

桥梁工程施工中裂缝控制方法探讨

文 / 赵艳寿 中铁十四局集团第四工程有限公司

摘要：桥梁结构裂缝是影响结构安全性和耐久性的常见病害，如何有效控制裂缝的产生和发展是桥梁工程建设中面临的重要技术难题。本文基于多年工程实践经验，系统分析了裂缝检测的四种主要技术方法及其特点，深入探讨了外部荷载、温度变化、材料收缩和施工质量等主要成因及其作用机理，并从设计优化、施工管控和后期养护三个维度提出了全生命周期的裂缝控制策略。研究成果可为桥梁工程的裂缝控制提供系统的技术支撑，有效指导工程实践中的裂缝防治工作。

关键词：桥梁裂缝；检测技术；应力控制；施工质量；养护管理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.067

引言

桥梁工程是现代交通基础设施的重要组成部分，其结构安全和使用寿命直接关系到交通运输的可靠性和经济效益。随着桥梁建设规模的不断扩大和结构形式的日趋复杂，桥梁结构所处的荷载环境和自然条件也愈发严峻。特别是在高强度混凝土广泛应用的现代桥梁工程中，结构构件的截面尺寸趋于小型化，荷载效应和环境因素对结构的影响更加显著。因此，深入研究桥梁结构裂缝的控制技术，对于保障桥梁结构的安全性能、提升工程质量和延长使用寿命具有重要的工程价值和现实意义。

一、桥梁结构裂缝的检测技术与表征方法

为确保桥梁结构的安全运营，准确掌握裂缝状态和发展趋势至关重要。目前工程实践中已形成了较为完善的裂缝检测技术体系，基于不同检测原理和技术手段，能够满足多样化的检测需求。首先，视觉检测法作为传统检测手段，通过人工观察或借助游标卡尺等简单工具对裂缝特征进行记录和测量。这种方法操作简便、成本低廉，适用于大多数现场检测工作，但检测精度和可靠性较差，且难以实现自动化和实时监测。其次，接触式测量法采用应变计、位移计等传感器与裂缝直接接触进行测量。这类方法能够准确获取裂缝的变形量和发展状态，测量精度较高，但传感器需要定期维护校准，且在恶劣天气条件下可能无法正常工作。此外，非接触式测量法利用激光测距、超声波等物理手段进行检测，无需与裂缝直接接触。这种方法具有精度高、非破坏性等显著优点，能够实现远距离检测，但设备成本较高，且检

测结果易受环境因素干扰^[1]。最后，数字图像处理技术通过计算机视觉算法对桥梁表面照片进行分析，实现裂缝特征的自动识别和量化。该技术具有自动化程度高、效率高、可重复性强等优势，能够快速处理大量数据，但对图像采集条件和光照环境要求较高。

二、桥梁结构裂缝的主要成因及作用机理

（一）外部荷载与应力因素

在桥梁结构的各类破坏形式中，外部荷载引起的裂缝是最为常见的病害类型。根据不同荷载类型和作用效应，这类裂缝表现出明显的力学特征和发展规律。一来，直接应力裂缝主要出现在结构承受的设计荷载超过其承载能力的情况下。这类裂缝在受拉区域或受剪区域形成，具有明显的力学特征。从表1可见，随着荷载类型的不同，裂缝宽度和深度呈现显著的变化规律，其中冲击荷载引起的裂缝参数值最大。二来，次应力裂缝由外部荷载引入的次生应力导致，主要发生在结构实际工作状态与设计计算存在差异的部位。这类裂缝的形成机理较为复杂，其扩展速率和应力水平往往呈非线性变化，需要在设计阶段特别关注潜在的问题区域。三来，裂缝的发展过程往往伴随着应力重分布现象。当裂缝出现后，结构内部的应力状态发生改变，可能导致新的应力集中区域形成，进而引发更多的裂缝。因此，及时发现和控制初始裂缝的发展对于预防结构的进一步损伤具有重要意义。这种应力重分布引发的连锁反应可能加速结构的整体损伤过程，必须在监测和维护中予以重点关注。

