

大柴旦盐湖采卤区地层剖面盐渍土基本类型 及其抗剪强度试验研究

虎啸天^{1,2}, 胡夏嵩^{1,3}, 李光莹^{1,2}, 栗岳洲^{1,2}, 付江涛^{1,2}, 余冬梅¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘要:选取柴达木盆地大柴旦盐湖采卤区作为试验区,对区内地层剖面盐渍土的基本类型进行划分,即通过测定 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等易溶盐离子的方法,得出区内采卤区地层剖面盐渍土的主要类型是以亚氯盐渍土为主。在此基础上,对盐渍土进行扰动试样的室内直剪试验研究,以获取抗剪强度指标粘聚力 c 值与内摩擦角 φ 值。试验结果表明,该区盐渍土的含盐量由地表开始向下呈逐渐降低趋势,即由地表的6.89%降到地下4.5 m处的1.11%。粘聚力 c 值主要受试样含水量大小的影响,表现出随着含水量的增加,粘聚力 c 值呈降低现象,即当含水量由19.8%上升至23.3%时,粘聚力 c 值由35.4 kPa下降至24.9 kPa,下降率约为29.7%;而当含水量由23.3%下降至17.4%时,粘聚力 c 值则由24.9 kPa上升至34.1 kPa,上升率约为36.9%。内摩擦角 φ 值则受试样粒径影响相对较为明显,随着试样中粘粒含量的增多,粗粒含量相对减少,内摩擦角呈逐渐增大的趋势,即由 24.1° 上升至 33.3° ,增加率约为37.3%。随着试样中含盐量的增加,粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值均呈线性增加趋势。该研究成果将有助于进一步探讨含水量、颗粒大小以及含盐量对盐渍土试样抗剪强度变化的影响,且对区内盐田及其相应的基础设施建设有一定的理论指导意义。

关键词:大柴旦;盐渍土;抗剪强度;含水量;含盐量;粒度

中图分类号:P642.1

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2014)04-0038-12

1 引言

盐渍土是易溶盐含量高于0.3%的土,由于易溶盐的存在,使得盐渍土具有溶陷、盐胀和腐蚀的特性^[1]。一般根据易溶盐离子的种类的不同可将盐渍土分为氯盐渍土、亚氯盐渍土、亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土、碳酸(氢)盐渍土;根据盐渍化程度的不同又可将盐渍土分为弱盐渍土、中盐渍土、强盐渍土、过盐渍土^[2-3]。盐渍土主要分布于干旱半干旱地区地下水位埋深相对较浅部位,西北地区是我国盐渍土分布最多的地区,约占全国盐渍土总面积的60%左

右^[4-6]。青海境内盐渍土主要分布于柴达木盆地西部及西宁、平安河湟谷地湟水河南岸山前倾斜平原带等地区^[7]。柴达木盆地区内气候干燥,盐湖、盐渍土十分发育,分布面积达 $1.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 以上^[8-9]。盆地内有诸多重要交通线路穿过,如格尔木至茫崖段(格茫公路)、敦煌至格尔木段(敦格公路)、德令哈至小柴旦段(德小高速公路),以及青藏铁路、在建的敦煌至格尔木铁路(敦格铁路),还有花土沟至格尔木输油管线等诸多已建和在建工程。同时,随着该区各类资源的勘探和开发,一些工矿设施、居民聚居区等基础设施建设均处于快速发展阶段,区内现有的可耕土地和建设用地均为极其

收稿日期:2013-11-22;修回日期:2014-04-03

基金项目:中国科学院“百人计划”资助项目(Y110091025);中国科学院青海盐湖研究所“青年基金”资助项目(Y360441058)

作者简介:虎啸天(1986-),男,硕士生,主要研究方向环境岩土工程与工程地质。Email:rhuael@gmail.com。

通信作者:余冬梅。Email:ydm2011@isl.ac.cn。

宝贵且有限的资源,如何科学改良该区的盐渍土成为工程建设和环境保护领域的共同研究课题。

盐渍土对工程建设和工程建筑材料的使用寿命具有特殊影响,溶陷和盐胀可使地基和路基塌陷变形,土中的易溶盐离子腐蚀建筑材料,盐渍土这种特殊工程性质成为国内外学者广泛关注的热点^[10-11]。顾成权等通过不固结不排水快速剪切试验,分析了内聚力随含水量与粘粒含量比值变化的关系,以及内聚力与土体干密度之间的关系,揭示了影响土体内聚力的因素之间的关系,即土体含水量与粘粒含量比值(m)对土体内聚力的影响存在一个 $m = 1.33$ 的临界值。在此临界值以下内聚力随 m 增大而线性降低,在此临界值以上内聚力 c 随 m 的增大变化不明显^[12]。陈炜韬等通过室内直剪试验研究了含盐量及含水量对盐渍土抗剪强度指标的影响,结果表明试样含水量为10%、15.56%时,含盐量对盐渍土强度参数的影响明显存在一个为10.36%的含盐量阈值^[9,13]。郭菊彬等对格尔木地区所采集的粉质粘土分别加入不同含量的氯盐及硫酸盐进行直剪试验,研究了土体粘聚力和内摩擦角与含盐量及含水量的关系,结果表明含盐量同含水量的比值与土体粘聚力、内摩擦角均存在显著的线性关系^[14]。本项研究利用天然状态下的盐渍土剖面,选取部分位置制取扰动试样,探讨在自然含水量及含盐量条件下,不同层位盐渍土抗剪强度变化规律及其影响因素,该研究成果为进一步探讨区内及其与该区地质条件相似的其它地区开展盐渍土抗剪强度及其影响因素之间的关系提供重要的理论基础。

2 试验材料及方法

2.1 试验区概况

研究区大柴旦盐湖属于封闭的山间湖盆,整个湖盆位于柴达木山与绿梁山之间,中部为第四系所覆盖的新生代凹陷区^[15-16]。柴达木地区属于干旱、多风的大陆性气候,年蒸发量大于降水量,终年干燥少雨,冬季寒冷漫长,夏季

凉爽短促^[17]。大柴旦盐湖因地形雨较多,年降水量达97.2 mm,较其附近的冷湖、格尔木和察尔汗等地高2~5倍,而周围亚高山地带更可达300 mm左右,全年平均气温为1.6℃,1月平均气温为-13.7℃,7月平均气温为14.9℃^[18]。

