

文章编号: 1674-9057(2017)03-0451-05

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2017.03.009

渗透吸力对饱和黏土变形-强度特性的影响

赵续月, 颜荣涛, 梁维云, 李 杨, 陈 波, 曾 腾

(桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为了解孔隙溶液组分或浓度变化对土体强度特性产生的影响, 进行了不同浓度 NaCl 溶液饱和黏土的三轴固结排水剪切试验, 结果表明: 渗透吸力对黏土的变形-强度特性有明显影响, 同一围压下, 饱和黏土变形模量值和强度值随渗透吸力的增加并不是单调降低的, 而是先降后升。盐溶液侵蚀可以改变黏土的孔隙状态和结构, 从而影响剪切过程中变形和强度及破坏时间, 认为土体强度除了与土颗粒自身强度有关外, 还与土体结构有关。

关键词: 饱和黏土; 盐溶液; 渗透吸力; 强度

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

在自然界中, 诸多岩土体所处的地下水环境并非纯水环境, 而是含有多种离子、具有一定酸碱度的溶液环境, 土体在这类地下水环境施加的一系列物理、化学和力学作用下发生强度和变形等特性的改变。同时近年来垃圾填埋、核废料处置、污水处理等环境岩土工程问题的发生, 都对岩土体地下水环境造成了一定的污染侵蚀, 引起岩土体内部孔隙溶液的离子类型和浓度的变化, 促使相应黏土层的物理力学性质和水理性质的改变, 处理不慎将造成严重的岩土工程灾害和经济损失。因此探究孔隙水化学变化对黏土力学特性影响的研究具有非常重要的意义。

当前, 国内外众多学者都对孔隙水化学条件改变引起的黏土体物理力学性质的变化做了大量试验研究: Blaser 等^[1]研究了含 Na_2SO_4 盐渍土在不同含水量、不同浓度孔隙溶液、不同黏土矿物含量条件下盐胀的规律; Kenney^[2-3]发现孔隙溶液中易溶盐含量的增加会显著提高膨润土及富含蒙脱石黏性土的残余内摩擦角, 且 NaCl 溶液对土体残余内摩擦角的改变具有可逆性; 汪民^[4]、程昌炳

等^[5]、唐晓武等^[6]、颜荣涛等^[7]通过固结快速直剪试验和固结慢速直剪试验, 探讨了孔隙溶液化学变化对土体剪切强度的影响; 郭菊彬等^[8]通过盐渍土剪切试验认为, 土体的黏聚力和内摩擦角与含盐量同含水量的比值有线性关系。

为进一步了解盐溶液饱和黏土变形-强度特性的影响规律, 探究其作用机制, 为建立本构关系提供试验数据支持, 本文通过三轴固结排水剪切试验分析盐溶液饱和黏土的强度特性, 讨论盐溶液渗透吸力对黏土变形、强度的影响规律, 为后期分析化学-力学耦合特性提供一定的数据支持。

1 材料和试验过程

1.1 试验材料

试验所用土样取自广西南宁五象新区某工地地下 6.5~8.0 m 处, 土样的基本物理性质指标如表 1 所示, 本次试验用土为高液限黏土, 矿物成分见表 2。

由于 NaCl 化学性质较稳定, 不与粘土矿物、

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11562007; 11372078; 51309055); 国家大学生创新创业计划项目 (201610596031)

作者简介: 赵续月 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程, zxy09718@163.com。

通讯作者: 颜荣涛, 博士, 副教授, yrt301@163.com。

引文格式: 赵续月, 颜荣涛, 梁维云, 等. 渗透吸力对饱和黏土变形-强度特性的影响 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37 (3): 451-455.

