

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.06.012

桂林地区酸、碱污染红黏土力学效应弱化试验研究

牟春梅, 韦瑜玺

(桂林理工大学 a. 土木与建筑工程学院; b. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了研究酸、碱污染对红黏土力学性质的影响, 分别使用酸(HCl)溶液和碱(NaOH)溶液对桂林雁山红黏土进行浸泡, 考虑酸浓度(0、1%、4%、8%)和养护时间(7, 14 d), 碱浓度(0、4%、8%、12%)和养护时间(7, 14 d)双因子因素, 通过室内试验, 包括固结试验、三轴试验(UU)和直剪试验(快剪), 分析酸碱污染对桂林雁山红黏土压缩性指标和抗剪强度指标的变化。试验结果表明: 1) 红黏土在 HCl 和 NaOH 中浸泡后, 其压缩模量、黏聚力与内摩擦角逐渐减小, 且随着酸、碱浓度及养护时间增加, 减小的幅度增大; 2) 对比经 HCl 和 NaOH 浸泡红黏土, 在相同养护时间下, 经 HCl 浸泡红黏土的压缩模量、黏聚力的变化程度大于经 NaOH 浸泡红黏土的变化, 内摩擦角反之; 3) 随着养护时间增加, 经 HCl 浸泡的红黏土黏聚力与内摩擦角的变化程度小于经 NaOH 浸泡红黏土的变化, 压缩模量反之。对试验结果分析后认为: 在酸碱溶液作用下, 红黏土的化学成分、颗粒大小及形状都将发生变化, 使其原本稳定的结构状态发生改变, 导致桂林地区酸碱污染红黏土力学效应弱化。

关键词: 桂林; 酸碱污染红黏土; 力学效应弱化; 试验研究

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)06-109-10

Experimental study on the weakening of mechanical properties of red clay contaminated by acid and alkali in Guilin area

MU Chunmei, WEI Yuxi

(a. College of Civil Engineering and Architecture; b. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China)

Abstract: In order to study the effect of acid and alkali pollution on the mechanical properties of red clay, laboratory tests (consolidation test, triaxial test (UU) and direct shear test (quick shear)) have been carried out of the red clay of Yanshan, Guilin, and the samples are soaked in acid solution (HCl) and alkali solution (NaOH), respectively, to get the changes of compressibility index and shear strength index of the red clay by acid and alkali pollution. Two factors, the concentration of both acid(0, 1%, 4%, 8%) and alkali (0, 4%, 8%, 12%) and the same curing time (7 d, 14 d) were taken into account. The results show that: 1) the compression modulus, cohesive force and internal friction angle of red clay soaked in HCl or

收稿日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41867039); 广西自然科学基金资助项目(2017GXNSFAA198213); 广西高校科学技术研究重点项目(KY2015ZD055); 广西岩土力学与工程重点实验室资助项目(2015A0103)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41867039), Guangxi Natural Science Foundation (2017GXNSFAA198213), Key Projects of Scientific and Technological Research in Guangxi Colleges and Universities (KY2015ZD055), and Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering (2015A0103).

作者简介: 牟春梅(1968—), 女, 副教授, 主要从事岩土工程的教学与科研工作, (E-mail)421079166@qq.com。

NaOH gradually decreased, and the extent of which became greater with the increase of acid or alkali concentration and curing time; 2) under the same curing time, the degree of change of compressive modulus and cohesion of the red clay soaked in HCl is more significant than that of the red clay soaked in NaOH, and the case was just the opposite in terms of the internal friction angle; 3) with the increase of curing time, the cohesion and internal friction angle of red clay soaked in NaOH has greater degree of change than that of the red clay soaked in HCl, and the case was just the opposite in terms of the compression modulus. The analysis of the test results indicate that the chemical composition, particle size and shape of red clay will be changed under the action of acid and alkali solution, which will bring changes to the original stable structure state and weaken the mechanical effect of red clay in Guilin area.

Keywords: Guilin; acid-alkali contaminated red clay; weakening of mechanical effect; experimental study

桂林地区广泛分布的红黏土是由碳酸盐岩类岩石,包括玄武岩、花岗岩等,在湿热气候下经风化后残积、坡积形成的褐红色、棕红色或黄褐色黏土^[1],具有孔隙大,含水量高,液塑限高等特点,且结构性强,存在上硬下软的成层分布特征^[2]。

