

分类号：  
学号：20232110054

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学 硕士学位论文



## 冻融循环条件下风积沙改良盐渍土力学特性及 盐冻胀变形规律试验研究

学位申请人	何亚坤
指导教师	刘星炎 副教授 张景 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	建筑与土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子  
2026年05月

分类号：  
学号：20232110054

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 冻融循环条件下风积沙改良盐渍土力学特性及 盐冻胀变形规律试验研究

学位申请人	何亚坤
指导教师	刘星炎 副教授 张景 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	建筑与土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子  
2026年05月

**Experimental Study on Mechanical Properties and Salt Frost Heaving  
Deformation Behavior of Aeolian Sand-Modified Saline Soil under  
Freeze-Thaw Cycles**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

**By**

**He Yakun**

**(Architecture and Civil Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Xingyan

Senior Engineer. Zhang jing

May, 2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：何亚坤 时间：2026年5月20日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：何亚坤 时间：2026年5月20日

导师签名：刘星兵 时间：2026年5月20日

## 摘要

针对寒旱地区硫酸盐渍土在冻融环境下因盐胀、冻胀引发的路基病害问题，风积沙改良被视为一种经济有效的改良手段。然而，现有研究对改良盐渍土在冻融循环作用下的宏微观力学响应机制尚不明确，尤其缺乏对多因素耦合影响及不同粒径改良效果的系统认识。为此，本文以风积沙改良硫酸盐渍土为研究对象，通过开展冻融循环试验、侧限压缩试验、扫描电镜观测及三轴剪切试验，系统探究了其力学特性演化规律与微观结构损伤机理。试验设置了不同含盐量、风积沙掺量及粒径梯度，模拟了多次冻融循环及不同围压条件下的力学响应，并结合邓肯-张模型，修正了考虑冻融与盐分耦合作用的本构模型与体变方程。主要研究工作及结论如下：

(1) 针对风积沙改良硫酸盐渍土在冻融环境下的宏微观力学行为，开展了系统的试验研究。通过冻融循环试验，观测了不同含盐量（0%、1.6%、3%）和风积沙掺量（0%、5%、10%、20%）下试样的表面劣化及骨架变形规律；利用扫描电镜从微观尺度揭示了改良机理及冻融损伤机制；并采用正交试验设计，考察了冻融次数、含盐量、风积沙掺量和含水率对侧限压缩特性的影响。结果表明：含盐量是控制土体冻融损伤的首要因素，高含盐量会加剧盐胀和融沉；掺入适量风积沙（10%）能有效优化孔隙结构、抑制盐分迁移，显著提升抗冻性能；各因素对压缩变形的影响排序为含盐量 > 冻融次数 > 风积沙掺量 > 含水率。研究结果为阐述风积沙改良盐渍土在冻融环境中的性能演变提供了数据支撑。

(2) 针对冻融循环条件下风积沙改良硫酸盐渍土的力学特性，开展了固结排水三轴剪切试验，系统研究了含盐量、风积沙掺量、冻融循环次数及围压对土体强度与变形的影响。结果表明：冻融循环使应力-应变曲线弹性阶段斜率降低，抗剪强度下降，且含盐量越高降幅越显著；抗剪强度随风积沙掺量增加呈先增后减趋势，掺量为 10% 时达到峰值，改良效果最优；围压增大可提高强度并抑制侧向变形，体变表现为剪缩特征；冻融循环主要削弱黏聚力（降幅达 34.16%），对内摩擦角影响较小。基于邓肯-张模型，引入综合考虑冻融次数与含盐量的骨架变形参量  $X(N, T)$ ，并以此建立了修正的应力-应变本构模型及体变模型，模型预测与试验值吻合良好，验证了其可靠性。研究结果为冻融区盐渍土工程提供了理论依据。