表 1 试验土样的基本物性指标
Table 1 Fundamental physical indices of tested clay

比重	塑限/%	液限/%	塑性指数	阳离子交换量/ (mmol · 100g ⁻¹)	比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	颗粒组成/%		
						砂粒/mm	粉粒/mm	黏粒/mm
						2 ~ 0.075	0.075 ~ 0.005	< 0.005
2.73	24.87	54.37	29.50	54.9	34.42	4.37	28.63	67

注：取下沉深度为 10 mm 所对应的含水率为液限。

方解石、石英及空气发生化学反应，且是天然地下水中较常出现的成分，因而本次试验采用广东汕头市西陇化工股份有限公司生产的 NaCl 晶体作为溶质，实验室蒸馏冷凝而成的蒸馏水（电导率为 1.8 μS/cm、pH 值为 5.6）作为溶剂，配制成不同浓度的 NaCl 溶液，进而模拟天然状态下水化学成分的变化。

表 2 试验土样的矿物分析
Table 2 Mineral analysis of tested soil $w_B/\%$

粘土矿物			非粘土矿物		
蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	赤铁矿	白云母
/	/	60.0	31.0	5.0	4.0

1.2 试验方案

三轴试样的制备过程：利用蒸馏水调配湿土样，密封保存 3 天后，取出湿土样复测其含水率，其值控制在 23.5% ± 0.2% 以内；利用改进后三轴压压器压实成样，控制干密度为 1.5 ± 0.1 g/cm³；试样装入三轴饱和器中，进行真空抽气，随后用不同相对浓度的盐溶液进行饱和浸泡。为使反应充分，浸泡时间为 15 ~ 30 d，试验所用 NaCl 溶液浓度分别为 0、0.1、0.5、1.0、2.0 mol/L。虽然试样在饱和浸泡时其内部原有蒸馏水会稀释溶液浓度，但土中原有水分相对于浸泡溶液分量很少，可以忽略不计，这里不考虑土中原有水分对浸泡溶液浓度的影响。试样尺寸为圆柱体，直径为 39.1 mm，高度为 80 mm。

待试样达到平衡后，使用 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透仪进行三轴试验，该剪切渗透仪可以对三轴试验进行等应力、等应变控制，可进行 UU、CU、CD 试验，不等向固结、等向固结、反压力饱和、K₀ 试验、应力途径试验和渗透试验。仪器各部分采用单片机控制，能够独立工作，并与计算机数据交换，集中数据采集处理。

将试样装样完成后，施加周围压力 400 kPa 进行等压固结，由于土样内孔隙溶液为 NaCl 盐溶液，若进行反压饱和会对仪器管路造成腐蚀破坏，

故采用真空抽气法对试样进行饱和后直接开始等压固结，固结 24 h 后认为固结完成。随后通过应变控制进行剪切，控制轴向应变超过 15%，排水剪切速率 0.01 mm/min。为加快孔压消散，采用双面排水。

本试验主要测试 5 个不同浓度盐溶液饱和黏土的三轴压缩试验结果，分析渗透吸力对黏土变形和强度的影响规律，讨论其影响机理。渗透吸力的估算是通过孔隙溶液的电导率利用经验公式获得。为准确得到土体的强度指标，各浓度进行了多组平行试验。

2 试验结果

2.1 渗透吸力的估算

一般认为土中总吸力是由基质吸力和渗透吸力（溶质吸力）两部分组成^[9-10]：基质吸力与土体内部含水量有关；渗透吸力与孔隙水离子浓度有关。对于饱和土而言，一般只考虑渗透吸力。

本文渗透吸力的估算方法为通过测试排水管中试样排出的孔隙水溶液的电导率（EC）来估算，在测试之前需对电导率仪进行校准。本文选用 Ma-ta 等^[11]提供的公式计算渗透吸力

$$\pi = A \left(\frac{EC}{1 \mu S/cm} \right)^B, \tag{1}$$

式中：π 为渗透吸力，kPa；A = 0.019 kPa；B = 1.074；EC 为电导率，μS/cm。计算得到各试样渗透吸力值，见表 3。

表 3 试样的渗透吸力计算值
Table 3 Osmotic suction estimation of NaCl solution

孔隙溶液 NaCl 浓度/ (mol · L ⁻¹)	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	渗透吸力 π/kPa
0	2.91	99.76 (π ₀)
0.1	9.93	372.80 (π ₁)
0.5	41.00	1 709.56 (π ₂)
1.0	89.30	3 944.28 (π ₃)
2.0	141.10	6 446.82 (π ₄)

