

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.023

粉质黏土强度指标的水化学敏感性研究

杨德欢¹, 颜荣涛¹, 韦昌富^{1,2}, 张 敏¹, 张 芹¹

(1. 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;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要:通过对重塑粉质黏土的液、塑限和固结慢速直剪试验,探讨了粉质黏土液限、塑性指数及抗剪强度与不同浓度 NaCl 孔隙溶液的关系。试验结果表明,随着孔隙溶液浓度增加,液限随之减小,塑性指数表现出粉土的性质;不同竖向正应力下的强度随浓度变化表现出较大的差异,正应力较低时,强度不断减小,而正应力较高时,则强度不断增大,正应力介于二者之间强度则先降后升;内摩擦角随浓度增加而增大,最终趋于稳定;黏聚力先迅速减小后逐渐回升,且均为负值。其性质变化主要是因为扩散双电层、颗粒间作用力以及孔隙比发生了改变。基于 Terzaghi 的有效应力原理,对饱和粉质黏土固结慢速直剪试验测得的负值黏聚力进行了分析和讨论,认为渗透压力对黏聚力起了非常重要的作用,从而使黏聚力成为负值。

关键词:水-土化学作用;粉质黏土;液塑限试验;直剪试验;渗透压力

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 12 - 3529 - 08

A study of water chemical sensitivity of strength indices of silty clay

YANG De-huan¹, YAN Rong-tao¹, WEI Chang-fu^{1,2}, ZHANG Min¹, ZHANG Qin¹

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

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: A series of direct shear experiments was performed to investigate the influences of pore fluid concentration on the liquid limit, plastic index and shear strength of remolded silty clay. The experimental results indicate that the liquid limit decreases with the increase of pore solution concentration, and the plastic index is similar to that of silt. It is found that the variation of the shear strength with the concentration depends upon the vertical stress applied. For a low vertical stress, the shear strength decreases slightly as the concentration increases; for a medium vertical stress, the shear strength first decreases and then increases as the concentration increases; for a high vertical stress, however, the strength constantly increases as the concentration increases. In addition, the internal friction angle increases with the pore fluid concentration and approaches toward a stable value, while the cohesion decreases rapidly in the early stage, and gradually increases again, remaining at a negative values all the time. These features of the soil behavior can be attributed to the combing effect of electric diffuse double layers, the intergranular stress variation and the void ratio change under coupled chemical and mechanical interactions. Based on the Terzaghi's effective stress principle, the shear strength parameters of the tested saturated silty clay are analyzed, suggesting that the osmotic pressure plays an important role in the occurrence of the negative cohesion of clayey soils.

Keywords: chemical action of water-soil; silty clay; consistency limits test; direct shear test; osmotic pressure

1 引 言

岩土体在遭受水、不同化学溶液等的侵蚀作用后,其结构性将发生变化,导致岩土体的物理力学性质和水理性质的改变^[1,2]。例如,近年来,一些工

厂地基土被污染腐蚀后,引起地基土下陷或膨胀,导致构筑物的不均匀沉降和墙体开裂等,影响其正常使用,造成不同程度的经济损失^[3]。因此,研究土体孔隙组分变化情况下的化学-力学耦合作用对岩土体强度的影响具有重要的工程意义和理论价

收稿日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(No.11372078, No.51309055); 广西自然科学基金创新研究团队项目(No.2012GXNSFGA060001); 广西自然科学基金青年项目(No.2014GXNSFBA118236)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11372078, 51309055) and the Science Fund for Creative Research Groups of Natural Science Foundation of Guangxi (2012GXNSFGA060001) and the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Guangxi (2014GXNSFBA118236)。

第一作者简介: 杨德欢, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: ydh9008@126.com

通讯作者: 颜荣涛, 男, 1984 年生, 博士, 副教授, 主要从事有关于化学-力学耦合岩土工程问题的研究工作。E-mail: yrt301@163.com

值,也是当前环境岩土工程前沿性研究课题之一。

国内外众多学者对水化学作用引起土体物理力学性质的变化做了大量试验研究。汤连生^[1]对水-土化学作用的力学效应机制进行分析指出,同一种土不同的溶液存在着正负两个方向的力学效应。唐晓武^[4]、汪民^[5]、程昌炳^[6]等通过固结快速直剪试验,探讨了孔隙化学溶液变化对土体剪切强度的影响。王军等^[7]开展了水-土化学作用的力学效应试验,揭示了离子效应对粉质黏土黏聚力和内摩擦角的影响。Arasan 等^[8]研究了低塑性和高塑性黏土的稠度界限随 4 种盐溶液浓度的变化后指出,随着浓度的增加,土体将发生改性。Warkentin 等^[9]探讨了孔隙溶液变化引起颗粒间作用力的改变与蒙脱土和高岭土的强度机制的关系指出,蒙脱土强度受抵抗颗粒滑动的粒间排斥力影响;而高岭土强度主要受粒间引力与颗粒排列影响。Wang 等^[10]通过共振柱和不排水三轴压缩试验对不同孔隙溶液的高岭土力学性质进行研究指出,结构性对土体的力学性质具有重大影响。Sridharan^[11]研究了不同孔隙溶液对高岭土和蒙脱土的物理和工程性质的影响,并指出控制其变化的机制截然不同。