2.2 试验材料

试验用盐渍土取自柴达木盆地大柴旦盐湖区出露的盐渍土地层剖面,地理位置为北纬37°50′,东经95°08′,海拔3 140 m。采样方法是按层位分层取样,共取6组土样,采样剖面厚度为7.5 m,具体地层出露情况如图1所示。

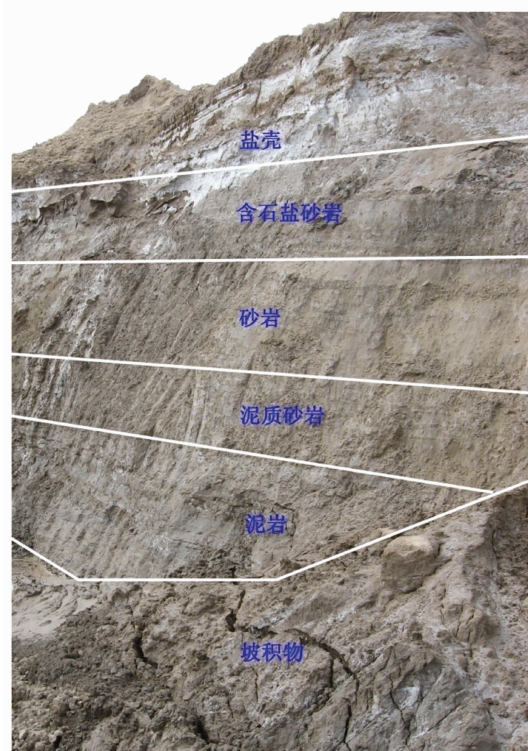


图1 研究区地层出露情况及采样点位置

Fig. 1 Condition of stratum outcrop and sampling sites in testing area

采样点地层分布与出露地层的基本岩性特征是,该取样剖面由下而上划分为6层,即第1层为坡积物所覆盖,其组成主要为上覆地层塌落堆积的盐渍土,土体表层有白色盐类结晶现象,且伴有部分粉砂及泥岩,该层厚度约为2.75 m;第2层为层状泥岩,土黄色,厚层状结

构,主要由粘土矿物组成,层厚 2.25 m;第 3 层为泥质砂岩,灰白色,砂状结构,泥质成分为粘土矿物,层厚 0.5 m;第 4 层为砂岩,灰白色,砂状结构,其内部见有少量的结晶盐粒,层厚 1 m;第 5 层为含石盐砂岩,灰白色,砂状结构,其内部的结晶盐粒较上一层显著增多,层厚 1 m;第 6 层为盐壳,白色,呈致密状,盐壳其块体表面分布有蜂窝状的溶蚀孔隙,层厚 2 m。本项研究在该剖面中所划分出的 6 层地层中,主要以中—厚层状的泥岩、盐壳、泥质砂岩和含石盐砂岩等类型为主。

分层编号	层厚 /m	地层柱状图	岩性描述	备 注
⑥	2		盐壳, 主要成分为粘土矿物及盐类结晶	在该剖面中共取得 6 个盐渍土试样, 其位置分别位于第①层顶部、第②层顶部、第③层中部、第④层顶部, 以及第⑤层底部和顶部
⑤	1.0		含石盐砂岩, 主要成分为石英	
④	1.0		砂岩, 表面有盐类矿物析出现象	
③	0.5		泥质砂岩, 灰白色, 主要成分为石英	
②	2.25		厚层状泥岩, 浅黄色, 成分为粘土矿物	
①	2.75		主要由坡积物组成, 组成成分为上覆塌落的盐渍土, 并伴有粉砂及泥岩	

图 2 研究区采样点地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of sampling sites in testing area

2.3 试验方法

采用火焰光度计与化学滴定法测定试样中易溶盐 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等的含量,其中 Na^+ 、 K^+ 等两种离子采用火焰光度计测定,其余离子采用化学滴定法测定,根据易溶盐含量判定盐渍土类型及盐渍化程度。采用烘干法测定土体试样的密度、含水量;利用比重瓶法对盐渍土试样进行粒度分析;采用室内直剪试验对扰动试样进行剪切试验,确定研究区盐渍土试样抗剪强度指标及其变化规律。

3 试验过程

3.1 盐渍土易溶盐特征

对试验区所采集的试样所含易溶盐离子均采用火焰光度计与滴定法测定^[19-20]。试验区 6

个样品的易溶盐离子化学测试结果如表 1 所示。由表 1 可知,阳离子主要以 Na^+ 为主,且随着剖面深度的递增 Na^+ 呈逐渐降低的变化趋势,即表现为 Na^+ 的含量在剖面表层位置为 1.32%,在剖面地表以下至地下 450 cm 处为 0.3%,降低了 77%;其次为 Mg^{2+} ,同样表现出随着剖面深度的增加 Mg^{2+} 的含量呈逐渐降低趋势, Mg^{2+} 的含量在剖面表层位置为 0.36%,在剖面表层以下至地下 450 cm 处为 0.04%,降低了 89%。阴离子中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 亦表现出上述变化规律,由地表层至地下 450 cm 处,分别降低了 80% 和 90%。由此可知, SO_4^{2-} 的变化幅度相对最大, Na^+ 含量变化幅度相对较小,以上 4 种主要离子含量的变化幅度由大到小的顺序依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+$ 。在该选取的剖面中, CO_3^{2-} 、 K^+ 等其余易溶盐离子未表现出随深度变化的明显规律性,该剖面盐渍土中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 是影响研究区剖面盐渍土试样总盐度的主要离子。

表1 研究区盐渍土易溶盐含量测试结果

Table 1 Testing results of soluble salt content of saline soil in testing area

取样深度/cm	易溶盐离子含量/%							
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
20	0.069 6	0	2.318 4	2.184 4	0.057 5	1.317 0	0.585 2	0.356 0
70	0.022 8	0.001 2	1.878 9	1.755 0	0.051 5	1.276 5	0.352 7	0.260 7
130	0.022 8	0.007 4	1.758 3	1.994 2	0.040 0	1.225 0	0.424 8	0.222 8
230	0.009 6	0.001 2	1.673 2	1.872 2	0.034 3	1.114 5	0.448 9	0.244 2
310	0.013 2	0	1.474 7	1.755 0	0.046 7	0.925 0	0.521 0	0.182 9
450	0.002 4	0.011 0	0.467 9	0.219 0	0.024 6	0.300 0	0.041 7	0.039 9