(3) 为探究不同粒径风积沙对硫酸盐渍土的改良效果及其在冻融循环作用下的力学响应，选取  $< 0.075 \text{ mm}$ 、 $0.18\sim 0.22 \text{ mm}$  及  $0.22\sim 0.5 \text{ mm}$  三种粒径范围的风积沙，分别按 0%、5%、10%、15%、20% 的质量比例掺入含盐量为 3% 的硫酸盐渍土中，对冻融循环前后的试样开展不固结不排水三轴压缩试验。结果表明：最优掺量随粒径增大而递减，大粒径（ $0.22\sim 0.5 \text{ mm}$ ）为 5%，中粒径（ $0.18\sim 0.22 \text{ mm}$ ）为 10%，冻融前后均保持稳定；小粒径（ $< 0.075 \text{ mm}$ ）冻融前最优掺量为 15%，冻融后升至 20%，表现出冻融强化特征。在最优掺量下，中粒径改良土的抗剪强度优于大、小粒径风积沙，因其

比表面积大、分布均匀，能形成更充分的应力传递网络。应力-应变曲线形态受风积沙掺量、围压和冻融循环共同控制：随掺量增加，曲线由硬化型向软化型转变；高围压抑制软化；冻融循环削弱结构性，使破坏模式由脆性向塑性过渡。黏聚力和内摩擦角均随风积沙掺量增加先升后降，在各自最优掺量下达到峰值。研究为盐渍土路基的粒径优选提供了依据。

**关键词：**风积沙；三轴试验；邓肯-张模型；体变方程；不同粒径

## Abstract

In response to the subgrade diseases caused by salt expansion and frost heave of sulfate saline soil in cold and arid regions under freeze-thaw environment, aeolian sand modification is regarded as an economical and effective improvement method. However, existing research on the macro-micro mechanical response mechanism of modified saline soil under freeze-thaw cycles remains unclear, and there is a particular lack of systematic understanding of the coupled effects of multiple factors and the modification effects of different particle sizes. To this end, this study takes aeolian sand-modified sulfate saline soil as the research object, and systematically investigates the evolution law of its mechanical properties and the damage mechanism of its microstructure by conducting freeze-thaw cycle tests, confined compression tests, scanning electron microscopy observations, and triaxial shear tests. The experiments set different salt contents, aeolian sand dosages, and particle size gradients to simulate the mechanical responses under multiple freeze-thaw cycles and different confining pressures. Combined with the Duncan-Chang model, the constitutive model and volumetric strain equation considering the coupling effect of freeze-thaw and salt were modified. The main research work and conclusions are as follows:

(1) Systematic experimental research was conducted on the macro-micro mechanical behavior of aeolian sand-modified sulfate saline soil under freeze-thaw environment. Through freeze-thaw cycle tests, the surface deterioration and skeleton deformation patterns of specimens with different salt contents (0%, 1.6%, 3%) and aeolian sand dosages (0%, 5%, 10%, 20%) were observed. The modification mechanism and freeze-thaw damage mechanism were revealed at the microscopic scale using scanning electron microscopy. Furthermore, the orthogonal experimental design was adopted to investigate the effects of freeze-thaw cycles, salt content, aeolian sand dosage, and water content on the confined compression characteristics. The results show that salt content is the primary factor controlling freeze-thaw damage of the soil, and high salt content aggravates salt expansion and thaw settlement. Incorporating an appropriate amount of aeolian sand (10%) can effectively optimize the pore structure, inhibit salt migration, and significantly enhance the frost resistance. The order of influence of various factors on compressive deformation is salt content > freeze-thaw cycles > aeolian sand dosage > water content. The research findings provide data support for elucidating the performance evolution of aeolian sand-modified saline soil in freeze-thaw environments.

(2) To investigate the mechanical properties of aeolian sand-modified sulfate saline soil under freeze-thaw cycles, consolidated-drained triaxial shear tests were conducted to systematically examine the effects of salt content, aeolian sand dosage, number of freeze-thaw cycles, and confining pressure on the strength and deformation of the soil. The results indicate that freeze-thaw cycles reduce the slope of the elastic stage of the stress-strain curve and decrease the shear strength, with the reduction being more significant at higher

salt contents. The shear strength initially increases and then decreases with the increase of aeolian sand dosage, reaching its peak value at a dosage of 10%, which represents the optimal improvement effect. Increasing confining pressure enhances the strength and suppresses lateral deformation, with the volumetric deformation exhibiting shear contraction characteristics. Freeze-thaw cycles mainly weaken the cohesion (with a reduction of up to 34.16%), while having a relatively minor effect on the internal friction angle. Based on the Duncan-Chang model, a skeleton deformation parameter  $X(N, T)$  that comprehensively considers the number of freeze-thaw cycles and salt content was introduced, and a modified stress-strain constitutive model and volumetric strain model were established. The model predictions are in good agreement with the experimental values, verifying their reliability. The research findings provide a theoretical basis for saline soil engineering in freeze-thaw regions.