尽管已有许多学者对水化学作用引起土体物理力学性质变化做了大量试验研究,取得了一批比较深入的研究成果,但目前仍然存在一些问题值得进一步深入研究。如强度方面,众所周知,是由有效应力决定的,在进行固结慢剪试验中,普遍认为,其孔隙水压消散为 0,即认为竖向压力等于有效应力。但实际上由于土体孔隙水溶解了较多矿物,使得存在较高的渗透压力,现有研究中鲜有人考虑渗透压力的存在对其强度的影响^[12];以及水化学作用引起的结构变化造成一系列宏观工程力学特性变化的内在机制迄今为止还不是十分清楚,尚未得到共识。

为此,于海浩等^[13]通过固结慢速直剪试验,对低浓度 NaCl 溶液情况下的重塑混合土(粉土与膨润土)强度特性进行了试验研究,发现黏聚力随孔隙溶液浓度变化出现负值的现象。为进一步证实于海浩等^[13]试验结果的合理性和分析土体的强度特性随孔隙溶液浓度变化的机制,以及为以后进行数值模拟提供试验数据。本文选用粉质黏土开展了较于海浩等^[13]试验更高孔隙溶液浓度和更小竖向应力下土体强度特性的试验研究,并根据试验结果,探讨了控制强度特性变化的机制。

2 材料和试验过程

2.1 土样的基本物理性质测试

试验所用的土取自桂林市朝阳乡葛家村,取土

深度为 3 m。对土样进行基本的物理性质试验,测得各项指标如表 1 所示。按照《岩土工程勘察规范》^[14]分类,试验用土为粉质黏土。其黏土矿物组成及化学成分分别如表 2、3 所示。

表 1 桂林粉质黏土基本物理性质指标

土粒 相对 密度	塑限 / %	液限 / %	塑性 指数	粒径 d (mm) 含量 / %					
				>0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.005	~ 0.002	
2.72	16.5	27.6	11.1	1.5	2.1	23.53	42.69	9.85	20.36

表 2 桂林粉质黏土的黏土矿物组成

矿物	伊利石	高岭石	蛭石	伊利石蛭石混层
含量 / %	19	51	11	19

表 3 桂林粉质黏土的化学成分

化学式	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MnO
百分比 / %	78.60	9.51	0.37	0.044	4.90	0.82	0.072

2.2 试验思路与方法

岩土体的工程地质特性及其变化主要取决于土体组成材料,即土的特性^[15]。故欲研究岩土体遭受化学侵蚀后对其工程地质特性的影响,需对污染后土的物理力学特性的变化规律进行研究。即通过土与化学溶液反应后,测定其物理和强度参数随孔隙溶液变化的规律。

2.2.1 液塑限试验

液限和塑限采用液、塑限联合测定法测定。将洗盐后的风干土碾碎过 0.5 mm 筛后放入烘箱中,在温度 105 ~ 110 °C 下烘干 12 h 左右,然后装入保鲜袋并放在干燥器中冷却至室温。喷晒溶液使土样吸湿,调制均匀,密封放置 15 d 后再进行试验。所用溶液分别为蒸馏水,浓度为 0.01、0.10、0.50、1.00、2.00 mol/L 的 NaCl 溶液。

2.2.2 直剪试验

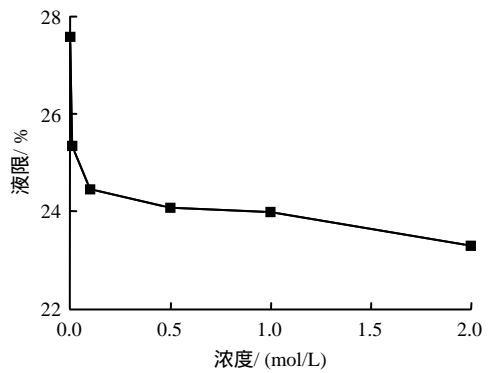
直剪环刀样的制备方法与傅鑫晖等^[16]对非饱和和红黏土强度特性研究的制样方法类似。本文选用的粉质黏土由表 2 可知,黏粒主要是由高岭石组成,含少量的伊利石,而 Olson^[17]在论述高岭石的强度试验时指出,化学因素变化将影响土样的初始结构。因此,为了避免制样时初始结构不同而造成对试验结果的影响,本次试验一律先用蒸馏水调配湿土样,密封保存 3 d 后,取出湿土样复测其含水率,其值控制在 12%±0.2% 以内,否则调整含水率至符合标准为止。然后,根据要求的干密度

