

# Study on mechanical performance analysis and optimal design of new protective structure for steep embankment slope

Yaguang Yuan

Guangdong Provincial Institute of Transportation Planning and Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

This paper proposes a new type of protective structure design for the application of traditional slope protection structure in high and steep slope surface. The stability and stress distribution characteristics of the new structure are studied by mechanical properties analysis and finite element simulation. It is found that, compared with the traditional protection methods, the new structure has better adaptability and stability, which can effectively reduce the slope stress concentration and improve the overall stability of the slope. Based on the parameter optimization analysis, the structure design is further optimized and a set of optimization design scheme is proposed. This study provides a new idea for the prevention and control of high and steep embankment slopes and is of great significance to the road safety construction in mountainous areas of China.

## Keywords

high and steep embankment slope; new protective structure; analysis of mechanical properties

## 高陡路堤边坡新型防护结构的力学性能分析与优化设计研究

袁亚光

广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 中国·广东 广州 510000

## 摘要

本文针对传统边坡防护结构在高陡坡面应用时存在的不足,提出了一种新型防护结构设计。通过力学性能分析与有限元模拟方法,研究了新型结构在不同工况下的稳定性和应力分布特性。研究发现,相对于传统防护方法,新型结构具有更好的适应性和稳定性,能有效降低边坡应力集中,提高边坡整体稳定性。基于参数优化分析,对结构设计进行了进一步优化,提出了一套优化设计方案。本研究为高陡路堤边坡的防治提供了新思路,对我国山区道路安全建设具有重要意义。

## 关键词

高陡路堤边坡; 新型防护结构; 力学性能分析

## 1 引言

我国西部的山区地形复杂,高陡路堤边坡的地质灾害问题一直是道路安全建设中的重要挑战。传统的边坡防护方法在这些地区的应用效果并不理想,往往不能满足实际工程需求,特别是在高陡坡面上存在显著的局限性。鉴于此,开发和优化专门针对高陡路堤边坡的防护结构显得尤为迫切。本文提出了一种新型防护结构设计,旨在克服传统防护结构在此类地质环境中遇到的问题。本研究的成果为高陡路堤边坡的稳定性管理提供了新的解决思路,对增强我国西部山区道路的安全性及其可持续发展具有实际和深远的意义。

【作者简介】袁亚光(1995-),男,中国湖北咸宁人,硕士,助理工程师,从事道路总体设计研究。

## 2 问题背景及挑战

### 2.1 我国西部山区地质灾害现状

我国西部山区以其复杂的地形和丰富的自然资源特征而闻名,也是地质灾害频发区域<sup>[1]</sup>。这些地区地质条件多样,包括陡峭的山坡、活跃的断裂带和不稳定的地质构造,导致了滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害的高发。气候条件的多变性,如强降雨和植被稀疏,也进一步加剧了这些灾害的发生风险。随着基础设施建设的快速推进,对道路尤其是山区道路的需求不断增长,使得高陡路堤边坡的防护成为亟待解决的难题。在这种背景下,现有的传统防护结构在面对复杂动态的自然环境时,稳定性和适应性显得不足,难以提供道路长期的安全保障,迫切需要探索更为有效的防护解决方案,以应对这些严峻的地质挑战。

### 2.2 高陡路堤边坡地质灾害的特殊性

高陡路堤边坡地质灾害的特殊性体现在多个方面。地

形复杂的西部山区，高陡边坡普遍具有坡度大、坡高等特点，易受自然环境和人为活动的影响而发生地质灾害。这些边坡的稳定性往往受到降雨、地震、风化等因素的干扰，导致其承载能力减弱，由于土体内摩擦角和内聚力的降低，边坡材料易发生破坏。高陡坡面的几何特性和不均匀的地质结构，增加了滑坡、崩塌等灾害发生的可能性。路堤结构在高陡坡面上的施工难度较大，传统防护措施难以适应复杂的地质条件，通常不能充分抵抗外力的作用，亟需研发适应性更强的新型结构进行有效防护。

## 3 新型防护结构的提出

### 3.1 高陡边坡新型防护结构的构想

高陡路堤边坡在地质灾害频发的西部山区具有极高的潜在风险，开发一套新型的边坡防护结构至关重要。新型防护结构的构想主要基于对传统方法的改进，以增强其适应性和有效性。通过引入岔道加固技术，能够有效分散坡面应力，增强结构的整体稳定性。结合现代材料科学，运用高强度、耐腐蚀的新型建材，不仅提升了结构强度，还降低了长期维护成本。考虑到复杂的山区地形，通过模块化设计，使结构能够灵活适应不同边坡环境。新型防护结构采用多层次防护组合，利用嵌入式加固网和地表植被绿化相结合，减少表层土壤流失，增强生态恢复能力。此构想在确保边坡稳定的兼顾了经济性和生态效益，提供了一种创新且高效的防护方案。