注:测试结果为本研究实测获得,2012

按照《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001,2002)对盐渍土类型划分依据及盐渍化程度确定方法相关规定^[21],以及根据Cl⁻与SO₄²⁻的摩尔浓度(*c*)之比确定盐渍土的类型,即*c*(Cl⁻)/2*c*(SO₄²⁻)的值居于2~1之间为亚氯盐渍土,大于2为氯盐渍土。故研究区盐渍土类型的划分结果如表2所示。由该表2可知,

样品的*c*(Cl⁻)/2*c*(SO₄²⁻)值分布在1.14~2.89之间,除位于剖面450 cm处的该值大于2以外,其余值均小于2,因此研究区剖面所在位置均以亚氯盐渍土为主,即在试验区剖面中选取的6个样品中有5个样品为亚氯盐渍土,仅1个位于剖面最下层的样品为氯盐渍土。

表2 研究区盐渍土基本类型划分结果

Table 2 Results of saline soil type in the testing area

取样深度/cm	<i>c</i> (Cl ⁻)/2 <i>c</i> (SO ₄ ²⁻)	易溶盐总量/%	盐渍土类型	盐渍化程度
20	1.438 0	6.891 0	亚氯盐渍土	强
70	1.450 5	5.601 0	亚氯盐渍土	强
130	1.194 6	5.675 0	亚氯盐渍土	强
230	1.210 9	5.412 0	亚氯盐渍土	强
310	1.138 5	4.905 0	亚氯盐渍土	中
450	2.894 7	1.109 0	氯盐渍土	中

由盐渍土试样易溶盐含量测试结果可知,研究区实测剖面中地层的相对最大含盐量层位于剖面表层至地下的20 cm范围之内,地层的含盐量约为6.89%,相对最小含盐量位于剖面中最下层450 cm位置,含盐量约为1.11%,两者差异相对较大。该剖面中地层含盐量在距剖面表层深度为70 cm至310 cm段内变化相对稳定,含盐量的总变化趋势仍然表现出由上层至下层呈逐渐降低,且降低幅度较平缓。含盐量变化显著的两个段分别位于剖面表层以下20 cm至70 cm之间和剖面表层以下310 cm至

450 cm之间,含盐量在这两个段内自上而下依次由6.89%变为5.60%,由4.91%变为1.11%,分别下降了18.7%和77.4%。研究区剖面中含盐量与取样深度之间的变化关系如图2所示。若按盐渍土含盐量来划分,则研究区盐渍土属强盐渍土和中盐渍土,且含盐量随着剖面深度增加呈逐渐降低的变化趋势,故剖面以强亚氯盐渍土为主。

3.2 盐渍土基本性质特征

研究区所采试样pH值测定是在测定易溶

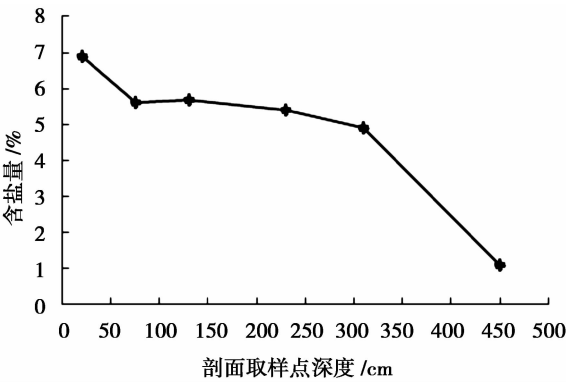


图 2 研究区剖面取样位置与含盐量变化关系
Fig.2 Relationship between sampling location and salt content in testing area

盐时用 pH 试纸对浸提液进行测试得到的,用烘干法获得试样含水率和干密度,用比重计法对试样进行颗粒分析, 试样的命名根据《土工

试验规程》^[19]。试验结果表明,试验区剖面盐渍土试样均呈碱性,其 pH 值最大为 8.45,最小为 8.41。试样含水量由剖面表层向下表现出两个变化趋势,即由剖面表层往下至 130 cm 处,试样含水率逐渐增加,表现出由 20 cm 处的 19.8% 增加到 130 cm 处的 23.3%,达到剖面取样点中含水率的最大值,含水率上升约为 17.7%;剖面表层以下 130 cm 至 450 cm 范围内,盐渍土试样的含水率趋于下降,表现在由 23.3% 下降至 17.4%,下降约为 25.3%,该现象产生的主要原因在于剖面表层向下至130 cm 深度位置附近有地下水渗出现象。由表 3 可知,研究区盐渍土试样的干密度为 1.4 ~ 1.8 g·cm⁻³,变化幅度相对较小。研究区剖面不同取样深度试样基本性质指标的试验结果如表 3 所示。

表 3 研究区剖面不同取样深度试样基本性质指标测定结果

Table 3 Basic property index of saline soil samples taken at different depths in stratigraphic section in testing area								
取样深度/cm	pH 值	干密度/g·cm ⁻³	含水量/%	液限/%	塑限/%	液性指数	塑性指数	试样类型
20	8.44	1.639	19.8	31.7	17.0	0.19	14.7	粉砂
70	8.45	1.696	22.6	32.0	17.9	0.33	14.1	粉砂
130	8.43	1.808	23.3	31.9	17.3	0.01	14.6	粉砂
230	8.42	1.497	22.5	32.7	17.0	0.18	15.7	含粗粒粘土
310	8.45	1.635	19.9	33.0	18.2	0.29	14.8	含细粒土砂
450	8.41	1.416	17.4	32.9	17.8	0.36	15.1	粉砂

因剖面在 130 cm 附近有地下水渗出,这不仅对该层附近及以下一段距离内土层的含水量造成了较大的影响,同时地下水的渗出对盐渍土颗粒也造成了较大的影响。根据《土工试验规程》相关规定,土壤粒径在 0.25 ~ 0.075 mm 内为细砂,土壤粒径在 0.075 ~ 0.005 mm 内为粉粒,土壤粒径小于 0.005 mm 为粘粒。由表 3、表 4 所示,研究区盐渍土粒度的变化规律表现为,细砂主要分布在剖面表层以下 310 cm 处,占 85.3%,该深度试样粘粒含量在整个剖面取样深度内最低,占 1.5%;粉砂主要集中在剖面表层以下 230 cm 处,占 57.9%,该试样中一半以上由粉砂构成;粘土则主要分布在剖面表层以下 230 cm 处,占 14.1%。由以上不同取样深度试样组成粒径的大小变化规律可知,该剖面中盐渍土细砂级粒度在剖面中取样深度