1.7 g/cm³，称取湿土质量，压实成样，密度差值不大于 0.01 g/cm³。试样装入重叠式饱和器中，进行真空抽气饱和，所用溶液分别为蒸馏水、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、4.0 mol/L 的 NaCl 溶液。饱和 15 d 后，将土样装入应变控制式直剪仪（四联剪）剪切盒中，分别在 50、100、200、300、400 kPa 的竖向正应力下固结稳定后进行剪切。本文为了排除孔隙水压力对剪切强度的影响，采用慢速直剪试验，剪切速率为 0.01 mm/min。为准确得到土体的强度指标，对各浓度进行多组平行试验。

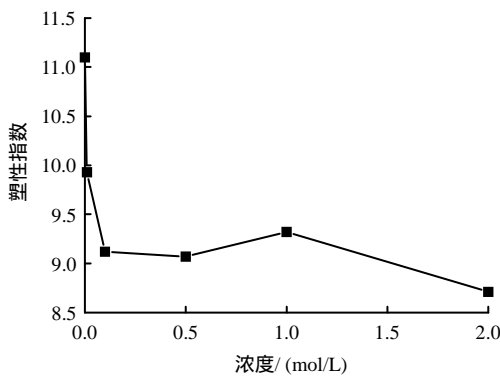
3 试验结果

3.1 液、塑限试验

图 1 为试验土样的液限和塑性指数对不同孔隙溶液浓度的反应。从图中可以看出，随着 NaCl 溶液浓度的增加，其液限和塑性指数均有不同程度的减小。



(a) 对液限的影响



(b) 对塑性指数的影响

图 1 不同浓度 NaCl 溶液对粉质黏土影响

Fig.1 Effect of NaCl concentration on silty clay

Sridharan^[11]和 Horpibulsuk 等^[18]均指出，随孔隙溶液浓度增加膨胀土的液限降低，而高岭土的液限增加。本文试验现象与膨胀土的液限变化类似，原因是试验土样并不是纯的高岭土，而是混合有伊

利石、蛭石等黏土矿物，更详细分析将在下一节进行讨论。

3.2 直剪试验

3.2.1 粉质黏土抗剪强度变化规律

抗剪强度随孔隙溶液浓度变化的各种平行试验结果全部列在表 4 中。为了使试验结果更加直观，从平行试验中，挑选了一组完整的试验数据，绘制了不同浓度的 NaCl 溶液对应的抗剪强度线和相同正应力下抗剪强度随溶液浓度变化的曲线，分别如图 2、3 所示。从图 3 中发现，当正应力较低（200 kPa）时，孔隙溶液浓度在 0~0.5 mol/L 区段，随着浓度的增加，抗剪强度略有降低。即双电层越发育，其抗剪强度相对愈高，这与汪民^[5]、程昌炳^[6]、Warkentin^[9]等学者对高岭土的试验现象类似。浓度超过 0.5 mol/L 以后，对于正应力为

表 4 直剪试验结果汇总

Table 4 Summary of direct shear test results

竖向正应力 / kPa	平行试验		浓度 / (mol/L)						
	次数	蒸馏水	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	
50	1	26.82	25.23	25.05	24.51	23.67	22.08	23.07	
	2	25.73	24.75	24.78	24.05	23.55	20.02	22.95	
	3	25.12	25.01	24.49	25.59	20.82	23.16	23.43	
100	1	49.09	42.34	41.82	40.23	42.59	50.34	50.49	
	2	50.38	41.94	42.08	41.17	46.49	49.47	51.55	
	3			39.78	37.77	42.03	47.95	53.99	
200	1	108.69	103.17	100.67	92.65	100.89	106.34	117.30	
	2	108.55	101.03	98.37	93.20	98.59	101.08	115.96	
	3			102.79		107.19			
300	1	147.88	156.71	157.91	166.87	170.03	174.01	180.10	
	2	147.13	152.56	156.29	165.76	169.31	174.69	177.42	
	3	140.08	157.84	161.99	170.22		170.62		
400	1	202.99	213.04	220.28	228.27	230.14	239.78	241.07	
	2	209.69	212.89	217.63	226.31	234.06	236.63	238.96	
	3	209.31	219.63	224.57	228.39	229.34	231.75	239.67	

