

盐渍土强度特性及其影响因素研究

刘卫卫 严耿升

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/pe.v3i6.18022

[摘要] 若羌盐渍土主要为洪积倾斜平原,表面形成一层灰褐色硬结土,下面为结晶硫酸盐盐渍土,呈蜂窝状。盐渍土工程性质比冻土、膨胀土等更加特殊和复杂。这给盐渍土地工程地质勘察和工程设计带来了新的难题,也给病害工程治理带来了新的挑战。针对工程建设中遇到的盐渍土的强度问题展开研究,为盐渍土地基基础设计和处理提供依据。

[关键词] 盐渍土; 强度; 地基基础

中图分类号: TU448 **文献标识码:** A

Study on the strength of saline soil in the 1 million kilowatt photovoltaic project of Tarim Oilfield

Weiwei Liu Gengsheng Yan

China Power Engineering Group Northwest Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] The saline soil in Ruoqiang is mainly located in an alluvial sloping plain, with a layer of grayish-brown hardened soil on the surface, beneath which lies crystalline sulfate saline soil in a honeycomb pattern. The engineering properties of saline soil are more unique and complex than those of frozen soil and expansive soil. This presents new challenges for engineering geological investigation and design of saline soil sites, as well as new difficulties in the treatment of engineering defects. This study focuses on the strength issues of saline soil encountered in engineering construction, providing a basis for the design and treatment of saline soil foundations.

[Key words] saline soil; strength; foundation

前言

国内对各类盐渍土的力学特性研究不多,并且都集中在考虑含盐量、含盐类别、含水量以及温度等因素的影响,而对粒径级配、干密度对盐渍土抗剪特性的影响研究较少。

为研究盐渍土粒径级配、干密度与抗剪特性的关系,本文采用直接快剪试验,研究盐渍土在不同粒径级配、不同干密度组合下土样的应力-应变特性及抗剪强度参数。

1 制样与研究方法

为了进一步了解盐渍土的强度特征,探究含盐量、干密度、粒径组成等对土体强度的影响,并从机理上解释和预测粗粒盐渍土的强度特征,本次研究在工程区取样进行土体强度的室内试验。

由于工程区的盐渍土属于粗粒土,含有大量碎石或砾砂,弱胶结,因此无法取原状样进行测试,只能现场取样后在室内重塑土样,然后进行土体强度测试。盐渍土的强度试验按照颗粒组成将土体分为3种不同粒度组分的土样,即粗粒土(土样过5mm筛分筛,保留粒径<5mm的所有组分,简称5mm土样)、中粒土(土样过2mm筛分筛,保留粒径<2mm的所有组分,简称2mm土样)和细粒土(土样过0.5mm筛分筛,保留粒径<0.5mm的所有组分,简称0.5mm土样)。三种土的基本物理性质指标和颗粒组成分别如表1和表2

所示。通过击实试验确定土样的最大干密度和最优含水量等参数,在最优含水量条件下通过静力压实法制取不同干密度试样,最后进行强度测试。制取土样的含水率和干密度如表3所示。

直剪试验是在维持垂直压力不变的条件下,不断对试样施加水平剪应力,直至试样达到破坏。本次直剪试验采用电子计数,以4圈/分钟的速率进行剪切,分别测试三种粒径级配土样各自三种密度共9种试样分别在100kPa、200kPa、300kPa、400kPa四级压力下剪位移与剪应力的关系,同时测试不同时刻试样的剪胀量。

表1 土样基本物理性质指标

土样	比重	最大干密度 (g/cm ³)	最优 含水量	天然 含水量	塑限	液限
<5mm	2.57	2.04	8.7%	1.22%	-	-
<2mm	2.53	2.00	10.5%	1.39%	-	-
<0.5mm	2.59	1.93	12.8%	1.74%	27.6	16.4

2 研究结果与分析

按照土样抗剪强度整理结果,可得到土样抗剪强度与垂直压力关系曲线、剪应力与剪切位移关系曲线等试验成果。图1、图2、图3所示分别为<5mm土样、<2mm土样和<0.5mm土样在不同干密度状态下抗剪强度与垂直压力的关系曲线。

