

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1580

非饱和土平均粒间应力的计算及应用

宋朝阳¹, 赵成刚¹, 韦昌富², 马田田²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 土体各相之间物理化学作用对环境及能源等岩土工程都有重要影响, 有效应力原理是解决上述问题最重要的理论。而目前的有效应力表达式无法描述由于物理化学作用引起的土颗粒间接应力的变化。针对上述问题, 最近提出了一个平均粒间应力表达式可以表述非饱和土内部的物理化学作用。为了实现该平均粒间应力的量化计算并验证其稳定性和有效性, 首先阐述了平均粒间应力表达式中各部分的物理意义。通过参数分析, 得到了平均粒间应力各部分随含水率和孔隙盐溶液浓度的变化规律。推导出了表面力势中表征固液界面相互作用部分的计算公式, 实现了平均粒间应力的定量计算。计算了临界状态时的非饱和土平均粒间应力, 并应用平均粒间应力对非饱和土化学力学加载试验进行模拟。结果表明, 临界状态时平均粒间应力与剪切强度具有唯一关系, 应用平均粒间应力的计算结果与试验结果符合较好, 验证了平均粒间应力公式的稳定性和有效性。

关 键 词: 非饱和土; 物理化学效应; 平均粒间应力; 表面力势

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 08-2665-10

Calculation of mean intergranular stress and its application in unsaturated soil

SONG Zhao-yang¹, ZHAO Cheng-gang¹, WEI Chang-fu², MA Tian-tian²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The physicochemical interactions between different phases of the soil have an important impact on the geotechnical engineering related to environment and energy. The principle of effective stress is always the most important and effective theory to solve the relevant problems. However, the change of inter-particle stress caused by physicochemical effects cannot be accurately described by current effective stress equation. In response to the above problems, a mean intergranular stress expression that uniformly describe capillary, adsorption and osmosis effects between soil particles has recently been proposed. The purpose of this research is to realize the quantitative calculation of the mean intergranular stress and verify its stability and effectiveness. Firstly, the physical meaning of each part in the expression of mean intergranular stress is analyzed. Through analyzing the parameter in the expression, the variation rule of each part of mean intergranular stress with the water content and the concentration of pore water are obtained. Then, the formula characterizing the solid-liquid interface interaction for the surface force potential is derived, which can be used for the quantitative calculation of the mean intergranular stress equation. Finally, the mean intergranular stress of unsaturated soil in the critical state is calculated, and applied to simulate the coupled chemical-mechanical loading test of unsaturated soil. The calculated results show that there is a unique relationship between mean intergranular stress and shear strength in the critical state, and the chemical-mechanical calculation results give good agreement with the experimental results, verifying the stability and effectiveness of the mean intergranular stress.

Keywords: unsaturated soil; physicochemical effect; mean intergranular stress; surface force potential

1 引 言

在自然沉积或人工土体中物理化学作用普遍存

在。并且随着社会经济的发展, 与环境和能源有关的岩土工程问题也变得尤为重要^[1-2], 比如高放核废料的深地质处置^[3]、污染场地处理、固废填埋和

收稿日期: 2019-09-16

修回日期: 2020-03-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金 (No. 2019YJS137)。

This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2019YJS137).

第一作者简介: 宋朝阳, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: 16115299@bjtu.edu.cn

通讯作者: 赵成刚, 男, 1955 年生, 博士, 教授, 主要从事理性土力学、非饱和土力学、岩土地震工程等方面的研究。E-mail: cgzhao@bjtu.edu.cn

油气的开采等都涉及到土体各相之间的物理化学作用^[4-5], 同时物理化学作用对于降雨诱发土体滑坡^[6]以及海相软土的工程特性^[7-8]均有重要影响。

目前解决上述问题最重要的理论是有效应力原理。Terzaghi^[9]提出了饱和土体的有效应力公式, 将有效应力定义为总应力减去孔隙水压力的数值。在上述基础上, Bishop^[10]为了使得有效应力适用于对非饱和土的描述, 定义了非饱和土的有效应力公式, 该公式由两部分组成, 第 1 部分为净应力 $\bar{\sigma}_{ij}$, 第 2 部分为有效应力参数 χ 与基质吸力 s 的乘积:

$$\sigma'_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + \chi s \delta_{ij} \quad (1)$$

Aitchison^[11]、Jennings^[12]以及 Blight^[13]等给出了相似的表示非饱和土有效应力的公式。值得注意的是, 非饱和土的有效应力并不会随毛细作用的增大而无限增大, 当基质吸力大于一定范围时, 随着基质吸力的变化, 毛细作用对非饱和土有效应力的影响很小。Gallipoli 等^[14]引入与气液界面作用有关的变量来解释这一事实。Khalili 等^[15]则通过临界状态剪切试验以及干化收缩试验建立并验证了所建立的非饱和土有效应力。

国内方面, 陈正汉等^[16]建立了各向同性状态的非饱和土以及各向异性状态的弹性多孔-流体介质的有效应力表达式。陈正汉等^[17]以连续介质力学为基础, 以非饱和土骨架平衡方程为切入点, 推导出了一系列应力状态变量。赵成刚等^[18]对三相(固、液、气)土体的表征体元进行了力学平衡分析, 得到了非饱和土平均骨架应力的表达式。邵龙潭等^[19-20]也推导得到了非饱和土的有效应力方程。段晓梦等^[21]将非饱和土分为 6 相: 颗粒骨架、胶质、固态孔隙水、液态孔隙水、收缩膜和孔隙气。分析了非饱和土的承载结构, 但并没有给出可以定量计算的有效应力公式。

上述有效应力表达式均不能描述土颗粒间物理化学作用的影响。Mitchell 等^[22]提出了一个考虑颗粒间物理化学作用的有效应力公式: $\sigma' = \sigma - p_w^l + (A - R)$ 。采用 R 和 A 分别表示土颗粒间的斥力和引力, 但其计算方法并不明确。徐永福^[23]针对膨润土建立了考虑渗透吸力影响的有效应力公式并进行了验证。

