

DOI: 10.11779/CJGE201503023

孔隙溶液浓度的变化对黏土强度的影响

于海浩^{1,2}, 韦昌富^{1,2}, 颜荣涛^{1,2}, 傅鑫晖³, 马田田⁴

(1. 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;
3. 福建省建筑设计研究院, 福建 福州 350001; 4. 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: 孔隙溶液的变化对土体的强度具有重要作用, 为了分析孔隙溶液浓度的变化对黏土的有效强度及黏土颗粒微观结构的影响, 基于应变控制式室内直剪仪和电镜扫描技术, 对采用不同浓度 NaCl 溶液饱和的重塑土样进行强度和微观试验研究。试验结果表明孔隙溶液浓度的变化对土体黏聚力有很大影响, 随着 NaCl 溶液浓度的增加, 黏聚力呈现降低趋势, 当 NaCl 孔隙溶液达到 0.1 mol/L 时, 黏聚力出现负值。黏聚力主要来源于颗粒间物理化学作用力对颗粒移动的阻碍作用, 当黏土孔隙中的 NaCl 溶液浓度增加时, 颗粒间斥力减小, 颗粒变的易于移动, 黏聚力下降。同时由于土中真实孔隙水压力的存在, 使得黏聚力呈现负值。另外, 通过电镜扫描对土体微观结构的探测表明, 用 NaCl 溶液调拌的土样主要以凝聚结构为主, 而用去离子水调拌的土样主要以集聚结构为主。

关键词: 黏土; 直剪试验; 化学-力学耦合作用; 有效强度; 孔隙水压力

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)03 - 0564 - 06

作者简介: 于海浩(1988 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为水土化学力学耦合作用。E-mail: yuhaihao_ch@163.com。

Effects of pore solution concentrations on shear strength of clay

YU Hai-hao^{1,2}, WEI Chang-fu^{1,2}, YAN Rong-tao^{1,2}, FU Xin-hui³, MA Tian-tian⁴

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin 541004, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research, Fuzhou 350001, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Pore solutions play an important role in the shear strength of soils. A series of shearing and microcosmic tests are performed on the samples saturated with NaCl solutions with different concentrations to investigate the effects of pore solution concentrations on the effective strength of clay. The experimental results show that the pore solution concentrations have strong effects on cohesion of samples. The cohesion decreases with the increase of pore solution concentrations. As the concentration approaches 0.1 mol/L, the cohesion decreases to below 0 kPa. The cohesion depends on the block effect of physical and chemical forces between particles on the interparticle sliding. The repulsion decreases with the increase of the pore solution concentration which makes the interparticle sliding more easily. Due to the development of real pore pressure in the samples, the cohesion decreases to below 0 kPa. The environmental scanning electron microscopy tests on the microstructures confirm that clays form flocculation in NaCl solution and form aggregation in water.

Key words: clay; direct shear test; chemo-mechanical interaction; effective strength; pore pressure

0 引 言

无论是自然沉积或是人工堆填的岩土介质都是由多组份构成的, 在温度、化学等环境荷载作用下, 这种多相多组分岩土材料会表现出复杂的化学-力学耦合行为。当孔隙溶液发生变化时, 微观的化学-力学作用将会引起土体宏观性质的改变。国内外发生了很多此类工程实例, 昆明某硫酸厂由于污水渗入地基产生严重的不均匀沉降, 仅一个月观测到的相对沉降达到 40 mm^[1], 而在北海 Ekofisk 区域由于石油开采引起了

海底地表沉降^[2]。因此, 研究化学组分、浓度变化情况下的化学-力学耦合作用对黏土强度的影响具有重要的理论价值和实践意义。

国内外学者针对化学-力学耦合作用进行了大量试验, 分别就孔隙溶液为酸、碱、盐进行了研究。王

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372078, 51309055); 广西自然科学基金创新研究团队项目 (2012GXNSFGA060001); 广西岩土力学与工程重点实验室项目 (12-A-01-032)