(3) To investigate the modification effects of aeolian sand with different particle sizes on sulfate saline soil and their mechanical responses under freeze-thaw cycles, aeolian sand with three particle size ranges of  $< 0.075$  mm, 0.18–0.22 mm, and 0.22–0.5 mm was selected and mixed into sulfate saline soil with a salt content of 3% at mass ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%, respectively. Unconsolidated-undrained triaxial compression tests were conducted on specimens before and after freeze-thaw cycles. The results show that the optimal dosage decreases with increasing particle size: 5% for large particle size (0.22–0.5 mm) and 10% for medium particle size (0.18–0.22 mm), both remaining stable before and after freeze-thaw cycles; for small particle size ( $< 0.075$  mm), the optimal dosage is 15% before freeze-thaw and increases to 20% after freeze-thaw, exhibiting freeze-thaw strengthening characteristics. Under the optimal dosage, the shear strength of the medium particle size modified soil is superior to that of the large and small particle size aeolian sand, attributed to its larger specific surface area and uniform distribution, which enable a more effective stress transfer network. The morphology of the stress-strain curve is jointly controlled by aeolian sand dosage, confining pressure, and freeze-thaw cycles: as the dosage increases, the curve transitions from strain-hardening to strain-softening; high confining pressure suppresses softening; freeze-thaw cycles weaken the soil structure, leading to a transition in failure mode from brittle to plastic. Both cohesion and internal friction angle initially increase and then decrease with the increase of aeolian sand dosage, reaching their peak values at the respective optimal dosages. This study provides a basis for optimizing particle size selection in saline soil subgrades.

**Key words:** Aeolian sand; Triaxial test; Duncan-Chang model; Volume change equation; Different particle sizes

# 目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 冻融循环作用下盐渍土力学特性研究.....	2
1.2.2 盐渍土盐冻胀变形研究.....	5
1.2.3 盐渍土固化改良研究.....	6
1.2.4 风积沙的工程应用.....	8
1.3 主要研究思路和内容.....	9
第 2 章 地区工程地质概况及试验材料的基本性质.....	12
2.1 研究区概况调研.....	12
2.1.1 自然地理概况.....	12
2.1.2 研究区取样.....	14
2.2 试验材料的基本性质.....	14
2.3 试验方案.....	17
2.3.1 冻融循环试验.....	17
2.3.2 SEM 试验.....	19
2.3.3 侧限压缩试验.....	20
2.3.4 三轴剪切试验.....	22
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 冻融循环条件下风积沙改良盐渍土盐冻胀变形分析.....	26
3.1 引言.....	26
3.2 试验结果分析.....	26
3.2.1 试样上表面劣化分析.....	26
3.2.2 试样骨架变形分析.....	28
3.2.3 SEM 分析.....	33
3.2.4 侧限压缩结果分析.....	37
3.3 讨论.....	40
3.4 本章小结.....	41
第 4 章 冻融循环条件下风积沙改良盐渍土力学特性与本构模型研究.....	43

4.1 引言 .....	43
4.2 试验结果分析 .....	43
4.3 本构模型构建与验证 .....	47
4.3.1 应力-应变模型建立与参数确定 .....	47
4.3.2 体变模型的建立与参数确定 .....	51
4.3.3 模型验证 .....	54
4.4 讨论 .....	56
4.5 本章小结 .....	57
第 5 章 冻融循环条件下不同粒径风积沙改良盐渍土力学特性研究 .....	59
5.1 引言 .....	59
5.2 试验结果分析 .....	59
5.2.1 大粒径 (0.22~0.5 mm) 改良试样试验结果分析 .....	59
5.2.2 中粒径 (0.18~0.22 mm) 改良试样试验结果分析 .....	60
5.2.3 小粒径 (< 0.075 mm) 改良试样试验结果分析 .....	61
5.2.4 冻融循环条件下不同粒径风积沙最优掺量对比分析 .....	62
5.3 改良盐渍土压缩变形与抗剪强度参数的演化规律分析 .....	64
5.3.1 冻融循环作用下改良盐渍土的压缩变形分析 .....	64
5.3.2 试验条件对应力-应变曲线形态的影响分析 .....	66
5.3.3 冻融循环作用下改良盐渍土强度参数的变形规律分析 .....	67
5.4 讨论 .....	69
5.5 本章小结 .....	70
第 6 章 结论与展望 .....	72
6.1 结论 .....	72
6.2 展望 .....	73
参考文献 .....	74
致谢 .....	82
作者简介 .....	84

