

# 寒区路基填料研究现状综述

石 森<sup>1</sup>, 李 辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

<sup>2</sup>辽宁铁道职业技术学院城市轨道交通学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月29日

## 摘 要

寒区路基长期受冻融循环、温度交变与动力荷载耦合作用, 填料力学性能退化是诱发冻胀、融沉、翻浆等病害的核心原因。本文以“病害机理-防治技术-监测预测”为主线, 系统梳理寒区路基填料冻融劣化、动力-温度耦合效应、固废资源化及智能防控等研究进展, 剖析各类研究方法的优缺点与适用场景, 补充新型保温材料、结构优化等防治内容, 结合可视化图表提炼核心规律。研究表明, 该领域正朝着多场耦合机理深化、绿色资源化、智能监测预测方向发展, 后续需攻克极端环境填料耐久性、多技术协同防控等难题, 为冻土区路基工程建设与养护提供理论支撑。

## 关键词

寒区路基填料, 冻融病害机理, 填料改良技术, 固废资源化, 智能监测预测, 保温隔热材料

# A Review of the Research Status of Subgrade Fillers in Cold Areas

Miao Shi<sup>1</sup>, Hui Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

<sup>2</sup>School of Urban Rail Transit, Liaoning Railway Vocational and Technical College, Jinzhou Liaoning

Received: March 9, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 29, 2026

## Abstract

Subgrade in cold regions is long-term subjected to the coupling effect of freeze-thaw cycles, temperature alternations and dynamic loads. The degradation of mechanical properties of fillers is the core cause inducing typical distresses such as frost heave, thaw settlement and frost boiling. Taking the thread of distress mechanism-prevention technology-monitoring and prediction, this paper systematically reviews the research advances in freeze-thaw deterioration of cold-region subgrade

文章引用: 石森, 李辉. 寒区路基填料研究现状综述[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 654-660.

DOI: 10.12677/aep.2026.164064

fillers, dynamic-temperature coupling effect, solid waste resource utilization and intelligent prevention and control. It analyzes the advantages, disadvantages and applicable scopes of various research methods, supplements the prevention contents including novel thermal insulation materials and structural optimization, and extracts core laws via visual charts. The results reveal that this field is developing towards the deepening of multi-field coupling mechanism, green resource utilization and intelligent monitoring and prediction. Future research needs to overcome key difficulties including the durability of fillers in extreme environments and multi-technology collaborative prevention and control, so as to provide theoretical support for the construction and maintenance of subgrade engineering in permafrost regions.

## Keywords

Subgrade Fill in Cold Regions, Freeze-Thaw Distress Mechanism, Fill Improvement Technology, Solid Waste Resource Utilization, Intelligent Monitoring and Prediction, Thermal Insulation Materials

Copyright © 2026 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

冻土约占地球陆地表面面积的 50%，广泛分布于中高纬度的北欧、俄罗斯、加拿大及中国东北、青藏高原等区域，是典型的极端岩土工程环境[1]。受全球气候变暖与人类工程活动叠加影响，冻土冻融稳定性持续弱化，加之“振兴东北老工业基地”“一带一路”等战略推动下冻土区交通路网密度不断提升，寒区路基病害防控成为工程领域的核心难题[2]。路基填料作为路基结构的主体，其物理力学性能直接决定路基承载能力与长期稳定性；冻融循环引发的填料结构破损、水分迁移、强度衰减，是导致路基横纵裂缝、不均匀沉降、翻浆冒泥等病害的核心诱因[3] [4]。

