

# 寒旱区硫酸盐渍土路基结构损伤破坏机理研究综述

张璐<sup>1</sup>, 杨保存<sup>1,2\*</sup>, 张勤玲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

<sup>2</sup>塔里木大学南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2021年12月13日; 录用日期: 2021年12月18日; 发布日期: 2022年1月13日

## 摘要

硫酸盐渍土在我国西北寒旱区分布广泛, 路基病害严重, 对道路工程建设不利。主要对外部环境作用对路基结构的变形影响及其损伤机理研究进行了综述。寒旱区的道路病害主因是土体的盐冻胀变形和水泥基材料在硫酸盐参与下的化学侵蚀。学者们探究了含盐量、含水量、压实度、温度等因素对路基盐胀的影响; 依据寒旱区地理气候特征, 模拟干湿循环和盐冻融循环作用研究了路基盐冻胀、强度、微观结构变化规律; 随着研究不断深入, 技术手段不断提高, 学者们利用COMSOL等有限元软件来模拟路基环境, 探究水、盐、温、力的多场耦合环境作用的盐渍土路基损伤破坏机理, 借助CT、SEM、XRD来观测结构内部微观变化特征。根据目前的研究成果, 今后可多做现场试验研究、结晶压力的定量研究和多场耦合作用模型建立的探究。

## 关键词

硫酸盐渍土, 路基结构, 干湿循环, 冻融循环, 多场耦合

# Review on Damage Mechanism of Sulphuric Acid Soil Roadbed Structure in Cold and Arid Regions

Lu Zhang<sup>1</sup>, Baocun Yang<sup>1,2\*</sup>, Qinling Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Water Resources and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer Xinjiang

<sup>2</sup>South Xinjiang Geotechnical Engineering Research Center, Tarim University, Alaer Xinjiang

Received: Dec. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

## Abstract

Sulfuric acid saline soil is widely distributed in the cold and arid areas of Northwest China, and the subgrade diseases are serious, which is unfavorable to the road engineering construction. The main causes of road diseases in cold and arid regions are salt frost heave deformation of soil and chemical erosion of cement-based materials with sulfate participation. Scholars have explored the influence of salt content, water content, degree of compaction, temperature and other factors on subgrade salt swelling. According to the geographical and climatic characteristics of cold and arid regions, the dry-wet cycle and salt freezing-thawing cycle were simulated to explore the changes of frost heave, strength and microstructure of subgrade salt. With the deepening of research and the improvement of technical means, scholars also used finite element software such as COMSOL to simulate the subgrade environment, explored the microscopic change characteristics inside the structure with the help of CT, SEM and XRD, and explored the damage mechanism of saline soil subgrade under the multi-field coupling environmental action of water, salt, temperature and force. According to the current research results, more field experiments can be done in the future, and more research can be done in the quantitative study of crystallization pressure and the establishment of multi-field coupling action model.

## Keywords

Sulfuric Acid Saline Soil, Subgrade Structure, Dry Wet Cycle, Freeze Thaw Cycle, Multi Field Coupling

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在工程上,把易溶盐含量大于0.3%的粉土、粉质黏土或砂类土定义为盐渍土[1]。按含盐性质分类,硫酸盐渍土是盐渍土的一种。西北地区气候干燥温差大,巨大的蒸发量和温度变化使硫酸盐渍土路基结构在水、盐、温、力的多场环境下经历着干湿循环和冻融循环作用,致使其力学性质变差,工程性质下降。道路产生盐胀、冻胀、翻浆等病害,路面会有鼓包、裂缝现象,给西北地区的道路工程建设带来的危害日趋严重,同时阻碍了经济发展。因此,对寒旱区硫酸盐渍土路基结构损伤破坏机理的研究可以为工程建设提供一些指导。