为 20 ~ 450 cm 范围内,其含量分布相对较为均匀,粉粒和粘粒则主要集中分布在剖面中取样深度为 20 ~ 230 cm 范围内。

3.3 盐渍土试样室内直剪试验

试验区盐渍土的抗剪强度指标的获取采用室内扰动试样直剪试验的方法^[22-24],所用仪器为南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪,剪切量为 4 mm,剪切速度为 2.4 mm/min,施加荷载大小依次为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa。盐渍土试样含盐量和含水量均为自然状态,其中试样含盐量依次为 6.891%、5.60%、5.68%、5.41%、4.91%、1.11%,含水量依次为 19.8%、22.6%、23.3%、22.5%、19.9%、17.4%。每个试样共制作 4 组待测试样,共制成 24 组盐渍土试样。

表4 研究区盐渍土粒度大小分析结果
Table 4 Analysis of saline soil grain size in testing area

取样深度/cm	不同粒级及其含量/%		
	0.25~0.075mm	0.075~0.005mm	<0.005mm
20	70.7	25.7	3.6
70	77.0	21.3	1.7
130	68.0	26.3	5.7
230	28.0	57.9	14.1
310	85.5	13.0	1.5
450	79.6	17.3	3.1

剪切试样利用三瓣模分层击实制备,根据每个试样的实测密度称取一定质量的土样,保持每层加入的土样等量,击实完一层之后用刮刀将土柱表层刮毛,接着加入下一层所需土量,继续击实,土柱制备完成以后去掉三瓣模,将环刀套在土柱上,用削土刀切取略高于环刀厚度的土柱,环刀两端用削土刀修平整待用。以此方式

在土柱上取得4个直剪土样即为一组,然后分别在50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 4级荷载下进行直剪试验。在研究区剖面中分别在剖面表层以下20 cm、70 cm、130 cm、230 cm、310 cm、450 cm等6处取样点位置处,由直剪试验所得到的抗剪强度与垂直压力的关系、剪应力与剪切位移关系分别如图3、图4所示。

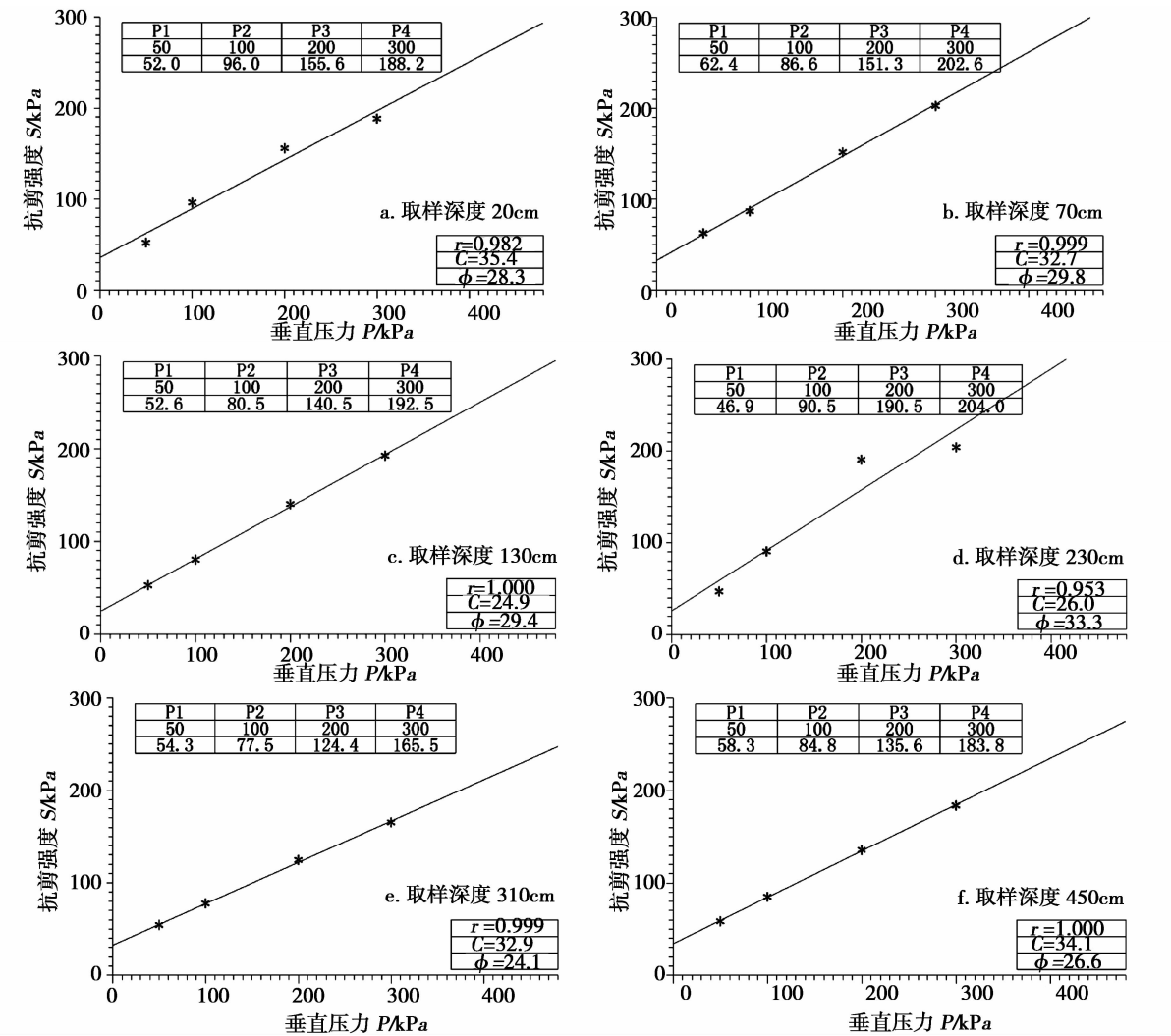


图3 研究区取样点试样抗剪强度与垂直压力关系

Fig.3 Relationship between shear strength and vertical pressure of soil samples in testing area

图 3 为研究区各取样点试样抗剪强度与垂直压力的关系,由图 3 可知,盐渍土试样抗剪强度与垂直压力均呈线性关系,即随着垂直压力的递增,盐渍土试样的抗剪强度呈逐渐增强趋

