

DOI: 10.11779/CJGE201904005

考虑渗透吸力影响膨润土的修正有效应力及其验证

徐永福

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030; 2. 皖江工学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 普遍认为膨润土是高放废物地质处置库缓冲/回填层的理想材料, 膨润土在地下水溶液中的膨胀变形和剪切强度关乎高放废物地质处置库的安危。地下水溶液中膨润土膨胀变形和剪切强度受到渗透吸力影响, 根据膨润土表面分形模型, 建立考虑渗透吸力影响的修正有效应力公式, 用竖向应力 p 和渗透吸力 π 表示为 $p^e = p + (p/\pi)^{D_s-2}\pi$, 并采用膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀变形和剪切强度进行验证。NaCl 溶液中膨润土的膨胀变形与修正有效应力 p^e 表示为同一曲线 $e_m = K(p^e)^{D_s-3}$, 峰值剪切强度与修正有效应力 p^e 表示为同一直线 $\tau_f = c' + p^e \tan \phi'$, 符合 Mohr–Coulomb 准则。

关键词: 渗透吸力; 膨润土; 膨胀变形; 峰值剪切强度; 表面分维; 修正有效应力

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)04-0631-08

作者简介: 徐永福(1967-), 男, 江苏泰兴人, 博士, 教授, 从事分形介质力学、非饱和(特殊)土力学和地基处理的研究。E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn。

Modified effective stress induced by osmotic suction and its validation in volume change and shear strength of bentonite in saline solutions

XU Yong-fu

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Wanjiang Institute of Technology, Maanshan 243000, China)

Abstract: Bentonite is widely seen as a potential buffer/backfill materials for deeply buried geological disposal system to isolate high-level radioactive waste (HLRW). The swelling deformation and shear strength of the bentonite in saline solutions are very important to the safety of the HLRW depository. A conceptual model is proposed to explain the influences of osmotic suction on the volume change and shear strength of the bentonite in a quantitative way. A new formula for the effective stress is proposed as $p^e = p + p_\pi$ incorporating with vertical stress (p) and osmotic suction (π), and $p_\pi = (p/\pi)^{D_s-2}\pi$. The e_m-p^e relationship is expressed using a unique curve in the form of $e_m = K(p^e)^{D_s-3}$ for the bentonite in NaCl solutions. The peak shear strength is expressed using a unique curve according to the Mohr–Coulomb criterion for the bentonite in NaCl solutions.

Key words: osmotic suction; bentonite; swelling deformation; peak shear strength; surface fractal dimension; modified effective stress

0 引言

膨润土因其强膨胀性、强吸附性、低渗透性等性能, 被视为高放废物地质处置库缓冲/回填层的理想材料^[1-7]。有关膨胀变形的研究成果很多, Xu 等^[1]根据膨润土表面的分形模型, 建立了膨润土在纯水中膨胀变形的计算方法。秦冰等^[2]研究了干密度、竖向压力、浸泡液体、吸湿方式对高庙子钠基膨润土膨胀变形的影响, 探讨浸泡液体变化引起的渗析变形和加卸载循环变形规律。叶为民等^[3]采用双电层理论估算了高庙子膨润土水化过程中的自由膨胀量。孙德安等^[4]利用单向固结仪研究高庙子钠基膨润土的膨胀变形特性。张虎元等^[5]采用 WG 型单杠杆固结仪研究了干密度、饱和度和掺砂率对膨润土的膨胀压力与膨胀率的影

响。谭罗荣等^[8]研究了击实膨胀土的膨胀压力与 50 kPa 竖向应力下的膨胀率随干密度、饱和度的变化规律。姜昊等^[9]模拟了膨润土化学组分在不同溶液环境中随时间的变化规律, 揭示了由 Na 基膨润土转变为 Ca 基膨润土是膨胀性衰减机理。孙文静等^[10]根据膨胀试验结果, 验证了浸水膨胀后蒙脱石孔隙比 e_m 与竖向应力 p 在双对数坐标内呈唯一线性关系。项国圣等^[11]基于双电层扩散 (DDL) 理论和表面分形模型, 提出膨润土膨胀变形的计算方法。

膨润土在盐溶液中的膨胀试验结果表明^[11-15]: 膨

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41630633, 41877211); 安徽省自然科学基金面上项目 (1808085MD106)

收稿日期: 2017-11-21

润土在盐溶液中的膨胀变形随溶液浓度增加而减小，不同盐溶液中膨胀后的膨润土的 e_m 与竖向应力 $\lg p$ 不是同一曲线。盐溶液浓度越大，渗透吸力越大，渗透吸力增加了上覆压力，导致膨胀变形减小^[16]。Xu 等^[17]提出了渗透吸力的有效应力公式，膨润土在不同类型盐溶液和不同浓度溶液中膨胀后的 $\lg e_m$ 与渗透吸力的有效应力 $\lg p^e$ 是同一直线。

