

寒冷地区混凝土桥梁冻融损伤机理与防护方法探讨

奚映钟

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650217

【摘要】：寒冷地区混凝土桥梁常面临严峻的冻融循环环境，导致其结构耐久性和使用寿命受到严重影响。本文旨在探讨混凝土桥梁在冻融循环条件下的损伤机理，并提出相应的防护方法。通过综合分析冻融损伤的影响因素，结合不同试验和实践经验，提出一系列增强混凝土耐冻融性能的策略，以提高桥梁的整体可靠性和安全性。

【关键词】：混凝土桥梁；冻融损伤；寒冷地区；耐久性；防护方法

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.030

引言

寒冷地区的桥梁建设一直受到冻融循环现象的挑战。这种环境条件导致混凝土内部产生反复的水分结冰和融化过程，从而引发结构损伤和性能退化。随着全球气候的变化和交通负荷的增加，研究和掌握混凝土桥梁的冻融损伤机理变得尤为重要。在此背景下，本文重点研究冻融对混凝土材料的影响机制，并探讨有效的防护措施，以延长桥梁的使用寿命。

1 冻融损伤机理

1.1 冻融循环对混凝土的影响

冻融循环是指温度反复在冰点上下波动，从而引起混凝土内部水分的反复冻结和融化。这一过程对混凝土的耐久性产生了显著的影响。在寒冷气候下，水在混凝土的孔隙和裂缝中冻结后，体积膨胀约9%，这种体积膨胀会在混凝土内部引发高压。当解冻发生时，融化的水对混凝土的结构产生进一步的破坏，使材料更容易吸收更多的水，恶化其物理性能。冻融循环导致的显著问题包括表面剥落、强度降低、吸水率增加和抗渗性下降，最终缩短混凝土结构的寿命并增加维护成本。这种反复的物理破坏加速了混凝土的劣化，特别是在使用普通配方混凝土且没有进行特殊处理的情况下。

1.2 水饱和度与冻融损伤的关系

水饱和度是影响混凝土冻融损伤的一个关键因素。混凝土的孔隙率和水与水泥比决定了其吸水能力，从而影响其耐冻性能。当混凝土中孔隙充满水且没有足够的空间容纳新形成的冰时，冻融循环会导致显著的体积变化和由此产生的内应力。高水饱和度的情况下，混凝土容易发生损伤，因为冻结水产生的膨胀力没有缓冲余地。如果混凝土中存在足够的空气孔（通过引气剂引入），这些孔可以吸收部分膨胀力，减少损伤。此外，准确掌握浇筑时间和混凝土的初始固化

温度以减少水饱和程度，对于增强混凝土抵御冻融损伤的能力也至关重要。

1.3 冰胀力及其对混凝土结构的破坏作用

冰胀力是指水在冻结时体积膨胀所产生的力，这种力在狭窄的混凝土孔隙中尤为显著。冰胀力能够对混凝土结构造成的破坏是冻融损伤的核心。随着水结冰体积增大，无法及时释放的膨胀压力会导致微裂纹产生并逐渐扩展。这些微裂纹在反复的冻融循环下增大，最终引起混凝土的剥落、剥蚀甚至整体结构性损伤。冰胀力对混凝土不同部分的破坏度也不均匀，通常在暴露于极端环境的外表面最为严重。这种内部压力的累积和释放不仅削弱了混凝土的物理结构完整性，也增加了对未来冻融循环的敏感性，加速了整体结构的劣化过程。为了减轻这一损伤，必须采取特定的材料选择和优化工程设计来应对和缓解冰胀力对结构的影响。

2 影响因素分析

2.1 材料组成及其抗冻融性能

材料组成在很大程度上决定了混凝土的抗冻融性能。关键在于混凝土的配料，如水泥种类、集料性质、水与水泥比，以及掺合料和添加剂的选择。高品质的水泥和低水灰比能提高混凝土的密实度，从而减少水分的渗入和冰胀损害。此外，掺入引气剂可以在混凝土内部形成微小的空气泡，这些气泡为冻胀提供了缓冲空间，有效地减缓内应力的积累。掺和料如粉煤灰和硅灰的使用，也可以改善混凝土的微观结构，进而提升其抵御冻融循环的能力。因此，在选材和配比设计中，必须针对寒冷地区的具体环境要求进行优化，以获得最佳的抗冻融效果。

2.2 环境条件与冻融循环次数

环境条件对混凝土桥梁的冻融损伤有直接的影响。层积严寒、日夜温差剧烈的地区尤其容易加速冻

融循环的频次和强度。每一次温度的骤降都会导致水在混凝土孔隙中冻结，形成内部压力，并在解冻时造成结构的细微破损。频繁的冻融循环会加速微裂缝的发展和扩展，从而导致更严重的结构性损伤。气候变化和极端天气事件的增多，增加了这种循环的不确定性。因此，在设计和施工阶段，必须认真考虑当地的气候特征和预期的冻融循环次数，以便采取适当的预防措施，减轻桥梁所受的环境压力。