表2 土样颗粒组成情况

<5mm 土样		<2mm 土样		<0.5mm 土样	
粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
<5	100	<5	-	<5	-
<2	74.31	<2	100	<2	-
<1	63.14	<1	89.46	<1	-
<0.5	39.54	<0.5	55.63	<0.5	100
<0.25	19.68	<0.25	28.32	<0.25	52.59
<0.075	5.35	<0.075	8.28	<0.075	13.1

表3 土样样品制取参数

试样	<5mm 土样			<2mm 土样			<0.5mm 土样		
含水量(%)	8.7			10.5			12.8		
干密度(g/cm³)	1.94	2.04	2.14	1.90	2.00	2.10	1.83	1.93	2.03

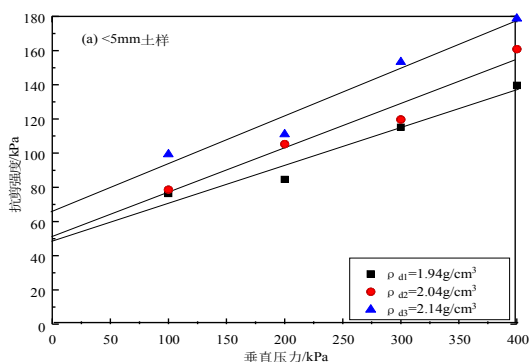


图1 粗粒土样(<5mm)抗剪强度与垂直压力关系曲线

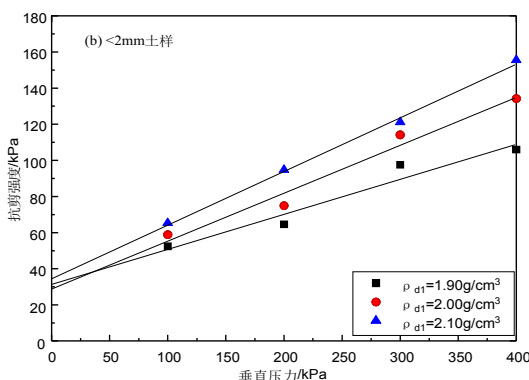


图2 中粒土样(<2mm)抗剪强度与垂直压力关系曲线

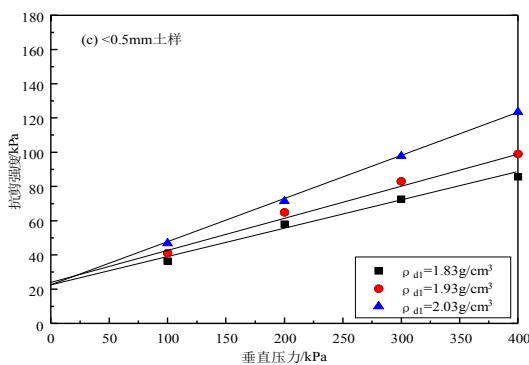


图3 细粒土样(<0.5mm)抗剪强度与垂直压力关系曲线

采用最小二乘法对土体抗剪强度与垂直压力关系进行线性

回归, 回归方程见表4, 从回归方程中得出不同土样在不同干密度状态下对应的内摩擦角和粘聚力。结合土体抗剪强度与垂直压力关系曲线, 可以看出, 同一粒径的土样初始含水量相同时, 随着干密度增加, 压实盐渍土的内摩擦角都相应增大, 粘聚力也有一定程度增加, 土体抗剪强度整体呈增加趋势。

