

分类号：
学 号：20202110003

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



严寒环境下加筋材料拉伸性能及粗粒土加筋界面特性研究

学 位 申 请 人	白 奇 玉
指 导 教 师	王 勇 副教授 刘 杰 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

2023年09月

分类号：
学号：20202110003

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



严寒环境下加筋材料力学性能及粗粒加筋土界面特性研究

学位申请人	白奇玉
指导教师	王勇 副教授 刘杰 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

2023年09月

**Study on the mechanical properties of reinforced materials and the
interface characteristics of coarse-grained reinforced soil in severe
cold environment**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Bai Qiyu

(Architectural and Civil Engineering)

Dissertation Supervisor: A.P. Wang Yong

Senior Engineer. Liu Jie

September,2023

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：白奇斌

时间：2023年10月24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：白奇斌

时间：2023年10月24日

导师签名：王勇

时间：2023年10月24日

摘要

土工合成材料加筋土结构是国内外认可的岩土工程技术，具有造价低、适应性强及力学性能优越等特点。但由于传统工程技术理论在土工合成材料低温力学性能、低温条件下复杂填料加筋土结构界面特性等方面还存在一些不足，制约了寒区加筋土结构稳定控制方面的发展，因此对该技术在严寒地区的进一步推广应用造成困扰。在寒区工程中，加筋材料的力学特性，筋土界面的界面特性是影响寒区加筋土结构稳定性的关键因素，重点体现在：土工合成材料伴随土体长期处于低温状态，温度会对不同材料的力学性能产生影响；土体在低温影响下以粗粒土为代表的复杂填料筋土界面特性的改变机理尚不明确。因此针对土工合成材料在寒区应用中存在的问题，基于《土工格室加固机理及在寒旱区公路路基工程中的应用关键技术研究》项目的资助，主要工作如下：

(1) 通过室内试验，探究土工合成材料在低温环境下的力学性能，采用高低温拉力试验机，开展了 20°C、-5°C、-20°C 和 -35°C 条件下的单轴拉伸力学试验。在低温拉伸试验过程中发现并解决了夹具与土工合成材料之间出现的打滑问题，并对夹具进行了改良。分别对工程中常用的高密度聚乙烯 (HDPE)、聚丙烯 (PP) 及聚酯 (PET) 三种片材力学性能展开研究，比较其拉伸强度、断裂模式和对温度的敏感性。并用扫描电子显微镜 (SEM) 对三种片材的断裂处进行微观分析，总结了三种片材的生产工艺对其拉伸强度的影响。采用强度比与伸长率比，对三种片材的拉伸力学性能进行了定量分析，得出了适用于严寒地区气候条件的加筋材料，为土工合成材料加筋土结构在寒区工程中的应用提供理论依据。

(2) 为探究低温状态下土工格栅-粗粒土界面特性与加筋机理，采用新疆典型粗粒土，进行了土工格栅-粗粒土筋土界面的低温大型直剪试验。测试了土工格栅样条的低温拉伸力学性能参数以及试验所用粗粒土的物理力学性质指标，重点研究了在非冻结状态下与冻结状态下土工格栅加筋典型粗粒土筋土界面剪切位移-剪应力的曲线特征、峰值剪应力的变化规律以及剪胀特性的形成机制。结合 Mohr-Coulomb 强度准则分析了筋土界面抗剪强度指标，通过表观摩擦系数和土体的水平位移与剪胀量对筋土复合体剪胀特性的形成机制进行解释，揭示了严寒条件下土体中孔隙冰的胶结作用以及冻结导致土颗粒自身强度的提升对筋土界面参数的影响，为季节性冻土区的加筋土工程设计参数提供了数据支撑。

(3) 为探究粗粒土细观组构以及筋土界面特性的演化规律，采用 PFC^{3D} 软件对粗粒土加筋土工格栅的界面特性进行离散元模拟。从细观角度分析土工格栅与粗粒土在直剪过程中格栅的变形特点、粗粒土颗粒的位移与旋转、土体内部的应力场、力链分布以及孔隙率的变化，揭示了粗粒土颗粒的嵌固作用对土工格栅加筋粗粒土加筋机理的影响，从细观角度对粗粒土的加筋机理提供了理论解释。

