

# 冻融循环对粉煤灰改良盐渍土抗剪特性影响研究

程卓,崔高航,高泽宁,侯召,刚浩航

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**为探究冻融循环条件下采用粉煤灰改良盐渍土路基的抗剪切性能,选取绥化至大庆高速公路沿线盐渍土样进行不同粉煤灰掺量下的直剪试验研究。结果表明:历经多次冻融循环,盐渍土黏聚力和内摩擦角均出现下降趋势;随着粉煤灰掺量的增加,改良盐渍土的内摩擦角、黏聚力和抗剪强度呈现出先升高后下降的趋势;当粉煤灰掺量为15%时,盐渍土样的黏聚力、内摩擦角等力学指标均达到最大值。绥化高速公路地区路基修筑过程中,可以在路基土中掺加15%粉煤灰,以提高路基土抗剪强度及抗冻融循环作用的能力。

**关键词:**粉煤灰;盐渍土;冻融循环;黏聚力;内摩擦角

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

盐渍土是一种特殊土,盐土和碱土及盐化、碱化后的土壤总称为盐渍土。外界气温、水分等发生变化时,盐渍土内部盐分反复发生盐结晶和潮解,盐渍土物理力学性质发生显著变化,往往会造成盐渍土内部孔隙增大、土体软化或体积增大,造成路面开裂和下沉、翻浆、腐蚀等公路病害<sup>[1]</sup>。

目前对于冻融循环条件下盐渍土特性和应用改性剂改良盐渍土路用性能的研究,已经取得了一定的成果。陈伟韬等<sup>[2]</sup>对于格尔木市盐渍土开展研究,结果表明:冻融循环过程中,盐渍土内部大孔隙占总孔隙面积的比例随冻融次数的增加而减小;Wan等<sup>[3]</sup>研究得到盐渍土盐分结晶规律及盐分对液态水含量的影响,并根据热力学原理建立了考虑冰盐相变的传热方程;陈康亮等<sup>[1]</sup>研究认为在硫酸盐渍土中掺加粉煤灰和生石灰对固化盐渍土无侧限抗压强度有较大影响;刘胜等<sup>[4]</sup>研究表明,在花岗岩残积土中掺入15%的粉煤灰,可以大大提高花岗岩残积土的水稳定性和抗剪强度;Kamei等<sup>[5]</sup>使用从石膏废料中获得的再生蓝晶石作为软黏土的稳定材料,提高了盐渍

土冻融循环条件下的耐久性和强度;巩伟等<sup>[6]</sup>结合实际工程研究认为,在滨海盐渍土路段施工时,综合考虑社会环境、地质情况、施工难易性及经济要求等因素,采用石灰、粉煤灰改良盐渍土路基切实可行。目前,很多文献对盐渍土特性和应用改性剂改良盐渍土特性进行了研究,报道了含盐量、改性剂掺量及含水率等多种因素对盐渍土强度的影响规律,但对于东北严寒地区的盐渍土特性及外掺改性剂对冻融循环条件下盐渍土的强度特性研究依然较少。

目前,正在规划建设的绥化至大庆高速公路大部分路段为盐渍土地,且该地区属于季节性冻土区,冬季较长,昼夜温差较大,冬季气温长期低于零摄氏度。根据中国气象网数据,绥化自2011年以来最低气温达-34℃,其中1月、2月、12月平均气温为-20℃、-15℃和-17℃。因此当地的路基土长期处于冻融循环条件下,这样的周期性变化会导致路基松散,威胁道路的运营。因此,需采取相关措施对路基进行改良。使用粉煤灰对盐渍土路基进行改良,可以提高路基的抗剪强度和稳定性。与其他改良方法相比较,在降低施工成本的同时也可以加快粉煤灰的综合利用进程,具有良好的经济意义和环境意义。本文以绥化高速公路沿线地区典型硫酸盐

收稿日期:2021-01-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:50538030);黑龙江省自然科学基金资助项目(编号:E201149);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:DL12CB03);大学生创新创业训练计划项目(编号:202010225018)

作者简介:程卓,男,博士研究生.E-mail:chengzhuo12138@163.com

渍土为工程背景,以粉煤灰为改性剂,考虑不同冻融循环次数对盐渍土的影响,分析不同掺量粉煤灰对冻融循环条件下盐渍土抗剪强度的影响和冻融循环次数对盐渍土特性的影响,为粉煤灰改良硫酸盐渍土应用于寒区公路实践提供参考。