目前硫酸盐渍土道路病害问题的研究,主要分为路基结构损伤破坏机理和道路病害工程防治技术两大方面。道路病害机理研究之初,从易发生膨胀变形的硫酸盐渍土土体展开工作,主要讨论了温度、含盐量、干密度、含水率等因素对土体变形的影响,为此方向的研究工作奠定了基础。随着研究不断深入,学者们考虑了外部环境作用对道路损伤破坏的影响,多集中在干湿循环和冻融循环作用、多场耦合作用。干湿循环、冻融循环作用方面,主要针对土体和水泥基材料与硫酸盐相遇时发生的水盐相态变化和化学侵蚀作用;在水-盐-温-力的多场耦合作用方面的研究多采用数学模型的建立与数值模拟分析,取得了丰硕的成果。本文主要对路基结构在硫酸盐侵蚀与外部环境因素影响下发生道路病害机理方面的研究成果进行简单的总结,针对目前研究现状进行了讨论与展望,为西北寒旱区的硫酸盐渍土路基结构破坏机理的进一步研究提供一些参考。

## 2. 硫酸盐渍土的膨胀特性研究

一定含水率的硫酸盐渍土在低于一定的温度时,会发生膨胀。对盐渍土影响土体变形的因素有土的干密度、含水量、荷载、含盐量、温度等。在国内最早李斌团队采用 X-射线衍射分析、电子显微镜分析等方法检测了盐渍土主要成分,讨论了硫酸盐与氯化盐在不同组成比例情况下与土体膨胀率之间的关系[2];并且研究了硫酸盐渍土在一定的含盐量、含水量、初始干密度条件下温度与盐胀率之间的变化规律[3]。高江平团队提出了含盐量、初始干密度、荷载等 5 因素与盐胀率之间的计算公式[4] [5],研究一致认为干密度与膨胀率之间程二次抛物线规律[6] [7]。顾强康等人[8]推导出了根据含盐量、压实度、荷载三个参数预估盐胀率的公式。还有研究表明,氯化钠的存在会抑制减轻硫酸盐渍土的盐胀变形[9] [10]。

另一方面,已有的研究对硫酸盐渍土的盐胀率进行了讨论。含盐量的大小直接影响了土体的膨胀变形,二者关系如表 1 所示。酸盐渍土在冻结温度以上,含水量一定的情况下,含盐量与盐胀率的关系大致如下:重型击实标准下起胀含盐量为 0.2%,而轻型击实标准下起胀含盐量为 0.5% [11];含盐量不足 1%时,土体的盐冻胀变形很小,造成的盐胀累加效应不明显,引起变形破坏的主要因素是盐胀与冻胀;含盐量大于 1%时,盐胀显现显著,土体变形破坏主要是盐胀导致的;而含盐量大于 2%以后,土体的变形速度加快;含盐量大于 5%时,饱和溶液盐分晶体析出会抑制冻胀的发生,冻胀率与含盐量成反比[4] [11] [12] [13] [14]。

**Table 1.** Swelling form of sulfuric acid saline soil under different salt content

**表 1.** 不同含盐量下硫酸盐渍土膨胀形式

含盐量	主要膨胀形式
0.2%~0.5%	开始发生膨胀
<1%	膨胀变形小,盐胀和冻胀同时发生
<2%	膨胀变形显著,盐胀为主要膨胀形式
>5%	随含盐量增加,膨胀变形增幅减小

## 3. 干湿循环和冻融循环作用对路基结构损伤破坏研究

经过对硫酸盐渍土损伤破坏机理的初步研究发现,盐胀-冻胀是路基土体变形的主要破坏形式。学者们结合气候环境特征,模拟环境作用,研究干湿循环和冻融循环作用下硫酸盐渍土路基盐-冻胀损伤破坏特性以及微观结构损伤机理。

