

[文章编号] 1003—4684(2022)01-0100-04

氯化钠溶液对膨胀土强度影响研究

周 荣, 庄心善, 周睦凯, 彭承鸿

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以河南南阳某公路工程膨胀土为研究对象,对经过不同浓度的氯化钠溶液饱和后的试样进行击实试验和三轴试验。试验结果表明:氯化钠溶液浓度增加,土样主应力差呈先增加后减小趋势,峰值强度逐渐减小,素土样峰值强度最大;内摩擦角随着浓度的增加而增加,黏聚力随着浓度的增加而减小,相较黏聚力的变化,内摩擦角变化不是很明显,说明其浓度变化对土体内摩擦角影响较小;进一步通过拟合曲线发现,氯化钠溶液浓度与土的抗剪强度指标均线性相关,并得到内摩擦角、黏聚力与浓度相关的公式。

[关键词] 膨胀土; 氯化钠; 双电层; 抗剪强度

[中图分类号] TU411 [文献标识码] A

目前国内外学者对膨胀土物理、化学改良后的土体强度进行了研究,虞海珍^[1]等将 ESR 生态改性剂掺入土中进行化学改良,研究表明:试样土的内摩擦角和黏聚力在改良后明显提高,水稳性达到了较好的效果;查甫生等^[2]使用乙炔的主要废弃物电石渣对膨胀土进行化学改良,得到了电石渣掺入比例、养护时间与改良土的强度、胀缩性的关系,并采用扫描电镜验证其结果;周葆春等^[3]在膨胀土中掺入石灰,通过开展单轴、侧限、三轴等试验,研究了石灰试样土在不同状态下其强度变化,得出湿化饱和后改良土刚度与强度较高;杨俊等^[4]通过直剪试验得出风化砂掺量与黏聚力、内摩擦角关系;边加敏等^[5]采用了石灰改良膨胀土方法,研究了初始含水率、掺灰率等因素对改良土抗剪强度参数的影响。李妥德等^[6]在膨胀土中掺加工业废料—矿渣对其进行改良,通过一系列试验得出了改良土掺合料的最佳配比,得到了强度随固化剂掺量、压实密度、龄期的变化曲线;庄心善等^[7]采用掺入石灰—玄武岩纤维来改性膨胀土,得到了石灰—玄武岩纤维掺量与膨胀土强度的关系,并确定了其最佳掺量;姚传芹^[8]等研究了不同浓度 NaCl、CaCl₂ 溶液对膨胀土力学性质的影响,分析了溶液组分与浓度大小对土样抗剪强度产生影响。

综上所述,尽管许多学者对物理化学改良后的膨胀土强度进行研究,但在孔隙溶液环境变化时的膨胀土强度研究较少。当今,诸多工程建设对冻土

路基进行撒盐处理,该做法易导致土体孔隙溶液环境发生改变^[9],进而影响膨胀土路基的宏观力学性质,因此本文研究不同浓度氯化钠溶液下膨胀土强度变化具有十分重要的意义。

1 试验材料

本试验采用的土样为河南南阳某公路的膨胀土,呈淡黄色,自由膨胀率为 44%,为弱膨胀土,见图 1。主要由蒙脱石、伊利石和少许高岭土组成,其基本物理力学指标见表 1。试验采用氯化钠溶液,其浓度配制分别为 0、0.1、0.3、0.5 mol/L。



(a) 风干后



(b) 烘干过筛后

图 1 膨胀土土样

表 1 膨胀土物理力学指标

天然密度/(g·cm ⁻³)	1.71	
天然含水率/%	17	
塑限 W _P /%	30	
液限 W _L /%	65	
自由膨胀率/%	44	
粒组含量/%	<0.005 mm	36.4
	<0.002 mm	22.6

[收稿日期] 2021—01—09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51708190)

[第一作者] 周 荣(1996—),女,湖北仙桃人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程

[通信作者] 庄心善(1964—),男,河南周口人,湖北工业大学教授,研究方向为岩土工程及边坡工程

2 试验方案

为了研究在氯化钠溶液下土体强度的变化,参照《土工试验方法标准》对不同浓度氯化钠溶液下的膨胀土进行固结不排水试验。试验开始前,先将风干过的土样碾碎,过 2 mm 孔径筛,将筛好的土放入温度为 105 ℃ 的烘箱中,烘烤 24 h 取出,待其完全冷却后用密封袋进行装样保存。

用量筒和烧杯等配制 0、0.1、0.3、0.5 mol/L 的氯化钠溶液,并按照土的最优含水量与干土进行调配后,放置在塑料薄膜内,焖料 48 h,使土样与氯化钠溶液混合均匀。然后将配置好的土样放入三瓣模内,其中三瓣模直径为 39.1 mm,高度为 80 mm,土样按最大干密度分 4 层进行压实制样,并对每层压实土样做刮毛处理。试样制备完成后,使用真空饱和装置来抽气饱和,其养护溶液为氯化钠溶液。将已养护好的试样取出,放入 TSZ-2 型全自动三轴仪进行 CU 试验。试验围压分别取 100 kPa、200 kPa、300 kPa,剪切速率为 0.05 mm/min,试验所用仪器和破坏后的土样见图 2。