除毛细以及渗透作用的影响外, 吸附作用也会影响非饱和土的力学行为。显然, 我们需要一个统一变量来表述这些作用。传统有效应力表达式没有解决这些问题, 因此引入平均粒间应力的概念。近年来, Wei^[24]提出了平均粒间应力表达式, 能够统

一地描述毛细、吸附以及渗透作用。但是该公式中表征固液界面作用部分的表面力势计算方法尚不明确, 并且该平均粒间应力的精确性并未进行试验验证。

由于非饱和土有效应力的基础性和重要性以及工程实践的需要, 有必要对 Wei^[24]提出的非饱和土平均粒间应力进行量化计算, 并验证其稳定性和准确性。量化计算的平均粒间应力将为解决涉及土体各相之间物理化学作用的工程实践提供重要理论依据, 为与环境和能源有关的岩土工程提供重要理论指导。

2 非饱和土的平均粒间应力

无论是边界上的外力作用还是骨架-孔隙水间物理化学作用(静电力、范德华力、氢键及双电层作用等), 都是通过骨架或者粒间进行传递, 才能引起土骨架的变形。同时土抗剪强度也是由粒间应力大小决定的。对于非饱和土, 平均粒间应力可以表达为^[24]

$$\sigma'' = \sigma - p^g I + n^l (s - \Pi) I \quad (2)$$

式中: σ'' 为平均粒间应力张量; I 为单位向量; σ 为总应力张量; p^g 为气相压力; n^l 为液相的体积分数; $n^l (s - \Pi)$ 为非饱和以及物理化学作用引起的应力, 可称之为吸应力^[25]。下面对平均粒间应力各部分的物理意义进行介绍。

s 为表征基质吸力, 它的表达式为

$$s = p^g - p_w^l \quad (3)$$

式中: p_w^l 为孔压传感器测量得到的孔隙水压力。表征基质吸力为含水率变化(饱和度)的函数, 两者的关系即为土-水特征曲线(SWCC)方程, 采用 VG 模型^[26]表示:

$$S_r = \left[\frac{1}{1 + (s/\alpha)^n} \right]^{1-(1/n)} \quad (4)$$

式中: S_r 为饱和度; α 和 n 为 SWCC 模型参数。

Π 为广义渗透压, 为土体内部微观物理化学作用的宏观表征。可通过孔隙水压力测量值与土体中真实孔压的差值进行解释: 在测量孔压时, 土体中的水和测量容器中的水(平衡溶液)处于连通状态, 当达到平衡状态时, 二者的势能是相等的。Wei^[24]基于势能相等原理推导出了土体中真实孔压 p^l 和测量孔压 p_w^l 之间的关系:

$$p^l = p_w^l + \Pi \quad (5)$$

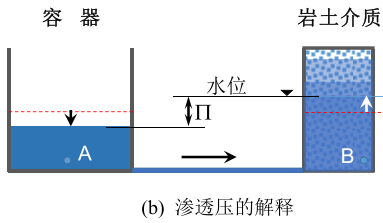
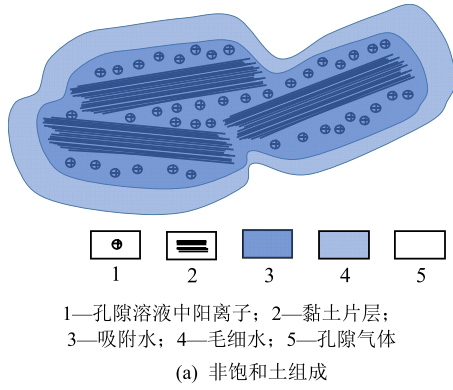


图 1 非饱和土三相作用图
Fig.1 Schematic of three-phase composition of unsaturated soil

广义渗透压 Π 由两部分组成

$$\Pi = \Pi_D - \rho_{\oplus}^{\text{H}_2\text{O}} \Omega^{\text{I}} \quad (6)$$

其中第 1 部分为 Donnan 渗透压，来源于土颗粒表面所带的固定负电荷。土颗粒遇水时出现双电层现象，使得孔隙溶液中电荷分布不均，并与平衡溶液产生一定的浓度差，类似于半透膜作用，引起孔隙溶液的压力与平衡溶液的压力不相同。Donnan 渗透压为双电层效应的宏观表征。除了土颗粒固定负电荷所引起的物理化学作用外，土颗粒表面和孔隙水之间还存在着其他的相互作用，包括范德华力、表面张力以及流相与固相之间的吸附作用等，广义渗透压的第 2 部分表征这些微观表面力， $\rho_{\oplus}^{\text{H}_2\text{O}}$ 为纯水的密度， Ω^{I} 为表面力势。

广义渗透压的第 1 部分 Donnan 渗透压的值与固定负电荷密度 c_{fix} 、液相体积分数 n^{I} 及平衡溶液的浓度 c_0 有关：

$$\Pi_D = \frac{RT\rho_{\oplus}^{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \ln\left(\frac{a_{\text{R}}^{\text{H}_2\text{O}}}{a_{\text{P}}^{\text{H}_2\text{O}}}\right) \quad (7)$$

式中： R 为普适气体常量，为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T 为温度； $\rho_{\oplus}^{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的质量密度； $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的摩尔质量，为 18 g/mol ； $a_{\text{R}}^{\text{H}_2\text{O}}$ 和 $a_{\text{P}}^{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为平衡溶液和岩土孔隙溶液中水 (H_2O) 的活度，当溶液为理想溶液时，等于孔隙水的摩尔分数。 Π_D 的详细计算流程 Wei^[24] 以及 Ma 等^[4] 已给出。

Donnan 渗透压 Π_D 的参数分析见图 2^[24]。由图可知，随着固定负电荷密度 c_{fix} 的增大， Π_D 呈现出

增大的趋势。 c_{fix} 定义为每单位土颗粒体积所带有固定负电荷的摩尔数，与黏土的阳离子交换量 CEC 密切相关。即随着黏土 CEC 的增大，Donnan 效应增强。随着平衡溶液浓度 c_0 的增大， Π_D 逐渐降低。当饱和土体采用盐溶液置换孔隙水时，双电层厚度变薄，斥力降低，使得土体发生相应的变形。 Π_D 可以从宏观上对上述现象进行定量表征。同时 Π_D 随液相体积分数 n^{I} 的增大而降低，即当含水率降低时，土体的物理化学作用更加明显。