近年来,在项目建设过程中遇到的红黏土,其天然地基以及人工地基处理中屡次发生问题。问题主要集中在两个方面:一是天然地基表现出承载力较好,但局部变形较大,特别是在建筑物修建好以后有持续的沉降变形,导致墙体开裂;另外,由地基处理加固的红黏土复合地基,其加强体的强度呈现出不同程度的降低,而且在同一个建筑场地加强体强度降低的幅度也大不相同,导致复合地基的承载力远远达不到设计要求。由此耗费了大量的人力物力,不仅遭受了严重的经济损失,而且拖延了工期,造成了不良的社会影响^[3-6]。欧美等许多国家自 20 世纪 70 年代就已开始对土体污染进行研究和保护,主要侧重于对废弃物填埋场及污染土处理等方面的研究,并逐渐把电渗法和动电技术引入到污染土处理研究领域^[7-9]。国内学者从 20 世纪 80 年代中期开展了一系列研究。刘汉龙等^[10-11]、朱春鹏等^[12-13]在室内模拟自然条件下的酸碱污染土,通过酸碱污染土与未污染土对比后发现:污染后土体有机质含量减少,液塑限增大,孔隙比增大,压缩性增强,抗剪强度降低,工程性质恶化,随着酸碱浓度增加,土体性质变化越剧烈。顾展飞等^[14]以桂林红黏土为研究对象,对浸泡于不同浓度的 HCl、NaOH、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液中的试样进行固结实验;谌文武等^[15]通过无侧限抗压强度试验,研究了不同龄期条件下,不同 SH 固含量固化酸碱污染黄土的抗压强度特征,并对影响土体强度变化及 SH 加固效果的微观机制进行了分析;高彦斌等^[16]通过室内试验,研究了硫酸、盐酸和氢氧化钠污染重塑粉质黏土的现象、孔隙水离子成分以及土的塑性、压缩性和强度的变化规律。做了相关研究的学者还有孙重初^[17]、佰桐震等^[18]、Huang 等^[19]、Mashalah 等^[20]、Bell^[21]等。研究表明,酸、碱溶液使天然土的物理力学性质发生改变,但对于不同地区、不同土质,各种指标随着酸、碱浓度和养护时间的变化趋势也不同,即使在工程分类中属同类土亦如此。基于此,笔者围绕桂林岩溶区污染红黏土工程地质性质变化规律这一课题,选取具有代表性的桂林雁山地区红黏土作为试验土样,分别以盐酸(HCl)和氢氧化钠(NaOH)为污染源,人工制备酸、碱污染红黏土土样,对酸碱污染红黏土的力学性质开展试验研究。希望通过对酸碱污染红黏土力学性质的研究以及对力学性质弱化机理的分析对桂林地区的发展建设提供一些参考。

1 试验方案

1.1 试验材料的选取

1) 盐酸(HCl):桂林地区地下水呈弱酸性^[22]。酸性试剂最常见的有盐酸和硫酸两种,为了更好地模拟自然条件下酸性溶液对桂林红黏土力学性质的影响,根据前人的研究^[11-15,18],试验选用初始浓度为 36.5% 的浓盐酸作为原材料。结合桂林地区的实际情况,选择配制质量分数为 0(Y)、1%(a)、4%(b)、8%(c) 的酸污染液。

2) 氢氧化钠(NaOH):桂林地区碱污染红黏土的污染物成分极其复杂,主要来自农田药物喷洒、化肥使用、农蓄及生活污水等,如:化肥(尿素、铵态氮肥)、农药(钠盐制剂、钾盐制剂)和含有洗涤剂(洗衣粉、沐浴露)的生活污水,这些污染物易导致土体碱化,考虑碱化过程是指土壤吸收性复合体为钠离子饱和的过程,以

及便于溶液的配制,本研究中选取常见且具有代表性的氢氧化钠(NaOH)作为污染物,含量纯度大于等于96%,其他含有杂质较多的成分为碳酸盐,含量约为1.5%。将氢氧化钠晶体配制成分别为0(Y)、4%(A)、8%(B)、12%(C)的NaOH溶液。

3) 试验土样:土样取自桂林雁山地区,取土深度1~2 m,主要由更新世残积土、残坡积土及冲洪积土组成并经后期湿热化作用改造形成的高塑性黏土,红黏土厚度为1~25 m,其下伏岩性为厚层灰岩。让土样在阳光下自然暴晒风干,风干后含水率约为2%~3%,用木槌敲碎并经过2 mm标准土壤筛过滤,放入密封塑料桶内备用。红黏土物理力学性质指标统计值如表1所示。

表1 红黏土基本物理力学性质指标统计表

Table 1 Basic physical and mechanical properties of red clay

天然含水率/ %	土粒相对 密度	最优含水率/ %	液限/%	塑限/%	塑性指数	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/ MPa
40.2	2.724	29	59.68	36.89	22.79	16.70	26.21	0.684	3.681

1.2 试验方案

1) 固结试验分为2组:

- ① 相同养护时间,不同浓度HCl或NaOH污染对土的压缩模量的影响;
- ② 不同养护时间下同一浓度HCl或NaOH污染对土的压缩模量的影响。

2) 三轴试验(UU)分为2组:

- ① 相同养护时间,不同浓度HCl污染对土的抗剪强度指标的影响;
- ② 不同养护时间对同一浓度HCl污染土的抗剪强度指标的影响。

3) 直剪试验(快剪)分为2组:

- ① 相同养护时间,不同浓度NaOH污染对土的抗剪强度指标的影响;
- ② 不同养护时间对同一浓度NaOH污染土的抗剪强度指标的影响。

按照拟定的试验方案,参照《土工试验规程》(SL237-021-1999)操作,固结试验仪器选用南京土壤仪器厂生产的三联固结仪,先对HCl污染红黏土进行分析,再分析NaOH对红黏土的影响。由于学校实验室的局限性及养护试样的时效性,HCl、NaOH污染红黏土的抗剪强度指标分别通过三轴试验(UU)、直剪试验(快剪)获得,通过分析其抗剪强度指标变化程度的大小,分析HCl、NaOH对红黏土的腐蚀强度。三轴试验(UU)采用的是南京土壤仪器厂生产的应变控制式三轴仪,直剪试验(快剪)使用ZJ型应变控制式直剪仪(四联剪)。用制备好的不同酸、碱浓度,不同浸泡养护时间的红黏土试样,直接进行室内试验,同一条件下的试样都制备5个进行平行试验。获取酸、碱污染红黏土的压缩性指标与抗剪强度指标,探究不同浓度的酸、碱溶液,不同浸泡养护时间条件下红黏土力学性质的变化规律。

2 试验结果与分析

2.1 压缩模量的变化

污染红黏土的压缩特性通过标准固结试验得到。图1为酸、碱污染红黏土的压缩模量随酸、碱浓度和养护时间的变化。 η 为不同浓度污染红黏土的压缩模量(b)与原状红黏土压缩模量(Y)之差占原状土压缩模量的百分比,即 $\eta = \frac{b-Y}{Y} \times 100\%$ 。