## 1 试验材料

### 1.1 试验用土

试验土样取自绥大高速公路沿线,采取地下0.5~1 m范围内的冻土土样,该场地地表裸露,表层土壤受蒸发过程中沉积盐分的影响严重,干燥时呈白色、硬壳状,表面有许多宏观-微观裂缝,土体表现出明显的盐渍化特征。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)<sup>[7]</sup>,采取的土样为黏性粉砂土,应用筛分法确定其粒径分布如图1所示。根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)<sup>[8]</sup>试验分析确定土壤的物理参数,如表1所示,易溶盐离子质量比见表2。由表2可知:试样中 $\text{Cl}^-/2\text{SO}_4^{2-}=0.297$ ,由《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)<sup>[7]</sup>可知,属于硫酸盐渍土。

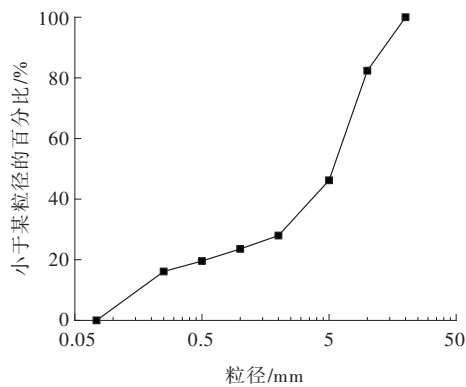


图1 粒径分布曲线

表1 土壤物理参数

天然含水率/%	相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
12	2.63	21.5	29	7.5	1.96	12.4

表2 易溶盐离子含量

离子	含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	离子	含量/(g·kg <sup>-1</sup> )
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.032	Ca <sup>2+</sup>	0.602
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.159	Mg <sup>2+</sup>	0.342
Cl <sup>-</sup>	2.144	K <sup>+</sup>	0.012
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.607	Na <sup>+</sup>	3.100

### 1.2 改良材料

改良材料选用一级粉煤灰,采用X射线荧光光谱仪、半定量检测分析方法确定元素含量,测试结果为根据元素与其氧化物之间的关系,确定氧化物含量,其有效成分及具体含量见表3。

表3 粉煤灰性能指标

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	45.10	SO <sub>3</sub>	2.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.20	K <sub>2</sub> O	3.68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	Na <sub>2</sub> O	1.06
CaO	0.85	烧失量	4.70
MgO	1.58		

## 2 试验方案设计

### 2.1 改良试样配比设计

将未掺加粉煤灰编号为L1,粉煤灰掺量分别为10%、15%、20%时分别编号为L2、L3、L4。

### 2.2 试样制备

将收集到的天然盐渍土风干,碾碎后过2 mm的筛子;粉煤灰在使用前通过同一筛子。根据前期勘探所取土样,通过室内试验,测得土样平均天然含水率为12.1%。为了使试验条件更加贴近实际工况,同时使试验数据更加具有可比性,试验过程中控制固定含水率为12.1%。考虑到虽然含水率对土样压实度具有影响,但基于现场土样实际含水率和后期相关的测试和试验需要,文中改良土样的含水率也均设定为12.1%。击实试验测得土样干密度,见表4。

表4 试样的物理性质指标

粉煤灰掺量/%	含水率/%	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
0	12.1	2.152 4	1.920 1
10	12.1	2.152 5	1.920 2
15	12.1	2.152 2	1.920 1
20	12.1	2.152 9	1.920 5

由表4可知:在含水率一定的情况下,掺加粉煤灰后,土样干密度和湿密度未发生明显变化,这与王峻等<sup>[9]</sup>试验数据相类似。

按配比关系将粉煤灰和盐渍土混匀后,按质量-体积关系加入蒸馏水,使其含水率达到12.1%。将配置好的土样标准条件养护24 h后,使用液压机将土样按照95%压实度<sup>[10]</sup>静压成直径61.8 mm、高20

mm的标准直剪试件。将试件用保鲜膜和密封袋包裹后,放入低温箱。

参考中国天气网及当地气象局统计数据,当地冬季为10月一次年3月,冬季日间平均温度为 $-4.3^{\circ}\text{C}$ ,夜间平均气温为 $-13.9^{\circ}\text{C}$ ,选取 $-13.9^{\circ}\text{C}$ 作为冻结试验温度。将试样置于 $-13.9^{\circ}\text{C}$ 低温箱冻结6 h,然后置于 $20^{\circ}\text{C}$ 恒温箱融化6 h。

