

整与整体优化。阶段性调整通常在索塔封顶前进行，目的是逐步修正主梁的各节段高程与索力分配，保持结构的设计线形。这一阶段的调整主要通过每个施工阶段的监测数据进行分析，及时进行细微调整，确保施工过程中不出现显著的变形或偏差。整体优化则主要发生在主梁合龙前后，通过综合索力调整和结构反变形控制，修正累积误差，确保结构的整体稳定性。合龙后，为了确保轨道铺设的精度，必须进行多轮复测，并结合温度补偿模型对最终线形进行修正。这些措施有效地避免了在施工后期因累积误差导致的线形偏差，确保了桥梁整体的设计精度与施工质量。

4.3 误差修正与动态反馈机制

在大跨度桥梁施工中，不确定性因素使得误差无法完全避免，尤其是在施工过程中的复杂变形环境下。为此，建立了动态反馈机制，通过实时监测与数值计算的联动，形成“监测—分析—调整—再监测”的闭环控制。该机制能够根据实时监测的数据，及时识别结构中的偏差并迅速作出调整。例如，对于索力的偏差，可以通过局部重新张拉或邻索补偿等方式进行修正；对于主梁高程的偏差，则可通过调整临时支撑或反拱控制进行纠偏。关键在于数据响应速度与决策执行的同步性，确保在结构应力重新分布之前完成必要的调整。这一机制能够显著提高施工过程中调整的精准性，避免了由于误差积累带来的结构失稳风险，并确保了整个施工过程的安全性及高效性。

5 综合控制体系的实践应用与成效分析

5.1 施工过程的综合协调与管理模式

在大跨度桥梁施工中，综合协调与管理至关重要，涉及设计、监测和施工三方的紧密配合。为了实现这一目标，越来越多的工程开始引入 BIM（建筑信息模型）与监测信息平台相结合的技术手段，确保施工过程的实时管理与调控。通过这一平台，设计参数、施工状态和监测数据得以可视化集成，施工团队可以根据实时反馈动态调整施工计划。尤其在复杂施工环境中，信息化平台的应用有效减少了人为误差与信息滞后，提高了决策效率和精度。管理层可借助数据分析工具实时监控施工进度、质量与风险状态，确保在施工过程中及时发现并解决潜在问题。这种数据驱动的决策模式显著提升了施工效率和安全性，也为施工过程中出现的突发状况提供了更加高效的应对策略。

5.2 典型工程应用与监测结果分析

以某高铁跨江斜拉桥的建设为例，桥梁主跨达到 480 米，采用双塔双索面钢箱梁结构。该项目的施工过程中，共布设监测点 420 个，采集了近 100 万条数据。通过结合索力与主梁高程的双重控制，监测数据显示，桥梁的线形偏差控制在

$\pm 3\text{mm}$ 以内，符合高铁运营标准。特别是优化后的张拉顺序，不仅有效地降低了塔顶水平位移，减少了 25% 的偏差，还将主梁竖向变形控制在设计值的 90% 以内，极大提升了施工精度和质量。通过这一系列监测与控制措施，施工过程中的数据反馈与实时调整得以实现，从而确保了结构的稳定性与精度。该工程实例验证了综合控制体系在复杂工程中的有效性，充分证明了信息化监测与反馈控制的巨大优势。

5.3 技术经济与安全效益评价

综合控制体系的实施不仅在技术上提高了施工精度，还在经济和安全效益上取得了显著成果。传统的线形调整往往依赖于经验判断，导致施工过程中存在较高的返工概率和较长的施工周期。然而，信息化控制体系的引入显著降低了这些问题的发生，施工返工率降低了约 40%，索力调整次数减少了 20%，同时施工周期缩短了近一个月。安全方面，通过实时监测和动态调整，施工人员暴露在高风险环境中的时间大幅度减少，安全风险事件明显下降。综合效益分析表明，信息化综合控制体系在提高工程质量的同时，不仅优化了成本和工期，还显著降低了施工过程中的安全风险。这一体系的应用为类似大型项目提供了可借鉴的管理模式，推动了施工技术与管理方式的现代化。