图1表明,HCl污染红黏土曲线前段(HCl质量分数为0~1%)减小的程度最大,曲线后段(HCl质量分数为1%~8%)稳定减小;而NaOH污染红黏土曲线中段(NaOH质量分数为4%~8%)减小的程度最大,后段(NaOH质量分数为8%~12%)次之。可见,酸污染红黏土在酸浓度较低时反应较明显,而碱污染红黏土则在碱浓度较高时反应明显。

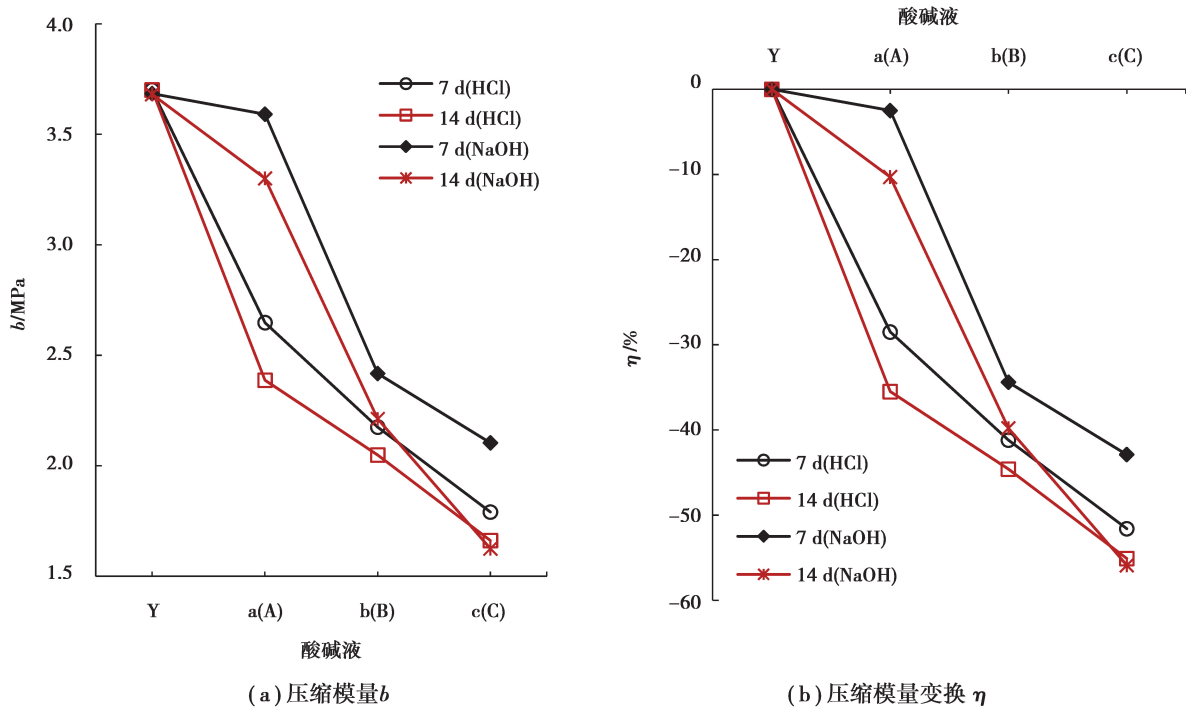


图 1 酸、碱污染红黏土的压缩模量随浓度和养护时间的变化

Fig. 1 Changes of compressive modulus of contaminated red clay with concentration and curing time

在养护时间相同的情况下,不同浓度酸、碱污染均使红黏土的压缩模量减小。以养护时间 7 d 为例,酸污染红黏土的压缩模量从 HCl 质量分数 0 处最大值 3.700 MPa 减小至 8% 处最小值 1.790 MPa,减幅 51.6%,且在 HCl 质量分数 0~1% 区间减幅为 28.5%;同理,碱污染红黏土的压缩模量从 NaOH 质量分数 0 处最大值 3.684 MPa 减小至 12% 处最小值 2.103 MPa,减幅 42.9%,且在 NaOH 质量分数 4%~8% 区间减幅为 31.9%。可见,HCl 浸泡的土样压缩模量变化程度要显著于 NaOH 浸泡的土样,说明前者压缩性较高。

污染物浓度相同时,养护时间增加(7 d→14 d)使酸、碱污染红黏土的压缩模量进一步减小。如 HCl 质量分数为 1%,养护时间为 7,14 d 时,酸污染红黏土的压缩模量分别为 2.647,2.387 MPa,前后变化-7.0%;HCl 质量分数为 4%、8%,随着养护时间由 7 d 增至 14 d,酸污染红黏土的压缩模量前后变化分别为-3.4%、-3.5%。而对于碱污染红黏土,当 NaOH 质量分数为 4%,养护时间为 7,14 d 时,酸污染红黏土的压缩模量分别为 3.591,3.301 MPa,前后变化-7.8%;同样,NaOH 质量分数为 8%、12%,随着养护时间由 7 d 增至 14 d,碱污染红黏土的压缩模量前后变化分别为-5.4%、-13.0%。可见,随着养护时间增加,酸碱污染红黏土的压缩模量均呈现减小的趋势,HCl 质量分数为 1% 时,酸污染红黏土的压缩模量随着养护时间的增加而减小的幅度最大,而 NaOH 质量分数为 12% 时,碱污染红黏土的压缩模量随着养护时间增加的减小幅度最大,与前面得出结论相同,HCl 与红黏土在酸浓度较低时反应较明显,而 NaOH 与红黏土则在碱浓度较高时反应明显。