2.3 结构与施工工艺的影响

结构与施工工艺的合理性直接影响混凝土桥梁的耐久性和抗冻能力。合理的结构设计可以降低应力集中，避免局部应力过高引发的局部冻融破坏。采用标准化的施工方法，以及严格的质量控制流程，有助于确保混凝土的均匀性和密实度，减少内部缺陷。施工过程中，应特别注意气温控制、混凝土养护，避免快速降温或升温带来的内外温差。此外，施工细节如适当的排水系统设计和妥善的施工缝处理，也在保护结构免受冻融侵害方面扮演重要角色。因此，将现代化施工技术与创新设计理念相结合，可以显著提高寒冷地区桥梁的抗冻融性能和结构寿命。

3 防护方法

3.1 增强混凝土抗冻融性的材料改进

3.1.1 引气剂和补强纤维的应用

引气剂的应用是在混凝土中引入微小而均匀的气泡，这些气泡在冻融循环中起到缓冲作用，使体积膨胀过程对混凝土结构的影响最小化。微观气泡提供了必要的应力释放空间，有助于减缓冻融损伤的发生。与此同时，补强纤维，如聚丙烯纤维或钢纤维，可以有效地增强混凝土的拉伸和弯曲抗性，减少微裂缝的产生和扩展。纤维的随机分布在材料内部形成了一个增强网，提供了额外的结构支持，提升了混凝土在恶劣环境下的综合性能。

3.1.2 高性能混凝土的使用

高性能混凝土（HPC）拥有更低的孔隙率和更高的强度，使其在面对极端气候条件时表现出更好的耐久性和抵抗力。HPC通过优化水泥用量、选择优质骨料并加入高效矿物掺合料，如硅灰或矿渣微粉，使得混凝土更加密实，减少水分的渗透和冻结破坏。这种材料的使用大幅度降低了水灰比，提高了混凝土的内部结构强度，延长了桥梁的使用寿命。应用高性能混凝土不仅意味着更好的抗冻融性能，也显著提升了桥梁的整体耐腐蚀和抗磨损性能。

3.2 施工质量控制与优化设计

3.2.1 精确施工管理

精确的施工管理是实现整体质量控制的基础。施工过程中的气温、湿度以及浇筑和养护条件必须得到严格管理和监控。关键措施包括在适宜的气温条件下浇筑混凝土以确保其正确固化，并在早期养护阶段提供充足湿度以防止表面裂缝的形成。施工人员需要接受专业培训，确保按照标准作业规程执行，并做好应对突发天气的准备，保持任何环境条件下施工品质的稳定性。

3.2.2 排水系统的设计优化

优化的排水系统设计对于混凝土桥梁的耐久性有着不可忽视的影响。有效的排水系统可以迅速移除桥面和基础周围的水分，减少水分渗入混凝土内部并引起冻融破坏的风险。在设计排水系统时，应确保其具备快速引导和排除降水的能力，防止积水。具体设计可以包括排水坡度的设置、桥面排水沟以及桥梁接缝处的密封处理等细节措施。这些优化设计能够有效减少潜在的水分滞留，降低冻融损害的可能性，从而提升桥梁的长期服务性能。

3.3 桥梁表面防护措施

3.3.1 渗透密封材料的应用

渗透密封材料是一类能够渗入混凝土表面的化学防护剂，这些密封剂可以填充和封闭混凝土表面的微小孔隙，从而阻止水分渗透。渗透密封材料通常由硅烷或硅氧烷等化学物质组成，这些物质能够与混凝土中的硅酸盐反应，形成耐水性较强的硅酸凝胶层。该凝胶层有助于减少液态水的入侵，降低因水饱和导致的冻融损害。同时，渗透性密封材料保持了混凝土的透气性，使其内部积聚的水分有机会蒸发出去，从而在不影响结构呼吸功能的前提下提供有效的防护。这种处理极大地延长了混凝土桥梁在恶劣气候条件下的使用寿命。

3.3.2 表面涂层与覆盖材料

表面涂层和覆盖材料是通过在混凝土桥梁表面施加一层保护性的物质，形成一层物理屏障，以防止水分、盐和其他腐蚀性物质的入侵。这类材料通常为聚合物基涂层、环氧树脂涂层或沥青基覆盖层，它们能够有效阻隔环境因素对混凝土表面的直接侵害。聚合物和环氧涂层具有出色的粘附力和耐化学性，通过增加混凝土的抗渗性和抗化学侵蚀能力而显著延缓冻融损伤的发展。应用于桥梁结构时，这些涂层还能提供额外的抗紫外线保护，同时增强表面的耐磨损性。另