6 结语

大跨度高铁斜拉桥施工控制与线形调整技术是保障结构安全与运行平顺性的关键环节。通过构建以监测、仿真与调整为核心的全过程控制体系，实现了结构变形的动态预测与实时修正。研究表明，多学科融合与信息化技术在施工控制中的应用显著提升了施工精度与可靠性。未来的发展方向应聚焦于智能传感技术、数字孪生模型及人工智能优化算法的融合应用，构建自适应的智能控制体系。随着高铁网络的持续扩张，此类高精度控制技术将成为桥梁工程建设的核心支撑，推动中国高铁桥梁建设迈向更高的质量与安全标准。

参考文献

- [1] 李俊,张伟宁,黎修旺.支座沉降对大跨度矮塔斜拉桥结构受力及索力的影响分析[J].西部交通科技,2025,(11):113-116.
- [2] 肖军华,宛洪宇,孙思齐,等.基于轨道不平顺特征的千米级高铁斜拉桥梁端轨道状态评价[J/OL].铁道科学与工程学报,1-13[2025-12-26].
- [3] 文亚平.大跨度高速铁路矮塔斜拉桥施工控制[J].交通世界,2025,(22):140-142.
- [4] 黄鑫.合龙方案对大跨度非对称高铁独塔斜拉桥的影响分析[J].铁道建筑技术,2025,(02):109-112.
- [5] 刘彦林,李再玮,谭社会.千米跨度高铁斜拉桥轨道平顺性控制拟合参数分析[J].振动与冲击,2024,43(16):176-184+218.

Crack Prevention and Control Technology and Durability Analysis of High-speed Railway Bridge Concrete

Wenju Lu

China Railway 12th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710024, China

Abstract

The quality of concrete in high-speed railway bridges directly impacts the safety and durability of the track, with cracks being a critical factor limiting structural performance. Cracks not only affect mechanical properties and appearance but also lead to durability degradation such as water infiltration, steel corrosion, and carbonation expansion. Based on engineering practices, this paper analyzes the formation mechanisms and influencing factors of concrete cracks, and explores prevention technologies from aspects such as material properties, construction techniques, structural design, and environmental conditions. A prevention system centered on "source control—process optimization—intelligent monitoring—comprehensive management" is proposed, combining shrinkage-reducing materials, temperature-controlled curing, and intelligent monitoring to achieve early prevention, identification, and repair of cracks. The study demonstrates that this system significantly enhances the durability and service safety of bridges.

Keywords

high-speed railway bridge; concrete crack; prevention and control technology; durability; temperature-controlled curing

高铁桥梁混凝土裂缝防控技术与耐久性分析

卢文举

中铁十二局集团第四工程有限公司, 中国·陕西 西安 710024

摘要

高铁桥梁混凝土工程质量直接关系线路的安全与耐久性, 而裂缝问题是制约结构性能的关键因素之一。裂缝不仅影响力学性能与外观, 还会引发渗水、钢筋锈蚀和碳化扩展等耐久性退化。本文基于工程实践, 分析混凝土裂缝的形成机理与影响因素, 从材料性能、施工工艺、结构设计及环境条件等方面探讨防控技术。提出以“源头控制—过程优化—智能监测—综合治理”为核心的防治体系, 结合减缩材料、温控养护与智能监测, 实现裂缝的早预防、早识别、早修复。研究表明, 该体系可显著提升桥梁耐久性与服役安全。

关键词

高铁桥梁; 混凝土裂缝; 防控技术; 耐久性; 温控养护

1 引言

近年来, 随着高性能混凝土 (HPC) 与智能施工技术的应用, 混凝土结构裂缝防治取得显著进展。然而在高铁桥梁环境中, 因高速列车荷载频繁、温度梯度大、桥面暴露时间长, 裂缝控制仍是关键技术难点。如何在满足强度与承载要求的同时, 实现混凝土微裂缝的可控化、结构耐久性的延长, 成为桥梁工程质量管理的重要课题。本文结合高铁桥梁的结构特点与环境条件, 分析裂缝形成机制与影响因素, 提出针对性的防控技术与耐久性提升策略, 为高铁基础设施的长期服役提供参考。

