

DOI: 10.11779/CJGE201412014

渗透吸力对重塑黏土的压缩和渗透特性影响的试验研究

张彤炜¹, 邓永锋^{1*}, 刘松玉¹, 杨忠超²

(1. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 已有研究表明孔隙水盐分对黏土的力学性质有着重要影响, 但相关的定量研究仍需进一步深入。以渗透吸力作为宏观参数, 将商用高岭土与钙基膨润土的混合土作为研究对象, 用不同浓度的 NaCl 溶液与土混合, 进行饱和重塑土的固结试验, 探究孔隙水盐分对饱和重塑黏土压缩特性和渗透特性的影响规律。试验结果表明重塑饱和黏土的压缩指数 C_c 随着渗透吸力的增加而呈指数规律衰减, 回弹指数未产生明显变化; 在 Burland 体系下, 渗透吸力对曲线初始段有较大影响; 而屈服后, 压缩曲线可以在 $I_v - \lg \sigma_v'$ 分析体系中进行归一化。相同固结压力和孔隙比下, 渗透吸力越小, 次固结系数越大; 次固结系数与压缩指数的比值 C_α/C_c 的比值并不为常数, 随着渗透吸力的增大而减小。同样的初始孔隙比, 比例系数 $C_k = \Delta e / \Delta \lg k_v$ 随渗透吸力增加而非线性递减, 延拓了 Tavenas 认为比例系数 C_k 与初始孔隙比 e_0 线性相关的认知。

关键词: 固结试验; 重塑黏土; 渗透吸力; 固有压缩曲线; 次固结系数; 渗透系数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)12-2260-07

作者简介: 张彤炜 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事软黏土工程特性的研究。E-mail: ztw_123@163.com。

Experimental investigation of osmotic suction effect on hydro-mechanical behaviour of remolded clay

ZHANG Tong-wei¹, DENG Yong-feng¹, LIU Song-yu¹, YANG Zhong-chao²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The chemistry of pore water obviously affects the hydro-mechanical behaviour of clay, but the quantitative evaluation of pore water effect needs to be further conducted. The oedometer tests on kaolinite and Ca-bentonite mixtures saturated with different concentrations of NaCl solution are performed to investigate pore water chemical effect on the hydro-mechanical behaviour of remolded clay, where the osmotic suction is adopted as the characterization parameter. The results indicate that the compression index exponentially decreases with the osmotic suction, while the swelling index is almost constant. The compression behaviors after pre-yielding can be normalized in the $I_v - \lg \sigma_v'$ system proposed by Burland, but it is not suitable before pre-yielding. There is a negative correlation between the secondary consolidation coefficients and the osmotic suctions, furthermore, the ratio of the secondary consolidation coefficient to the compression index decreases with the osmotic suction. The coefficient of $C_k = \Delta e / \Delta \lg k_v$ to depict the hydraulic conductivity is related to the initial void ratio and can be expressed as a function of the osmotic suction, which extends the understanding of this parameter.

Key words: oedometer test; remolded clay; osmotic suction; intrinsic compression line (ICL); secondary consolidation coefficient; hydraulic conductivity

0 引言

随着近海(岸)开发战略的实施以及区域内的建筑、交通等基础设施建设, 其海相黏土的工程特性日益引起重视, 近海黏土具有高盐分含量的特点。

孔隙水的化学成分和力的耦合作用在岩土工程研究中日益引起重视, 例如使用黏土隔离墙或防渗层对污染土隔离和核废料深埋处治时均需考虑孔隙水盐分效应^[1]。在地基基础的建设过程中, 盐分变化对一些

特殊土的工程性质的影响也需引起关注, 以湿陷性黄土为例, 黄土中存在大量可溶盐, 当黄土的含水率较小时, 易溶盐处于微晶体状态, 附着在土颗粒表面,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378117, 41330641); 水利水运工程教育部重点实验室及国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金项目(SLK2012B01); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX_0148)

收稿日期: 2014-02-25

*通讯作者

起到一定的胶结作用;受水浸湿后,易溶盐溶解,这部分结构强度消失,土体产生湿陷^[2]。对于由工矿业的污染和海水入渗形成的盐渍土,土中含盐量增加,则液塑限降低,工程性质发生改变;同时盐渍土在盐分较高时,具有较高的强度,但盐分溶脱后,强度降低^[3]。工程设计一般依据现有盐分状态下土样指标或原位测试指标,并未考虑盐分变化使土体工程性质产生的变异,有可能为工程带来潜在的危害,如边坡失稳、地基承载力降低、变形或差异变形加大等。加拿大和瑞典等地学者通过现场调研,报道了盐分溶脱后软黏土地基上的公路变形加大、边坡失稳等现象^[4-5];国内也有滨海盐渍土地基盐分变化后发生失稳和变形增大等病害的报道^[6]。为此,不少学者开始关注孔隙水盐分对黏性土的化学作用机理,目前主要成果为建立在双电层扩散理论上的微观模型和建立在渗透吸力基础上的宏观模型。