2.2 应力-应变-体积应变关系曲线

图1、图2分别为在同一围压值（有效围压400 kPa）、不同渗透吸力（ $\pi = 99.76、372.80、1\,709.56、3\,944.28、6\,446.82$ kPa）下饱和黏土的应力-应变关系和体积应变关系曲线。

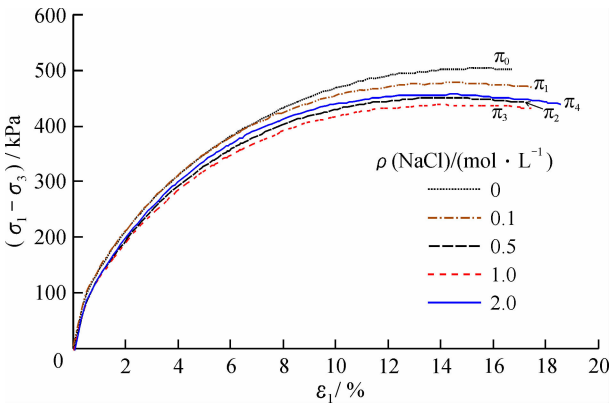


图1 应力-应变关系
Fig. 1 Stress-strain relationship

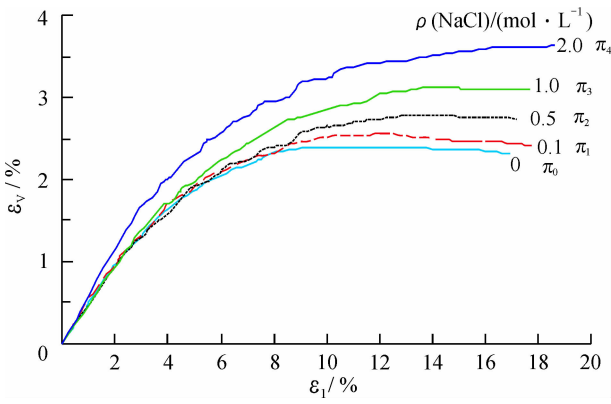


图2 体积应变与轴向应变关系
Fig. 2 Volumetric strain

由图1可以看出：在相同围压，不同渗透吸力条件下饱和黏土的应力-应变关系曲线形态基本相同，曲线都近似为双曲线模型。各渗透吸力下，饱和黏土的剪应力均随轴向应变增加而增加，增长速率逐渐减慢，线型趋于平缓。同时应力-应变关系曲线没有明显的峰值强度，表现为应变硬化。但在渗透吸力为 π_4 （即2.0 mol/L盐溶液， $\pi_4 = 6\,446.82$ kPa）时，试样的应力-应变曲线稍有软化现象。对比图1中5条应力-应变曲线可知，孔隙溶液浓度增加，使得强度较蒸馏水时有明显下降。

从体积应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 关系曲线(图2)可以看出：土体体积应变呈纯粹减缩特性，随轴向

应变增大试样体积减小，体积应变随溶液渗透吸力的增大表现出不同程度的递增趋势，在渗透吸力 $\pi_2 \sim \pi_4$ 范围内($\pi = 1\,709.56、3\,944.28、6\,446.82$ kPa)试样体积应变增大幅度尤为明显，进一步说明随着渗透吸力的增大，土体抗剪强度降低。

2.3 变形模量

根据三轴试验得出的应力-应变关系曲线，可以求出土的变形模量 $E^{[12]}$ 。为分析渗透吸力对变形模量 E 的影响，对平行试验(S1、S2、S3)得出的应力-应变关系进行数据整理，得到平行试验中变形模量 E_{50} 变化规律(图3)。 E_{50} 为应力-应变关系曲线图中的割线模量，即峰值应力一半的应力与相应的应变之比值。