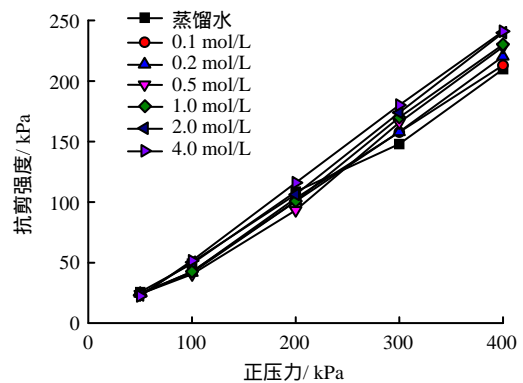


图 2 不同浓度的 NaCl 溶液对应的抗剪强度线
Fig.2 Shear strength curves of silty clay at different concentrations

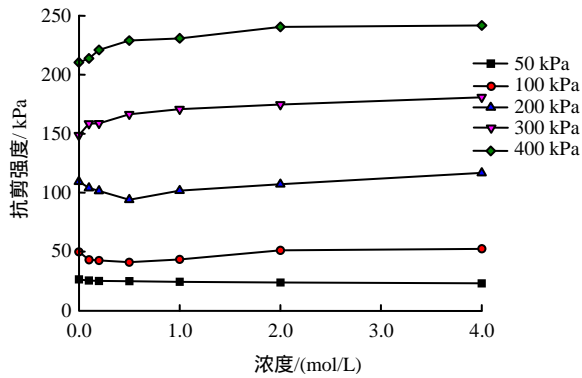
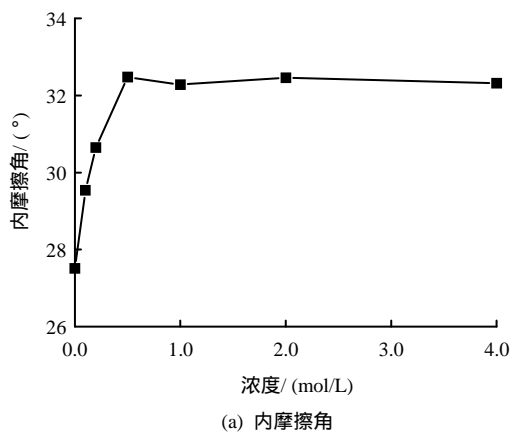


图3 相同正应力下抗剪强度随 NaCl 溶液浓度变化的曲线

Fig.3 Variations of shear strength with concentrations at same vertical stress

50 kPa 时,抗剪强度继续降低,而正应力为 100 kPa 和 200 kPa 时,抗剪强度却逐渐上升,且正应力越大现象越明显。正应力在 300 kPa 和 400 kPa 的情况下,两者试验现象一致,均随着孔隙溶液浓度的增加,抗剪强度增大。



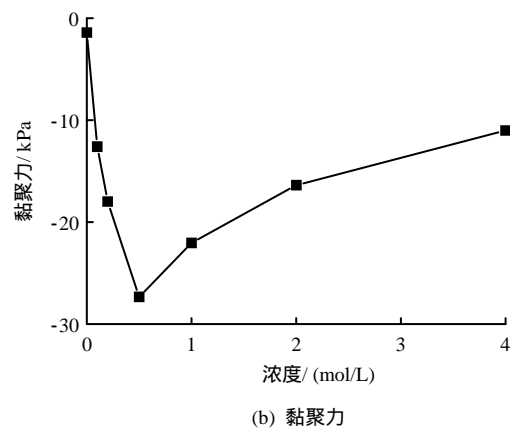
(a) 内摩擦角

3.2.2 粉质黏土内摩擦角变化规律

根据试验结果绘制 NaCl 溶液浓度变化与内摩擦角的关系曲线,如图 4(a)所示。由图可知,浓度在 0~0.5 mol/L 时,其内摩擦角急剧增大;超过 0.5 mol/L 以后,随着浓度的增加,内摩擦角的变化幅度很小,其值在 32°左右波动。

3.2.3 粉质黏土黏聚力变化规律

根据试验结果绘制 NaCl 溶液浓度变化与黏聚力的关系曲线,如图 4(b)所示。由图可知,本文通过固结慢速直剪试验测得土体的黏聚力为负值;浓度在 0~0.5 mol/L 区段内,黏聚力是随浓度的增加而急剧减小,在 0.5 mol/L 处达到最小值,即 -27.31 kPa;浓度在 0.5~4 mol/L 区段内,又不断增大。而于海浩等^[13]用去离子水调制的混合土(粉土与膨润土质量比为 2:3)经化学溶液浸泡后,其黏聚力在 0~0.5 mol/L 区段内,随浓度增加急剧减小;在 0.5~1 mol/L 区段内有回升的趋势,且同样观测到黏聚力为负值的情况。故本文的试验现象和于海浩等^[13]的试验结果具有较好的一致性。