势,符合摩尔—库伦强度准则,即 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$,其中 τ 为土体的抗剪强度(kPa), c 为土体粘聚力(kPa), σ 为土的剪切面上的垂直压力(kPa), φ 为土体内摩擦角($^{\circ}$)。

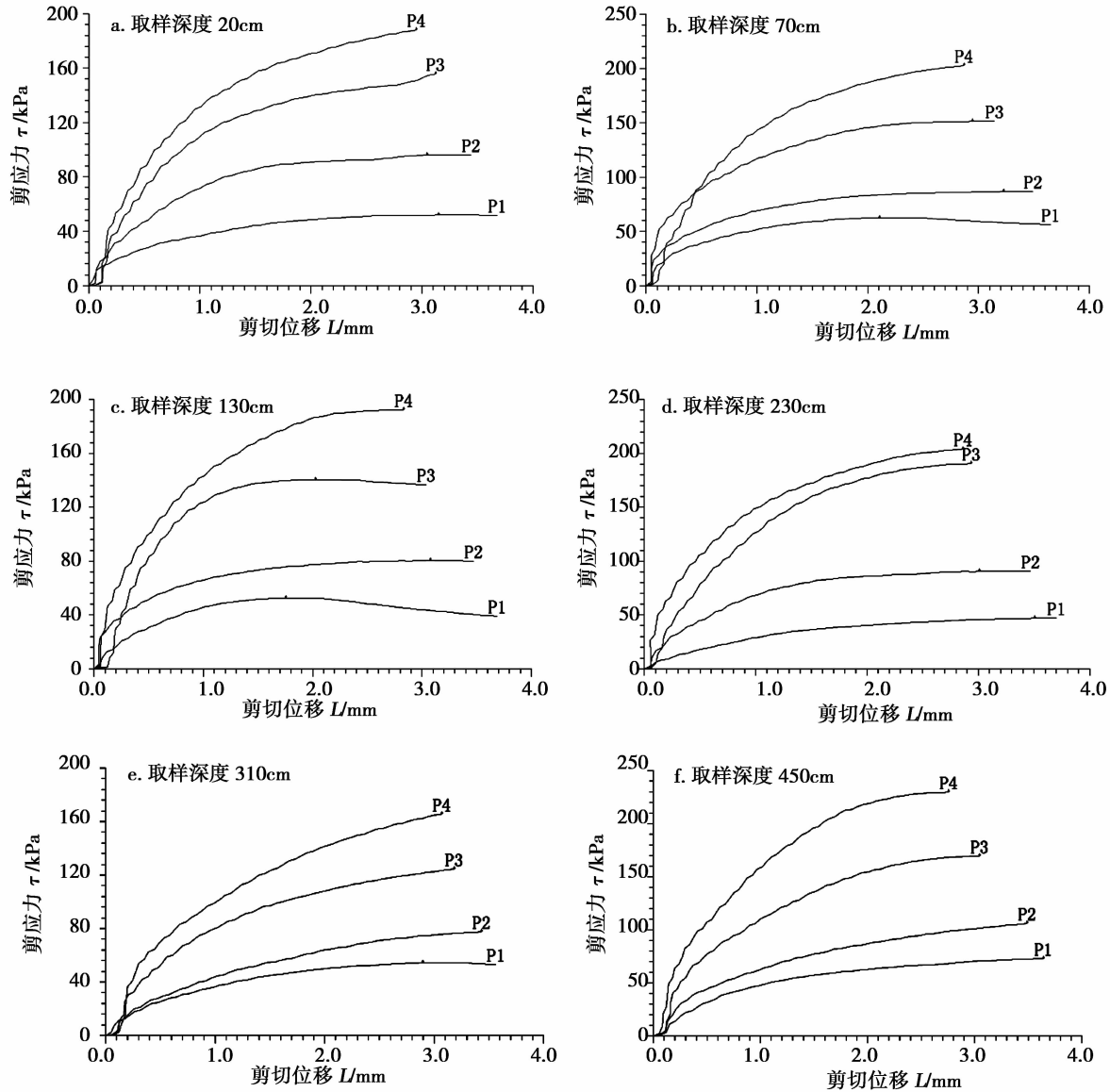


图 4 研究区取样点试样剪应力与剪切位移的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and shear displacement of soil samples in testing area

图 4 为研究区各取样点试样剪应力与剪切位移的关系,图中曲线 P1、P2、P3、P4 分别代表试样在垂直压力 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 作用下的剪应力与剪切位移之间的关系。由图 4 可知,剪应力与剪切位移的关系表现为由线性转化成非线性,即在初始阶段为线性关系,随着剪切过程的进行当剪切位移超出

0.2~0.3 mm 时,则由线性转化为非线性。以上规律反映出在相同剪应力作用下,与初始阶段相比非线性阶段相对形成显著的剪切位移。例如当 $\tau = 40$ kPa 时,图 4 中 6 处采样位置的 6 组试样在 P4 垂直压力下线性变形阶段所产生的最大剪切位移分别为 0.16 mm、0.20 mm、0.10 mm、0.10 mm、0.21 mm、0.12 mm;而在相

同垂直压力下,当 $\tau = 80$ kPa时,所对应的非线性变形阶段所产生的最大剪切位移则分别为0.42 mm、0.42 mm、0.33 mm、0.30 mm、0.60 mm、0.41 mm,即在增加相同的剪应力40 kPa时,非线性变形阶段所产生的位移分别为0.26 mm、0.22 mm、0.23 mm、0.20 mm、0.39 mm、0.29 mm,这些剪切位移值的存在反映出了与初始阶段的线性变形阶段相比,非线性变形阶段剪切位移相对更为显著。此外,在相同的荷载作用下,在图4中所示的4组垂直压力中的任意一组,即在P3垂直压力下,当剪应力达到100 kPa时,6组试样的剪切位移依次为0.82 mm、0.70 mm、0.68 mm、0.70 mm、1.60 mm、1.30 mm,表现出随深度的增加剪切位移略呈逐渐增大的现象。

4 试验结果与分析

已有研究表明盐渍土抗剪强度与含盐量、含水量、水盐比及粒度等因素存在内在关系。可以首先将试验所得抗剪强度指标与含盐量、含水量、水盐比及粒度等因素进行相关性分析,依次得到粘聚力与含盐量、粘聚力与含水量,内摩擦角与含水量、内摩擦角与土粒粒径等关系的相关性系数,在此基础上进一步分析得出变量之间的相关性。本项研究采用用于分析判断两变量之间相关性问题的Pearson相关系数计算两变量间的相关性,并以此来描述两个变量之间相关程度^[25],其计算公式如下,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}。$$