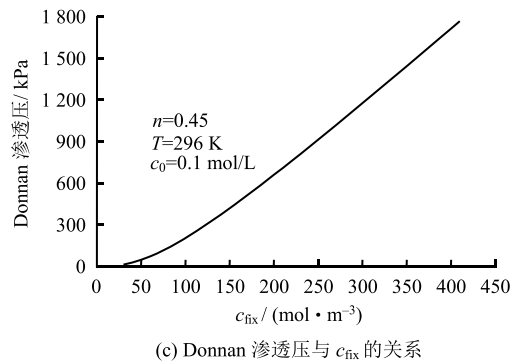
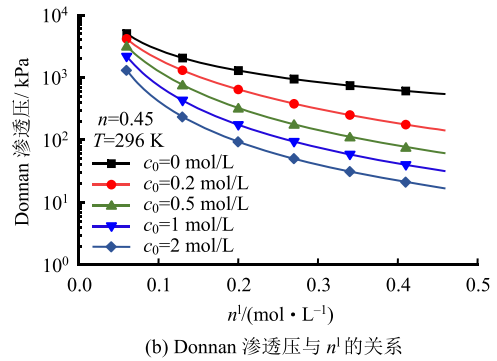
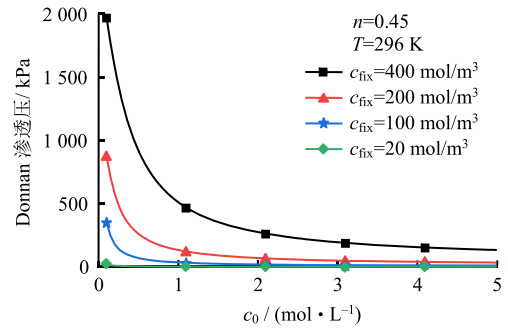


图 2 Donnan 渗透压的参数分析
Fig.2 Parameter analysis of Donnan osmotic pressure

广义渗透压的第 2 部分表达式为

$$n^{\text{I}} \rho^{\text{I}} \Omega^{\text{I}}(T, n^{\text{I}}) = n_0^{\text{I}} \rho^{\text{I}} \Omega_0^{\text{I}}(T, n_0^{\text{I}}) + \int_{n_0^{\text{I}}}^{n^{\text{I}}} (s - \Pi_D) dn^{\text{I}} \quad (8)$$

式中： ρ^{I} 为水的密度； n_0^{I} 为饱和土体中水的体积分数； Ω_0^{I} 为饱和土的表面力势。上述表面力势与含水

率和温度密切相关。在等温条件下, 以及 Ω_0^l 为 0 时, 对式 (8) 进行参数分析, 得到表面力势与饱和度的关系见图 3。随着饱和度的降低, 表面力势增大, 表明孔隙水存在状态更稳定, 移动单位质量的孔隙水需要更多的能量。

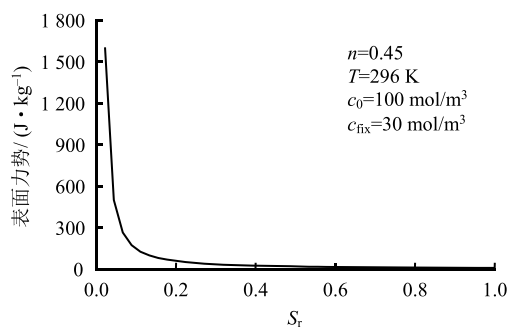


图 3 表面力势与饱和度的关系

Fig.3 Relationship between surface force potential and saturation

对式 (4)、(7) 以及式 (6) 进行计算, 得到 s 、 Π_D 以及 Π 随饱和度的变化曲线, 如图 4^[24] 表示。随着含水率的降低, 表征基质吸力、Donnan 渗透压以及广义渗透压均呈现出增大的趋势。即随着饱和度的降低, 孔隙气压与水压的差值, 土体的双电层效应以及土体内部微观物理化学作用都更为显著。这些微观相互作用将影响土体的真实孔压以及平均粒间应力的数值。因此, 定量表征土体内部物理化学作用的两个宏观变量: Donnan 渗透压以及表面力势十分必要。

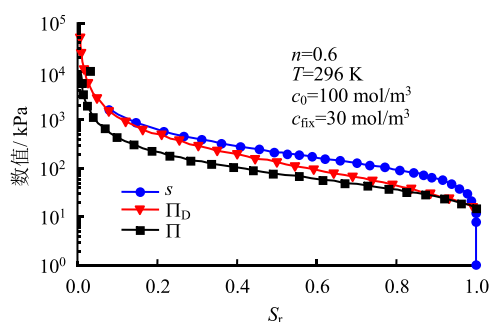


图 4 表征基质吸力、Donnan 渗透压和广义渗透压随饱和度的变化曲线

Fig.4 Variations of s , Π_D , and Π with S_r

下面介绍不同情况下平均粒间应力公式的组成, 以便于更清晰地了解该公式中各项的物理意义。

当土体处于非饱和状态, 不考虑化学渗透作用时 (此时表征化学渗透作用的 Donnan 渗透压项不用计算), 平均粒间应力的表达式为

$$\sigma_1'' = \sigma - p^s + n^l s + n_0^l \rho^l \Omega_0^l + \int_{n^l}^{n_0^l} s dn^l \quad (9)$$

