

DOI: 10.11779/CJGE201809016

考虑孔隙水盐分效应的人工软黏土工程特性与本构模型

张彤炜^{1, 2}, 邓永峰^{*2}, 吴子龙², 刘松玉², 刘垚²

(1. 兰州大学土木工程与力学学院地质工程系 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 中国江苏北部连云港地区海相软土蒙脱石族矿物含量相对较高, 且在海陆交互环境沉积形成, 沉积过程中具有孔隙水盐分较高的特点, 但在后沉积过程中由于地表和地下淡水入侵, 会使孔隙水盐分发生变化。工程设计一般依据既有地下水环境中土体参数, 未能考虑盐分变化后土体参数变化, 会造成工程安全系数的冗余度不足, 进而导致工程风险。为了解决江苏北部地区基础设施运营中, 孔隙水盐分变动环境下软黏土地基长期性状与工程性质变异问题, 需要深入了解矿物成分、孔隙水盐分在软黏土物理和力学特性中的作用机制。由于天然软黏土的矿物成分、孔隙水成分差异较大, 在黏土矿物盐敏性的研究和当地地下水盐分测试基础上, 试验材料采用矿物成分均一的商用高岭土与膨润土组成的人工黏土作为研究对象, 配制不同浓度的 NaCl 溶液作为孔隙水, 模拟孔隙水盐分变化。通过液塑限试验、常规固结试验和固结不排水剪切试验, 发现对于含蒙脱石矿物的人工黏土, 液限 w_L 、压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 随着孔隙水盐分的增加而减小, 而内摩擦角随着孔隙水盐分的增加而增加; 对于高岭石矿物为主的人工黏土, 液限 w_L 、压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 和内摩擦角都基本不随孔隙水盐分的增加而改变。将孔隙水盐分效应采用渗透吸力进行表征, 在试验规律、修正剑桥模型和 BBM 模型认知的基础上, 建立了考虑盐分效应的人工软黏土本构模型, 并对比了计算结果与试验结果, 两者在趋势上较为接近, 验证了本构模型的实用性, 可为近海岩土工程设计提供参考。

关键词: 人工软黏土; 孔隙水盐分; 矿物成分; 工程特性; 本构模型

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)09-1690-08

作者简介: 张彤炜(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事特殊土工程性质的研究工作。E-mail: ztw@lzu.edu.cn。

Engineering behavior and constitutive model of artificial soft clay considering pore water salinity effect

ZHANG Tong-wei^{1, 2}, DENG Yong-feng², WU Zi-long², LIU Song-yu², LIU Yao²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Department of Geotechnical Engineering, Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The soft marine clay, which is deposited under the marine environment in the north plain of Jiangsu Province, is rich of montmorillonite mineral and saline pore water. During the post-sedimentary period, the soil suffers the invasion of the surface and underground freshwater, leading to the alteration and reduction of pore water salinity. Presently, the safety evaluation is generally based on the in-situ soil strength in the current environment. Hence, this non-consideration of the pore water salinity alteration may result in insufficient redundancy and potential risk. To clarify the evolution of the hydro-mechanical behavior of soils due to the alteration of pore water salinity during the operation of the coastal infrastructure, the impact of pore water salinity and clay mineral on the soil behavior is necessary to be investigated. To simplify the mineralogical influence, commercial kaolin and bentonite are selected. The physical and mechanical properties of artificial clay changing with pore water salinities (NaCl solution) are investigated using the Atterberg limits tests, oedometer tests and tri-axial tests. The results show that the liquid limits, compression index C_c and swelling index C_s of the artificial clay containing bentonite decrease with the pore water salinity, and its internal friction angle increases with the pore water salinity. Meanwhile, the liquid limits, compression index C_c , swelling index C_s and consolidated undrained strength of Kaolin are not affected by the pore water salinity. Finally, based on the test results, modified Cambridge model and BBM model, an updated constitutive model considering pore water salinity effect represented by the osmotic suction is proposed, and the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378117, 41572280, 41807225, 41790443); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2018); 国家重点研发项目(2016YFC0800201)

收稿日期: 2017-10-19

*通讯作者 (E-mail: noden@seu.edu.cn)

reliability is verified by the comparison between the calculated and measured data. These results will provide a reference for the design of coastal engineering.

Key words: artificial soft clay; pore water salinity; clay mineral; engineering behavior; constitutive model

0 引言

由于古黄河改道, 中国江苏北部连云港地区海相软土的蒙脱石族矿物含量较高, 且在海洋沉积环境下形成, 具有孔隙水盐分浓度较高的特点。李国刚^[1]使用X射线衍射的方法分析了中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成和分布。分析结果显示, 距离海岸线越远, 蒙脱石含量越低, 江苏北部地区近海表层沉积物中蒙脱石族含量在18%以上。根据《江苏省水文地质图》获得的矿化度等值曲线显示, 距离海岸线越近, 矿化度越高, 孔隙水中的可溶盐中则以NaCl为主。