### 2.3 试验方法

考虑到实际工程中施工速度较快,采用SDJ-II型应变控制直剪仪对土体进行室内快剪试验。为减小安放试样过程中对土体的扰动,在试样完成最后一次冻融循环的冻结部分后取出置于剪切盒内,将剪切盒置于 $20^{\circ}\text{C}$ 恒温箱内6 h进行解冻。设置剪切速度为 $0.8\text{ mm/min}$ 条件下进行抗剪强度试验,试验过程中保持温度不变。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 土体抗剪强度与竖向压力关系

图2为冻融循环作用下不同粉煤灰掺量土样的竖向压力与抗剪强度关系图。为了更加直观地反映抗剪强度随竖向压力的变化,对相同冻融次数下的

各点进行一次线性拟合。拟合得到的直线相关系数 $R^2$ 均大于0.95,证明各直线与原数据拟合的相关性较好,可以较好反映原数据变化趋势。

由图2可以得出:在粉煤灰掺量一定的情况下,当冻融循环次数不发生改变时,土体的抗剪强度随竖向压力的增大而增大。竖向压力不变时,土体的抗剪强度随冻融循环次数的增加而有所衰减。当土体在未掺加粉煤灰和掺加10%粉煤灰时,增加竖向压力可以削弱土体由于冻融循环作用导致的抗剪强度数值下降。当土体粉煤灰的掺量较高,达到15%和20%时,增加土体的竖向压力无法削弱土体由于冻融循环作用导致的抗剪强度数值下降。

### 3.2 冻融循环作用对土体抗剪性能的影响

#### 3.2.1 冻融循环作用对土体抗剪强度的影响

图3为不同竖向压力下土体的抗剪强度随冻融循环次数的变化曲线。不同竖向压力作用下,冻融循环作用对土体抗剪强度的影响规律大致相同,随着冻融循环次数的增加土体的抗剪强度下降。当粉煤灰掺量一定时,随着冻融次数的增加土体的抗剪强度呈现出先降低后逐渐趋于稳定的变化规律。这说明,在冻融循环作用初期土体内部结构遭到破坏,抗剪强度下降。随着冻融循环次数的增加土体内部