(b) 黏聚力

图4 土的抗剪强度随着 NaCl 溶液浓度的变化

Fig.4 Variations of cohesion with concentration

4 分析与讨论

4.1 水-土化学作用对液、塑限的影响

目前主要是通过絮凝机制和扩散双电层理论解释液限的变化^[8,11,15,18-19]。本文所用土样黏粒矿物由高岭石、伊利石、蛭石以及伊利石蛭石混层组成,其中蛭石是一种类似于蒙脱石的黏土矿物。随孔隙溶液浓度和阳离子化合价的增加,高岭石颗粒间排斥力减小,表现为净引力,使土体发生絮凝,持水能力增强,即使液限随之增高;相反伊利石、蛭石以及伊利石蛭石混层则由于双电层的压缩,使得液限降低。上述二者对液限的贡献正好相反。笔者认为,可能是双电层压缩占主导,导致液限随着孔隙

溶液浓度的增加而减小,而且黏粒含量相对较少,所以液限变化较小。这与 Wahid 等^[20]研究溶液浓度对高岭土液限的影响现象类似,即随浓度增加,液限降低。

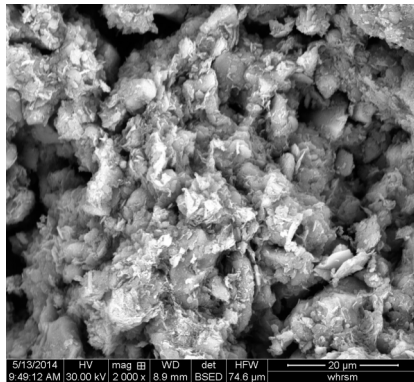
土体发生絮凝后,使得原来相对分散、粒径较小的颗粒变得集中和粒径变大,即粗颗粒含量相对增加,使得塑性指数表现出粉土的性质。本文的试验现象与 Arasan 等^[8]对低塑限黏土在较高盐溶液浓度时改性为低塑性粉土的现象相一致。

4.2 水-土化学作用对强度的影响

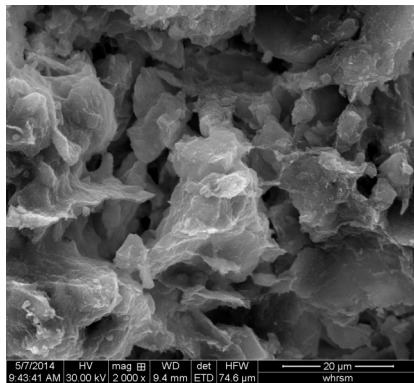
水化学作用对土体宏观工程力学特性的影响,基本上可认为是水化学作用改变了颗粒间的相互作用力以及引起土体结构发生变化而导致的^[1,21],故

笔者将从上述两方面进行抗剪强度变化规律探讨。

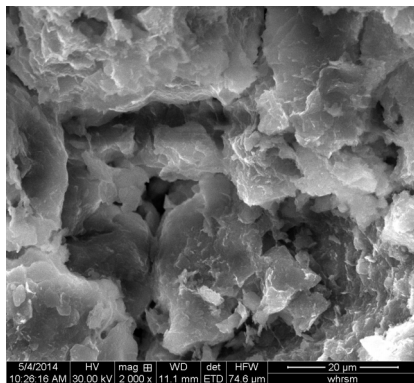
为了观察土体结构随孔隙溶液浓度的变化，本文选取代表性土样，进行 SEM 电镜扫描试验，如图 5 所示。由图可知，当孔隙溶液为蒸馏水时，松散、小颗粒较多，孔隙相对较小；而孔隙溶液为盐溶液时，具有较多、较大的粒团，并形成一定深度的空洞，且浓度越高，构成土体的粒团越大。



(a) 蒸馏水



(b) 1 mol/L NaCl 溶液



(c) 2 mol/L NaCl 溶液

图 5 不同孔隙溶液浓度的土体结构电镜照片
Fig.5 SEM images of soil structure at different pore solution concentrations

因此，根据前面的启示及电镜照片，笔者认为，粉质黏土的内部结构可以表述为：当孔隙溶液为蒸

馏水时，黏土矿物片状颗粒间表现为净斥力，使得片状颗粒相对分散无规律，如图 6(a)所示。但随着孔隙溶液浓度的增加，粒间净引力增大，片状颗粒相互吸引，发生絮凝，形成集粒。再通过胶结物质和集粒间相互作用力，使多个集粒黏聚在一起形成以黏土片组为单元的絮凝结构，即粒团，如图 6(b)所示。这种结构具有较大的孔隙，且随引力的增大而增大。而形态、大小各异的粒团和较大的黏土矿物片组通过胶结物质聚集，构成宏观上类似于粗粒土性质的土粒。图 7 是根据上述分析绘制的直剪试验剪切面处颗粒分布情况的结构示意图。从图中可以看出，影响抗剪强度的主要因素是剪切面处的孔隙比（即密实度）和粒间作用力。