表1 不同外部荷载作用下的裂缝特征参数

荷载类型	裂缝宽度 (mm)	裂缝深度 (mm)	扩展速率 (mm/年)	应力水平 (MPa)
静力荷载	0.2-0.5	50-150	0.1-0.3	2.5-4.0
动力荷载	0.3-0.8	100-200	0.2-0.5	3.0-5.0
冲击荷载	0.5-1.2	150-300	0.3-0.8	4.0-6.0

（二）温度变化与热胀因素

温度因素对桥梁结构的影响贯穿于施工和使用的全

过程，其引起的热胀冷缩变形和温度应力直接影响混凝土的开裂机理和裂缝发展趋势。为有效控制温度裂缝，

需要深入理解不同温度条件下混凝土的热学性能及其应力响应特征。第一，水泥水化热是施工阶段裂缝形成的主要原因。混凝土浇筑后，水泥水化反应释放大热量，由于混凝土的导热性能差，内外温差显著。水化热引起的温差和温度应力较大，见表2所列参数，这种温度效应容易导致混凝土开裂。第二，环境温度的周期性变化会对结构产生持续的影响。昼夜温差作用虽然单次影响较小，但其反复作用特性容易导致裂缝的扩展。相比之

下，季节温差带来的温度应力更大，易诱发裂缝的形成，具体参数特征见表2。第三，温度效应往往与其他因素相互叠加，产生更为复杂的应力状态。特别是在大体积混凝土结构中，水化热与外部温度变化的共同作用，可能导致结构内部产生更大的温度梯度和应力集中，加速裂缝的发展过程。这种多重温度作用下的应力叠加效应，不仅加剧了裂缝的形成，还增加了温度控制措施的难度^[2]。

表2 不同温度条件下混凝土的热学参数与应力特征

温度类型	温差范围(°C)	热膨胀系数(10 ⁻⁶ /°C)	温度应力(MPa)	临界裂缝宽度(mm)
水化热	20-35	8-10	2.5-3.5	0.15-0.25
昼夜温差	10-25	9-11	1.5-2.5	0.10-0.20
季节温差	30-50	10-12	3.0-4.0	0.20-0.30

(三) 材料收缩与应变因素

混凝土材料由于其独特的水化过程和体积变形特性，在凝结硬化过程中不可避免地产生收缩变形。不同类型的约束条件与收缩变形的相互作用，往往导致结构内部产生复杂的应力状态。一方面，内部约束是影响混凝土收缩裂缝的关键因素。结构内部不同部位由于水化程度、温度分布等差异，产生不均匀的变形。见表3所示，高强度混凝土由于水胶比较低，其收缩率和临界应力值明显高于普通混凝土，更容易产生收缩裂缝。另一方面，外部约束条件

同样显著影响裂缝的形成。当混凝土构件的变形受到临近构件或支座的约束时，收缩变形受阻会导致内部产生拉应力。这种应力一旦超过混凝土的抗拉强度，便会引发裂缝。此外，收缩应力往往与温度应力、荷载应力发生耦合作用。这种多重应力的叠加效应会加速裂缝的形成和扩展，特别是在结构的应力集中区域，更容易出现贯穿性裂缝。因此，在进行混凝土配合比设计时，需要综合考虑强度需求和收缩变形控制。尤其对于大体积混凝土结构，更需要通过合理的配合比设计和养护措施，有效控制收缩变形。

表3 不同强度等级混凝土的收缩特性参数

强度等级	水胶比	28天收缩率(10 ⁻⁶)	极限收缩率(/10 ⁻⁶)	临界应力(MPa)
C30	0.50	250-300	450-550	1.8-2.2
C40	0.42	300-350	500-600	2.2-2.6
C50	0.35	350-400	550-650	2.5-3.0
C60	0.32	400-450	600-700	2.8-3.3