邓永峰等^[2]对距海岸线不同距离处的两条公路(连临高速公路与临海高等级公路)进行多孔原位勘察和测试, 并选取离海岸线50 m处和离海岸线30 km处两个取样点, 分析两个场地土体的矿物成分和离子浓度等主要参数。分析结果显示, 取样点土体的次生矿物以伊蒙混层为主, 孔隙水以Na⁺和Cl⁻两种离子成分为主。近海点位孔隙水的总含盐量为4.9%, 而远离海岸线点位孔隙水的盐分约为0.9‰。对于相同矿物成分与应力历史的软黏土, 由于盐分浓度的差异, 土体的原位强度差异较大。早在1967年, Bjerrum^[3]曾提出由于人类活动和降雨, 高盐分的黏土在缓慢的淋滤作用下, 孔隙水盐分逐渐变淡, 从而引起抗剪强度的降低和灵敏度的升高, 形成了北欧大陆的quick clay。近年来, 由于黏土隔离墙或防渗层应用于污染土隔离和核废料深埋处治, 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^[4], 而目前国内关于盐分对不同矿物构成的黏性土的物理力学行为和本构关系的研究较少^[5]。解决江苏北部地区基础设施运营中出现的软黏土地基问题, 就需要对矿物成分、孔隙水盐分在软黏土物理力学特性中所起的作用, 有一个较为全面的认识。因此, 明晰盐分浓度、矿物成分与土体强度的关系, 具有重要的意义。

天然黏土矿物成分、孔隙水离子成分差异较大。为了控制分析变量, 本文试验材料采用矿物成分均匀的商用高岭土与膨润土组成的人工黏土作为研究对象, 其黏土矿物分别为高岭石和蒙脱石, 是软黏土中典型的黏土矿物; 配制不同浓度的NaCl溶液模拟天然沉积软土孔隙水盐分变化。在液塑限试验、常规固结试验和三轴固结不排水剪切试验的基础上, 探讨盐分对人工黏土基本物理特性、压缩特性和强度特性的影响。在试验规律、修正剑桥模型和BBM模型认知的基

础上, 提出考虑盐分作用的重塑人工黏土本构模型。

1 试验方法

1.1 试验材料

邓永峰等^[2]对连云港地区软黏土进行了调查, 其基本初始参数如表1所示, 且伊蒙混层含量在20%~30%。为了探讨不同黏土矿物成分对盐分的响应, 参照连云港地区软黏土的初始状态, 并采用高岭土与膨润土质量比4:1的人工黏土, 命名为B20K80(字母之后的数字代表质量百分比); 同时选用纯高岭土试样进行对比, 命名为K, 试样的初始参数如表1所示。

1.2 试验过程

首先, 进行人工黏土的液塑限试验。将人工黏土(B20K80)和高岭土(K)与蒸馏水或不同浓度的NaCl溶液(质量浓度0%, 1%, 3%, 5%, 10%)混合后, 根据《土工试验方法标准GB/T 50123》, 采用锥式仪测定液限, 采用搓条法确定塑限。测定含水率过程中, 按照NaCl溶液的质量浓度, 扣除盐分晶体的质量。

然后, 进行人工黏土的常规固结试验。根据Burland^[6]提到的重塑土固结试验的方法, 将2种试验材料与蒸馏水或不同浓度的NaCl溶液混合至泥浆状态(1.2倍液限以上), 试样的初始状态如表1所示, 加载过程参照《土工试验方法标准GB/T 50123》, 从1 kPa开始按照1:2的加载比例逐级加载至1600 kPa。

最后, 进行固结不排水剪切试验, 采用如下方法制样: 为了模拟海相沉积形成的正常固结软黏土, 根据Hong等^[7]中提到的方法, 采用大直径固结仪(高度15 cm, 直径20 cm), 将黏土从泥浆状态进行预固结(试样初始状态如表2所示)。分3层填筑完成后, 按照1.6, 3.2, 6.7, 16, 37, 74 kPa的顺序加载。将间隔一小时变形小于0.01 mm作为主固结完成的标准, 或者根据固结曲线中次固结拐点的出现作为每级荷载固结完成的标准。土体具备一定的强度后, 切割为三轴试验的试样的尺寸(直径39.1 mm, 高度80 mm), 抽真空饱和后, 在GDS三轴仪中进行固结不排水剪切试验。

三轴固结不排水剪切试验中, 对试样继续饱和。饱和的方法为设置围压大于反压5 kPa, 饱和大于24 h后再次检查B值。然后施加围压进行等向固结, 有效围压 σ'_3 (扣除反压)为100, 200和400 kPa。试验过

表1 连云港软土及常规固结试验的试样初始参数

Table 1 Initial states of Lianyungang clay and samples in oedometer tests

试样	NaCl浓度/%	w_0 /%	w_L /%	e_0	颗粒/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
连云港软土 ^[2]	0.09~4.9	58~81	51~79	1.52~2.18	0~0.2	70.3~77.7	22.3~29.5
B20K80	0, 1, 3, 5, 10	62±1	52	1.74±0.02	1.2	58.8	40.0
K	0, 1, 3, 5, 10	42±1	33	1.08±0.02	0	63.0	37.0