收稿日期: 2014 - 07 - 11

洋等^[3]发现酸性水溶液使红黏土强度提高, 碱性水溶液使红黏土的强度降低, 但 Spagnoli 等^[4]发现在孔隙溶液 pH 值高或低时, 高岭土、蒙脱土混合黏土的不排水强度会增加。由此可见对于不同种类的土, 酸碱影响会存在差异。对于不同的盐溶液侵蚀的土试样也会产生 2 个方向的力学效应^[5]。王军等^[6]对土样、水样和粉煤灰的复合体进行室内水化学试验、土体物理力学常规试验和直剪试验, 表明 K^+ 、 Na^+ 等离子对土体的原始黏结力和固有黏结力有明显的减弱现象。Naeini 等^[7]通过室内试验研究了无机盐溶液的渗入对黏土不排水强度的影响, 研究发现同一种孔隙溶液对于不排水强度的影响与孔隙溶液浓度有关。Warkentin 等^[8]分析了孔隙溶液对黏土强度的影响机理, 认为黏聚强度只与颗粒间的斥力有关。随着研究的深入, 有些学者从微细观层面分析了黏土的化学-力学耦合作用的机理。研究表明某些黏土在颗粒形成过程中, 在颗粒表面会形成扩散的双电层^[4, 9-10], 孔隙溶液的变化对土体的双电层产生了不容忽视的影响^[11]。

尽管已有许多学者对于化学-力学耦合作用对于土体强度的影响做了大量的研究, 但是仍然还有很多问题有待解决。并且目前主要是针对土体的不排水强度进行研究, 对土体的有效强度涉及很少, 然而有效强度更能反映土体本身的性质。黏土的黏聚力主要来源于黏土颗粒间的分子作用力, 因此对黏聚力的研究更能直接反应土体中化学-力学耦合作用, 然而颗粒间的化学作用力如何形成黏土的黏聚力目前并没有统一的认识。因此, 本文借助 ZJ 型应变控制式直剪仪, 对采用低浓度 NaCl 溶液饱和黏土试样进行固结排水剪试验, 分析了重塑土样孔隙溶液浓度的变化对黏聚强度的影响。从试验结果可知, 随着土样孔隙中 NaCl 溶液浓度的增大, 颗粒间的斥力减小, 削弱了阻止颗粒移动的效应, 在剪切过程中更容易形成剪切面, 黏聚强度随之降低。

1 试验方法与过程

1.1 试验材料

试验所用土试样为重塑土样, 组成为粉土和膨润土, 二者质量比分别为 3:2 (土样 1) 和 2:3 (土样 2)。混合后的土样物理性质发生了一些改变, 表 1 分别列出了粉土、膨润土以及混合土的物理性质指标。

混合土样的颗粒级配曲线如图 1 所示。土样 (1) 中小于 0.005 mm 的粒径占 34.34%, 粒径在 0.005~0.075 mm 之间的占 54.62%, 粒径在 0.075~2 mm 之间的占 11.04%。土样 2 土中小于 0.005 mm 的粒径占 37.36%, 粒径在 0.005~0.075 mm 之间的占 58.57%,

大于 0.075 mm 的粒径仅有 4.06%。从级配曲线看到土样 2 的黏粒含量大于土样 1 的黏粒含量, 而在表 1 中土样的塑性指数大于土样 2 的塑性指数, 由于两种土样非常接近, 而在进行液塑限试验时会出现不可避免的误差, 使得土样 1 的液限偏大而塑限偏小或者是土样 2 的液限偏小而塑限偏大, 出现了塑性指数与黏粒含量不一致。

表 1 土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soils

土类	特性			
	液限	塑限	塑性指数	土粒比重
粉土	26.3	15.5	10.8	2.71
膨润土	56.2	31.6	24.6	2.66
土样 1	41.7	21.9	19.8	2.67
土样 2	43.0	23.6	19.4	2.69