(四) 施工工艺与质量因素

施工质量控制是保障桥梁结构整体性能的基础，合理的施工工艺和严格的质量管理对预防裂缝具有决定性作用。从原材料选择到施工操作再到养护管理的全过程质量控制，都直接影响着结构的耐久性能。第一，混凝土配合比设计和材料质量控制是基础环节。见表4所示，配比不合理可导致15%~25%的强度损失，同时显著增加混凝土的渗透性。原材料质量不达标、水泥用量偏差或者配合比设计不科学都可能引发这类问题，最终影响结构的整体性能。第二，施工工艺的规范性直接关系到结构质量。振捣

不充分会造成蜂窝、孔洞等结构缺陷，导致混凝土渗透系数增大；钢筋绑扎和连接质量不达标则会形成应力集中区域，成为裂缝的诱发点。这些施工缺陷不仅降低结构强度，还会加速裂缝的形成和扩展。第三，养护管理质量对裂缝形成有显著影响。数据显示，养护不当造成的强度损失最高可达30%，且会导致较大的裂缝宽度和较高的渗透系数^[3]。因此，需要建立完善的养护制度，确保混凝土在早期获得良好的硬化环境，有效控制早期裂缝的产生。特别要强调施工过程中的质量控制体系建设，通过严格的工艺标准和质量检验制度，从源头预防施工质量缺陷。

表4 施工质量缺陷的特征参数

质量缺陷类型	强度损失率(%)	典型裂缝宽度(mm)	渗透系数(10 ⁻⁶ cm/s)	耐久性影响等级
配比不合理	15-25	0.3-0.5	3.5-4.5	III
振捣不充分	10-20	0.2-0.4	2.5-3.5	II
养护不当	20-30	0.4-0.6	4.0-5.0	III
钢筋施工缺陷	12-18	0.3-0.5	3.0-4.0	II

三、桥梁结构裂缝的多维度控制策略

(一) 设计阶段的结构优化与应力调控

设计阶段的结构优化与应力调控是桥梁结构裂缝防控的源头措施。通过科学的结构设计和合理的应力控制,可以从根本上降低裂缝的发生概率,提高结构的整体性能和耐久性。一是结构体系选择与构件设计是预防裂缝的基础。根据桥梁的使用环境、跨径要求和荷载条件,合理确定结构类型和构造形式。通过优化截面尺寸、调整配筋比例、设置构造钢筋等措施,可以有效提高结构的抗裂能力。特别是在应力集中区域,需要通过加强配筋和细部构造设计来提升结构的抗裂性能,同时应注意结构节点的刚度协调,避免因刚度突变引起应力集中。二是温度应力控制是设计阶段的重点内容。对于大体积混凝土结构,采用合理的分块浇筑方案,设置后浇带或伸缩缝,可以有效控制温度应力的积累。通过温度应力分析,确定合理的施工顺序和浇筑分区,避免因温度变形受阻而产生过大的约束应力。三是预应力技术的应用为裂缝控制提供了有效手段。通过科学的预应力设计,可以在结构中形成有利的应力状态,抵消部分外部荷载效应。预应力筋的布置应考虑结构受力特点,合理确定预应力大小和施加位置,确保预压应力能够有效覆盖潜在的裂缝敏感区域^[4]。同时,应根据结构的实际使用环境,合理选择混凝土材料的强度等级和配合比,并通过有限元分析等手段对结构的受力性能进行优化验证。