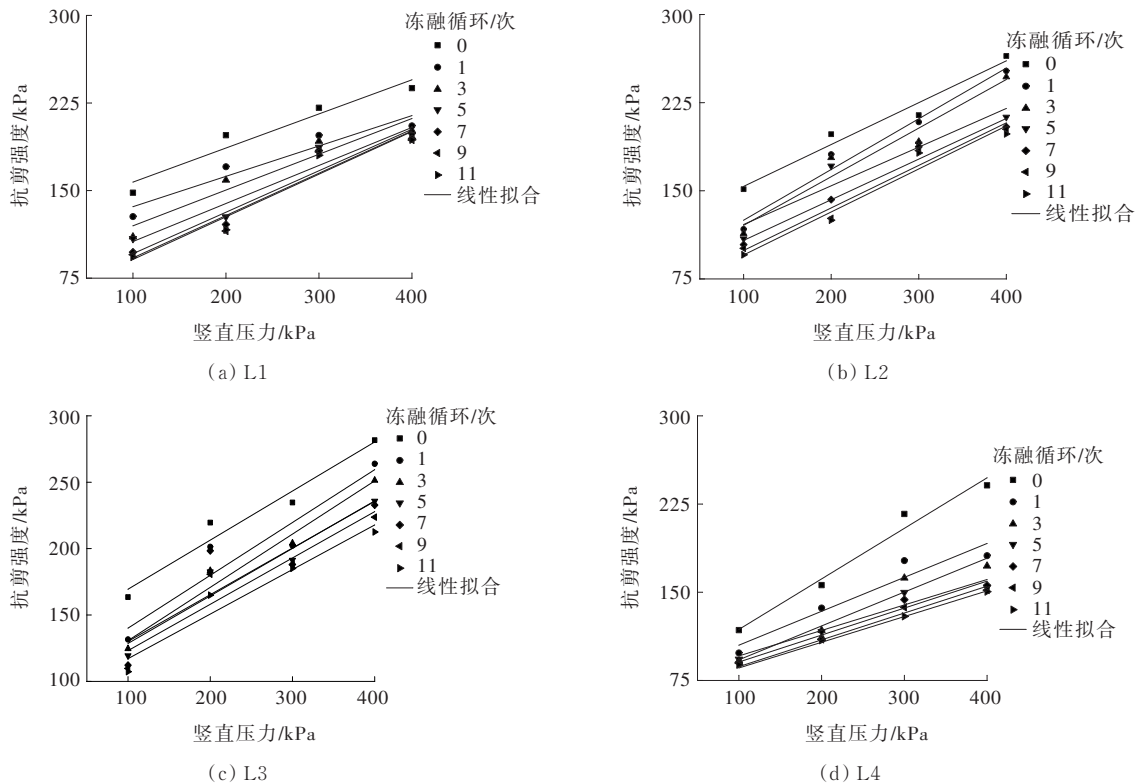


图2 冻融循环作用下抗剪强度与竖向压力关系

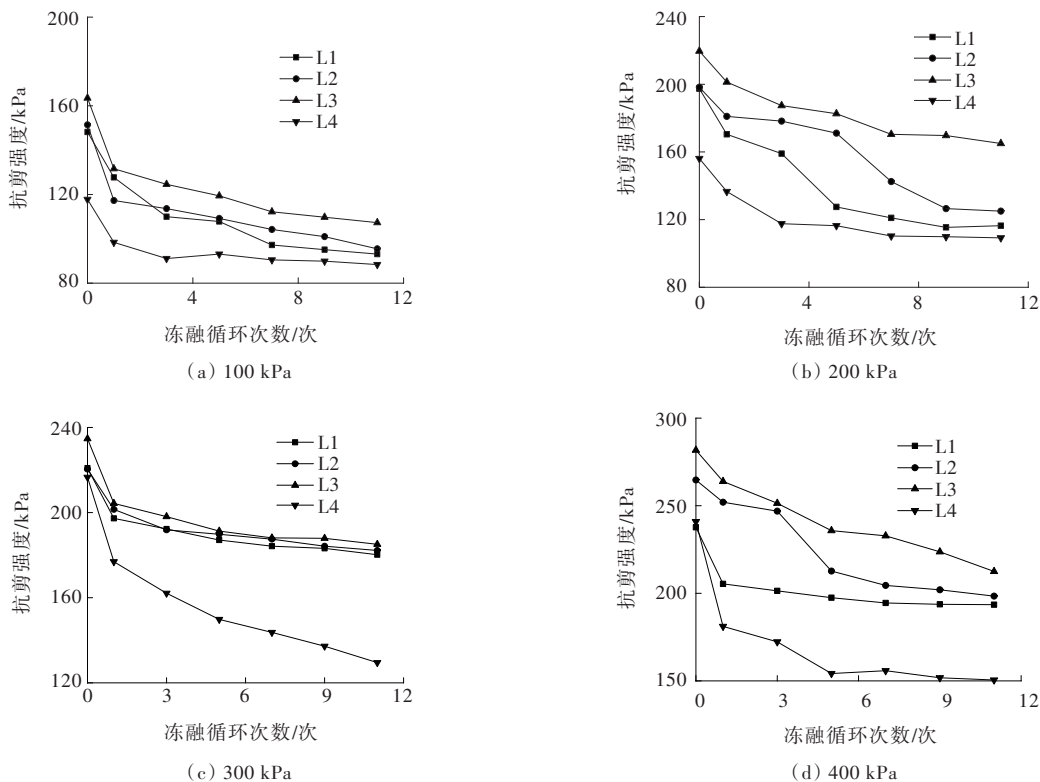


图3 不同竖向压力时土体抗剪强度与冻融循环次数关系

结构被完全破坏,抗剪强度趋于稳定。具体表现为,土体经历第1次冻融循环后抗剪强度大幅度下降,随着冻融次数的增加抗剪强度下降幅度较小,在经历7次冻融循环后抗剪强度衰减幅度趋于平稳。这主要是因为土体在冻融过程中,土粒间水的不断融化重结晶,盐渍土中的水分、易溶盐盐分不断融化重结晶的变化<sup>[10-11]</sup>,导致土骨架受力发生变化,致使土的孔隙体积和粒间间距不断改变,土体的密实度受到影响,但当冻融次数达到一定值后土的内部结构已经被破坏,冻融循环过程中孔隙和土骨架微观结构变化较小。故冻融初期土体抗剪强度下降剧烈,当进行到7次冻融循环后抗剪强度趋于稳定。

### 3.2.2 冻融循环作用对土体抗剪强度参数的影响

根据摩尔库仑理论计算得到土样的黏聚力和内摩擦角,并绘制黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的关系曲线(图4、5)。