关键词：严寒地区；土工合成材料；拉伸试验；直剪试验；筋土界面

Abstract

Geosynthetic-reinforced soil structures are recognized as geotechnical engineering technology, both domestically and internationally. This excellent structural form is widely applied in the field of geotechnical engineering, benefiting from its advantages of low cost, strong adaptability, and superior mechanical properties. However, due to the limitations in the traditional engineering technology theories, specifically related to the low-temperature mechanical properties of geosynthetics and the interface characteristics of complex filler-reinforced soil structures under low-temperature conditions, technological progress in the stability control of reinforced soil structures has been restricted in cold regions. Consequently, further application of this technology has been plagued, particularly in severe cold regions. The mechanical properties of reinforcing materials and the geosynthetic-soil interface characteristics remain as the core research directions for engineering applications in cold regions. These research areas primarily focus on the two aspects: the temperature impacts on the mechanical properties of different materials, considering the long-lasting exposure of geosynthetics to low temperature in the soil, as well as the mechanism of variations in the geosynthetic-soil interface characteristics in the case of complex fillers, particularly coarse-grained soil, under the influence of low temperatures, which is yet to be comprehensively understood. To address these challenges in the application of geosynthetics in cold regions, this research was initiated under the funding provided by the "Research on the reinforcement mechanism of geocell and the key technology for application in highway subgrade engineering in cold and arid regions" project. The research efforts encompass the following main components.

(1) To explore the mechanical properties of geosynthetics in low-temperature environments, laboratory tests were conducted. Specifically, uniaxial tensile mechanical tests were carried out using high- and low-temperature tensile testing machine at 20°C, -5°C, -20°C and -35°C. During the low-temperature tensile test process, slipping was observed between the fixtures and geosynthetics, which was solved by using modified fixtures. The mechanical properties of three commonly used engineering materials, namely high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), and polyester (PET), were studied using sheet specimens. These materials were compared in terms of tensile strength, fracture mode, and sensitivity to temperature. Fracture micro-analysis of these sheet specimens using scanning electron microscopy (SEM) helped summarize the influence of different production processes on their tensile strength. Their tensile mechanical properties were then quantitatively analyzed using strength ratio and elongation ratio. The analysis results unveiled the reinforcing materials suitable for the climatic conditions in severe cold regions, thus providing a theoretical

basis for the engineering application of geosynthetic-reinforced soil structures in cold regions.

(2) To explore the geogrid-coarse grained soil interface characteristics and reinforcement mechanism at low temperatures, a large-scale direct shear test was carried out using typical coarse-grained soil in Xinjiang. This test focused on the parameters representing the tensile mechanical properties of the geogrid specimens at low temperatures, as well as the indexes showcasing the physical and mechanical properties of the coarse-grained soil specimens. Special attention was given to the study on the curve characteristics pertaining to shear displacement-shear stress, the variation law of peak shear stress, and the formation mechanism of dilatancy characteristics at the geogrid-typical coarse-grained soil interface under non-freezing and freezing states. Moreover, the shear strength index of the geosynthetic-soil interface was analyzed, giving account to the Mohr-Coulomb strength criterion. The formation mechanism of the dilatancy characteristics in reinforced soil structures was elucidated by examining the apparent friction coefficient, as well as the horizontal displacement and dilatancy of the soil. This study revealed the presence of pore ice cementation in the soil under severe cold conditions, as well as the influence on geosynthetic-soil interface parameters due to freezing, which leads to increasing strength of the soil particles. The study results provide data support for the selection of parameters in the engineering design of reinforced soil structures in areas with seasonal frozen soil.

(3) To explore the evolution law of micro-fabric in coarse-grained soil and geosynthetic-soil interface characteristics, the PFC^{3D} software was used to simulate the interface characteristics between geogrid and coarse-grained soil by the discrete element method. The direct shear process of geogrid reinforced coarse-grained soil structures was analyzed from a microscopic perspective, including the geogrid deformation characteristics, displacement and rotation of coarse-grained soil particles, stress field inside the soil, distribution of force chain, and change in porosity. The analysis results revealed the influence of the embedding effect of coarse-grained soil particles on the reinforcement mechanism of geogrid-reinforced coarse-grained soil structures, thus providing a theoretical explanation for the reinforcement mechanism of coarse-grained soil structures from a microscopic standpoint.