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

盐渍土指易溶盐含量大于 0.3%，并具有溶陷性和盐胀性的一类特殊土体。我国盐渍土分布范围广泛，按照盐类组成可划分为氯化盐渍土、硫酸盐渍土和碳酸盐渍土三种类型，工程中常引发溶陷、盐胀和腐蚀等病害<sup>[1-3]</sup>。在外界环境条件变化时，土中易溶盐发生固—液相态转换，引起土体工程性质劣化。当土体含水率较低时，易溶盐以结晶态填充于土粒间，起到骨架支撑作用，使土体保持较高强度；而当降雨、灌溉等外部水分进入后，盐晶体溶解导致孔隙结构重组，土体强度快速下降，进而引发融陷。在负温环境下，水分和盐分迁移加剧，除冻胀效应外，盐分结晶还会诱发盐胀，温度因此成为影响盐渍土物理力学及化学行为的关键因素。此外，盐渍土中富含吸附性阳离子，持水能力较强，进一步削弱土体强度；同时，冰盐析出引起的离子迁移与盐溶液扩散，对钢筋混凝土结构及路基等产生腐蚀作用，从而影响工程设施的长期稳定性。

新疆是我国盐渍土分布范围最广的省份，其盐渍土主要分布于河流冲积平原，类型以硫酸盐和氯化物盐渍土为主。区域内同时发育多年冻土和季节性冻土，气候条件复杂，表现为昼夜温差大、蒸发作用强烈。在全球气候变暖背景下，温度与水分的变化共同驱动了盐渍土中冻胀融沉与盐渍化过程的相互强化，进一步诱发盐胀、溶陷、吸湿软化及侵蚀破坏等多种灾害（图 1-1a, 1-1b）。其中，硫酸盐盐渍土因盐胀问题尤为突出，已对当地机场、道路及水利工程等基础设施造成了显著的盐冻胀耦合破坏<sup>[4-6]</sup>。



(a) 阿拉尔地区路基盐冻胀变形图



(b) 阿克苏地区路基盐冻胀变形图

图 1-1 路基盐冻胀变形图

Fig. 1-1 Subgrade salt frost heave deformation diagram

针对盐渍土引发的工程危害,有必要在季节性冻融循环背景下开展其改良利用研究。我国风积沙资源储量丰富,将其合理应用于工程建设,为缓解河沙资源紧张局面提供了可行路径。新疆地区盐渍化软弱土分布广泛,工程病害频发,而传统砂砾料处治成本偏高,换土垫层方案亦存在局限性,因此,开展盐渍土与风积沙复合固化处理研究,具有重要的工程实践价值。目前,石灰作为常用盐渍土固化材料,可在一定程度上提高土体强度,但由于氯盐未参与反应,固化土体仍保留吸湿软化特性,难以满足高水稳定性要求的工程场景。粉煤灰常与石灰或水泥复掺使用,但固化土在浸水后强度下降明显,水稳定性能改善有限。风积沙虽颗粒细、结构松散、粘聚力弱,导致其基本物理力学性能偏低、抗剪强度不足,但其良好的水稳定性、均匀的沉降特性及受季节影响小等优点,仍值得重点关注。

在季节性冻融作用显著的新疆地区,探索风积沙对盐渍土的改良利用,兼具理论研究价值与工程实践意义。风积沙的掺入有助于改善土体颗粒级配,抑制盐分迁移路径,从而减弱盐胀与冻胀效应;同时,其良好的水稳定性可有效弥补传统固化材料在浸水条件下强度衰减的不足。该研究不仅推动了“以沙治盐”的资源化利用路径,也为寒旱区盐渍土路基的耐久性设计提供了理论支撑。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 冻融循环作用下盐渍土力学特性研究

