

DOI: 10.11779/CJGE201811017

# 酸碱污染重塑粉质黏土的塑性及其与力学特性的关系

高彦斌<sup>1</sup>, 刘佳丹<sup>1</sup>, 王雨滢<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国建筑工业出版社, 北京 100037)

**摘要:** 酸碱溶液会显著改变黏性土的力学特性因而在污染土的研究中备受关注。通过室内试验, 详细研究了硫酸、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。从孔隙溶液的 pH 值、离子交换以及土的结构三方面解释了硫酸和氢氧化钠污染土塑性增大、盐酸污染土塑性减小的机理。给出了这 3 种污染土的力学特性与塑性指标之间的关系, 并与一些用于非污染重塑土的经验公式进行了对比。发现这 3 种酸碱污染土均表现出一定的结构性, 尽管结构性形成的机理并不相同, 但均导致压缩性增大, 适用于非污染重塑土的经验公式会低估这类污染土的压缩性。研究发现这种低浓度的污染土的结构性不足以改变不排水抗剪强度  $c_u$  与液性指数  $I_L$  之间的关系, 因而其强度可以大致通过未污染土的  $c_u - I_L$  关系来预测。

**关键词:** 粉质黏土; 酸碱污染; 塑性; 力学特性; 结构性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-2103-07

**作者简介:** 高彦斌(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事软土工程地质与软土工程, 黏性土污染的教学和科研工作。

E-mail: yanbin\_gao@tongji.edu.cn。

## Plasticity and its relationship with mechanical properties of a remolded silty clay contaminated by several acids and bases

GAO Yan-bin<sup>1</sup>, LIU Jia-dan<sup>1</sup>, WANG Yu-ying<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Architecture & Building Press, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The fact that the mechanical properties of clay can be significantly changed by acid and base solutions draws high attention in the study of the mechanical properties of contaminated soils. The change of ionic composition of pore water, soil plasticity, compressibility and strength of the remolded silty clay soaked by sulfuric acid, hydrochloric acid and sodium hydroxide solutions are investigated. The mechanism of the increase of plasticity by sulfuric acid and sodium hydroxide contaminated samples and the decrease of plasticity of hydrochloric acid samples are explained from three aspects: pH value, ion exchange and soil structure. The relationships between mechanical properties and plasticity indexes of the three types of contaminated soils are presented, and they are compared with the empirical formulas for uncontaminated remolded clay. It is found that although the mechanisms are not the same, the three types of contaminated soils show a certain structural effect, which leads to the increase of compressibility. Therefore, the empirical formulas between plasticity and compressibility for uncontaminated remolded clay will underestimate the compressibility of these contaminated samples. However, the structural effect is not sufficient to change the relationship between undrained shear strength  $c_u$  and liquidity index  $I_L$ , so the strength of contaminated samples can be approximately predicted through the relationship between  $c_u$  and  $I_L$  of uncontaminated samples.

**Key words:** silty clay; acid/base contamination; plasticity; mechanical property; structural effect

## 0 引言

工业废水和废液会产生大量的酸碱污染源, 对水土产生污染。当土体受到酸、碱等污染溶液侵蚀后, 其物理力学特性将发生显著的变化, 地基会产生过大变形或破坏, 因此对酸碱污染土物理力学特性的研究具有重要的工程意义(黄世铭<sup>[1]</sup>)。在 20 世纪 80 年代, 中国岩土工程和工程地质界便意识到了这方面研究的

重要性, 对酸碱污染黏性土的塑性、压缩性和抗剪强度的变化开展了相关研究工作(如黄世铭<sup>[1]</sup>; 顾季威<sup>[2]</sup>; 刘汉龙等<sup>[3]</sup>; 曹海荣等<sup>[4]</sup>)。研究结果表明, 尽管酸碱污染后黏性土的塑性变化表现出复杂的规律, 但力学特性

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772293)

收稿日期: 2017-09-10

普遍表现出退化的现象，即压缩性增大、强度降低。

塑性是黏性土的一个重要的物理特性，而塑性指标综合反映了土颗粒和孔隙水物理化学特性，也是各种黏性污染土研究中的一个重要内容。酸碱污染黏性土塑性变化的机理非常复杂，其中最关注的是孔隙溶液酸碱度（pH 值）的变化对双电层结构以及塑性的影响（Gajo 等<sup>[5]</sup>）。很多试验结果表明，酸碱介质与土的化学反应也是影响土的塑性以及力学特性的一个重要因素。这种影响不仅与酸碱介质的类型有关，还和土的成份有关，如 Sunil 等<sup>[6]</sup>对红黏土、Gajo 等<sup>[5]</sup>对钠基膨润土、Bakhshipour 等<sup>[7]</sup>对一种残积土的研究都充分说明了这一点。