Key words: severe cold region; geosynthetics; tensile test; direct shear test; geosynthetic-soil interface

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	3
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 土工合成材料拉伸力学性能研究现状.....	3
1.2.2 筋土相互作用机理研究现状.....	6
1.2.3 筋土界面数值模拟研究现状.....	9
1.3 研究内容及技术路线.....	12
1.3.1 研究内容.....	12
1.3.2 技术路线.....	13
第二章 土工合成材料低温拉伸力学特性研究.....	15
2.1 引言.....	15
2.2 试验概况.....	15
2.2.1 试验设备.....	15
2.2.2 夹具.....	16
2.2.3 试验材料.....	17
2.2.4 试验方案.....	18
2.3 试验结果及分析.....	19
2.3.1 HDPE 片材拉伸强度及断裂模式分析.....	19
2.3.2 PP 片材拉伸强度及断裂模式分析.....	21
2.3.3 PET 片材拉伸强度及断裂模式分析.....	23
2.3.4 试验结果对比分析.....	26
2.4 本章小结.....	29
第三章 土工格栅-粗粒土界面低温特性研究.....	31
3.1 引言.....	31
3.2 试验概况.....	31
3.2.1 试验设备.....	31
3.2.2 试验材料.....	33

3.2.3 试验方案.....	37
3.3 试验结果及分析.....	39
3.3.1 非冻结状态下(0°C)筋土界面特性分析.....	39
3.3.2 冻结状态下(-5°C)筋土界面特性分析.....	41
3.3.3 含水率和温度对筋土界面抗剪强度指标影响.....	43
3.3.4 筋土复合体剪胀特性分析.....	46
3.4 本章小结.....	47
第四章 土工格栅-粗粒土界面特性离散元模拟研究.....	49
4.1 引言.....	49
4.2 颗粒离散元的基本理论.....	49
4.2.1 颗粒离散元.....	49
4.2.2 颗粒离散元的基本力学理论.....	50
4.2.3 颗粒离散元中的基本接触模型.....	53
4.3 直剪试验的建模过程与参数标定方法.....	56
4.3.1 粗粒土颗粒(Clump).....	57
4.3.2 单向 HDPE 土工格栅(Ball).....	59
4.3.3 模型箱(Wall)与整体模型.....	61
4.4 模拟结果分析.....	62
4.4.1 试验与模拟结果对比验证.....	62
4.4.2 土工格栅单体变形受力分析.....	63
4.4.3 粗粒土颗粒的位移与旋转分析.....	66
4.4.4 筋土复合体的应力场分析.....	69
4.4.5 粗粒土孔隙率的变化分析.....	73
4.5 本章小结.....	76
第五章 结论与展望.....	78
5.1 结论.....	78
5.2 创新点.....	79
5.3 展望.....	79
参考文献.....	81
致谢.....	89
作者简介.....	90

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

我国东北、内蒙古、和新疆北部、西藏北部、青海等地区以及高海拔山区冬季严寒且持续时间长，最低气温可达 -50°C ^[1]。在寒区工程中，随气候的变化，岩土由冻结状态转变为融化状态或由融化状态转为冻结状态，直接影响寒区岩土工程构筑物的安全与使用性能，甚至酿成工程事故，例如路基因冻胀与融沉而引发的不均匀沉降以及挡墙、边坡因冻融循环后产生的裂缝与坍塌都是常见的工程事故。因此，严寒环境下岩土工程构筑物的安全与使用性能是目前研究的热点问题。

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确指出要加快建设交通强国，加强出疆入藏、中西部地区等骨干通道建设^[2]。未来大量的交通基础设施建设将在高寒高海拔地区开展，以新疆为例，打通天山区域大通道是“十四五”新疆交通建设的主战场。目前，G0711 乌鲁木齐-尉犁公路、G219 线都拉塔口岸至昭苏公路、G218 线那拉提至巴伦台公路建设项目、G219 温宿-昭苏通道已开工建设。按照国家、自治区交通运输发展规划，G3033 独山子-库车高速公路即将全面启动，高寒山区地形一般都较为陡峭，基础设施高填构筑物较多。同时，该地区气候寒冷、地震烈度高、路基填料复杂的现实条件导致圪工防护结构施工难度大、工程造价高，如何降低工程造价，提升工程服役性能一直是工程界和学术界关注的热点问题。