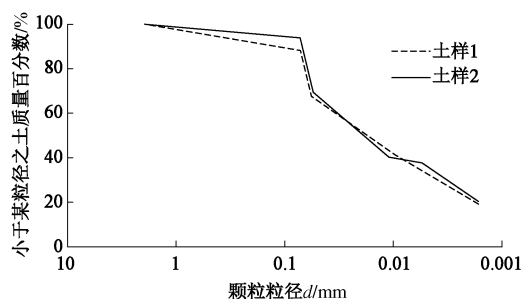


图 1 混合土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of mixture clay

1.2 试验方法

本文研究黏土的有效黏结强度, 因此选取固结慢剪试验, 这样不仅尽量排除了孔隙水压力的影响, 同时也使得水土化学作用更加充分。试验仪器为南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪 (四联剪)。

分别取风干的粉土和膨润土在 105℃ 温度下烘干, 粉土 8 h 以上, 膨润土 12 h 以上, 烘干后按干土质量 3:2 和 2:3 进行混合, 搅拌均匀。黏土颗粒在形成的过程中, 由于选择性吸附、表面分子解离、同晶替代等原因使得颗粒表面带有负电位, 因此黏土颗粒沉积成土体时, 不同的化学环境会导致不同的颗粒排列。因此, 试验采用两种不同方式制备重塑土样, 第一种方式是用不同浓度的 NaCl 溶液将烘干土调拌成含水率为 17% 的土样, 试验含水率为水与干土加 NaCl 质量的比值, NaCl 溶液的浓度为 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 1 mol/L。土样调配均匀后用塑料薄膜闷料 48 h, 待土样中的水分迁移达到平衡、水土作用充分, 取代表性土样测含水率, 得到精确的含水率, 然后, 根据需要的干密度制作环刀样, 按所需干密度计算出试验所需湿土质量, 采用环刀压实法压制备, 环刀直径 61.8 cm, 高度 2 cm, 控制试样的干密度均为 1.6 g/cm³。环刀试样采用抽气饱和法饱和, 饱和溶液为对应的孔隙水溶液, 然后浸泡。为使重塑土试样的水土

化学作用充分, 环刀试样在对应的孔隙水溶液中浸泡 7 d。第二种方式是用去离子水将烘干土调拌成含水率为 10% 的土样, 按上述步骤做成环刀样, 进行抽气饱和, 饱和溶液分别为 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 1 mol/L 的 NaCl 溶液。

直剪试验过程按土工试验规程 SL237—021—1999^[12] 规定进行。先对土样进行固结, 土样 1 每组剪切试验固结压力为 100, 200, 300, 400 kPa, 土样 2 每组剪切试验固结压力均为 400 kPa。固结 24 h 稳定后进行剪切, 剪切速率为 0.01 mm/s, 剪切时间为 12 h。试验剪切过程中采用的垂直压力为 100, 200, 300, 400 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

根据直剪试验结果可以得到抗剪强度与垂直压力的关系曲线, 如图 2 (a) ~ (d) 所示, 图 2 (a)、(b) 分别为土样 1 的抗剪强度与垂直压力关系曲线, 图 2 (c)、(d) 分别为土样 2 的抗剪强度与垂直压力关系曲线。其中图 (a) 和 (c) 采用第一种方式制备土样, 图 (b) 和 (d) 采用第二种方式制备土样。从图中可以看出, 由于 NaCl 溶液的侵蚀, 土样的抗剪强度曲线发生了明显的变化, 无论是黏聚力还是内摩擦角均产生了影响, 但是土样 1 明显看出, NaCl 溶液对于黏聚力的影响更为显著。而土样 2 的内摩擦角变化比土样 1 变化要显著, 因为土样 2 中的膨润土含量高, 受到 NaCl 溶液影响更大。