表2 大直径固结的试样初始参数

Table 2 Basic properties of samples in large-scale consolidation tests

试样	NaCl浓度/%	高度/cm	直径/cm	w_0 /%	e_0	ρ /(Mg·m ⁻³)	w_L /%
B20K80-PreCU-0%	0	13	20	62±1	1.74±0.02	1.57	52
B20K80-PreCU-5%	5	13	20	62±1	1.74±0.02	1.57	52
K-PreCU-0%	0	13	20	42±1	1.08±0.02	1.82	33
K-PreCU-5%	5	13	20	42±1	1.08±0.02	1.82	33

程中围压为瞬时加载, 固结结束的标准为试样体应变基本稳定或者超静孔隙水压力接近消散, 整个过程持续约 7~14 d。固结结束后, 进入不排水剪切过程, 试样剪切速率为 0.073 mm/min。剪切出现峰值后, 或达到超过 20% 的轴向应变, 结束试验并卸除压力。

2 盐分对人工黏土的物理特性的影响

图 1 为不同人工黏土液塑限与 NaCl 溶液浓度的关系, 从图中可以看出, 随着 NaCl 溶液浓度的增加, B20K80 的液限从 52% 下降到 35%。但是 K 的液限与塑限随 NaCl 浓度变化并不明显, 变化范围为 1%~2%。

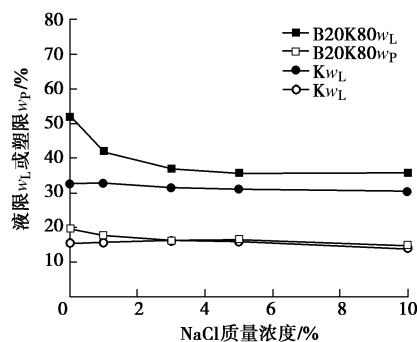


图1 人工黏土液塑限随盐分的变化

Fig. 1 Change of liquid and plastic limits of artificial clay with pore water salinity

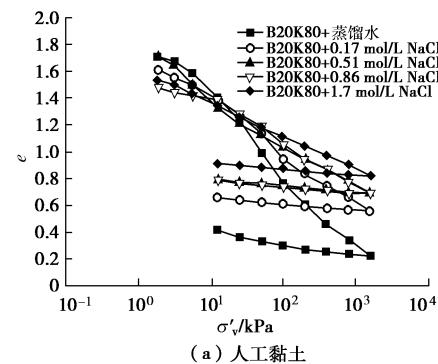
Sridharan 等^[8-9]最早开展了膨润土和高岭土液限随盐分发生改变的研究, 认为膨润土液限一般由吸附结合水厚度决定, 而高岭土的液限则受结合水厚度影响较小。当孔隙之间充满 NaCl 溶液后, 根据双电层理论, 双电层的厚度由于孔隙水的离子浓度升高而变薄, 颗粒间引力大于斥力, 发生絮凝现象。因此, 对于比表面积大的蒙脱石, 双电层的作用占主导, 盐分增加带来的结合水膜厚度的降低与絮凝现象降低了土

液限, 因此出现图 1 的试验结果^[10]。

3 盐分对人工黏土的压缩特性的影响

土体压缩指数与回弹指数是研究地基变形规律的关键参数, 而对于不同矿物成分的黏土, 其孔隙水盐分对土的压缩与回弹指数的影响并不明晰。

图 2 (a)、(b) 分别为试样 K 和 B20K80 的压缩曲线 $e - \lg \sigma'_v$, 其中孔隙水 NaCl 的质量浓度分别为 0%, 1%, 3%, 5% 和 10%, 对应的物质的量浓度分别为 0, 0.17, 0.51, 0.86, 1.7 mol/L。从试验结果看出, 重塑高岭土 K 的压缩曲线直线段的斜率与回弹曲线的斜率基本不随孔隙水盐分浓度的改变而发生变化。但是, 人工黏土 B20K80 压缩曲线直线段的斜率和回弹曲线的斜率则明显受孔隙水的盐分浓度影响: 两者随着孔隙水盐分浓度的升高而减小。需要注意的是张彤伟等^[5]、Witteveen 等^[11]对不同矿物成分的纯黏土进行压缩试验, 发现回弹曲线的斜率对盐分的响应不明显。可能原因是, 文献中初始含水率低于液限, 处于可塑状态, 土颗粒的水化尚不完全。本研究中初始含水率高于液限, 土中自由水使颗粒之间分离, 黏土矿物水化更加充分。因此, 初始泥浆状态的试样, 回弹过程受结合水膜厚度的影响更明显, 具体原因尚需进一步论证。



