

文章编号:1671-6833(2024)01-0098-09

含泥量对砂类硫酸盐渍土工程特性的影响分析

张莎莎, 张超, 王旭超, 赵彦虎

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了明确含泥量对砂类硫酸盐渍土的盐胀和力学特性的影响,人工配制了不同细粒土含量的砂类硫酸盐渍土,在 1% 和 3% (质量分数,下同)含盐量单向冻结盐胀试验的基础上,选取了细粒土含量为 5%、15%、30% 和 40% 的砂样进行常温、低温三轴剪切试验。研究结果表明:此试验条件下,不同级配砂类硫酸盐渍土的冻结温度为 $-0.7 \sim -0.1$ °C,当砂样孔隙溶液浓度在冻结温度之上达到饱和时,降温过程中会首先生成盐结晶;1% 含盐量条件下,高细粒土含量($\geq 30\%$)砂样的起胀温度在 $4 \sim 9$ °C 之内,而低细粒土含量砂样的起胀温度在 0 °C 附近,3% 含盐量砂样的起胀温度为 $20 \sim 23$ °C;试验含水率和细粒土含量通过影响土体中自由水的含量对盐冻胀产生显著影响。在力学特性方面,随着细粒土掺量的增加,砂类硫酸盐渍土的抗剪强度表现出先增大后减小的趋势,细粒土由增强摩擦转变为颗粒间的“润滑”作用;此外,冻结后砂土转变为承载能力更强的“土-盐-冰骨架结构”,抗剪强度大幅提高,并呈现出明显的脆性破坏特征,由于冻结砂土受相对温度的影响,随着含盐量的增加,破坏应力呈先减小后增大的趋势。

关键词:砂类土;盐渍土;盐胀试验;三轴剪切试验;细粒土含量;SEM 试验

中图分类号:TU448

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2024.01.001

粗粒土具有压实性能好、透水性能强、抗剪强度高、沉降变形小等优良的工程特性^[1]。由于西北地区的自然气候条件和地质因素使得当地土体矿化程度较高,形成了大面积的盐渍化砂土,盐渍土的盐胀和溶陷对路基填筑产生了不可忽视的影响^[2]。而综合技术经济因素和生态环保要求,高速铁路或公路等构筑物穿越粗粒盐渍土地区时,使用当地的粗粒盐渍土作为路基填料成了首要选择。因此,进一步开展粗粒盐渍土相关研究十分必要。

粗粒盐渍土的盐冻胀性质受到颗粒级配、含盐性质^[3]、温度^[4]、含盐量、含水率和上覆荷载^[5]等的影响,且影响因素之间存在一定的交互作用^[6]。细粒土粒径较小、比表面积大,对水的吸附能力强,会降低土体的冻结温度^[7],但随着含水率的增加,粒径对冻结温度的影响逐渐降低^[8],同时,冻结温度还受孔隙溶液及孔隙结构的影响,会随着含盐量的增加、孔隙半径的减小而降低^[9]。由于粗粒盐渍土的孔隙率较大,与细粒土相比盐冻胀敏感性较弱,但

其盐冻胀敏感性会随细粒土掺量的增加而急剧增加,因此常将细粒土含量作为其盐冻胀敏感性的分类指标^[10]。细粒土粒度越小、黏粒含量越多,土的强度越大^[11-12],破坏孔隙结构所需的结晶应力也将随之增大^[13]。盐渍土冻结过程中会产生盐溶冰,强度将大幅提高,且温度越低强度越高^[14]。低围压下,冻结粗粒盐渍土的剪切强度会随围压的增加而增大,剪切强度随围压的增大而减小,还会表现出应变硬化的延性行为^[15-17]。冻结含盐粉砂的抗剪强度和初始阶段的弹性模量会随着硫酸钠含量的变化而变化^[18]。

现有研究和规范中大多表明,粗粒土中细粒土含量越低,其盐冻胀敏感性越低,然而细粒土含量不足却会导致路基基床不易压实^[19],同时,也有学者认为含水率对盐冻胀的影响要远大于细粒土含量^[20]。为了探究含泥量对砂类硫酸盐渍土盐冻胀的影响以及结晶盐相变带来的力学性质的差异,针对不同细粒土含量的砂类土,在 1% 和 3% (质量分

收稿日期:2023-06-20;修订日期:2023-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42101126);青海省交通运输厅科技项目(2020-02)

作者简介:张莎莎(1982—),女,山西运城人,长安大学副教授,博士,主要从事特殊土工程性状及其应用、地基处理及地下工程的研究,E-mail:zss_lx@126.com。

引用本文:张莎莎,张超,王旭超,等.含泥量对砂类硫酸盐渍土工程特性的影响分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(1):98-106.(ZHANG S S, ZHANG C, WANG X C, et al. Analysis of the influence of mud content on the engineering characteristics of sand sulfate saline soil[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(1):98-106.)