当前针对冻融循环影响下盐渍土力学特性的研究,主要集中于细观结构演化及抗压、抗剪等基本力学性能的变化规律。常规研究方法为:在设定初始条件基础上制备盐渍土试样,经历多次冻融循环后进行力学测试与细观结构分析,从宏观与微观角度综合探讨冻融作用机制。由于盐渍土中的盐分在冻融过程中反复发生结晶与溶解,细观结构随之改变,从而引起力学性能变化,并最终导致工程性质逐渐劣化。

#### (1) 土的细观结构特性研究

国外研究起步较早,主要聚焦于冻融循环与盐分耦合作用下土体孔隙结构的演化机制。通过压汞法、X 射线成像等技术手段,揭示了冻融作用导致土体孔隙呈双峰分布,超微孔隙向小孔隙转化的规律,明确了盐分类型与含量对孔隙结构复杂化的控制作用。Edwin 等人<sup>[7]</sup>指出,冻融循环会导致土体结构破坏,进而改变盐渍土的渗透性能。Viklander<sup>[8]</sup>提出了残余孔隙比的概念,指出冻融作用后土体的孔隙比会趋于稳定。Steiger 等人<sup>[9]</sup>探讨了硫酸钠晶体的析出过程及其驱动力。Derluyn<sup>[10]</sup>结合 X 射线成像技术与孔

隙力学模型,研究了盐分在冻融条件下的迁移规律。Wang 等人<sup>[11]</sup>采用压汞法研究了不同盐分含量与类型的盐渍土在冻融循环后的孔隙结构,结果表明,冻融后土体孔隙呈双峰分布,孔隙率随含盐量增加而增大;硫酸钠盐渍土含盐量超过 1%时,大孔含量显著增加,孔隙结构趋于复杂。Xu 等人<sup>[12]</sup>通过压汞法研究发现,冻融循环可改变盐碱土的微观孔隙结构,促使超微孔( $<0.05\ \mu\text{m}$ )和微孔( $0.05\sim 2\ \mu\text{m}$ )向小孔( $2\sim 10\ \mu\text{m}$ )转化,从而提高土壤饱和导水率;高含水率会增强这一效应,而高干密度则起抑制作用。Xia 等人<sup>[13]</sup>通过微观试验发现,冻融循环通过改变孔隙分布特征(减少团聚体内孔隙、增加团聚体间孔隙)显著影响苏打盐渍土的可蚀性;可溶盐含量对土体抗崩解能力呈双向影响,其阈值由双电层厚度变化主导<sup>[13]</sup>。

国内盐渍土微观结构研究虽起步较晚,但已取得显著进展。陈炜韬等人<sup>[14]</sup>通过 SEM 观测发现,冻融循环使盐渍土孔隙特征改变:前两次循环后孔隙面积和大孔隙增加,第三次后粒间孔隙增多但总孔隙面积未减,导致密实度降低。张莎莎等人<sup>[15]</sup>研究表明,粗粒盐渍土经 3~9 次冻融,结构逐渐疏松,孔隙增大,颗粒由胶结连接变为点接触,最终骨架架空,且 9 次后出现热筛效应,小颗粒回落填充大颗粒孔隙。杨晓华等人<sup>[16]</sup>对比分析指出,粗粒盐渍土冻融后结构疏松、孔隙增大、骨架架空,9 次后大颗粒破坏、小颗粒回落;细粒盐渍土孔隙率增大,但盐晶体析出胶结粒间,增强粘结。吕擎峰等人<sup>[17]</sup>发现,20°C 改性水盐渍土小颗粒团聚强化胶结,改性温度升高则团聚减少、小孔隙增多;冻融后微观结构破坏,孔隙连通性增强,强度降低。李宏波等人<sup>[18]</sup>采用压汞和 SEM 分析,固化超硫酸盐渍土孔隙率降低,大孔隙减少,中小孔隙增多,分形维数增大,水化产物 C-S-H 和 AFt 形成网状结构增强胶结。余云燕等人<sup>[19]</sup>通过核磁共振与 SEM 揭示,冻融使硫酸盐渍土微、小孔隙减少,中、大孔隙增多,形成贯通裂隙,颗粒结构由片层状变絮状。程建军等人<sup>[20]</sup>利用工业 CT 技术观察到,冻融作用下盐渍土路基独立孔隙形态、体积和位置变化显著,含水率低于 6%时独立孔隙数随冻融增加,高于 6%则演变为联通孔隙。余炜等人<sup>[21]</sup>通过 SEM 分析表明,冻融使硫酸盐渍土-混凝土界面土颗粒破碎、孔隙率增大,6 次后孔隙面积变化趋缓但粒间小孔隙增多,颗粒排列均匀,界面强度劣化<sup>[21]</sup>。