根据双电层理论,片状黏土颗粒的表面带有负电荷,吸引孔隙水中的正电荷离子,形成扩散双电层。Bolt^[7]最早根据双电层理论做了电解质溶液对黏土压缩性的研究。Mitchell 等^[8]指出双电层间的电荷密度和电势能分布可用 Poisson-Boltzman 方程描述:

$$1/K=(DkT/8\pi n_0\varepsilon^2v^2)^{1/2}。$$

(1)

式中 $1/K$ 为双电层厚度; D 为介电常数; k 为 Boltzmann 常数, $k=1.38\times10^{-23}$ J/K; n_0 为溶液的离子浓度; ε 为单位静电荷; v 为离子价位; T 为绝对温度。式 (1) 表明双电层的厚度受孔隙水的介电常数、离子浓度、离子价位的影响。双电层中的阳离子浓度增加,具有较高的电势能,使双电层距离减小,双电层间斥力减小,引起孔隙直径和体积的减小。Sridharan 等^[9]根据双电层理论,推导了孔隙比与双电层间斥力的理论公式,但这一公式基于所有的黏土片都为理想的双电层模型这一假设,且需要确定的参数复杂,难以测定。因此出现了以渗透吸力为基础的宏观模型。

Barbour 等^[10]提出了单独采用孔隙水的渗透压为变量来研究孔隙水的化学作用引起的压缩特性与力学特性的变化,即渗透吸力。其后 Hueckel 等^[11]和 Loret 等^[12]将溶液的浓度和离子类型作为变量,从宏观角度研究了膨润土的本构模型。Guimaraes 等^[13]建立的预测模型中,将孔隙水的可交换离子的浓度与黏土的离子交换能力 CEC 的比值,作为土的微观弹性模量的参数。

以上的分析对象均为钠基膨润土,与天然黏土成分差异较大,且模型参数较多,难以应用。目前针对孔隙水盐分对天然黏土的力学特性研究很少,主要因为天然黏土矿物成分、孔隙水离子成分差异较大。天然黏土主要由高岭石、蒙脱石和伊利石矿物组成;同时海相沉积土初始沉积时孔隙水盐分以 NaCl 为主。

因此,本文基于已有的研究成果,采用商用高岭土与钙基膨润土混合土作为研究对象,模拟自然界中的重塑黏土;配制不同浓度的 NaCl 溶液作为孔隙水,以渗透吸力为参量,模拟天然沉积软土孔隙水盐分变化,进而研究孔隙水的渗透吸力对饱和重塑黏土压缩性的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验采用的材料为高岭土、钙基膨润土与 NaCl 溶液。商用高岭土产自江苏徐州,钙基膨润土产自江苏镇江市,土的基本物理指标如表 1 所示。

表 1 土样物理特性指标

Table 1 Physical properties of samples

土样	比重 G_s	比表面积 $/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	w_L /%	w_p /%	I_p /%
高岭土	2.65	20.7	31	19	12
钙基膨润土	2.72	734.0	321	95	226
混合土	2.66	163.4	53	21	32

试验采用 NaCl 分析纯配制溶液,溶液质量浓度为 1%, 3%, 5%, 10%, 换算摩尔浓度为 0.17, 0.52, 0.86, 1.7 mol/L。

1.2 试验方法

(1) 试样制备: 首先将干燥的高岭土与钙基膨润土按照 4:1 的质量比搅拌均匀,用四分法选取土样,按照 $w=30\%$ 的目标含水率加入蒸馏水与各种浓度的 NaCl 溶液,搅拌均匀后,采用自封袋密封放置在标准养护室内 24 h,养护温度为 20 ± 2 °C,相对湿度为 98%。养护完成后称取相同质量的土样密实填入环刀内,然后用相同的击实功压平,抽真空饱和后,称取试样质量,得到土的密度 $\rho=1.85$ g/cm³,初始含水率 $w_0=33\pm1\%$,换算后试样的初始孔隙比 $e_0=0.91\pm0.01$ 。

(2) 固结试验: 固结试样采用常规一维固结仪,试验过程中试样饱和,试样高度 20 mm,直径 61.8 mm,进行加荷比为 1 的分级加载压缩试验,加载范围 12.5~1600 kPa,分别在 200 kPa 和 1600 kPa 时卸载测土的回弹指数。常规一维固结试验中以 24 h 作为加载时间标准。试验完成后计算土的压缩指数、回弹指数、次固结系数、渗透系数等参数。

2 结果与讨论

2.1 渗透吸力的表征

土中的总吸力包括基质吸力和渗透吸力(溶质吸力)。渗透吸力(osmotic suction)是孔隙水自由能的溶质部分,渗透吸力的量测是通过测定孔隙水溶液相对于纯水的蒸汽压,其大小与溶质种类及浓度有关。