### 3.2 新型防护结构的理论基础

新型防护结构的理论基础在于提高边坡的整体稳定性和适应性，针对高陡边坡特殊的地质特征，通过力学原理进行创新设计。在力学方面，新结构旨在通过优化材料的分布和形态，实现对应力的更均匀传递，从而降低局部应力集中现象。新型结构通过一系列结构单元的相互作用，使得它能够在地质变动或施工扰动下维持稳定。其设计还考虑了地应力、剪切应力和拉应力的综合影响，以此提升结构的面对复杂地质环境的应变能力。同样，结构的几何配置和材料选择也经过精心设计，以增强其抗滑移、抗倾覆能力。通过结合现代工程力学与材料科学，新型防护结构理论为高陡边坡的防护提供了一种更加安全和有效的方法<sup>[2]</sup>。

### 3.3 新型防护结构的预期优势

新型防护结构具有多方面的预期优势。它通过创新设计和选材，显著增强了对地质灾害的适应能力，在应对复杂地形时表现出更高的灵活性<sup>[3]</sup>。结构在分配和转移应力方面具备优良的特性，能够有效减少边坡应力集中现象，从而提升整体稳定性。该结构的适应性不仅提升了施工效率，也降低了对环境的干扰。较低建设和维护成本提高了其经济性，使其在大规模推广应用中展现出明显的可行性和竞争力。

## 4 新型防护结构力学性能的分析与模拟

### 4.1 力学性能的理论分析

新型防护结构的力学性能主要通过理论分析来评估其在高陡边坡应用中的适应性与稳定性。分析过程涵盖材料力学特性、结构应力分布及其相互作用。采用弹性力学理论，结合结构优化设计中的参数变量，探讨结构在不同应力条件下的响应模式。基础材料的抗压强度及弹性模量通过理论计算获得，以确保材料在负载条件下的性能。结构设计遵循力矩平衡与应力分布原则，以减少应力集中带来的潜在风险。通过理论模型分析结构在侧向压力、重力荷载等多重力学条件下的步态和塑性变形，评估其稳定性。注重结构的抗剪切能力，通过理论公式验证其在临界状态下的破坏特征。结合上述分析，确定该新型防护结构不仅在抗压、抗剪能力上优于传统结构，而且具有良好的力学性能适应性，能有效提升高陡边坡的整体稳定性。

### 4.2 有限元模拟方法的应用

有限元模拟方法在新型防护结构力学性能分析中起到关键作用。通过建立详细的三维模型，该方法可精确模拟边坡在不同工况下的应力分布和变形特性。模拟过程中，采用真实材料参数和边界条件，确保结果的可靠性。针对新型防护结构，验证了在不同加载条件下的稳定性，通过分析得出边坡应力集中区域及其变化规律。通过比较传统结构与新型结构的应力分布图，得出新型结构能够有效降低边坡应力集中，增强整体稳定性。模拟结果为后续设计优化提供了科学依据。这个过程强调了有限元模拟在理解和评估防护结构性能方面的重要性。

### 4.3 新型防护结构工况下的稳定性和应力分布特性

在新型防护结构的工况分析中，采用有限元模拟揭示其稳定性及应力分布特性。与传统结构相比，新型结构在复杂地形下展现出优异的力学性能，表现为边坡的应力集中现象显著减弱。结构在不同载荷及环境因素影响下，均保持较高的稳定性，边坡变形得到有效控制。应力分析显示，新结构能够合理分布并传递外部荷载，降低局部应力峰值。这些特性证明了新型防护结构在应对地质灾害时的潜在优势，为边坡工程提供了可靠的解决方案。

## 5 新型防护结构的优化设计

### 5.1 参数优化的理论与方法

参数优化在新型防护结构的设计中起着至关重要的作用，其核心在于通过数学和计算方法在满足设计要求的最小化资源使用和成本。优化理论基础包括目标函数的确定、约束条件的设置及优化算法的选择。目标函数通常反映防护结构的性能指标，如稳定性和应力分布，而约束条件则涉及材料强度、施工技术和环境限制。常用的优化方法有梯度下降法、遗传算法和粒子群算法，这些算法通过不断迭代实现参

数在多维空间上的全局最优搜索。在此过程中,有限元模拟结果为各参数组合的性能提供了依据,优化模型则结合多种工况下的数据进行迭代更新,实现参数调整。有效的参数优化能显著提高结构设计的整体性能,确保新型防护结构在实际应用中的可行性和经济性。