膨润土在盐溶液中剪切强度分为峰值强度和残余强度^[18]，Di Maio^[19-20] 和 Calvello 等^[21]详细研究膨润土在盐溶液中的残余强度特性，盐溶液浓度越大，内摩擦角增大。Winterkorn 等^[22]根据黏土的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。Bulut 等^[23]、Man 等^[24]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。Tiwari 等^[25]发现膨润土的峰值强度与应力状态和土体结构有关。Zhang 等^[26]根据直剪试验研究了 GMZ07 膨润土在 NaCl 溶液中的剪切强度特性，GMZ07 膨润土的内摩擦角随 NaCl 溶液浓度增加而增加。膨润土的剪切强度受孔隙水溶液的成分和浓度的影响明显^[19-21, 26]。由于孔隙溶液浓度难以控制，采用直剪试验和三轴试验研究孔隙溶液的渗透吸力对膨润土剪切强度影响的难度大、试验时间长，既费力又耗时。因此，考虑渗透吸力的影响，基于 Mohr-Coulomb 准则计算膨润土在盐溶液中的内摩擦角和黏聚力是切实可行的方法。本文基于膨润土表面的分形模型和膨润土吸水体积与竖向应力的关系，建立考虑渗透吸力影响的修正有效应力公式，采用膨润土在 NaCl 溶液中的膨胀变形和剪切强度的试验数据验证修正有效应力公式。

1 考虑渗透吸力的修正有效应力

膨润土表面具有自相似嵌套结构，常用分形模型表示^[27]。根据膨润土表面的分形模型，膨润土吸水体积与蒙脱石体积之比表示为^[1]

$$e_m = \frac{V_w}{V_m} = Kp^{D_s-3} , \quad (1)$$

式中， V_w 为膨润土吸水体积， V_m 为蒙脱石体积， K 为常数， p 为竖向应力， D_s 为膨润土的表面分维。

渗透吸力产生机理如图 1 (a) 所示。渗透吸力是由孔隙溶液浓度差异引起的渗透压力差，渗透吸力的计算公式表示为^[28-29]

$$\pi = vRTm\phi , \quad (2)$$

式中， π 为渗透吸力， v 为盐离子的化合价， R 为气体通用常数， T 为绝对温度， m 为盐离子的物质的量浓度， ϕ 为渗透吸力系数，根据相对湿度计算^[30]：

$$\phi = \frac{\rho_w}{v_{w0} M_w} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) , \quad (3)$$

式中 ρ_w 为水的密度， v_{w0} 为水的比容， M_w 为水蒸气的分子质量 (18.016 kg/kmol)， P 为水蒸气压， P_0 为纯水平衡蒸气压。

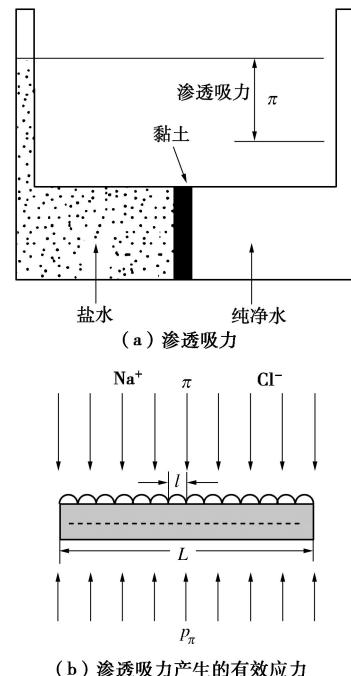


图 1 渗透吸力产生的有效应力示意图

Fig. 1 Schematic of modified effective stress of bentonite in saline solution

渗透吸力是盐溶液中膨润土有效应力的组成部分^[17]。假设膨润土颗粒在盐溶液中呈平行平列，膨润土在盐溶液中的有效应力由渗透吸力承担^[31]，如图 1 (b) 所示。渗透吸力作用在膨润土颗粒表面的微观尺度上，渗透吸力产生的有效应力作用膨润土团粒表面的宏观尺度上。设膨润土颗粒表面的微观尺寸为 l ，膨润土团粒表面的宏观尺寸为 L ，根据膨润土颗粒和团粒表面的应力平衡，建立渗透吸力与由渗透吸力产生的有效应力的关系：

$$p_\pi L^2 = \pi \left(\frac{L}{l} \right)^{D_s} l^2 , \quad (4)$$

式中， p_π 为由渗透吸力产生的有效应力。

膨润土在盐溶液中的膨胀变形试验的示意图如图 2 所示。在竖向应力 p 作用下，膨润土团粒的吸水体积与式 (1) 相同，表示为

$$\frac{V_w^L}{V_m} = Kp^{D_s-3} , \quad (5)$$

式中， V_w^L 为膨润土团粒的吸水体积， $V_w^L = f^L LS$ ， f^L 为团粒的形状系数， S 为膨润土团粒孔隙表面积。类似地，在渗透吸力作用下，膨润土颗粒的吸水体积表

示为

$$\frac{V_w^1}{V_m} = K\pi^{D_s-3}, \quad (6)$$

式中, V_w^1 为膨润土颗粒的吸水体积, $V_w^1 = f^1 ls$, f^1 为颗粒的形状系数, s 为膨润土颗粒孔隙表面积。由于膨润土团粒是一个分形体, 膨润土团粒与颗粒具有自相似结构, 因此, $f^1 = f^L$ 。由式(4)~(6) 得到渗透吸力应力的表达式:

$$p_\pi = \pi \left(\frac{p}{\pi} \right)^{D_s-2}. \quad (7)$$

对于多组分盐溶液, 综合考虑各组分的渗透吸力和竖向应力(p)共同作用, 修正有效应力公式表示为

$$p^e = p + \sum_i \pi_i \left(\frac{p}{\pi_i} \right)^{D_s-2}, \quad (8)$$

式中, p 为竖向应力, π_i 为盐溶液中组分 i 的渗透吸力。

2 盐溶液中的膨胀变形

2.1 GMZ07 膨润土的膨胀变形

膨润土表面分维采用 N_2 等温吸附法测量, Avnir 等^[32]提出 N_2 吸附体积与表面分维的关系为

$$V_{ads} = k \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right]^{D_s-3}. \quad (9)$$