将各种离子浓度和类型的孔隙水，统一采用渗透吸力这一变量，表征孔隙水化学作用对土的力学特性的影响，是最易于应用的方法之一。Metten 等^[14]提出渗透吸力的计算可近似通过 Van's Hoff 方程计算：

$$\pi = \nu R T c \quad , \quad (2)$$

式中， π 为渗透吸力 (kPa)， R 为气体常量， $R=8.3145$ J/mol·K， T 为绝对温度 (K)， c 为溶液的摩尔浓度。Fredlund 等^[15]采用滤纸法测定的 NaCl 溶液的渗透吸力，如表 2 所示。对比表 2 与式 (2)，发现实测值与式 (2) 计算获得的渗透吸力存在一定的误差，本文分析中采用 Fredlund 等^[15]测试获得溶质吸力。由于试验过程试样始终饱和，因此本文未考虑基质吸力的作用。

表 2 不同浓度的 NaCl 溶液的渗透吸力(Fredlund 等^[15])

Table 2 Osmotic suction of NaCl solution

NaCl 摩尔浓度 /(mol·L ⁻¹)	渗透吸力/kPa				
	0℃	7.5℃	15℃	25℃	35℃
0	0	0	0	0	0
0.2	836	860	884	915	946
0.5	2070	2136	2200	2281	2362
0.7	2901	2998	3091	3210	3328
1.0	4169	4318	4459	4640	4815
1.5	6359	6606	6837	7134	7411
1.7	7260	7550	7820	8170	8490
1.8	7730	8035	8330	8700	9040
1.9	8190	8530	8840	9240	9600
2.0	8670	9025	9360	9780	10160

Witteveen 等^[16]采用滤纸法和湿度计法，对溶液和溶液与伊利石土的混合物进行吸力测试，结果表明了黏土基质对溶液的渗透吸力的影响可以忽略不计。因此，在室温 7.5±2℃时根据表 2 计算得到 1%，3%，5%，10%质量浓度的 NaCl 溶液的渗透吸力分别为 0.73，2.22，3.70，7.55 MPa，蒸馏水的渗透吸力近似取 0 MPa。

2.2 渗透吸力对压缩指数与固有压缩曲线的影响

国内外学者已经开展了针对盐分浓度对海相沉积软土初始孔隙结构和孔隙比的影响研究。Chen 等^[17]通过悬液稳定试验，分析了 10⁻³~1.0 mol/L 范围内不同的 NaCl 溶液浓度对高岭土沉积特性的影响，发现沉积的最终孔隙比受离子浓度控制，NaCl 溶液浓度越高，沉积稳定后的孔隙比越小。刘启贞^[18]和张倩^[19]认为入海河口水体中悬浮泥沙因盐度增大而发生絮凝沉淀，颗粒粒径增大。樊恒辉等^[20]提出双电层越厚，悬浮液中的颗粒的絮凝倾向就越小，即颗粒分散性能就越强。根据双电层理论，离子价越高，离子浓度越大，扩散层的厚度越小，所以盐分浓度高的介质环境可抑制土的分散性。

土体压缩性指标也是研究地基变形规律的关键参数，而对于同一种重塑黏土，其孔隙水盐分变化对土的压缩与回弹指数的影响并不明晰。图 1 为不同渗透

吸力下固结试样的 $e - \lg \sigma'_v$ 曲线，结果显示试样屈服后的压缩指数随渗透吸力变化发生明显改变。

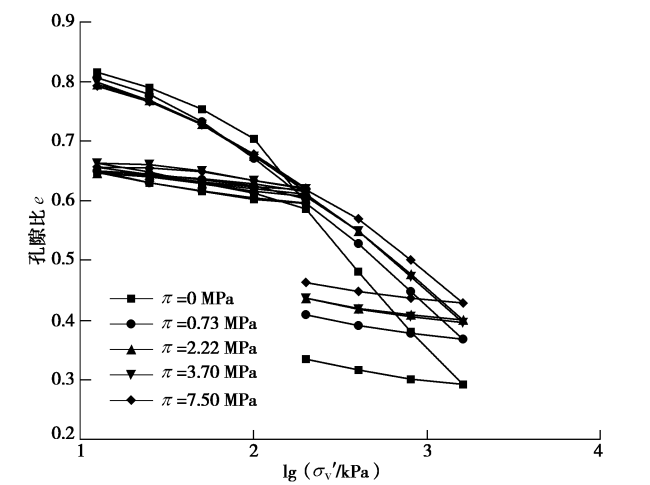


图 1 $e - \lg \sigma'_v$ 曲线
Fig. 1 $e - \lg \sigma'_v$ curves

为了描述渗透吸力对重塑黏土压缩特性的影响规律，根据 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》确定重塑黏土的回弹指数和压缩指数， C_{s1} 为 200~12.5 kPa 的回弹指数， C_{s2} 为 1600~200 kPa 的回弹指数， C_c 是试样屈服后的压缩系数，即试样屈服后 $e - \lg \sigma'_v$ 的斜率，如图 2 所示。