## (2) 土的强度特性研究

国外学者通过无侧限压缩、三轴剪切等多种力学试验,系统研究了温度、盐度、冻融循环、含盐量及围压等因素对各类盐渍土抗剪强度与变形特性的影响规律。Hivon 等人<sup>[22]</sup>通过无侧限压缩试验发现,冻结盐渍土强度随温度降低而增大,随盐度升高显著减小;粗粒土呈脆性破坏,细粒土呈应变硬化;强度与未冻水含量呈幂律关系,未冻水含量是控制强度的关键因素。Arenson 等人<sup>[23]</sup>综述表明,冻结盐渍土强度随盐度增加而降低,随温度降低而增大;高应变率下呈脆性破坏,低应变率下蠕变主导;含冰量低于 40%

时颗粒接触增强强度。Liao 等等人<sup>[24]</sup>通过常规三轴试验发现, 硫酸盐渍土冻结抗剪强度随含盐量增加先减后增, 最小值在含盐量 0.5% 时; 强度随围压增加先增大后因高压融冰而增速减缓。Han 等人<sup>[25]</sup>发现, 盐渍土抗剪强度随冻融循环次数呈降低-稳定-再降低三阶段变化, 前 10 次显著下降, 10~60 次稳定, 120 次后再降; 含盐量 2.0% 为强度变化阈值。Zhang 等人<sup>[26]</sup>通过三轴压缩试验表明, 冻融循环后高氯盐渍土抗剪强度显著增大, 而高硫酸盐渍土大幅降低, 两者均存在残余强度状态。Xu 等人<sup>[27]</sup>发现, 冻融循环使盐渍原状黄土抗剪强度显著降低, 黏聚力呈指数衰减且主要发生在前 1~2 次循环; 含水量和含盐量越高, 劣化越明显, 强度降低与结构损伤密切相关。Lyu 等人<sup>[28]</sup>通过不排水三轴剪切试验指出, 冻结盐渍黏土抗剪强度随温度降低而增大、随盐度增加而减小, 且受围压和应变率影响; 黏土强度变化较砂土更平缓。Qiu 等人<sup>[29]</sup>研究发现, 碳酸盐渍土抗剪强度随冻融次数增加而显著降低, 前 15 次劣化最明显; 含盐量越高, 强度降幅越大; 应力-应变曲线随含盐量增加由应变软化转变为应变硬化。Ding 等人<sup>[30]</sup>通过试验发现, 固化盐渍土抗压强度随盐分增加而降低, 损失率达 16.2%~75.65%; 冻融与盐蚀耦合作用显著加剧抗剪强度劣化。