GMZ07 膨润土的 N_2 等温吸附曲线如图 3 所示, 根据图 3 和式(9)得到 GMZ07 膨润土的表面分维为 2.78。

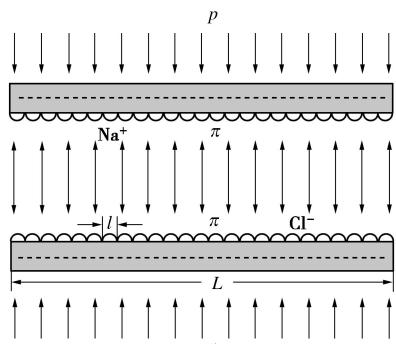


图 2 膨胀变形示意图

Fig. 2 Schematic of swelling deformation

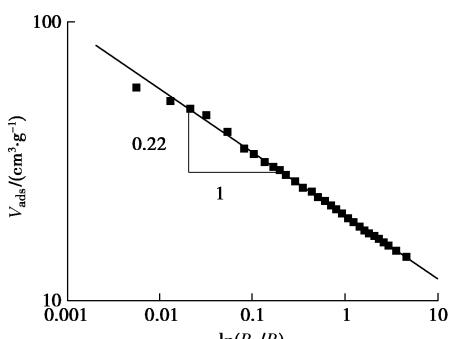


图 3 GMZ07 膨润土的 N_2 吸附曲线

Fig. 3 N_2 adsorption curve of GMZ07 bentonite

Sun 等^[33]给出了 GMZ07 膨润土的在去离子水中的膨胀变形结果, 如图 4 所示。根据 GMZ07 膨润土的表面分维, 由式(1)预测 GMZ07 膨润土的 $e_m - p$ 关系。GMZ07 膨润土的表面分维为 2.78, $\lg e_m - \lg p$ 直线的斜率为 -0.22。GMZ07 膨润土的 $e_m - p$ 关系的预测结果与试验数据比较与图 4 中, 试验数据与预测结果完全符合。

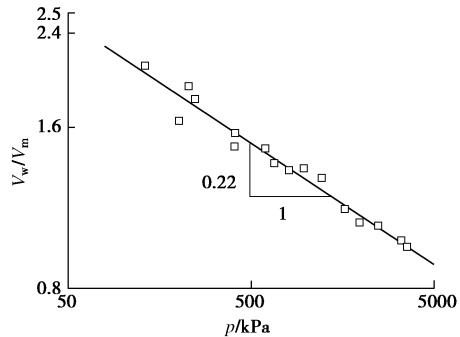


图 4 GMZ07 膨润土的 $e_m - p$ 曲线

Fig. 4 $e_m - p$ curve of GMZ07 bentonite

Ye 等^[15]给出了 GMZ01 膨润土在不同浓度 NaCl 溶液中膨胀后的 $e - p$ 关系, 孔隙比 e 与 e_m 的关系为 $e = C_m e_m$, C_m 是膨润土中蒙脱石的含量。因此, $\lg e_m - \lg p^e$ 直线的斜率与 $\lg e - \lg p^e$ 直线的斜率相同。渗透吸力按 NaCl 溶液浓度由式(1)计算, 修正有效应力采用式(8)计算。GMZ01 膨润土的表面分维采用 2.78, $\lg e - \lg p^e$ 直线的斜率为 -0.22, $e - p^e$ 关系的预测结果与试验结果比较于图 5 中, 两者基本一致。图 4 验证了式(1)的正确性, 图 5 同时验证了式(1)、(8)的正确性。图 3~5 中的结果表明: 由膨润土表面分维计算修正有效应力和膨胀变形是可行的。

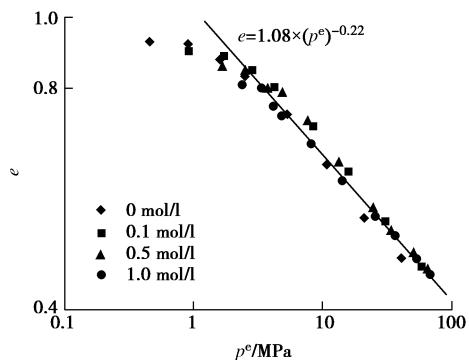


图 5 GMZ07 膨润土在 NaCl 溶液膨胀后的 $e - p^e$ 曲线

Fig. 5 $e - p^e$ curve of GMZ07 bentonite in NaCl solution

2.2 其他膨润土的膨胀变形

为了验证由渗透吸力产生的有效应力的可靠性, 选取不同膨润土的膨胀试验数据进行分析, 首先根据纯水中的 $e - p$ 关系反算膨润土表面分维, 再根据膨润土的表面分维和渗透吸力计算膨润土的修正有效应力 p^e , 预测膨润土的 $e_m - p^e$ 或 $e - p^e$ 关系。