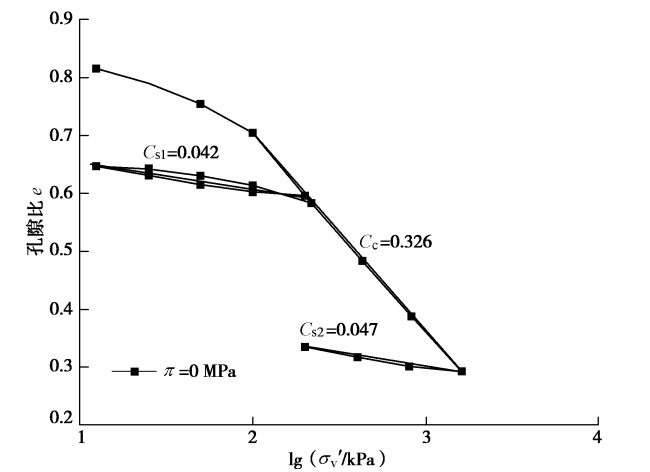


图 2 压缩指数和回弹指数确定示意图
Fig. 2 Determination of compression and swelling index

根据以上定义，压缩与回弹指数计算的结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出回弹指数 C_{s1} 和 C_{s2} ，随着渗透吸力增加，略微减小，基本不发生改变，这与 Witteveen 等^[16]使用伊利石土的试验结果相似。

而重塑土的压缩指数随着渗透吸力的增加而明显减小，且趋于常量，采用指数函数拟合，结果如下：

$$C_c = 0.23 + 0.097 \exp(-1.79\pi) \quad , \quad (3)$$

将压缩指数与渗透吸力的关系推广后得出

$$y = a + b \exp(-\lambda\pi) \quad , \quad (4)$$

式中 a, b, λ 代表试验中确定的常量, 本研究中 $a=0.23, b=0.097, \lambda=1.79$ 。需要说明的是, Sridharan 等^[21]在对日本 Ariake 海岸不同取样点的海相黏土调查试验后发现, 比表面积较大的蒙脱石组黏土矿物, 盐分浓度对其物理力学的影响受扩散双电层理论的控制, 如蒙脱石含量超过 20% 的 Kubota 黏土和 Kawazoe 黏土。因此, 式 (4) 中常数代表的物理意义推测与土的比表面积与矿物成分有关, 有待于进一步的研究。

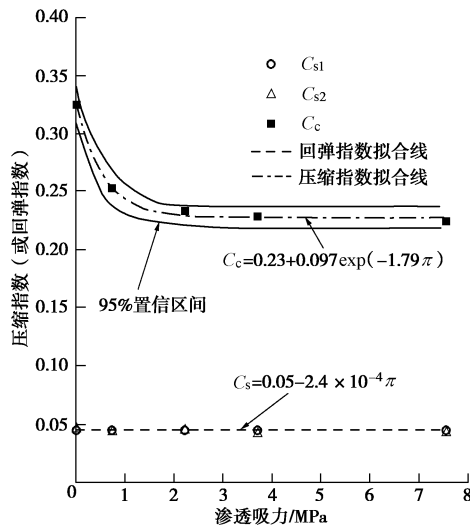


图 3 压缩指数与渗透吸力的关系曲线

Fig. 3 Relationship between compression index and osmotic suction

Burland^[22]提出含水率在 $w_L \sim 1.5w_L$ 之间的同一种重塑黏土存在固有压缩指数 $C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^*$, 它和内摩擦角 φ 一样为土的固有特性, 不随初始状态的变化而改变。同时通过试验发现, 采用孔隙指数 I_v 这一指标, 可以将所有重塑黏土的压缩曲线归一化于同一条曲线, 即 ICL (intrinsic compression line) 线, I_v 表达式如下:

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{1000}^* - e_{100}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (5)$$

式中, C_c^* 为土的固有压缩指数, e_{100}^* 为重塑土 100 kPa 竖向应力下的孔隙比, e_{1000}^* 为重塑土 1000 kPa 竖向应力下的孔隙比。需要指出的是, 本试验中土样在大于 100 kPa 的固结压力下压缩曲线均呈一直线, 因此 Burland 提出的 C_c^* 和 $e - \lg \sigma_v'$ 分析体系中 C_c 物理意义和数值是一致的。图 3 的结果表明, 固有压缩指数随着渗透压力增加而呈指数形式减小。Burland 体系中归一化的 ICL 曲线表达式为

$$I_v = 2.45 - 1.285 \lg \sigma_v' + 0.015 (\lg \sigma_v')^3 \quad (6)$$

式中, σ_v' 代表竖向有效应力 (kPa)。

图 4 显示 $\lg \sigma_v' - I_v$ 坐标系中, 土样在不同的渗透吸力作用下, 达到屈服应力之后, 即 100~1600 kPa 之间, 同样可以归一化为一条曲线, 表达式为

$$I_v = 2.65 - 1.88 \lg \sigma_v' + 0.3 (\lg \sigma_v')^2 - 0.06 (\lg \sigma_v')^3 \quad (7)$$

