

预应力混凝土箱梁早期裂缝成因与养护措施研究

方 刚

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

【摘 要】：预应力混凝土箱梁广泛应用于现代桥梁建设中，然而在早期使用阶段，裂缝问题日益突出，影响其安全性和耐久性。通过对裂缝成因的深入分析，研究发现裂缝的主要成因包括施工过程中混凝土的配比问题、温度变化引起的收缩、预应力筋的张拉不当以及环境因素等。针对这些问题，本文提出了一系列养护措施，如合理控制混凝土的水灰比、加强施工过程中对预应力筋张拉的监控、定期进行结构检查和养护等。这些措施有效降低了裂缝的发生概率，提升了预应力混凝土箱梁的耐久性。通过这一研究，本研究能够为预应力混凝土箱梁的设计和施工提供参考，减少早期裂缝的发生，延长结构的使用寿命。

【关键词】：预应力混凝土箱梁；裂缝成因；养护措施；施工工艺；结构耐久性

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.036

引言

预应力混凝土箱梁作为现代桥梁建设的重要结构形式，因其优异的承载能力和较长的使用寿命而广泛应用。在实际工程中，早期裂缝的出现却严重影响了结构的安全性和耐久性。裂缝的形成往往与施工工艺、混凝土的配比、温度变化以及环境因素等多方面因素密切相关。尽管裂缝问题常见，但针对早期裂缝的成因和有效的养护措施的研究仍存在一定的空白。因此，深入探讨预应力混凝土箱梁早期裂缝的成因，并提出相应的养护措施，对于提高结构的长期稳定性至关重要。通过系统地分析和研究，本研究能够为今后类似工程提供理论依据，保障工程安全并延长其使用寿命。

1 预应力混凝土箱梁早期裂缝的主要成因

施工过程中，混凝土的配比不当以及浇筑时的不均匀性可能导致箱梁内部的收缩裂缝。混凝土的水灰比、骨料的质量、外加剂的使用等因素直接影响到混凝土的强度和耐久性。如果混凝土未能达到设计要求的强度，或者在浇筑过程中发生了不均匀的收缩，应力集中就容易引起裂缝的产生。温度变化引起的体积收缩也是造成裂缝的一个重要因素。尤其在夏季高温条件下，混凝土水化反应较为剧烈，导致其内部温差较大，造成箱梁出现温度裂缝。温差过大时，混凝土的膨胀和收缩不均匀，进而引发裂缝，这种裂缝通常发生在混凝土的表面或接缝处，且具有一定的延展性。

除了混凝土自身因素，预应力筋张拉不当亦是早期裂缝的关键诱因。其张拉控制精度直接影响箱梁抗裂性能与承载能力^[1]。若张拉力不均或控制失准，将引发局部应力集中，进而产生裂缝。此外，预应力筋质量不合格或锚固施工偏差，也易在梁体内形成裂缝。环境因素同样重要，特殊地理条件可能加剧裂缝问题。高湿环境下混凝土吸水膨胀，低温条件则可能导致冻裂，这些外部应力变化均会提升裂缝风险。

此外，现代梁场生产中普遍采用蒸汽养护工艺，尤其是在智慧梁场生产线的推广应用中，若蒸汽养护制度设置不当，极

易引发早期裂缝。根据现行梁场设置规范，蒸汽养护应严格控制升降温速率及恒温温度，但实际生产中常因追求效率而加快升温速度，导致混凝土内外温差过大，表面水分蒸发过快，产生温度应力裂缝。同时，智慧梁场生产线依赖自动化控制系统，若传感器布置不合理或数据反馈滞后，会造成养护环境控制不精准，加剧混凝土的不均匀收缩，形成早期裂缝。

2 施工过程中引发裂缝的关键因素分析

施工过程中引发预应力混凝土箱梁裂缝的关键因素，往往与混凝土的质量控制、施工工艺、施工环境等多方面的因素密切相关。混凝土的配合比、施工过程中对原材料的选择和处理方式，直接决定了混凝土的强度和耐久性。在实际施工中，若水泥、砂、石等骨料的选用不符合设计要求，或者水泥与水的比例控制不精确，都会使得混凝土的抗压强度不足，造成结构在初期阶段受到较大的应力作用时产生裂缝。混凝土浇筑时的温度控制和浇筑方法也至关重要，温度过高或过低、浇筑不均匀，都可能引发不均匀收缩，进一步导致裂缝。

施工工艺对裂缝控制至关重要。混凝土浇筑后，若养护不当导致水化不充分，强度发展受阻，易在应力下开裂。振捣不充分或过度均会造成内部气泡或密实不均，为后期裂缝埋下隐患。早期养护阶段温湿度失控，表面水分过快蒸发，也会引发表面裂纹。预应力筋张拉过程中，张拉力不均或控制失误将导致局部应力过大而开裂^[2]。此外，锚固施工质量不佳，如锚固方式或位置不准，会影响预应力有效传递，造成应力集中，引发裂缝。