当土体完全饱和时, 土体孔隙中完全充满液体, 此时的液相体积分数 n^l 即为孔隙率 n 。此时不考虑与非饱和状态有关的项 (表征基质吸力 s 以及表面力势中与液相体积分数有关的积分项), 平均粒间应力的表达式为

$$\sigma_2'' = \sigma - p_w^l + n(-\Pi_D + \rho^l \Omega_0^l) \quad (10)$$

当土体完全饱和, 且不考虑颗粒之间的物理化学作用时, 式 (10) 等号右端最后一项不予考虑, 平均粒间应力的表达式为

$$\sigma_3'' = \sigma - p_w^l \quad (11)$$

该表达式即为描述饱和土的 Terzaghi 有效应力公式。

3 表面力势的固液界面作用部分的确定

广义渗透压的两部分分别由式 (7) 以及式 (8) 计算得到。式 (7) 可直接量化计算, 而表面力势的计算公式 (8) 由两部分构成: 第 1 部分为 $n_0^l \rho^l \Omega_0^l$, 第 2 部分为表征基质吸力与 Donnan 渗透压对体积含水率的积分。给定了土体的基本物理特性和土-水特征曲线的关系, 第 2 部分可以直接积分计算, 而第 1 部分 $n_0^l \rho^l \Omega_0^l$ 是唯一一个未知变量, 它表征表面力势的固液界面作用部分。固液界面相互作用与气液界面相互作用之和为非饱和状态下的总表面力势。因此只有确定表面力势的固液界面作用部分, 才可使土体的物理化学作用实现定量描述。

岩土介质在热力学平衡态时, 要满足以下力学平衡条件^[24]:

$$p^l - p^s - p_m^l = 0 \quad (12)$$

式中: p^s 为固相的热力学压力。该式为对应于多孔材料的微观界面相容条件, 是指物质不能穿透不同相态之间的界面 (除非通过化学反应)^[27]。因此, 不同相态物质的界面上的两侧压力差不是随意变化的, 而是受到式 (12) 的约束限制, 这种宏观压力差为材料状态变量的函数, $p_m^l = n^l \rho^l (\partial \Omega^l / \partial n^l)$, 在饱和时液相体积分数 n^l 即为孔隙率 n 。根据饱和土的力学平衡条件可得 $p^s = p_w^l$ (饱和土的固相压力以及平衡溶液压力示意图在图 5 中给出)。

将饱和时的上述条件代入式 (12) 得

$$p^l - p_w^l - n \rho^l \frac{\partial \Omega^l}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

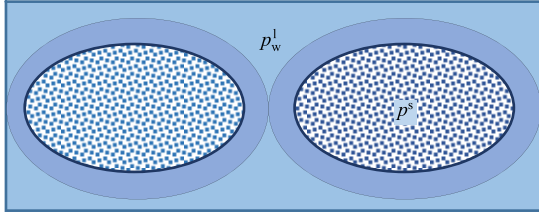


图 5 饱和土体应力示意图

Fig.5 Schematic of the stress of saturated soil

将饱和时的真实孔压与测量孔压之间的关系 $p^1 = p_w^1 + \Pi_D - \rho^1 \Omega_0^1$ (式 (5) 在饱和条件下的表达) 代入式 (13) 得

$$n \rho^1 \frac{\partial \Omega_0^1}{\partial n} + \rho^1 \Omega_0^1 = \Pi_D \quad (14)$$

即有

$$\frac{\partial(n \rho^1 \Omega_0^1)}{\partial n} = \Pi_D \quad (15)$$

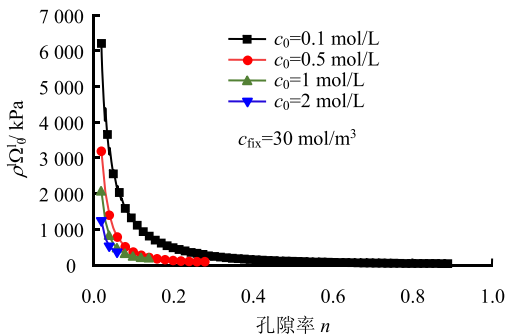
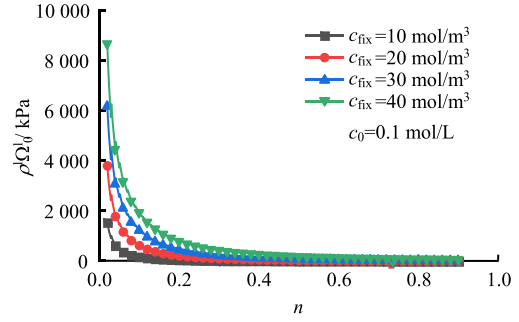
对式 (15) 进行积分得到

$$n \rho^1 \Omega_0^1 = \int_0^n \Pi_D dn \quad (16)$$

式 (16) 即为表面力势的固液界面作用部分表达式，它为表征土中固、液两相物理化学作用的物理量。由式 (16) 得到饱和土中真实孔压与测量孔压差值的第 2 部分为

$$\rho^1 \Omega_0^1 = \frac{\int_0^n \Pi_D dn}{n} \quad (17)$$

此表达式与 Gor 等^[28]推导得到的吸附应力表达式类似，所不同的是，本文所得到的表达式为宏观值，为基本物理特性以及孔隙率的函数，计算参数简单；而 Gor 等的表达式需要对水膜厚度 h 进行积分，为微观度量，不便于定量计算。对 $\rho^1 \Omega_0^1$ 进行参数分析，分析结果见图 6、7。

图 6 c_{fix} 恒定时不同孔隙溶液浓度 $\rho^1 \Omega_0^1$ 与孔隙率的关系Fig.6 Relationship between $\rho^1 \Omega_0^1$ and porosity at different pore solution concentrations as the fixed charge concentrations is constant图 7 孔隙溶液浓度恒定时不同 c_{fix} 下 $\rho^1 \Omega_0^1$ 与孔隙率的关系Fig.7 Relationship between $\rho^1 \Omega_0^1$ and porosity at different fixed charge concentrations as the concentration of the pore solution is constant

由图 6、7 可知，随着孔隙率的增加， $\rho^1 \Omega_0^1$ 逐渐减小；即当土体较松散时，物理化学作用较弱。对于致密多孔介质，随着孔隙率的降低，吸附作用显著增强。在孔隙率相同时，土体固定电荷密度 c_{fix} 较大时， $\rho^1 \Omega_0^1$ 较大；平衡溶液浓度 c_0 较小时， $\rho^1 \Omega_0^1$ 较大。