式中, r 为相关系数; X_i 、 Y_i 分别是变量 X 、 Y 的

第 i 个观测值; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别是变量 X 、 Y 的均值。

利用统计分析软件SPSS13.0,将本项研究中试样的粘聚力、内摩擦角、含盐量、含水量、水盐比及粒度等变量直接输入软件开始程序主页面的数据编辑器窗口(SPSS Data Editor),根据变量的输入顺序将默认的变量1(VAR00001)、变量2(VAR00002)、变量3(VAR00003)等变量名称分别设定为对应的粘聚力、内摩擦角、含盐量等变量名称,然后再依次选择分析(Selective analysis)、相关性分析(Correlation analysis)、二变量相关性(Bivariate Correlations),将相关性系数(Correlation Coefficients)选择为Pearson,通过完成上述诸步骤,然后点击完成键(OK)即可输出本项研究拟得到的相应相关性系数 r 值。表5为输出的盐渍土抗剪强度指标及盐渍土基本性质指标的Pearson相关性系数,表中诸如粘聚力与含水量、粘聚力与含盐量,内摩擦角与含盐量、内摩擦角与细粒含量等两变量间相关性大小均可用相关系数来描述,即相关系数绝对值愈接近于1,表明相关性愈好;相关系数大于0,表明两变量之间为正相关,相关系数小于0,表明两变量之间为负相关。由表中相关系数的值可得出如下规律,剖面采样点深度与含盐量具有显著相关性,且呈负相关,而含水量随深度的变化不明显,相关系数分别为-0.901和-0.617;粘聚力 c 值与含水量存在较好相关性,且呈负相关,相关系数为-0.746;粘聚力 c 值与含盐量之间亦存在一定程度的相关性,其相关系数为0.379;内摩擦角 φ 与试验粒度间存在显著的正相关性,即随着土体细颗粒组分的增加,内摩擦角有增大的趋势,相关系数为0.871。研究区盐渍土抗剪强度指标与组分间的相关性分析结果如表5所示。

表5 研究区盐渍土抗剪强度指标与组分间相关性分析结果

Table 5 Result of correlation coefficient between shear strength parameters and components of saline soil in study area

指 标	深 度	c	φ	含水量	含盐量	盐水比值	细粒含量
深 度	1.000	0.072	-0.403	-0.617	-0.901	-0.865	-0.122
c		1.000	-0.616	-0.746	0.379	-0.034	-0.650
φ			1.000	0.661	0.351	0.212	0.871
含水量				1.000	0.665	0.494	0.470
含盐量					1.000	0.978	0.257
盐水比值						1.000	0.167
细粒含量							1.000

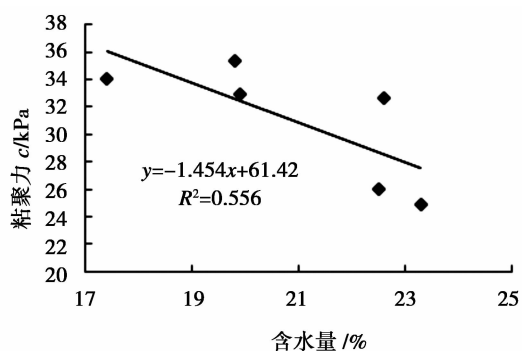


图 5 研究区试样粘聚力与含水量之间的关系

Fig. 5 Relationship between cohesion force and moisture content of saline soil in testing area

4.1 粘聚力与含水量的关系

由研究区盐渍土试样直剪试验结果分析可知,试样粘聚力与含水量之间具有一定的相关性。若以含水量为自变量,粘聚力 c 值为因变量,则可在平面坐标系内作出粘聚力随含水量变化的散点图,并进行拟合得到图 5 所示结果。由图 5 可知,研究区试样粘聚力与含水量之间呈线性关系,即粘聚力随含水量变化的总体趋势是粘聚力随着盐渍土含水量增加而呈降低趋势。

在含水量相对较小的情况下,含水量大小的变化对粘聚力的影响较为明显。土体中的水一般可分为结合水和孔隙水两类,土粒表面的结合水对细粒土的粘聚力形成起到积极作用,通常细粒土的粘聚力是由土粒周围水化膜在土粒之间形成的水胶产生的,且含水量在此过程中有着重要作用^[26]。相应地,盐渍土的粘聚力除了受试样含水量影响外,可溶盐离子浓度也会影响到粘聚力。一般来说,粘粒表面带有负电荷,愈靠近粘粒表面,吸附的阳离子愈多,为使离子浓度达到平衡,介质中的水分子有向粘粒表面扩散的趋势,使得水分子与土粒紧密联结起来^[27]。此外,粘聚力受可溶盐和含水量两者的共同作用,两者间的相互作用一定程度影响着粘聚力的大小,即表现出当含水量过高时,土颗粒之间相对分散,使得粘聚力降低。

4.2 土样粒度与内摩擦角的关系

一般认为粗粒土的抗剪强度主要由土粒之间的表面摩擦阻力和土粒间咬合力形成,故土的内摩擦系数取决于土粒的表面粗糙程度和土粒的排列咬合情况。试验中所采用的含粘粒粉砂盐渍土其主要固相组分为细砂、粘粒和氯盐晶粒,后两者具有填充作用,即填充了细砂之间的孔隙致使试样密实度增强,从而有助于提高试样的内摩擦角。图 6、图 7 所反映的是粗粒含量和粘粒含量与内摩擦角之间的关系,说明在含粘粒粉砂盐渍土中,粘粒含量的增加能在一定程度上增加试样的内摩擦角;此外,试样内摩擦角与粗粒含量、内摩擦角与粘粒含量之间均呈线性关系。

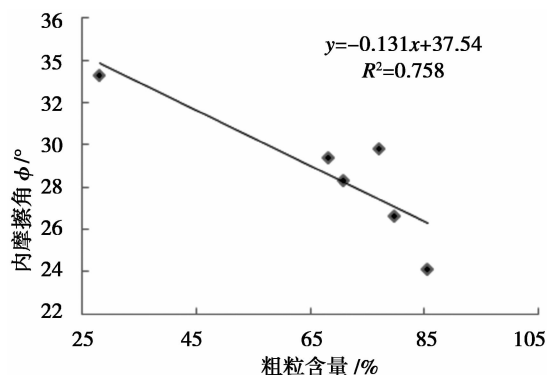


图 6 研究区试样内摩擦角与粗粒含量之间关系

Fig. 6 Relationship between internal friction angle and coarse grain content in testing area

