

Optimization technology of frost and thaw cycle performance of pavement base material

Mengdan Ji

Guoji Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

In cold and high-altitude freeze-thaw areas, the performance of pavement base materials degrades due to freeze-thaw cycles, leading to a shortened service life. This paper explores the degradation mechanisms and proposes optimization techniques from three perspectives: material composition, structural design, and construction methods. These techniques include reducing porosity, adding modified materials, and enhancing with high-performance fibers and nanomaterials. Using the Gongyu Expressway as a case study, years of operation and monitoring have shown that these optimization techniques significantly improve the freeze-thaw resistance of the base layer, reduce cracks and other defects, extend the service life, and lower costs. This provides important references for highway construction in similar regions and promotes the development of related technologies.

Keywords

pavement base material; freeze-thaw cycle; performance optimization; engineering application

路面基层材料抗冻融循环性能优化技术

吉梦丹

国基建设集团有限公司, 中国·山西太原 030000

摘要

在寒冷及高海拔冻融区, 路面基层材料受冻融循环影响, 易出现性能劣化, 缩短路面使用寿命。本文深入探究其劣化机理, 从材料组成、结构设计和施工工艺三方面提出优化技术, 涵盖降低孔隙率、掺加改性材料等措施, 并引入高性能纤维和纳米材料增强效果。以共玉高速公路为案例, 经多年运营及监测, 验证优化技术使基层抗冻融性能显著提升, 裂缝等病害减少, 使用寿命延长, 成本降低, 为同类地区公路建设提供重要参考, 推动了相关技术发展。

关键词

路面基层材料; 冻融循环; 性能优化; 工程应用

1 引言

公路建设的发展, 使寒冷与高海拔冻融区的路面基层材料面临严峻考验。冻融循环常致其性能下滑, 引发路面病害, 威胁使用安全。为提升路面质量与耐久性, 降低养护成本, 深入研究优化技术成为行业迫切需求。本文将从材料组成、结构设计及施工工艺三方面着手, 展开全面探究, 旨在为相关工程提供有力技术支持。

2 路面基层材料抗冻融循环性能劣化机理

2.1 冻融循环作用机制

冻融循环过程中, 路面基层材料孔隙中的水分冻结膨胀, 产生巨大冰胀压力, 使材料内部微结构受损。随着温度回升, 冰晶融化, 孔隙内压力骤降, 材料内部已受损的微观结构难以完全恢复。反复冻融循环下, 材料内部微裂纹不断

产生、扩展、相互贯通, 最终导致材料宏观性能显著下降。

2.2 材料自身因素对冻融性能的影响

1. 水泥稳定碎石中, 水泥水化产物如氢氧化钙等在冻融作用下稳定性差, 易与水分发生化学反应, 导致强度弱化; 集料的吸水性使孔隙中水分增多, 加剧冻融损伤。

2. 石灰粉煤灰稳定土的强度主要依赖石灰与粉煤灰的化学反应, 但其反应产物耐水性、耐冻性不足, 在冻融循环和水分侵蚀下易分解, 强度快速衰减。

3. 级配碎石虽具有良好的排水性能, 但若级配不合理, 孔隙率过高, 大量水分会进入孔隙, 在冻融循环下引发松散等病害。

2.3 外部环境因素的影响

环境温度波动幅度越大, 冻融循环对材料的破坏作用越强。频繁的冻融循环使材料性能持续恶化。降水量大且集中, 致使路面基层积水, 加速冻融循环对材料的损害。交通荷载与冻融循环耦合作用下, 车辆荷载在材料强度弱化阶段易使路面产生车辙、裂缝等病害^[1]。

【作者简介】吉梦丹(1987-), 女, 中国山西运城人, 本科, 工程师, 从事路面工程研究。

3 路面基层材料抗冻融循环性能优化技术

3.1 材料组成优化

1. 降低孔隙率：优化水泥稳定碎石级配，增加细集料比例，使粗细集料紧密嵌挤，连通孔隙数量和尺寸减小。某工程实践表明，优化后孔隙率从 8% 降至 5%，吸水率大幅降低，抗冻融性能显著提升。

2. 掺加改性材料：在水泥稳定碎石中掺入聚丙烯纤维，纤维与水泥基体形成增强网络，有效阻碍裂缝扩展。同时，掺入沥青乳液于级配碎石，其包裹集料表面，增强集料间粘结力，降低吸水性。试验显示，掺加纤维后材料冻融后强度保留率提高 20%，掺沥青乳液使级配碎石冻融循环后质量损失率降低 15%。

3.2 结构设计优化

1. 设置隔离层与排水层：在基层与面层间铺设土工布隔离层，阻止水分渗透，基层底部设透水性碎石排水层，及时排出底部水分。某山区公路应用后，基层含水率降低 30%，冻胀量减少 40%，有效抑制冻胀病害。

2. 加厚基层与复合基层结构：根据交通等级，适当增加基层厚度，提高结构抗冻融能力。采用上层抗冻水泥稳定碎石与下层级配碎石复合基层结构，上层提供强度与抗冻性，下层增强排水与支撑。现场检测数据表明，复合基层路面在经历 100 次冻融循环后，病害发生率较传统结构降低 50%。