4 临界状态剪切强度验证

土体剪切至临界状态时，应力和体积不变，剪应变还在不断发展。此时土颗粒间相互作用受土体结构的影响降低到最小值，颗粒间的相互作用主要为外力作用下引起的土颗粒之间的摩擦以及土体内部物理化学作用。因而若存在能够统一描述外力作用及土体内部的物理化学作用的“平均粒间应力”，即有效应力，对应于某剪切强度，应该存在唯一的有效应力值（有效应力原理）。根据该原理，本节采用 3 种不同土体的临界状态试验数据验证平均粒间应力的存在以及唯一性。

4.1 低塑性粉土试验验证

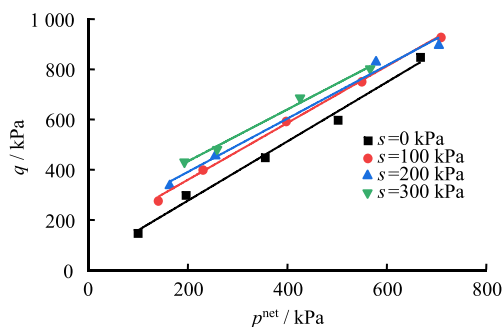
Estabragh 等^[29]对低塑性粉土进行了饱和土样以及控制基质吸力为 100、200、300 kPa 的三轴剪切试验，临界状态试验结果见图 8(a)，应用 VG 模型对 SWCC 进行拟合，拟合结果见图 8(b)。

对该土的平均粒间应力进行计算，得到平均粒间应力与剪切强度的关系图见图 9。在平均粒间应力大于 300 kPa 以后，平均粒间应力与剪切强度的关系在一个小范围成带状分布，但趋势上平均粒间应力与剪切强度的关系基本为一条直线。

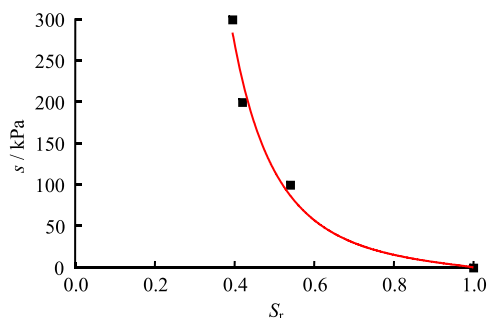
4.2 北京地区非饱和粉砂临界状态试验验证

蔡国庆等^[30]对北京地区粉砂进行了饱和土以及控制基质吸力为 30、100、200 kPa 的三轴剪切试验，初始干密度为 1.6 g/cm³ 以及 1.96 g/cm³ 粉砂临界状态试验结果见图 10(a)、11(a)，应用 VG 模型对

SWCC 进行拟合, 拟合结果见图 10(b)、11(b)。

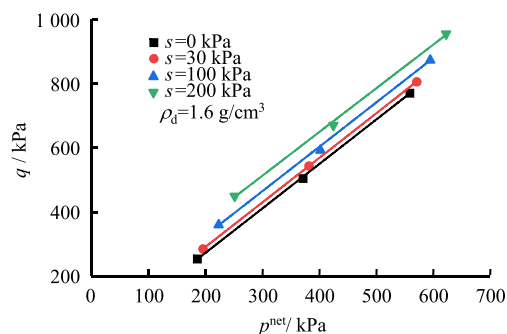


(a) 净应力-剪切强度关系

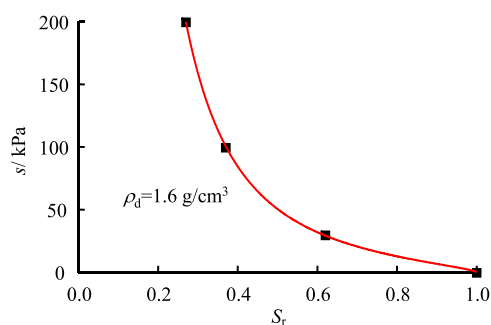


(b) 通过 VG 模型拟合的 SWCC

图 8 低塑性粉土的临界状态试验数据
Fig.8 Experimental data of silt with low plastic in the critical state



(a) 净应力-剪切强度关系



(b) 通过 VG 模型拟合的 SWCC

图 10 非饱和粉砂的临界状态试验数据($\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$)
Fig.10 Experimental data of unsaturated silt in the critical state ($\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$)

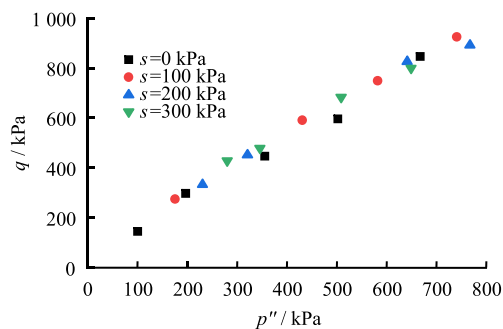


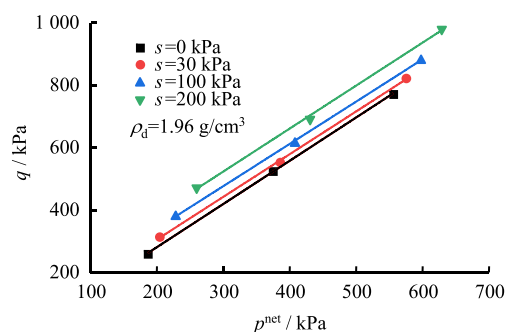
图 9 平均粒间应力-剪切强度关系
Fig.9 Relationship between mean intergranular stress-shear strength

