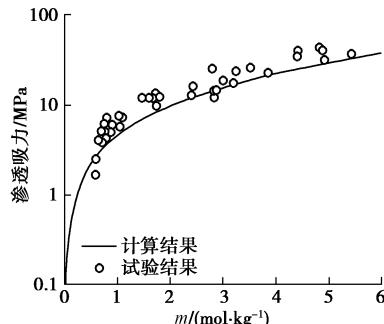


图 4 NaCl 渗透吸力与溶质浓度的关系

Fig. 4 Relationship between osmotic suctions and concentrations of NaCl and CaCl<sub>2</sub>

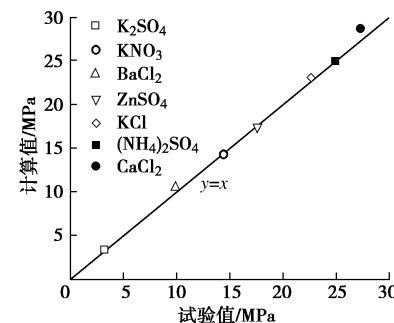


图 5 饱和溶液渗透吸力的计算与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between calculated osmotic suctions of saturated solutions and test results

表 2 不同溶质的渗透吸力

Table 2 Osmotic suctions of different solutes (kPa)

$c/(mol \cdot kg^{-1})$	MgSO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
0.01	36.71	67.41516	66.77073	38.15521
0.1	294.62	635.4709	589.8685	—
0.2	554.72	1279.774	1123.057	—
0.4	1054.95	2656.663	2121.458	—
0.6	1549.69	4181.872	3081.8	—
0.8	2061.18	5883.231	4048.301	—
1	2611.04	7780.672	5055.62	—
2.5	9593.91	29184.23	16435.12	—
3	13575.79	—	22670.31	—
4	—	—	40535.41	—
5.5	—	—	—	—
6	—	—	—	—

### 3 峰值剪切强度的理论

根据 Mohr-Coulomb 准则, 膨润土在盐溶液中的峰

值剪切强度用修正有效应力 $p^e$ 表示为

$$\tau_f = c' + p^e \tan \varphi' \quad (21)$$

式中,  $c'$  为黏聚力,  $\varphi'$  为内摩擦角。下面采用 GMZ07 膨润土和 Al-Qatif 膨润土的峰值剪切强度试验结果, 验证修正有效应力 (式 (10)) 的正确性。

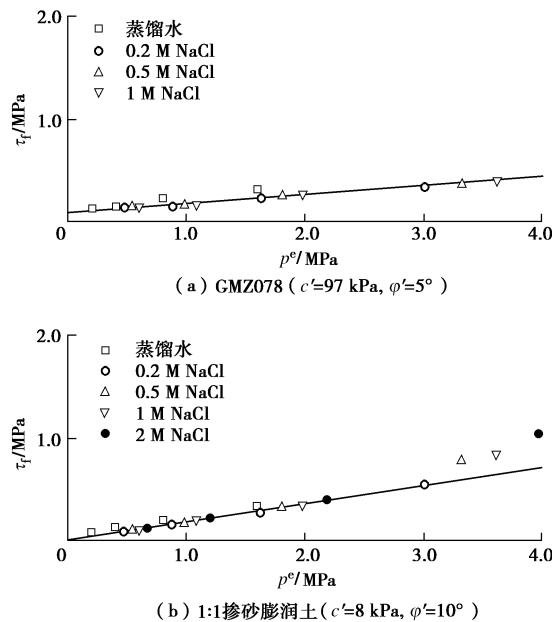


图 6 膨润土峰值强度与修正有效应力的关系

Fig. 6 Relationship between peak shear strength and modified effective stress

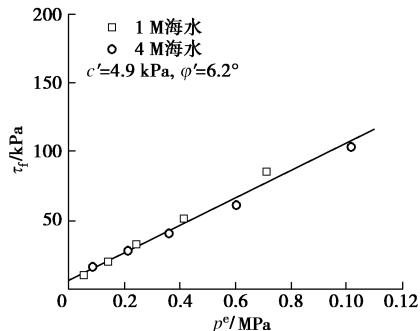


图 7 海水中的膨润土峰值强度与修正有效应力的关系

Fig. 7 Relationship between peak shear strength and modified effective stress

### 3.1 GMZ07 膨润土

Zhang 等<sup>[6]</sup>通过直剪试验, 得到浸泡在不同浓度的 NaCl 溶液中的饱和 GMZ07 膨润土和 1:1 掺砂膨润土的峰值剪切强度。根据氮等温吸附试验, GMZ07 膨润土的表面分维  $D_s$  测定为 2.78<sup>[16]</sup>。联立式 (10)、

(15) 求得 GMZ07 膨润土及掺砂膨润土在不同浓度溶液中的修正有效应力, 进而得到 GMZ07 膨润土及掺砂膨润土在不同溶液中的峰值剪切强度与修正有效应力的关系如图 6 所示。GMZ07 膨润土在不同浓度盐溶液下的峰值剪切强度与修正有效应力符合