针对智慧梁场蒸汽养护生产线，其裂缝风险尤为突出。一方面，蒸汽管道布置不均或喷头堵塞会导致箱梁各部位受热不均，产生局部过热或养护不足，引发温差裂缝；另一方面，养护棚密封不严或温湿度传感器失灵，会造成养护环境波动，混凝土表面干燥收缩与内部膨胀不协调，形成表面龟裂或深层裂缝。此外，为适应自动化生产线节奏，部分梁场缩短了静停时间，混凝土在未形成足够强度时即进入高温养护阶段，内部结构受损，抗拉强度降低，更易开裂。施工环境变化对裂缝形成

具有显著影响。温湿度变化会引起混凝土体积改变,较大温差易导致热胀冷缩裂缝。高温加速水化反应,加大内外温差引发温度裂缝;低温则可能引起冻融破坏,养护不当将加剧冻裂风险。此外,施工机械操作不当、人员未严格执行规范或设备故障等问题,均可导致施工质量缺陷,进而诱发裂缝。

3 环境因素对箱梁裂缝的影响与防范

温度波动是影响混凝土裂缝的重要因素之一。在较高温度环境下,混凝土水化过程加速,导致内部温差过大,混凝土表层和深层之间的收缩不一致,产生裂缝。尤其在夏季高温条件下,水泥的水化反应导致混凝土体积膨胀,冷却后则发生收缩,从而产生因温差应力导致的裂缝^[3]。如果施工过程中未能采取有效的温控措施,混凝土表面温度的急剧变化很容易引发裂缝,尤其是在长时间阳光直射下,表面温差变化更为剧烈。湿度也是影响混凝土结构的重要环境因素。高湿度环境下,混凝土在硬化过程中容易吸湿,造成膨胀。当环境湿度过大时,混凝土的含水量会发生变化,导致其体积发生不均匀变化,从而产生裂缝。低湿度的环境则加剧了混凝土的水分蒸发,过快的水分丧失导致表面收缩过大,从而引起表面裂纹。合理控制施工期间以及结构使用过程中的湿度,尤其是采用有效的防水和保湿措施,对预应力混凝土箱梁的抗裂性至关重要。

冻融循环也是对箱梁裂缝产生影响的关键环境因素。在低温环境中,混凝土中的水分可能结冰,导致混凝土体积膨胀。随着冻融循环的不断进行,冰冻水分的膨胀作用会对混凝土产生破坏,尤其是在寒冷地区,这种现象会对箱梁的耐久性造成长期损害。冻融过程不仅会导致表面裂缝的发生,还可能引发深层的结构裂缝,从而影响整体稳定性。防止冻融损害的措施包括添加抗冻剂、选择低水泥含量的配比及加强养护等。环境污染的影响也不可忽视。某些工业区域或交通繁忙的地方,空气中的氯离子和其他腐蚀性物质可能渗透到混凝土中,尤其是与钢筋接触的地方,导致钢筋锈蚀,最终影响箱梁的整体结构。抗腐蚀处理和混凝土的密封性能在这些环境下尤为重要,通过合理的配比和结构保护,可以有效减缓环境对箱梁的影响。

4 有效的养护措施与技术方法

有效的养护对防治箱梁裂缝至关重要。养护应从浇筑初期开始,核心在于控制湿度与温度,保障混凝土充分水化。水分过早蒸发或水化不完全易导致表面开裂,可采用覆盖物保持表面湿润,尤其在潮湿环境中更为关键。温度控制方面,高温会加速水化并增大内外温差,引发温度裂缝,需通过遮阳、降温等措施降低温差应力。夏季宜避开高温时段浇筑,选择晨间或傍晚施工,以减少温度剧烈波动。科学的养护能显著提升混凝土强度,从源头预防裂缝产生。

对于寒冷地区,混凝土的养护更为复杂。低温环境下,水泥的水化反应减缓,混凝土的强度增长受到限制。为避免冻融

破坏,施工过程中可采用加热养护或覆盖保温材料,保持混凝土的适宜温度,避免冻裂的发生^[4]。抗冻剂的使用也能够提高混凝土在低温下的抗冻性能,减缓冻融循环带来的损害,确保结构的完整性。对于已经出现裂缝的箱梁,及时进行裂缝修补和加固是防止裂缝进一步发展的关键措施。裂缝修补的技术方法包括注浆法、填缝法等。这些方法通过有效地灌浆或填充材料,重新密封裂缝,恢复结构的承载力和稳定性。在修补过程中,应根据裂缝的类型和位置,选择合适的修补材料和技术。环氧树脂、聚氨酯材料等具有较好的黏结性和耐久性,能够有效填充裂缝,并防止水分和有害物质的渗透,避免裂缝的进一步扩展。