2 高铁桥梁混凝土裂缝形成机理与影响因素分析

2.1 温度应力与收缩变形影响

高铁桥梁混凝土在浇筑与硬化过程中会经历复杂的温度变化与体积变形过程。水泥水化反应释放大量热量, 导致早期内部温升, 当表层与核心区温差过大时, 外层受拉、内层受压, 极易形成温度裂缝。对于大体积结构, 如承台、墩台、连续梁节段, 当温差超过 25℃时, 热应力迅速累积, 裂缝风险显著提高。硬化后期的干缩、塑性收缩及自收缩同样会造成体积变化, 当混凝土受结构约束或边界条件限制时, 易出现拉应力集中, 形成微细裂缝。外部环境亦是诱因之一, 昼夜温差与季节交替造成的热胀冷缩, 使混凝土处于周期性应力循环中, 导致微裂缝反复扩展、贯通, 影响结构耐久性与整体稳定。若缺乏科学温控与收缩补偿措施, 裂缝不可避免地成为高铁桥梁耐久性衰退的关键隐患。

【作者简介】卢文举 (1995–), 男, 中国甘肃陇南人, 本科, 助理工程师, 从事道路桥梁与渡河工程研究。

2.2 材料性能与配合比因素

混凝土材料性能与配合比设计是决定其抗裂性能的关键。水胶比过高会增加毛细孔隙率与收缩率，削弱体积稳定性；骨料级配不合理或含泥量偏高会降低界面黏结力，裂缝易沿界面扩展。掺合料比例控制不当会导致早期强度不足或水化热偏高，增加温度应力与收缩变形。高强度混凝土虽承载力强，但因水化热大、弹性模量高，内部应力集中，裂缝风险更高。此外，钢筋与混凝土热膨胀系数差异大，在温度变化下产生附加拉应力，促使裂缝扩展。通过优化配合比、控制水胶比、合理掺加减缩与缓凝材料，可有效改善体积稳定性，降低温度与收缩应力叠加引发的裂缝风险。

2.3 结构设计与施工工艺影响

高铁桥梁结构设计与施工工艺直接决定裂缝的分布与严重程度。设计阶段若截面过大或约束条件复杂，如墩帽、盖梁根部、连续梁桥面等，应力集中部位往往成为裂缝高发区域。施工过程中，模板拆除过早、混凝土浇筑不均、振捣过度或养护不充分，均会导致内部收缩不均与局部应力集中，促发早期裂缝。若施工缝或冷缝设置不当、连接处理不严密，极易形成潜在裂缝源，成为结构耐久性的薄弱环节。施工组织不合理、温控措施缺乏或施工环境温度突变，也会加剧热应力累积，增加裂缝风险。因此，应在设计阶段强化有限元分析以优化应力分布，在施工阶段严格执行分层分块浇筑、温控养护与施工缝规范化处理，实现全过程裂缝防控，从而确保高铁桥梁的结构安全与服役稳定性。

3 混凝土裂缝防控技术体系构建

3.1 材料层面的抗裂技术优化

材料性能是高铁桥梁混凝土抗裂能力的基础。为降低温度应力和收缩变形，应优先选用低水化热水泥，并掺入高性能矿物材料如粉煤灰、硅灰、矿渣微粉，以减少早期水化放热，减小内外温差。通过掺加聚丙烯纤维或玄武岩纤维，可有效抑制微裂缝萌生与扩展，提高混凝土的抗拉强度和韧性。配合比设计中，水胶比宜控制在 0.38 ~ 0.42 范围，以兼顾密实度与体积稳定性。适量加入减缩剂、缓凝剂及膨胀剂，可平衡收缩与膨胀效应，降低干缩裂缝风险。同时，严格控制骨料级配与含水率，优化拌合工艺与振捣密实度，实现从材料源头上减少裂缝产生的可能性。