4.2.1 干密度为 1.6 g/cm^3 平均粒间应力验证

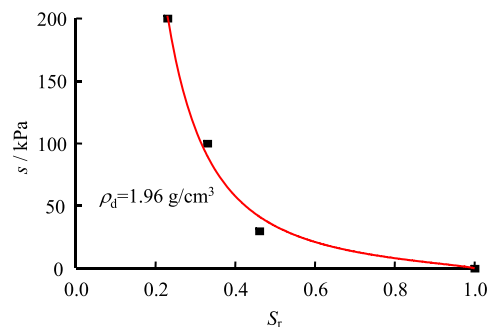
对干密度为 1.6 g/cm^3 平均粒间应力进行计算, 计算得到的平均粒间应力-剪切强度关系见图 12。由图可知, 平均粒间应力-剪切强度关系图为一 条直线, 即对应于某剪切强度, 存在唯一的平均粒间应力与之对应。

4.2.2 干密度为 1.96 g/cm^3 平均粒间应力验证

对干密度为 1.96 g/cm^3 时粉砂的平均粒间应力进行计算。计算得到的平均粒间应力-剪切强度关系见图 13。由图可知, 平均粒间应力-剪切强度关系基本为一条直线。



(a) 净应力-剪切强度关系



(b) 通过 VG 模型拟合的 SWCC

图 11 非饱和粉砂临界状态试验数据($\rho_d = 1.96 \text{ g/cm}^3$)
Fig.11 Experimental data of unsaturated silt in the critical state ($\rho_d = 1.96 \text{ g/cm}^3$)

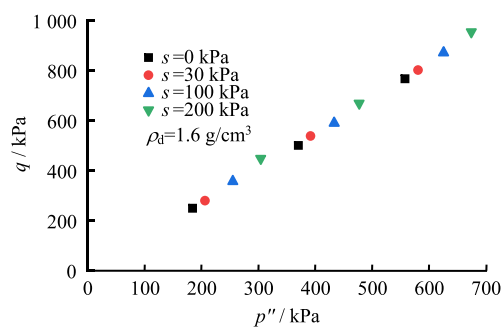


图 12 平均粒间应力-剪切强度关系

Fig.12 Relationship between mean intergranular stress-shear strength

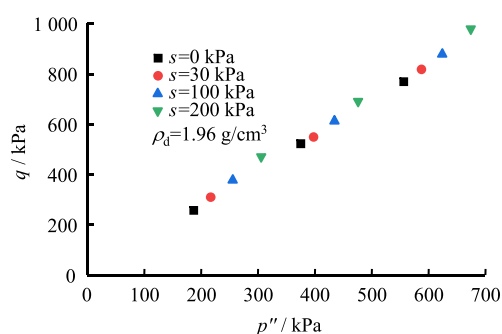


图 13 平均粒间应力-剪切强度关系

Fig.13 Relationship between mean intergranular stress-shear strength

4.3 土耳其重塑残余黏土试验验证

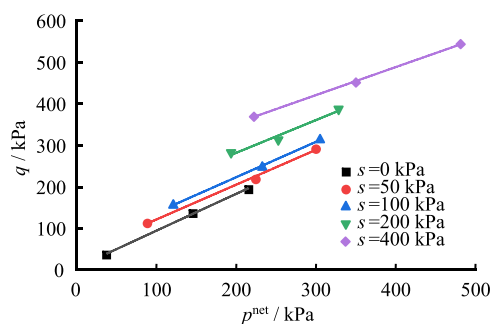
Kayadelen 等^[31]对土耳其重塑残余黏土进行了饱和土以及控制基质吸力为 50、100、200、400 kPa 的三轴剪切试验。试验得到的临界状态时的净应力-剪切强度关系见图 14(a)，由 VG 模型拟合得到的土-水特征曲线见图 14(b)。

对该试验数据进行平均粒间应力的计算，得到的平均粒间应力与剪切强度的关系见图 15。由图可知，虽然平均粒间应力为 300 kPa 附近计算数据点稍微偏高，平均粒间应力为 700 kPa 附近计算的数据偏低，但平均粒间应力与剪切强度的关系总体为一条直线。

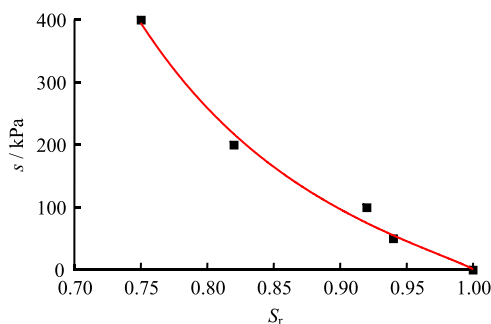
本节通过 3 种不同土性的临界状态时平均粒间应力与剪切强度的关系，验证了平均粒间应力的唯一性。下节应用平均粒间应力对非饱和土的物理化学作用进行模拟分析，验证平均粒间应力在土体中存在物理化学作用时的有效性。

5 平均粒间应力在非饱和黏土的应用

由于黏土颗粒表面带负电荷，土体内部受物理化学影响较大，土体的力学表现受含水率以及孔隙盐溶液浓度的影响更为显著。本节应用所建立的平均粒间应力对同时考虑非饱和以及孔隙盐溶液浓度



(a) 净应力-剪切强度关系



(b) 通过 VG 模型拟合的 SWCC

图 14 土耳其重塑残余黏土的临界状态试验数据

Fig.14 Experimental data of undisturbed residual clayey soils from Turkey in the critical state

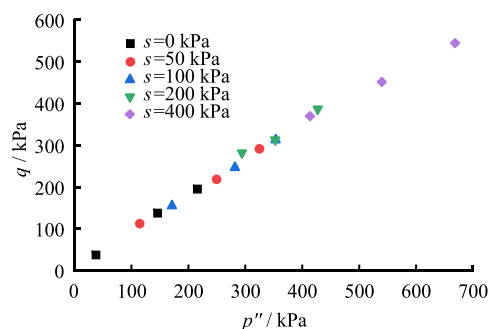


图 15 平均粒间应力-剪切强度关系

Fig.15 Relationship between mean intergranular stress-shear strength

作用下黏土的化学力学表现进行计算，并与相关试验结果进行对比，验证平均粒间应力对非饱和黏土化学力学特征的描述能力。

本节采用的本构模型为改进的修正剑桥模型，将饱和土的有效应力替换为非饱和土的平均粒间应力，为了考虑物理化学作用对土体屈服的影响，硬化函数为^[4]

$$p_c = p_{c0}^* \exp\left(\frac{\nu \varepsilon_v^p}{\lambda - \kappa}\right) \exp(-\beta \Pi_0) \exp(\beta p_s) \quad (18)$$