为了更好地看出孔隙水溶液的变化对黏土强度的影响, 分别将两种土样的黏聚力和内摩擦角与溶液浓度之间关系画在同一图中, 如图 3, 4 所示, 其中图 3 为黏聚力与溶液浓度的关系, 图 4 为内摩擦角与浓度的关系。图 3 (a) 为土样 1 黏聚力与溶液浓度关系, 从图中可以看出当有 NaCl 溶液侵蚀后, 土试样的黏聚力有显著降低, 但是, 在浓度进一步增加后, 黏聚力又有一个提高。用高于 0.05 mol/L 浓度溶液侵蚀时, NaCl 溶液调拌的土样的黏聚力出现了负值。Calvello 等^[13]对 NaCl 溶液饱和土样进行的直剪试验中, 同样观察到了负的黏聚力。而用另一种方式调拌的土样, 当浓度达到 1 mol/L 时出现了负值。同时从图中还看出, 用去离子水调拌土样的黏聚力高于用溶液调拌土样的黏聚力, 只有在 0.05 mol/L 浓度时低于溶液调拌土样的黏聚力。

图 3 (b) 为土样 2 黏聚力与溶液浓度关系, 从图 3 中可以看出, 当有 NaCl 溶液侵蚀土样 2 后, 土样的黏聚力同样发生了类似于土样 1 的变化, 黏聚力随着孔隙溶液浓度的增加显著减小, 在浓度大于 0.1 mol/L 时, 土样 2 也出现负值。但是, 由于两种土样固结压

力不同, 在固结过程中土样结构发生不同变化, 因此, 两种方式调拌的土样黏聚力表现出了不同相对大小。

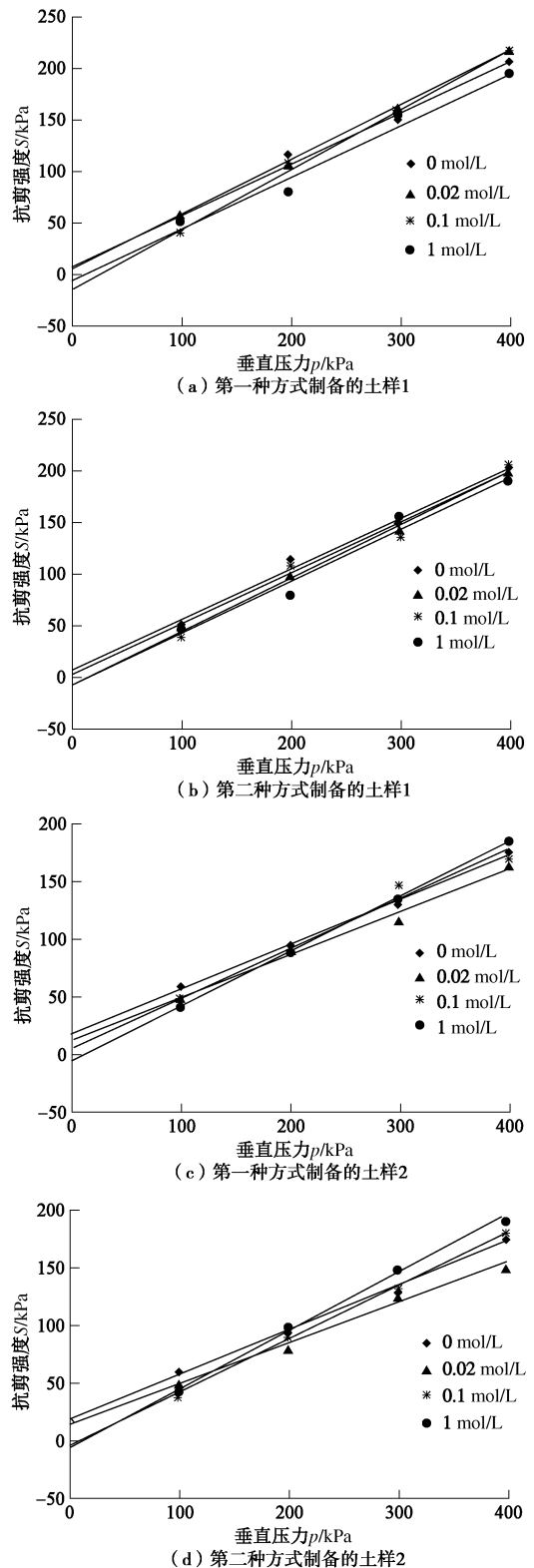


图 2 不同浓度时抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 2 Fitted linear regression curves of shear strength under different NaCl concentrations