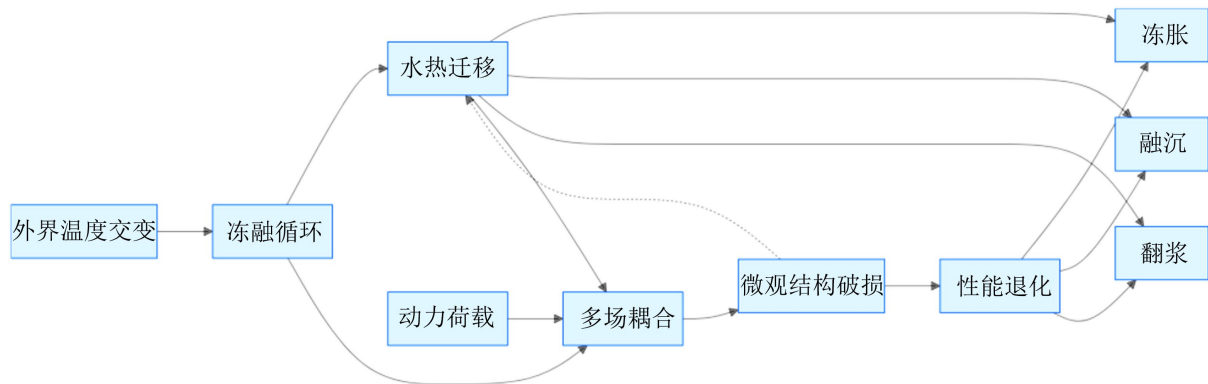
近年来，国内外学者围绕寒区路基填料展开大量研究，涵盖冻融劣化机理、动力响应特性、固废填料应用、监测预测技术等方向，但现有综述多存在逻辑零散、文献堆砌、防治内容缺失等问题。本文重构研究脉络，聚焦病害本质、防治技术、监测预测全链条，深度整合研究成果、剖析方法适用性，补充新型保温防治技术，完善综述系统性与实用性，为寒区路基工程科研与实践提供参考。

## 2. 寒区路基填料病害机理与劣化机制

寒区路基病害的核心本质是冻融循环、水热迁移、动力荷载多场耦合作用下，路基填料微观结构破损与宏观力学性能退化的外在表现，主要病害类型包括冻胀、融沉、翻浆三类，其形成机理存在显著的耦合关联性如图 1。

### 2.1. 冻融循环与水分迁移主导的病害机理

季节冻土区与多年冻土区的周期性温度交变，使路基填料经历反复冻融，引发土体内部冰-水相态转化、孔隙结构重塑及水分重分布，这是填料力学性能衰减的核心诱因。冻胀现象源于低温下填料孔隙水冻结成冰、体积膨胀 9%左右，导致路基整体抬升、横纵开裂；融沉则是冻土升温融化后，冰体转化为水、土体孔隙压缩，在荷载作用下水分排出引发路基不均匀下沉[5] [6]；翻浆是融沉阶段水分无法及时消散，在行车荷载反复作用下形成泥浆喷涌、路面鼓包车辙的复合型病害[7]。



**Figure 1.** Schematic diagram of the coupling relationship among formation mechanisms of main subgrade diseases in cold regions

**图 1.** 寒区路基主要病害形成机理耦合关系示意图

学界针对水分迁移机理尚未形成统一论，现有研究证实冻融作用是导致填料水分不均匀分布的首要因素，毛细作用次之，水分局部积聚进一步加剧差异沉降[8]。针对不同土质的融沉特性研究表明：粉质亚粘土、粉质土融沉性最强，砂砾土最弱；相同含水率下，粘土融沉系数高于砂土，粘性土融沉系数与塑限含水量呈负相关[9]。冻融循环还会破坏填料颗粒胶结结构，产生细小裂隙，虽孔隙比减小但渗透系数增大，进一步恶化水热传递条件[10]。现场监测数据显示，季冻区重载铁路路基冻胀量多集中在 1~1.5 cm，融沉量多为 0.5~1 cm，不均匀变形具有普遍性与随机性，直接影响行车安全[11]。

## 2.2. 动力 - 温度耦合的填料劣化效应

交通荷载的反复作用与温度交变形成耦合效应，进一步加速路基填料性能退化。研究发现，冻结路基填料的轴向累积塑性应变随冻结负温升高而增大，随粗颗粒含量增加而减小[12]；循环荷载下，填料动弹模量衰减、阻尼比增大，煤矸石、软岩等粗颗粒填料的级配特性直接影响动力稳定性[13][14]。超固结红黏土、掺土煤矸石等特殊填料的动力试验表明，动应力幅值、围压、超固结比是控制动态强度的核心参数，循环荷载对填料动内摩擦角影响微弱，但会显著降低黏聚力[15][16]。此外，温度指数(TI)、低温指数(LTI)等气候参数与填料开裂行为高度相关，极端低温会加剧填料脆性破坏[17]。