土质学和土力学主要从以下两方面来解释黏性土力学特性的形成机理，即塑性和结构性。塑性被认为是影响重塑黏性土力学特性的主要因素，因此早在 20 世纪 40 年代便开始建立黏性土力学特性与塑性指标（液限  $w_L$ 、液性指数  $I_L$ 、塑性指数  $I_p$ ）之间的各种经验关系。这种经验关系在岩土工程和工程地质中发挥了重要的作用，至今仍然备受关注（Carrier 等<sup>[8]</sup>；Nakase 等<sup>[9]</sup>；Kulhawy 等<sup>[10]</sup>）。然而，这种方法在污染土力学特性的研究中却很少应用，酸碱污染土物理特性和力学特性之间的关系很少有人讨论，而那些已建立的经验关系是否适用于污染土也是值得关注的一个问题。

中国沿海地区表层广泛分布着一层受风化作用影响的以褐黄色粉质黏土为主的硬壳层。由于埋深较浅、易污染，该土层在沿海地区的水土污染防治的研究中具有重要的地位。本文从这种土作为研究对象，希望在该类酸碱污染土的物理力学特性的变化机理及物理特性与力学特性之间的关系方面做出一定的成果。

### 1 污染土样的制备

试验用上海第②层褐黄色粉质黏土。土样的比重  $G_s$  为 2.73，液限  $w_L$  为 39.6%，塑限  $w_p$  为 15.1%，塑性指数值  $I_p$  为 24.5。砂粒（粒径  $d=0.075\sim1\text{ mm}$ ）占总质量的 0.4%，粉粒占 81.6%，黏粒占（ $d<0.005\text{ mm}$ ）18%。根据 X 射线衍射分析，黏土矿物主要以伊利石为主，其次是蒙脱石和绿泥石。非黏土矿物主要以石英为主，另外含有少量的钠长石（ $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot6\text{SiO}_2$ ）、云母、沸石、针铁矿（ $\text{FeO}(\text{OH})$ ）以及一些碳酸盐矿物方解石（ $\text{CaCO}_3$ ）和白云石（ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）等。这些结果与前人对该土层矿物组成的认识基本一致（孙更生等<sup>[11]</sup>、何美临<sup>[12]</sup>）。

用蒸馏水配置 4 种不同浓度的硫酸、盐酸、氢氧化钠溶液作为污染液，浓度值见表 1 所示，质量浓度

均在 5%以内。土样共 13 个，其中污染土样 12 个，另外一个采用蒸馏水浸泡，代表未污染土以作对比。土样浸泡方法如下。将烘干、磨碎、筛分的重塑土分成 13 份，每份质量 1500 g。在容积 3 L 的烧杯中倒入 2 L 配置好的溶液。然后将土样倒入烧杯中，边倒边搅拌。此过程中发现硫酸、盐酸溶液中产生剧烈的气泡，盐酸溶液更为剧烈，持续时间也更长，这可能与盐酸的摩尔浓度较大有关。气泡应该是酸溶液与土中的碳酸盐（ $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ ）反应所产生的二氧化碳气体。然后在烧杯上覆盖保鲜膜，常温下浸泡一个月。为保证均匀性，每隔一个星期搅拌一次。一个月后，发现盐酸中土样的沉积高度小于蒸馏水中沉积的高度，而硫酸和氢氧化钠溶液中土样的沉积高度要明显大于蒸馏水中沉积的高度。盐酸和硫酸浸泡土样的溶液呈黄色，而氢氧化钠的变成棕红色。

表 1 配置的溶液及浸泡后土样的特征

Table 1 Solutions and characteristics of contaminated samples					
溶液	土样号	质量浓度 $c/\%$	物质的量浓度 $c_1/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$w_0/\%$	$e_0$
$\text{H}_2\text{O}$	O	—	—	66.31	1.80
	A1	0.28	0.03	68.42	1.86
	A2	1.09	0.11	72.32	1.95
	A3	2.15	0.23	75.15	2.03
$\text{H}_2\text{SO}_4$	A4	3.34	0.34	79.02	2.13
	B1	0.28	0.08	63.80	1.72
	B2	1.13	0.30	62.75	1.69
	B3	2.29	0.61	59.18	1.58
$\text{HCl}$	B4	3.48	0.91	58.39	1.58
	C1	1.10	0.28	68.53	1.86
	C2	2.17	0.56	76.51	2.08
	C3	3.23	0.83	83.65	2.28
$\text{NaOH}$	C4	4.25	1.11	81.91	2.23