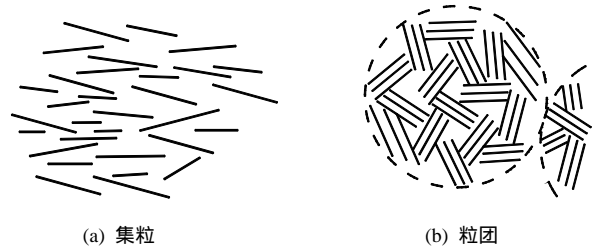


图 6 化学作用引起土体结构变化示意图
Fig.6 Schematic illustration of soil structure change under chemical impact

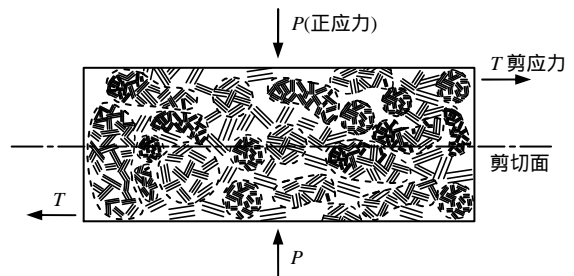


图 7 土体剪切面结构示意图
Fig.7 Schematic of soil structure on shear plane

土体孔隙比的大小与竖向正应力的大小和孔隙溶液浓度的高低有关。Horpibulsuk^[18]和 Sridharan^[22]等通过对高岭土进行固结试验均发现，在同一竖向正应力作用下，平衡时的孔隙比将随着孔隙溶液浓度的增加而增大。同时 Sridharan^[22]和 Warkentin^[9]等均指出，高岭土的剪切强度主要是受颗粒间的引力控制，且随浓度增加引力不断增强。但颗粒间排斥力和引力均有一定的作用范围，随粒间距的增大而衰减。

图 3 表明：孔隙溶液浓度影响抗剪强度的规律受到垂直压力的影响。原因在于，当竖向正应力较小（小于 200 kPa）且溶液浓度在 0~0.5 mol/L 区段

时,同一竖向正应力下,随浓度的增加,土体剪切时的孔隙比增大,即密实度减小,粒间距增大,此时引力作用很微小,强度主要是受排斥力和孔隙比控制。虽然排斥力作用随浓度增加有所减小,但总的来说,因孔隙比增大致使剪切面上单位面积内抗滑力减小,所以随浓度的增加强度降低。当浓度大于 0.5 mol/L,颗粒间的引力增大,但对于正应力为 50 kPa 的情况,粒间距仍然很大,引力对强度的贡献不能弥补孔隙比对强度的削弱,所以抗剪强度继续减小。而对于正应力为 100 kPa 和 200 kPa 时,由于正应力增大,土体压缩量增大,粒间距减小,引力作用增强,此增强部分弥补了孔隙比对强度的削弱,故强度随浓度增加逐渐增大。而且正应力越大,这种增大现象越明显,因为正应力越大,土体压缩量越大,孔隙比越小,孔隙比对强度的削弱作用越小,粒间距越小,引力作用越强,引力对强度的贡献越大。

同理,在较高的正应力(300 kPa)作用下,由于竖向固结正应力很大,各浓度下相应的孔隙比均较小,即粒间距较小,引力对强度的贡献掩盖了孔隙比变化对强度的贡献,所以随着浓度的增加,强度逐渐增大。

4.3 水-土化学作用对内摩擦角的影响

根据摩尔-库仑强度理论可知,强度是由摩擦强度和黏聚强度组成,因此,强度的变化受上述二者变化的影响。试验结果表明,孔隙溶液浓度变化引起粉质黏土的内摩擦角和黏聚力均产生了较大的变化,故笔者进一步分析二者随孔隙溶液浓度的变化规律。

由前面的分析知,随着孔隙溶液浓度的增加,孔隙比也不断增大。固结平衡时,孔隙溶液为蒸馏水的孔隙比最小,但由于颗粒间表现为净斥力,使颗粒相对分散、连接较弱以及双电层发育,颗粒间比较平滑,故内摩擦角较小。随孔隙溶液浓度的增加,虽孔隙比也不断增大,但双电层变薄,持水能力减弱(由图 1(a)所示液限变化可知),粒间净吸力使片状土粒发生絮凝,分散结构减少,形成大尺寸颗粒,具有较强的咬合能力,从而提高其内摩擦角,故内摩擦角将增大。如图 4(a)中,0~0.5 mol/L 区段。内摩擦角也并不是随着浓度一直上升,浓度在 0.5 mol/L 以后,内摩擦角值在 32°左右波动,可能是因为随浓度增加,虽然颗粒表面变得粗糙,但颗粒变大,其孔隙比不断增加,使得颗粒间的有效接触面较少,在上述二者的综合作用下使得内摩擦角趋于某一稳定值。