图 4 (a)、(b) 分别为土样 1 和土样 2 的内摩擦角正切值与溶液浓度的关系。从两幅图中可以看出, 在较低浓度时, $\tan \varphi$ 总体呈现上升的趋势, 而达到较

高浓度, $\tan \phi$ 变化平稳, 基本不发生变化。

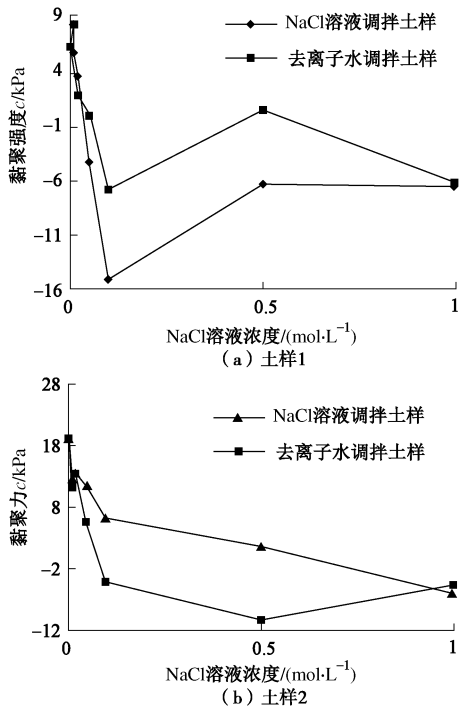


图 3 黏聚力与溶液浓度关系

Fig. 3 Relationship between cohesion and NaCl concentration

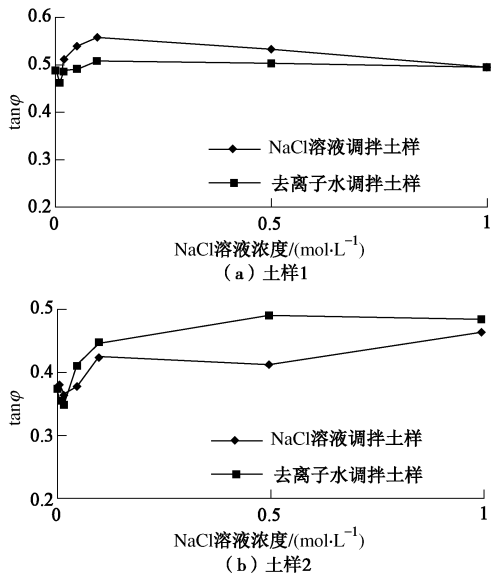


图 4 内摩擦角正切值与溶液浓度的关系

Fig. 4 Relationship between internal friction angle and NaCl concentration

2.2 试验分析

(1) 溶液对黏土颗粒微观结构的影响

通过微观手段发现, 黏土颗粒微观排列为主要 3 种方式, 如图 5 所示。由这 3 种基本结构组合聚集成团粒, 形成宏观的土体。试验中采取了两种不同的制样方式, 由于初始水环境不同, 形成了不同的黏土团粒, 如图 6 所示。用 NaCl 溶液调拌土样, Na^+ 被黏土颗粒吸附在表面, 平衡了部分颗粒表面的负电位, 斥力减小引力增加, 使得颗粒能得以靠近, 在此情况

下容易形成以面对边或者边对边为主的凝聚结构。用去离子水调拌土样, 颗粒表面没有阳离子吸附, 存在大量的未被平衡的负电位, 颗粒之间斥力占主要地位, 在此情况下形成了以面对面为主的集聚结构。Santamatina 等^[14]的研究中也有类似的结果。