Mohr-Coulomb 准则, 内摩擦角为 5°, 黏聚力  $c'$  为 97 kPa。由于砂土摩擦角比黏土大, 1:1 掺砂膨润土在修正有效应力较大时, 峰值剪切强度偏离 Mohr-Coulomb 准则。

### 3.2 Al-Qatif 膨润土

Tamer 等<sup>[7]</sup>通过直剪试验研究了 7~200 kPa 范围的竖向荷载下, 膨润土浸泡在 4 M 和 1 M 海水中的峰值剪切强度。试验中的剪切应变速率控制为 0.003 mm/min, 试样破坏或最大剪切应变达到 15% 时停止。峰值剪切强度与修正有效应力的关系如图 7 所示, 膨润土在不同浓度盐溶液下的峰值剪切强度与修正有效应力符合 Mohr-Coulomb 准则, 内摩擦角为 6.2°, 黏聚力  $c'$  为 4.9 kPa。利用修正有效应力的概念, 不同浓度溶液下膨润土的峰值剪切强度可以统一用 Mohr-Coulomb 准则表示。

## 4 讨 论

膨润土的剪切强度可分为峰值强度和残余强度<sup>[30]</sup>。膨润土的残余强度是土的固有特性, 不受土结构 (构造和黏结方式) 影响<sup>[31]</sup>。Skempton<sup>[32]</sup>认为土发生大应变后, 黏土颗粒重新排列至与剪切方向一致, 剪切强度逐渐从峰值强度降至残余强度。Warkentin 等<sup>[11]</sup>认为, 颗粒间的电斥力会阻碍颗粒重新排列和剪切破坏面的形成, 引起残余强度增加。如图 8 所示, 颗粒间排斥力阻碍残余剪切破坏, 排斥力减小更有利破坏面形成。根据双电层理论, 增加盐溶液浓度或离子电价会使颗粒间排斥力减小, 减小残余强度。

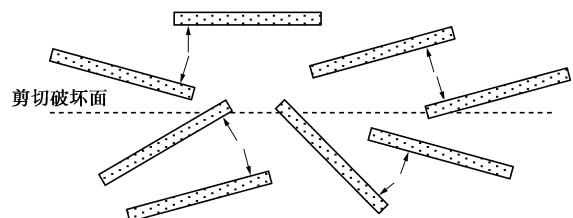


图 8 颗粒间斥力阻碍剪切破坏面形成的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of clay particles with inter-particle repulsion resisting development of failure plane

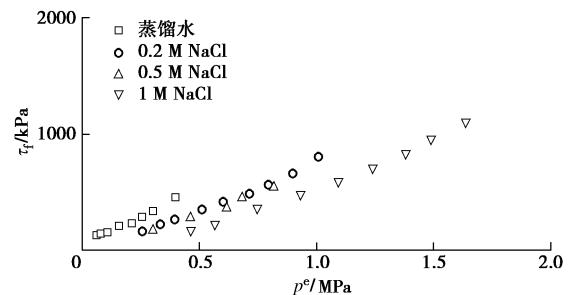


图 9 膨润土残余强度与修正有效应力的关系

Fig. 9 Relationship between residual shear strength and modified effective stress

Zhang 等<sup>[6]</sup>通过直剪试验, 得到的不同浓度的 NaCl 溶液下 GMZ07 膨润土的残余剪切强度, 如图 9 所示。残余剪切强度随修正有效应力增加而增大, 但无法用统一的线性关系表示。Anson 等<sup>[8]</sup>通过研究膨润土残余剪切强度在不同浓度的 CaCl<sub>2</sub> 溶液中的变化, 发现膨润土的残余剪切强度与修正有效应力间无法用统一的线性关系表示, 如图 10 所示。盐溶液浓度增加了土的修正有效应力, 引起剪切强度增加, 但盐溶液浓度增加会使颗粒间的电斥力减小, 有利于破坏面的形成。因此, 在两种因素的共同影响下, 膨润土在盐溶液中的残余强度无法用修正有效应力准确表示。

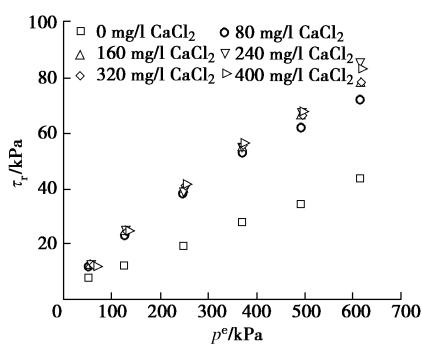


图 10 膨润土残余强度与有效应力的关系

Fig. 10 Relationship between residual shear strength and modified effective stress

## 5 结 论

本文从微观角度定性地解释了盐溶液对膨润土峰值剪切强度的影响机理, 基于分形理论导出盐溶液的渗透吸力产生的有效应力, 主要得到以下结论:

(1) 随盐溶液浓度的增加, 根据双电层理论, 土粒晶层间电斥力减小, 有效应力增加, 膨润土的峰值剪切强度增加。

(2) 利用修正 Debye-Hückel 公式给出盐溶液渗透吸力的计算公式, 基于膨润土表面的分形模型, 导出由盐溶液渗透吸力产生的修正有效应力公式。

(3) 基于修正有效应力的概念, 盐溶液对膨润土的峰值剪切强度的影响可定量地用修正有效应力表示。膨润土在盐溶液中的峰值剪切强度与修正有效应力间的关系符合剪切强度的 Mohr-Coulomb 准则。

(4) 盐溶液对膨润土残余剪切强度的影响, 表现出非单调、非线性变化。残余强度与峰值强度不同, 与颗粒定向排列有关。随盐溶液浓度增加, 一方面, 有效应力增加, 提高残余剪切强度; 另一方面, 排斥力减小有利于颗粒定向排列, 降低残余剪切强度。残余强度与修正有效应力的关系取决于以上两种作用, 导致残余强度与修正有效应力之间难以用统一的线性

关系表示。

## 参 考 文 献:

- [1] 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 Zhen-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [2] WANG J, SU R, CHEN W M, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 649 - 658.
- [3] DI MAIO C. Shear strength of clays and clayey soils: the influence of pore fluid composition[C]// CISM Courses and Lectures. Vienna, 2004, 462: 45 - 55.
- [4] MAN A, GRAHAM J, VAN GULCK J. Effect of pore fluid chemistry on strain-softening behaviour of reconstituted plastic clay[C]// Proc 5th Int Conf Geoenvir Eng. Cardiff, 2006, 1: 569 - 576.
- [5] WINTERKORN H F, MOORMAN R B. A study of changes in physical properties of Putnam soil induced by ionic substitution[J]. Highway Research Board Proceedings, 1941, 21: 415 - 434.
- [6] ZHANG L, SUN D A, JIA D. Shear strength of GMZ07 bentonite and its mixture with sand saturated with saline solution[J]. Applied Clay Science, 2016: 24 - 32, 132-133.
- [7] ELKADY T Y, AL-MAHBASHI A M. Effect of solute concentration on the volume change and shear strength of compacted natural expansive clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76: 483.
- [8] ANSON R W W, HAWKINS A B. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite[J]. Géotechnique, 1998, 48(6): 787 - 800.
- [9] 姚传芹, 韦昌富, 马田田, 等. 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 116 - 122. (YAO Chuan-qin, WEI Chang-fu, MA Tian-tian, et al. Effects of pore solution on mechanical properties of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 116 - 122. (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]. Italian Geotechnical Journal, 2005, 1: 33 - 46.
- [11] WARKENTIN B P, YONG R N. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces[J].

- Clay and Clay Minerals, 1962; 210 – 218.
- [12] SRIDHARAN A, RAO G V. Shear strength behavior of saturated clay and the role of the effective stress concept[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(2): 177 – 193.
- [13] LIU L, MORENO L, NERETNIEKS I. A dynamic force balance model for colloid expansion and its DLVO-Based application[J]. *Langmuir*, 2009, **25**: 679 – 687.
- [14] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (JIA Jing-chao. Study on the swelling mechanism and mesomechanical swelling model of expansive soil[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [15] DEBRUYN C, COLLINS L F, WILLIAMS A. The specific surface, water affinity and expansive potential of clays[J]. *Clay Miner.*, 1957, **3**: 120 – 128.
- [16] 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.
- [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[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 20015, **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] RAO S M, THYAGARAJ T. Swell-compression behavior of compacted clays under chemical gradients[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**: 520 – 532.
- [20] 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]. *Journal Chemical Thermodynamics*, 1995, **27**(1): 35 – 41.
- [21] WIJMANS J G, BAKER R W. The solution-diffusion model: a review[J]. *Journal of Membrane Science*, 1995, **107**(1/2): 1 – 21.
- [22] FERNÁNDEZ D P, GOODWIN A R H, LEMMON E W, et al. A formulation for the static permittivity of water and steam at temperature from 238 K to 873 K at pressures up to 1200 MPa, including derivatives and Debye-Hückel coefficients[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1997, **26**(4): 1125 – 1166.
- [23] SCATCHARD G. The excess free energy and related properties of solutions containing electrolytes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1968, **90**(12): 3124 – 3127.
- [24] PITZER S K, 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*, 1972, **77**(19): 2300 – 2308.
- [25] PITZER S K, MAYORGA G. Thermodynamics of electrolytes: III activity and osmotic coefficients for 2-2 electrolytes[J]. *Journal of Solution Chemistry*, 1973, **3**(7): 539 – 546.
- [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] 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.
- [28] 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 Jin-yi, SONG Guo-seng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(4): 955 – 960. (in Chinese))
- [29] ROCKLAND L B. Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5° and 40°C[J]. *Analytical Chemistry*, 1960, **32**(10): 1375 – 1376.
- [30] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2005.
- [31] BURLAND J B, FENG. On the compressibility and shear strength of natural clay[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 329 – 378.
- [32] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides folded strata and the laboratory[J]. *Géotechnique*, 1985, **35**(1): 3 – 18.