4.4 水-土化学作用对黏聚力的影响

本文采用常规的应变控制式直剪仪进行固结慢速剪切试验,因此,所得强度指标应是有效应力的强度指标,用公式表示为

$$\tau'_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: τ'_f 为有效剪切强度; c' 、 φ' 为有效应力强度参数; σ' 为剪破面上的法向有效应力。

Wei^[23]认为,饱和孔隙介质中孔隙液体压力由两部分组成:一部分是直接测定的液体压力 p_w ;另一部分是渗透压力 Π ,本质上是所测孔压与土体真实孔压之差。即

$$\sigma' = \sigma - (p_w + \Pi) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)整理得

$$\begin{aligned} \tau'_f = c' + [\sigma - (p_w + \Pi)] \tan \varphi' = \\ (c' - \Pi \tan \varphi' - p_w \tan \varphi') + \sigma \tan \varphi' \end{aligned} \quad (3)$$

对于固结慢剪试验, p_w 消散为 0。则试验所测黏聚力可表述为

$$c'_{\text{测}} = c' - \Pi \tan \varphi' \quad (4)$$

由式(4)可知,试验测得黏聚力并非土体真实的有效黏聚力 c' ,而是包含了 $-\Pi \tan \varphi'$ 在其中,所以出现了负值。

Wei^[23]给出了渗透压力 Π 的表达式为

$$\Pi = \Pi_D - \rho_{\oplus}^{H_2O} \Omega_0^I \quad (5)$$

式中: Π_D 为 Donnan 渗透压力,是由于土体表面带电而使土体内外电解质产生浓度差所引起的力; $\rho_{\oplus}^{H_2O} \Omega_0^I$ 为饱和土表面力。

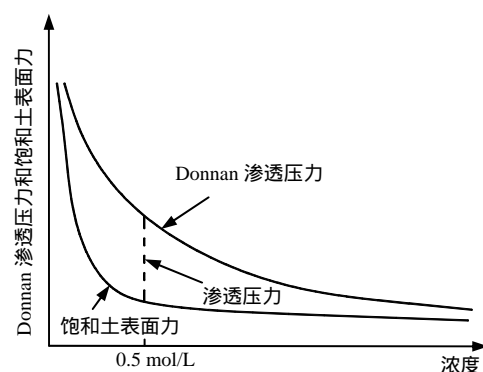


图 8 Donnan 渗透压力和表面力随 NaCl 溶液浓度变化示意图

Fig.8 Schematic of variations of osmotic pressure and surface force with concentration

一般地,Donnan 渗透压力和饱和土表面力随浓度的变化如图 8 所示。Donnan 渗透压力和饱和土表面力随电解质浓度的增大而减小,而二者减小的幅度并不一致。因此,二者之差渗透压力 Π 可能出现图 9 的变化情况。再加上孔隙溶液浓度发生了改变,土体真实黏聚力 c' 变化可以忽略不计,而内摩擦角正切值变化也较小,约增大 0.11。所以渗透压力的变化主要控制了黏聚力的变化趋势。

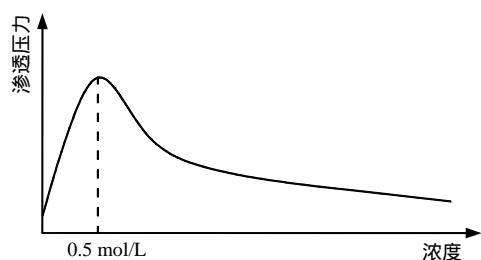


图 9 渗透压力随 NaCl 溶液浓度变化示意图
Fig.9 Schematic of variation of osmotic pressure with concentration

唐晓武等^[4]通过固结快速直剪试验研究了无机盐溶液对粉质黏土强度的影响,测得其黏聚力为正值,该结论与本文的试验结果不一致。笔者认为,结果不同主要与试验方法有关。对于固结快速直剪试验,如果剪切面处发生剪胀,剪切过程中孔隙水压来不及消散,将产生局部负孔隙水压,式(3)中 $-p_w \tan \phi'$ 是有利于黏聚力的,使黏聚力极大提高,因此,测得的黏聚力为正值,掩盖了本文的试验现象。

5 结 论

(1) 粉质黏土孔隙中化学溶液浓度的改变将引起土体的液限以及塑性指数发生变化。结果表明,随浓度的增加,土体的液限以及塑性指数均减小。

(2) 固结慢速直剪试验结果表明,不同竖向正应力时,抗剪强度随浓度的变化表现出较大的差异。在低应力(50 kPa)时,随浓度增加强度略有下降;在高应力(300 kPa)时,随浓度增加强度却是增强;而介于二者之间的应力,随浓度增加强度是先降后升。原因在于强度是受孔隙比(密实度)和颗粒间作用力综合作用的结果。