表4 土样抗剪强度与垂直压力线性回归方程

土样	干密度 (g/cm³)	拟合函数	相关系数 R²
<5mm	1.94	$\tau_0=48.9+\sigma_{tan}12.4$	0.93764
	2.04	$\tau_0=50.9+\sigma_{tan}14.6$	0.94514
	2.14	$\tau_0=65.5+\sigma_{tan}15.7$	0.94164
<2mm	1.90	$\tau_0=31.8+\sigma_{tan}11.0$	0.91943
	2.00	$\tau_0=29.2+\sigma_{tan}14.9$	0.96156
	2.10	$\tau_0=35.0+\sigma_{tan}16.5$	0.99598
<0.5mm	1.83	$\tau_0=22.6+\sigma_{tan}9.2$	0.97787
	1.93	$\tau_0=24.1+\sigma_{tan}10.9$	0.98699
	2.03	$\tau_0=20.8+\sigma_{tan}14.4$	0.99979

2.1 粒径对压实盐渍土抗剪强度的影响

图4至图7分别为三种土样中间干密度试样在不同垂直压力条件下的应力-应变曲线。得出结论, 各级垂直压力下三种土样的初始应力-应变曲线均接近直线变形, 剪应力与剪位移成正比, 试样处于弹性变形阶段。达到屈服应力后, 试样除弹性变形外, 开始出现不可恢复的塑性变形, 曲线上各点斜率逐渐减小, 剪应力与剪位移呈非线性关系。

从图中也可以看出, 在各垂直压力级下, 压实盐渍土的峰值强度随粒径增大而增大, 剪应力-应变曲线由应变硬化型向应变软化型过渡。粒径<0.5mm的土样在4级垂直压力下均表现为应变硬化型, 试样为塑性破坏; 粒径<5mm的土样在4级垂直压力下均表现为应变软化型, 试样为脆性破坏; 粒径<2mm的土样则随垂直压力的增加由应变硬化型向应变软化型过渡。最大粒径对压实盐渍土的峰值强度起到控制作用。由图4和图5可知, 在100kPa、200kPa压力条件下, 三种土样的残余强度都趋于稳定值, 且残余强度几近相等。相反, 在300kPa、400kPa压力条件下, 不同土样的残余强度出现差别, 但相差不到40kPa(如图6、图7所示)。由此看出, 在低压力条件下, 粒径对压实盐渍土残余强度的影响较小, 随着压力增大, 粒径对压实盐渍土残余强度的影响逐渐增大, 但总体影响程度不大。