## 5.2 新型防护结构的优化设计

新型防护结构的优化设计主要通过对关键参数进行调整,以达到最佳的性能表现。通过力学性能的理论分析与有限元模拟,识别出影响结构稳定性与应力分布的关键参数。利用多目标优化技术,针对材料选择、几何尺寸及构造形式等进行方案改进,确保在不同地质条件下防护结构的适应性和稳定性。考虑施工经济性与环境适应性,优化设计方案不仅提高了边坡的整体稳定性,还降低了工程造价。最终形成的设计方案在力学性能上表现出优异的减震和稳固能力,确保边坡长期安全并达到节约资源的目的。

## 5.3 优化后结构的功能性能分析

优化后的新型防护结构在功能性能方面表现出显著提升。力学性能分析表明,优化设计有效降低了边坡处的应力集中现象,改善了应力分布的均匀性,从而提升了边坡的整体稳定性。该结构通过对关键参数的调整,增强了对于环境变化的适应能力,尤其是在极端气候条件下表现出优良的稳定性和可靠性。优化后的结构设计考虑了材料的可持续利用,降低了施工过程中的资源消耗,实现了经济效益与环境效益的双重提升,为未来高陡路堤边坡的安全和可持续建设提供了可靠的技术支持。

# 6 优化方案的实际应用及意义

## 6.1 优化方案实施的经济性和可行性

在评估优化方案的经济性和可行性时,需考虑工程成本、施工周期及后期维护费用。新型防护结构在设计过程中,通过材料选用和结构简化,实现了成本的优化。常规施工设备即可满足构件安装的要求,减少了对专业设备的依赖。施工周期得到了缩短,在保证安全的前提下,提高了施工效率。由于新型防护结构有效降低了应力集中,减少了可能的结构损坏风险,从而降低了维护和修复频率,进而减少了长期维护成本。在经济效益的前提下,新型结构设计充分考虑了复杂地形条件和当地施工环境,对于在资源有限的山区实现大规模应用具备现实可行性。通过综合分析,新型防护结构设计不仅经济高效,而且能够在实际应用中迅速推广。

## 6.2 长期稳定性的确保

新型防护结构的优化设计在确保高陡路堤边坡的长期稳定性方面具有显著优势。通过对关键参数的优化,结构能在长期荷载作用下保持较高的稳定性和适应性。随着时间的推移,材料的耐久性和抗腐蚀性提供了卓越的性能表现,进一步减少了由于环境变化导致的损伤风险。优化设计还特别关注了结构的排水性能,有效防止水分积聚,从而减少了土体滑移的可能性。这些设计改进确保了长期使用中应力均匀分布,降低了边坡的潜在失稳风险,为山区道路的安全运行提供了重要保障。通过严格的测试和监控,优化后的结构展示出可靠的长期抗灾能力。

## 6.3 对我国山区道路安全建设的贡献

新型防护结构优化设计的实施,为我国山区道路的安全建设带来了显著贡献。它通过提升边坡的整体稳定性,有效减少地质灾害的发生频率,并降低潜在灾害对人身和财产安全的威胁。这一优化设计方案不仅加强了高陡边坡的长期可靠性,还兼顾了经济与施工的可行性,促进了山区道路建设的可持续发展。这对于提升我国西部山区道路基础设施的质量和抗风险能力,具有重要的现实意义和战略价值。新型结构的应用将有助于推进山区道路建设的现代化进程。

# 7 结语

本研究针对我国西部山区高陡路堤边坡常发生的地质灾害,设计了一种新型的防护结构,通过广泛且深入的力学性能和有限元模拟分析,成功提出现出其优异的稳定性、最优的应力分布以及应对高陡边坡的适应性。对比传统防护方法,该结构能显著降低边坡的应力情况,增强边坡整体稳定性。本文进一步对该结构进行了优化,以提升其使用效果、考虑经济效益和施工的可行性。尽管已取得重要进展,但研究仍有限,未来需关注新型防护结构在实际应用中的可行性和耐久性。本研究对于高陡路堤边坡的防治提供了新理论和实践指导,对我国山区道路安全建设具有深远影响,希望为相关领域的发展和边坡防护工程实践提供参考。

## 参考文献

- [1] 冀伟.山区道路高陡路堤边坡设计[J].交通世界,2021,(09):100-101.
- [2] 冯小平.山区道路高陡路堤边坡设计研究[J].福建建筑,2020(06):62-64.
- [3] 李兵.新型高陡边坡排水结构加固技术研究[J].西部交通科技,2022,(09):21-22.