浸泡一个月以后，取样测定含水率  $w_0$  及孔隙比  $e_0$ ，结果见表 1。蒸馏水土样的  $e_0$  为 1.80；硫酸和氢氧化钠土样  $e_0$  的要比蒸馏水的高出 0~0.43，盐酸的要比蒸馏水的低 0~0.22，且浓度越大，这种差别也越大。这与前面提到的不同溶液中沉积土样的高度吻合。然后将污染土倒入直径为 11 cm，高度为 10 cm 的固结器，在 5 kPa 的竖向压力下预压约 5 d 后测定含水率和孔隙比  $e_1$ 。预压后土样的孔隙比  $e_1$  与浸泡后孔隙比  $e_0$  的对比见图 1。可以看出，预压后污染土的孔隙比总体上要大于未污染土的孔隙比，包括盐酸污染土。预压后盐酸污染土的孔隙比呈现出随浓度增大而略微增大的现象，这与浸泡后的规律是相反的，这可能与盐酸污染土复杂的结构性有关。取预压后的土样进行各种试验，包括：①孔隙水化学成分测试；②液塑限试验；③压缩试验；④落锥法强度试验。

表 2 土中孔隙水中的阳离子、阴离子及 pH 值  
Table 2 Cations, anions and pH values of pore solutions

溶液	土样号	阴离子含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				阳离子含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )						pH 值
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CL <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
蒸馏水	O	198	318	11.1	<1.0	<5	<5	82	35	52	35	7.20
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A4	135	72.4	710	<1.0	<5	<5	394	125	89	125	7.14
HCl	B4	42.4	7640	311	<1.0	<5	<5	4180	753	178	753	6.58
NaOH	C4	1570	89.6	72.1	4870	38.9	60	8	7	41	7	10.40

注：离子含量指的是每 1 kg 土中的离子质量，单位为 mg。

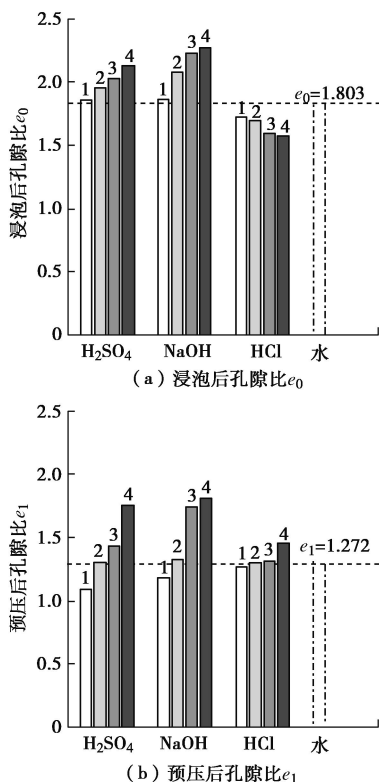


图 1 浸泡后和预压后污染土的孔隙比

Fig. 1 Void ratios measured after soaking and preloading

2 污染土孔隙水化学成分

仅取最高浓度的污染土样以及未污染土样进行孔隙水化学成分分析，得到的结果见表 2。表 2 中的离子含量指的是每千克土中离子的毫克量，可以看出：

- (1) NaOH 污染土的 pH 较高，H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 HCL 污染土的 pH 为 7 左右。
- (2) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 污染土和 HCL 污染土中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>增多，这可能是 H<sup>+</sup>的置换作用以及与难溶碳酸盐矿物反应的结果。另外 HCL 污染土中的阳离子含量要明显多于 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>污染土，特别是 Ca<sup>2+</sup>，可能是由于硫酸盐（如 CaSO<sub>4</sub>）的溶解度要比盐酸盐的溶解度低得多。
- (3) NaOH 污染土中的 Al<sup>3+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>略微增多，但 Na<sup>+</sup>却较少，这可能是 Na<sup>+</sup>离子进入双电层中置换出

Al<sup>3+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>，前面提到的 NaOH 溶液呈棕红色应该与 Fe<sup>3+</sup>以及 Fe(OH)<sub>3</sub>胶体有关。NaOH 污染土中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>增多，这可能是由于黏土矿物的边缘电荷在碱性环境中由正变为负，从而造成阴离子的解吸附。