国内学者针对盐渍土力学特性开展了大量试验研究, 揭示了盐分、冻融循环、温度及耦合作用对强度的影响规律。王海涛等人<sup>[31]</sup>基于三轴固结排水剪切试验发现, 氯盐渍土和硫酸盐渍土的黏聚力与内摩擦角均随冻融循环次数增加而减小, 其中硫酸盐渍土衰减更显著, 9 次冻融后黏聚力分别降低 45.7% 和 58.4%。刘军勇等人<sup>[32]</sup>通过直剪和无侧限抗压试验发现, 察尔汗盐湖氯盐渍土强度随含盐量增加持续提高, 强度显著变化的含盐量拐点为 45.74%, 与新疆板块状盐渍土存在最佳含盐量峰值的规律不同。赵福堂等人<sup>[33]</sup>通过动三轴试验发现, 低温冻结盐渍土破坏动应力随温度降低显著增大、随围压增大线性增大, 动荷载频率影响较弱; 动黏聚力随温度降低呈指数增长, 动内摩擦角先增后减。许健等人<sup>[34]</sup>通过三轴剪切试验发现, 硫酸钠盐渍原状黄土破坏偏应力随冻融次数增加呈先快后慢的减速劣化, 随含盐量增加呈线性或加速劣化; 黏聚力变化规律相似, 内摩擦角无明显变化。罗崇亮等人<sup>[35]</sup>基于低温冻土三轴试验发现, 冻结盐渍土抗剪强度随冻结温度降低和冻结时间增加显著增大, 黏聚力及内摩擦角均提高, 其中黏聚力对温度更敏感; 主应力差与围压呈线性关系。包卫星等人<sup>[36]</sup>通过三轴剪切试验发现, 盐渍化风积沙抗剪强度随冻融循环次数增加而衰减, 含盐量越高衰减越快; 首次冻融后强度下降最显著。王中攀等人<sup>[37]</sup>基于 UU 三轴试验发现, 碳酸盐渍土不排水强度随冻融循环次数增加而降低, 前 3 次循环降幅最大。包卫星等人<sup>[38]</sup>通过三轴试验发现, 伊犁盐渍化黄土抗剪强度随冻融循环次数增加而衰减, 含盐量越高衰减越显著; 应力-应变曲线随含盐量增加由软化型向硬化型转变。郑方等人<sup>[39]</sup>通过三轴剪切试验发现, 乌兹别克斯坦盐渍土破坏强度随含盐量增加线性衰减, 随冻融循环次数增加呈对数衰减; 边坡安全系数随含

盐量和冻融次数增加而减小。张传鑫等人<sup>[40]</sup>通过三轴剪切试验发现,干湿-冻融耦合作用下黄土状盐渍土黏聚力呈强化-衰减-稳定三阶段演化:初期盐结晶使强度提升 19.61%,随后水-盐相变导致强度快速衰减,干湿 6 次、冻融 20 次后趋于稳定。

现有研究虽系统揭示了冻融循环下盐渍土细观结构演化与宏观力学性能的变化规律,但仍存在一定局限。在研究方法上,现有成果以静态观测为主要手段,缺乏对冻融过程中孔隙结构演变与盐分动态迁移的实时追踪,限制了对其演化机理的深入认识。同时,宏微观相结合的综合研究相对薄弱,如何将冻融循环引起的微观孔隙结构变化,如孔隙粗化、颗粒接触方式转变,与宏观力学行为如抗剪强度、压缩变形之间建立定量联系,仍有待进一步探索。

## 1.2.2 盐渍土盐冻胀变形研究

国外学者针对盐渍土的盐胀与冻胀变形问题开展了系统研究,重点关注盐分类型、分布形式、冻融循环及水热迁移等因素的影响。Darrow 等人<sup>[41]</sup>通过冻胀试验发现,改变土壤中的吸附阳离子类型显著影响其物理化学性质及冻胀敏感性;冻胀量主要取决于阳离子类型、未冻水含量及粘土矿物含量,且土体对盐处理的冻胀响应具有不可预测性。Sarsembayeva 等人<sup>[42]</sup>通过室内模拟试验发现,供应 NaCl 溶液的土样在第二个冻融循环中冻结锋面迁移速率降低,冰分凝和冻胀量减少;盐分在热梯度作用下向上迁移,表明除冰盐可改变路基土冻胀特性。Yang 等人<sup>[43]</sup>通过现场观测与试验发现,盐渍土地区城市道路路面损害以纵向裂缝和波浪变形为主,盐分分布与冻融循环密切相关;盐胀率随含盐量增大而增加,冻融循环加剧盐冻胀变形。Xiao 等人<sup>[44]</sup>研究发现,盐渍土冻结温度低于同浓度盐溶液,偏差随盐浓度增大;共晶温度随含盐量变化而非定值,影响盐胀与冻胀的变形机制,不同土质共晶温度差异显著。Shah 等人<sup>[45]</sup>通过冻融试验发现,孔隙水盐度增加显著降低土体冻胀敏感性:冻胀速率降低 77%,最大冻胀量减少 56.5%,冻结深度减小 40%以上;盐分迁移使上层未冻水含量增加,抑制冰透镜形成。Wang 等人<sup>[46]</sup>通过温循环试验发现,硫酸盐渍土盐胀变形主要发生在初始升降温阶段,随循环次数增加产生残余累积;盐胀量随含水率和盐-水比增大而增大;盐分随深度递减的分布形式产生最大盐胀变形和径向膨胀应变,均匀分布则产生较大收缩应变。Han 等人<sup>[47]</sup>通过试验与数值模拟发现,降雨入渗显著增强季冻区硫酸盐砾石冻融循环中的沉降变形,盐胀与冻胀发生温度约-8℃,变形敏感深度为 0~200 mm;水汽向上迁移与水分下渗共同作用破坏土体结构,导致松散沉降。