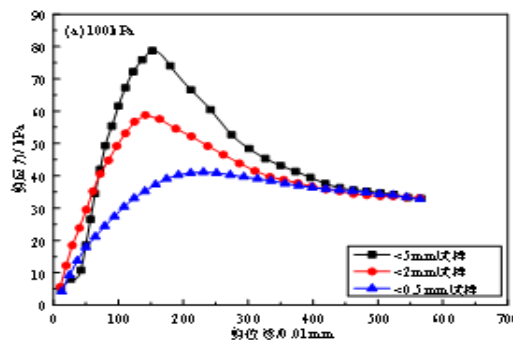


图4 土样在100kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

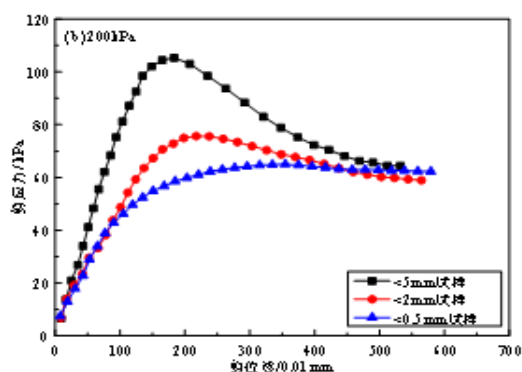


图5 土样在200kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

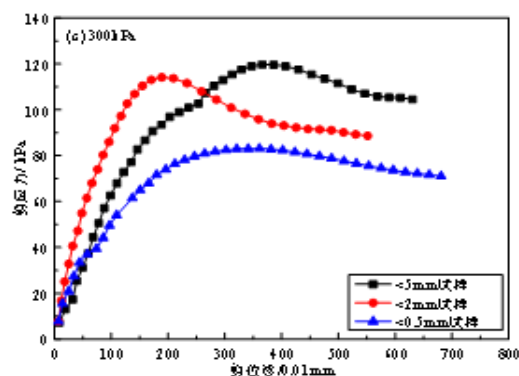


图6 土样在300kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

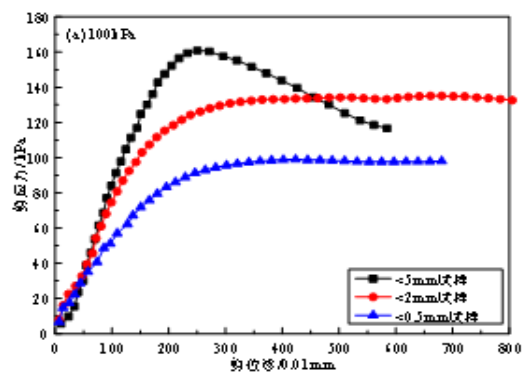


图7 土样在400kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

错排列的咬合情况^[2]。盐渍土颗粒的连接包括结合水连接、毛细连接以及盐分颗粒的胶结连接^[1]。粒径<math>< 0.5\text{mm}</math>的压实土样粒度单一,土样颗粒为紧密排列的单粒结构,剪切过程中土粒间相对滑动的阻力、土粒相互嵌接的咬合力均较小,且盐分浓度较高的孔隙液使土颗粒表面的结合水连接、毛细水连接力较弱,因此粒径<math>< 0.5\text{mm}</math>的土样粘聚力与内摩擦角均较小。级配较好的<math>< 2\text{mm}</math>与<math>< 5\text{mm}</math>土样,细颗粒与盐分晶体均匀填充在大孔隙中,起到接触连接的作用。在一定范围内,土样中粗粒含量越多,则土体级配越好、土样表面越粗糙,土粒接触点增多,接触面扩大,粘聚力和内摩擦角均得到提高。

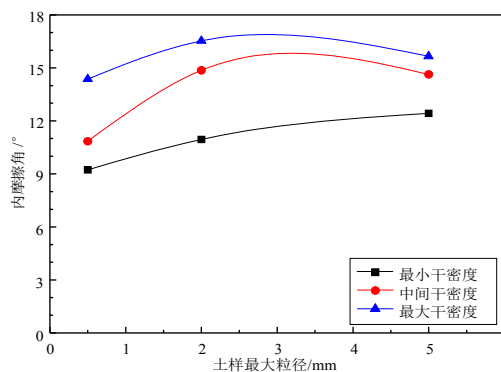


图8 土体内摩擦角与颗粒组成的关系



图9 土体粘聚力与颗粒组成的关系

图8和图9为压实盐渍土抗剪强度参数与粒径的关系。由图8可知,干密度较小时,压实盐渍土的内摩擦角随粒径增大而增大;土样达到最密实状态即最大干密度状态时,初始条件下土样内摩擦角随粒径呈增大趋势,当粒径增大到一定程度后则不再增大,也即土体的内摩擦角逐渐趋于稳定。由图9可知,在同一密度梯度下,土体粘聚力随粒径增大而增大,在一定范围内,土体粘聚力与压实盐渍土的最大粒径呈线性增大关系。

土的抗剪力由内摩擦力和粘聚力两部分组成,粘聚力是阻止土粒移动的主要阻力,它反映土体的连接力大小。土粒移动后,内摩擦力起阻力作用,土的内摩擦力主要取决于土粒表面的粗糙程度和交

2.2 干密度对压实盐渍土抗剪强度的影响

图10至图13分别为<math>< 2\text{mm}</math>土样不同干密度试样在100kPa、200kPa、300kPa和400kPa四级垂直压力下的应力-应变曲线。从图中可以看出,在低压力条件下,土样表现为常规的弹性-塑性破坏模式,弹性阶段剪应力随剪位移增大不断增大,达到顶峰后剪应力随剪位移增大迅速降低,具有明显的峰值强度,土样呈应变软化型。随着垂直压力和土样密度不断增大,土样由应变软化型向应变硬化型不断过渡。随着剪位移增大,剪应力不再出现突然快速降低的现象,试样发生塑性变形后持续发展,直至试样被剪坏,土样不具有明显的峰值强度,应力-应变曲线呈应变硬化型,试样为塑性破坏。试样剪切破坏模式由应变软化型向应变硬化型转化的过程中,随着垂直压力不断增大,压实盐渍土的抗剪强度逐渐增大。同一压力条件下,低密度试样呈现应变硬化型破