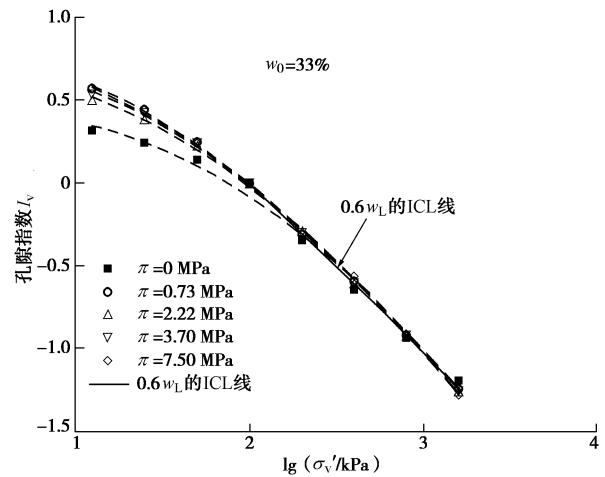


图 4 固有压缩曲线

Fig. 4 Intrinsic compression lines

本研究中归一化公式与提出的式 (6) 不同, 其原因可能为本试验土的含水率为 $0.6w_L$ 。图 4 的结果也发现, 同一重塑黏土屈服前, $\lg \sigma_v' - I_v$ 曲线初始段的斜率随着渗透吸力增大而增大, 即渗透吸力对 $\lg \sigma_v' - I_v$ 曲线初始段的斜率有影响。而屈服后, 不同的渗透吸力下 $\lg \sigma_v' - I_v$ 曲线仍可归一化为同一条压缩曲线。

2.3 渗透吸力对次固结系数的影响

土体的次固结变形指在超孔隙水压力消散后, 有效应力基本稳定, 因土粒表面的结合水膜蠕变及土粒结构重新排列等作用而引起变形^[23]。次固结变形的计算, 通常采用土体次固结阶段的变形与时间增长的相关关系式。次固结系数是反映土体次固结变形的参数, 定义为次固结变形过程中孔隙比增量与对数时间增量的比值:

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \lg t} \quad (8)$$

式中, e 是孔隙比, t 为时间。

目前对于土体次固结变形规律的研究主要集中在应力历史、应力水平、加载速率、孔隙比等对次固结的影响^[24]。Mesri 等^[25]认为同一种土的次固结系数 C_α 与该级固结压力下的压缩指数 C_c 比值为常数, 并采用 C_α/C_c 这一指标预测土的次固结变形, 以上研究均未考虑孔隙水的化学作用对次固结系数的影响。为此, 本文在渗透吸力、应力水平和孔隙比 3 个参量下讨论重塑黏土次固结系数。

图 5 为蒸馏水浓度为 0.17 mol/L 的 NaCl 溶液 $e - \lg t$ 曲线对比, 从图 5 中可以看出, 在 24 h 试验时间范围内, 土体进入次固结阶段后 $e - \lg t$ 近似成线性关系, 且 NaCl 溶液制备试样的次固结系数较小, 并都随着固结压力的增大而减小。摩尔浓度为 0.52, 0.86, 1.7 mol/L 的 NaCl 溶液 $e - \lg t$ 曲线也具有相同的规律。