由图4可以看出:不同粉煤灰掺量的土样,在经历冻融循环的过程中,黏聚力均呈现出先逐渐降低后趋于稳定的变化规律。在经历1次和3次冻融循环后,土体黏聚力下降幅度较大,当冻融循环次数达到7次时黏聚力趋于稳定。其中当土体经历3次冻融循环后,黏聚力下降幅度最大。在1~3次冻融循

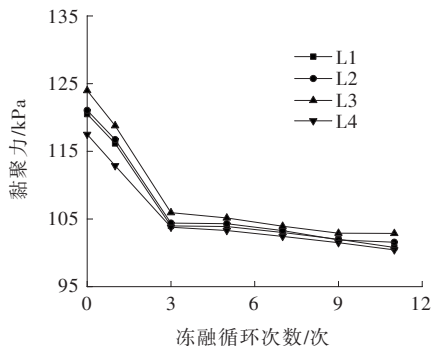


图4 黏聚力与冻融循环次数关系

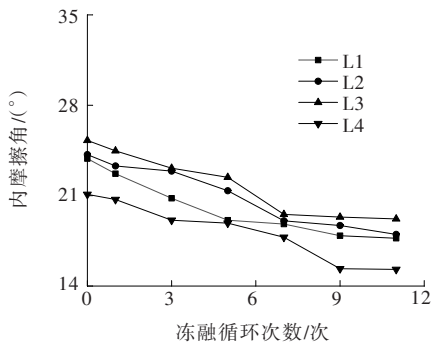


图5 内摩擦角与冻融循环次数关系

环过程中,掺加粉煤灰的土体黏聚力下降幅度大于素土的黏聚力下降幅度;在土体经历7个冻融循环后,掺加粉煤灰的土体与素土相比黏聚力变化更加



平稳。表明在冻融作用下,冻融循环会影响土体的黏聚力大小,冻融过程中颗粒联结方式和土骨架结构发生变化,土粒粒间间距发生改变,土体黏聚力降低;当冻融循环次数达到一定数量后,土体结构趋于稳定,结构不会显著变化,土体黏聚力趋于不变。同时,在盐渍土中掺加粉煤灰后,可以影响土体经历冻融循环后的黏聚力变化,且影响程度与粉煤灰的掺量相关。

由图5可以看出:冻融循环作用下,内摩擦角随着冻融循环次数的改变而改变,粉煤灰的掺加会改变内摩擦角-冻融循环次数曲线的变化规律。整体而言,粉煤灰掺量一定时,随着冻融次数的增加土样内摩擦角呈现下降的趋势,但经历相邻次数冻融循环的土样内摩擦角变化并不明显。为更好描述冻融循环条件下土样内摩擦角的变化,定义内摩擦角衰减比 $\alpha_{n-m}$ :

$$\alpha_{n-m} = \frac{C_n - C_m}{C_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_n$ 为土体经历 $n$ 次冻融循环后内摩擦角; $C_m$ 为土体经历 $m$ 次冻融循环后内摩擦角,且 $n > m$ 。

土体内摩擦角衰减比结果见表5。土体在1~7次冻融循环过程中,内摩擦角衰减比较大;经历7次

冻融循环以后,内摩擦角衰减比较小且变化趋于平稳。这与土体抗剪强度、黏聚力随冻融循环次数改变时的变化趋势有一定的相似性。虽然L1组 $\alpha_{5-3}$ 数据低于L1组 $\alpha_{3-1}$ 和 $\alpha_{9-7}$ ,但是结合各组内摩擦角衰减比变化情况分析,该数据并不影响整体变化规律,不排除试验误差以及人为因素导致的这种现象发生的可能。从整体变化情况考虑,掺加粉煤灰的土体内摩擦角衰减情况优于素土内摩擦角衰减情况,且随着粉煤灰掺量的增加,内摩擦角衰减比呈先减小后增加的变化规律;在掺加15%粉煤灰时,土体的内摩擦角衰减情况相对其他情况小。

表5 土样内摩擦角衰减比 %

编号	$\alpha_{1-0}$	$\alpha_{3-1}$	$\alpha_{5-3}$	$\alpha_{7-5}$	$\alpha_{9-7}$	$\alpha_{11-9}$
L1	4.90	7.73	1.20	5.78	4.72	0.33
L2	3.64	6.72	6.64	10.90	1.89	0.69
L3	3.20	5.48	3.07	12.80	1.07	0.72
L4	4.90	8.37	8.17	5.57	4.79	1.12