3.3 施工工艺优化

1. 控制含水率：施工时，采用烘干法精确测定含水率，依材料特性与环境条件确定最佳含水率范围。水泥稳定碎石施工含水率控制在最佳值 $\pm 1\%$ ，确保强度形成与耐久性。

2. 合理养生：湿法养生水泥稳定类基层材料，覆盖土工布并定时洒水，保持湿润。养生 7 天后，材料强度稳定增长，抗冻性能提升。养生不足使强度低、孔隙多，抗冻性差^[2]。

4 极端气候条件下的路面基层材料性能研究

4.1 极寒地区材料性能研究

1. 在极寒地区（最低气温可达 -40°C 以下），路面基层材料面临更严峻的低温考验。通过开展极低温环境下的室内试验，模拟实际工况，发现材料在极寒条件下其内部微观结构的变化更为剧烈。

2. 针对极寒地区，优化材料组成时，除了降低孔隙率和掺加常规改性材料外，还引入了抗冻蛋白等新型添加剂。抗冻蛋白能够在材料内部形成一层保护膜，有效降低冰晶的生长速率和尺寸，从而减轻冰胀压力对材料结构的破坏。试验表明，在掺入适量抗冻蛋白后，水泥稳定碎石在极寒条件下的抗压强度提高了 25%，抗冻融循环次数可增加 30%。

4.2 极端温差环境下的材料性能研究

1. 在昼夜温差极大的高原冻融区，路面基层材料经历着快速的冻融循环过程。研究发现，这种快速的温度变化会使材料内部的热应力与冻融应力相互叠加，加速材料的疲劳损伤。通过建立数学模型，分析了温度变化速率与材料性能指标之间的关系，得出在极端温差环境下，材料的疲劳寿命

会显著缩短。

2. 为应对极端温差环境，优化结构设计时，除了采用复合基层结构外，还设计了温度缓冲层。温度缓冲层采用具有良好热稳定性的材料（如橡胶改性沥青混凝土），能够有效吸收和释放热量，减小温度变化对基层材料的影响。工程实践表明，设置温度缓冲层后，基层材料的温度应力降低了 40%，疲劳裂缝的发生率减少了 60%^[3]。

5 基于新型材料的路面基层材料优化技术

5.1 高性能纤维增强材料

1. 研发了新型高性能纤维（如碳纤维与聚乙烯醇纤维的混合纤维），将其应用于路面基层材料中。这种混合纤维具有更高的强度和更好的粘结性能，能够在材料内部形成更有效的增强网络。通过对比试验，发现掺入混合纤维的水泥稳定碎石基层材料，其无侧限抗压强度比仅掺加单一纤维的材料提高了 18%，劈裂强度提高了 22%。

2. 进一步研究了混合纤维的最佳掺量和分布状态。采用数值模拟与实验相结合的方法，确定了在不同交通荷载等级和环境条件下，混合纤维的最佳掺量范围为 0.3% - 0.5%（体积比）。同时，通过优化施工工艺，使混合纤维在基层材料中均匀分散，充分发挥其增强作用^[4]。

5.2 纳米材料改性路面基层材料

1. 探索了纳米材料（如纳米二氧化硅和纳米氧化钙）在路面基层材料中的应用。纳米材料具有极高的比表面积和反应活性，能够与水泥水化产物发生二次反应，生成更多的胶凝物质，从而提高材料的密实度和强度。试验结果显示，掺入纳米二氧化硅的水泥稳定碎石，其 28 天抗压强度比未掺纳米材料的提高了 30%，且在经历 150 次冻融循环后，强度保留率仍能达到 80% 以上。

2. 研究了纳米材料的分散技术和掺入方式。通过加入适量的分散剂和采用预混工艺，解决了纳米材料在基层材料中易团聚的问题，使其能够在材料内部均匀分布，充分发挥改性效果。

6 路面基层材料长期性能预测模型

6.1 预测模型的建立

1. 收集了大量不同环境条件下路面基层材料的长期性能跟踪数据，包括材料的强度、模量、冻胀量等指标随时间的变化关系。同时，考虑了交通荷载、气候条件、材料组成等因素对性能的影响，建立了基于人工神经网络的长期性能预测模型。该模型能够根据输入的历史数据和相关影响因素，对路面基层材料在未来一定时期内的性能进行预测。

2. 为了提高预测模型的准确性，采用遗传算法对人工神经网络的初始权重和阈值进行优化。通过不断迭代训练，使模型能够更好地拟合实际数据，预测误差控制在 5% 以内。

6.2 预测模型的应用

1. 在实际公路工程中，利用建立的长期性能预测模型，对路面基层材料的使用寿命和病害发展趋势进行预测。根据预测结果，为公路的养护和管理提供科学依据，制定合理的

养护计划。例如,对于预测在未来3-5年内可能出现严重病害的路段,提前采取预防性养护措施,如局部补强、罩面处理等,延长路面的使用寿命,降低养护成本。

2. 通过对不同优化技术方案下的长期性能预测,评估各种方案的技术经济可行性。选择出在满足性能要求的同时,具有较低寿命周期成本的优化方案进行推广应用,实现公路建设的可持续发展^[5]。