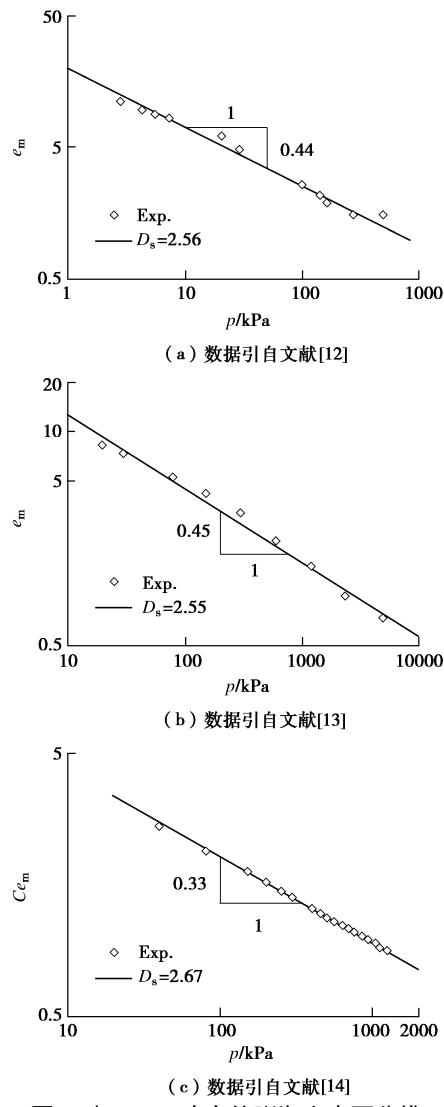
图 6 由 $e_m - p$ 确定的膨润土表面分维

Fig. 6 Surface fractal dimension determined from the e_m-p curve of GMZ07 bentonite

Studds 等^[12]完成了 Wyoming 膨润土在纯水和 NaCl 溶液中的膨胀变形试验, 根据膨润土纯水中膨胀变形后的 $e_m - p$ 关系, 如图 6(a) 所示, 由式(1)反算 Wyoming 膨润土的表面分维, 为 2.56。Di Maio 等^[13]和 Calvello 等^[14]分别完成了 Ponza 黏土和 Bisaccia 黏土的膨胀变形试验, 纯水中 Ponza 黏土和 Bisaccia 黏土膨胀后的 $e_m - p$ 关系分别表示在图 6(b)、6(c) 中, 根据 $\lg e_m - \lg p$ 的直线斜率, 计算 Ponza 黏土和 Bisaccia 黏土的表面分维, 分别为 2.55 和 2.67。

根据黏土的表面分维计算 NaCl 溶液中的修正有效应力, 预测黏土在 NaCl 溶液中的 $e_m - p^e$ 关系。Wyoming 膨润土在 NaCl 溶液中的 $e_m - p^e$ 关系如图 7(a) 所示, Wyoming 膨润土的 $e_m - p^e$ 试验数据位于同一直线上, 与预测结果一致。Ponza 黏土和 Bisaccia 黏土在 NaCl 溶液中的 $e_m - p^e$ 关系如图 7(b)、7(c) 所示, Ponza 黏土和 Bisaccia 黏土在 NaCl 溶液中的 $e_m - p^e$ 试验数据位于同一直线上, 与预测结果一致。不