3.3 粉煤灰掺量对土体抗剪性能的影响

3.3.1 粉煤灰掺量对土体抗剪强度的影响

图6为土体抗剪强度与粉煤灰掺量关系曲线。

由图6可知:在各竖直压力、冻融循环次数一定的情况下,掺加较少粉煤灰后的土体抗剪强度有一

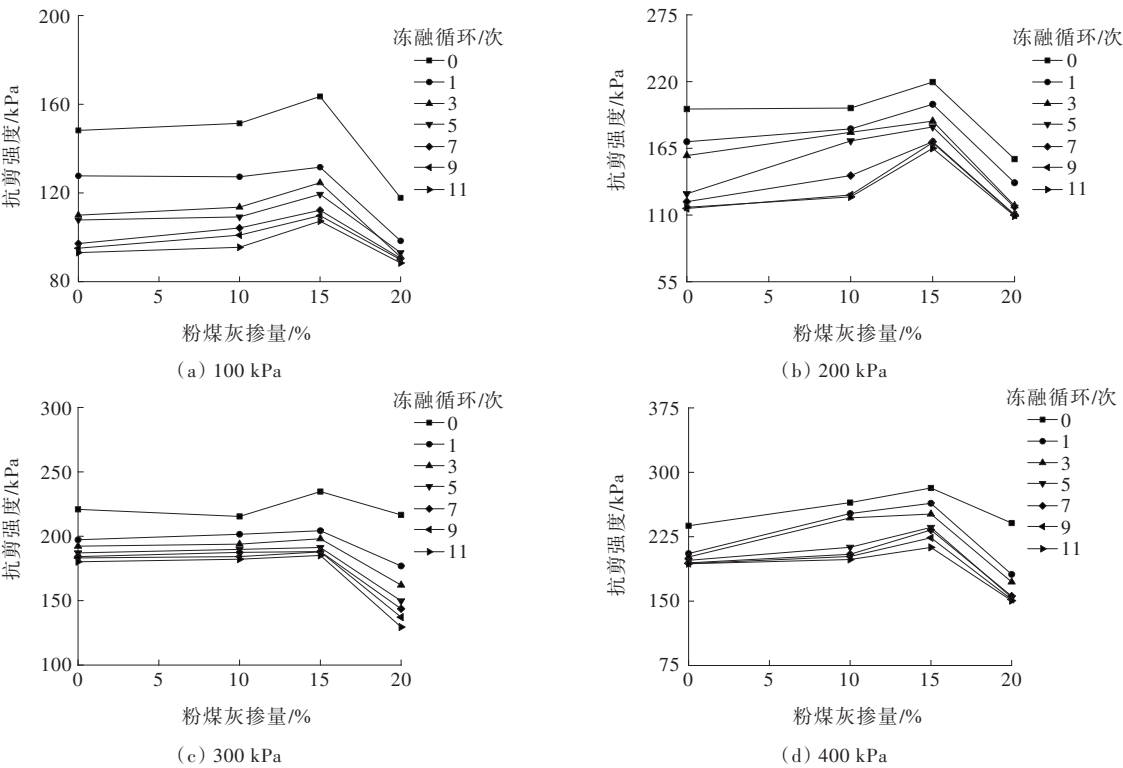


图6 抗剪强度与粉煤灰掺量关系

定程度提升;随着粉煤灰掺量的增加,土体抗剪强度呈现出先升高后降低的趋势。具体表现为:当粉煤灰掺量小于15%时,盐渍土的抗剪强度随着粉煤灰掺量的增加而增加,在粉煤灰掺量为15%时盐渍土的抗剪强度达到最大;继续增加粉煤灰掺量,土体的强度随着粉煤灰掺量的增加而降低。当粉煤灰掺量为20%时,土体的抗剪强度低于素土的抗剪强度,且随着竖直压力增大,该变化规律更加明显。粉煤灰掺量由0提升至10%时,盐渍土的抗剪强度的增加量小于粉煤灰掺量由10%提升至15%时的增加量。