### 3.1. 硫酸盐渍土盐-冻胀特性研究

国外对于盐渍土路基在干湿循环与盐冻融循环作用下的损伤破坏机理研究甚少,Yoshida [15]研究了干湿循环与土体抗剪强度的关系,A. Rahman Barzegar [16]做了重塑土的干湿循环试验,结果表明干湿循环次数增加,土壤的软化率越高。在国内,学者们对于土的干湿循环作用主要集中于对膨胀土、黄土、红土的研究[10] [17] [18] [19],肖泽岸、赖远明[20]研究了干湿循环下水盐迁移规律,发现干湿循环是土体发生盐胀变形的主要原因。在盐分的分布区域上郭玉春[21]发现盐渍土经过干湿循环,不论从当天温差效应还是月温差效应来看,土体浅层的热效应剧烈,表层含盐量较大,且向深层次减小。王沪生[22]通过干湿冻融联合作用试验,指出土体的法向应变受冻融循环作用影响较大,干湿循环作用加速了土体变形,但是对最终的累加变形影响不大。

硫酸盐渍土在经历冻融循环之后,随温度、含盐量、循环次数变化其变形破坏程度有所不同。文桃发现在含盐量 1.3%以下,冻胀率很小,在 2.1%以上冻胀率与冻融循环次数程线性关系,增速明显[23],

这与褚彩平的结论不同，其区别主要在于第 6 次循环以后的盐胀率增长速率。从已有研究成果来看，大部分冻融循环实验为短期冻融循环，而马君泽[24]在长期冻融 - 干湿及冻融干湿交替作用研究发现：盐胀率随含盐量和循环次数增大而增大，冻融循环次数对含盐量较高的硫酸盐渍土盐胀率影响较大，当含盐量相对低时，干湿循环作用对盐胀率的贡献较明显。

研究单一的干湿循环或冻融循环作用只能单方面的反应路基土体结构损伤破坏机理，鲜有学者采用室内试验法模拟干湿 - 冻融循环作用研究硫酸盐渍土的变形和强度特性。马君泽[25]、王沪生[22]、孙炜[26]研究了土体的强度、耐久性、微观结构变化随循环次数的变化规律。研究表明，土体的变形与含盐量和循环次数呈正相关。温度升高，水盐通过毛细作用迁移至土体表面，继续干燥蒸发盐结晶残留，土体表面发白，这使土体产生盐胀。降水湿润，温度降低，土中水结冰，硫酸根与水结合形成芒硝晶体，结晶压力使土体孔隙增大，产生盐 - 冻胀。在干湿 - 冻融循环交替作用下，冻融循环往往比干湿循环对土体的变形促进作用更显著，其强度，颗粒形态也随环境次序不同而呈现不同规律。

### 3.2. 强度特性研究

对于硫酸盐渍土的力学特性研究主要是抗压强度和抗剪强度。抗压强度试验多为室内无侧限抗压强度试验，抗剪强度研究主要通过室内直剪和三轴剪切试验来实现。硫酸盐渍土强度特性与其压实度、含盐量、含水量、冻融循环次数以及外界环境影响等因素相关[27] [28]，影响因素与抗压强度、抗剪强度之间的关系如表 2 所示。

**Table 2.** Relationship between each factor and compressive strength or shear strength  
**表 2.** 各因素与抗压强度或抗剪强度关系

影响因素	抗压强度特性	抗剪强度特性
压实度	硫酸盐含量与温度一定时，三轴压强度与压实度呈正比增长[29]。	土的粘聚力随压实度的增加先增加后减小，内摩擦角随压实度增大而增大[34]。
含盐量	硫酸盐含量降低，抗压强度呈线性增大[30]。	粘聚力随含盐量的增加而减小，并逐渐趋于稳定，内摩擦角随含水率先减小后增[34]。
含水量	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 盐渍土得单轴抗压强度以 20% 含水率为峰值点先增大后减小[31]。	含水率为 21% 时，粘聚力随易溶盐含量的增大呈先减小后增大的趋势[35]。
循环作用次数	冻融循环次数在第 1 次和第 2 次为主要降低阶段[32]；达到 6 次时，强度减小趋势变缓[33]。	随冻融循环次数增加亚硫酸盐渍土粘聚力减小[36]。