针对智慧梁场蒸汽养护工艺,须建立并严格执行科学养护制度。首先通过试验确定关键参数:静停时间宜不少于2-4小时,升温速率 $\leq 15^{\circ}\text{C}/\text{h}$,恒温温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$,降温速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。其次优化生产线配置,确保蒸汽管道布局均匀、喷头畅通;采用高精度传感器实现养护环境实时精准调控;加强养护棚密封,减少热湿损耗。同时建立数据追溯系统,记录养护曲线以支持问题分析与工艺优化。对已出现的裂缝,表面细微裂缝可用封闭剂处理,较深裂缝则采用低压注浆法修复,从而有效控制养护裂缝,提升箱梁质量。

定期的检查与监测是养护工作中的一项重要内容,通过对箱梁进行定期的结构健康监测,及时发现裂缝的早期迹象,可以采取相应的措施进行干预,防止裂缝扩展成严重的结构性损伤。监测手段可包括视觉检查、裂缝宽度测量、超声波检测等多种方法,利用现代技术手段对箱梁进行全面评估,确保结构始终处于安全状态。防腐处理也应纳入养护方案中,特别是在盐雾或潮湿环境较为严重的地区。采取防腐涂层、锈蚀防护网等措施,可以有效减少外界环境对混凝土和钢筋的腐蚀作用,延长箱梁的使用寿命。

5 裂缝防治的综合策略与实施效果

裂缝防治需采取贯穿设计、施工、养护及监测的综合闭环策略。设计阶段应依据气候与环境特征,优化混凝土配比、预应力筋布置及张拉方案,提升抗裂性并均匀应力分布。施工中需精细控制温湿度:高温季节通过遮阳、喷水降低表面温度与蒸发;寒冷季节采用保温加热措施,防止冻害。同时确保浇筑均匀与振捣充分,避免内部缺陷。养护阶段应持续保障适宜条件,支撑混凝土强度发展。结合定期监测,形成全过程管控体系,从而有效预防裂缝,保障结构长期安全与耐久。

养护阶段是裂缝防治的另一个关键环节,合理的养护能有效提升混凝土的强度,降低裂缝的发生率。保持适宜的湿度和温度,防止混凝土表面过早失水,是养护过程中最基础的工作。通过覆盖物或喷洒养护剂等方式,保证混凝土表面水分充足,避免水分流失过快引发裂缝^[5]。针对特殊环境,还应采用抗冻剂或抗裂剂等混凝土外加剂,提高混凝土的抗冻抗裂性能。对

于已经出现的裂缝，采用科学的修补方法进行及时修复至关重要。裂缝修补技术包括裂缝注浆、裂缝封闭等方法，修补材料的选择应根据裂缝的类型和位置来定。环氧树脂、聚氨酯等高性能修补材料能有效封闭裂缝，恢复结构的完整性，同时防止水分和腐蚀性物质渗透，减少裂缝的扩展。

在综合策略中，智慧梁场蒸汽养护的精细化管控是关键。规范养护制度、升级智能控制系统、加强过程监控，可显著降低早期裂缝发生率。严格控制升降温速率，将箱梁内外温差控制在规范限值内（通常 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ ），能有效预防温度裂缝；保证充足静停时间，使混凝土形成初期强度以抵御热应力；实时精准的温湿度控制则保障水化均匀，避免干缩裂缝。同时，养护数据数字化管理支持工艺优化与问题追溯，形成预防、控制、处治的良性循环，提升梁场生产质量与箱梁长期耐久性。

定期健康监测与维护检查能及早发现并处理裂缝。应用超声波、红外成像等无损检测技术，可实时监控结构状态，掌握

裂缝发展，防止其扩展。通过数据化、智能化管理，实现裂缝早期干预，延缓扩大趋势，提升结构耐久性。综合策略的成功实施需依托科学管理与技术支持：加强人员培训，确保工艺规范严格执行；完善质量控制体系与记录机制，保障各环节符合标准要求。

6 结语

预应力混凝土箱梁的早期裂缝问题在施工和使用过程中不可忽视，通过合理的设计、精确的施工和有效的养护，可以显著减少裂缝的发生，确保结构的安全性和耐久性。通过对裂缝成因的深入分析与综合防治措施的实施，能够最大限度地提高箱梁的长期稳定性，延长其使用寿命。未来在预应力混凝土箱梁的研究中，还应继续探索更加科学、高效的裂缝防治技术，为桥梁工程的可持续发展提供更加坚实的理论基础和技术支持。

参考文献：

- [1] 房中孝,李鹏鹏.预应力混凝土连续箱梁混凝土水化热温度测试研究[J].水泥,2025,(12):86-88.
- [2] 汪志勇.连续预应力混凝土箱梁桥偏位成因及解决方案[J].福建建设科技,2025,(06):103-106+127.
- [3] 庄成,刘玉静,李立斌.预应力混凝土小箱梁桥病害原因分析与加固措施研究[J].现代工程科技,2025,4(21):65-68.
- [4] 石云华.浅谈预应力混凝土箱梁桥腹板裂缝类型及养护措施[J].北方交通,2017,(07):84-86.
- [5] 文良统.大跨径预应力混凝土薄壁箱梁桥施工早期裂缝的控制技术初步研究[J].湖南交通科技,2012,38(03):105-109.