坏, 高密度试样呈现应变软化型破坏。至400kPa压力条件时, 最大干密度的试样也呈现为应变硬化型破坏。在100kPa压力条件下, 三种密度试样均具有明显的峰值强度, 试样呈应变软化型破坏, 至400kPa压力条件时, 三种密度试样均不具有明显的峰值强度, 试样已全部转变为应变硬化型破坏。由以上分析可知, 随着垂直压力和干密度不断增大, <2mm压实试样的峰值强度不断得到提高, 且试样的破坏模式由应变软化型向应变硬化型转变。同时, 对比不同干密度试样在不同压力条件下的残余强度, 可以看出干密度的增大对试样的残余强度影响不大。

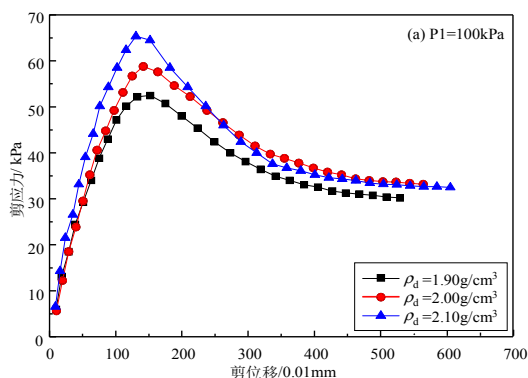


图10 不同干密度试样在100kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

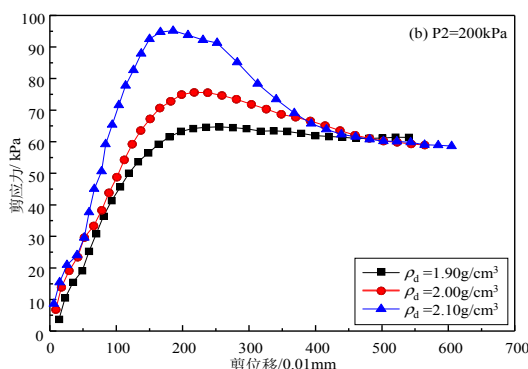


图11 不同干密度试样在200kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

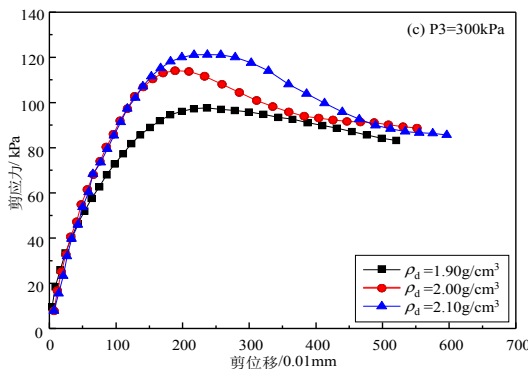


图12 不同干密度试样在300kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

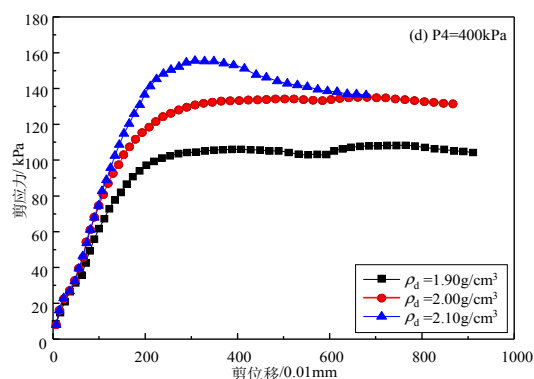


图13 不同干密度试样在400kPa压力条件下剪应力与剪位移关系曲线