土工合成材料与水泥、木材、砖头和钢材合称为五大工程建筑材料，在土木工程、水利工程、岩土工程、交通工程中应用广泛。土工合成材料加筋土结构是国内外正在推广的优秀岩土工程技术，具有造价低、适应性强及力学性能优越等特点，在大多数情况下土工合成材料加筋土结构可以取代圪工挡土墙，从而显著降低山岭地区基础设施的施工难度和工程造价，是一种非常有前途的岩土工程结构形式。新疆 S101 线土工格栅加筋陡坡路堤、G217 线独库公路哈希勒根防雪走廊土工格室挡墙、川藏铁路拉林段土工格栅挡墙、青藏高原冻土区加筋路堤试验段、哈大客运专线等实践表明土工格栅及土工格室加筋结构对严寒地区高填构筑物、路基的稳定性有较大优势，而且占地面积小、用料省，可大大减小工程建设对环境及生态的破坏^[3-8]。欧美及日本等国家和地区应用加筋土结构逐渐取代传统的支护结构，目前已经成为一种主流防护形式。但是，由于传统工程技术理论在土工合成材料低温力学性能、低温条件下复杂填料加筋土结构界面特性等

方面的认识还不清晰，导致寒区加筋土结构稳定控制还存在一些不确定性，对土工合成材料加筋土结构在严寒地区的进一步推广应用造成困扰。甚至，在严寒地区加筋土结构也有不少工程事故发生，如 S12 线伊宁至墩麻扎段高速公路位于伊犁河谷腹地伊宁市境内，属季节性冻土区，冬冷夏热，昼夜温差大，冬季降雪量大，夏季降水较充沛，该段高速公路跨线桥匝道采用土工格栅粗粒土加筋挡墙。在 2019 年到 2021 年间该段高速公路跨线桥匝道多处加筋土挡墙同时出现筋材断裂、面板脱落、整体垮塌等破坏。根据调查，其挡墙垮塌均发生在每年 3、4 月份的季节性冻土融化期，挡墙填土中粗粒土的含水率较高，甚至达到饱和状态，最严重处的垮塌后缘已接近公路中线，且未垮塌处路面已经出现较多的纵向裂缝，与面板连接处的拉筋带出现断裂，面板已经发生明显的“鼓肚子”现象，随时都有可能发生面板脱落，进而导致整体失稳，垮塌现场如图 1-1 所示。