2.2 抗剪强度指标的变化

本次试验对酸污染红黏土采取三轴剪切试验,碱污染红黏土采取直剪试验以确定污染土的抗剪强度指标^[23-24],其三轴剪切试样与直剪试样均符合常规破坏形式(详见图 2)。

酸、碱污染红黏土在不同浓度、不同养护时间的抗剪强度指标(黏聚力 c 、内摩擦角 φ) 试验结果见图 3~4。

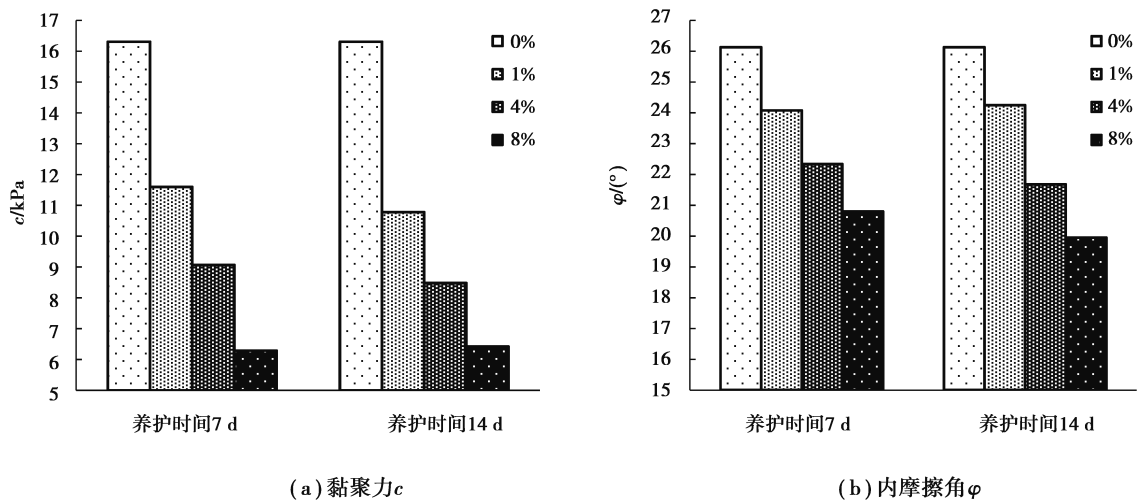


(a) 三轴试验土样破坏形式

(b) 直剪试验土样破坏形式

图 2 土样破坏形式

Fig. 2 Soil sample failure form

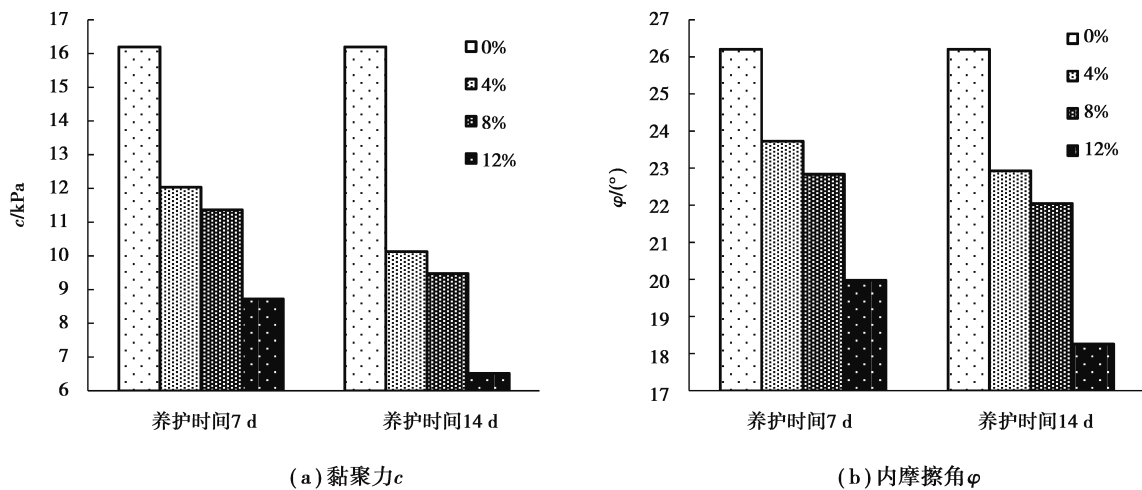


(a) 黏聚力c

(b) 内摩擦角φ

图 3 酸污染红黏土的抗剪强度指标随酸浓度和养护时间的变化

Fig. 3 Variation of shear strength index of acid-contaminated red clay with alkali concentration and curing time



(a) 黏聚力c

(b) 内摩擦角φ

图 4 碱污染红黏土的抗剪强度指标随碱浓度和养护时间的变化

Fig. 4 Variation of shear strength index of alkali contaminated red clay with alkali concentration and curing time

