

不同溶液下弱膨胀土的抗剪强度研究^{*}

于海浩,孙德安

(上海大学 土木工程系,上海 200444)

摘要:为了研究氯化钠溶液对膨胀土强度的影响,以宁明弱膨胀土为研究对象,对经不同浓度氯化钠溶液饱和后的试样进行直剪试验。试验结果发现,由于试样孔隙中氯化钠盐溶液的存在,改变了弱膨胀土的峰值和残余剪切强度,即经1 mol/L 氯化钠溶液饱和的试样剪切强度小于蒸馏水饱和试样的剪切强度,氯化钠溶液降低了试样的黏聚强度和摩擦强度。认为造成上述结果的原因为,氯化钠溶液降低了位于剪切面上的颗粒与颗粒之间的作用力,使得相互阻碍作用降低,剪切面容易形成,表现为剪切强度降低。

关键词:弱膨胀土;直剪试验;剪切强度;剪切机理;氯化钠溶液

中图分类号:TU41

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0423-05

Shear Strength of Weakly Expansive Soils in Different Solution

Yu Haihao, Sun Dean

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P.R. China)

Abstract: In order to investigate the effect of NaCl solution on shear strength of compacted weakly expansive clay, a series of direct shear tests were performed on Ningming weakly expansive clay saturated by NaCl solution with different concentrations. The results show that NaCl solution can change the shear strength of weakly expansive clay. The shear strength including cohesion and friction strengths decrease with increasing the NaCl solution concentration. It is believed that the reasons for the above results are as follows: sodium chloride solution reduces the force between particles located on the shear surface induce the decrease of the mutual hinder. Thus the shear surface is easy to form, which is manifested as the reduction of shear strength.

Keywords: weakly expansive clay; direct shear test; shear strength; shear mechanism; NaCl solution

0 引言

膨胀土具有“三性特征”,即胀缩性、裂隙性和超固结性。造成膨胀土具有特殊性质的主要原因是其矿物组成,膨胀土通常含有较多的蒙脱石、伊利石或伊-蒙混合层等强亲水性矿物,这些矿物对于环境荷载变化特别敏感^[1]。膨胀土分布广泛,经常用作路基、路堤或建筑物的地基。由于其特殊的工程性质,经常会给结构物造成严重破坏,比如

建筑物地基隆起、路基开裂、边坡失稳等。对于浅层膨胀土,随着环境荷载的变化,抗剪强度会随之变化,进而对各种岩土工程结构产生影响。因此,研究膨胀土的抗剪强度机理对于土力学理论和工程实践具有重要的意义。而研究表明,具有高膨胀性的膨润土强度对于孔隙溶液极为敏感^[2-3],因此有必要研究孔隙溶液对弱膨胀土强度的影响。

目前,国内外学者对于膨胀土强度进行了大量

^{*} 收稿日期:2018-09-12(修改稿)

作者简介:于海浩(1988-),男,辽宁葫芦岛人,博士生,主要从事膨胀土特性的研究工作。

E-mail:yuhaihao_ch@163.com

基金项目:国家自然科学基金(11672172);广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金(17-J-21-2)

的研究。陈正汉等^[4]应用 CT 三轴扫描仪,在多种应力路径下对膨胀土浸水膨胀过程中细观结构演化特性进行了研究,定义了描述膨胀土细观结构的定量指标。徐彬等^[5]通过对膨胀土进行直剪试验和三轴试验,探究了土体裂隙发展过程中的强度影响因素和规律。试验发现,含水率、密度及裂隙是影响膨胀土强度的 3 个因素。何芳婵等^[6]对不同增湿程度膨胀土进行了抗剪强度试验,在抗剪强度试验结果基础上建立了黏聚力、内摩擦角与增湿含水率的关系式。对于膨胀土的强度研究主要是在库伦-摩尔抗剪强度理论基础上进行的,而从抗剪强度公式中可以看出,黏土的抗剪强度由两部分组成,即黏聚强度和摩擦强度。许多学者对于剪切过程中黏聚强度和摩擦强度对抗剪强度所起的作用也进行了探究。