根据陈肖柏等[37]、王海涛等[38]、张飞等[39] [40]研究成果，在相同法向应力下的抗剪强度随含盐量的增加，呈现先减小后增大的规律，无侧限抗压强度呈小幅度先增后减趋势，在冻融循环作用下，硫酸盐渍土土体抗剪强度参数随冻融循环次数增加而减小；在干湿循环作用下，硫酸盐渍土含盐量越高，土体强度降低特征越显著[25]。

### 3.3. 微观结构研究

近年来，盐渍土的微观结构研究多采用 CT 和 SEM 电镜扫描技术来观测土体在外部环境作用下的内部结构变化。研究表明：硫酸盐渍土路基鼓包与融沉的根本原因是水盐结晶前后的相态转变[41] [42]。干湿循环作用下，盐的结晶与溶解使土体孔隙增大，改变了颗粒间的胶结作用。伴随含盐量和循环次数的增加，土体原始结构破坏，咬合摩擦降低，强度下降[25]。因硫酸盐渍土的盐 - 冻胀特性，有学者对结晶压力的产生和影响做了研究，认为其中的结晶压力破坏了土体结构并提出了结晶压力公式[43] [44] [45]，

因该理论研究较少，难以验证其可靠性。

Edwin [46]与 Zimmie T F [47]两位外国学者发现盐渍土在经历冻融循环之后会严重破坏土体结构，孔隙比减小，改变其渗透系数。韩志强等[48]研究指出：多次冻融循环作用以后，对于粗大粒径的硫酸盐渍土会表现出盐结晶以点的形式与土颗粒接触，而较细小的松散颗粒会在重力作用下回落在大孔隙中。还有学者通过室内试验研究得出：冻融循环会改变土颗粒的排列形式，水分的反复结冰融化，盐分的反复结晶溶解使土的密度减小，这与国外学者得出的结论有相同之处[49] [50]。

可以看出，不论土体经历何种环境作用，从微观角度来看，其根本原因是盐结晶后体积增大，产生的结晶压力改变了土颗粒的原有排列形式，当结晶压力突破土颗粒间作用力之后，土体结构发生破坏，架空孔隙，变得松散。土颗粒的微观结构变化与其粒径大小相关。孔隙的大小决定着土体的密实度，干湿循环与盐-冻融循环作用会使土体密度减小，同时土体的强度也随之改变，这些微观结构特性是路基土在宏观变形上的本质反映。

#### 4. 干湿循环和冻融循环作用对道路水泥基材料的损伤破坏研究

在硫酸盐渍土环境下，混凝土路面经历干湿、冻融循环后开裂；水泥稳定基层的变形严重，对沥青路面层造成影响。在西北寒旱区，水泥稳定沙砾原材料经济，故水泥稳定类基层应用广泛，道路病害严重。

寒旱区巨大的蒸发量和温差使当地道路水稳层处于干湿循环作用和冻融循环作用环境中，水泥稳定基层沥青路面的破坏主要来自温度变化和基层损伤破坏，其干缩变形特性的影响因素有集料级配组成、失水率、强度等；加之硫酸盐环境下，盐分随土基中毛细水作用向上迁移至基层，硫酸盐的加入会导致道路水稳层膨胀变形，其含盐量与其膨胀量存在良好的指数关系[51] [52] [53]。研究发现，盐渍土地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀的发生具有周期性，20℃~30℃区间内基层拱胀最为剧烈，对此，程力通过工业 CT 扫描发现当温度从 20℃升至 30℃，水泥稳定基层断面孔隙面积明显扩张，热盐耦合作用下形成的硫酸钠晶体和钙矾石会导致路面拱胀变形，压实度越大，变形越明显[54] [55] [56]。王飞等[57]调查的南疆二级路面出现的时间为 3~5 a，与冯瑞玲等[58]在新疆硫酸盐渍土地区沥青路面的鼓胀变形机理研究中的调查结果相同，故障最严重的时期为夏季高温时期，且得出路基结构鼓胀变形原因有钙矾石型硫酸盐侵蚀和硅灰石膏型硫酸盐侵蚀，和上述学者观点达成一致。