图14和图15所示为三种土样抗剪强度参数与干密度的关系。图14为压实盐渍土内摩擦角与干密度的关系曲线, 可以看出对于同种粒径级配的压实试样, 土体内摩擦角随干密度增大逐渐增大, 干密度每增加0.1g/cm³, 内摩擦角约增大2°。图15为压实盐渍土粘聚力与干密度的关系曲线, 可以看出, 对于<0.5mm土样和<2mm土样, 土体干密度对粘聚力影响不大, 不同干密度试样粘聚力相差不到4kPa; 对于<5mm土样, 试样粘聚力随干密度增大显著增大, 干密度对粘聚力影响水平较高。

本次试验为直接快剪试验, 试样在整个剪切过程中不排水, 盐渍土试样中存在吸力^[3], 会使土体骨架内部在剪切过程中产生附加摩擦力。随着干密度、垂直压力的增加, 土体内吸力值不断增加, 附加摩擦力也相应增大, 试样在抵抗外力作用时表现为土体抗剪强度提高。另一方面, 在颗粒组成和与含水量均相同的情况下, 随着干密度增加, 压实盐渍土试样的土体孔隙比变小, 饱和度增加, 土颗粒结合水膜变厚, 润滑作用增强, 高压实盐渍土脆性破坏时, 剪切面上的吸力消散, 吸附强度随之消失, 使内摩擦角有所降低。

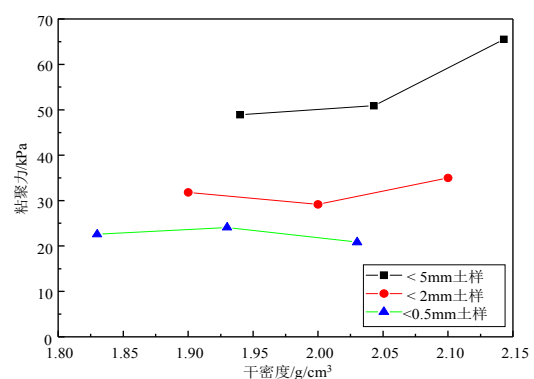


图14 土体内摩擦角与干密度的关系

2.3 垂直压力对压实盐渍土抗剪强度的影响

土体所受垂直压力对其应力-应变特性具有较大影响^[4]。同一种试样, 垂直压力较小时, 应力-应变曲线出现明显峰值, 峰值后剪应力随剪位移的继续增大迅速减小, 土样被剪坏, 最后趋于

一稳定值,这个稳定值被称为残余强度,应力-应变曲线呈应变“软化”型。随着土样垂直压力的增大,应力-应变曲线由应变“软化”逐渐向应变“硬化”过渡。

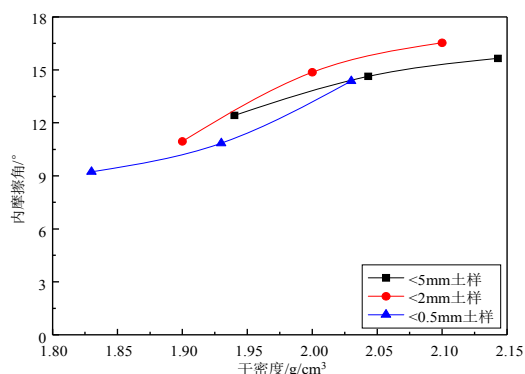


图15 土体粘聚力与干密度的关系

图16至图18所示分别为<5mm土样、<2mm土样和<0.5mm土样在四级垂直压力下的剪应力-剪位移曲线。由图可知,粒径、密度,含水量均相同的土样,随着所受垂直压力的增大,峰值强度与残余强度均显著提高。