3 污染土的塑性

污染土的塑限  $w_p$  采用搓条法确定，液限  $w_L$  采用落锥法测定（锥重 76 g，锥角为 30°，液限对应的落锥深度为 17 mm），试验结果如图 2 所示。根据试验结果绘制的污染土塑性图（卡氏塑性图）见图 3，其中 A 线和 B 线为土质分类的经验界限。由塑性图可以看出，两种酸性污染土的塑性呈现出完全相反的变化规律，硫酸和氢氧化钠提高了土的塑性，而盐酸则降低了土的塑性。总体上看，这 3 种污染液造成的液限  $w_L$  变化值在 10%以内， $w_p$  变化值在 6%以内。从图 3 给出的塑性图来看，污染造成塑性的变化近似平行于 A 线，这个规律可能有助于预估这种污染土的塑性变化。

一般认为，土的塑性与双电层结构有直接的关系。通常认为影响双电层结构和土的塑性的最主要的因素：①黏土矿物的类型和含量；②孔隙溶液 pH 值；③孔隙溶液阳离子类型和浓度。由于采用的污染溶液的浓度较低，因此认为污染土的黏土矿物类型和含量不会发生显著改变。这里主要结合表 2 给出的孔隙溶液离子成分来分析后两种因素对双电层厚度和塑性的影响。表 3 给出了分析结果，并与实测结果进行了对比。

可以看出，盐酸和氢氧化钠污染土的试验结果与分析结果完全吻合。但硫酸污染土的试验结果与分析结果却完全相反。双电层厚度的变化无法解释硫酸污染土塑性增大的现象。这可能是由于硫酸污染土中难溶的硫酸盐胶结物对液限含水率测量的影响。无论是碟式仪法还是落锥法，实际上都是一种基于强度的测试方法，液限所对应的抗剪强度多在 0.5~5.6 kPa（Sridharan 等<sup>[13]</sup>）。胶结物通常会导致团聚体的结构的形成，增大土的抗剪强度，从而导致所测液限值增

表 3 pH 值及离子交换作用对塑性影响的分析  
Table 3 Analysis of influences of pH value and ion exchange on soil plasticity

溶液	pH 的影响			阳离子的影响			试验结果
	pH 变化	双电层厚度	塑性变化	离子变化	双电层厚度	塑性变化	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	略减小	略变薄	略减小	Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Na <sup>+</sup> 略增多	略变薄	略减小	增大
HCl	略减小	略变薄	略减小	Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Na <sup>+</sup> 明显增多	变薄	减小	减小
NaOH	明显增大	明显变厚	明显增大	Na <sup>+</sup> 被吸附	变厚	增大	增大

大 (Sridharan 等<sup>[14]</sup>)。而在 20 世纪 80 年代,王继庄<sup>[15]</sup>在对中国关于红黏土的塑性研究中,也曾发现红黏土中氧化铁胶体导致的团聚结构对液限的影响显著。

25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, 每级荷载持续的时间为 2 h。根据试验结果绘制污染土压缩曲线,并根据压缩曲线计算压缩指数。作为代表,图 4 给出了硫酸污染土的压缩曲线,即  $e - \lg P$  曲线。盐酸和氢氧化钠污染土的压缩曲线的形态与此相似。可以看出,在超过 25 kPa 后,压缩曲线近似直线,其斜率即为压缩指数  $c_c$ 。压缩曲线的位置以及  $c_c$  的大小与溶液的浓度密切相关。

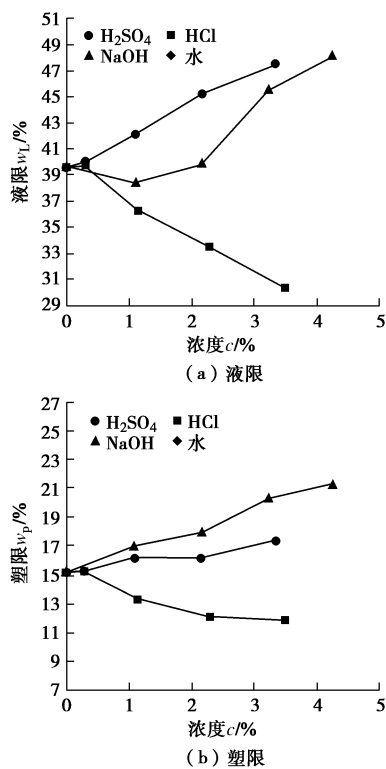


图 2 污染土的界限含水率

Fig. 2 Limit water contents of (a)  $w_p$  and (b)  $w_L$  for contaminated samples