数,下同)含盐量单向冻结盐胀试验的基础上,选取了细粒土含量为 5%、15%、30% 和 40% 的砂样进行了常温、低温三轴试验,得到了含泥量对砂类硫酸盐渍土盐冻胀和力学特性的影响规律,结合微观试验结果分析了其影响机制,并根据试验结果为路基填料的选择提供了一些参考建议。

1 试验砂样及基本工程特性

试验用土有砂土和黄土,砂土为西安沣河河沙,其主要矿物为石英和长石;细粒土为西安长安区的天然黄土,主要矿物成分为石英、长石和云母。对砂样进行清洗、烘干和筛分,除去无机盐、腐殖质等杂质后装袋备用,然后依据 TB 10001—2016《铁路路基设计规范》中 A、B、C 这 3 组填料配土并命名,细粒土含量分别设置为 0、1%、3%、5%、10%、15%、30%、40%、50%,依次编号为 T-0、T-1、T-3、T-5、T-10、T-15、T-30、T-40、T-50,具体的砂样粒径级配曲线如图 1 所示。

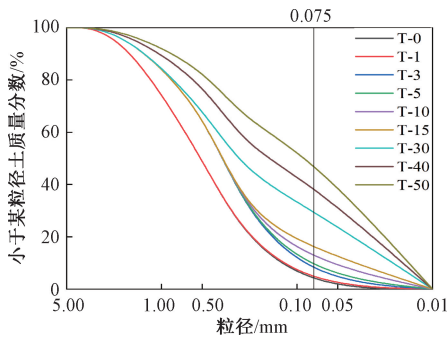


图 1 砂样粒径级配曲线

Figure 1 Grain size grading curve of sand

对不同级配的砂样进行重型击实试验,获取其最佳含水率和最大干密度,试验结果见表 1。随着细粒土含量的增大,砂样的最佳含水率先增大,然后持续大幅减小,当细粒土含量大于 30% 后再次缓慢增大;随着细粒土含量的增大,试验砂样的最大干密度先显著上升而后缓慢降低。

表 1 试验砂样压实指标

Table 1 Test sand compaction index

砂样编号	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
T-0	12.286	1.696
T-1	12.576	1.703
T-3	13.584	1.784
T-5	12.675	1.817
T-10	11.162	1.881
T-15	10.683	1.947
T-30	7.106	2.103
T-40	8.444	2.109
T-50	8.723	2.105

2 试验方案设计

2.1 室内盐胀试验

本试验为单向冻结室内盐胀试验。试验采用自制的低温试验箱,箱体侧面和顶面环绕有制冷管,制冷管与低温恒温槽连接,通过管内液体循环实现温度控制,温度可调控范围为 $35\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,自制低温试验箱示意图如图 2 所示。低温试验箱内安放盛装砂样的无盖圆柱形钢筒,钢筒内径为 150 mm,可盛装砂样高 250 mm,能有效避免尺寸效应的影响。当钢筒中填土高度达到 125 mm 时在截面中心埋入温度传感器,通过数据采集仪实时监测砂样内部温度。

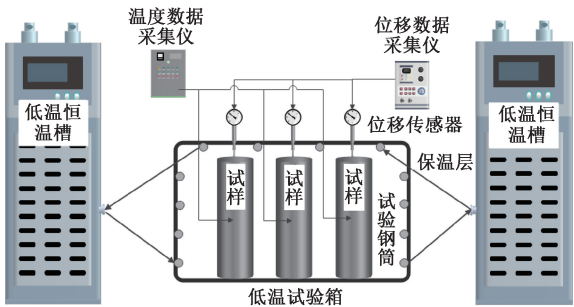


图 2 自制低温试验箱

Figure 2 Self-made low temperature test chamber

试验选用 T-0、T-1、T-3、T-5、T-10、T-15、T-30、T-40、T-50 共 9 组级配砂样,依据 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》选取中盐渍土(0.3%~2.0% 含盐量)和强盐渍土(2.0%~5.0% 含盐量)含盐范围进行试验,每组级配分别配制含盐量 1% 和 3% 两个试样,共 18 个试样。控制每组砂样的含水率为最佳含水率,闷料后分层压实,其压实度为 93%。有研究表明,硫酸盐渍土的主要盐胀温度为 $13\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21]。因此将试验的降温梯度设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 15\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 10\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 5\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 0\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -5\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -10\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温至每级温度梯度后稳定 1 h,温度降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,恒温保持 8 h 至变形稳定。

2.2 常温、低温三轴试验

细粒土的掺入会对砂土的土体结构产生影响,此外,盐胀过程中生成的盐晶会对土体强度产生显著的影响。为了探究细粒土含量对砂类硫酸盐渍土力学特性的影响规律,选取了 T-5、T-15、T-30 和 T-40 级配砂样开展了常温、低温三轴剪切试验,具体的试验方案如表 2 所示。为避免尺寸效应影响,试样尺寸选择 $50\text{ mm}(d)\times 100\text{ mm}(h)$ 。参考 MT/T 593—2011《人工冻土物理力学性能试验》等规范要求,低温三轴剪切试验的试验温度取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,剪切速率取 1 mm/min ,常温三轴试验的剪切速率取

0.012 mm/min。

表 2 三轴试验方案

Table 2 Triaxial test scheme				
试验类型	砂样级配	含盐量/%	温度	围压/kPa
常温三轴 试验	T-5	1,3	室温	100,200,300
	T-15	1,3	室温	100,200,300
	T-30	1,3	室温	100,200,300
低温三轴 试验	T-5	0,1,3	-10℃	300,400,500
	T-15	0	-10℃	300,400,500
	T-30	0	-10℃	300,400,500
	T-40	0	-10℃	300,400,500

试验中首先将烘干后的各粒组按相应的级配混合,按最优含水率配制成试验砂样,然后将配制好的砂样在密封袋中闷料 24 h 后分 3 层压制试样。常温三轴试样需采用水头饱和法进行饱和,进行低温三轴试验的试样成样后直接进行快速冻结,然后装入密封袋中在-10℃下恒温养护 24~48 h 后用于试验加载。