(a) 人工黏土

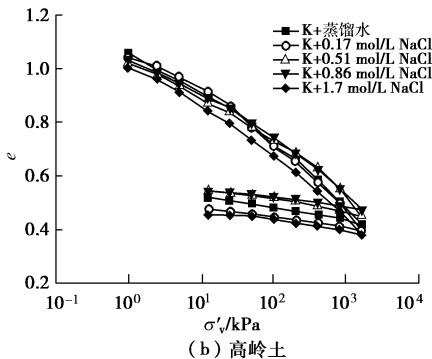


图 2 压缩曲线对比

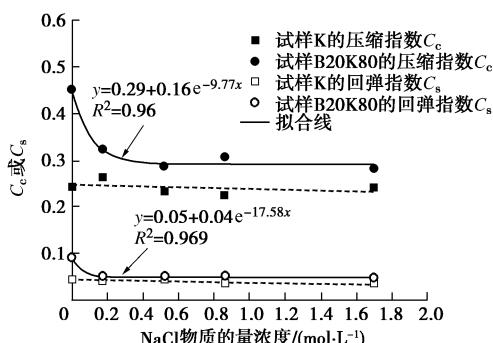
Fig. 2 Compression curves of samples

为了描述孔隙水盐分对重塑黏土压缩特性的影响规律, 根据《土工试验方法标准 GB/T50123》确定重塑黏土的回弹指数和压缩指数, C_c 是试样压缩曲线 $e - \lg \sigma'_v$ 直线段的斜率, $C_c = -\Delta e / \Delta \lg \sigma'_v$, 反映了正常固结土的压缩性; C_s 是卸载后膨胀回弹曲线的斜率。压缩指数 C_c 与回弹指数 C_s 的计算的结果与盐分浓度的关系如图 3 所示。结果显示, 人工黏土 B20K80 的 C_c 和 C_s 随着盐分浓度的增加而减小, 且趋于常量, 采用指数函数拟合 (式 (1)), 可以得到较好的相关性 ($R^2 > 0.95$):

$$y = a + b e^{-cx} \quad , \quad (1)$$

式中, a , b , c 均为试验确定的经验常数 (图 3)。对于高岭土试样 K, 其压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 基本为常数, 不随孔隙水盐分浓度的变化而改变。

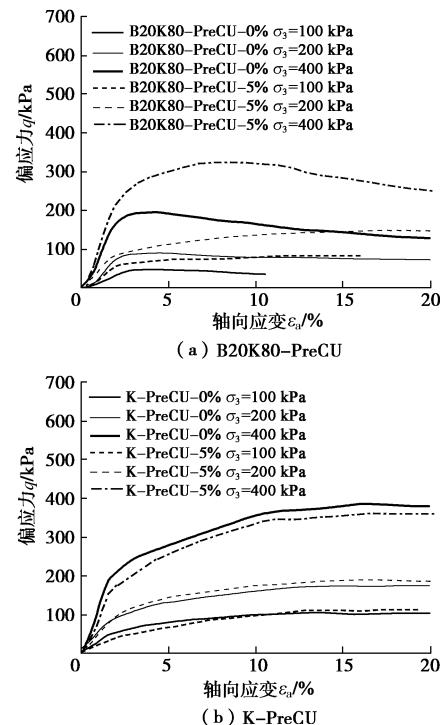
孔隙水盐分对人工软黏土压缩行为影响的机理可进行如下解释: 在压缩过程中, 自由水被缓慢排出, 颗粒间的压缩性逐渐由结合水厚度控制。对于含蒙脱石矿物的纯黏土, 结合水的厚度由于孔隙水的离子浓度升高而变薄, 且颗粒间互相靠近过程中引力大于斥力, 结合成团粒, 因此压缩性降低。而对于高岭土, 双电层理论并不一定适用^[9], 结合液塑限的试验结果, 离子浓度的改变没有对高岭土的结合水能力产生明显的影响, 因此压缩性并未产生明显的差异。

图 3 压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 与孔隙水盐分浓度的关系Fig. 3 Relationship among compression index C_c , swelling index C_s and NaCl molarity

4 盐分对人工黏土的强度特征的影响

按照 0.073 mm/min 的剪切应变速率进行固结不排水试验, 得到偏应力 q 与轴向应变 ε_a 的关系, 结果如图 4 所示。根据《土工试验方法标准 GB/T50123》, 按照峰值强度, 或应变达到 15% 处的偏应力作为屈服强度。

从图 4 (a) 的试验结果看出, 当孔隙水为蒸馏水时, B20K80-Pre-CU 试样呈现应变软化, 有明显的峰值强度和残余强度。但是, 当孔隙水为 NaCl 溶液时, B20K80-Pre-CU 试样则未呈现明显的应变软化。同时, 人工黏土 B20K80 试样, 在不同的有效固结压力下, 盐分明显提高了其峰值强度。图 4 (b) 的试验结果显示, 高岭土试样 K-Pre-CU-0% 和 K-Pre-CU-5% 的应力都随着应变的发展而趋于一个稳定值, 在应力不变的条件下塑性应变不断发展, 呈现应变硬化。对于高岭土试样, 孔隙水的化学成分对稳定后的强度及应力 - 应变曲线的形态都未产生明显的影响。

图 4 偏应力 q 与轴向应变 ε_a 的关系Fig. 4 Relationship between deviatoric stress q and axial strain ε_a

在量测孔压的基础上, 绘制 B20K80-Pre-CU 和 K-Pre-CU 试样的有效应力莫尔圆和强度破坏包线于图 5。结果显示, 土的不排水强度随着固结压力的增大而增大, 由于起始有效固结压力 (100 kPa) 大于制样前的前期固结压力 (74 kPa), 强度包线是过原点的直线, 内黏聚力 $c=0$ 。从图 5 (a) 中看出, 对于含蒙脱石的人工黏土 B20K80, 盐分的加入明显增加了有