Lambe^[7]认为土体的抗剪强度由颗粒之间的凝聚、剪胀及摩擦组成,在剪切位移较小时颗粒间的凝聚和剪胀起着主要作用,而在剪切位移较大时颗粒间的摩擦起着主要作用。Warkentin 等^[8]对不同孔隙盐溶液的膨润土进行直剪试验,认为直剪过程中颗粒间的排斥力控制着土样的剪切强度。Lu 等^[9]探讨了黏聚力的主要来源,提出黏聚力主要是颗粒间吸应力的宏观表现。可以看出,黏土剪切强度的形成非常复杂,在剪切过程中在微观层次发生复杂的耦合作用。虽然许多学者对于膨胀土进行了大量的研究,但是在盐溶液饱和下膨胀土的强度及其机理的研究还很少,因此,本文将从土中的物理化学力出发,对于盐溶液饱和下膨胀土的抗剪强度进行探讨。为了控制土试样的物理化学力,采用不同浓度氯化钠溶液对烘干土样进行饱和,对饱和后的试样进行固结慢剪试验。

1 试验材料及试验过程

1.1 土样基本物理指标

试验所用的膨胀土取自广西南明县,该地区膨胀土所含膨胀矿物为伊-蒙混合,黏土矿物成分分析见表 1。从表中可知,黏土矿物有 4 种,其中伊蒙混合层占的相对比例最高,其次为高岭石。伊蒙混合层矿物是伊利石和蒙脱石 2 种矿物之间的过渡矿物。表 2 中列出了土样的基本物理指标,按照《膨胀土地区建筑技术规范》^[10]的分类,该膨胀土为低膨胀性膨胀土。

表 1 宁明膨胀土矿物相对含量

Table 1 Relative amount of mineral in Ningming expansive soil

黏土矿物相对含量/%			
伊蒙混合	伊利石	高岭石	绿泥石
73	8	15	4

表 2 宁明膨胀土基本物理指标

Table 2 Physical properties of Ningming expansive soil

比重 $G_s/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限 $w_L/$ %	塑限 $w_p/$ %	最大干 密度 $\rho_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含 水率 $w_{opt}/\%$	自由 膨胀率 $\delta_f/\%$
2.74	71.45	28.65	1.78	20.0	64

1.2 试验过程

用压实法制备直剪试验用的试样,试样初始高度为 15 mm,直径为 49 mm。为了使试样具有相同的初始结构,土样均经过烘干,初始含水率接近为零,试样目标干密度为 1.6 g/cm^3 。压实试样分别用蒸馏水和 1 mol/L 氯化钠溶液进行饱和,首先将制成的环刀试样用叠式饱和器固定,然后将叠式饱和器放置在真空缸中,用抽气饱和的方法对试样进行饱和。直剪试验采用固结慢剪试验,剪切速率设定为 0.005 mm/min ,垂直固结压力分别为 100、200、300、400 kPa。表 3 中列出了所有试样在制样后和固结前后的孔隙比。表中“饱和后孔隙比”是指在抽气饱和后,试样在饱和溶液中静置一个星期后,拆除叠式饱和器时的试样孔隙比。

表 3 试样孔隙比

Table 3 Void ratio of the specimens

溶液浓度 $/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	固结压力 kPa	制样 e_0	饱和后 e_s	固结后 e_c
0	100	0.776	0.797	0.737
	200	0.776	0.803	0.644
	300	0.778	0.801	0.635
	400	0.776	0.801	0.617
1.0	100	0.778	0.807	0.727
	200	0.777	0.799	0.679
	300	0.774	0.795	0.637
	400	0.779	0.799	0.619