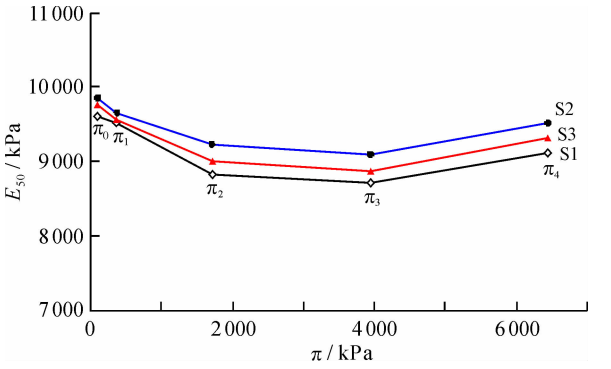


图3 变形模量随渗透吸力的变化规律
Fig. 3 Variation of deformation modulus with osmotic suction

从图3可知：3组平行试验的土样变形模量 E_{50} 变化规律基本一致，在同一围压下，渗透吸力在 $\pi_0 \sim \pi_3$ ($\pi = 372.80、1\,709.56、3\,944.28$ kPa，即孔隙溶液浓度在0~1.0 mol/L)区段，随渗透吸力增加，饱和黏土的变形模量 E_{50} 依次降低，但在渗透吸力 $\pi_4 = 6\,446.82$ kPa（即孔隙溶液浓度为2.0 mol/L）时，饱和黏土的变形模量 E_{50} 略有回升。认为这一现象与土体孔隙结构变化有关：在同一围压作用下，一定浓度范围(0~1.0 mol/L，即渗透吸力 $\pi_0 \sim \pi_3$ 区段)内，随孔隙溶液浓度增加，微孔隙结构变少，大孔隙结构变多，变形模量减小，但当孔隙溶液浓度增加到某一程度后（即2.0 mol/L，渗透吸力 $\pi_4 = 6\,446.82$ kPa时），颗粒间的排列将发生重新调整，大孔隙结构会被压缩或破坏，造成大结构减少，促使变形模量得到一定程度的回升，即饱和黏土变形模量值随渗透吸力的增加并不是单调降低的，而是先降后升。

2.4 强度

由于图 1 中应力 - 应变关系曲线出现硬化特征, 根据三轴压缩试验破坏取值标准, 取轴向应变 15% 所对应的主应力差作为试样的抗剪破坏标准, 得出不同渗透吸力下试样的破坏点应力值 (表 4, 平行试验 S1 结果)。3 组平行试验强度演变规律如图 4 所示, 平行试验数据的变化规律一致。

表 4 试样破坏点应力值 (S1)				
Table 4 Failure stress values				
渗透吸力	σ_3	σ_1	p	q
π_0	400	902.1	567.37	502.1
π_1	400	876.5	558.83	476.5
π_2	400	849.85	549.95	449.85
π_3	400	837.85	545.95	437.85
π_4	400	854.1	551.37	454.1