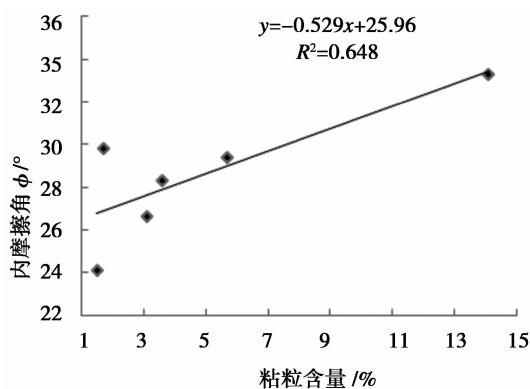


图 7 研究区试样内摩擦角与粘粒含量之间关系

Fig. 7 Relationship between internal friction angle and clay content in testing area

4.3 试样含盐量与抗剪强度指标的关系

在本项研究中,由前述的抗剪强度指标与含盐量、含水量、水盐比等的相关性分析结果表明,试样中的含盐量及其大小对粘聚力和内摩擦角具有一定的影响和相关性。研究区试样中的易溶盐含量与粘聚力 c 值、内摩擦角 φ 值等抗剪强度指标间的关系由图8、图9所示。

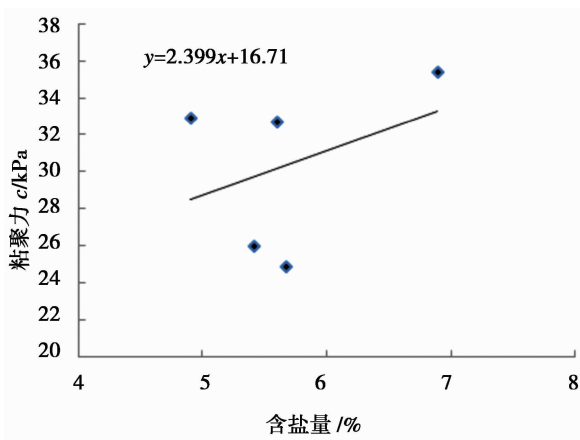


图8 研究区试样粘聚力与含盐量关系

Fig. 8 Relationship between cohesion and salt content in testing area

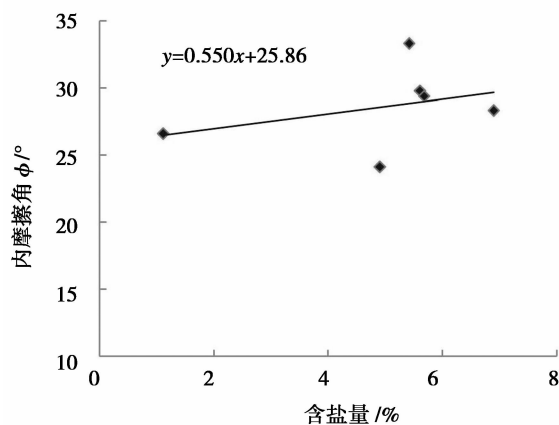


图9 研究区试样内摩擦角与含盐量关系

Fig. 9 Relationship between internal friction angle and salt content in testing area

由图8可知,随着试样中含盐量的增加,盐渍土试样的粘聚力 c 值呈逐渐上升的趋势,且上升幅度较内摩擦角随试样含盐量上升的幅度略大,即表现在图8、图9拟合直线斜率上,试样粘聚力 c 值随试样含盐量变化的斜率为2.399,而内摩擦角随试样含盐量变化的斜率为

0.55。试验结果表明,研究区盐渍土试样的含盐量与其抗剪强度指标间存在显著相关性,即试样的粘聚力、内摩擦角与含盐量之间呈线性关系。由图8、图9拟合方程可知,当含盐量为5%时,粘聚力 c 值为28.71 kPa,内摩擦角为28.61°;含盐量为6%时,粘聚力 c 值为31.10 kPa,内摩擦角为29.16°;含盐量为7%时,粘聚力 c 值为33.50 kPa,内摩擦角为29.71°;由此可知,当试样含盐量增加1%时,则其粘聚力将增加2.4 kPa,相应地内摩擦角亦增加0.55°。

在该研究中,试样中的含盐量对内摩擦角的作用表现为,随着含盐量的增加,盐渍土的内摩擦角有逐渐增大的趋势,即含盐量为1.11%~6.89%时,内摩擦角为24.1°~33.3°。由以上分析可知,试样粘聚力随着含盐量的变化规律总体上比内摩擦角随着含盐量的变化规律略为显著,而有关含盐量和含水量的耦合作用对盐渍土抗剪强度指标影响机理有待进一步研究。

5 结 论

1) 研究区分布的盐渍土以亚氯盐渍土为主,含盐量随着剖面深度的递增呈逐渐降低趋势,即在剖面表层以下450 cm处与剖面表层以下20 cm处相比,含盐量降低约84%。试样易溶盐分析表明, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等离子是影响研究区剖面中盐渍土总盐度的4种主要易溶盐离子;试样中的含盐量随该剖面深度的降低与该地区相对较高的蒸发量密切相关,湖盆内地下水水位较高引起易溶盐向地表运移,产生盐渍土中易溶盐的表聚现象;由研究区盐渍土粒度大小分析结果可知,细砂级粒度在整个剖面中分布相对较均匀,粉粒和粘粒则主要集中分布在剖面表层以下至230 cm位置。

2) 粘聚力 c 值与盐渍土试样含水量间呈显著的线性关系,且随着试样含水量的上升,粘聚力 c 值呈逐渐下降趋势,即当试样含水量由19.8%上升至23.3%时,粘聚力 c 值由35.4 kPa下降至24.9 kPa,下降幅度为29.7%;当试样含水量由23.3%下降至17.4%时,粘聚

力 c 值由 24.9 kPa 上升至 34.1 kPa, 上升幅度为 36.9%。

3) 内摩擦角与试样粘粒含量呈线性关系, 随着试样中粘粒含量的增多, 内摩擦角呈逐渐增大的趋势, 表现在试样受盐分和粘粒填充, 使试样密实度得到一定程度的增大, 致使内摩擦角受到一定程度的影响。