同膨润土在 NaCl 溶液中 $e_m - p^e$ 预测结果与试验结果都很一致, 验证了修正有效应力表示膨胀变形的正确性和可行性。

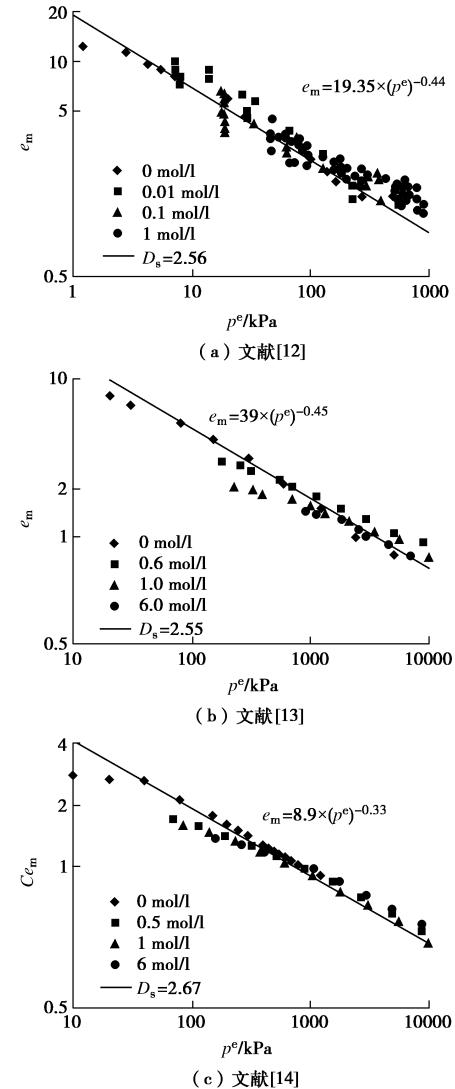
图 7 由 $e_m - p^e$ 确定的膨润土表面分维

Fig. 7 Surface fractal dimension determined from the e_m-p^e curve of bentonites

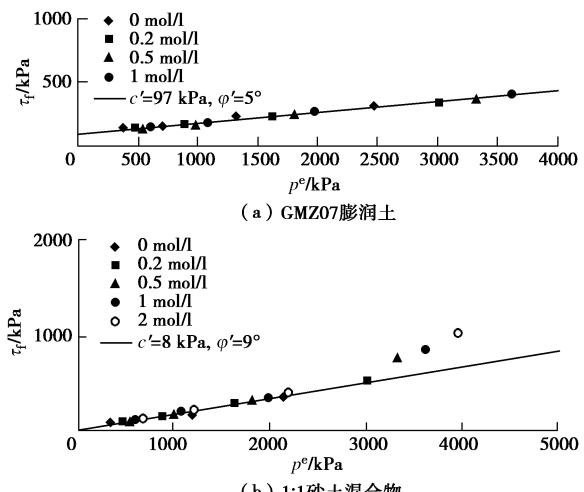


图 8 GMZ07 膨润土的剪切强度包络线

Fig. 8 Shear strength envelope of GMZ07 bentonite

3 盐溶液中的剪切强度

3.1 峰值剪切强度

根据 Mohr–Coulomb 准则, 土的剪切强度表示为

$$\tau_f = c' + p^e \tan \varphi' \quad , \quad (10)$$

式中, c' 和 φ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角。

Zhang 等^[26]在 HUS-25 直剪仪上完成了 GMZ07 膨润土的剪切强度试验。GMZ07 膨润土剪切强度的 Mohr–Coulomb 包络线如图 8 所示。图中渗透吸力采用式(2)计算, 修正有效应力根据式(8)计算, GMZ07 膨润土的表面分维为 2.78。不同 NaCl 溶液浓度中的膨润土的剪切强度位于相同的 $\tau_f - p^e$ 包络线上, GMZ07 膨润土的有效黏聚力和摩擦角分别为 97 kPa 和 5°, 与蒙脱石的摩擦角的变化范围 4° ~ 20° 一致^[18]。

Cokca 等^[34]给出了 Ankara 黏土由总吸力表示的土–水特征曲线(图 9)。总吸力的计算公式为^[18]

$$\psi = \frac{RT}{M_w V_{w0}} \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right] \quad . \quad (11)$$

总吸力的计算公式(11)与膨润土的膨胀力计算公式一致^[37]。重力含水率与吸水体积的关系为

$$w = \frac{C_m \rho_w V_w}{\rho_m V_m} \quad , \quad (12)$$

式中, ρ_w 和 ρ_m 分别是水和蒙脱石的密度。因此, $\lg w - \lg \psi$ 与 $\lg e_m - \lg p$ 和 $\lg e_m - \lg p_s$ 具有相同的斜率^[37], $\lg e_m - \lg p_s$ 的斜率, 均为 $D_s - 3$ 。根据图 9 中 $\lg w - \lg \psi$ 的斜率计算 Ankara 黏土的表面分维为 2.67。

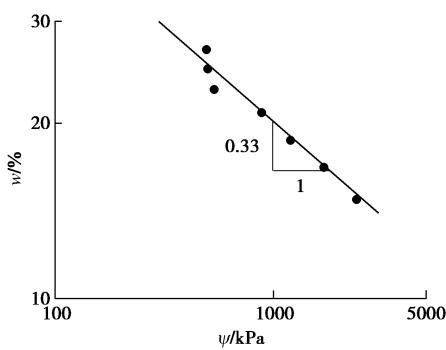


图 9 Ankara 黏土总吸力表示的土–水特征曲线

Fig. 9 Soil-water characteristic curve expressed by total suction of Ankara clay

根据 Ankara 黏土的表面分维计算修正有效应力, 剪切强度与修正有效应力的关系如图 10 所示。Ankara 黏土在不同总吸力和正应力下的剪切强度与修正有效应力呈同一直线, 与 Mohr–Coulomb 准则一致。根据剪切强度与修正有效应力的关系, Ankara 黏土的有效凝聚力和有效内摩擦角分别为 35 kPa 和 16.5°。

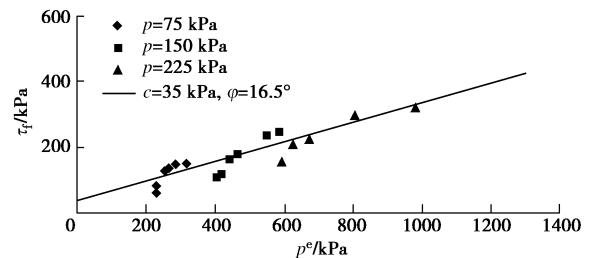


图 10 Ankara 黏土的剪切强度包络线

Fig. 10 Shear strength envelope of Ankara clay

Blatz 等^[35]给出了膨润土的由总吸力表示的土–水特征曲线, 如图 11 所示。根据 $\lg w - \lg \psi$ 的斜率, 膨润土的表面分维为 2.67。根据膨润土的表面分维计算修正有效应力 (p^e), $q - p^e$ 曲线如图 12 所示, 不同总吸力下的 $q - p^e$ 表示为同一直线:

$$q = a + Mp^e \quad , \quad (13)$$

式中, $M = 0.5$, $a = 0.2$ MPa。

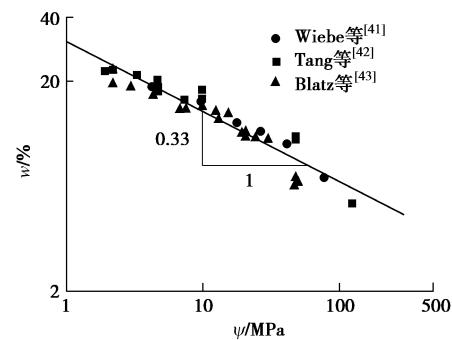


图 11 膨润土总吸力表示的土–水特征曲线

Fig. 11 Soil-water characteristic curve expressed by total suction of bentonite

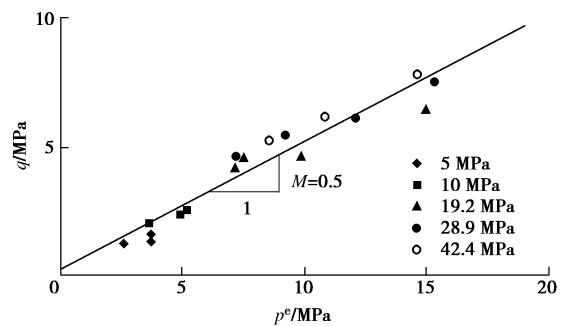


图 12 膨润土的 $q - p^e$ 曲线

Fig. 12 $q - p^e$ curve of bentonite

根据膨润土的表面分维计算由渗透吸力产生的修正有效应力, 不同渗透吸力(不同浓度和离子类型的盐溶液)的峰值剪切强度可以表示为修正有效应力的单一的线性关系, 避免了不同渗透吸力的峰值强度与正应力呈不同的曲线关系, 得到多个内摩擦角和黏聚力, 与 Mohr–Coulomb 准则不符合。

3.2 残余剪切强度

Di Maio^[36]、Di Maio 等^[13]分别给出了 Ponza 膨润土和 Bisaccia 黏土在不同浓度盐溶液中的残余剪切强度, Ponza 膨润土和 Bisaccia 黏土的表面分维分别为 2.55 和 2.67, 按式(8)计算修正有效应力。Ponza 膨润土和 Bisaccia 黏土的残余剪切强度与修正有效应力的关系如图 13 所示。从图 13 中看出, Ponza 膨润土和 Bisaccia 黏土的残余剪切强度与修正有效应力的关系不是单一线性关系, 表现为上翘曲线, 不符合 Mohr–Coulomb 准则。

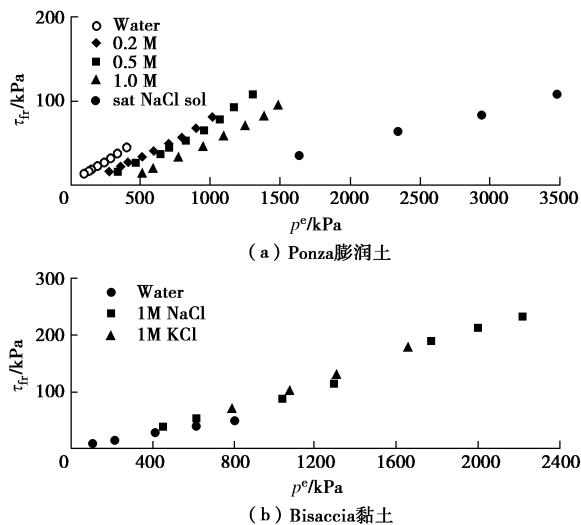


图 13 膨润土的残余强度与修正有效应力的关系

Fig. 13 Relationship between the residual shear strength and modified effective stress of bentonite

采用由渗透吸力产生的修正有效应力表示膨润土的残余剪切强度时, 没有得到符合剪切强度 Mohr–Coulomb 准则的 $\tau_{fr} - p^e$ 直线, 而是呈上翘曲线。针对这种现象, Kenney^[38]指出黏土剪切位移达到剪切残余状态时, 黏土呈定向排列。Skempton^[39]和 Burland^[40]指出残余状态下的剪切强度与初始应力状态和土体结构无关, 将残余剪切强度成为“固有的剪切强度”。

4 结 论

本文基于膨润土表面的分形模型, 建立了渗透吸力引起的修正有效应力的计算公式, 取得了以下 5 点结论。

(1) 根据 N_2 等温吸附试验, GMZ07 膨润土的表面分维为 2.78。

(2) 膨润土吸水膨胀后的吸水体积与竖向应力呈幂函数关系, 幂函数的指数是表面分维的函数。

(3) 根据膨润土表面的分形模型, 建立了渗透吸力应力的计算方法, 导出由渗透吸力和竖向应力产生的修正有效应力公式。

(4) 不同浓度盐溶液中、或不同总吸力的膨润土膨胀后的蒙脱石孔隙比(或孔隙比)与修正有效应力呈相同单一的幂函数关系。

(5) 不同浓度盐溶液中、或不同总吸力的膨润土膨胀后的峰值剪切强度与修正有效应力呈相同的线性关系, 符合 Mohr–Coulomb 准则; 残余剪切强度与修正有效应力呈非线性关系。