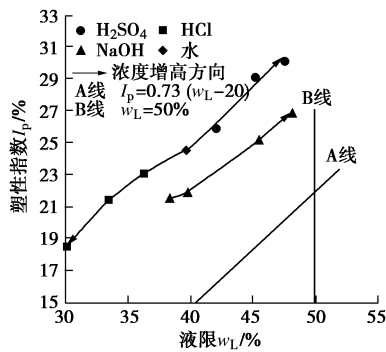


图 3 污染土塑性图

Fig. 3 Plasticity chart of contaminated samples

4 污染土的压缩性

每个土样做一组压缩试验,竖向荷载  $P$  为 12.5,

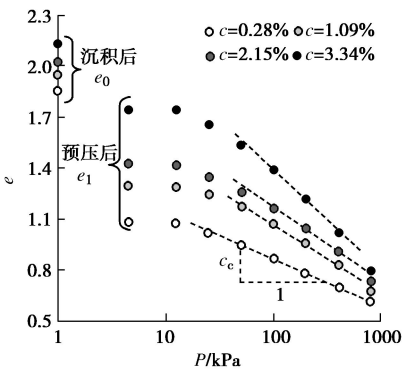


图 4 硫酸污染土的压缩曲线

Fig. 4 Compression curves of  $H_2SO_4$ -contaminated samples

4.1 归一化压缩曲线

黏性土的压缩性与土的塑性有关。通过选取合适的代表土的塑性的指标,可以将不同塑性的土的压缩曲线归一化,给出一个统一的表达式。Nagaraj 等<sup>[16]</sup>提出过一个较为简单的压缩曲线归一化的方法,该方法采用液限含水率对应的孔隙比  $e_1$  作为归一化指标,给出的经验公式如下:

$$e/e_1 = 1.25 - 0.28 \lg P \quad (1)$$

式中,  $P$  为竖向压力,单位为 kPa。图 5 给出了各土样的归一化压缩曲线,即  $e/e_1 - P$  曲线。可以看出,未污染土样的归一化曲线与式 (1) 较为接近,而 3 种污染土的归一化压缩曲线多数位于式 (1) 的上方。这表明这种用于重塑土的归一化公式并不适用于本文制备的污染土。众所周知,具有一定结构性的原状土的归一化压缩曲线位于重塑土的上方。因此图 5 给出的现象可归结为结构性的影响:即使污染土制备采用的是重塑土,在浸泡过程中可能仍然形成了开放式的絮凝结构。而这 3 种污染土的结构性成因可能是不同的:盐酸污染土可能是由于酸性环境中土颗粒间的斥力

降低导致引力增加, 形成絮凝结构 (Santamarina 等<sup>[17]</sup>); 硫酸污染土可能是由于土颗粒间硫酸盐胶结物的生成; 氢氧化钠污染土可能是由于土颗粒间氢氧化胶体的胶结作用。而从图 5 给出的结果来看, 尽管试验采用的溶液浓度不大, 但结构性对污染土压缩特性的影响还是非常显著的。

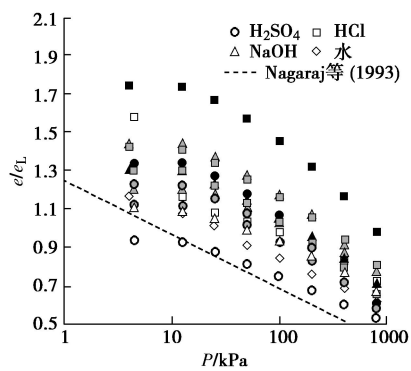


图 5 污染土的归一化压缩曲线

Fig. 5 Normalized compression curves of contaminated samples

4.2 压缩指数  $c_c$

图 6 给出了三类污染土的压缩指数与溶液浓度之间的关系。可以看出, 这三类污染土的压缩指数均随浓度的增大而显著增大。中低压压缩性的重塑土, 污染后接近或达到高压压缩性 ( $c_c > 0.4$ )。