2 试验结果及分析

图1表示了直剪试验得到的剪应力与剪切位移关系曲线。图1(a)和(b)分别是蒸馏水和1 mol/L氯化钠溶液孔隙溶液的试验结果。从图可知,在剪切过程中无论蒸馏水还是1 mol/L氯化钠溶液饱和试样的剪应力都出现了明显的峰值。图2比较了2种孔隙溶液在同一垂直压力下的结果,图2(a),(b),(c)和(d)分别为2种孔隙水溶液试样在100、200、300、400 kPa垂直压力下的剪应力与剪切位移关系曲线。从图中可看出,在相同垂直压力下,2种孔隙溶液的土样强度表现出了差异,在4种垂直压力下,无论是峰值剪应力还是稳定后的残余剪应力,孔隙溶液为蒸馏水的剪应力都略高于孔隙溶液为氯化钠溶液的剪应力。

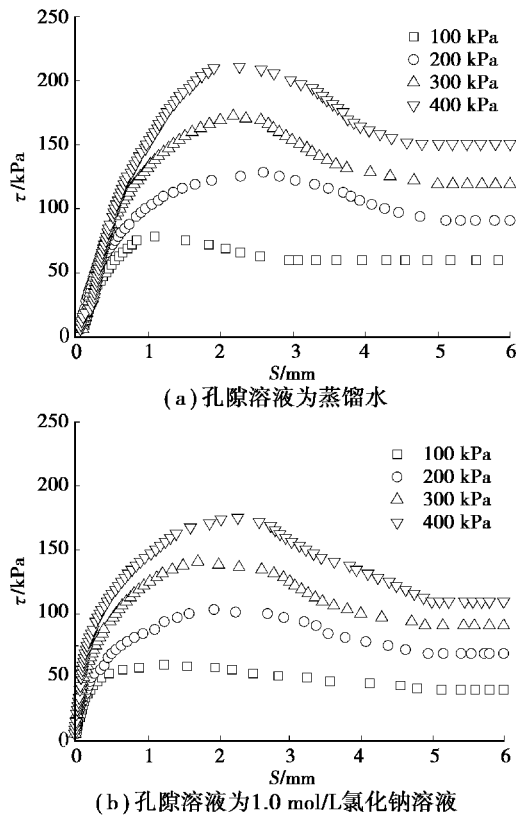


图1 宁明膨胀土的剪应力与剪切位移关系

Fig. 1 Shear stress vs. shear displacement of Ningming expansive Soil

根据直剪试验得到剪应力与剪切位移关系曲线可画出抗剪强度曲线,分别选取前述试验结果的峰值剪切应力和稳定后的残余剪切应力作出相应的抗剪强度曲线,如图3所示。从图中结果可以看出,由于孔隙溶液浓度的不同,采用峰值剪切应力得到的抗剪强度线的坡度有着明显差异,同样,抗