效内摩擦角 φ' 。而图 5 (b) 显示, 对于高岭土试样, 盐分则对有效内摩擦角 φ' 无明显的改变。

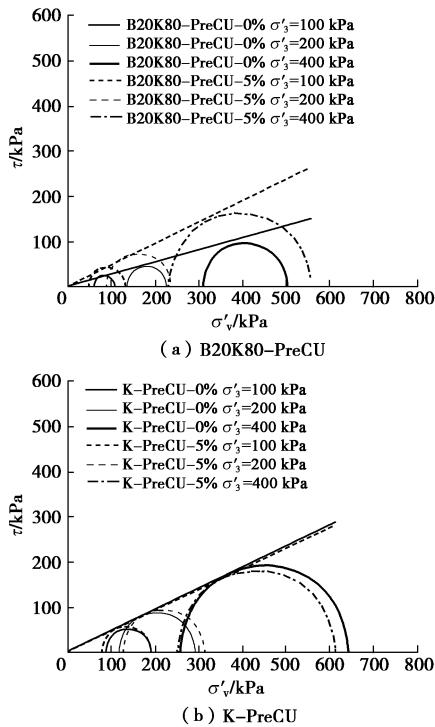


图 5 莫尔应力圆和强度破坏包线

Fig. 5 Mohr's stress circles and strength envelopes

以往学者已经开始关注黏性土的物理性质与强度之间的关系^[12-15]。其中, Trask 等^[12]对不同矿物成分黏土的抗剪强度展开研究, 结果显示对于同一种含水率, 蒙脱石土的强度高于伊利石土和高岭石土; 对于相同的抗剪强度, 3 种土含水率从高到低依次为蒙脱石土、伊利石土和高岭石土。Tiwari 等^[15]将不同矿物构成的黏性土在 1 倍液限含水率的状态下重塑后进行固结慢剪试验, 最终对土体有效内摩擦角与液限 w_L 的相关性进行了总结。为了扩大研究范围, 将 Tiwari 和 Ajmera 试验中数据与本文数据进行对比 (图 6), 可以发现有效内摩擦角 φ' 与液限有一定的相关性, 拟合结果可以采用下式表示:

$$\varphi'(w_L) = 15 + \frac{10.4}{1 + (w_L / 40.7)^3} \quad (2)$$

结合图 1, 6 的试验结果发现, 盐分如果对人土黏土 (B20K80) 的液限含水率产生影响, 则会进一步影响重塑土的内摩擦角; 盐分如果对人土黏土 (K) 的液限含水率不产生影响, 则对重塑土的内摩擦角也无明显改变。

其机理可以从盐分对颗粒的有效接触面积的改变进行解释。从黏性摩擦理论分析^[10], 接触面的切向力 $T = A_c \cdot \tau_m$, 其中 A_c 为屈服后界面的真实接触面积, τ_m 为的抗剪切应力, 因此引起滑动的切向力实际由颗粒

间的接触面积和抗剪切应力决定。由于土颗粒表面的结合水膜作用, 颗粒的真实接触面积 A_c 小于整体接触面积 A , 因此接触面的抗剪强度可以表示为

$$T = A \cdot [\delta \cdot \tau_m + (1 - \delta) \cdot \tau_c] \quad (3)$$

其中水膜的抗剪强度为 τ_c , δ 为颗粒接触面积与总面积的比, 水膜的抗剪强度 τ_c 低于颗粒接触面的抗剪强度 τ_m 。阳离子浓度的增加引起水膜厚度变薄, 因此, 颗粒接触的面积比 δ 增大, 颗粒滑动的内摩擦角相应的增大。

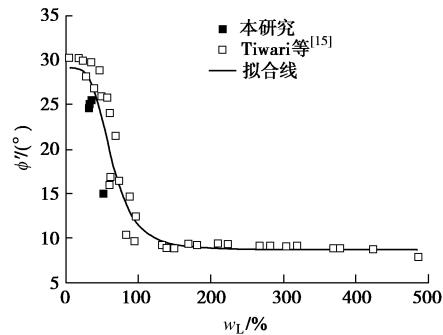


图 6 液限与有效内摩擦角的经验关系

Fig. 6 Empirical relationship between liquid limit and effective internal friction angle

5 考虑盐分作用的软黏土本构模型

Barbour 等^[16]提出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 (也称为溶质吸力)。土中的总吸力包括基质吸力和渗透吸力 (osmotic suction), 渗透吸力是孔隙水自由能的溶质部分, 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。本文的渗透吸力近似通过 Van's Hoff 方程计算^[11]。

巴塞罗那基本模型 (Bacerlona basic model, BBM) 是以修正剑桥模型为基础发展的非饱和土弹塑性模型, 该模型认为, 对于非饱和土, 代表刚度的 $e - \ln p$ 斜率 λ 与吸力相关。土的吸力越大, 土越干燥, 则刚度越大; 土的吸力越小, 土越湿润, 则刚度越小。该现象与本文试验结果中渗透吸力 (盐分浓度) 对压缩曲线的影响规律相类似。另外, Loret 等^[17]指出在上部荷载不变的条件下, 外部化学力的作用会引起的土体变形, 这也类似非饱和土吸力增加引起的土体收缩。因此, 本文在非饱和土 BBM 模型和修正剑桥模型认知的基础上, 建立考虑孔隙水盐分效应的本构模型。