### 3.3.2 粉煤灰掺量对土体抗剪参数的影响

图7、8分别为黏聚力、内摩擦角与粉煤灰掺量的关系曲线。

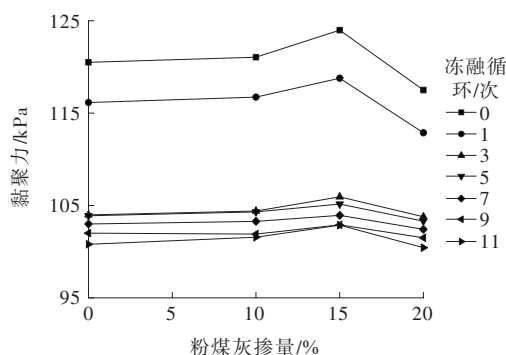


图7 黏聚力与粉煤灰掺量关系

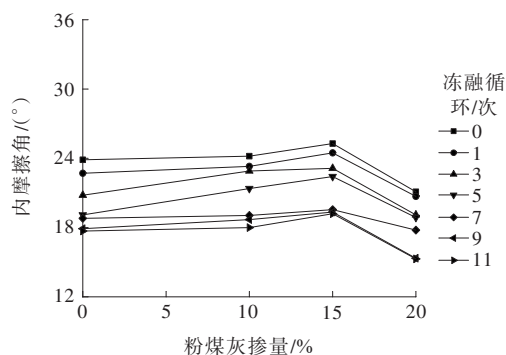


图8 内摩擦角与粉煤灰掺量关系

由图7可得:在冻融循环次数一定时,掺加少于15%粉煤灰后的盐渍土黏聚力有一定的提升,当粉煤灰掺量大于15%时,土体黏聚力下降且略低于未掺加粉煤灰盐渍土的黏聚力。当在盐渍土中掺加15%粉煤灰时,土体的黏聚力达到最大。盐渍土黏聚力随粉煤灰掺量的变化趋势与土体抗剪强度随粉煤灰掺量改变时的变化规律基本一致,这也在一定程度上解释了随着盐渍土中粉煤灰掺量的增加土体抗剪强度先增加后减小这一现象。

由图8可得:土体内摩擦角随着粉煤灰掺量的增加呈现出先增加后减小的变化趋势,这与已有研究结论相类似<sup>[12-13]</sup>。当粉煤灰掺量由0增加至10%时的内摩擦角增量小于掺量由10%增加至15%时的内摩擦角增量;当粉煤灰掺量增加至20%时土体内摩擦角呈现出下降的趋势。当土体经历的冻融循环次数发生变化时,仍存在该规律。当土体经历冻融循环作用次数不高于5次时,该变化趋势更加明显。

## 4 成果分析与讨论

盐渍土季冻区道路建设与维护中关注的主要问题是地基土体的强度与变形。季节性冻土区盐渍土的力学性质通常较差,如果直接使用这种材料作为基础的填充材料,可能会出现多种类型工程问题<sup>[14]</sup>,如道路翻浆、融沉、路基沉降和边坡稳定性降低等问题。试验得出冻融循环作用下,盐渍土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角会随着冻融循环次数的改变而改变。对于不同粉煤灰掺量的盐渍土,当经历冻融循环0~7次时,内摩擦角随着冻融循环次数的增加下降较快,当经过7次以上冻融循环后,内摩擦角下降缓慢,变化趋于稳定。这是因为在冻融循环过程中盐渍土中的水会因温度变化而发生相变,水结晶体积膨胀会挤压土骨架<sup>[15]</sup>,改变土骨架原有结构。冻融过程中,盐渍土中的硫酸盐也会结晶体积发生膨胀,有研究证明第1次冻融循环过程导致水的体积发生较大膨胀,而硫酸钠的结晶也会使盐的体积明显增加<sup>[16-17]</sup>;另一方面,由于冻融过程中盐渍土内部存在温度差异,当试样被放置于低温环境中,样品表面和中心之间会产生温度梯度,根据温度梯度引起的未冻水转移理论,样品中心的未冻水将被转移到表面,可溶性硫酸钠将随水转移到样品表面;在室温解冻过程中,表面温度高于中心,该温度梯度与试样冷冻时温度梯度相反,盐渍土表面的水和盐就会转移到样品的中心。冻融过程中水盐迁移造成的迁移力也会对试样内部的结构造成影响,不断削弱土壤颗粒之间的结合力,导致黏聚力下降,内摩擦角发生变化。在这个过程中土颗粒受到迁移力、盐结晶和水结晶的挤压影响重新排列,随着冻融循环次数的增加,土壤颗粒逐渐形成新的稳定结构,改变了颗粒之间的接触点和接触方式,冻融循环对结合力和内摩