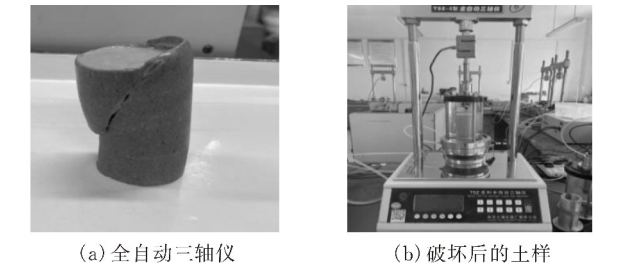


图 2 试验仪器与试样

3 试验结果与分析

3.1 土样含水率与干密度关系

按照《土工试验方法标准》进行击实试验。分别制备五组不同含水率的试验土样,将每组土样分层装入击实仪内,按照相关规定,控制相同条件加以压实;最后得到土样的最优含水率为 17%,最大干密度为 1.7 g/cm³,试验结果如图 3 所示。

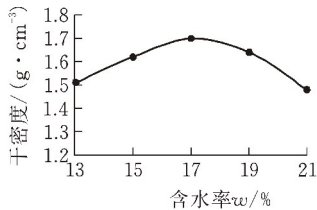


图 3 含水率与干密度关系曲线

3.2 应力-应变关系曲线

为了研究 0、0.1、0.3、0.5 mol/L 氯化钠溶液对膨胀土强度的影响,本文采用全自动三轴仪进行固结不排水试验,得到不同浓度氯化钠溶液下应力-应变关系,见图 4;不同围压下试验土土样应力-应变关系,见图 5。

应变关系,见图 4;不同围压下试验土土样应力-应变关系,见图 5。

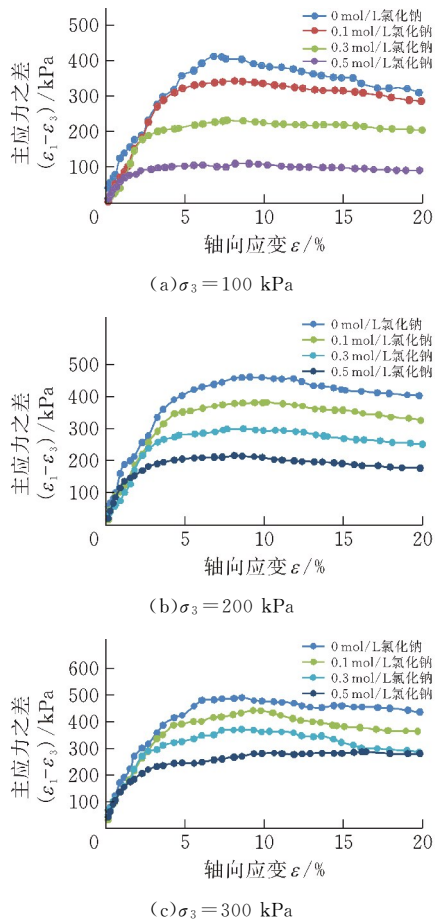


图 4 不同浓度下试验土应力-应变关系曲线

由图 4 可见:

1)在相同围压下,0、0.1、0.3、0.5 mol/L 氯化钠溶液下的土样主应力之差随着轴向应变的增加呈先上升后下降的趋势。

2)在围压为 100 kPa 时,素土样的峰值强度最高,为 410.5 kPa,0.5 mol/L 氯化钠溶液下土样的峰值强度为 109.8 kPa,远低于素土样的峰值强度,表明氯化钠溶液会降低膨胀土的强度。在围压为 200 kPa、300 kPa 时,测得数据同样也是素土样的峰值强度远高于 0.5 mol/L 氯化钠溶液峰值强度。

这是由于,一方面黏土颗粒表面带有不平衡的负电荷,在电场作用下,四周游离状态的阳离子会被吸引在土颗粒表面,从而与水分子、土体表面负电荷构成双电层;另一方面随着氯化钠溶液浓度增加,更多 Na⁺ 吸附在土颗粒周围,使土颗粒表面双电层厚度减小,即减小了土颗粒间结合水膜厚度,土体结构随着结合水膜厚度的减小由集聚结构转换为絮凝结构,进而导致土体强度降低^[8]。

由图 5 可知,在相同氯化钠溶液浓度下,随着围压的增加,同一浓度下的土样峰值强度会逐渐增加,在围压为 300 kPa 时,0、0.1、0.3、0.5 mol/L 氯化钠