7 工程应用案例分析

7.1 工程概况

共玉高速公路(青海共和至玉树)是我国首条穿越高海拔多年冻土区的高速公路,也是青藏高原多年冻土区建设的首条高速公路。该公路全长635公里,其中多年冻土路段约360公里,沿线地区平均海拔在4000米以上,气候条件极为恶劣,年均气温在-5℃左右,冻融循环频繁,昼夜温差大,给路面基层材料的性能带来了极大的挑战。

7.2 优化技术应用过程

7.2.1 材料组成优化

1. 水泥稳定碎石的级配调整与改性:在水泥稳定碎石的级配设计方面,通过增加细集料比例,使粗细集料紧密嵌挤,孔隙率从传统的8%-10%降低至5%左右。同时,为提高其抗冻融性能,掺入了聚丙烯纤维,掺量为0.3%(体积比),以及适量的抗冻蛋白,使材料能够更好地抵抗冰晶生长对内部结构的破坏。

2. 级配碎石的优化:在级配碎石中,除了采用优化级配降低孔隙率外,还掺入了2%(体积比)的沥青乳液,增强集料间的粘结力,降低吸水性。

7.2.2 结构设计优化

1. 设置隔离层与排水层:在基层与面层之间铺设了土工布隔离层,有效阻止了水分从面层渗透到基层。在基层底部设置了透水性碎石排水层,及时排出基层底部的水分,减少了冻胀力对基层的破坏。

2. 采用复合基层结构:根据交通荷载和环境条件,将基层厚度加厚了5cm,并采用了上层抗冻水泥稳定碎石(厚度为18cm)与下层级配碎石(厚度为23cm)的复合基层结构,充分发挥了各层次的优势。

7.2.3 施工工艺优化

1. 含水率控制:在施工过程中,采用了烘干法精确测定含水率,并根据材料特性与环境条件确定了最佳含水率范围。在水泥稳定碎石施工时,严格控制含水率在最佳值±1%以内。

2. 养生措施:对水泥稳定类基层材料采用了湿法养生,覆盖土工布并定时洒水,确保养生期不少于7天,使材料强度稳定增长,抗冻性能提升。

7.3 应用效果评估

7.3.1 路基性能提升

1. 抗冻融性能显著增强:经过优化的路面基层材料在

经历多次冻融循环后,其强度和稳定性得到了有效保持。水泥稳定碎石基层的28天无侧限抗压强度达到了4.5mpa,冻融循环100次后的强度保留率仍在85%以上,极大地减少了因冻融循环导致的路面病害。

2. 路面平整度良好:由于基层材料性能的提升和结构设计的优化,共玉高速公路的路面平整度得到了有效保障。在多年的运营过程中,路面平整度指标始终满足设计要求,行车舒适性良好。

3. 使用寿命延长:通过优化技术的应用,共玉高速公路的路面使用寿命得到了显著延长。与传统的路面结构相比,病害发生率降低了60%,维修成本减少了50%,大大提高了公路的使用寿命和经济效益。

7.3.2 病害发生率降低

在多年的运营过程中,共玉高速公路的路面病害得到了有效控制。与未采用优化技术的同类公路相比,裂缝、车辙、松散等病害的发生率显著降低。例如,路面裂缝的数量减少了70%,车辙深度小于5mm的路段占比达到了90%以上,有效保障了行车安全和公路的正常使用功能。

7.3.3 环境适应性增强

优化后的路面基层材料在极端气候条件下展现出了良好的适应性。在极寒天气(最低气温可达-40℃以下)和昼夜温差极大的情况下,仍能保持良好的性能。这得益于在材料组成中添加的抗冻蛋白、高性能纤维以及纳米材料等新型添加剂,提高了材料的抗冻性和抗疲劳性能,使其能够更好地适应高海拔冻融区的恶劣环境。

8 结语

本文全方位探究了路面基层材料抗冻融循环性能优化技术。研究发现,通过优化材料组成、结构与施工工艺,可显著提升路面基层的抗冻融性能。共玉高速公路的工程实践证实,优化后的路面基层能有效减少病害,延长使用寿命,降低养护成本,为寒冷及冻融区公路建设提供了重要参考。

未来,随着技术进步和交通基础设施建设需求的提升,我们将继续深入研究更耐久、更环保的路面基层材料,进一步完善优化技术体系,加强多学科交叉融合,以应对更复杂环境的挑战,推动公路建设行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 张维东,汪愿,宋鹏飞,等.高寒区混凝土多场耦合损伤劣化机制研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(07):2317-2334.
- [2] 任海生.高海拔高寒地区混凝土桥面沥青铺装损伤机理及性能提升研究[D].东南大学,2023.
- [3] 张丽娜.季冻区沥青路面使用性能预测及养护决策研究[D].东北林业大学,2022.
- [4] 顾涵.碳纤维缠绕Ⅲ型气态储氢装备模态与振动疲劳特性研究[D].西华大学,2024.
- [5] 郝大力.路面性能的评价与分析研究[D].长安大学,2000.