图 7 为孔隙水盐分对人工黏土压缩曲线影响的示意图。如图所示, 假设初始的压缩曲线孔隙水的渗透

吸力为 π_0 , 在 $P=p_1$ 的正应力下, 假设孔隙水经过置换后, 渗透吸力为 π_1 。从 $e-\ln p'$ 曲线上看, 孔隙比表面上沿着 1-2-4 的路径变化, 先在恒定压力下进行坍塌 (collapse), 然后沿着回弹路径 (斜率为 $\kappa(\pi_1)$) 到达新的屈服应力 p_{1_yield} , 这也与以往研究中的试验结果相对应^[16]。同时, 假设存在另一条假想的化学力作用路径, 首先, 化学力使实际的有效应力增大到 p_1^* , 则孔隙比沿着 1—3—4 路径变化, 1—3 的斜率为 $\lambda(\pi_1)$ 。因此, 从图 7 看出, 化学力产生的变形 Δe_π 可以分为 Δe_{1-2} 和 Δe_{2-3} , 而坍塌变形量 Δe_{1-2} 可表达为

$$\begin{aligned}\Delta e_{1-2} &= (e_4 - e_1) - (e_4 - e_2) = (e_3 - e_1) - (e_3 - e_2) \\ &= \Delta e_\pi - (e_3 - e_2) \quad .\end{aligned}\quad (4)$$

进一步可以得到下式

$$\begin{aligned}\Delta e_{1-2} &= [\lambda(\pi_1) - \kappa(\pi_1)] \ln \left(\frac{p_{1_yield}'}{p_1'} \right) \\ &= [\lambda(\pi_0) - \kappa(\pi_1)] \ln \left(\frac{p_1^*}{p_1'} \right) \quad .\end{aligned}\quad (5)$$

将式 (5) 进行变换, 得到屈服应力的表达式:

$$p_{1_yield}' = p_1' \left(\frac{p_1^*}{p_1'} \right)^{\frac{\lambda(\pi_0) - \kappa(\pi_1)}{\lambda(\pi_1) - \kappa(\pi_1)}} = p_1' \left(\frac{p_1' + p_\pi'}{p_1'} \right)^{\frac{\lambda(\pi_0) - \kappa(\pi_1)}{\lambda(\pi_1) - \kappa(\pi_1)}} \quad . \quad (6)$$

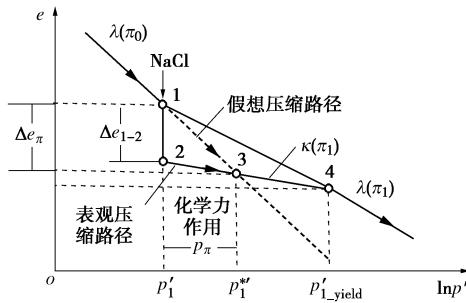


图 7 孔隙水盐分作用下的 $e-\ln p'$ 压缩曲线

Fig. 7 Change of $e-\ln p'$ compression curves with pore water salinity

其中, 式 (6) 中的 p_π' 可以认为是与化学作用等效的力。Hong 等^[7]对不同初始含水率的重塑土的进行压缩试验, 证明了泥浆状态下饱和土在较小的压力下存在类似的前期屈服压力, 称之为吸压力 (suction pressure), 经验公式如下所示:

$$\sigma_s' = 5.66 / (e_0 / e_L)^2 \quad . \quad (7)$$

由于泥浆状态, 土颗粒之间充满自由水, 颗粒间相互分离, 可以认为其屈服应力由孔隙水溶液提供。因此, 可假定为化学作用等效的力 p_π' 等于泥浆状态压缩曲线的屈服应力 σ_s' , 进而可根据经验公式 (7) 求得盐分效应下的屈服应力。由于在数值上 p_π' 可能不完全等于渗透吸力, 因此化学力 p_π' 的确定方法还需要进一步的研究。

对修正剑桥模型中正常固结土, 其屈服方程为

$$\left(1 + \frac{q^2}{M^2 p'^2} \right) p' = p_x' \quad , \quad (8)$$

其中 p_x' 为当前的等向固结压力, $M = p'/q$ 为临界有效应力比。由于临界应力比 M 与土体有效内摩擦角相关, 根据试验结果人工黏土 B20K80 的内摩擦角与孔隙水盐分浓度相关, 因此认为 M 是与渗透吸力相关的函数 $M(\pi)$ 。

根据剑桥模型, 等向固结 ($q=0$) 阶段塑性体积应变 (硬化参数) 为

$$\varepsilon_p^p = \varepsilon_p - \varepsilon_p^e = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p_x'}{p_0'} \quad , \quad (9)$$

其中 p_0 为前期屈服应力, 将 p_0' 替换为式 (6) 中的 p_{1_yield}' , 整理式 (9) 得到

$$\ln p_x' = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_p^p + \ln \left[p_1' \left(\frac{p_1' + p_\pi'}{p_1'} \right)^{\frac{\lambda(\pi_0) - \kappa(\pi_1)}{\lambda(\pi_1) - \kappa(\pi_1)}} \right] \quad . \quad (10)$$

对式 (8) 两边取自然对数并整理得

$$\ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p'^2} \right) = \ln p_x' - \ln p' \quad . \quad (11)$$