溶液下试样土的峰值强度最大,依次为 489.5 kPa、440.9 kPa、370.1 kPa、286.6 kPa,呈明显降低趋势。

因为土样在固结状态下,土体孔隙中水分逐渐排出、体积发生大幅度减小,内部孔隙逐渐被压缩。而且饱和土体是两相体系,土颗粒与水的压缩可忽略不计,土体变形量取决于孔隙的变化量,孔隙中水被压出的量。围压较大时,试样内的砂颗粒和土颗粒充分地受挤压,互相包裹,孔隙本身被大幅度压缩,其变形的空间减少,逐渐形成密实结构。颗粒表面充分摩擦,随着体积的减小,改良土颗粒被压缩得更加紧密,土体的抗剪强度增大。

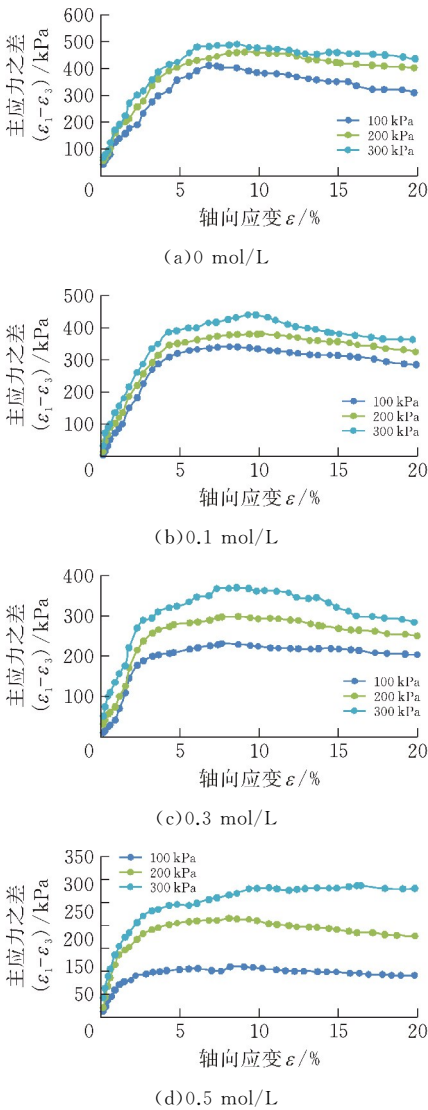


图 5 不同围压下试验土样应力-应变关系曲线

3.3 氯化钠浓度对内摩擦角、黏聚力的影响

通过极限状态莫尔-库伦圆,得出氯化钠溶液浓度与土样内摩擦角和黏聚力的关系(表 2、图 6)。由图 6 可知:不同浓度氯化钠溶液对内摩擦角和黏聚力有着不同程度的影响。0 mol/L 氯化钠溶液下的土样内摩擦角最小,为 9.52°;0.5 mol/L 氯化钠溶液下的土样的内摩擦角最大,为 17.9°;氯化钠溶液

浓度从 0~0.1 mol/L、0.1~0.3 mol/L、0.3~0.5 mol/L,其内摩擦角依次增加量为 1.99°、3.42°、2.97°,可得出 0.3 mol/L 土样内摩擦角变化量最大。原因可归结为,随着氯化钠溶液浓度增加,双电层厚度随之减小,土颗粒重新排列更加困难,致使摩擦力增大,即表现为内摩擦角增大。

表 2 不同氯化钠浓度下内摩擦角和黏聚力的关系

氯化钠溶液浓度/(mol·L ⁻¹)	内摩擦角/°	黏聚力/kPa
0	9.52	158.3
0.1	11.51	117.7
0.3	14.93	61.9
0.5	17.9	9.6

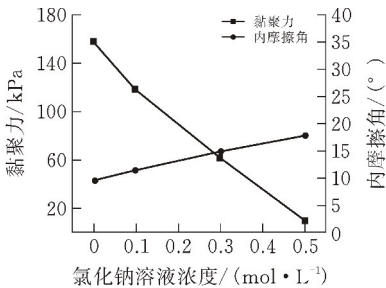


图 6 不同氯化钠浓度下内摩擦角和黏聚力的关系曲线

膨胀土的黏聚力随氯化钠溶液浓度增加而逐渐减小。0 mol/L 氯化钠溶液下的土样黏聚力最大,为 158.3 kPa;0.5 mol/L 氯化钠溶液下的土样黏聚力最小,为 9.6 kPa。随着浓度依次增大,黏聚力呈逐渐下降趋势,氯化钠溶液浓度的提高会使双电层厚度减小,扩散双电层斥力减弱,从而使黏聚力逐渐降低。总体来说,浓度对内摩擦角的影响相对较小。