## 2.3. 填料微观结构与宏观性能的关联机制

寒区填料的宏观力学劣化源于微观结构的不可逆破损，电镜扫描、CT 扫描等微观测试手段证实：冻融循环会破坏填料颗粒排列、增大孔隙曲折度，降低颗粒间胶结力与咬合作用[18]。齐吉琳等提出冻土为“土 - 冰 - 未冻水 - 气”四相体系，未冻水与冰的动态平衡是控制冻土变形的关键，受力状态下未冻水含量升高会进一步弱化填料强度[19]。何朝伟、王晶等通过三轴试验与灰色关联分析发现，冻融次数、含水率与填料黏聚力、弹性模量呈负相关，围压、压实度呈正相关，粉砂土摩擦角随冻融次数先增后减、整体衰减[20][21]。水热迁移是病害诱因，冻融循环是性能退化核心，动力 - 温度耦合是加速因素，微观结构破损是本质根源。

## 3. 寒区路基填料防治材料与技术

针对寒区路基填料冻融劣化与病害问题，现有防治技术主要围绕填料改良、固废资源化利用、新型保温隔热、结构优化设计四大方向展开，旨在提升填料抗冻融性能、阻断水热传递、降低冻害风险，不同技术的适用场景与效果差异显著。

### 3.1. 传统填料改良技术

无机结合料改良是提升软弱填料抗冻性的常用手段, 其中石灰、水泥、粉煤灰改良效果最为突出。陈宝等研究表明, 石灰改良软土存在最佳掺量, 掺量升高可增大有效内摩擦角、提升黏聚力, 同时改变土的液限与击实特性[22]; Yarbass 等[23]试验证实, 石灰-粉煤灰-水泥复合改良土的抗冻融耐久性远优于素土, 冻融循环后强度损失率降低 30%以上。刘晖等通过正交试验发现, 改良填料的力学性能受含水率、冻融次数、压实度多因素交互影响, 优化配合比可显著提升抗冻融稳定性[24]。该类技术工艺成熟、成本低廉, 适用于季冻区普通路基工程, 但存在环保性差、长期耐久性不足的短板。

### 3.2. 固废材料资源化填料应用

工业固废、建筑固废作为绿色路基填料, 既解决资源短缺问题, 又实现固废消纳, 成为近年研究热点。常用固废填料包括煤矸石、建筑再生骨料、红砖废料等, 其路用性能与传统填料的关键参数对比见表 1。研究表明, 建筑固废填料的黏聚力、内摩擦角随压实度升高而增大、随含水率升高而减小, CBR 值满足路基填料规范要求[25][26]; 煤矸石与土壤复配后可优化土体团聚体结构, 粒径 2~5 mm 煤矸石的改良效果最优[27]; 掺土煤矸石按 3:1~4:1 配比复配, 动力强度提升最为显著[16]。固废填料具备成本低、环保性强的优势, 但需严控杂物含量、级配参数与压碎值, 适用于低等级公路与路基基层工程。

**Table 1.** Comparison of key performance parameters of different types of subgrade fillers in cold regions  
**表 1.** 不同类型寒区路基填料关键性能参数对比

填料类型	CBR 值 (%)	抗剪强度 (KPa)	冻融循环后强度损失率 (%)	环保性	适用场景
传统粉质土/砂土	3~8	20~50	25~40	一般	季冻区低等级公路
石灰/水泥改良土	8~15	50~100	10~20	较差	季冻区高等级公路、铁路
煤矸石固废填料	12~20	80~120	8~15	优	各等级公路路基垫层、基层
建筑固废再生填料	10~18	70~110	12~18	优	市政道路、低等级公路

### 3.3. 新型保温隔热与结构防治技术

新型保温隔热材料是阻断路基水热传递、抑制冻融循环的核心技术, 可有效降低冻土上限波动、减少冻胀融沉量。现有主流保温材料包括聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)、聚氨酯硬质泡沫、气凝胶保温板、复合保温土工布等, 具备导热系数低、质量轻、耐冻融的特点, 铺设于路基基层可阻隔外界热量侵入, 维持冻土稳定[28]。此外, 路基结构优化设计(如通风管路基、隔热层路基、块石路基)与保温材料协同应用, 可进一步提升防冻胀效果, 适用于多年冻土区高等级公路、铁路路基工程[29]。目前该类技术存在成本偏高、施工工艺复杂的问题, 是未来寒区路基防治的重点优化方向。