擦角的影响逐渐减小。当盐渍土经历5次冻融循环后土颗粒大致完成重新排列,结构趋于稳定。

试验结果表明:在盐渍土中掺加粉煤灰可以改变土体的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角,随着粉煤灰掺量的增加抗剪强度、黏聚力和内摩擦角呈现出先增加后减小的变化趋势,当土体中掺加15%的粉煤灰时对于该类盐渍土有较好的改良效果。这是因为粉煤灰由细小的粉末状颗粒组成,一般情况下粉煤灰粒径为10~90  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>,远小于土颗粒粒径,对于盐渍土内部结构具有良好的填充效应。在一定介质环境下能够发生水解水化反应,离子交换作用降低了土粒的分散性,使土体密实。将粉煤灰掺入盐渍土后,在土中水的作用下反应生成二价钙、镁和氢氧根离子<sup>[19]</sup>。土颗粒吸附二价钙、镁离子发生离子交换反应,降低了盐渍土颗粒的分散性,使得土体容易稳定成型。反应形成的 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{MgCO}_3$ 强度较高难溶于水,能增加土粒间的联结。此外,凝胶作用形成的含水硅酸钙等凝胶体硬化在土体原有颗粒间形成网状联结,提高盐渍土土体强度。在一定范围内,增加粉煤灰掺量对提高盐渍土强度有较好的效果,当粉煤灰掺量达到一定值,继续掺加粉煤灰掺量,会大大改变盐渍土原有的成分和结构组成,粉煤灰本身的物理力学性质会对土体强度造成较大影响,过量掺加粉煤灰可能导致土体强度下降<sup>[12-13]</sup>。

## 5 结论

(1) 冻融循环会影响盐渍土抗剪强度和相关强度参数,随着冻融次数的增加,改良盐渍土黏聚力和内摩擦角均呈现先波动减小后趋于平缓的总体下降趋势。

(2) 在盐渍土中掺加粉煤灰后,一方面可以通过孔隙填充效应提高土体密实度;另一方面,化学反应产物可以降低土颗粒分散性,同时反应得到的 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{MgCO}_3$ 对土颗粒具有胶凝作用,增加土颗粒间联结性,提高土体强度。

(3) 改良后的土体强度与粉煤灰掺量有关,当粉煤灰掺量为15%时,土体的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角数值最高,过量掺加粉煤灰会导致盐渍土强度下降。

## 参考文献:

[1] 陈康亮,刘长武,杨伟峰,等.基于生石灰和粉煤灰改良

硫酸盐渍土的强度特性[J].科学技术与工程,2020,20(26):10888-10893.

[2] 陈炜韬,王鹰,王明年,等.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2343-2347.

[3] WAN X S, LIU E L, QIU E X, et al. Study on phase changes of ice and salt in saline soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 172: 102988.

[4] 刘胜,陈志波,陈伟文,等.粉煤灰改良花岗岩残积土试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),2018,46(5):712-717.

[5] KAMEI T, AHMED A, SHIBI T. Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 82: 124-129.

[6] 巩伟,焦淑贤,汪日灯.改良滨海盐渍土路基填料试验研究与工程应用[J].中外公路,2019,39(5):242-246.

[7] 建设部综合勘察研究设计院.岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.

[8] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

[9] 王峻,王谦,王平,等.粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J].岩土工程学报,2013,35(S1):156-160.

[10] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[11] 包卫星,杨晓华.冻融条件下盐渍土抗剪强度特性试验研究[J].公路,2008,53(1):5-10.

[12] 杨晓松,刘井强,党进谦.粉煤灰改良氯盐渍土工程特性试验研究[J].长江科学院院报,2012,29(11):82-86.

[13] 陈洁.粉煤灰改良硫酸盐渍土工程特性的试验研究[D].银川:宁夏大学,2015.

[14] 安利强,杨勃,严福章,等.盐渍土输电铁塔基础耐久性可靠度敏感性研究[J].应用力学学报,2016,33(3):459-465,548.

[15] 杨胜波.冻融循环对改良粉土力学特性影响的试验研究[J].中外公路,2018,38(5):270-274.

[16] 刘毅,刘杰,陈杰.极旱荒漠盐湖区盐渍土微结构对强度特性的影响分析[J].中外公路,2013,33(4):41-45.

[17] BING H, HE P. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(2):431-436.

[18] SARKAR A, RANO R, MISHRA K K, et al. Particle size distribution profile of some Indian fly ash: A comparative study to assess their possible uses[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(11):1221-1238.

[19] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(3):327-363.