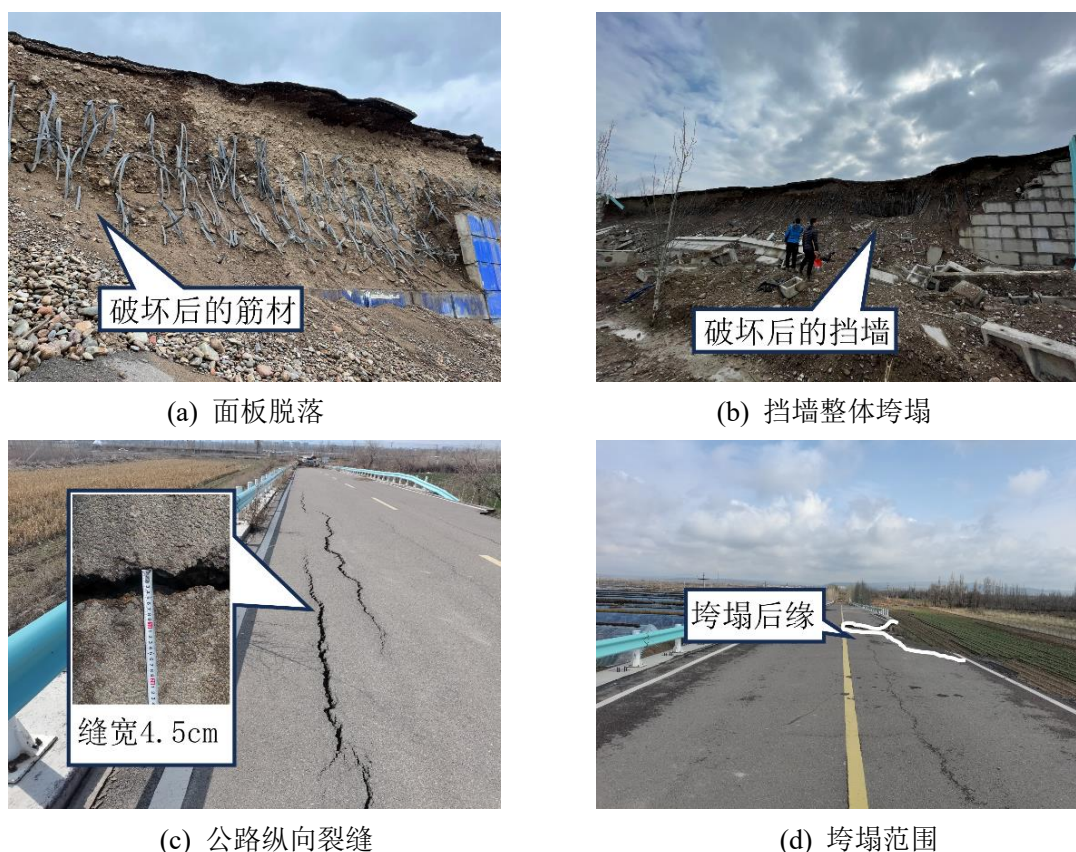


图 1-1 寒区加筋土工程事故

Fig.1-1 Accidents of reinforced soil engineering in cold regions

大量的工程实践表明，以土工合成材料加筋土为代表的土工构筑物受严寒气候条件的影响较大，主要原因还在于低温环境下土工合成材料本身的力学性能与筋土界面特性的改变机理不明确，严重影响着工程的安全服役。因此，对寒区加筋土工程亟需深入研究，其中加筋材料的低温特性和加筋土工程的筋土界面特性为核心研究方向。同时，与欧美日等发达国家的应用不同，我国西部山区路基填筑追求填挖平衡，一般充分利用挖方粗粒土和土石混合物作为路堤填料，寒区气候特点及填料性质的复杂性导致严寒地区

筋土相互作用机理更加复杂。综合国内外研究及工程应用现状可以看出，在寒区、粗粒土等条件共同作用下，严寒环境下加筋材料力学性能及粗粒加筋土界面特性尚需进一步研究。

1.1.2 研究意义

土工合成材料加筋作为一种柔性结构，在阻抑路基的融沉与冻胀、挡墙的倾覆与位移方面有较强的优势，在季节性冻土及多年冻土区等寒区工程中已有小范围的应用^[9-11]。

而在寒区工程中，土工合成材料作为一种有机高分子材料，伴随土体长期处于低温状态，温度会对不同材料的力学性能造成差异。在低温条件下，材料性能的改变机理不清楚，会导致工程设计中参数的准确性出现偏差，影响工程服役性能，甚至酿成工程事故。虽然大量的研究表明，相比于高温状态，高分子材料在低温状态下的蠕变较小^[12-13]，但是在低温条件下，土工合成材料在拉伸性能方面的研究还存在一定不足，尤其是材料的设计参数取值还存在一定的不确定性。因此，通过开展对土工合成材料片材低温拉伸力学性能研究，为土工合成材料在寒区工程中的应用提供参数支撑。

另一方面，在严寒环境下筋土界面的研究，多以现场监测和室内冻融循环试验作为手段，考虑土体冻结与融化的筋土界面特性研究较少。而冻结与融化为两个长期过程，土体中水分的迁移会使土体产生一系列变化。由于温度梯度势能的分布不均匀，水分将由高势能向低势能流动，改变结构物内部的水分分布，筋土界面附近土体中水的不同状态对筋土界面特性会产生较大影响^[14-15]。目前对于土体在低温状态下，筋土界面特性的改变机理尚不明确，尤其是在含水率的变化以及加筋结构在冻结与非冻结状态下的界面特性研究还存在一定的不足，影响到寒区加筋土结构设计参数的合理取值。

综上所述，严寒地区气候、填料等多因素的耦合限制了土工合成材料加筋土结构这一具有明显技术和经济优势的结构形式在寒区工程中的推广应用。因此，基于高低温拉伸试验机，开展土工合成材料低温拉伸特性研究；通过大型低温直剪试验，开展低温状态下土工格栅-粗粒土界面特性研究；通过离散元数值模拟开展土工格栅-粗粒土界面微观特性的分析，将理论分析、室内试验、数值模拟相结合，对严寒环境下加筋材料拉伸力学性能及粗粒加筋土界面特性展开研究，为严寒地区的加筋土工程设计与工程建设、工程病害处置方案的确定提供理论依据，具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土工合成材料拉伸力学性能研究现状

根据《土工合成材料应用技术规范》(GB/T 50290-2014)^[16]，可将土工合成材料基