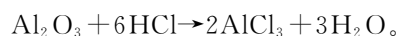
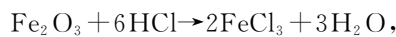
在养护时间相同的情况下,随着 HCl、NaOH 浓度的增加,酸、碱污染红黏土的黏聚力逐渐减小(图 3(a)、图 4(a)),酸、碱污染红黏土的内摩擦角逐渐减小(图 3(b)、图 4(b))。黏聚力和内摩擦角的变化率 η_1 和 η_2 定义为原状土黏聚力 c_0 和内摩擦角 φ_0 分别与污染土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的差除以原状土的黏聚力 c_0 或内摩擦角 φ_0 的百分比,即 $\eta_1 = \left| \frac{c_0 - c}{c_0} \right| \times 100\%$, $\eta_2 = \left| \frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0} \right| \times 100\%$ 。以养护 14 d 为例, HCl 质量分数为 0 浸泡的红黏土的黏聚力为 16.31 kPa,随着 HCl 质量分数增加,黏聚力值下降,其最大值与最小值 6.42 kPa 分别出现在 0 和 8% 处,两者相差 60.6%。同样地,随着 NaOH 质量分数增加,黏聚力最大值 16.20 kPa 和最小值 6.52 kPa 分别出现在 0 和 12% 处,两者相差 59.8%。可见,经 HCl 浸泡红黏土的黏聚力减小幅度略大于 NaOH 浸泡土,且随着浓度增大,其变化的幅度也增大。HCl 质量分数为 0 时,红黏土的内摩擦角为 26.15° ,随着 HCl 质量分数增加,数值稳定减少,最大峰值和最小值 19.95° 分别出现在 0 和 8% 处,前后变化程度为 23.7%;对于 NaOH 浸泡的红黏土,随着 NaOH 质量分数增加,其内摩擦角减小的幅度不均匀,质量分数在 0~4% 和 8%~12% 污染下红黏土的内摩擦角减小的幅度大于质量分数在 4%~8% 区间的变化,最大值 26.21° 和最小值 18.26° 分别出现在 0 和 12% 处,前后变化幅度 30.3%,与黏聚力相反,经 NaOH 浸泡的红黏土的内摩擦角的变化幅度大于经 HCl 浸泡的红黏土。

对于酸(HCl)污染红黏土,随着养护时间增加(7 d→14 d),当 HCl 质量分数为 1%、4%、8% 时,黏聚力进一步减小的幅度分别为 -5.0%、-3.7%、+0.8%,内摩擦角进一步减小的幅值分别为 +0.6%、-2.5%、-3.2%。HCl 质量分数为 1%、4% 时,黏聚力随养护时间增加而减小,但在 HCl 质量分数为 8% 时出现小幅增大的波动(6.29 kPa→6.42 kPa);HCl 质量分数为 4%、8% 时,对应的内摩擦角随养护时间增加而减小,但在 HCl 质量分数为 1% 时出现小幅增大的波动($24.08^\circ \rightarrow 24.25^\circ$)。对于碱(NaOH)污染红黏土,随着养护时间从 7 d 增加到 14 d,黏聚力与内摩擦角均减小,当 NaOH 质量分数为 4%、8%、12% 时,黏聚力进一步减小的幅值分别为 -11.8%、-11.7%、-13.7%,内摩擦角进一步减小的幅值分别为 -3.0%、-3.0%、-6.5%。由以上数据的整体变化趋势可知,随着养护时间增加,酸(HCl)污染红黏土抗剪强度指标的变化幅值均小于碱(NaOH)污染红黏土。对于酸(HCl)污染红黏土抗剪强度指标出现小幅异常的主要原因有两个方面:一是经密封放置的酸污染土样没有达到完全密封而导致溶液水分散失;其次是酸与土样作用时间过长而没有及时进行试验致使污染土样凝固硬化作用减弱。这两方面对试验结果都会有一定的影响。

3 酸、碱污染红黏土力学效应弱化机理

桂林红黏土的主要化学成分是 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 ,且含量较高,一般可达到 25%~35%^[25-26],是土中主要的胶结物质。 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 在酸碱溶液中均会发生反应。

当红黏土被酸污染后(以 HCl 为例),随着酸含量增加, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 与酸溶液发生化学反应的机会大大增加(图 5(b))。反应如下:



新生成的 FeCl_3 和 AlCl_3 溶解于溶液中,通过扩散作用流动到土体之外。因此酸污染土中的氧化铁、氧化铝的含量远低于原状红黏土,使酸污染红黏土的固相成分减少,力学性质弱化。

同时, SiO_2 与水溶液发生水解平衡,反应式如下:



水解作用是一个双向可逆的过程,当溶液中 H^+ 含量较少时,化学反应式正向进行, SiO_2 通过解离作用生成 SiO_3^{2-} 和 H^+ ;盐酸溶液加入后,随着 H^+ 含量的增加,反应式逆向进行, SiO_2 的含量有所增加。由于游离 SiO_2 含量增加,原有已经聚集结块的土体进一步细碎化,团粒结构被驱散,黏粒含量增多(图 5(c)),使污染红黏土的压缩性增加、力学特性进一步弱化。

另外,桂林地区红黏土是由碳酸盐岩长期风化作用所形成,其中含有大量的 CaCO_3 和 MgCO_3 ,当红黏土被污染后,由于 H^+ 离子增加, CaCO_3 和 MgCO_3 也会溶解在盐酸溶液中,产生 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,新生成的离子又会与盐酸溶液发生离子交换反应(图 5(d))。具体反应式如下:

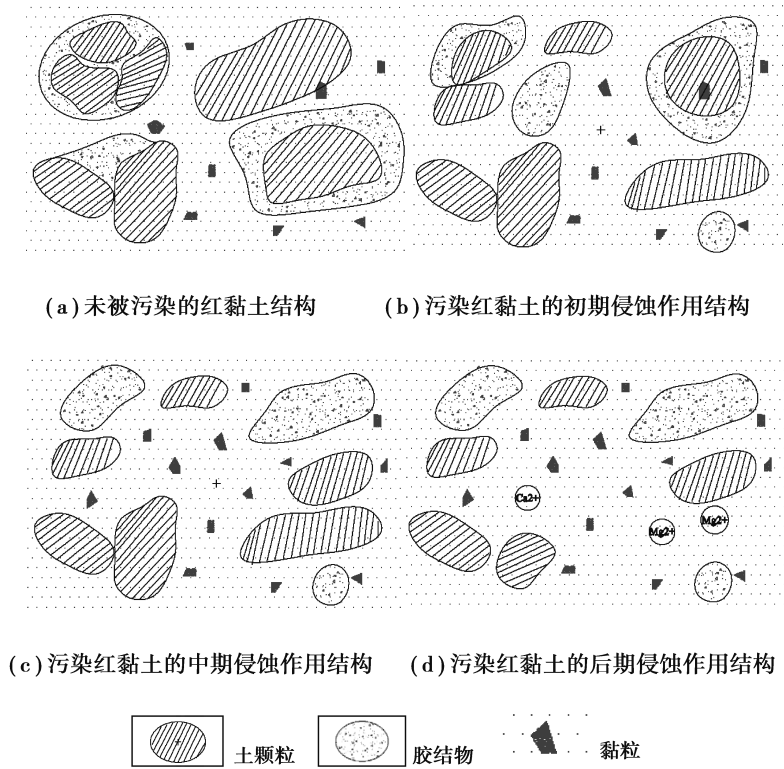
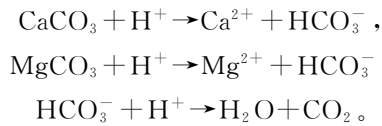