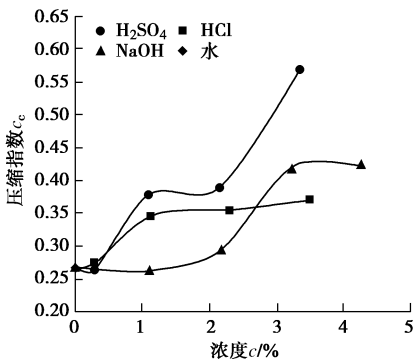


图 6 污染土的压缩指数

Fig. 6 Compression index of contaminated samples

重塑黏性土的压缩指数与塑性指标有很好的相关性, 有些学者给出了  $c_c$  与  $w_L$  之间的关系, 如

$$c_c = 0.007(w_L - 7) \quad (\text{Terzaghi 等}^{[18]}) ; \quad (2a)$$

$$c_c = 0.0023w_L G_s \quad (\text{Nagaraaj 等}^{[16]}) 。 \quad (2b)$$

还有的给出了  $c_c$  与  $I_p$  之间的关系, 如

$$c_c = \frac{I_p}{74} \quad (\text{Kulhawy 等}^{[10]}) ; \quad (3a)$$

$$c_c = 0.014I_p + 0.046 \quad (\text{Nakase 等}^{[19]}) 。 \quad (3b)$$

图 7, 8 分别给出了这三类污染土的  $c_c - w_L$  和  $c_c - I_p$  关系, 并给出了式 (2a)、(2b)、(3a)、(3b) 的曲线以作对比。尽管硫酸、氢氧化钠污染土表现出与经验关系式一致的规律, 即  $c_c$  随  $w_L$  或  $I_p$  的增大而增

大, 但是这些经验关系式明显低估了  $c_c$  增大的幅度。盐酸污染土则给出相反的规律,  $c_c$  随着  $w_L$  或  $I_p$  的减小反而呈现出增大的现象。这种现象似乎也归因于这种污染土的结构性。盐酸污染土突出的结构性超过了塑性对土的压缩性的影响, 使其在塑性减小的情况下, 仍然能维持一个孔隙比较大的开放结构, 因而导致较大的压缩性。

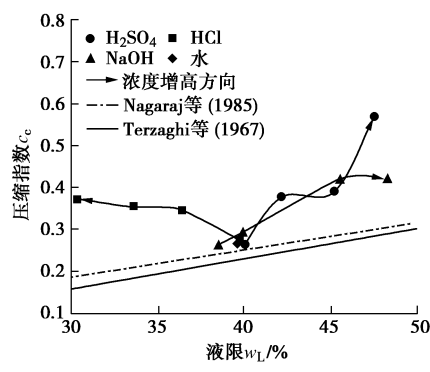


图 7 污染土的压缩指数  $c_c$  与液限  $w_L$  的关系

Fig. 7 Relationship between  $c_c$  and  $w_L$  contaminated samples

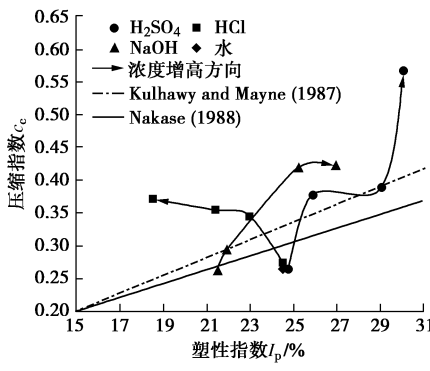


图 8 污染土压缩指数  $c_c$  与塑性指数  $I_p$  的关系

Fig. 8 Relationship between  $c_c$  and  $I_p$  contaminated samples

5 污染土的不排水抗剪强度

污染土的不排水抗剪强度采用落锥法确定。不排水抗剪强度与落锥深度的关系为<sup>[20]</sup>

$$c_u = K \frac{Q}{h^2} , \quad (4)$$

式中,  $c_u$  为不排水抗剪强度 (kPa),  $h$  为落锥深度 (mm),  $Q$  为锥的质量 (g),  $K$  为与锥角有关的常数。根据经验, 锥角  $30^\circ$ 、锥的质量 76 g 的圆锥的  $K$  值为 7.5。这样就可以根据落锥深度  $h$  与含水率  $w$  的关系换算出不排水抗剪强度  $c_u$  与含水率  $w$  的关系。

图 9 给出了 3 种污染土的不排水抗剪强度  $c_u$  与含水率  $w$  的双对数关系。可以看出, 在相同的含水率情况下, 硫酸和氢氧化钠污染土的强度随着浓度的增大而增大, 而盐酸污染土的强度随着浓度的增大而减小。这种变化可以通过液性指数的变化来解释。液性指数