参考文献:

- XU Y F, MATSUOKA H, SUN D A. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixture[J]. *Appl Clay Sci*, 2003, **22**: 197 – 209.
- 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[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1005 – 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-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))
- 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): 1899 – 1904. (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): 1899 – 1904. (in Chinese))
- 孙德安, 张龙. 盐溶液饱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))
- 张虎元, 贾灵艳, 周浪. 高效废物处置库的混合型缓冲回填材料压缩特性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1546 – 1552. (ZHANG Hu-yuan, JIA Ling-yan, ZHOU Lang. Compression behaviors of compacted bentonite-sand mixtures as buffer material for HLW disposal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1546 – 1552. (in Chinese))
- YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the unsaturated permeability of the densely compacted GMZ01 bentonite under confined conditions[J]. *Eng Geol*, 2012, **126**: 1 – 7.
- XU Y F, DONG P. Fractal approach to hydraulic properties in unsaturated porous media[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, **19**: 327 – 337.
- 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(10): 1555 – 1559. (TAN Lou-rong, KONG

- Ling-wei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. *Soil Mechanics*, 2004, **25**(10): 1555 - 1559. (in Chinese))
- [9] 姜昊, 徐永福, 项国圣. 膨润土在核废料处置环境中的膨胀衰减规律研究[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(2): 203 - 209. (JIANG Hao, XU Yong-fu, XIANG Guo-sheng. Numerical simulation for decay of swelling capacity of bentonite in high-level nuclear waste repository[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(2): 203 - 209. (in Chinese))
- [10] 孙文静, 刘仕卿, 孙德安. 高掺砂率膨润土混合土膨胀特性及其膨胀量预测[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(9): 1620 - 1626. (SUN Wen-jing, LIU Shi-qing, SUN De-an, et al. Swelling characteristics of bentonite-sand mixtures with a high sand mixing ratio and its prediction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(9): 1620 - 1626. (in Chinese))
- [11] 项国圣, 徐永福, 姜昊. 压实膨润土在盐溶液中的膨胀变形特性[J]. *工程地质学报*, 2015, **23**(6): 1053 - 1058. (XIANG Guo-sheng, XU Yong-fu, JIANG Hao. Swelling behavior of compacted bentonite under osmotic suction[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, **23**(6): 1053 - 1058. (in Chinese))
- [12] STUDDS P G, STEWART D I, COUSENS T W. The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures[J]. *Clay Miner*, 1998, **33**: 651 - 661.
- [13] DI Maio C, SANTOLI L, SCHIAVONE P. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state[J]. *Mech Mater*, 2004, **36**: 435 - 451.
- [14] 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.
- [15] YE W M, ZHANG F, CHEN B, et al. Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Environ Earth Sci*, 2014, **72**: 2621 - 2630.
- [16] LORET B, KHALIL N. An effective stress elasto-plastic model for unsaturated soils[J]. *Mech Mater*, 2002, **44**: 97 - 116.
- [17] XU Y, XIANG G S, JINAG H, et al. Role of osmotic suction in volume change of clays in salt solution[J]. *Appl Clay Sci*, 2014, **101**: 354 - 361.
- [18] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2005.
- [19] DI MAIO C. Shear strength of clays and clayey soils: the influence of pore fluid composition[C]// Chemo-Mechanical Couplings in Porous Media Geomechanics and Biomechanics. LORET B, HUYGHE L, eds. Springer-Verlag Wien NY, 2004.
- [20] DI MAIO C, SANTOLI L, SCHIAVONE P. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state[J]. *Mech of Maters*, 2004, **36**: 435 - 451.
- [21] 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]. *Rivista Italiana Di Geotechnica*, 2005, **1**: 33 - 46.
- [22] WINTERKORN H F, MOORMAN R B B. A study of changes in physical properties of Putnam soil induced by ionic substitution[J]. *Proc Highways Res Board*, 1941, **21**: 415 - 434.
- [23] BULUT R, LYTTON R L, WRAY W K. Suction measurements by filter paper, expansive clay soils and vegetative influence on shallow foundations[C]// VIPULANANDAN C, ADISON M B, HASEN M, eds. *Geotechnical Publication*, ASCE. Reston, VA, 2001.
- [24] MAN A, GRAHAM J, VAN Gulck J. Effect of pore fluid chemistry on strain-softening behaviour of reconstituted plastic clay[C]// Procs of the Int Cong on Envir Geotech. Cardiff, 2006: 569 - 576.
- [25] TIWARI B, AJMERA B. A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics[J]. *Appl Clay Sci*, 2011, **53**: 48 - 57.
- [26] ZHANG L, SUN D A, JIA D. Shear strength of GMZ07 bentonite and its mixture with sand saturated with saline solution[J]. *Appl Clay Sci*, 2016(132/133): 24 - 32.
- [27] XU Y F, SUN D A, YAO Y P. Surface fractal dimension of bentonite and its application to determination of swelling properties[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, **19**: 347 - 356.
- [28] METTEN U. Desalination by reverse osmosis[J]. Cambridge: MIT Press, 1966.
- [29] SPOSITO G. The thermodynamic of soil solution[M]. London: Oxford Clarendon Press, 1981.
- [30] LANG A R G. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solution from 0 to 40°C[J]. *Australian J of Chem*, 1967, **20**: 2017 - 2023.
- [31] MESRI G, OLSON R E. Shear strength of montmorillonite[J]. *Géotechnique*, 1970, **3**: 261 - 270.
- [32] AVNIR D, JARONIEC M. An isotherm equation for adsorption on fractal surfaces of heterogeneous porous materials[J]. *Langmuir*, 1989, **5**: 1431 - 1433.
- [33] SUN W J, WE Z F, LIU S Q, et al. Deformation