3 盐胀特性分析

3.1 温度变化特征分析

根据试验结果绘制不同含盐量砂样冻结过程的温度时程曲线,如图 3 所示。该单向冻结过程可分为 4 个阶段:快速降温段、过冷段、稳定段和继续下降段。①快速降温段,随着砂样与外界环境的热交换,砂样温度随时间逐渐降低。②过冷段,水结冰分为成核和生长两个过程:水过冷时可以形成小冰核,当某个小冰核偶然达到临界尺寸,形成临界冰核;然后临界冰核会自发快速生长致水成冰。冰水相变过程中伴随着潜热的释放,试样温度开始逐步回升。③稳定段,冰水相变放热与砂样向环境中散发的热量形成动态平衡,温度维持在恒定状态。④继续下降段,当砂样中大部分的自由水结冰后,动态平衡被打破,砂样继续向环境释放热量,温度继续降低。

由图 3 可知,1%、3%含盐量砂样均存在着过冷段,但 3%含盐量砂样的过冷度(过冷温度与冻结温度的差值)较小。这是由于含盐量较高时,前期降温过程中生成了大量结晶盐分布于土颗粒表面,使得土颗粒与冰晶的接触角减小^[22]。结合图 4 可知,试验砂样的冻结温度在-0.7~-0.1℃之内,冻结温度的变化总体上较小。这是由于所有砂样计算孔隙溶液浓度均高于硫酸盐溶液 0℃时的饱和浓度,在 0℃之上均会由于过饱和而产生盐结晶,冻结时各砂样孔隙溶液浓度接近该温度下的饱和浓度,故本试验中冻结温度受孔隙溶液初始浓度的影响较小。

含盐量较高时,快速降温段生成的盐结晶量越多,结晶消耗的水分越多;同时细粒土含量较高时,含水率较低且束缚水含量增多,含水率较低时,砂类土的冻结温度随含水率的降低而降低^[8],故 3%含盐量砂样的冻结温度变化相对 1%的较大,且细粒土含量较高时,冻结温度相对较低。

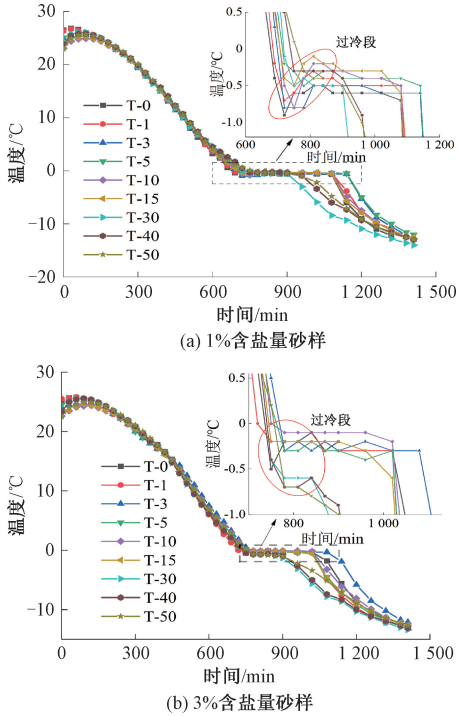


图 3 温度时程曲线

Figure 3 Temperature-time history curve

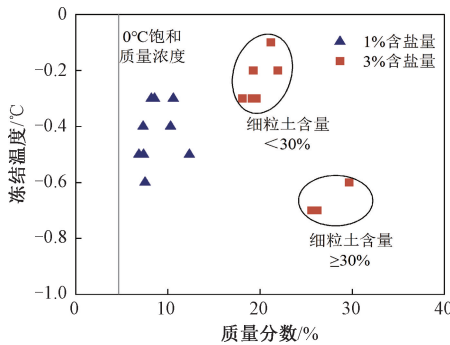


图 4 各级配砂样的冻结温度

Figure 4 Freezing temperature of sand samples at different gradation

据图 3 可知,含盐量相同时,低细粒土含量(<30%)砂样的稳定段维持时长明显高于高细粒土砂样。该差异与砂样中自由水的含量密切相关:一方面细粒土含量高于 30%后砂样的试验含水率大幅降低;另一方面,细粒土较大的比表面积使得细粒土表面束缚水含量较高。细粒土含量相同时,1%含盐量砂样的稳定段维持时长高于 3%含盐量砂样。这可能是由于 3%含盐量砂样在冻结温度之上消耗

了更多的自由水,冰水相变过程中砂样中剩余的自由水含量相对较少。上述差异表明,细粒土含量和含盐量可以通过影响不同阶段土体内部自由水相对含量来改变冻结过程中盐冻胀的占比。

3.2 变形特征分析

图 5 是不同含盐量的不同级配砂样的盐冻胀率随温度的变化曲线。含盐量为 1% 时,高细粒土含量($\geq 30\%$)砂样的起胀温度为 4~9℃,而低细粒土含量砂样的起胀温度在 0℃ 附近;3% 含盐量砂样的起胀温度为 20~23℃。对于 1% 含盐量的砂样,降温至较低温度时孔隙溶液浓度才能达到饱和,起胀温度相对 3% 含盐量砂样较低。此外,由于细粒土填充了粗颗粒之间的孔隙,减少了吸收盐胀变形的空间,使得高细粒土含量砂样起胀温度高于低细粒土含量砂样。