图 5 HCl 溶液污染红黏土的侵蚀作用情况结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of erosion of red clay contaminated by HCl solution



可溶盐的溶解和离子交换反应使污染红黏土中固相物质减少,土体的密实程度和强度均下降,力学效应弱化。

在碱性溶液中(以 NaOH 为例),碱与土作用的 4 个阶段是引起红黏土力学性质发生变化的主要原因,其相互作用引起了红黏土颗粒的变化,使红黏土原本稳定的结构状态发生改变。图 6(a)为未被污染的红黏土结构示意图,由于未被污染,游离氧化物(主要为 SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃)包裹在粘土矿物表面或充填在粘土矿物集合体间隙,起到结构连结作用。在前期水解作用中,NaOH 溶解于水后离解为 Na⁺ 和 OH⁻, Na⁺ 和 OH⁻ 同时侵入土体。红黏土受 NaOH 污染的初期(图 6(b)),随着碱溶液持续侵入,前期水解作用电离出的 OH⁻ 与红黏土中的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 反应生成 SiO₃²⁻ 和 AlO₂⁻, SiO₃²⁻ 和 AlO₂⁻ 与 Na⁺ 反应生成化学性质不稳定、易溶于水的 Na₂SiO₃、NaAlO₂, Na₂SiO₃、NaAlO₂ 在水中发生水解,原本的化学结构遭到破坏,土颗粒间原本起到胶结作用的物质被消耗,使得红黏土原本的结构发生破坏,碱溶液浓度越大造成的破坏性越大,导致土体的抗变形能力持续减弱,抗剪强度不断降低。反应式如下:

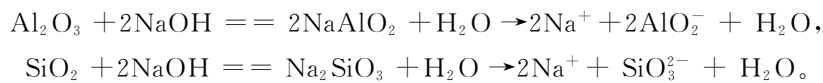


图 6(c)为污染红黏土的中期胶结作用结构示意图。随着碱溶液侵入土体的时间增长,红黏土和碱溶液充分反应,NaOH 与红黏土中的胶结物质 SiO₂ 和晶体物质 Al₂O₃ 发生反应,分别形成具有黏聚性物质 Na₂SiO₃ 和 NaAlO₂,由于 Na₂SiO₃ 化学性质不太稳定,易吸潮,易溶于水,在溶液中易与 H₂O、CO₂ 发生反应,生成 H₂SiO₃ 和 Na₂CO₃,其中 H₂SiO₃ 为胶体,Na₂CO₃ 为晶体;同理,NaAlO₂ 在水中发生水解,生成 Al(OH)₃(絮状沉淀物)。图 6(d)为污染红黏土的后期溶解作用结构示意图。新生成的胶体物质性质不稳定,极易溶于水,使土颗粒间的胶结能力变差,从而导致受到碱污染的红黏土压缩性增强。反应式如下:

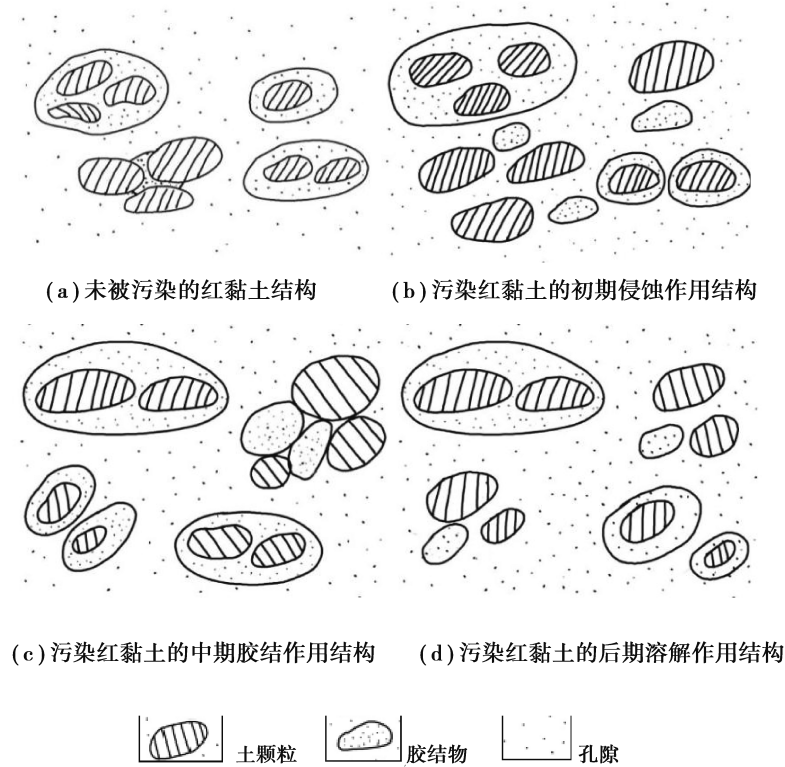
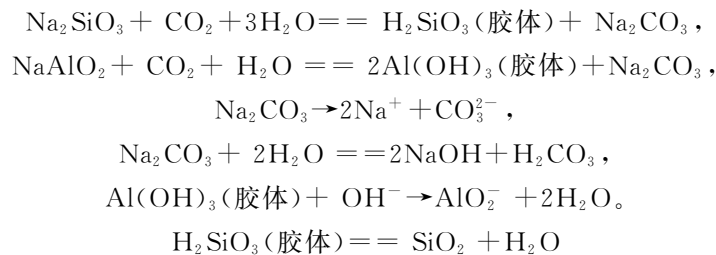