根据剑桥模型, 联立式 (10) 和 (11) 得到与盐分相关的屈服函数:

$$\begin{aligned}f &= \frac{\lambda(\pi) - \kappa(\pi)}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p_1' \left(\frac{p_1' + p_\pi'}{p_1'} \right)^{\frac{\lambda(\pi_0) - \kappa(\pi)}{\lambda(\pi) - \kappa(\pi)}}} + \\ &\quad \frac{\lambda(\pi) - \kappa(\pi)}{1 + e_0} \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2(\pi) p'^2} \right) - \varepsilon_p^p = 0 \quad . \quad (12)\end{aligned}$$

图 8 为屈服面随渗透吸力发展的示意图。假设渗透吸力 $\pi_0 < \pi_1 < \pi_2$, 随着渗透吸力的增大, 实际屈服面 (球应力 p_1' 形成的屈服面), 大于当前固结压力 p_0' 形成的屈服面, 使当前的应力状态处于实际屈服面内, 因此开始阶段属于弹性变形。当应力比 η 超出实际屈服面后, 再逐渐发展至临界状态线, $\eta = M_1$ 。渗透吸力增加至 π_2 , 临界状态线斜率和屈服面沿着渗透吸力 π 坐标轴继续扩大, $p'-q-\pi$ 坐标内屈服面的发展如图 8 (b) 所示。这一概念模型解释了盐分浓度的增加带来抗剪强度增加的原因。

根据相关流动法则 $g(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{ij})$, 及屈服函数式 (12) 可以得到塑性应变的增量比 (式 (13)) 及塑性体应变增量 (式 (14)), 其推导过程与修正剑桥模型相似^[18-19]:

$$\frac{d\varepsilon_p^p}{d\varepsilon_q^p} = \frac{\partial g / \partial p'}{\partial g / \partial q} = \frac{\partial f / \partial p'}{\partial f / \partial q} = \frac{M^2(\pi)(2p' - p_0')}{2q} \quad , \quad (13)$$

$$d\varepsilon_p^p = \frac{\partial f}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f}{\partial q} dq \quad (14)$$

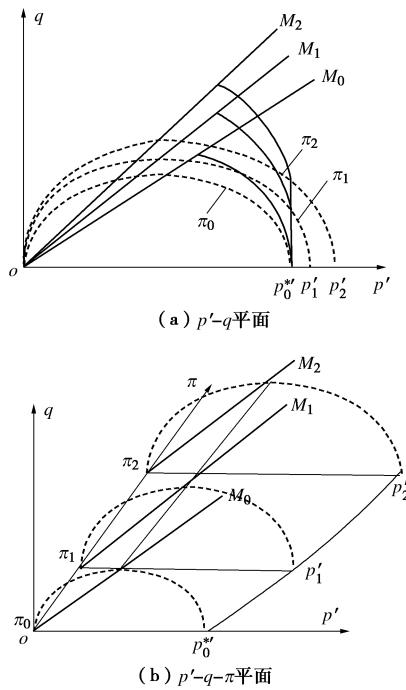
图 8 屈服面随渗透吸力 π 的变化规律

Fig. 8 Change of yielding surface with osmotic suction

通过式(13)、(14)联立求解可求得塑性体应变增量 $d\varepsilon_p^p$ 和偏应变增量 $d\varepsilon_p^p$ [18-19]:

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_p^p \\ d\varepsilon_q^p \end{bmatrix} = \frac{(\lambda(\pi) - \kappa(\pi))}{(1+e_0)p'(M^2(\pi) + (p'/q)^2)} \cdot \begin{bmatrix} (M^2(\pi) - (p'/q)^2) & 2(p'/q) \\ 2(p'/q) & 4(p'/q)^2 / (M^2(\pi) - (p'/q)^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp' \\ dq \end{bmatrix} \quad (15)$$

弹性体应变和剪应变的关系可表示为

$$d\varepsilon_v^e = \frac{dp'}{K} \quad (16)$$

$$d\varepsilon_q^e = \frac{dq}{3G} \quad (17)$$

而弹性模量 K 和剪切模量 G 都与 κ 有关, 可表示为

$$K(\pi) = \frac{vp'}{\kappa(\pi)} = \frac{(1+e_0)p'}{\kappa(\pi)} \quad (18)$$

$$G(\pi) = \frac{3K(\pi)(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \quad (19)$$

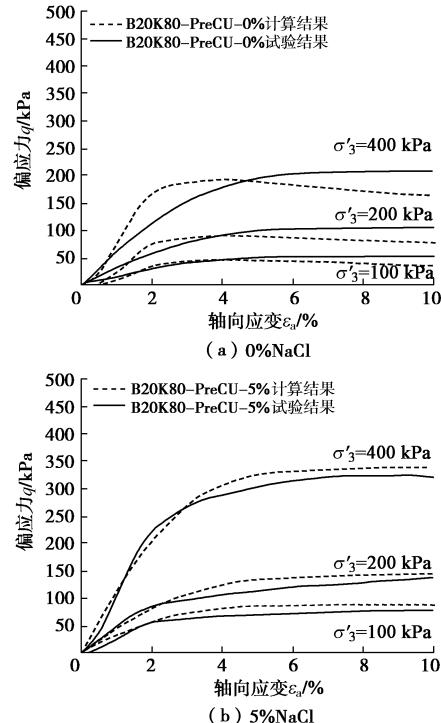
由于土的泊松比 ν 很难确定, 因此可采用 ν 与侧压力系数 K_0 的关系计算泊松比, 而 K_0 可以通过与内摩擦角的经验关系得到^[20]:

$$\mu = \frac{K_0}{1+K_0} \quad (20)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi(\pi) \quad (21)$$