国内学者针对盐渍土的盐胀与冻胀变形开展了大量试验研究,揭示了盐分、压实度、冻融循环及温度等因素对冻胀特性的影响规律。王宁等人<sup>[48]</sup>通过冻胀试验发现,盐渍土

起始冻胀含水率随压实度增大而线性减小, 随含盐量增加整体呈增大趋势。研究建立了包含压实度参数的起始冻胀含水率经验公式, 揭示了盐分通过降低冰点、增加未冻水含量对冻胀起抑制作用, 为季冻区盐渍土工程防控提供理论依据。潘蕾等人<sup>[49]</sup>研究发现, 亚硫酸盐渍土各冻融周期盐-冻胀率呈先增后减的二次函数变化, 第4周期后开始降低。前4周期盐-冻胀增长呈先减速后加速趋势, 随含水率增大表现明显。干密度增大使各周期盐-冻胀率呈波动性变化, 表明盐-冻胀与土体结构状态密切相关。刘凯等人<sup>[50]</sup>研究发现, 亚氯盐渍土在冻融循环中盐胀量随温度降低而增加, 升温时有所回落但不恢复初始状态。盐胀具有显著累加效应, 最大达7.61 mm, 前4周期盐胀量约占总量的80%, 盐胀率随冻融次数增加而增大, 但增幅逐渐减小, 7周期后趋于稳定。巩丽丽等人<sup>[51]</sup>通过冻胀试验发现, 盐分对季节性冻土区路基土冻胀具有显著抑制作用, 相同条件下含盐量越大冻胀率越小。于天佑等人<sup>[52]</sup>发现细粒硫酸钠盐渍土盐胀与盐冻胀变化趋势一致, 在冻结温度至-5℃盐胀发展最快, 此后增长甚微; 盐胀占比随温度降低而减小, 随含盐量增加而增大, 冻结温度以上为100%, -3~-4℃降至50%, -10℃以下趋于稳定。朱杰等人<sup>[53]</sup>通过冻胀试验与数值模拟发现, 淤泥质盐渍土冻胀力随冷端温度降低、初始含水量增大而增强, 随上覆荷载和含盐量增加而减弱; 冻胀力稳定值与冻结温度呈线性, 与含水量、荷载、含盐率呈二次抛物线关系, 并建立四场耦合模型验证。康鑫睿等人<sup>[54]</sup>通过冻融循环试验发现, 固化处理可显著抑制季冻区盐渍土的冻胀与盐分迁移, 冻胀力衰减达65.0%, 冻胀量衰减达41.8%, 盐分迁移抑制效果超7倍, 且冻胀力在-10~0℃存在明显波动, 为渠道地基抗冻设计提供依据。

现有研究虽系统揭示了盐分类型、分布形式及冻融循环对盐渍土盐胀与冻胀变形的影响规律, 但仍存在一定局限。在研究方法上, 现有成果以阶段性测试为主, 难以在冻融过程中直接观测盐胀与冻胀变形的动态演化过程, 限制了对其发展规律的实时捕捉与深入认识。同时, 盐胀、冻胀及溶陷等多种变形机制的耦合作用研究不足, 各变形分量在总变形中的贡献比例尚不明确, 导致对盐渍土冻融变形机理的认识仍较为宏观。此外, 现有研究多侧重于单一因素分析, 含盐量、含水率、冻融循环次数及温度梯度等多变量对变形的综合影响规律尚不清晰, 各因素的交互作用机制缺乏系统揭示。难以为实际工程抗冻设计提供可靠的理论依据。

### 1.2.3 盐渍土固化改良研究

国外学者针对盐渍土的化学改良与生物加固开展了大量研究, 涉及生物炭改性、有机肥配施、微生物诱导矿化等技术。Cong 等人<sup>[55]</sup>采用微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良粗粒盐渍土, 发现处理后碳酸钙晶体填充孔隙, 显著提高无侧限抗压强度, 细粒含量过