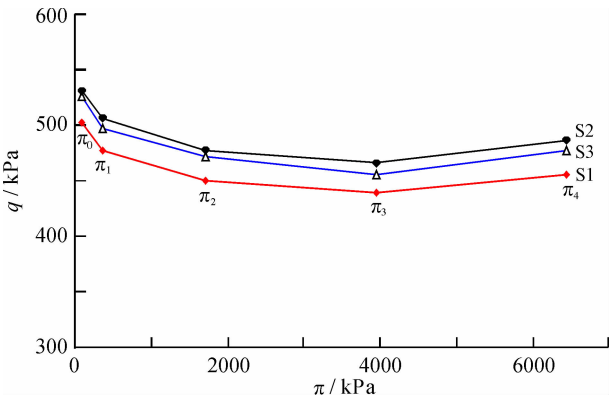


图 4 剪切强度随渗透吸力的变化规律
Fig. 4 Variation of shearing strength with concentration

下面选取 S1 的试验结果作详细分析: 在同一围压下, 渗透吸力在 $\pi_0 \sim \pi_3$ ($\pi = 99.76、372.80、1\,709.56、3\,944.28$ kPa, 即孔隙溶液 NaCl 浓度在 $0 \sim 1.0$ mol/L) 区段, 随渗透吸力增加, 饱和黏土的抗剪强度值依次降低; 以渗透吸力 $\pi_0 = 99.76$ kPa 时的破坏应力值为参考, 盐溶液渗透吸力为 $372.80、1\,709.56、3\,944.28$ kPa 时对应的粘土强度下降幅度分别为 $5.10\%、10.41\%、12.80\%$ 。这一结果与汪民^[4]、程昌炳等^[5]、Warkentin 等^[13]对蒙脱土和高岭土的试验结果类似。当渗透吸力为 π_4 ($\pi_4 = 6\,446.82$ kPa, 即孔隙溶液浓度为 2.0 mol/L) 时, 下降幅度为 9.56% , 相比较而言, 抗剪强度值略有回升。这说明, 饱和黏土抗剪强度值随渗透吸力的增加并不是单调降低的, 而是先

降后升, 该试验现象与杨德欢等^[14]利用应变控制式直剪仪, 开展的不同浓度 NaCl 溶液对粉质黏土的固结慢速直剪试验, 所得到的抗剪强度值随 NaCl 溶液浓度变化趋势类似。

由莫尔 - 库仑强度理论可知, 饱和黏土的剪切强度由摩擦强度和黏聚强度两部分组成, 但二者并没有明确的界限区分。Moore^[15]指出, 摩擦强度主要受控于剪切区域颗粒的接触点数量、土颗粒间的物理化学作用力以及土体的体积变化趋势; 而黏聚强度则主要由土颗粒间物理化学力决定。故可以认为影响饱和黏土抗剪强度的主要因素是剪切面上的孔隙比 (即密实度) 和粒间物理化学作用力。

土体是由形态、大小各异的粒团颗粒单元、聚集体及胶结物质堆积而成^[16]。将粒团颗粒单元内部孔隙视为第一级孔隙, 称为微孔隙结构; 黏土粒团之间或与砂粒、粉粒之间的孔隙视为第二级孔隙, 称为大孔隙结构。当孔隙溶液浓度较低时, 片状矿物颗粒表面吸附孔隙溶液中的离子, 形成较厚的扩散双电层, 颗粒间表现为净斥力, 呈现 F - F 分散结构, 此时土体内部矿物颗粒排列相对均匀, 微孔隙结构占的比例较大而大孔隙结构相对较少。但随孔隙溶液浓度的增加, 扩散双电层厚度变薄, 粒间净引力增强, 片状矿物颗粒相互吸引, 形成 E - E 或 E - F 的絮凝结构, 使得微孔隙结构减少而大孔隙结构相对增加。

在同一围压作用下, 一定渗透范围 (ρ (NaCl) 为 $0 \sim 1.0$ mol/L, 渗透吸力 $\pi_0 \sim \pi_3$, 即 $\pi = 99.76、372.80、1\,709.56、3\,944.28$ kPa) 内, 随孔隙溶液浓度增加, 微孔隙结构变少, 大孔隙结构变多, 即密实度减小, 土体整体上表现为疏松状态, 剪切区域颗粒的接触点数量变少, 从而导致剪切面上单位面积内抗滑力减小, 故土体剪切强度不断减小。但当孔隙溶液 NaCl 浓度增加到某一程度后 (即 2.0 mol/L, 渗透吸力 $\pi_4 = 6\,446.82$ kPa 时), 因剪切区域内接触点数目减少至某一界限, 一方面在相同的围压下, 颗粒间的排列将发生重新调整, 大孔隙结构会被压缩或破坏, 剪切区域内由于水化学效应减少的颗粒的接触点在一定程度上得以部分恢复, 另外因粒间距减小, 颗粒间引力作用增强, 二者综合作用下使得强度略有回升。

综合分析可知, 饱和黏土的抗剪强度值随渗

透吸力的增加并不是单调降低的,而是先降后升,受剪切面上的孔隙比(即密实度)和粒间物理化学作用力共同影响。

3 结 论

利用 NaCl 溶液饱和黏土,研究了三轴试验条件下不同浓度盐溶液对黏土变形和强度的影响规律,得出了以下结论:

(1) 渗透吸力对饱和黏土的变形有明显影响:在同一围压作用下,一定渗透吸力范围内,变形模量 E_{50} 随渗透吸力的增加而降低,但在渗透吸力达到某一程度后变形模量值得到一定程度的回升。

(2) 渗透吸力对饱和黏土强度有明显影响。三轴固结排水剪切试验结果表明,相同围压、不同渗透吸力条件下饱和黏土抗剪强度随渗透吸力变化表现出一定的差异。在渗透吸力 $\pi_0 \sim \pi_3$ ($\pi \leq 4\ 000$ kPa) 范围内,随渗透吸力增大强度降低,有良好的一致性;在渗透吸力 π_4 ($\pi > 4\ 000$ kPa) 时,随渗透吸力增大强度略有回升,原因在于强度是受孔隙比和颗粒间作用力综合作用的结果。

(3) 盐溶液侵蚀可以改变黏土的孔隙状态和结构,从而影响剪切过程中变形和强度及破坏时间,认为土体强度除了与其土颗粒自身强度有关外,还与土体组构有关。

参考文献:

[1] Blaser H D, Scherer O J. Expansion of soils containing sodium sulfate caused by drop in ambient temperatures [R]. Highway Research Board Special Report, 1969: 150-160.

[2] Kenney T C. The influence of mineral composition on the residual shear strength of natural soils [J]. Highway Capacity Manual, 1967, 1: 123-129.

[3] Kenney T C. Residual strengths of mineral mixtures [C]. Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 155-160.

[4] 汪民. 饱水黏性土中黏粒与水相互作用的初步探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1987, 13 (3): 1-5.

[5] 程昌炳, 徐昌伟. 重塑高岭土的力学特性与 ζ -电位的关系 [J]. 水文地质工程地质, 1985 (1): 44-45.

[6] 唐晓武, 应丰, 寇乃羽, 等. 吸附离子对粉质黏土及改良土特性的影响 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (8): 2519-2524.

[7] 颜荣涛, 梁维云, 杨德欢, 等. 氯化钠溶液对黏性土的强度影响 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37 (1): 88-93.

[8] 郭菊彬, 宋吉荣, 张昆. 盐渍土强度参数与含盐量、含水量关系初探 [J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33 (5): 98-99.

[9] Nelson J, Miller D J. Expansive soils: problems and practices in foundation and pavement engineering [M]. John Wiley & Sons, 1997.

[10] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. John Wiley & Sons, 1993.

[11] Mata C, Romero E, Ledesma A. Hydro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures [C] //Proceeding of the 3rd International Conference on Unsaturated soil. Recife, Brazil, Swets & Zeitlinger, Lisse. 2002: 283-288.

[12] 陈仲颐. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

[13] Warkentin B P, Yong R N. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces [J]. Clays and Clay Minerals, 1960, 9 (1): 210-218.

[14] 杨德欢, 颜荣涛, 韦昌富, 等. 粉质黏土强度指标的水化学敏感性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (12): 3529-3536.

[15] Moore R. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays [J]. Géotechnique, 1991, 41 (1): 35-47.

[16] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (4): 458-462.

Effect of osmotic suction on strength characteristics of saturated clay

ZHAO Xu-yue, YAN Rong-tao, LIANG Wei-yun, LI Yang, CHEN Bo, ZENG Teng

(Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The change in the composition or concentration of the pore solution will have an important effect on the strength characteristics of the soil. To solve this problem, triaxial consolidation drainage shear test is done on saturated clays with pore solution of different concentration of NaCl. The test results show that the osmotic suction has obvious effect on the deformation-strength characteristics of clay. Under the same confining pressure, the modulus and strength value of saturated clay are not monotonically decreasing with the increase of osmotic suction. Salt solution can change the clay pore status and structure, thus affecting the process of shearing deformation, soil strength and failure time during the shear process. The strength of the soil particles is also related to soil structure.

Key words: saturated clay; salt solution; osmotic attraction; strength