图 5 黏土颗粒微观结构排列

Fig. 5 Arrangement of clay microstructure

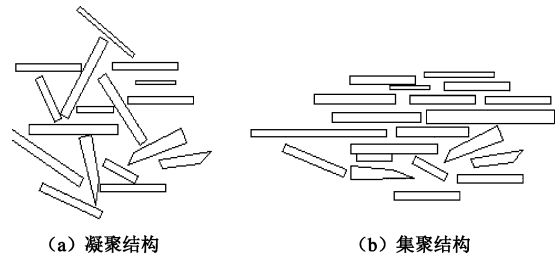


图 6 黏土结构

Fig. 6 Structure of clay

试验采用固结慢剪试验, 土样 1 的固结压力为 100, 200, 300, 400 kPa, 而当孔隙比相同时, 凝聚结构较之集聚结构有较低的压缩性。因此在固结完成后, 用去离子水调拌的土样比 NaCl 溶液调拌的土样密实, 所以得到的黏聚力要大一些。而土样 2 在试验中采的固结压力均为 400 kPa, 因为固结压力较大, 固结结束后土样的密实度差异不大, 而当孔隙比相同时, 凝聚结构的强度比集聚结构大, 所以土样 2 中, 用 NaCl 溶液调拌土样的黏聚力要比去离子水调拌的大一些。

由于土样是混合土, 因此土样强度由膨润土和粉土共同提供, 土样 1 中孔隙浓度为 0.05 mol/L 的土样在剪切面上粉土颗粒略多一些, 使得受溶液的影响程度稍稍减小, 因此出现了用去离子水调拌土样的黏聚力低于用溶液调拌土样的黏聚力, 如图 3 (a) 所示。

为了验证土样形成的两种结构, 选取代表性试样做电镜扫描照片, 如图 7 所示。其中图 7 (a) 为 0.01 mol/L NaCl 溶液调拌制样, 用 0.01 mol/L NaCl 溶液浸泡, 图 7 (b) 为去离子水调拌制样, 用 0.01 mol/L NaCl 溶液浸泡, 两种土试样均为固结前试样。两张图片均放大了 2000 倍, 仔细观察两张图片会发现, 图 7 (a) 中团粒比较小, 而图 7 (b) 中的团粒较大。同时在图 7 (b) 中能看到明显的层状结构, 而在图 7 (a) 中没有出现这种结构, 只有无规则的团粒结构。从上述两张照片中可以看出, 在 NaCl 溶液中形成的土样是以角、边与面或者边与边搭接排列为主, 土样主要由凝聚结构团粒组成; 而在去离子水中则是以面对面的片状堆积为主, 土样主要由集聚结构团粒组成。

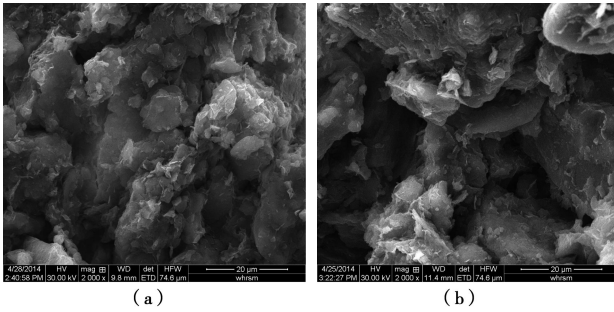


图7 电镜扫描照片

Fig. 7 Photos of scanning electron

(2) 孔隙溶液浓度变化对黏聚力的影响

黏性土的黏聚力取决于黏土颗粒间的各种物理化学力, 包括库仑力、范德华力、双电层排斥力等等。在剪切过程中, 黏聚力是黏土颗粒发生摩擦现象的宏观表现, 即黏聚力是上述物理化学力阻碍黏土颗粒移动的宏观表现。如图8给出了土样在剪切过程中的剪切机理, 在垂直压力作用下, 剪切盒中的土样在剪切过程中形成剪切面, 剪切面主要是由于黏土颗粒偏离原来的位置形成的。在图8中, 如果要形成剪切面, 颗粒a将离开原来的位置, 而颗粒a必然受到周围颗粒的分子力作用阻止其移动, 或者斥力或者引力。剪切面上无数的颗粒将进行上述的作用, 颗粒之间相互排斥、吸引, 阻碍剪切面形成, 最后表现出土样在剪切过程中的黏聚力。