图 6 NaOH 溶液污染红黏土的碱-土作用情况结构示意图

Fig. 6 Structure of alkali-soil interaction of red clay polluted by NaOH solution



对比酸碱污染红黏土力学效应弱化机理:在侵蚀初期(图 5(b)、图 6(b)),酸污染土中随着 HCl 增加,土中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 被消耗,固相成分较少,而碱污染土中 SiO_2 、 Al_2O_3 与 NaOH 反应被消耗,胶结物减少,两者土中的氧化物在前期均被消耗;侵蚀中期(图 5(c)、图 6(c)),在酸污染土中,HCl 进一步增多使 SiO_2 的含量有所增加,团粒结构被驱散,黏粒含量增多,在碱污染土中,由前期反应生成的 Na_2SiO_3 和 NaAlO_2 与 H_2O 、 CO_2 发生反应,生成 H_2SiO_3 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 絮状沉淀物,前者土中氧化物 SiO_2 增多,土体细碎化,后者重新生成絮状沉淀物,土颗粒间胶结;在侵蚀后期(图 5(d)、图 6(d)),酸污染土中 CaCO_3 和 MgCO_3 溶解并发生离子交换作用,使土中固相物质进一步减少,而碱污染土中,新生成的絮状沉淀物溶于水被消耗,使土颗粒间的胶结能力变差,两者都会导致土体进一步细碎化,团粒结构被驱散。

4 结 论

1) 红黏土在 HCl 和 NaOH 溶液中浸泡后,随着 HCl 和 NaOH 的质量分数及养护时间增加,其压缩模量、黏聚力和内摩擦角均减小。酸污染红黏土的压缩模量、黏聚力和内摩擦角在 HCl 质量分数为 0~1% 段减小的幅度最大;碱污染红黏土的压缩模量在 NaOH 质量分数为 4%~8% 段减小的幅度最大,其黏聚力与内摩擦角在 NaOH 质量分数为 0%~4% 和 8%~12% 段减小的幅度较明显。说明酸污染红黏土在酸浓度较低时对弱化红黏土力学性质影响大,而碱污染红黏土在碱浓度较高时对弱化红黏土力学性质影响大。

2) 比较 HCl 和 NaOH 对土样的压缩模量、黏聚力和内摩擦角的影响发现,在相同养护时间下,HCl 对压

缩模量和黏聚力的影响强于 NaOH,内摩擦角反之。随着养护时间增加(7 d→14 d),经 HCl 浸泡的红黏土黏聚力和内摩擦角的变化程度小于 NaOH 浸泡的红黏土,压缩模量反之。

3) 由于桂林地区原状红黏土含有氧化物、盐类及起胶结作用的矿物质,当红黏土被酸污染后,红黏土中倍半氧化物 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 减少、 SiO_2 含量增加、 CaCO_3 和 MgCO_3 溶解及离子交换,都直接影响酸污染红黏土的物理力学性质,致使酸污染红黏土力学性质弱化;碱污染红黏土由于碱与土相互作用水解电离出的 OH^- 与红黏土中起胶结作用的矿物质(SiO_2 、 Al_2O_3)发生系列物理化学反应,使污染红黏土的土颗粒间的胶结物被溶解后又重新生成絮状物,导致土颗粒间的胶结力减小,土体原本稳定的结构状态发生改变,变形能力增强,抗剪强度减小。酸、碱与红黏土相互作用、矿物质溶解、离子交换、土颗粒变小以及颗粒间胶结力变差等都是导致桂林地区污染红黏土力学效应弱化的根本原因。

参考文献:

- [1] 张添锋,孙德安,刘文捷,等.桂林压实红黏土抗剪强度与含水率关系[J].上海大学学报(自然科学版),2014,20(5):586-595.
ZHANG Tianfeng, SUN De'an, LIU Wenjie, et al. Relationship between shear strength and moisture content for Guilin laterite[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2014, 20(5): 586-595. (in Chinese)
- [2] 陈学军,齐运来,卢丽霞,等.不同各样方法对桂林红黏土最优含水率及最大干密度的影响[J].安全与环境工程,2013,20(5):136-139.
CHEN Xuejun, QI Yunlai, LU Lixia, et al. Impact of different preparation methods on the optimum moisture content and maximum dry density of Guilin red clay[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(5): 136-139. (in Chinese)
- [3] Mu C, Han K, Liu Y. Analysis of the failure of a polluted red clay foundation in the north Guilin karst area[M]// Unsaturated soil mechanics - from theory to practice. CRC Press, 2015: 899-902.
- [4] 牟春梅,李佰锋.有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J].水文地质工程地质,2008,35(3):42-46.
MOU Chunmei, LI Baifeng. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(3): 42-46. (in Chinese)
- [5] 刘宝臣,牟春梅.有机质污染红黏土地基加固效果的力学效应分析[J].工业建筑,2010,40(2):128-131.
LIU Baochen, MOU Chunmei. Study on mechanical effect of red clay polluted by organic matter during strengthening foundation[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2): 128-131. (in Chinese)
- [6] Sridharan A, Nagaraj T S, Sivapullaiah P V. Heaving of soil due to acid contamination[C]// Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, June 15-19, 1981, Stockholm. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981: 383-386.
- [7] Ho Y A, Pufahl D E, Barbour S L. Effects of brine contamination on volume change behavior of fine-grained soils: materials from theory to practice [C]// Proceedings of the 42nd Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba. Canadian Geotechnical Society, 1989: 272-279.
- [8] Rajput V S, Higgins A J, Singley M E. Cleaning of excavated soil contaminated with hazardous organic compounds by washing[J]. Water Environment Research, 1994, 66(6): 819-827.
- [9] Piccoll S, Benoit J. Geo-environmental testing using the Envirocone 7[C]// Proceedings of the ASCE Specialty Conference Geoenvironment 2000, February 24-26, 1995, New Orleans, LA. American Society of Civil Engineers, 1995: 93-104.
- [10] 刘汉龙,朱春鹏,张晓璐.酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J].岩土工程学报,2008,30(8):1213-1217.
LIU Hanlong, ZHU Chunpeng, ZHANG Xiaolu. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1213-1217. (in Chinese)
- [11] 刘汉龙,朱春鹏,沈扬.酸碱污染土工程性质研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(11):39-44.
LIU Hanlong, ZHU Chunpeng, SHEN Yang. Study on fundamental engineering properties of polluted soil by acid and alkali[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(11): 39-44. (in Chinese)
- [12] 朱春鹏,刘汉龙,张晓璐.酸碱污染土压缩特性的室内试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(10):1477-1483.
ZHU Chunpeng, LIU Hanlong, ZHANG Xiaolu. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1477-1483. (in Chinese)
- [13] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬.酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(7):1146-1152.

- ZHU Chunpeng, LIU Hanlong, SHEN Yang. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1146-1152. (in Chinese)
- [14] 顾展飞,刘琦,卢耀如,等.酸碱及可溶盐溶液对桂林红黏土压缩性影响实验研究[J].中国岩溶,2014,33(1): 37-43.
GU Zhanfei, LIU Qi, LU Yaoru, et al. Experimental study of compressibility of red clay affected by acid-base and soluble salt solutions[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(1): 37-43. (in Chinese)
- [15] 湛文武,刘宏伟,张起勇,等.SH 加固酸碱污染黄土的抗压强度特性试验研究[J].桂林理工大学学报,2017, 37(3): 422-428.
CHEN Wenwu, LIU Hongwei, ZHANG Qiyong, et al. Compressive strength properties of soil polluted by acid and alkali consolidated by SH[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(3): 422-428. (in Chinese)
- [16] 高彦斌,刘佳丹,王雨滢.酸碱污染重塑粉质黏土的塑性及其与力学特性的关系[J].岩土工程学报,2018,40(11): 2103-2109.
GAO Yanbin, LIU Jiadan, WANG Yuying. Plasticity and its relationship with mechanical properties of a remolded silty clay contaminated by several acids and bases[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2103-2109. (in Chinese)
- [17] 孙重初.酸液对红黏土物理力学性质的影响[J].岩土工程学报,1989, 11(4): 89-93.
SUN Chongchu. Effects of acid on the mechanical properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 89-93. (in Chinese)
- [18] 伯桐震,黄英,石崇喜,等.酸污染红土物理性质的变化特征[J].水文地质工程地质,2012, 39(2):111-115.
BO Tongzhen, HUANG Ying, SHI Chongxi, et al. Variation characteristics of physical properties of acid pollution laterite[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(2): 111-115. (in Chinese)
- [19] Huang Y, Bo T, Jin K, et al. The research of shear strength and micro-structural characteristics of acid pollution laterite[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405/406/407/408: 566-570.
- [20] Khamsehchiyan M, Hossein Charkhabi A, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils[J]. Engineering Geology, 2007, 89(3/4): 220-229.
- [21] Bell F G. Lime stabilisation of clay soils[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1989, 39(1): 67-74.
- [22] 刘之葵,陈逸方,邱晓娟,等.不同酸碱度对改良红黏土力学性质及结构的影响[J].人民长江,2016,47(16):77-82.
LIU Zhikui, CHEN Yifang, QIU Xiaojuan, et al. Research on mechanical properties and microstructure of improved Guilin red clay under different pH environment[J]. Yangtze River, 2016, 47(16): 77-82. (in Chinese)
- [23] Mitchell J K, Campanella R G. Closure on bonding, effective stresses, and strength of soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(SM2): 478.
- [24] 中村真也,宜保清一.地すべり土の回復強度と垂直応力の影響[J].地すべり,2000, 37(3): 18-24.
Nakamura S, Gibo S. The recovered strength of landslide soils and its relation to the effective normal stress[J]. Journal of the Japan Landslide Society, 2000, 37(3): 18-24. (in Japanese)
- [25] 韦复才.桂林红黏土的物质组成及其工程地质性质特征[J].江西师范大学学报(自然科学版),2005,29(5): 460-464.
WEI Fucui. Material compositions and engineering geological properties of Guilin red soil[J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science), 2005, 29(5): 460-464. (in Chinese)
- [26] 吕海波,曾召田,尹国强,等.广西红黏土矿物成分分析[J].工程地质学报,2012,20(5):651-656.
LV Haibo, ZENG Zhaotian, YIN Guoqiang, et al. Analysis of mineral composition of red clay in Guangxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 651-656. (in Chinese)