- characteristics and permeability of saturated bentonite-sand mixtures[C]// Unsaturated Soil Mechanics from Theory to Practice (AP- UNSAT 2015). Gulin, 2015.
- [34] COKCA E, TILGEN H P. Shear strength-suction relationship of compacted Ankara clay[J]. Appl Clay Sci, 2010, 49: 400 - 404.
- [35] BLATZ J A, GRAHAM J, CHANDLER N A. Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite[J]. Can Geotech J, 2002, 39: 1005 - 1015.
- [36] DI Maio C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 695 - 707.
- [37] XU Y F. Fractal model for the correlation relating total suction to water content of bentonites[J]. Fractals, 2017. (in press)
- [38] KENNEY T C. The influence of mineralogical composition on the residual strength of natural soils[C]// Procs of the
- Geotech Conf on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks. Oslo, 1967.
- [39] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, 35(1): 3 - 18.
- [40] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 329 - 378.
- [41] WIEBE B, GRAHAM J, DIXON D. Influence of pressure, saturation and temperature on the behavior of unsaturated sand-bentonite[J]. Cana Geotech J, 1998, 35: 194 - 205.
- [42] TANG G X. Suction characteristics and elastic-plastic modelling of unsaturated sand-bentonite mixture[D]. Manitoba: University of Manitoba, 1999.
- [43] BLATZ J A, GRAHAM J, CHANDLER N A. Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite[J]. Can Geotech J, 2002, 39: 1005 - 1015.

中国土木工程学会第十三届全国土力学及岩土工程学术大会

(第二号通知)

2019年7月18日-21日，中国 天津

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会。

承办单位：天津大学；天津市土木工程学会；天津市建筑学会岩土力学与地下工程专业委员会。

会议主题：几十年来的工程建设给我国岩土工程的发展带来了巨大的机遇，也使岩土工作者积累了丰富的经验。然而，人类已经认识到，可持续发展是当前面临的重大问题，因此提升岩土工程品质与实现可持续发展成为广大岩土工作者的使命，也是我国由岩土工程大国发展为岩土工程强国的必由之路。在此岩土工程发展的历史机遇期，我国岩土工作者将于2019年7月齐聚天津，共同研讨我国岩土工程成就和问题，共同展望中国岩土工程的发展与未来，形成2019天津共识。

四年一度的中国土木工程学会全国土力学及岩土工程学术大会是我国岩土工程领域历史最为悠久、影响最为深远的学术会议。因此，第十三届全国土力学及岩土工程学术大会将以“岩土工程品质提升与可持续发展”为主题，对我国近年来力学与岩土工程领域最新研究进展进行广泛的学术交流，其中包括以下12个方面内容：①岩土的基本性质与本构关系；②岩土工程勘察、测试与评价技术；③基础工程与地基处理；④地下工程及深基坑工程；⑤岩土工程数值仿真与信息化技术；⑥土动力学与岩土地震工程；⑦特殊土与边坡工程；⑧环境岩土工程与土工加筋；⑨岩土工程中的新技术与新材料；⑩地质灾害预警与防治；⑪重大岩土工程实录；⑫岩土工程机械设备与施工技术。

会议日程与地点：7月18日会议注册及部分专业委员会会议；7月19日开幕式、大会报告及理事会议；7月20日专题论坛、分会场报告及部分专业委员会会议；7月21日专题论坛大会报告、分会场报告、闭幕式。地点：天津市西青区景道198号，距天津南站1.2 km，天津社会山国际会议中心。

会议展览：会议期间举办岩土工程仪器设备、机械与施工技术展览，主要包括岩土工程仪器、设备、机械、新材料、软件等，并设立专场技术研讨会。热忱欢迎从事岩土工程领域新材料、新技术、新设备的研发、生产和应用单位踊跃参加技术展览。

会议注册：（1）网上注册地址：www.cncsmge2019.cn；2019年4月30日前：正式代表1500元/人；学生代表1000元/人，陪同人员1000元/人；2019年6月15日前：正式代表1700元/人，学生代表1200元/人，陪同人员1000元/人；（2）现场注册1800元/人；（3）退款说明：2019年5月15日之前取消退全款，5月31日之前取消50%退款，6月1日及之后取消不予退款；（4）减免注册费：①顾问委员会委员、院士、国际论坛外籍专家免注册费；②国际土力学及岩土工程学会个人会员优惠100元/人。

联系方式：雷华阳13512418728；刘畅13821202109；程雪松13821807355；张雪莲13011392385；地址：天津市津南区海河教育园雅观路135号天津大学北洋园校区；第43教学楼建工学院土木工程系（300350）；E-mail：cismge2019@163.com；电话：022-27400843；会议网址：www.cncsmge2019.cn。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处 供稿)