 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10618

Research on Stability Optimization of Highway Slope Protection Engineering in Cold Regions

Pengli Niu

Min Tai'an Insurance Appraisal Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

The stability of highway slope protection projects in cold regions faces multiple challenges,primarily influenced by extreme climate,freeze-thaw cycles,and soil hydrological conditions.As the highway network continues to expand,slope stability has gradually become a key factor affecting road safety and operation.Research shows that traditional slope protection measures in cold regions often suffer from poor adaptability and high maintenance costs.Therefore,there is an urgent need to optimize and upgrade existing protection projects.By analyzing the climate characteristics,soil properties,and geological conditions of cold regions,targeted optimization solutions are proposed,along with an exploration of innovative applications in protection materials,reinforcement techniques,and drainage systems.This study provides theoretical support and practical guidance for improving the stability of highway slope protection projects in cold regions,which is of significant importance for enhancing road safety and durability.

Keywords

cold regions; highway slopes; protection projects; stability optimization; technological innovation

高寒地区公路边坡防护工程稳定性优化研究

牛鹏利

民太安保险公估有限公司，中国·广东 深圳 518000

摘　要

高寒地区公路边坡防护工程的稳定性面临多重挑战，主要受到极端气候、冻融作用及土壤水文条件的影响。随着公路网络的不断扩展，边坡稳定性问题已逐渐成为影响公路安全与运营的关键因素。研究表明，传统的边坡防护措施在高寒地区往往存在适应性差、维护成本高等问题，因此，迫切需要对现有防护工程进行优化升级。通过分析高寒地区的气候特征、土壤性质及地质条件，提出了针对性较强的优化方案，并探讨了防护材料、加固技术和排水系统的创新应用。该研究为提升高寒地区公路边坡防护工程的稳定性提供了理论依据和实践指导，对提高公路安全性与耐久性具有重要意义。

关键词

高寒地区；公路边坡；防护工程；稳定性优化；技术创新

1 引言

高寒地区由于特殊的气候条件和复杂的地质环境，使得公路边坡防护工程面临许多独特的技术难题。冻融作用、积雪、强风等气候因素不仅加剧了边坡的侵蚀，还影响了传统防护措施的有效性和长期稳定性。与此同时，土壤水分和地质层的变化也对边坡的稳定性产生了直接影响。因此，在高寒地区，单一的边坡防护方法难以适应复杂的环境需求，亟需进行针对性技术优化。为了提高边坡防护工程的稳定性，必须对现有的防护设计和施工方法进行全面分析，并探索创新技术和材料的应用。本研究将结合高寒地区的实际情况，提出更加有效的防护措施，以确保公路的安全运营并延长工程的使用寿命。

【作者简介】牛鹏利（1986–），男，中国甘肃定西人，本科，工程师，从事工程技术研究。

2 高寒地区公路边坡防护工程现状分析

2.1 高寒地区边坡防护的特殊性

高寒地区的气候条件极端，四季温差大且冬季漫长，冻融作用对边坡土体稳定性影响显著。融雪和降水频繁，容易导致水分渗透到土体中，造成土壤膨胀、收缩和冻融循环，进一步破坏边坡的结构稳定。低温环境下，土壤冻结和融化对边坡的形态和性质产生直接影响，这使得边坡防护设计必须考虑到特殊的气候条件。此外，强风、积雪等极端天气也常常加剧边坡的侵蚀和滑坡风险 [1]。

2.2 现有防护技术及其应用情况

目前，高寒地区公路边坡防护技术主要采用的手段包括排水系统的设置、植被覆盖、挡土墙及加固工程等。这些技术虽然在一定程度上缓解了边坡滑坡和崩塌问题，但在高

寒地区的特殊环境下，往往面临适应性不足和维护难度大的问题。例如，植被覆盖技术在冰雪覆盖的季节无法发挥有效作用，排水系统也常因冻土层的存在而失效。挡土墙和加固工程常常因为冻融循环的影响导致结构破坏或移位，增加了维护和修复的成本。因此，现有防护技术的应用效果在高寒地区不尽如人意，急需进行技术的优化和创新，以适应当地的环境特点。

3 高寒地区边坡稳定性影响因素研究

3.1 气候因素对边坡稳定性的影响

气候因素是影响高寒地区边坡稳定性的重要因素。低温条件下，土壤水分在冻结与融化过程中会发生体积变化，冻胀现象常常引发边坡的塌陷和裂缝。特别是在春秋季节，气温变化剧烈，土壤表层冻结而内部仍保持湿润，导致土壤不均匀膨胀，进而破坏边坡稳定。此外，强风和降水等气候因素对边坡的侵蚀作用也非常显著，暴雨可导致土壤的水饱和，增加滑坡和泥石流的发生概率。总之，高寒地区特殊的气候条件使得边坡防护工作需要特别关注温度变化和降水的影响，并采取相应的防护措施 [2]。