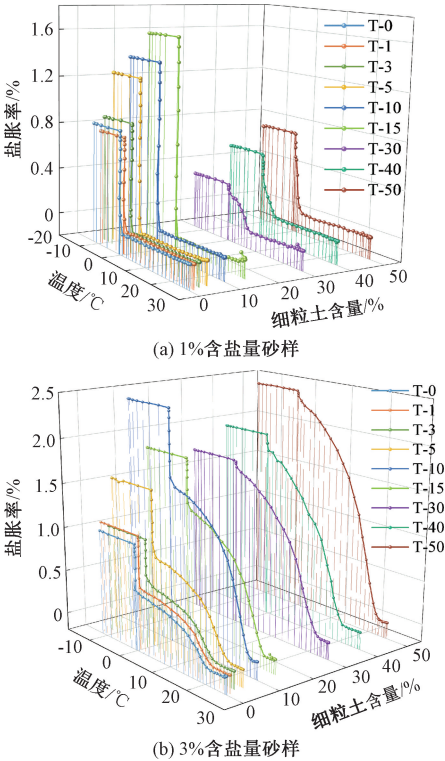


图 5 盐胀率随温度的变化曲线

Figure 5 Curve of salt expansion rate with different temperature

根据起胀温度和冻结温度可以将砂样的盐冻胀过程划分为以下 4 个阶段:略微下陷段、逐步膨胀段、快速膨胀段和变形稳定段。结合图 6 可知,1% 含盐量砂样在细粒土含量较低时,变形以快速膨胀段的盐冻胀为主,冻结温度之上生成的盐结晶被土骨架间的孔隙吸收,未能表现出宏观的盐胀;当细粒土含量大于 30% 时,大量的细粒土填充了土骨架间的大部分孔隙,使得砂样在前期的冻结过程中表现出了相对显著的盐胀变形。对于 3% 含盐量的砂

样,逐步膨胀段的盐胀变形占了总变形的大部分,一方面是由于含盐量较高,冻结温度之上产生了较多的盐结晶,另一方面是初期盐胀快速发展消耗了过多的自由水,冰水相变过程中剩余的自由水有限;随着细粒土含量的增大,逐步膨胀段变形占比总体上呈增长趋势。

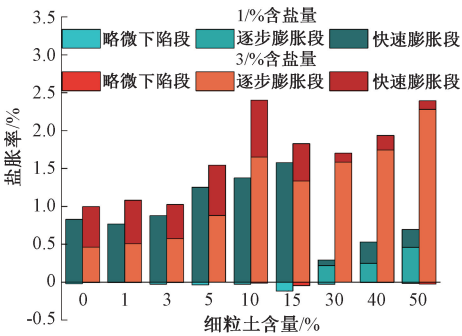


图 6 不同级配砂样各阶段变形堆积图

Figure 6 Deformation accumulation diagram of different gradation sand samples at different stage

另外,由图 6 可知,高细粒土砂样的快速膨胀段变形占比较小,这与此时砂样较低的含水率有显著的关系;细粒土含量较高时,1% 含盐量和 3% 含盐量砂样的总变形率差异较为显著,主要是冻结温度之上的盐胀变形差异大。这是由于较多的细粒土填充了土骨架间大部分孔隙,使得不同含盐量砂样的盐胀差异在宏观上充分表现出来。

如图 7 所示,随着细粒土含量的增加,不同含盐量砂样的总变形均表现出先增大后减少再增大的趋势,与砂样最优含水率的变化规律基本一致。另外,细粒土含量从 0 上升至 30% 时属于 B 组填料,细粒土含量在 30%~50% 时属于 C 组填料。各级配砂样变形率的离散程度较大,1% 含盐量时,最大变形率为 1.576%,最小变形率为 0.292%,前者是后者的 5.4 倍;3% 含盐量时,最大变形率为 2.4%,最小变形率为 1.0%,前者是后者的 2.4 倍。结合实际工程填料的选择,选用 B 组砂类硫酸盐渍土作为路基填料,当含盐量较高时,应当严格控制细粒土的掺量,细粒土的含量不宜超过 5%,否则会产生较大的盐冻胀变形;当含盐量较低时,应当避免细粒土含量为 5%~20% 的级配,同时考虑到粗粒土中细粒含量越低越不易压实,为了获得较好的压实效果,可优先选择细粒土含量在 30% 附近的级配。含盐量较高地区,应当禁止使用细粒土含量大于 30% 的级配。本文试验结果仅对工程建设提供一定的参考和建议,实际工程建设中还需结合实际情况深入分析后选用。

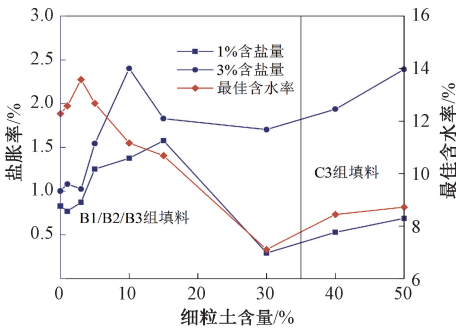


图 7 总变形率与最佳含水率的关系

Figure 7 Relationship between total deformation rate and optimum moisture content