剪强度线的截距也有一定差异,采用残余强度得到的抗剪强度线也有类似的结果。对不同抗剪强度线进行了线性拟合,其拟合结果如表4所示。

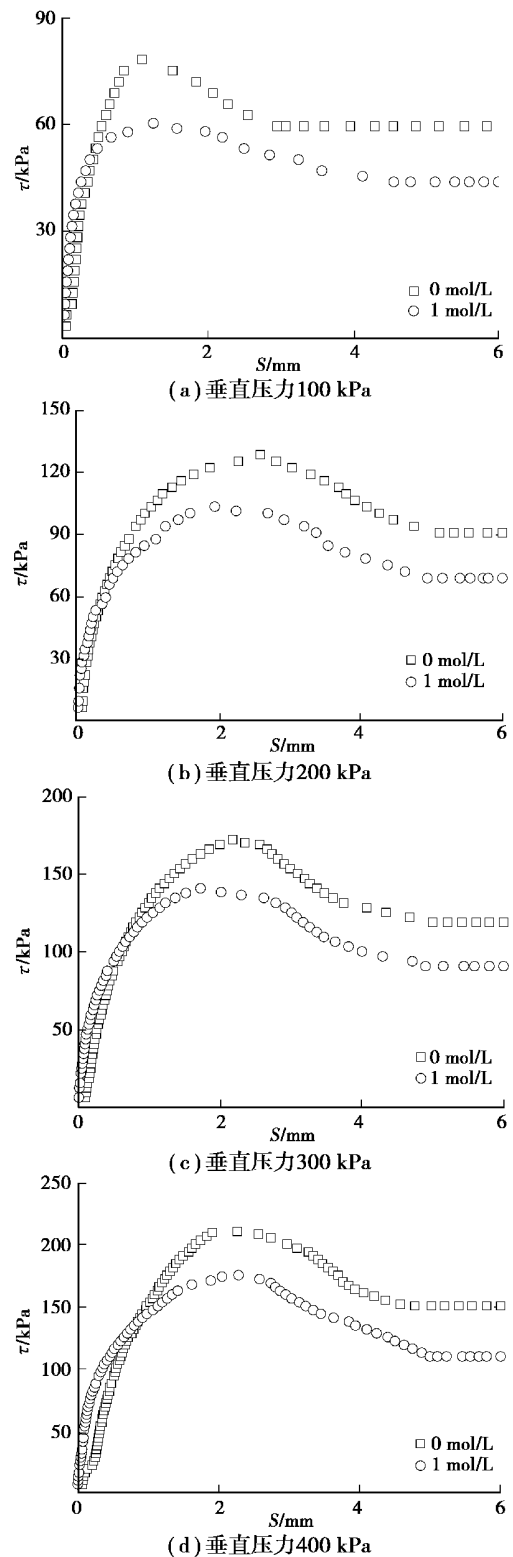


图2 同一垂直压力下不同孔隙溶液宁明膨胀土的剪应力与剪切位移曲线

Fig. 2 Shear stress vs. shear displacement of Ningming expansive soil with different pore solutions at the same vertical pressure

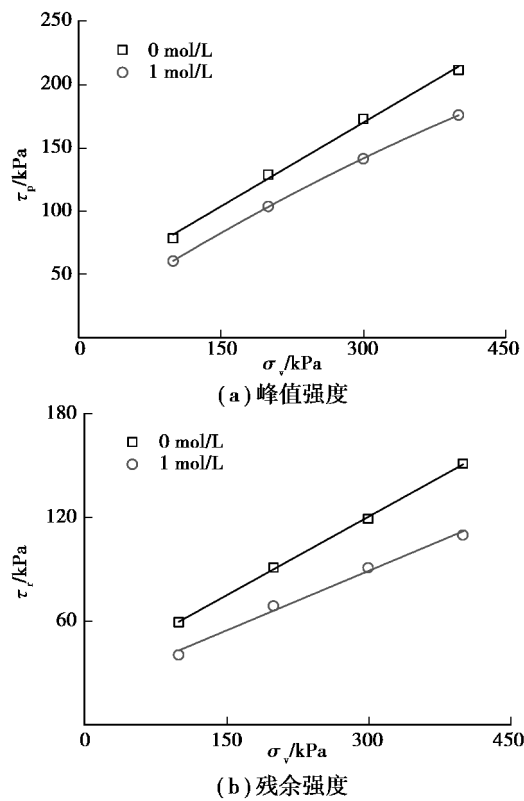


图 3 不同孔隙溶液饱和试样抗剪强度

Fig. 3 Shear strength vs. vertical stress relation with different concentrations in NaCl solution

表 4 线性拟合得到的剪切强度指标

Table 4 Shear strength parameters by linear fitting

指标 土样	类别	黏聚强度 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	拟合度
蒸馏水 土样	峰值强度	37.2	23.9	0.9969
	残余强度	29.6	16.8	0.9791
盐溶液 土样	峰值强度	24.4	21.0	0.9983
	残余强度	20.4	12.9	0.9744