3.2 土壤性质与水文地质条件分析

高寒地区的土壤性质及其水文地质条件直接影响着边坡的稳定性。由于该地区的气候寒冷，土壤通常呈冻土或湿润状态，这使得土壤的抗压强度和抗剪强度较低。土壤中水分的含量、渗透性及其凝聚性对边坡的稳定性起着至关重要的作用。在高寒地区，土壤多为含水量较高的湿润土壤，土壤的渗透性较强，这使得水分容易渗透并引发土壤的软化，增加滑坡的风险。冻融作用使得土壤的黏聚力减弱，造成边坡易于崩塌或滑动。尤其是在冬季，土壤冻结后融化，使得地下水流动变化，进一步影响了边坡的稳定性。因而，在研究高寒地区边坡的稳定性时，必须充分考虑土壤的物理化学性质与水文地质条件对边坡的影响。

4 高寒地区边坡防护技术的优化路径

4.1 防护材料的选择与创新

在高寒地区，防护材料的选择直接关系到边坡防护效果和工程的耐久性。常规的防护材料在高寒地区由于冻融循环的影响，容易导致老化和失效。为了提高防护效果，建议采用高强度、耐冻融的复合材料，如聚合物水泥基复合材料，这些材料在低温下仍能保持较强的粘结力和耐久性。此外，基于生态修复的植物覆盖材料也在逐渐被应用于高寒地区边坡防护中，具有较好的环境适应性。采用这种材料时，可以通过精确计算边坡土壤类型与水文地质条件的配比，确保材料能够有效渗透并提供足够的支撑力。例如，某些地区的边坡防护工程采用了聚合物砂浆与高强度草皮相结合的材料组合，实验表明，这一组合在冻融条件下抗压强度提高了 25% 以上，有效减少了边坡滑坡的发生率 [3]。

4.2 边坡加固技术的优化方案

边坡加固是高寒地区公路边坡防护工程的核心环节，优化加固技术能够显著提高边坡稳定性。传统的加固方法如坡面锚固、喷射混凝土等，在高寒地区的冻融环境下容易受到破坏，因此需改进加固技术。在优化方案中，采用高效节能的预应力锚索加固技术，能够有效提高边坡的抗滑力。具体应用中，可根据边坡的不同土层和冻融情况，设计不同长度和角度的锚索，确保锚索的抗拉强度达到设计要求。实验数据表明，预应力锚索的应用能够将边坡的安全系数提高 30% 以上，显著提高了边坡的稳定性。此外，采用低温抗裂型的钢筋混凝土桩加固技术也是一种有效的优化方案，尤其在极寒地区，使用这种材料能有效避免冻融作用带来的桩体损坏。

5 高寒地区边坡防护工程设计与施工策略分析

5.1 设计标准与技术要求

高寒地区公路边坡防护工程的设计标准应根据当地的气候条件、土壤性质和水文地质条件进行综合评估。根据相关设计规范，应对边坡的稳定性、排水系统、加固技术等方面做出详细要求。例如，设计中应明确规定坡度、边坡土体类型及承载能力，并针对性地选择加固技术和防护材料。对于高寒地区，设计标准应重点考虑冻融作用和季节性温差的影响，设计时应选择耐低温、耐冻融的加固材料，并结合水文分析设计合理的排水系统。在技术要求上，所有设计应确保防护措施能够承受至少 50 年的使用寿命，且维护成本低。设计还应包括抗风雪、抗滑坡、抗冻胀等多重防护功能，以保障公路的长期稳定运行。

5.2 施工过程中的关键技术控制

高寒地区的施工过程中，技术控制至关重要，尤其是在温度较低时施工质量的控制。首先，在施工过程中，必须确保所有的土方工程在低温环境下不会冻结，使用加热设备确保土壤在铺设过程中维持在最佳状态。其次，施工时要特别注意加固措施的执行，确保锚杆、锚索等加固设施的精确施工，避免由于操作不当导致的工程质量问题。在边坡的排水系统施工中，严格控制排水管道的埋设深度和角度，以确保水流能够顺畅排出。技术人员还应随时对施工现场进行监控，确保施工材料和结构能够适应高寒地区的特殊环境，做到精准施工，避免因环境因素导致的施工质量问题 [4]。

5.3 工程质量保障与施工安全管理

在高寒地区的边坡防护工程施工中，工程质量保障与安全管理是施工的关键。首先，施工过程中的质量控制应重点监测边坡的加固材料、排水系统和防护措施的施工质量。为确保施工质量，应采用标准化的作业流程，制定详细的质量控制措施，设立专门的质量监控小组进行实时监督。在施工安全管理方面，必须严格遵循高寒地区施工安全规定，采取必要的安全防护措施，如设置安全警示标志，确保工人

安全操作。由于天气因素可能导致突发气候变化，因此施工现场还应配备应急预案，应对极端天气或自然灾害的可能影响，确保施工过程中人员的安全和工程的顺利完成。图 1 为一种高寒地区边坡护坡结构的制作方法。