式中： p_c 为先期固结压力； ν 为比体积； ε_v^p 为塑性体应变； Π_0 为土体饱和时的广义渗透压； p_{c0}^* 为当 ε_v^p 和 Π_0 都为 0 时的饱和土的初始先期固结压力； λ

为 $v - \ln p''$ 加载线的斜率; κ 为 $v - \ln p''$ 回弹线的斜率; $p_s = n^1(s - \Pi)$, 为非饱和及物理化学作用对土体硬化的影响; β 为模型参数, 可通过先期固结压力和平均粒间应力的关系得到。

5.1 常基质吸力下化学力学过程计算及验证

对基质吸力保持恒定 (500 kPa) 情况下, 包含力学加载与化学加载的复杂加载路径进行模拟。采用 Mokni 等^[32]控制基质吸力条件下的压实黏土的化-水-力耦合试验数据作为验证数据。

具体应力路径为: ①保持基质吸力为 500 kPa, 竖向净应力从 20 kPa 加载到 100 kPa; ②竖向净应力保持为 100 kPa, 增加孔隙盐溶液浓度到 6.53 mol/L; ③竖向净应力由 100 kPa 加载到 1 000 kPa 之后再卸载至 100 kPa。

模型参数见表 1, 计算结果与试验结果的对比见图 16。其中 c_{fix} 为土体中固定电荷密度, 即每单位体积土体所具有负电荷摩尔数, 可通过阳离子交换量 CEC (mmol/100g) 计算得出。 $c_{\text{fix}} = 10\text{CEC} \times \rho_d$ 。 ρ_d 为土体的干密度 (g/cm^3)。土体的阳离子交换量以及干密度的数值在文献中均已给出, 所以固定电荷密度可计算得出。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of calculation model							
c_{fix} / $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	λ	κ	M	P_{c0}^* /kPa	β	n	α
360	0.3	0.001 7	0.856	200	0.034	1.03	7.3

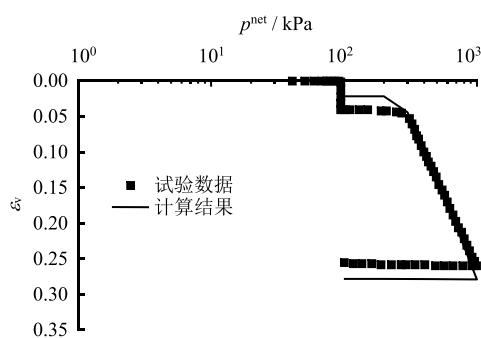


图 16 常基质吸力下复杂加载路径数值模拟
Fig.16 Numerical simulation of complex loading path under constant matrix suction

由图 16 可知, 在保持基质吸力为恒定的初始加载 (20~100 kPa) 过程计算值与试验值基本吻合; 在净应力保持为 100 kPa、基质吸力保持为 500 kPa 时, 应用本文的平均粒间应力能够模拟化学浓度增加引起的土体压缩变形; 在之后的加载-卸载中, 计算结果能够大致表示出土体孔隙比的变化趋势。

化学加载过程中浓度-体变关系在图 17 中表

示。在进行化学加载计算时, 采用了化学浓度逐级加载的计算方式, 最终达到所施加的指定浓度。

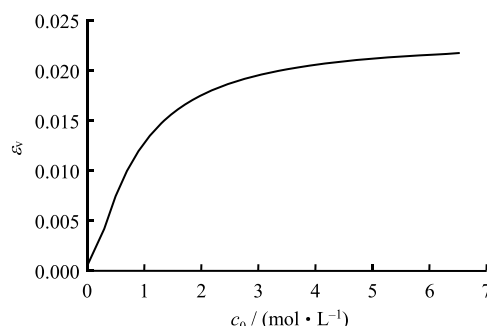


图 17 化学加载过程中浓度-体变关系图
Fig.17 Concentration-volume deformation relationship during chemical loading

从图 17 中可以看出, 随着化学浓度的逐级增加, 体积变形逐渐增大。在化学浓度较低范围内, 化学浓度的变化对体积变形的影响显著, 在化学浓度较高时, 溶液化学组分的变化对体变的影响程度逐渐减小; 而这和平均粒间应力随着浓度的变化趋势是一致的。

5.2 常基质吸力与孔隙盐溶液浓度下固结回弹过程计算及验证

对基质吸力保持恒定 ($s = 500$ kPa), 不同孔隙盐溶液浓度情况下 (孔隙盐溶液浓度分别为 0、4、5.4 mol/L) 力学加-卸载路径进行模拟。采用 Mokni 等^[32]的控制基质吸力与孔隙盐溶液浓度的压实黏土的化-水-力耦合试验数据作为验证数据, 模型参数见表 1。计算结果与试验数据对比见图 18。

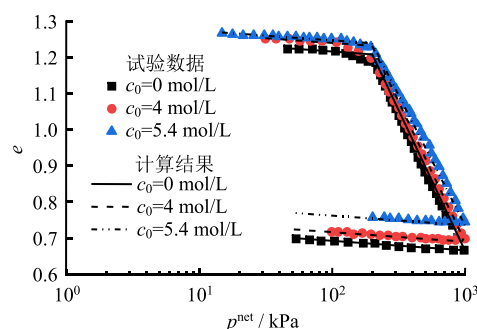


图 18 固定基质吸力与孔隙盐溶液浓度下固结-回弹关系
Fig.18 Vertical net stress-volume ratio relationship under constant matrix suction and pore water concentration

由图 18 基质吸力与孔隙盐溶液浓度恒定情况下, 力学固结回弹计算结果与试验数据结果的对比表明, 本文平均粒间应力可以反映非饱和条件下孔隙盐溶液浓度的不同对土体力学的响应。