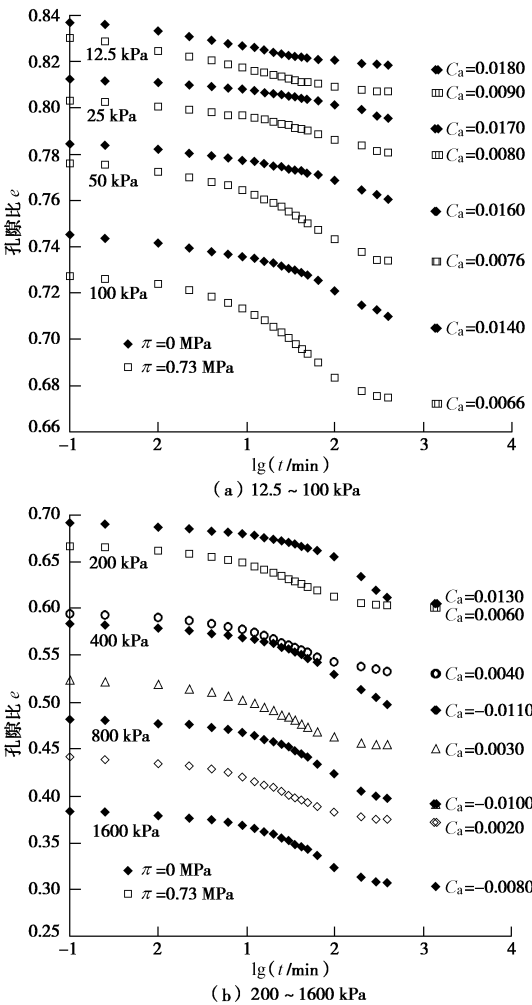


图 5 孔隙比与固结时间的关系

Fig. 5 Typical curves of void ratio versus elapsed time

图 6 为 $C_a - \lg \sigma'_v$ 关系曲线, 结果显示, 不同浓度 NaCl 溶液制备的重塑黏土试样, 次固结系数随着固结压力的增大而减小, 且 $C_a - \lg \sigma'_v$ 关系曲线随着渗透吸力的增加而向下移动。

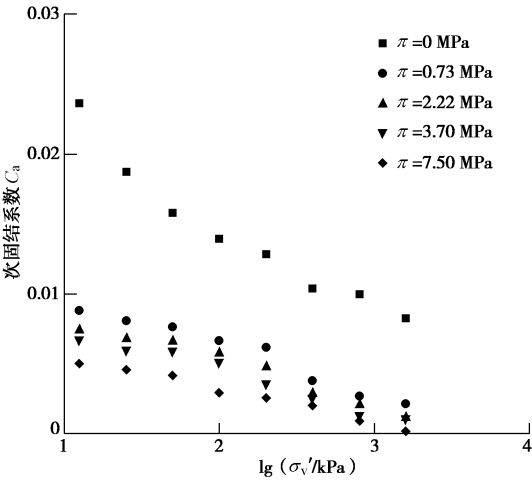


图 6 $C_a - \lg \sigma'_v$ 关系

Fig. 6 Relationship between C_a and $\lg \sigma'_v$

不同固结压力下最终的孔隙比与对应的次固结系数绘于图 7 中, 结果说明重塑黏土的次固结系数随着

孔隙比的减小而减小; 相同孔隙比下, 渗透吸力越小, 次固结系数越大。

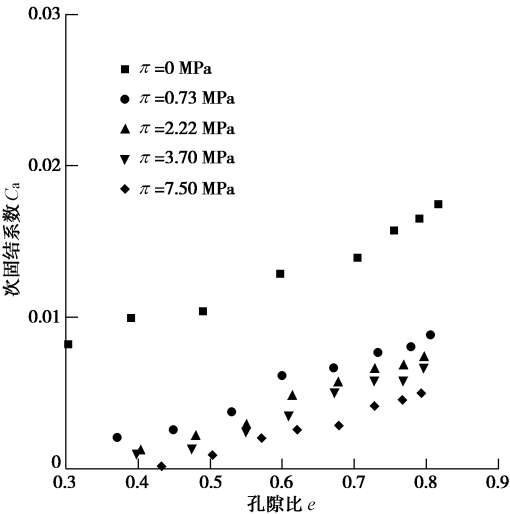


图 7 $C_a - e$ 关系

Fig. 7 Relationship between C_a and e

图 8 结果显示, 在同样的固结压力下, C_a/C_c 的比值并不为常数, 而是随着渗透吸力的增大而减小。 C_a/C_c 为 Mesri 评价次固结变形的重要参数, 且在某一压力下为常数, 但试验结果显示其随着孔隙水渗透吸力而发生变化。

综上所述, 孔隙水渗透吸力的改变对土的次固结变形产生重要影响。为此在含盐量较高的场地, 应考虑孔隙水渗透吸力的变化对地基次固结变形的影响。

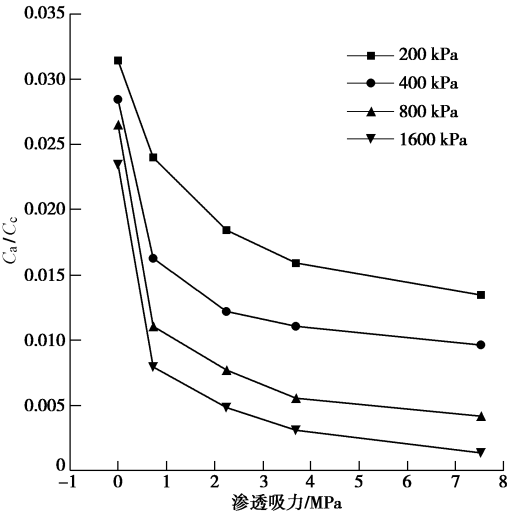


图 8 $C_a/C_c - \pi$ 关系

Fig. 8 Relationship between C_a/C_c and π

2.4 渗透吸力对渗透系数的影响

渗透系数是反映土体力学特性的一个重要参数, 它与地基变形、地下水渗流等工程问题密切相关。众多学者研究表明, 渗透系数 k 在固结过程中的变化规律与孔隙比 e 有关。Taylor^[26]提出渗透系数 k 的对数值随孔隙比 e 的变化呈线性关系:

$$\lg k_v = \lg k_{v0} - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (9)$$