从拟合结果中可以看出,对于同一种土样,残余剪应力得到的抗剪强度指标均小于峰值剪应力得到的抗剪强度指标。对于同样采用峰值剪应力得到的 2 种不同孔隙溶液试样的抗剪强度指标,蒸馏水试样的黏聚强度明显大于盐溶液试样的黏聚强度,而内摩擦角指标则是蒸馏水试样的略大于盐溶液试样的。对于采用残余剪应力得到的抗剪强度指标,蒸馏水的抗剪强度指标同样均大于盐溶液的抗剪强度指标。

膨胀土颗粒在形成土体过程中,首先是若干土颗粒堆叠在一起形成集聚体(如图 4 所示),然后众多集聚体最终形成土体,同时在土体中形成了 2 种孔隙,即集聚体内孔隙和集聚体间孔隙^[11-12]。形成集聚体的土颗粒表面不是电中性,而是带有过剩的负电荷,这些过剩的负电荷使得颗粒之间存在微观的物理化学力,主要有范德华力和扩散双电层的排斥力^[13],颗粒之间的物理化学力在剪切过程中则表现出了膨胀土的黏聚强度,粒间的物理化学力受控于土体孔隙中溶液环境,比如溶液浓度、电介质常数、温度等。土体中孔隙溶液环境的改变,在微观上土颗粒失去原有的平衡,而在宏观上则表现出土体强度的变化。膨胀土在直剪试验过程中,在剪切面附近的土颗粒从剪切前的原始位置移动到剪切结束后的某个位置,在移动的过程中颗粒与颗粒之间会相互阻碍,宏观上表现出了土体的抗剪强度。

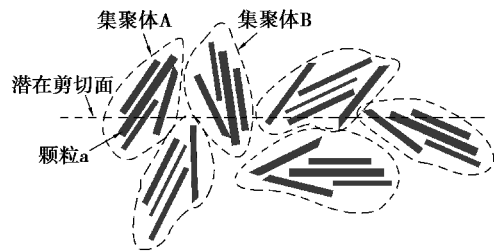


图 4 膨胀土微观结构示意图

Fig. 4 Sketch of microstructure of expansive clay

颗粒之间的阻碍方式主要有颗粒间的物理化学力的阻碍、土颗粒表面水膜的黏阻作用、颗粒之间的机械咬合阻碍及摩擦作用。这些阻碍存在于整个剪切过程中,但是在不同阶段起到的作用不同。在剪切最开始阶段,剪切面还未形成,存在一条潜在剪切面,土体形成剪切面并不是穿过颗粒,而是使颗粒离开原来位置形成剪切面。在图 4 中,颗粒 a 位于潜在剪切面上,在形成剪切面的过程中颗粒 a 将离开原有位置,在同属于集聚 A 中的其他颗粒阻碍颗粒 a 移动,剪切面附近的集聚体内均发生类似的作用。在剪切开始阶段(即图 5 所示的阶段 I)阻碍作用主要为颗粒间的物理化学力和集聚体内颗粒间的机械咬合作用,而对于物理化学力,无论是范德华吸引力或是扩散双电层排斥力均对颗粒 a 移动起到阻碍作用,范德华吸引力和扩散双电层排斥力大则阻碍作用大,反之亦然。

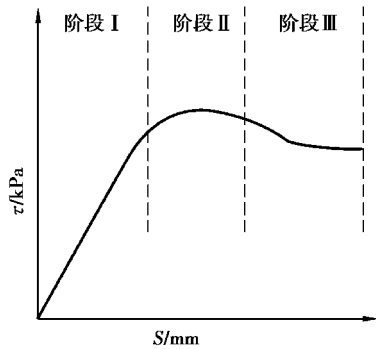


图 5 剪切位移与剪应力关系

Fig. 5 Shear stress vs. shear displacement

随着剪切的进行,集聚体内的颗粒之间的粒间力和机械咬合作用愈发激烈,同时将出现颗粒间水膜的黏阻作用。剪应力继续增加,剪切过程也向阶段Ⅱ过渡,而集聚体与集聚体之间的阻碍作用也相继出现。在图 4 中,集聚体 A 与集聚体 B 之间随着剪切面的产生将相互之间阻碍移动,在阶段Ⅱ中颗粒与颗粒之间、团粒与团粒之间的相互阻碍作用达到极限,剪应力在此阶段达到最大。过了最大剪应力之后,颗粒之间的排列趋向平行于剪切面的定向排列,颗粒之间的机械咬合作用逐渐消失,同时剪切面附近的集聚体部分也被破坏。