对水泥稳定基层的损伤破坏原因，从工程设计施工要点出发，选材、矿料级配、含水率、水泥剂量的选定是防止水泥稳定基层病害的易控因素；从结构所处环境特点来说，在西北寒旱区的冻融循环作用下，温度变化促进水盐通过土壤毛细作用从暖端向冷端迁移，为水泥稳定基层内部的化学反应创造了条件；究其内部结构损伤破坏本质：晶体的形成是路基破坏的根本原因，由于水、水泥的水化产物与硫酸盐发生化学反应生成  $\text{N}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、钙矾石或是硅灰石膏结晶体，突破了硅酸钙和铝酸钙与矿物颗粒表面的胶结力，使结构松散，破坏结构稳定性，强度下降。

#### 5. 水 - 盐 - 温 - 力多场耦合作用对路基结构损伤破坏研究

经过众多学者大量研究，硫酸盐渍土的盐胀冻胀是路基结构破坏的直接表现这一观点已非常清晰。硫酸盐渍土在季节性冻结的外部条件下，土体内部的物理场之间相互作用、相互影响，形成复杂的自然系统，并导致土体结构及力学效应的变化；其内部的水盐运移是路基产生盐胀不容忽视的现象，它是多物理场相互作用的宏观表现[59] [60] [61]。上世纪 80 年代，Shen Mu 等[62]建立了水、热、力三场耦合的水热迁移的流体力学模型，经与实验结果验证，适用于解决冻胀问题。黄兴法等[63]在中国较早提出了土壤冻结时水、热、盐三场耦合运动模拟，并用有限差分法进行了数值模拟。

近年来,对盐渍土三场以上的多场耦合作用方面的研究,在前人的研究基础上,利用不同理论建立数学模型并进行数值模拟,该方面的研究主要有以下几种。

1) 针对硫酸盐渍土盐胀过程中较为欠缺的四场耦合理论,基于水动力学模型和质量守恒定律,在已有的冻土三场耦合模型的基础上,建立了盐渍土水-盐-热-力四场耦合动力学模型[64]。

2) 为较好地揭示盐渍土在温度梯度作用下的水、盐迁移机制和变形机理,基于多孔介质理论以及连续介质力学原理,建立了描述温度梯度作用下非饱和盐渍土水-热-盐-气-力多场全耦合理论模型,并通过选取基本未知量,利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件进行了数值模拟[65]。

3) 为更好地预测冻结过程中土体内的多场耦合作用,基于连续介质力学、能量守恒定律、热力学、土力学等,利用 COMSOL Multiphysics 数学模块中的 PDE 方程接口建立物理场对吉林西部盐渍土水-热-盐-应力-应变(HTSPE)耦合数学模型进行求解,并与室内试验结果进行对比,验证了模型的有效性[52]。

4) 为研究粗颗粒硫酸盐渍土路基内隔断层设置对水盐迁移的影响效果,建立水盐迁移与路基盐胀、融陷变形的联系,基于非饱和土渗流和热传导理论,建立了适用于粗粒硫酸盐渍土路基水、热、盐、力场的耦合微分方程组。利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了盐渍土路基水-热-盐-力场耦合数值模型,并通过室内大型粗颗粒盐渍土冻融循环试验结果对建立的数学模型的有效性进行验证[66]。

以硫酸盐渍土为研究对象的多场耦合作用下路基损伤破坏研究中,对于硫酸盐环境下的多物理场作用下土体的损伤破坏研究较少,多以探寻其盐冻胀机理、水盐迁移机制为主要方向进行数学模型的建立和数值模拟,但同时这也是硫酸盐土路基结构破坏机理研究的重要研究方向和热点课题。