另外, 上述直剪试验所得到的黏聚力并不是黏土颗粒的真实黏聚力, 而是包含了渗透压力的黏聚力。Wei^[15]提出真实孔隙水压力概念, 认为土体中的真实孔隙水压力由两部份组成, 即通过传感器测得的孔隙水压力和渗透压力

$$p_w = u_w + \Pi \quad (1)$$

式中 p_w 为真实孔隙水压力; u_w 为通常所说的孔隙水压力, 实验室中通过传感器测得; Π 为土体中的渗透压力, 在黏土中普遍存在。因此, 在考虑太沙基有效应力时, 其中的孔隙水压力应为上述真实孔隙水压力, 即为

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

对于本试验采用的是固结慢剪试验, 固结过程中孔隙水压力消散, 即 u_w 为 0, 将式(2)代入到库仑强度公式中得

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

式中, $c - \Pi \tan \varphi$ 为直剪试验所得黏聚力, 从表达式可以看出, 试验所测的黏聚力包含了两部分, 第一项 c 为黏土的自身黏聚力, 而第二项则受土体中的真实孔隙水压力与土样的内摩擦角控制。当 NaCl 溶液侵蚀土样后, 改变了颗粒间的分子力, 从而影响了黏土的自身黏聚力。

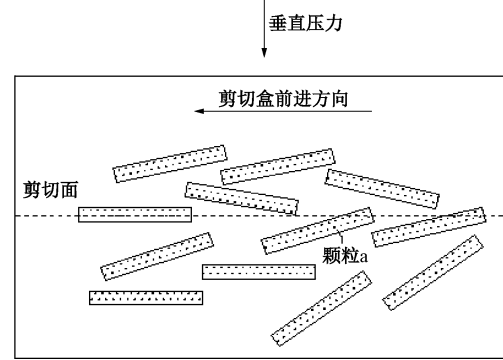


图8 黏土剪切机理

Fig. 8 Mechanism of clay shear

由于黏土颗粒的带电性, 使其周围形成了双电层结构, 双电层的厚度受到孔隙溶液的控制。NaCl 溶液的侵蚀改变了黏土颗粒的双电层的厚度, 颗粒双电层厚度的计算公式如下^[16]:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{\varepsilon^0 D k T}{2 n^0 e^2 v^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 $\frac{1}{K}$ 为双电层厚度; ε^0 为真空系数; D 为介电常数; k 为波尔兹曼常数; T 为温度; n^0 为孔隙溶液浓度; e 为单元电荷; v 为离子电价。

从式(4)中看出, 双电层的厚度和溶液浓度成反比关系, 浓度增加双电层厚度减小, 颗粒间的斥力减小。同时由于孔隙溶液中有阳离子存在, 平衡了颗粒表面的部分负电位, 颗粒间的斥力也会减小, 而颗粒间的引力, 对于溶液浓度不敏感^[16-17]。

本试验中, 由于 NaCl 溶液的侵蚀, 导致颗粒间的斥力减小, 阻碍颗粒移动的效应降低, 直剪试验所得到的 $c - \Pi \tan \varphi$ 值随着 NaCl 溶液浓度增加而减小, 如图2所示。当浓度达到一定程度时, 颗粒间的斥力显著减少, 导致黏土的自身黏聚力小于 $\Pi \tan \varphi$, 在图3中可以看到土样1和2均出现了负值。但是由于膨润土颗粒间的斥力显著减小, 使得原来没有接触到粉土颗粒接触, 增加了阻碍剪切面形成的作用, 使浓度达到 0.5 mol/L 时, 黏聚力又有了明显提高。NaCl 溶液对黏聚力的影响存在一个限度, 在图3中可以看出, 浓度大于 0.5 mol/L 后, 黏聚力变化趋于平稳状态。