3.3 微观孔隙结构特征分析

为了解不同级配砂类土的微观孔隙结构特征,选取 T-15、T-40 和 T-50 的试样进行了 SEM 试验,利用扫描电镜获取的图像来计算试样的表观孔隙率。灰度的 SEM 图像不能直接用于计算,需要利用 Adobe Photoshop 软件对图像进行预处理:对图像进行增强、除噪和二值化转化为黑白图像;孔隙和土颗粒分别用黑色和白色像素表示。砂样的表观孔隙率通过计算二值图中黑色像素个数与总像素个数之比得到。

利用 SEM 图像进行表观孔隙率计算时,阈值选择不当可能会带来较大的误差,参考文献[23],根据每个 SEM 图像特点选取 3 个阈值(80~100)进行计算,通过 Python 编程实现表观孔隙率计算,求 3 个阈值结果的平均值得到最终的表观孔隙率如表 3

所示。结果表明,随着细粒土含量的增多,土体中粗颗粒间的孔隙被大量填充导致表观孔隙率降低,但当细粒土含量增大到一定范围时,表观孔隙率开始回升。

表 3 表观孔隙率计算表

Table 3 Apparent porosity calculation table

试样编号	阈值	表观孔隙率/%	
		计算值	平均值
T-15	100	14.28	13.16
	95	13.13	
	90	12.07	
T-40	100	12.74	9.82
	95	8.84	
	90	7.89	
T-50	100	14.17	11.05
	90	11.27	
	80	7.72	

4 力学特性分析

4.1 常温下三轴试验结果分析

图 8 为不同级配砂样的应力-应变曲线,据图 8 可知,T-15 试样的应力-应变曲线为典型的应变软化型,曲线的发展趋势大致可分为初始线弹性阶段、非线性硬化阶段和软化阶段;T-5 和 T-30 试样的应力-应变曲线为应变硬化型,曲线的发展趋势可大致分为弹性变形阶段、塑性屈服阶段和塑性破坏阶段。

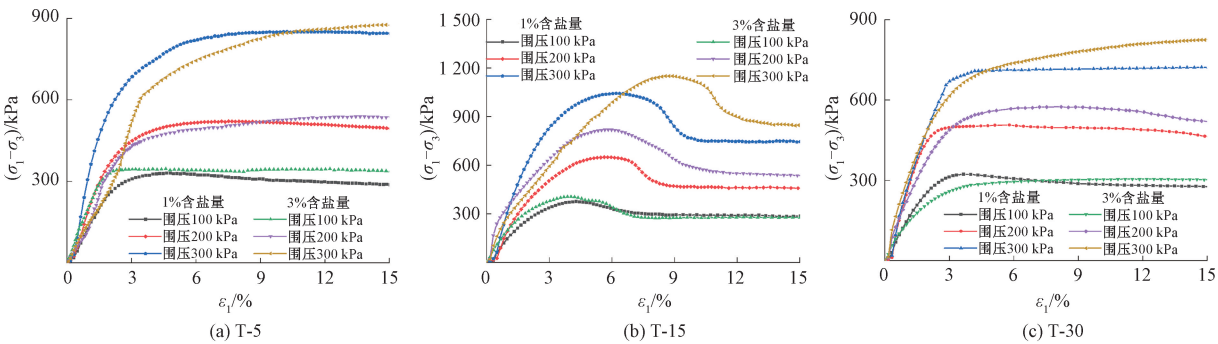


图 8 不同级配砂样的应力-应变曲线

Figure 8 Stress-strain curves of sand samples with different gradation

根据图 8 确定各砂样的破坏应力,然后绘制破坏应力随细粒土含量变化曲线,如图 9 所示。在不同围压和含盐量条件下,随着细粒土掺量的增多破坏应力均表现出先增大后减小的趋势,细粒土含量 15% 时,砂样的破坏应力最大,另外,3% 含盐量砂样的破坏应力高于 1% 含盐量的砂样。砂类土的抗剪强度主要依赖于砂粒间的咬合摩擦,当细粒土含量较低时,细粒土通过填充颗粒间的孔隙使得砂颗粒

间的咬合嵌固作用更强,砂土的摩擦强度随之增加;当细粒土掺量超过界限值时,大量细粒土分布在粗颗粒之间,起到润滑作用,使得砂样的抗剪强度降低。

随着围压的增大,土颗粒被挤压得更加密实,颗粒之间产生的摩擦力更大。分析数据发现,随着围压的增大,破坏应力近似线性增长。采用线性莫尔-库伦准则求得各砂样的抗剪强度参数,计算结果见

表 4. 由黏聚力和内摩擦角的范围可知,3 种级配砂土的抗剪强度主要以颗粒间的摩擦为主,且随着细粒含量的增加,内摩擦角呈先增大后减小的趋势,细粒土含量 15% 砂样的内摩擦角最大。

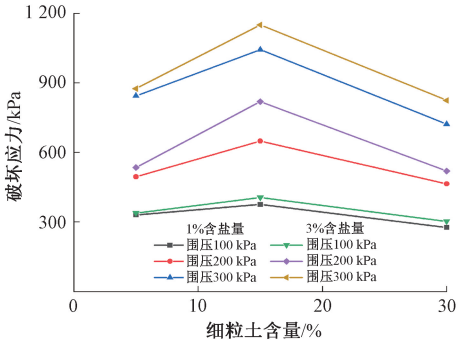


图 9 各砂样破坏应力随细粒土含量的变化
Figure 9 Failure stress of each sand sample with the increase of fine-grained soil content