## 6. 结论与展望

目前对硫酸盐渍土路基结构损伤机理的研究取得了丰硕成果,主要研究结论和后续研究工作总结如下。

1) 硫酸盐渍土的膨胀主要是芒硝晶体的盐胀和结晶水的冻胀引起,其影响因素与含盐量、含水量、压实度、温度等有关。1%、2%、5%三个含盐量指标可以鲜明地反映出盐冻胀率规律的不同之处。

2) 干湿循环作用会使土体产生盐胀,冻融循环作用使其产生盐胀和冻胀。含盐量较低时,干湿循环作用明显,含盐量较高时冻胀变形作用显著。含盐量越高,循环次数越多,土体变形越大。

3) 在干湿循环和冻融循环交替作用下,干湿循环作用对土体变形贡献较大。不同的环境作用影响下,硫酸盐渍土的黏聚力、内摩擦角变化规律也不一致。

4) 从微观角度来看,土基中的水盐介质迁移,导致上部结构层发生硫酸盐化学侵蚀作用,生成  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、钙矾石、硅灰石膏结晶体,使基层膨胀破坏。冰晶体与盐结晶体的形成破坏了土体结构颗粒间的作用力,使路基土体结构膨胀、路面鼓包变形,产生裂缝,在温度变化与水盐迁移作用下,盐-冻融循环作用改变了土体孔隙大小、结构密实度,使路基路面发生严重的变形破坏。

5) 对水-盐-温-力多场耦合作用下的路基结构损伤破坏机理研究,多以易溶盐为主要盐类,还没有形成与盐渍土本构模关系相统一的水-热-盐-力四场耦合动力模型研究体系。

6) 硫酸盐渍土路基结构损伤破坏机理研究多采用室内模拟实验,难以保证室内实验模拟实际工程环境。寒旱区盐渍土环境作用特征,多数学者开展冻融循环作用下路基变形机理的研究,也有少数学者做了干湿循环和冻融循环交替作用的模拟试验,而对干湿循环和冻融循环两种环境耦合作用的模拟试验较少,主要受限于环境作用耦合模拟实验系统的研发。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“水-盐-温多场耦合作用下南疆盐渍化路基结构变形机理研究”(项目编号:52068062)。