## 4. 寒区路基监测技术与变形预测方法

寒区路基填料的病害监测与变形预测是实现提前防控、动态养护的关键, 现有技术分为微观/现场监测技术与变形预测模型两大类, 各类方法的优缺点与适用场景差异显著。

### 4.1. 高精度监测技术

1) CT 微观监测技术: X-ray CT、XCT 技术可定量分析填料内部孔隙、裂缝、颗粒分布特征, 精准区分开口孔、闭合孔与连通孔, 表征孔隙连通性, 相比压汞法、气孔分析法更贴合实际工程状态, 但设备

成本高、现场应用受限, 适用于室内微观机理研究[30]-[32]。

2) 现场宏观监测技术: 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)、传感器实时监测(温度、水分、位移)可实现路基变形、水热参数的长期动态监测, 适用于工程现场大范围、全天候监测, 但数据处理复杂度高[2]。

3) 耦合监测技术: COMSOL 多场耦合模拟结合现场监测, 可实现水热力耦合过程的定量分析, 适用于复杂环境下路基病害演化规律研究[33]。

## 4.2. 变形预测模型与方法对比

现有路基变形预测方法主要分为四类, 各类方法的优缺点与适用范围如下:

1) 理论计算法: 基于弹性力学、冻土力学构建解析模型, 原理清晰、计算简便, 但仅适用于单一工况、多场耦合场景误差大, 适用于初步设计估算[34] [35]。

2) 曲线拟合法: 通过实测数据拟合沉降变形曲线, 操作简单、实用性强, 但依赖大量实测数据、外推预测精度低, 适用于短期变形预测[36] [37]。

3) 数值建模法: 依托有限元、有限差分软件模拟多场耦合过程, 适用性广、可模拟复杂工况, 但建模难度大、参数敏感性高, 适用于机理分析与中长期预测[37]-[39]。

4) 机器学习法: BP 神经网络、PSO-BP 神经网络、支持向量机等模型, 可处理非线性问题、预测精度高, 能融合多影响因子, 但依赖海量训练数据、模型泛化性需优化, 适用于智能动态预测与病害预警[40]-[42]。

其中, PSO-BP 神经网络模型针对煤矸石填料等特殊路基, 可有效提升累积变形预测精度, 是近年智能预测的主流方向[43]; 基于深度学习的 CT 图像分割技术, 可实现填料微观结构损伤的精准识别, 进一步优化预测模型可靠性[44]。

## 5. 研究方法综合评价与适用性分析

寒区路基填料研究主要采用室内试验、现场监测、数值模拟、机器学习四类方法, 各类方法的适配场景与局限性如下:

1) 室内冻融/三轴试验: 可精准控制温度、荷载、含水率等参数, 揭示填料劣化机理, 但试样与实际工程存在尺寸效应、边界差异, 适用于机理研究与参数标定。

2) 现场原位试验: 贴合工程实际、数据真实性高, 但干扰因素多、试验周期长、成本高, 适用于工程验证与长期监测。

3) 数值模拟: 可模拟多场耦合、极端工况, 降低试验成本, 但模型参数依赖试验标定、简化假设影响精度, 适用于规律分析与方案优化。

4) 机器学习: 处理非线性数据能力强、预测效率高, 但数据质量要求严苛、模型可解释性差, 适用于病害预警与动态预测。

实际研究中, 多采用“室内试验标定参数 + 数值模拟分析机理 + 机器学习预测变形”的协同方法, 兼顾精度与实用性。

## 6. 结论与展望

### 6.1. 主要结论

1) 寒区路基填料病害的核心本质是冻融循环、水分迁移与动力 - 温度多场耦合作用, 引发填料微观结构不可逆破损、宏观力学性能持续退化; 其中粉质土、粘性土受劣化影响最为显著, 水热重分布是诱发冻胀、融沉、翻浆等典型病害的直接核心诱因。