的定义为

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (5)$$

土的强度一般随  $I_L$  的增大而减小。对于硫酸和氢氧化钠污染土，塑性的增大导致相同含水率情况下  $I_L$  的减小，因此强度增大；对于盐酸污染土，塑性的减小导致相同含水率情况下  $I_L$  的增大，因而强度减小。

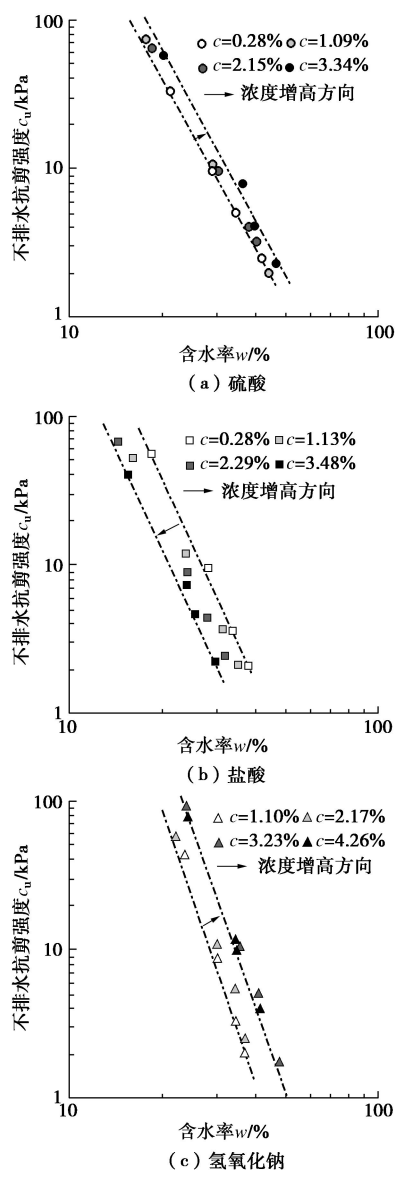


图9 污染土的不排水抗剪强度  $c_u$  与含水率  $w$  的关系

Fig. 9 Relationship between  $c_c$  and  $w$  of contaminated samples

正如上面提到的，饱和黏性土的强度  $c_u$  与液性指数  $I_L$  之间有很好的相关性。图 10 进一步给出了这三类污染土的  $c_u - I_L$  关系（4 种不同深度的灰度代表 4 种不同的浓度，颜色越深，浓度越大），并给出了两个适用于重塑土的经验关系式做对比。这两个经验关系式为

$$c_u = \left( \frac{19.8}{I_L} \right)^{2.44} \quad (\text{Locat 等}^{[21]}) ; \quad (6a)$$

$$c_u = \frac{1}{(I_L - 0.21)^2} \quad (\text{Leroueil 等}^{[22]}) . \quad (6b)$$

可以看出，这三类污染土的  $c_u$  与  $I_L$  之间有良好的相关性， $c_u$  随  $I_L$  的增大而非线性的减小，其变化规律与经验关系式一致。3 种污染土的  $c_u - I_L$  关系与未污染土（水浸泡）的看上去可以采用一个统一的关系表示。这意味着污染土的结构性并未改变  $c_u - I_L$  的关系，因而污染土的强度大致可以通过未污染土的  $c_u - I_L$  关系来预测。

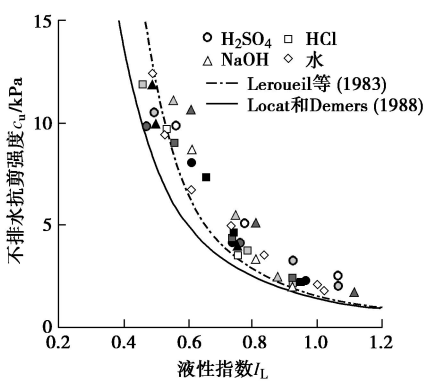


图 10 污染土的不排水抗剪强度  $c_u$  与液性指数  $I_L$  的关系

Fig. 10 Relationship between  $c_c$  and  $I_L$  of contaminated samples

## 6 结 论

本文研究了沿海地区地表广泛分布的粉质黏土“硬壳层”（重塑）受盐酸、硫酸和氢氧化钠污染后物理力学特性的变化，得到的主要结论如下：

（1）试验用粉质黏土中碳酸钙类矿物的分解与再造是主导硫酸污染土塑性特性的一个重要因素。硫酸污染土中硫酸钙胶结物的形成可能是造成其塑性变化规律与盐酸污染土完全不同的一个主要原因。因此，除了双电层结构外，由于孔隙溶液 pH 值变化以及土中非黏土矿物的分解与再造导致的土的结构的变化（絮凝和胶结），也是酸碱污染土物理力学特性变化机理研究需要关注的一个重点。