3.2 施工工艺的精细化控制

施工过程的温度控制与养护措施直接影响混凝土的抗裂性能。应采用分层分块、对称浇筑等工艺，以避免温度梯度集中引发裂缝。通过埋设温度传感器实时监测混凝土内部温度场，结合智能温控系统自动调节冷却水循环，实现全过程温度可控。浇筑后应采取覆盖保湿与保温措施，延长养护周期以减少干燥收缩。对于桥面连续结构，可运用预应力张拉或后张法预压技术抵消部分拉应力，提升结构抗裂能力。施工缝的处理应遵循规范要求，确保新旧混凝土界面的粘

与应力传递连续。科学的温控与施工组织可实现裂缝风险的过程化预防，保证结构整体质量与耐久性。

3.3 结构设计的防裂优化策略

设计阶段的应力优化与结构合理化是防裂的关键环节。通过有限元分析可识别潜在应力集中区域，优化截面尺寸与配筋方式，形成力学平衡。对于大体积构件，可采用中空或冷却水管嵌入设计以控制温升；合理设置伸缩缝、沉降缝可有效释放约束应力。钢筋布置应强化关键部位的双向配筋与锚固延伸，防止裂缝贯通。在桥面板与墩帽等受力复杂部位，可采用钢纤维或碳纤维增强混凝土，提高抗拉性能与延展性。设计中应贯彻“柔性抗裂”理念，将结构安全与耐久性相结合，通过构造优化实现应力分散与裂缝控制的统一，为高铁桥梁的长寿命服役提供设计保障。

4 裂缝监测、修复与耐久性保障技术

4.1 裂缝监测与信息化管理

高铁桥梁的裂缝防控已进入智能化、信息化管理阶段。建立基于光纤光栅 (FBG) 传感器、应变片与声发射技术的智能监测系统，可实现混凝土结构应变、裂缝宽度及扩展速度的实时监测。系统通过自动采集与数据分析，对裂缝发展趋势进行动态评估与预警，显著提升了监测的时效性与精度。无人机巡检与三维激光扫描技术可对桥梁表面裂缝进行高分辨率成像，实现毫米级精度的定位与定量分析。结合 BIM (建筑信息模型) 平台，可对裂缝信息进行可视化管理，将监测数据、裂缝位置、维修记录与结构模型关联，构建数字孪生式的桥梁维护体系。通过云端数据分析与人工智能算法，可实现裂缝风险分级与预测性维护，为管理部门提供科学决策依据。信息化监测体系的建立标志着高铁桥梁由传统人工检测向“智能感知—数据驱动—主动防控”转型，为结构健康管理提供了长期稳定的技术支撑。

4.2 裂缝修复与加固技术

裂缝修复与加固是维持高铁桥梁服役性能与结构安全的关键环节。针对不同类型的裂缝应采取分级治理策略：对于微细裂缝，可采用低黏度环氧树脂或聚氨酯注浆技术，通过毛细渗透封闭裂缝通道，恢复结构的密实性与防水性能；对于深层结构裂缝，应结合压力注浆与表面封闭的复合修复方法，确保浆液渗透均匀并形成整体补强层；而对受力裂缝及结构性裂缝较严重的部位，可采取外包碳纤维布、喷射混凝土加固或钢板粘贴加固措施，提高局部承载力与延性。修复过程中应注重裂缝成因分析，结合结构应力状态与环境影响确定最优修复方案，防止因“治标不治本”导致裂缝反复出现。施工完成后应进行无损检测与结构复核，以验证修复效果并完善维护记录。科学的裂缝修复与加固体系能够显著延长结构使用寿命并降低后期维护成本。

4.3 耐久性提升与寿命评估

裂缝控制的最终目标在于提升结构耐久性与延长服役