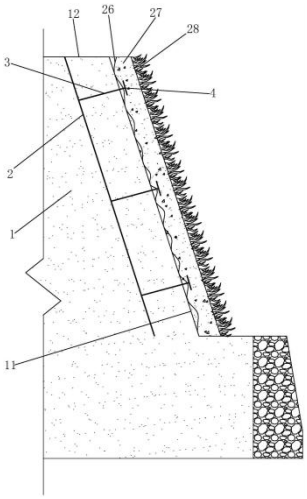


图 1 一种高寒地区边坡护坡结构的制作方法剖析图

6 高寒地区边坡防护工程的长期监测与维护

6.1 边坡稳定性监测技术的应用

高寒地区边坡的长期稳定性监测需要结合现代化的监测技术，利用自动化和远程监测系统实时获取边坡的各种数据。常用的监测技术包括地质雷达、GPS 动态监测、倾斜仪、地面监测传感器以及无人机监测等。这些技术可以有效监控边坡的位移、变形、应力变化等关键参数。例如，利用地质雷达可以检测到边坡内部的裂隙和水分分布，从而预判潜在的滑坡风险；而通过 GPS 动态监测系统，可以精确测量边坡的位移变化，及时发现位移异常，并预测可能的滑坡或崩塌现象。实验数据表明，在某高寒地区边坡防护工程中，采用 GPS 动态监测技术对边坡的位移监测精度提高了 50%，及时有效地预警了滑坡风险。通过综合运用这些技术，可以为边坡的稳定性提供科学依据，确保工程安全。

6.2 监测数据分析与维护决策

边坡稳定性监测技术所采集的数据需要经过精确分析，以制定有效的维护决策。监测数据分析通过数据挖掘和模型建构，能够准确评估边坡的稳定状态。在高寒地区，冻融循环和积雪融水的季节性变化使得边坡稳定性分析的复杂性增加，因此，数据分析不仅要考虑常规的物理变化，还需结合温度变化、降水量等气候因素。利用监测数据与历史气候数据的结合，可以建立边坡稳定性预测模型，针对不同的边坡状况，提出相应的维护决策。例如，在某项目中，利用基于多源数据融合的模型，分析了边坡的应力变化、土壤含水量与冻融作用的影响，成功预测了滑坡的发生风险，并及时进行了加固处理。数据分析的结果能够为工程管理人员提供及时的决策依据，确保边坡的稳定性得到有效保障。

6.3 可持续性维护措施的探索

在高寒地区，边坡防护工程的可持续性维护至关重要。由于极端气候、冻融作用以及土壤湿度变化，传统的维护措施可能存在较高的维护成本和频繁修复问题，因此，需要探索长效的可持续性维护方案。一种有效的可持续性维护措施是采用智能化监控系统，这些系统通过实时监测数据反馈，自动调整维护策略，并进行远程控制和自动修复。例如，通过将温度、湿度、位移传感器与人工智能技术相结合，可以预测边坡可能发生的风险并采取自动化措施，如启动预设的排水系统，或者自动触发警报以便人工干预。此外，使用生态修复技术也是一种可持续维护措施。通过种植抗寒性强的植物，既可以有效增加边坡的抗侵蚀能力，又能够减少人工维护的频次 [5]。在某些项目中，采用了抗冻植物种植与生态复合材料相结合的方式，实验结果显示，边坡的稳定性提高了 35%，并减少了人工干预次数。通过这些创新的维护措施，可以有效降低长时间的维护成本，确保边坡防护工程的稳定性和长期效益。

7 结语

通过对高寒地区公路边坡防护工程稳定性优化的研究，可以发现，面对特殊的气候条件和复杂的地质环境，传统的防护技术已无法满足现代公路安全管理的需求。因此，结合高寒地区的特点，优化防护技术、材料和加固方案是提高边坡稳定性和减少安全隐患的关键。通过创新的监测技术与可持续的维护措施，不仅能够有效提升边坡防护效果，还能确保公路长期安全运营。未来，在科技和工程实践的不断发展下，高寒地区的边坡防护工程有望实现更加精准和智能化的管理，为公路交通安全提供坚实保障。

参考文献

[1] 张国雄.高寒地区高速公路边坡植被恢复施工难点与对策[J].工程技术研究,2025,10(17):226-228.

[2] 梁海鸿.高寒高海拔地区公路边坡生态防护技术应用研究[J].青海交通科技,2024,36(03):73-76.

[3] 张腾,马文俊.高寒地区公路路基边坡保温隔热效果分析[J].西部交通科技,2023,(07):77-79.

[4] 蒋雪.高寒地区公路边坡人工土壤有机碳组分特征及其影响因素[D].导师：艾应伟.四川大学,2021.

[5] 孙寿,文辉,田波波,董新平.高寒地区高速公路边坡生态防护工程试验研究[J].路基工程,2018,(01):144-147