土样最终进入剪切阶段Ⅲ,在剪切面附近的土颗粒形成了平行于剪切面的定向排列,而一些集聚体也不再存在,在土体中形成了一条剪切带(如图 6 所示),在阶段Ⅲ颗粒间的机械咬合作用基本消失,但是颗粒间的物理化学力和颗粒表面的水膜黏阻作用仍然存在。在整个剪切过程中,几种阻碍作用是相互耦合,因此土样的 3 个剪切阶段界限不一定非常清晰。

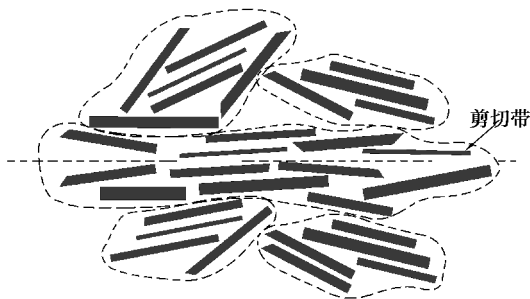


图 6 剪切稳定后土试样微观结构示意图

Fig. 6 Sketch of microstructure of soil sample after direct shear test

从图 2 的剪切试验结果可以看出,盐溶液降低了土样的剪切强度。因为土试样的孔隙溶液为氯

化钠,相比孔隙溶液为蒸馏水有大量的正电荷存在,膨胀土颗粒表面的负电荷将被钠离子中和,颗粒之间的扩散双电层排斥力大大降低,而范德华吸引力则对溶液不敏感,同时由于扩散双电层排斥力的降低,颗粒表面的水膜厚度减小,水膜之间的黏阻作用也随之降低(即阻碍颗粒移动的阻碍作用将降低),因此孔隙溶液为氯化钠的土样强度低于孔隙溶液为蒸馏水的土样强度。

颗粒之间的物理化学力阻碍作用在宏观上表现为土试样的黏聚强度指标,从前述分析中知,由于土试样孔隙中盐溶液的存在降低了这种阻碍作用,则宏观上表现为黏聚强度的降低,所以直剪试验中孔隙溶液为蒸馏水的试样黏聚强度大于孔隙溶液为盐溶液的试样黏聚强度,如图 3 所示。而颗粒间的机械咬合作用以及颗粒表面的水膜黏阻作用,宏观表现为土试样的内摩擦角。在峰值应力时,即土试样处于剪切阶段Ⅱ,此时颗粒之间的咬合作用达到极限,而在残余剪切应力时,即土试样处于剪切阶段Ⅲ,此时颗粒排列为定向排列,颗粒之间的机械咬合基本消失,因此,采用峰值剪切应力得到的内摩擦角大于采用残余剪切应力得到的内摩擦角。

3 结语

土试样在剪切过程中,剪切面附近颗粒随着剪切的发展而重新排列,最终颗粒呈定向排列。微观上颗粒与颗粒之间阻碍颗粒移动,宏观上表现出土试样的剪切强度。颗粒与颗粒之间的阻碍作用包括颗粒间的物理化学力的阻碍、土颗粒表面水膜的黏阻作用、颗粒之间的机械咬合阻碍及摩擦作用。

弱膨胀土的孔隙溶液环境影响土的剪切强度,氯化钠溶液会降低弱膨胀土的抗剪强度,这是因为氯化钠溶液会降低土颗粒间的排斥力,同时使颗粒表面水膜厚度降低,降低了剪切过程中颗粒之间的相互阻碍作用。

参考文献(References)

- [1] Maio C D. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects [J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 695-707.

(下转第 451 页)