4) 在本项研究中, 随着试样中含盐量的增大, 盐渍土的粘聚力 c 值呈逐渐增大的趋势, 内摩擦角亦存在相对缓慢增大的趋势, 由试样含盐量对粘聚力和内摩擦角的影响试验结果可知, 粘聚力 c 值较内摩擦角随含盐量的变化规律相对更为显著; 含盐量和含水量两者的耦合作用对盐渍土抗剪强度指标的影响机理有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 王生力, 裴平一, 冯朝军. 盐渍土资源综合利用的可持续发展观[J]. 北京地质, 2001, 13(3): 21-24.
- [2] 张洪萍. 盐渍土的工程性质及防治[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1-8.
- [3] 唐于银, 乔海龙. 我国盐渍土资源及其综合利用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(08): 19-21.
- [4] 刘威, 张远芳, 慈军, 等. 不同含盐类别和干密度盐渍土的三轴试验变化特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 11-15.
- [5] 温利强, 杨成斌, 李士奎. 中国西北地区盐渍土分布及危害[J]. 工程与建设, 2010, 24(5): 585-587.
- [6] 张士功, 邱建军, 张华. 我国盐渍土资源及其综合治理[J]. 中国农业资源与区划, 2000, 21(1): 52-56.
- [7] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 31(4): 116-120.
- [8] 安燕. 国道 215 线青山一大柴旦盐渍土分布发育特征[J]. 西部探矿工程, 2008, (5): 117-118.
- [9] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 1-5.
- [10] Dexter A R, Chant K Y. Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations [J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(2): 219-226.
- [11] Khatory A, Lequeux F, Kern F, et al. Linear and nonlinear viscoelasticity of semidilute solutions of wormlike micelles at high salt content [J]. Langmuir, 1993, 9(6): 1456-1464.
- [12] 顾成权, 孙艳. 土体内聚力随含水量、粘粒含量及干密度变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 34-36.
- [13] 陈炜韬, 李姝, 王鹰. 含盐量、含盐类别对盐渍土抗剪强度的影响[J]. 铁道建筑技术, 2005, (6): 54-56.
- [14] 郭菊彬, 宋吉荣, 张昆. 盐渍土强度参数与含盐量、含水量关系初探[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(5): 98-99.
- [15] 高世扬, 王建中, 柳大纲. 大柴旦盐湖的物理化学条件[J]. 盐湖研究, 1995, 3(3): 16-22.
- [16] 楼谦谦, 肖安成, 杨浩, 等. 柴达木盆地北缘中生代盆地性质研究—对大柴旦凹陷的解剖[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3): 407-416.
- [17] 时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地 40 多年来的气候变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 123-128.
- [18] 孙世洲, 孔令韶. 青海省大柴旦盆地植被[J]. 西北植物学报, 1992, 12(1): 59-69.
- [19] 南京水利科学研究所. 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 22-209.
- [20] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 181-192.
- [21] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 82-84.
- [22] Jewell R A, Wroth C P. Direct shear tests on reinforced sand [J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 53-68.
- [23] Bjerrum L, Landva A. Direct simple-shear tests on a norwegian quick clay [J]. Geotechnique, 1966, 16(1): 1-20.
- [24] Gan J K M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 500-510.
- [25] 汪冬华. 多元统计分析与 SPSS 应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2010: 81-85.
- [26] 顾成权, 孙艳. 土体内聚力随含水量、粘粒含量及干密度变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 34-36.
- [27] 梁健伟, 房蓉光, 陈松. 含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3821-3829.

The Experimental Research on Basic Types and Shear Strength of Saline Soil Taken from A Stratigraphic Section of Brine Mining Area in Da Qaidam Lake, Qaidam Basin

HU Xiao-tian^{1,2}, HU Xia-song^{1,3}, LI Guang-ying^{1,2}, LI Yue-zhou^{1,2}, FU Jiang-tao^{1,2}, YU Dong-mei¹
(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Qinghai University, Xining, 810016, China)

Abstract: The testing site of this study is located in the brine mining area of Da Qaidam. The basic types of saline soil taken from a stratigraphic section were analyzed via soluble salts content, and the ions such as Na^+ , Mg^{2+} , and Cl^- were measured. The result shows chlorous saline soil is the main type of the saline soil in this testing site. In order to obtain shear strength parameters of the saline soil samples, cohesion force (c) and internal friction angle (φ), the disturbed saline soil samples were tested by direct shear test. The test results show that the salt content of the samples in the testing site declines gradually from the ground surface to lower parts of the stratigraphic section, that is to say, the salt content is 6.89% at the ground surface, 1.11% at the depth of 4.5 m beneath the ground surface. The cohesion force of the saline soil is mainly affected by soil moisture content. With soil moisture content increasing, the cohesion force of the saline soil declines. When the soil moisture content increases from 19.8% to 23.3%, the cohesion force declines from 35.4 kPa to 24.9 kPa, and the decrement ratio is 29.7%. The cohesion force increases from 24.9 kPa to 34.1 kPa, and the increment ratio is 36.9% as the moisture content declines from 23.3% to 17.4%. The internal friction angle can be significantly affected by grain size as well, with the clay particle content increasing and the coarse granule declining relatively, the internal friction angle increases gradually from 24.1% to 33.3%, and the increment ratio is 37.3%. With the salt content in the samples increasing, the cohesion force and the internal friction angle of the soil increase linearly. The achievements are conducive to make a further investigation into the influence of moisture content, particle size and salt content on the shear strength of saline soil samples, which is of instructive significance in the construction of salt field and the relating facilities in the area.

Key words: Da Qaidam; Saline soil; Shear strength; Moisture content; Salt content; Grain size

《盐湖研究》2015 年征订启事

《盐湖研究》是原国家科委批准的学术类自然科学期刊,由中国科学院青海盐湖研究所主办,科学出版社出版,1992 年创刊并在国内外公开发行。

《盐湖研究》是国内唯一的研究盐湖科学和技术的专业性期刊。面向国内外报导交流盐湖、地下卤水、油田水等基础、应用、开发和技术及管理的研究报告、论文和成果,探讨其资源的分离提取技术与综合利用途径。

《盐湖研究》为季刊, A4 开本, 72 页, 每季末月 5 日出版发行。单价: 15.00 元/本, 全年订价: 60.00 元。中国标准刊号: ISSN1008-858X; CN63-1026/P。邮发代号: 56-20。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与《盐湖研究》编辑部联系, 联系电话: 0971-6301683