（2）3 种污染土的压缩性以及强度发生显著改变，这是塑性与结构性变化共同作用的结果。基于正常重塑土的  $c_c - w_L$  或  $c_c - I_p$  经验关系会低估污染土的压缩性；3 种污染土的  $c_u - I_L$  关系与未污染土的差别不大，这也许可以作为预估污染土强度的一个简便方法。

### 参考文献：

[1] 黄世铭. 酸碱介质对黏性土工程地质性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 1981, 15(4): 45 - 49. (HUANG Shi-ming. Influence of acid-base on the engineering properties of clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1981, 15(4):

- 45 - 49. (in Chinese))
- [2] 顾季威. 酸碱废液污染侵蚀对黏性土工程性质的影响[J]. 上海地质, 1984(3): 12 - 17. (GU Ji-wei. Influence of acid-base solutions on the engineering properties of clay[J]. Shanghai Geology, 1984(3): 12 - 17. (in Chinese))
- [3] 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 Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. 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))
- [4] 曹海荣. 酸性污染土物理力学性质的室内试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, **27**(2): 60 - 65. (CAO Hai-rong. Research on physical-mechanical property of soil contaminated by acid in laboratory[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2012, **27**(2): 60 - 65. (in Chinese))
- [5] GAJO A, MAINES M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay[J]. Géotechnique, 2007, **57**(8): 687 - 699.
- [6] SUNIL B M, NAYAK S, SHRIHARI S. Effect of pH on the geotechnical properties of laterite[J]. Engineering Geology, 2006, **85**(1): 197 - 203.
- [7] BAKHSHIPOUR Z, ASADI A, HUAT B B K, et al. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(6): 1008 - 1020.
- [8] CARRIER W D, BECKMAN J F. Correlations between index tests and the properties of remoulded clays[J]. Géotechnique, 1985, **34**(34): 211 - 228.
- [9] NAKASE A, KAMEI T, KUSAKABE O. Constitutive parameters estimated by plasticity index[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(7): 844 - 858.
- [10] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on estimating soil properties for foundation design[J]. Epr Palo Alto Report, 1990.
- [11] 孙更生, 郑大同. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. (SUN Geng-sheng, ZHENG Da-tong. Soft foundation and underground engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1987. (in Chinese))
- [12] 何美临. 上海市区浅层土黏土矿物、微结构与地面沉降[J]. 上海国土资源, 1989, **10**(4): 31 - 40. (HE Mei-lin. The clay minerals and textures of shallow soil related with landsurface settlement in shanghai city[J]. Shanghai Land & Resources, 1989, **10**(4): 31 - 40. (in Chinese))
- [13] SRIDHARAN A, PRAKASH K. Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, **23**(2): 236 - 244.
- [14] SRIDHARAN A, VENKATAPPA R G. Mechanisms controlling the liquid limit of clays[J]. Proceedings, Istanbul Conf on SM and FE, 1975, **1**: 75 - 84.
- [15] 王继庄. 游离氧化铁对红黏土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, **5**(1): 147 - 156. (WANG Ji-zhuang. The effects of free iron oxides on the engineering properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **5**(1): 147 - 156. (in Chinese))
- [16] NAGARAJ T S, PANDIAN N S, NARASIMHA R P S R. Stress state-permeability relationships for fine-grained soils[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 333 - 336.
- [17] SANTAMARINA J C, KLEIN K A, PALOMINO A, et al. Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric[C]// Chemo-mechanical Coupling in Clays: From Nano-scale to Engineering Applications. Maratea, 2001: 47 - 64.
- [18] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. Wiley, 1967.
- [19] NAKASE A, KAMEI T, KUSAKABE O. Constitutive parameters estimated by plasticity index[J]. Journal of Geotechnical Engineering A.s.c.e, 1988, **114**(7): 844 - 858.
- [20] HANSBO S. A new approach to determination of shear strength of clay by the fall cone test[J]. Proc Roy SGI, 1957, **14**: 5 - 47.
- [21] LOCAT J, DEMERS D. Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(4): 799 - 806.
- [22] LEROUIL S, TAVENAS F, LEBIHAN J P. Yield stress measurement by a penetration method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**: 681 - 705.