式中 e_0 为土体初始状态的孔隙比; k_{v0} 为土体初始状态 e_0 下的渗透系数; C_k 为比例常数, 即渗透系数的对数增量与孔隙比增量的比值。

Tavenas 等^[27]在 Taylor 理论的基础上, 将比例常数 C_k 定义为应变小于 20% 的 $e - \lg k$ 曲线的斜率, 并经过大量初始孔隙比为 0.8~2.0 的土样进行室内试验, 提出了比例常数与初始孔隙比 e_0 存在线性关系:

$$C_k = 0.5e_0 \quad (10)$$

对于同一种土体, 初始状态 e_0 发生变化, 初始渗透系数 k_{v0} 和 C_k 便会发生变化。但以上研究均未考虑土体内孔隙水的化学作用对渗透系数的影响。

结合本文数据, 首先绘制变形与时间对数的关系曲线, 在曲线中确定固结度达到 50% 所需时间 t_{50} , 结合下式计算固结系数:

$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}} \quad (11)$$

式中, H 为最大排水距离, 即某级压力下试样高度平均值的一半。根据一维固结理论, 渗透系数 k 可由下式计算:

$$k = \frac{C_v \gamma_w \alpha_v}{1 + e} = \frac{C_v \gamma_w}{E_s} \quad (12)$$

式中, α_v 为压缩系数, E_s 为压缩模量。不同渗透吸力下 $\lg k$ 与孔隙比 e 的关系如图 9 所示。从图 9 中看出, 渗透系数的对数随孔隙比增加而线性递增, 但同样的初始孔隙比, 比例系数 $C_k = \Delta e / \Delta \lg k_v$ 却存在着明显差异。 C_k 与渗透吸力 π 的关系如图 10 所示, 结果表明比例系数 C_k 随着渗透吸力增加非线性递减, 这延拓了 Tavenas 在 C_k 上的认知。因此在根据初始孔隙比预测渗透系数的变化时, 应考虑孔隙水盐分或渗透吸力的影响。

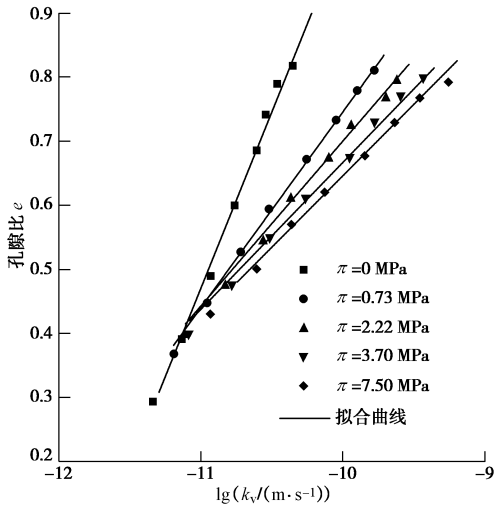


图 9 $e - \lg k_v$ 关系曲线

Fig. 9 Relationship between e and $\lg k_v$

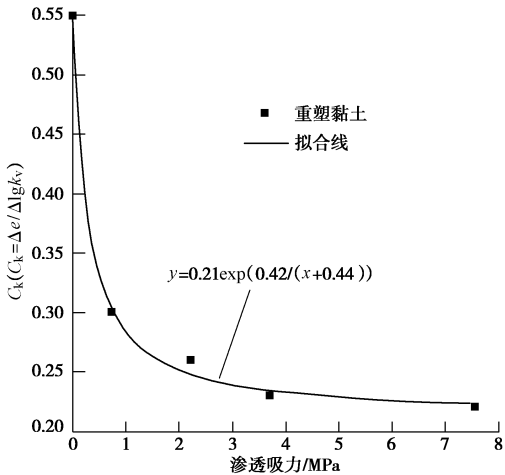


图 10 C_k 与渗透吸力 π 的关系曲线

Fig. 10 Relationship between C_k and osmotic suction

3 结 论

本文以商用高岭土与钙基膨润土混合土作为研究对象, 用不同浓度的 NaCl 溶液与土混合, 采用渗透吸力这一变量描述孔隙水盐分效应, 探究孔隙水的化学场对饱和和重塑黏土压缩和渗透特性的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 在 $e - \lg \sigma'_v$ 分析体系中, 压缩指数 C_c 随着渗透吸力的增加而呈指数衰减的规律减小; 回弹指数随着渗透吸力增加, 有减小的趋势, 基本不发生改变;

(2) 在 $I_v - \lg \sigma'_v$ 分析体系中, 渗透吸力对曲线初始段的斜率有较大影响; 而屈服后, 压缩曲线可以在 $I_v - \lg \sigma'_v$ 分析体系中进行归一化。