2) 无机结合料改良、固废资源化填料可有效提升填料抗冻融耐久性, 新型保温隔热材料搭配路基结构优化设计, 能从源头阻断冻融传导、遏制病害发生; 但现有防治技术仍存在绿色低碳化不足、长期耐久性有待提升的短板。

3) CT 微观探测、InSAR 现场监测实现了填料损伤的多尺度定量表征, 机器学习等智能方法在非线形变形预测中优势突出, 成为路基病害预警的核心技术支撑; 但多方法协同、多场耦合的预测体系仍不健全, 数据融合与模型泛化性需进一步优化。

4) 现有研究多聚焦填料单一力学性能, 热-力-水多场耦合机理、极端环境下填料长期耐久性研究存在明显缺口, 防治技术的系统性与工程适配性仍需完善。

## 6.2. 未来展望

1) 深化多场耦合机理研究, 聚焦极端气候条件下填料微观-宏观性能的关联演化规律, 完善寒区路基病害的理论体系, 为精准防控提供核心理论支撑。

2) 研发低成本、绿色环保的固废复合改良填料与高效保温隔热材料, 推动路基防治技术的节能化、资源化升级, 兼顾工程经济性与生态性。

3) 融合人工智能、物联网与 InSAR 技术, 构建寒区路基全生命周期智能监测-预测-防控一体化体系, 实现病害的提前预警与动态处置。

4) 推进数字化、智能化施工与运维养护技术落地应用, 攻克极端冻土环境下路基长效稳定的技术难题, 为寒区交通基础设施的设计、施工及全生命周期运维提供坚实的理论与技术保障。

## 参考文献

- [1] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1318-1336.
- [2] 何菲, 雷婉玉, 岳亚强, 等. 基于 CiteSpace 知识图谱的冻土路基研究现状与趋势分析[J]. 冰川冻土, 2024, 46(3): 891-908.
- [3] 石梁宏, 李双洋, 廖滢. 冻土随机性研究现状及展望[J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 57-63.
- [4] 赵亮, 景立平, 单振东. 冻土冻胀模型研究现状与进展[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(4): 43-52.
- [5] 郭惠芹, 王李阳, 王蕴嘉, 等. 青藏铁路多年冻土路基现状及分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(1): 116-121.
- [6] 朱志有, 王磊, 刘振奇, 等. 季节性冻土区铁路路基冻害研究现状[J]. 中国铁路, 2022(3): 124-130.
- [7] 朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982(3): 29-39.
- [8] Zhang, H., Zhang, Z., Zhang, K., Xiao, D. and Zhang, L. (2019) Effects of Freeze-Thaw on the Water-Heat Process in a Loess Subgrade over a Cut-Fill Transition Zone by Laboratory Investigation. *Cold Regions Science and Technology*, **164**, Article ID: 102789. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102789>
- [9] 童长江. 我国冻土融化压缩性研究[J]. 冰川冻土, 1988(3): 327-331.
- [10] Chamberlain, E.J. (1989) Physical Changes in Clays Due to Frost Action and Their Effect on Engineering Structures. *Frost in Geotechnical Engineering. International Symposium*, Saariselkä, 13-15 March 1989, 863-893.
- [11] 刘金豆. 寒区重载铁路路基冻害变形限值研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [12] 王庆志, 周志伟, 张淑娟. 青藏铁路路基粗颗粒填料动力特性和安定性行为研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 566-582.
- [13] 张宗堂, 肖天祥, 高文华, 等. 循环荷载下煤矸石路基填料动力特性及骨干曲线模型研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 84-92.
- [14] 刘鹏飞. 软岩质粗颗粒用作公路路基填料的级配及力学性能探讨[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(8): 110-112.
- [15] Cheng, Y., Yang, G., Long, Z., Yang, D. and Xu, Y. (2022) Dynamic Characteristics of Overconsolidated Remolded Red Clay in Southwest China: An Experimental Study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **81**, Article No. 176. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02683-2>
- [16] 贺建清, 阳军生, 靳明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(1): 199-205.