外，新型覆盖材料如自修复涂层在微裂缝形成时能够自动愈合，进一步增加防护效果。通过这种方式处理过的桥梁结构不仅拥有更长的耐用性，其维护需求和总体使用成本也将相应减少。

4 未来研究方向

4.1 智能监测技术在防护中的应用

智能监测技术在现代桥梁工程中扮演着越来越重要的角色，特别是在寒冷地区的混凝土桥梁防护中，它提供了实时、精准的结构健康状态评估。通过在桥梁结构中嵌入传感器阵列，能够长期监测温度、湿度、应力和振动等关键参数。这种系统可以实时分析冻融循环引起的结构变化，识别潜在的裂缝发展和其他损伤早期迹象。例如，光纤传感器和无线传感网络能够在不影响桥梁正常功能的情况下持续收集数据，并通过云平台进行分析，生成可视化报告。这不仅有助于优化维护决策流程，还可以将突发故障的风险降至最低。此外，借助人工智能及大数据技术，预测性维护程序可以提前识别出潜在的灾难性失败，使得维修工作更具针对性和经济效益，从而延长桥梁寿命和提高安全性。

4.2 新型材料的研发与测试

为了应对寒冷地区桥梁在严峻环境下的冻融损伤问题，新型材料的研发和测试成为了科研的重中之重。这些新材料通过化学和结构上的创新，旨在增强混凝土的抗冻融性能、延长其使用寿命。高性能混凝土（HPC）和超高性能混凝土（UHPC）是当前研究的重点，通过加入增强纤维、纳米技术和自愈合材料来提高其耐久性。此外，功能化涂层和表面处理剂如自修复聚合物，也在积极研发中，有望进一步提升桥梁的保护水平。新的实验方法和加速测试技术也在不断发展，帮助快速验证这些新材料的效果和长期稳定性。通过实验室模拟真实环境因素，新材料在应用于实际工程项目之前，经过严苛的测试以确保其适用性和可靠性。这些创新不仅提高了混凝土结构在极端气候条

件下的表现，还为未来的桥梁建设提供了可持续发展的材料选择。

4.3 综合管理系统的建立

在应对寒冷地区混凝土桥梁冻融损伤时，建立一个综合管理系统是确保桥梁长效服务和安全运行的关键。综合管理系统融合了先进的监测技术、数据分析手段和管理策略，以实现桥梁维护和防护的最佳化。首先，该系统借助物联网技术，将遍布桥梁结构的传感器网络的数据进行实时采集，这些传感器能够监测温度、湿度、应力变化和结构振动等关键参数。然后，收集的数据通过云平台进行大数据分析，借助机器学习算法可以识别出异常模式，预测可能的损伤发展趋势。该系统还集成了信息化的维护管理工具，帮助决策者以数据为基础进行维修计划的制定和调整。通过风险评估与管理模块，管理者可以预先识别高风险区域，并实施针对性的预防措施，如及时的表面处理和材料修复。此外，系统设计还包括资源管理优化，保障在进行维修时，各类人力、物资和设备的合理调配，以减少资源浪费和提高修复效率。通过调动所有相关资源，综合管理系统不仅能显著降低维修成本，还能提高桥梁的可靠性和使用寿命，在极端气候条件下确保公共安全和资源的可持续利用。这种系统化的桥梁管理方式有效整合了技术手段和管理智慧，为现代桥梁工程在严酷环境下的管理提供了一个可复制的范例。

5 结语

面对寒冷地区严酷的自然条件，探索混凝土桥梁的冻融损伤机理与防护方法不仅具有理论意义，也具有重要的工程实践价值。通过深入研究冻融损伤的影响因素和机理，并结合具体的防护策略，可以显著提升桥梁的耐久性，确保其在全生命周期内的安全和功能。未来的研究应在新材料开发、智能监控和整体管理系统方面不断探索，以更好地应对冻融挑战，实现桥梁基础设施的可持续发展。

参考文献:

- [1] 孙晓燕,孙保沭,黄承逵,等.基于可靠度的寒冷地区混凝土桥梁碳化寿命分析[J].中国矿业大学学报,2005,34(4):458-461.
- [2] 戴鹏飞.寒冷地区公路混凝土桥梁病害养护及修复技术研究[J].北方交通,2022(12):17-20.
- [3] 李忠,李涛,崔凤坤,等.寒冷地区冰冻海域混凝土桥梁耐久性现场检测及评估[J].公路,2024,69(5):414-418.
- [4] 穆柏林.寒冷地区碳化与冻融对混凝土桥梁耐久性影响试验研究[D].河北建筑工程学院,2018.
- [5] 邓旭.寒冷地区桥梁工程大体积混凝土施工的温度控制[J].河南科技,2017(1):119-120.