(3) 不同浓度 NaCl 溶液制备的重塑黏土试样, 次固结系数随着固结压力的增大而减小, 且 $C_a - \lg \sigma'_v$ 关系曲线随着渗透吸力的增加而整体下移; 相同孔隙比下, 渗透吸力越小, 次固结系数越大; 在同样的固结压力下, C_a/C_c 的比值并不为常数, 而是随着渗透吸力的增大而减小。

(4) 渗透系数与孔隙水盐分的分析结果表明, 同样的初始孔隙比, 比例系数 $C_k = \Delta e / \Delta \lg k_v$ 随渗透吸力增加而非线性递减, 因此延拓了 Tavenas 认为比例系数 C_k 与初始孔隙比线性相关的认知。为此, 在根据初始孔隙比预测渗透系数的变化时, 应考虑渗透吸力的影响。

参考文献:

[1] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. Géotechnique, 2010, 60(1): 3 - 74.
[2] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1692 - 1698.
(ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative assessment on change in microstructure of loess during collapsing using electrical resistivity measurement[J]. Rock and

- Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1692 – 1698. (in Chinese))
- [3] 李永红. 氯盐渍土的变形和强度特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. (LI Yong-hong. Research on the deformation and strength property of chlorine saline soil[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2006. (in Chinese))
- [4] BJERRUM L, ROSENQVIST I T. Some experiments with artificially sedimented clays[J]. *Géotechnique*, 1956, **6**(3): 124 – 136.
- [5] RANKKA K, ANDERSSON-SKÖLD Y, HULTEN C, et al. Quick clay in Sweden[J]. Swedish Geotechnical Institute Report, 2004, **65**: 145.
- [6] 柴寿喜, 王晓燕, 魏 丽, 等. 滨海盐渍土的工程地质问题与防护固化方法[J]. *工程勘察*, 2009(7): 1 – 4. (CHAI Shou-xi, WANG Xiao-yan, WEI Li, et al. Analysis on engineering geological problems of inshore saline soil and treatment measures[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009(7): 1 – 4. (in Chinese))
- [7] BOLT G H. Physico-chemical analyses of the compressibility of pure clay[J]. *Géotechnique*, 1956, **6**: 86 – 93.
- [8] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [9] SRIDHARAN A, JAYADEVA M S. Double layer theory and compressibility of clays[J]. *Géotechnique*, 1982, **32**(2): 133 – 144.
- [10] 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.
- [11] HUECKEL T. Chemo-plasticity of clays subjected to stress and flow of a single contaminant[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(1): 43 – 72.
- [12] 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 and Structures*, 2002, **39**(10): 2773 – 2806.
- [13] GUIMARAES L D N, GENS A, SANCHEZ M, et al. A chemo-mechanical constitutive model accounting for cation exchange in expansive clays[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(3): 221 – 234.
- [14] MERTEN Ulrich. Desalination by reverse osmosis[M]. Massachusetts: MIT Press, 1966.
- [15] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [16] WITTEVEEN P, FERRARI A, LALLOU L. An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behaviour of a clay[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(3): 244-255.
- [17] CHEN J, ANANDARAJAH A. Influence of pore fluid composition on volume of sediments in kaolinite suspensions[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1998, **46**(2): 145 – 152.
- [18] 刘启贞. 长江口细颗粒泥沙絮凝主要影响因子及其环境效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. (LIU Qi-zhen. Study on the flocculation parameters of fine sediments and the environmental effects in the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. (in Chinese))
- [19] 张 倩. 水化学环境变化对多孔介质强度和渗透性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. (ZHANG Qian. Effects of different electrical solutions on strength and permeability of saturated porous[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))
- [20] 樊恒辉, 李洪良, 赵高文. 黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(9): 1740 – 1745. (FAN Heng-hui, LI Hong-liang, ZHAO Gao-wen. Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(9): 1740 – 1745. (in Chinese))
- [21] SRIDHARAN A, EL-SHAFEI A, MIURA N. Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2002, **20**(1): 21 – 50.
- [22] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 329 – 378.
- [23] 曾玲玲, 洪振舜, 刘松玉, 等. 重塑黏土次固结性状的变化规律与定量评价[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(8): 1496 – 1500. (ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, CHEN Fu-quan, Variation law and quantitative evaluation of secondary consolidation behavior for remolded clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(8): 1496 – 1500. (in Chinese))
- [24] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(5): 521 – 526. (YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(5): 521 – 526. (in Chinese))
- [25] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, **103**(5): 417 – 430.
- [26] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[J]. *Soil Science*, 1948, **66**(2): 161.
- [27] TAVENAS F, LEBLOND P, JEAN P, et al. The permeability of natural soft clays. Part I: methods of laboratory measurement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, **20**(4): 629 – 644.