6 结 论

(1) 对考虑颗粒间物理化学作用的平均粒间应力的各部分进行了参数分析, 得到了平均粒间应力的变化规律。

(2) 推导得到了表面力势的固液界面作用部分的计算方法, 实现了考虑颗粒间物理化学作用的平均粒间应力的定量计算。

(3) 对临界状态时的平均粒间应力进行了计算。临界状态时的平均粒间应力-剪切强度关系为一条直线, 验证了平均粒间应力的唯一性。

(4) 理论计算结果与非饱和黏土的化学力学加载试验、固结回弹试验结果进行对比。对考虑颗粒间物理化学作用的平均粒间应力的有效性和适用性进行了验证。本平均粒间应力公式能够为环境及能源岩土工程提供重要理论基础。

参 考 文 献

- [1] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3521-3540.
ZHAO Cheng-gang, WEI Chang-fu, CAI Guo-qing. Development and challenge for soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3521-3540.
- [2] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(1): 3-74.
- [3] 叶为民, 张峰, 陈宝, 等. 化-力耦合作用下 GMZ 膨润土体变特性研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 1577-1584.
YE Wei-min, ZHANG Feng, CHEN Bao, et al. Advances on investigations into chemo-mechanical coupling effects on the volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2017, 45(11): 1577-1584.
- [4] MA T, WEI C, CHEN P, et al. Chemomechanical coupling constitutive model for chalk considering chalk-fluid physicochemical interaction[J]. **Géotechnique**, 2019, 69(4): 308-319.
- [5] MA T T, WEI C F, XIA X L, et al. Constitutive model of unsaturated soils considering the effect of intergranular physicochemical forces[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2016, 142(11): 04016088.
- [6] 刘剑, 崔鹏. 水土化学作用对土体黏聚力的影响——以蒙脱石-石英砂重塑土为例[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 491-427, 434.
LIU Jian, CUI Peng. Influence of water-soil chemical interaction on cohesive force: a case study of montmorillonite-quartz remolded soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 491-427, 434.
- [7] 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.
- [8] 张彤炜, 邓永锋, 吴子龙, 等. 考虑孔隙水盐分效应的人工软黏土工程特性与本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1690-1697.
ZHANG Tong-wei, DENG Yong-feng, WU Zi-long, et al. Engineering behavior and constitutive model of artificial soft clay considering pore water salinity effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(9): 1690-1697.
- [9] TERZAGHI K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear[C]//Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1936: 54-56.
- [10] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. **Teknisk Ukeblad**, 1959, 106 (39): 113-143.
- [11] AITCHISON G D, DONALD I B. Some preliminary studies of unsaturated soils[C]//Proceedings of the 2nd Australian and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wellington: Technical Publications for the New Zealand Institution of Engineers, 1956: 192-199.
- [12] JENNINGS J E B. A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils[C]//Proceedings of Pore Pressure and Suction in Soils. London: Butterworth, 1961: 26-30.
- [13] BLIGHT G E. A study of effective stress for volume change[C]//Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas. Sydney, Australia: Butterworth, 1965: 259-269.
- [14] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(1): 123-135.
- [15] KHALILI N, GEISER F, BLIGHT G E. Effective stress

- in unsaturated soils: review with new evidence[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(2): 115-126.
- [16] 陈正汉, 王永胜, 谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 62-69.
CHEN Zheng-han, WANG Yong-sheng, XIE Ding-yi. Effective stress in unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(3): 62-69.
- [17] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 1-54.
- [18] 赵成刚, 刘真真, 李舰, 等. 土力学有效应力及其作用的讨论[J]. 力学学报, 2015, 47(2): 356-361.
ZHAO Cheng-gang, LIU Zhen-zhen, LI Jian, et al. Effective stress in soil mechanics and the discussion about its functions[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2015, 47(2): 356-361.
- [19] 邵龙潭, 郭晓霞. 有效应力新解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia. New solution of effective stress[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.
- [20] 邵龙潭, 郭晓霞, 郑国锋. 粒间应力、土骨架应力和有效应力[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1478-1483.
SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia, ZHENG Guo-feng. Intergranular stress, soil skeleton stress and effective stress[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(8): 1478-1483.
- [21] 段晓梦, 曾立峰. 非饱和土的承载结构与岩土广义结构性[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3103-3112.
DUAN Xiao-meng, ZENG Li-feng. Bearing structure of unsaturated soil and generalized structural properties[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3103-3112.
- [22] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005.
- [23] 徐永福. 考虑渗透吸力影响膨润土的修正有效应力及其验证[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 631-638.
XU Yong-fu. Modified effective stress induced by osmotic suction and its validation in volume change and shear strength of bentonite in saline solutions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 631-638.
- [24] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemomechanical behavior of unsaturated soils[J]. **Vadose Zone Journal**, 2014, 13(9): 1-14.
- [25] LN N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(2): 131-142.
- [26] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892-898.
- [27] WEI C F, MURALEETHARAN K K. A continuum theory of porous media saturated by multiple immiscible fluids: I. Linear poroelasticity[J]. **International Journal of Engineering Science**, 2002, 40(16): 1807-1833.
- [28] GOR GENNADY Y, NEIMARK ALEXANDER V. Adsorption-induced deformation of mesoporous solids[J]. **Langmuir**, 2010, 26(16): 13021-13027.
- [29] ESTABRAGH A R, JAVADI A A. Critical state for overconsolidated unsaturated silty soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(3): 408-420.
- [30] 蔡国庆, ASREAZAD Saman, 刘超, 等. 非饱和粉砂临界状态的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 8-15.
CAI Guo-qing, ASREAZAD Saman, LIU Chao, et al. Experimental study on critical state of unsaturated silty sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl.1): 8-15.
- [31] KAYADELEN C, SIVRIKAYA O, TASKIRAN T, et al. Critical-state parameters of an unsaturated residual clayey soil from Turkey[J]. **Engineering Geology**, 2007, 94(1): 1-9.
- [32] MOKNI N, ROMERO E, OLIVELLA S. Chemo-hydro-mechanical behaviour of compacted Boom Clay: joint effects of osmotic and matric suctions[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(9): 681-693.