(二) 施工过程的技术管控与质量保障

施工阶段是桥梁工程质量控制的关键时期,科学的施工工艺和严格的质量管理直接影响结构的整体性能。通过建立完善的技术管控体系,落实各项质量保证措施,可以有效预防和控制施工过程中裂缝的形成。一方面,混凝土浇筑工艺的控制是关键环节。浇筑前应对模板、钢筋等进行全面检查,确保其位置和刚度满足要求。浇筑过程中严格执行分层浇筑制度,每层厚度控制在30-50厘米,并及时进行振捣。振捣要选择合适振捣设备和方式,确保振捣密实,避免漏振和过振,直至混凝土表面出现浮浆、不再冒气泡为止。另一方面,温度控制和养护管理至关重要。对于大体积混凝土,需要通过埋设冷却水管、选择合适的浇筑时间等措施控制混凝土内部温度。采用塑料薄膜覆盖、喷淋养护等方式保持混凝土表面湿润,防止因水分快速蒸发导致的表面裂缝。养护过程中要特别注意昼夜温差较大时期的保温措施。此外,施工缝和后浇带的处理需要特别重视。施工缝处理前必须彻底清除松动骨料和软弱层,并采取凿毛、冲毛等措施增强界面粘结性能。浇筑前要充分湿润接缝面,必要时涂刷界面处理剂,确保新旧混凝土的有效结合。对于后浇带,要严格控制其浇筑时间,确保两侧混凝土已完成大部分收缩变形。在整个施工过程中,应建立完善的质量检测制度,对

混凝土的坍落度、强度、温度等关键指标进行实时监控,发现问题及时处理。

(三) 后期养护的监测预警与修复加固

桥梁结构的长期耐久性离不开科学的后期养护和及时的维护修复。通过建立系统的监测预警机制,结合先进的修复技术和防护措施,可以有效延长结构的使用寿命,确保桥梁的安全运营。首先,监测预警体系的建立是结构维护的基础。常规定期检测应每年进行一次,重点关注结构的完整性、裂缝发展情况和混凝土表面状况;结构定期检测则需要根据桥梁的养护等级,每3-10年进行一次全面评估。通过目测、仪器测量等多种手段,及时发现结构存在的病害和安全隐患,为维修加固提供决策依据。其次,裂缝修补技术的选择应因地制宜。对于微细独立裂缝(宽度 $\leq 0.2\text{mm}$),可采用表面封闭法,使用低粘度修补胶液封闭裂缝通道;对于贯穿性裂缝,则需采用压力注浆法,确保注浆料能充分填充裂缝空间;对于宽度大于 0.5mm 的裂缝,宜采用填充密封法,在裂缝处开设U形或V形槽后填充改性环氧树脂等材料。此外,防护措施的实施对延缓结构劣化具有重要作用。防护涂层的选择要综合考虑其防碳化性能、抗渗性能和耐候性能,如纯丙乳液基防护涂层就具有优异的综合性能。同时,要建立长效的维护管理机制,根据检测结果及时更新维护方案,确保防护措施的持续有效性,实现结构的长期安全运营^[5]。特别要注意建立完善的数据库管理系统,对历次检测和维修记录进行系统整理和分析,为后期维护决策提供可靠的数据支持,实现科学化、智能化的维护管理。

结语

桥梁结构裂缝是影响结构安全性和耐久性的常见病害,如何有效控制裂缝的产生和发展是桥梁工程建设中面临的重要技术难题。本文基于多年工程实践经验,系统分析了裂缝检测的四种主要技术方法及其特点,深入探讨了外部荷载、温度变化、材料收缩和施工质量等主要成因及其作用机理,并从设计优化、施工管控和后期养护三个维度提出了全生命周期的裂缝控制策略。研究成果可为桥梁工程的裂缝控制提供系统的技术支撑,有效指导工程实践中的裂缝防治工作。

参考文献

- [1] 晏勇. 道路桥梁工程结构混凝土裂缝成因与防治措施[J]. 交通企业管理, 2024, 39(03): 91-94.
- [2] 高凤勇. 道路桥梁设计施工中裂缝成因及控制措施[J]. 运输经理世界, 2024, (12): 112-114.
- [3] 王红. 道路桥梁混凝土施工及裂缝控制施工工艺[J]. 四川建材, 2024, 50(04): 96-97+114.
- [4] 王征. 道路桥梁混凝土施工及裂缝控制施工工艺[J]. 四川建材, 2023, 49(07): 91-93+96.
- [5] 黄召. 桥梁工程裂缝产生的原因和控制措施[J]. 工程建设与设计, 2023, (07): 100-102.