(3) 土体孔隙溶液浓度的改变导致强度参数均发生了较大的变化。其内摩擦角随浓度的增加,先迅速升高,后趋于稳定,黏聚力随浓度的增加,先急剧减小,后逐渐回升,且为负值。

(4) 进一步分析表明,通过固结慢剪测得的黏

聚力并不是土体的真实黏聚力,而是包括渗透压力在内的一个综合数值。

参 考 文 献

- [1] 汤连生. 水-土化学作用的力学效应及机制分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(4): 104 - 109.
TANG Lian-sheng. Mechanical effect of chemical action of water on soil and analysis on its mechanism[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39(4): 104 - 109.
- [2] 汤文, 姚志宾, 李邵军, 等. 水化学作用对滑坡滑带土的物理力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2885 - 2892.
TANG Wen, YAO Zhi-bin, LI Shao-jun, et al. Effect of pore water chemistry on physical and mechanical properties of sliding-zone soil: An experimental study [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2885 - 2892.
- [3] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性性质变异研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1146 - 1152.
LI Xiang-ran, YAO Zhi-xiang, CAO Zhen-bin. Study on physical and mechanical property variation of polluted erosive foundation soils in typical district of Jinan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1146 - 1152.
- [4] 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.
TANG Xiao-wu, YING Feng, KOU Nai-yu, et al. Effects of cation adsorption on properties of silt clay and mixed dredged soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(8): 2519 - 2524.
- [5] 汪民. 饱和黏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, 12.
WANG Min. Preliminary study of particle interaction with water viscosity in saturated clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1987, 13(3): 1 - 5, 12.
- [6] 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: 40 - 41.
CHENG Chang-bing, XU Chang-wei. The relationship between mechanical properties and ζ of the remolded kaolinite[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1985, 1: 40 - 41.
- [7] 王军, 曹平, 赵延林, 等. 水土化学作用对土体抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 245 - 250.
WANG Jun, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Influence of chemical action of water-soil on soil shear strength[J].

- Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2010, 41(1): 245 - 250.
- [8] ARASAN S, YETIMOGLU T. Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays[J]. **Turkish Journal Engineering and Environmental Sciences**, 2008, 32(2): 107 - 115.
- [9] 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.
- [10] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(6): 601 - 617
- [11] SRIDHARAN A. Engineering behaviour of clays: influence of mineralogy[C]//Proceedings of Chemo-mechanical Coupling in Clays: From Nano-scale to Engineering Applications. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [12] 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.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 458 - 462.
- [13] 于海浩, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 孔隙溶液浓度的变化对黏土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 564 - 569.
YU Hai-hao, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Effects of pore solution concentrations on shear strength of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 564 - 569.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [15] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
TANG Da-xiong, LIU You-rong, ZHANG Wen-shu, et al. Engineering rock and soil[M]. Beijing: Geology Press, 1999.
- [16] 傅鑫晖, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 非饱和红黏土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 32(增刊 2): 204 - 209.
FU Xin-hui, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Research on strength characteristics of unsaturated red clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 32(Supp.2): 204 - 209.
- [17] OLSON R E. Shearing strengths of kaolinite, illite, and montmorillonite[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1974, 100(11): 1215 - 1229.
- [18] HORPIBULSUK S, YANGSUKKASEAM N, CHINKULKIJNIWAT A, et al. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite[J]. **Applied Clay Science**, 2011, 52(1): 150 - 159.
- [19] WARKENTIN B P. Interpretation of the upper plastic limit of clays[J]. **Nature**, 1961, 190: 287 - 288.
- [20] WAHID A S, GAJO A, DI MAGGIO R. Chemo-mechanical effects in kaolinite. Part 1: prepared samples[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(6): 439 - 447.
- [21] 袁建新. 环境岩土工程问题综述[J]. 岩土力学, 1996, 17(2): 88 - 93.
YUAN Jian-xin. Overview of problem of environmental geotechnology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2): 88 - 93.
- [22] SRIDHARAN A, RAO G V. Shear strength behavior of saturated clays and the role of the effective stress concept[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(2): 177 - 193.
- [23] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemomechanical behavior of unsaturated soils[J]. **Vadose Zone Journal**, 2014, 13(9): 1 - 21.

上接第 3528 页

- [16] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943: 37 - 42.
- [17] ETTER DOLORES, KUNCICKY DAVID, MOORE HOLLY. Matlab 7 及工程问题解决方案[M]. 邱李华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
ETTER DOLORES, KUNCICKY DAVID, MOORE HOLLY. Introduction to Matlab 7[M]. [S. l.]: Prentice Hall/Pearson, 2006.
- [18] 钟小春. 盾构隧道管片土压力的研究[D]. 河海大学, 2005.
ZHONG Xiao-chun. Research on earth pressure for shield tunnel lining[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.