表 4 砂样的强度参数

砂样	含盐量/%	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
T-5	1	26.1	13.06
	3	27.2	8.57
T-15	1	32.6	5.92
	3	35.2	12.06
T-30	1	22.3	14.84
	3	26.5	8.24

4.2 冻结砂土的力学特性

图 10 展示了冻结砂土的典型破坏形态。由图

10 可见冻结砂土呈压剪破坏,根据剪切带的特点可分为以下 3 种典型破坏形态:①整体剪坏破坏,随着轴向应变的增加,试样逐渐被压缩并出现一定的鼓腰变形,同时伴随着裂纹的发展;轴向应变继续发展,剪切带大量裂纹开始贯通形成轴向贯穿的斜裂缝。②局部剪切破坏,在试样局部出现一条较长的斜裂纹带,随着斜裂纹的贯穿发生破坏。③鼓胀剪切破坏,试样首先会出现鼓胀变形,随着变形的发展,在鼓胀区域形成交错的斜裂纹将试样分割破坏形成许多小区域。



(a) 整体剪坏破坏 (b) 局部剪切破坏 (c) 鼓胀剪切破坏

图 10 冻结砂土的典型破坏形态

Figure 10 Typical failure pattern of frozen sand

图 11 为不同围压条件下冻结砂土的应力-应变曲线。与常温条件下的试验结果相比,冻结后砂样的强度有了数量级的增长。这是由于在冻结过程中,随着砂样中盐溶液相变为盐溶冰,土体结构由之前的“土骨架结构”转化为了“土-盐-冰骨架结构”,这种复合骨架结构提高了砂样的整体性,更有利于承受荷载。在本试验围压条件下,冻结后砂样的应力-应变曲线整体上为应变软化型,轴向应力在达到

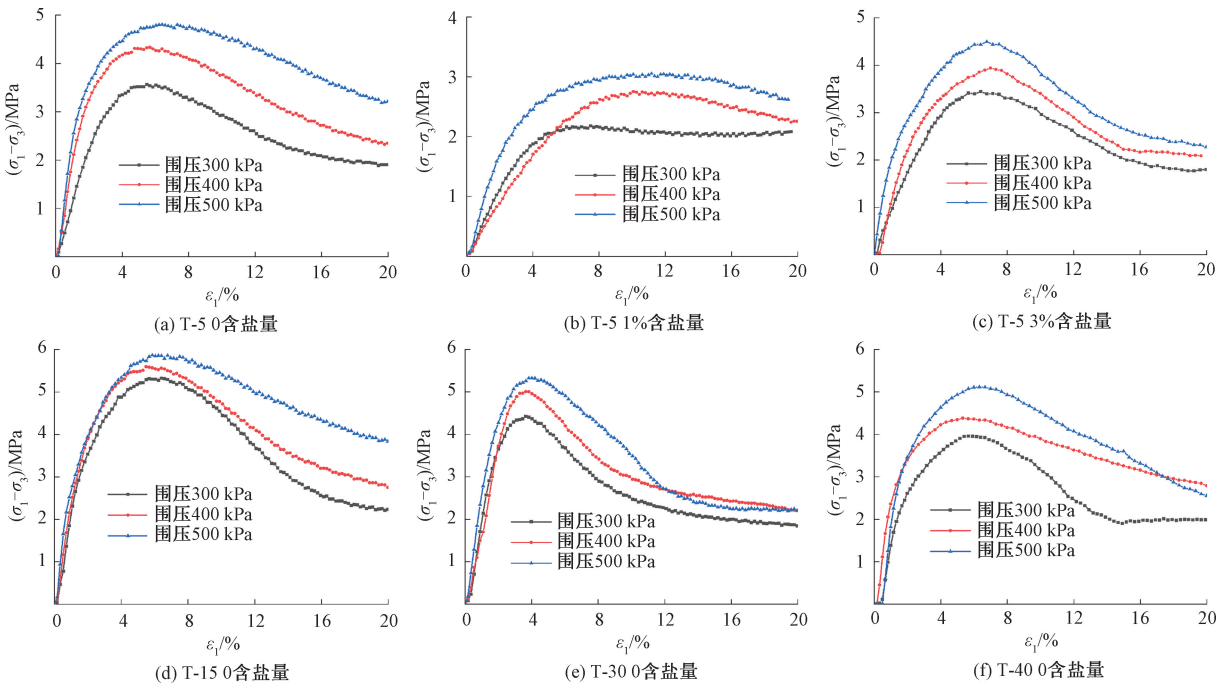


图 11 不同围压条件下冻结砂土的应力-应变曲线

Figure 11 Stress-strain curves of frozen sand under different confining pressures

峰值后随着应变的增大快速降低,表现出明显的脆性破坏特征。这是因为土颗粒间的盐溶冰在荷载作用下破碎,随后试样内裂缝快速发展导致土体强度迅速降低。随着围压的增大,冻结砂样的破坏应力随之增大。这是由于当围压增大后,试样变形受到的侧向约束增大,土体中微裂隙的发展受到限制,整体性增强,承受荷载能力得以提高。