在颗粒移动时, 颗粒间双电层厚度也起到润滑的作用。当双电层厚度减小, 将导致扩散层中弱结合水减少, 润滑作用降低, 内摩擦角随之增加。而双电层厚度存在极限值, 所以在较低浓度, 内摩擦角随着溶液浓度增加而增加, 而达到较大浓度变化平稳。

3 结 论

本文通过含有不同质量膨润土的混合土进行的直

剪试验, 用不同浓度 NaCl 溶液对土样进行侵蚀, 得出以下几点结论:

(1) 由于颗粒表面负电位的存在, 使得颗粒在堆积形成土体时, 相互之间排列方式受到化学环境的影响, 主要为凝聚型和集聚型结构, 而相同垂直压力下凝聚结构较之集聚结构更易被压缩。

(2) 当土样孔隙溶液为 NaCl 溶液时, 孔隙溶液浓度对于黏土的黏聚力具有较强的影响。孔隙溶液浓度增加黏土的黏聚力降低。但是, 产生的影响有一个限度, 即颗粒的双电厚度存在极值。

(3) 因为黏土中渗透压力的存在, 使得直剪试验中会得到负的黏聚力。黏土中渗透压力对于土样的强度影响很大, 应该得到足够的重视。

参考文献:

- [1] 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 Zhong-chu. The effect of acidizing fluid on the physico-mechanical properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(4): 89 - 93. (in Chinese))
- [2] NAGEL N. Ekofisk geomechanics monitoring[C]// Proceedings of the International Workshop on Geomechanics in Reservoir Simulation. Reuil-Malmaison, 2010.
- [3] 王 洋, 汤连生. 水土作用模式对残积红黏土力学性质的影响分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, **46**(1): 128 - 132. (WANG Yang, TANG Lian-sheng. Effects of water-soil interaction on mechanical strength of residual red clay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science), 2007, **46**(1): 128 - 132. (in Chinese))
- [4] SPAGNOLI G, RUBINOS D. Undrained shear strength of clays as modified by Ph variations[J]. Bull Eng Geol Environ, 2012, **71**: 135 - 148.
- [5] 汤连生. 水-土化学的力学效应及机理分析[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 (Natural Science), 2000, **39**(4): 104 - 109. (in Chinese))
- [6] 王 军, 曹 平. 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 - 249. (WANG Jun, CAO Ping. Influence of chemical action of water on soil shear strength[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2010, **41**(1): 245 - 249. (in Chinese))
- [7] NAEINI S A, JAHANFAR M A. Effect of salt solution and plasticity index on undrain shear strength of clays[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, **49**: 982 - 986.
- [8] 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.
- [9] STUDDS P G, STEWART D I, COUSENS T W. The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures[J]. Clay Minerals, 1998, **33**: 651 - 660.
- [10] PI MAIO C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 695 - 707.
- [11] RAND B, PEKENC E. Investigation into the existence of edge-face coagulated structures in na-montmorillonite suspensions[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1980, **76**: 225 - 235.
- [12] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil tests[S]. 1999. (in Chinese))
- [13] MICHELE C, MARILENA L, ROBERTO V, et al. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents[J]. Italiana Geotechnical, 2005, **1**: 34 - 46.
- [14] SANTAMARINA J C, KLEIN K A. Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling: interparticle forces and fabric[M]// Chemo-Mechanical Coupling in Clays: from Nano-Scale to Engineering Applications, MAIO C D, HUECKEL T, LORET B, ed. A.A. Balkema, Lisse, Maratea, 2002: 47 - 64.
- [15] WEI Chang-fu. A theoretical framework for modeling the Chemo-mechanical behavior of unsaturated soils[J]. Vadose Zone Journal, 2014, **13**(9): 1 - 21. (in Chinese))
- [16] JAMES K. Mitchell and kenichi soga[M]// Fundamentals of Soil Behavior, MITCHELL James K, SOGA Kenichi, ed. New York: Wiley, 2005
- [17] LAME T W, ASCE F. A mechanistic picture of shear strength in clay[C]// Soil Shear Strength Confence. Boulder, 1960: 555 - 580.