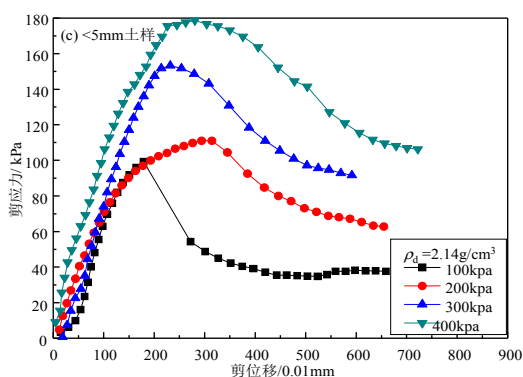


图16 不同垂直压力下<5mm土样的应力-应变曲线

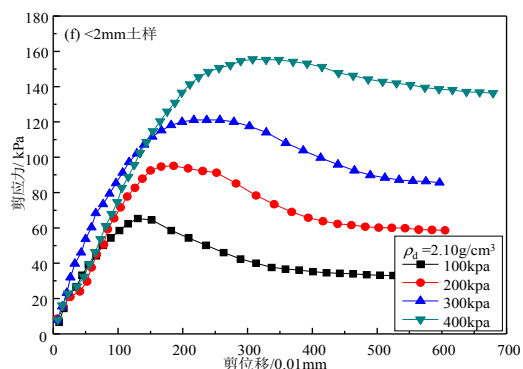


图17 不同垂直压力下<2mm土样的应力-应变曲线

土中含水量不大时,土中的易溶盐成分如Na₂SO₄、NaCl等以盐分晶体形态存在,并作为土颗粒的胶结物,起到土骨架的作用,

在一定程度上提高盐渍土的抗剪强度。土颗粒周围的孔隙水中也会溶解部分盐分,这就使得土体内部产生溶质吸力,在剪切过程中随压力与干密度的增大而增大,使土体的峰值强度与残余强度有所提高。

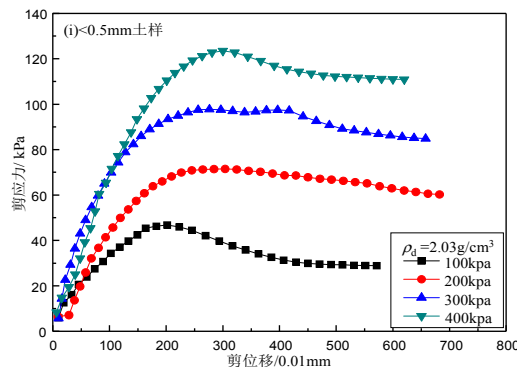


图18 不同垂直压力下<0.5mm土样的应力-应变曲线

3 结语

通过对三种压实盐渍土样在不同干密度状态下进行直剪试验,试验测定颗粒组成、干密度、垂直压力对压实盐渍土抗剪特性的影响规律,从非饱和土理论角度分析试验结果,得出以下结论:

- (1)干密度对盐渍土抗剪强度影响较大,在一定范围内土体内摩擦角随干密度的增加呈线性提高;粒径级配不同,干密度对盐渍土粘聚力的影响程度不同。干密度的增大可明显提高盐渍土的峰值强度,但对土样的残余强度影响不大。
- (2)颗粒组成对压实盐渍土的峰值强度有显著影响,但对残余强度提高不大,土样粒径越大、级配越好,压实盐渍土抗剪强度越高。
- (3)垂直压力的增大能够有效提高压实盐渍土试样的峰值强度和残余强度,在实际工程应用时确定地基法向荷载情况具有较大的实用性。

【参考文献】

- [1]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.
- [2]Alex Man,Jim Graham.Pore fluid chemistry, stress-strain behaviour, and yielding in reconstituted highly plastic clay. Engineering Geology.2010,116:296-310.
- [3]D.G.Fredlund,H.Rahurdjo.Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M].New York:John Wiley & Sons,1993.
- [4]D.G.Fredlund,A.Xing,M.D.Fredlund,et al.The relationship of unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J].Canadian Geotechnical Journal.1995,32:440-448.

作者简介:

刘卫卫(1989--),男,汉族,陕西人,大学本科,工程师,研究方向:岩土工程。