最终, 根据弹塑性理论建立弹塑性刚度矩阵, 并在屈服函数 f 的基础上, 建立考虑盐分作用的本构模

型。将本文试验得到的经验关系, 代入模型得到应力应变的计算值。图9显示试验结果与计算值在趋势上较为接近, 因此该模型基本可以用于描述盐分对蒙脱石矿物含量较高的人工软黏土的本构关系的影响。

图 9 B20K80-PreCU 的 $q - \varepsilon_a$ 关系的计算结果与试验结果的对比Fig. 9 Comparison between measured and calculated $q-\varepsilon_a$ curves of B20K80-PreCU

6 结 论

本文围绕针对连云港海陆交互相软黏土中含有蒙脱石族黏土矿物, 且孔隙水盐分动态变化这一特征, 以人工重塑软黏土为研究对象, 开展了重塑软黏土的物理力学试验, 提出了孔隙水盐分作用的机理。主要结论如下:

(1) 孔隙水盐分对含蒙脱石矿物的人工黏土 B20K80 液限影响较大, 随着盐分的增加, 土的液限降低; 而对于高岭石矿物为主的黏性土 K, 孔隙水盐分则对液限无明显的改变。

(2) 常规固结试验中, 人工黏土 B20K80 的压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 随着盐分浓度的增加而减小, 且趋于常量, 采用指数函数拟合可以得到较好的拟合关系。对于高岭土试样 K, 其压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 基本为常数, 基本不随孔隙水盐分浓度的变化而改变。

(3) 人工黏土 B20K80 试样, 在不同的有效固结压力下, 盐分明显提高了其峰值强度。对于高岭土试

样, 孔隙水的化学成分对峰值强度及应力应变关系都未产生明显的影响。盐分的加入明显增加了人工黏土B20K80的内摩擦角 φ' ; 而对于高岭土, 盐分则对其内摩擦角 φ' 无明显改变。结合以往研究, 建立了有效内摩擦角与液限 w_L (代表矿物成分和盐分的综合作用)的经验关系。

(4) 将孔隙水盐分采用渗透吸力进行表征, 在BBM模型和修正剑桥模型认知的基础上, 考虑了孔隙水盐分对 λ , κ 、有效临界应力 M 和屈服函数等的影响, 建立了考虑盐分作用的人工软黏土本构模型。对比模型计算与试验得到的应力-应变关系, 发现试验结果与计算值在趋势上较为接近, 说明该模型基本可以用于描述盐分对蒙脱石矿物含量较高的人工软黏土的本构关系的影响。

参考文献:

- [1] 李国刚. 中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报(中文版), 1990, **12**(4): 470 - 479. (LI Guo-gang. Composition and distribution of clay minerals in surface sediments of Chinese offshore areas and their geological significance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, **12**(4): 470 - 479. (in Chinese))
- [2] 邓永锋, 岳喜兵, 张彤炜, 等. 连云港海相软土在孔隙水盐分溶脱环境下的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 47 - 53. (DENG Yong-feng, YUE Xi-bing, ZHANG Tong-wei, et al. Consolidation behaviors of soft marine clay in Lianyungang under desalination environment of pore water[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(1): 47 - 53. (in Chinese))
- [3] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. *Géotechnique*, 1967, **17**(2): 83 - 118.
- [4] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Géotechnique*, 1990, **3**(40): 329 - 378.
- [7] HONG Z S, BIAN X, CUI Y J, et al. Effect of initial water content on undrained shear behaviour of reconstituted clays[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(6): 441 - 450.
- [8] SRIDHARAN A, RAO G V. Mechanisms controlling volume change of saturated clays and role effective stress concept[J]. *Géotechnique*, 1973, **23**(3): 359 - 382.
- [9] SRIDHARAN A, RAO G V. Mechanisms controlling the liquid limit of clays[C]// Proceeding of the Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975: 75 - 84.
- [10] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [11] WITTEVEEN P, FERRARI A, LALOUI L. An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behaviour of a clay[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(3): 244 - 255.
- [12] TRASK P D, CLOSE J E H. Effect of clay content on strength of soils[C]// Proceedings of Coastal Engineering, 1957.
- [13] WARKENTIN B P, YONG R N. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1962(9): 210 - 218.
- [14] DIMAIO C, FENELLI G B. Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid[J]. *Géotechnique*, 1994, **44**(2): 217 - 226.
- [15] TIWARI B, AJMERA B. A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics[J]. *Applied Clay Science*, 2011, **53**(1): 48 - 57.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. London: Cambridge University Press, 1990.
- [19] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (LUO Ting, YAO Yang-ping, HOU Wei. Soil constitutive models[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [20] KENNEY T C. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils[C]// Proceedings of the Oslo Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks. Oslo, 1967: 123 - 129.