## 参考文献

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 李宁远, 李斌, 吴家惠. 硫酸盐渍土的膨胀特性及微结构形态试验研究[J]. 公路, 1989(8): 24-29.
- [3] 石兆旭, 李斌, 金应春. 硫酸盐渍土膨胀规律及影响因素的试验分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1994, 14(2): 15-21.
- [4] 高江平, 吴家惠, 杨荣尚. 硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报, 1997, 19(1): 10-15.
- [5] 高江平, 吴家惠, 邓友生, 王家澄. 硫酸盐渍土膨胀规律的综合影响因素的试验研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 76-83.
- [6] 高江平, 吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 1997(1): 39-44.
- [7] 费雪良, 李斌. 硫酸盐渍土压实特性及盐胀机理研究[J]. 中国公路学报, 1995(1): 44-49.
- [8] 顾强康, 吴爱红, 李宁. 硫酸盐渍土的盐胀特性试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 283-287.
- [9] 高江平, 李芳. 含氯化钠硫酸盐渍土盐胀过程分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1997(4): 21-26.
- [10] 高民欢, 李斌, 金应春. 含氯盐和硫酸盐类盐渍土膨胀特性的研究[J]. 冰川冻土, 1997(4): 58-65.
- [11] 袁红, 李斌. 硫酸盐渍土起胀含盐量及容许含盐量的研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(3): 10-14.
- [12] 褚彩平, 李斌, 侯仲杰. 硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 108-111.
- [13] 于天佑, 吴亚平, 司培国, 张磊, 孔令楠, 蒲增钢. 细粒硫酸钠盐渍土盐冻胀特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 407-415.
- [14] 吴亚平, 王宁, 潘高峰, 李涛. 青海北部高含盐细砂冻胀特性研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 307-313.
- [15] Yoshida, I., Kouno, H. and Chikushi, J. (1985) The Effects of Hysteresis in Soil Water-Suction upon Soil Strength. *Journal Faculty Agric Tottori University*, **20**, 41-44.
- [16] Barzegar, A.R., Oades, J.M. and Rengasamy, P. (1996) Soil Structure Degradation and Mellowing of Compacted Soils by Saline-Sodic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, **60**, 583-588.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000020035x>
- [17] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 卢浩. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [18] 袁志辉, 唐春, 杨普济, 甘建军. 干湿循环下红土力学性质劣化的多尺度试验[J/OL]. 水力发电学报, 2021: 1-13.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20211008.1415.002.html>, 2022-01-11.
- [19] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2445-2453.
- [20] 肖泽岸, 赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- [21] 郭玉春. 干湿循环作用下青海省盐渍土物理性质及抗剪强度参数分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [22] 王沪生. 冻融干湿作用下硫酸盐渍土的耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [23] 文桃, 曹亚鹏, 应赛, 王升. 多次冻融循环下硫酸盐渍土盐-冻胀特性试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 49-54.
- [24] 马君泽. 长期冻融——干湿循环条件下宁夏地区硫酸盐渍土性能劣化研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [25] 马君泽, 张卫兵, 张笑. 干湿循环作用下硫酸盐渍土强度特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 704-713.
- [26] 孙炜. 干湿冻融循环作用下乾安泥林黄土状亚砂土强度劣化及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [27] 钱晓明, 张卫兵, 郑子昂, 袁鹏. 冻融条件下硫酸盐渍土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 268-271.
- [28] 杨芊, 吴亚平, 于天佑, 牛玉川. 细颗粒硫酸盐冻土抗压强度三轴试验研究[J]. 南阳理工学院学报, 2020, 12(4): 80-88.
- [29] 李生伟. 冻融循环下盐渍土力学特性及本构模型研究综述[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 177-182.  
<https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.01.029>