- [17] Nur, M.A., Khattak, M.J., Bhuyan, M.R. and Gaspard, K. (2020) Cracking Models for HMA Overlay Treatment of Composite Pavements in Louisiana. *International Journal of Pavement Engineering*, **22**, 1821-1832. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1725513>
- [18] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2690-2694.
- [19] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143.
- [20] 何朝伟. 冻融循环作用下路基土的剪切强度及其微观结构研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [21] 王晶. 反复冻融循环条件下粉砂土的力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- [22] 陈宝, 李池龙, 李永刚. 石灰改良路基土的力学特性试验研究[J]. 路基工程, 2013, 31(6): 78-82.
- [23] Yarbaşı, N., Kalkan, E. and Akbulut, S. (2007) Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives. *Cold Regions Science and Technology*, **48**, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.009>
- [24] 刘晖, 刘建坤, 邵博文, 等. 冻融循环对含砂粉土力学性质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 135-142.
- [25] 于楠, 宋杨, 秘贝, 等. 路基填料建筑固废混凝土的力学特性及颗粒破碎研究[J]. 中外公路, 2025, 45(2): 73-82.
- [26] 王勇, 时成林, 张健, 等. 红砖建筑固废路基填料的路用性能研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(1): 17-21.
- [27] 南益聪, 杨永刚, 王泽青, 等. 煤矸石对矿区土壤特性与植物生长的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1253-1262.
- [28] 汪双杰, 乔世范, 司伟. 多年冻土区路基新型保温隔热材料应用研究进展[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 362-374.
- [29] 郭成超, 党鹏, 马合木提·依明. 深厚含土重冰层路基高聚物隔热性能试验[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(4): 100-106.
- [30] 李娜, 赵燕茹. 基于 X-ray CT 技术研究混凝土内部损伤的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21169-21177.
- [31] Dong, H., Gao, P. and Ye, G. (2017) Characterization and Comparison of Capillary Pore Structures of Digital Cement Pastes. *Materials and Structures*, **50**, 1-12. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1023-9>
- [32] Fan, S., Ren, H., Hong, S., Xing, F., Hou, D. and Dong, B. (2023) Interfacial Mechanical Bond Characterization between Cement Pastes and Porous Aggregates through a Coupled XCT and DVC Technique. *Cement and Concrete Composites*, **142**, Article ID: 105158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105158>
- [33] 仝伟华, 顾相涛, 岳祖润, 等. 多年冻土区铁路桥台-路基水热力耦合数值分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 52-58.
- [34] 刘波, 杨伟红, 张功, 等. 基于隧道不均匀变形的地表沉降随机介质理论预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1943-1952.
- [35] Wang, Y., Li, J. and Li, L. (2020) Settlement of Jacked Piles in Clay: Theoretical Analysis Considering Soil Aging. *Computers and Geotechnics*, **122**, Article ID: 103504. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103504>
- [36] 蔡新, 范文超, 唐彤芝, 等. 基于功能原理强夯接触力与地基沉降计算[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 22-26.
- [37] 王子昂, 王武斌, 苏谦, 等. 新建铁路大临线临沧站站场路基沉降评估分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1688-1698.
- [38] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 级配碎石填料大三轴试验及累积塑性应变预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2993-3002.
- [39] 卢健, 姚爱军, 郑轩, 等. 地铁双线隧道开挖地表沉降规律及计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3735-3747.
- [40] Kumar, B. and Sahoo, J.P. (2020) Support Pressure for Circular Tunnels in Two Layered Undrained Clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**, 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.04.007>
- [41] 冯胜洋, 魏丽敏, 郭志广. 基于最小二乘支持向量机的高速铁路路基沉降预测[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(6): 6-10.
- [42] 田明杰, 牟智恒, 等. 基于 BP 神经网络的隧道稳定性分析研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 260-266.
- [43] 张宗堂, 肖天祥, 高文华, 等. 交通荷载下煤矸石路基填料累积变形 PSO-BP 神经网络预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 87-91.
- [44] 张新松, 李长圣, 钟军, 等. 基于神经网络的土石混合体 CT 图像分割及三维重建[J]. 工程地质学报, 2025, 33(3): 1230-1239.