由上述试验结果可得到氯化钠溶液浓度与内摩擦角、黏聚力拟合关系曲线(图 7);浓度与土样抗剪强度指标拟合方程表达式,见表 3,最终可得浓度与土抗剪强度指标的一次函数表达式。

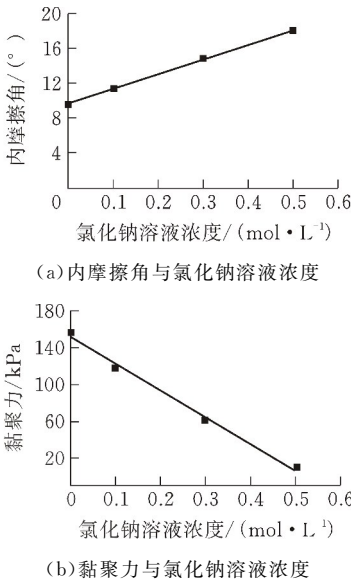


图 7 氯化钠浓度与内摩擦角、黏聚力的拟合关系曲线

表 3 内摩擦角和黏聚力的拟合方程

项目名称	拟合方程	相关系数 R^2
黏聚力/kPa	$c = -291.85x + 152.541$	0.9979
内摩擦角/(°)	$\varphi = 16.688x + 9.710$	0.99553

可得出：

$c = ax + b$ (1)

$\varphi = dx + e$ (2)

其中, a 、 b 、 d 、 e 为试验参数, 参数取值见表 3, 黏聚力和内摩擦角的拟合相关系数 R^2 为 0.9979、0.9955, 表明拟合程度较好。

土的抗剪强度公式为：

$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ (3)

式中: τ_f 土的抗剪强度, c 土的黏聚力, φ 土的内摩擦角。

将(1)和(2)代入(3)氯化纳可得氯化纳浓度与土的抗剪强度函数：

$\tau_f = -291.85x + 152.541 + \sigma \tan(16.688x + 9.71)$

4 结论

在保持土样干密度与含水率均为最佳条件下, 分别将 0, 0.1, 0.3, 0.5 mol/L 氯化钠溶液与膨胀土均匀混合, 依次进行击实试验与 CU 剪切试验, 得到结论如下：

1)在相同围压下, 不同浓度氯化钠溶液的主应差值呈现先增加后减小逐渐趋于平缓的趋势, 试样土的抗剪强度会随着氯化钠溶液浓度的增加而降低, 素土样抗剪强度最大, 说明氯化钠溶液会降低膨胀土的抗剪强度。

2)在同一氯化钠溶液浓度下, 试样土的峰值强度随围压增大而增大。

3)氯化钠溶液浓度的变化对内摩擦角和粘聚力皆有影响, 但两者相比之下, 对黏聚力影响极大。

4)浓度变化与土体抗剪强度指标呈线性关系, 可得出相对应的一次函数表达式。

[参 考 文 献]

[1] 虞海珍, 李小青, 姚建伟. 膨胀土化学改良试验研究分析[J]. 岩土力学, 2006(11): 1941-1944.

[2] 查甫生, 郝爱玲, 赵林, 等. 电石渣改良膨胀土试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 65-69 + 105.

[3] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 999-1005.

[4] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 风化砂改良膨胀土对抗剪强度指标的影响研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 276-281.

[5] 边加敏, 蒋玲, 王保田. 石灰改良膨胀土强度试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(2): 38-43.

[6] 李妥德, 赵中秀. 用矿渣复合料改良膨胀土的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1993(5): 11-23.

[7] 庄心善, 余晓彦. 石灰-玄武岩纤维改性膨胀土强度特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 166-170.

[8] 姚传芹, 韦昌富, 马田田, 等. 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 116-122.

[9] 陈永贵, 黄润秋, 朱春明, 等. 化学场对膨润土水-力特性影响研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 398-405.

Study on the Influence of Sodium Chloride Solution on the Strength of Expansive Soil

ZHOU Rong, ZHUANG Xinshan, ZHOU Mukai, PENG Chenghong

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: The compaction test and triaxial test were carried out on the expansive soil of a highway project in Nanyang, Henan Province after being saturated with different concentrations of sodium chloride solution. The results show that with the increase of the concentration of sodium chloride solution, the principal stress difference of soil samples increases first and then decreases, and the peak strength decreases gradually. The peak strength of plain soil samples is the largest. The internal friction Angle increases with the increase of the concentration, while the cohesion decreases with the increase of the concentration. Compared with the change of the cohesion, the change of the internal friction Angle is not very obvious, indicating that the change of the concentration has little effect on the internal friction Angle of soil. Furthermore, the fitting curve shows that the concentration of sodium chloride solution is linearly correlated with the shear strength index of soil, and the functions of internal friction Angle and cohesion are obtained.

Keywords: expansive soil; Sodium chloride; electric double layer; The shear strength