- [30] 杨成松, 何平, 程国栋, 邴慧. 含盐冻结粉质粘土单轴抗压强度试验研究[J]. 工程力学, 2006(1): 144-148.
- [31] 陈锦, 李东庆, 邴慧, 邓友生. 含水量对冻结含盐粉土单轴抗压强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 441-446.
- [32] 陈炜韬, 王鹰, 王明年, 李姝, 王玉锁. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007(11): 2343-2347. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2007.11.023>
- [33] 邴慧, 何平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1958-1962.
- [34] 钱晓明. 宁夏地区硫酸盐渍土工程特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [35] 张飞, 胡小庆, 刘亚薇, 徐光黎, 詹学启. 含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度影响试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(6): 162-164.
- [36] 刘长江, 张震, 张灵通, 张远芳, 陈益滨. 大尺寸设备冻融循环次数对天然盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 73-76.
- [37] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 盛文坤, 陶兆祥, 田林祥. 重盐土在温度变化时的物理化学性质和力学性质[J]. 中国科学(A 辑数学物理学天文学技术科学), 1988(4): 429-438.
- [38] 王海涛, 张远芳, 成峰, 孙勇. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1271-1276.
- [39] 张飞, 任治军. 细粒硫酸盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 勘察科学技术, 2014(S1): 51-56.
- [40] 张飞, 刘亚薇, 胡小庆, 徐光黎, 詹学启. 硫酸盐渍土无侧限抗压强度特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(12): 85-86.
- [41] 李炎. 新疆某地区天然盐渍土盐——冻胀及微观结构变化研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [42] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 28-32.
- [43] Marzal, R.M.E. and Scherer, G.W. (2008) Crystallization of Sodium Sulfate Salts in Limestone. *Environmental Geology*, **56**, 605-621. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1441-7>
- [44] 琚晓冬, 冯文娟, 张玉军, 等. 理想形态孔隙中晶体的结晶压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2787-2794.
- [45] Lai, Y.M., Pei, W.S., Zhang, M.Y., et al. (2014) Study on Theory Model of Hydro-Thermal-Mechanical Interaction Process in Saturated Freezing Silty Soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**, 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
- [46] Edwin, J.C. and Anthony, J.G. (1979) Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils. *Engineering Geology*, **13**, 73-92. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90022-X](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90022-X)
- [47] Zimmie, T.F. and La Plante, C. (1990) The Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Permeability of a Fine Grained Soil. In: *Proceedings of 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Drexel University, Philadelphia, 580-593.
- [48] 韩志强, 包卫星. 路基盐渍土多次冻融循环盐胀特征及微观结构机制研究[J]. 交通标准化, 2011(14): 96-99.
- [49] 邓友生, 蒲毅彬, 周成林. 冻结过程对盐渍土结构变化的试验研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 632-640.
- [50] 张旭东. 吉林西部盐渍土水盐迁移的 HTSPE 多场耦合研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [51] 姚爱玲, 王军伟, 许敏, 杨孟乾, 杨涛. 水泥稳定碎石基层沥青路面隆起开裂数值分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 105-111.
- [52] 孙兆辉, 许志鸿, 陈兴伟, 蔡氧, 邱颖峰, 吴美发. 水泥稳定碎石基层材料干缩变形特性的试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 27-32.
- [53] 宋亮, 王选仓. 新疆盐渍土地区水泥稳定基层盐胀变形规律及机理[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 20-28.
- [54] 代泽宇, 毛雪松, 徐旺, 唐可, 吴谦, 汤文杰. 盐渍土地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀原因调查分析[J]. 中国科技论文, 2021, 16(4): 444-449.
- [55] 赵春齐. 水泥稳定基层拱胀变形规律研究[C]//施工技术编辑部. 2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 2021: 567-572. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.034563>
- [56] 程力. 基于 CT 扫描试验的水泥稳定基层拱胀机理探究[J]. 中国公路, 2021(9): 109-111. <https://doi.org/10.13468/j.cnki.chw.2021.09.037>
- [57] 王飞, 杨保存. 干湿-冻融-行车荷载顺序耦合作用下道路水稳层变形试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(29): 232-238.



- [58] 冯瑞玲, 王随柱, 吴立坚, 陆奂材, 沈宇鹏. 新疆硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1739-1745.
- [59] 杨保存, 刘新荣, 贺兴宏, 邱林. 盐渍土路基盐胀性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 594-603.
- [60] 于天文. 吉林西部盐渍土水热盐力多物理场耦合模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [61] 王清, 刘宇峰, 刘守伟, 张旭东, 彭玮, 李超月, 徐新川, 范建华. 吉林西部盐渍土多场作用下物质特性演化规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(3): 807-817.
- [62] Shen, M. and Ladanyi, B. (1987) Modelling of Coupled Heat, Moisture and Stress Field in Freezing Soil. *Cold Regions Science and Technology*, **14**, 237-246. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(87\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0165-232X(87)90016-4)
- [63] 黄兴法, 曾德超, 练国平. 土壤水热盐运动模型的建立与初步验证[J]. 农业工程学报, 1997(3): 37-41.
- [64] 冯瑞玲, 蔡晓宇, 吴立坚, 张益铭. 硫酸盐渍土水-盐-热-力四场耦合理论模型[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 1-10+40.
- [65] 周立增. 温度梯度作用下非饱和硫酸盐渍土水盐迁移及其变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. <https://doi.org/10.27206/d.cnki.gsgsu.2021.000900>
- [66] 张莎莎, 叶素纤, 张林, 杨晓华, 陈伟志. 粗粒盐渍土路基水热盐力耦合方程修正及试验验证[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 31-40.