根据图 11 应力-应变曲线确定各砂样的破坏应力,绘制冻结砂土的破坏应力随细粒土含量的变化曲线,如图 12 所示。冻结砂土的破坏应力随细粒土含量的变化趋势与常温下砂土破坏应力的变化趋势一致,均呈现先增大后减小的趋势。随着细粒土含量的增加,细粒土填充了颗粒间的孔隙,密度更大,在盐溶冰的联结作用下土体骨架结构更加稳定;但当细粒土含量超过界限值时,大量细粒土分布在砂粒之间,其抗剪强度会减小。

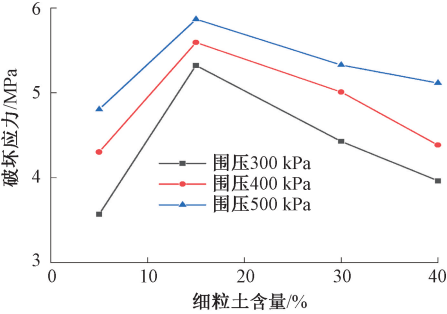


图 12 冻结砂土的破坏应力随细粒土含量的变化
Figure 12 Failure stress of frozen sand with the increase of fine-grained soil content

图 13 为细粒土含量 5% 砂样的破坏应力随含盐量的变化曲线。由图 13 可知,随着含盐量的增加,砂样的破坏应力呈先减小后增大的趋势,这种趋势与相对温度密切相关。相对温度即试验温度与冻结温度的差值,在一定范围内,随着砂样中含盐量的增加,冻结温度会降低,同一试验温度下,含盐量高的砂样盐溶冰强度相对较低,盐溶冰对土颗粒之间的相互联结作用较弱。因此,在含盐量较低时,随着含盐量的增大,砂样的抗剪强度变低。由于饱和浓度的存在,含盐量对冻结温度影响存在一定的局限性,当砂样在冻结温度以上达到过饱和状态时,硫酸钠晶体会先于冰晶生成,温度降低至冻结温度时,砂样的含盐浓度趋向于该温度下的饱和浓度,砂样的冻结温度便稳定在一定区间。3% 含盐量砂样与 1% 含盐量砂样相比,冻结后硫酸钠晶体的含量高,盐晶与土颗粒的结合强度变高。因此,当含盐量超过一定范围时,含盐量越高,冻结盐渍土的抗剪强度越高。

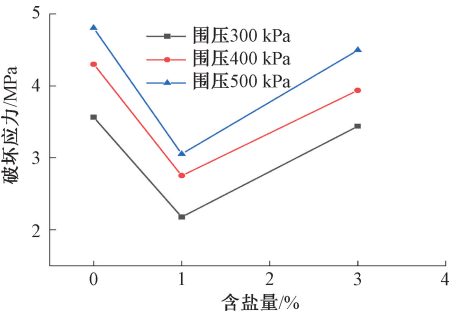


图 13 T-5 砂样的破坏应力随含盐量的变化
Figure 13 Failure stress of T-5 sand sample with the increase of salt content

5 结论

本文通过控制细粒土含量和含盐量,对砂类硫酸盐渍土开展了单向冻结盐胀试验和常温、低温条件下的三轴试验,并结合微观试验结果对其盐胀和力学特性进行了探讨,得出了以下结论。

(1) 本试验条件下,不同级配砂类硫酸盐渍土的冻结温度为 $-0.7 \sim -0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,当砂样孔隙溶液浓度在冻结温度之上达到饱和状态时,盐结晶将先于冰晶生成,当达到冻结温度时,孔隙溶液浓度将接近该温度下的饱和浓度。

(2) 细粒土含量和含盐量对盐冻胀发展趋势有显著影响。含盐量 1% 时,低细粒土砂样的起胀温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近;由于细粒土对粗颗粒间孔隙的填充作用,高细粒土砂样的起胀温度高于低细粒土砂样,其值为 $4 \sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。3% 含盐量的砂样由于在较高温度下便达到过饱和状态,起胀温度在 $20 \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内。

(3) 含盐量和细粒土含量会影响砂样中自由水相对含量和孔隙结构特征,从而对盐冻胀占比产生显著影响。3% 含盐量砂样的前期盐胀变形占比远高于 1% 含盐量砂样;对于 1% 含盐量砂样,细粒土含量高于 30% 时盐胀占比较大。

(4) 随着细粒土掺量的增加,砂类硫酸盐渍土的抗剪强度表现出先增大后减小的趋势。较低含量的细粒土能起到填充孔隙、增强摩擦的作用,而高于界限值后将起到润滑作用,本试验中细粒土含量在 15% 时砂样的抗剪强度最大。

(5) 冻结后砂样由之前的“土骨架结构”转化为“土-盐-冰骨架结构”,抗剪强度大幅提高,并表现出明显的脆性破坏特征。此外,随着含盐量的增加,砂样的破坏应力呈先减小后增大的趋势。

参考文献:

[1] 杨晓华, 张莎莎, 刘伟, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性

- 研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 22-40.
- YANG X H, ZHANG S S, LIU W, et al. Research progress on engineering properties of coarse-grained saline soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 22-40.
- [2] 杨晓华, 刘伟, 张莎莎, 等. 温度变化对粗粒硫酸盐渍土路基变形影响分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 64-72.
- YANG X H, LIU W, ZHANG S S, et al. Influence of temperature change on deformation of coarse-grained sulfate saline soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 64-72.
- [3] 包卫星, 张莎莎. 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 734-739.
- BAO W X, ZHANG S S. Experimental study on salt expansion and thawing subsidence properties of sandy saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 734-739.
- [4] 张戣, 邹美思, 徐安花, 等. 温度对盐渍土抗剪强度和变形特性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 66-78.
- ZHANG Y, ZOU M S, XU A H, et al. Effect of temperature on shear strength and deformation characteristics of saline soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 66-78.
- [5] 杨平, 王岩梓, 刁鹏程. 上覆荷载对重塑粉质黏土补水冻胀特性影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(6): 83-89.
- YANG P, WANG Y Z, DIAO P C. Influence of load on frost heaving characteristics of remolded silty clay[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(6): 83-89.
- [6] 张莎莎, 王永威, 包卫星, 等. 影响粗粒硫酸盐渍土盐胀特性的敏感因素研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 946-952.
- ZHANG S S, WANG Y W, BAO W X, et al. Sensitive parameters of embankment deformation behavior for coarse-grained sulfate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 946-952.
- [7] 郇慧, 马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1106-1113.
- BING H, MA W. Experimental study on freezing point of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1106-1113.
- [8] 周家作, 谭龙, 韦富昌, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 777-785.
- ZHOU J Z, TAN L, WEI C F, et al. Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 777-785.
- [9] WAN X S, LAI Y M, WANG C. Experimental study on the freezing temperatures of saline silty soils[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(2): 175-187.
- [10] KONRAD J M, LEMIEUX N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 515-527.
- [11] 王旭超, 张莎莎, 赵凯旋. 细粒土含量对粗粒硫酸盐渍土路基填料盐胀特性的影响试验及分析模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2191-2202.
- WANG X C, ZHANG S S, ZHAO K X. Salt expansion characteristics and analysis model of coarse-grained sulfate saline soil embankment fill material with increasing fines content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2191-2202.
- [12] 徐令宇, 薛莹莹, 潘冬冬, 等. 非塑性细粒粒径与含量对饱和砂类土强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 741-748.
- XU L Y, XUE Y Y, PAN D D, et al. Effects of non-plastic fines size and content on strength of saturated sandy soils[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 741-748.
- [13] LAI Y M, WU D Y, ZHANG M Y. Crystallization deformation of a saline soil during freezing and thawing processes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 463-473.
- [14] 罗崇亮, 余云燕, 岳建平, 等. 河西盐渍土的低温冻土三轴试验与模型研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(6): 61-69.
- LUO C L, YU Y Y, YUE J P, et al. Low-temperature frozen soil triaxial test and model study on saline soil in Hexi area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(6): 61-69.
- [15] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1612-1617.
- LAI Y M, CHENG H B, GAO Z H, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1612-1617.
- [16] LIAO M K, LAI Y M, WANG C. A strength criterion for frozen sodium sulfate saline soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1176-1185.
- [17] XU X T, WANG Y B, BAI R Q, et al. Comparative studies on mechanical behavior of frozen natural saline silty sand and frozen desalted silty sand[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 132: 81-88.

[18] HU K, CHEN X Q, CHEN J G. Laboratory investigation of deformation and strength characteristics of saline frozen silty sand[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2017, 54(2): 102-109.

[19] 王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359-364, 388.

WANG T L, YUE Z R. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359-364, 388.

[20] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522-1526.

ZHANG Y C, LI X, ZHANG X F, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1522-1526.

[21] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2090-2096.

WAN X S, LAI Y M. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090-2096.

[22] 应赛, 周凤玺, 文桃, 等. 盐渍土冻结过程中的特征温度研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 53-61.

YING S, ZHOU F X, WEN T, et al. Characteristic temperatures of saline soil during freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 53-61.

[23] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.

TANG C S, SHI B, WANG B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.

Analysis of the Influence of Mud Content on the Engineering Characteristics of Sand Sulfate Saline Soil

ZHANG Shasha, ZHANG Chao, WANG Xuchao, ZHAO Yanhu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the influence of mud content on salt swelling and mechanical properties of sand sulfate soils, sand sulfate soils with different fine-grained soil content were manually configured. Based on the unidirectional freezing salt swelling test with 1% and 3% salt content, sand samples with fine-grained soil mass fraction of 5%, 15%, and 30% were selected to conduct triaxial shear tests at constant and low temperature. The results showed that with the conditions of this test, the freezing temperature of sand sulfate saline soil of different levels was within the range of -0.7--0.1 °C. When the pore solution concentration of the soil samples reached saturation above the freezing temperature, salt crystals could first be generated in the cooling process. With the condition of 1% salt content, the initial swelling temperature of sand samples with high fine-grained soil content ($\geq 30\%$) was in the range of 4-9 °C, while the initial swelling temperature of sand samples with low fine-grained soil content was near 0 °C. The swelling temperature of 3% salt content sand sample was 20-23 °C. The process of salt frost heave was inseparable from the participation of free water. The test water content and fine-grained soil content had a significant effect on salt frost heave by influencing the content of free water in the soil. In terms of mechanical properties, with the increase of the content of fine-grained soil, the shear strength of sand sulfate soils increased first and then decreased, and the fine-grained soil changed from enhancing friction to "lubrication" between particles. In addition, after freezing, the sand was transformed into a "soil-salt-ice skeleton structure" with a stronger bearing capacity, and the shear strength increased greatly, showing obvious brittle failure characteristics. Affected by relative temperature, the failure stress of frozen sand decreased first and then increased with the increase of salt content.

Keywords: sand soil; saline soil; salt swelling test; triaxial shear test; fine-grained soil content; SEM test