

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250461

大挑臂复合截面节段梁耐久性研究

王 猛

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 归纳总结桥梁大挑臂复合截面节段梁的耐久性设计体系和优化思路,并深入研究后装挑臂与核心箱梁间的接缝耐久性问题。分析后装挑臂拼装误差导致的湿接缝钢筋保护层厚度偏差范围,并通过既有规范公式和有限元模拟 2 种方式,分别计算采用不同保护层厚度、接缝材料时以及在不同外部环境下氯离子对混凝土主筋的侵蚀速率。结果表明提高后装挑臂接缝耐久性应对措施有效。
关键词: 大挑臂复合截面节段梁;后装挑臂;耐久性;保护层厚度偏差;氯离子侵蚀速率
中图分类号: U441+.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2025)08-0317-05

Research on Durability of Large-cantilever Composite Cross-section Segmental Girder

WANG Meng

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The durability design system and optimization ideas for the large-cantilever composite cross-section segmental girder of the bridge are concluded and summarized. And the durability issue of the joint between the rear-mounted cantilever and the core box girder is deeply studied. The deviation range of the wet joint steel reinforcement cover thickness caused by the assembly error of the rear-mounted cantilever is analyzed, and the corrosion rate of chloride ions on the main concrete reinforcement with different cover thicknesses and joint materials under the different external environments is calculated respectively through two methods of existing standard formula and finite element simulation. The result shows that the proposed countermeasures for improving the durability of the rear-mounted cantilever joints are effective.
Keywords: large-cantilever composite cross-section segmental girder; rear-mounted cantilever; durability; cover thickness deviation; corrosion rate of chloride ion

0 引 言

目前常规预制节段大箱梁应用在宽幅桥梁上时,为减小节段尺寸和吊装重量,多采用分体式多箱断面^[1-2]。其工程设备投入套数多,墩顶横梁施工难度大,工期较长、造价高,景观效果也差强人意。为解决宽桥幅节段梁的运输、施工难题,提出了大挑臂复合截面节段梁方案^[3]。该方案将断面分解为“核心箱梁”和“预制挑臂”两部分。“核心箱梁”采用架桥机进行吊装、架设及拼装,“预制挑臂”在核心段成型后逐步拼装完成,如图 1、图 2 所示,可有效降低架梁设备吊重要求,是一种高效的结构系统,具有广泛的运用前景。

收稿日期: 2025-04-25
作者简介: 王猛(1982—),男,工学硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

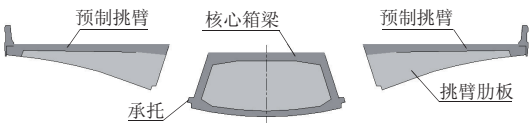


图 1 大挑臂复合截面节段梁拆解图

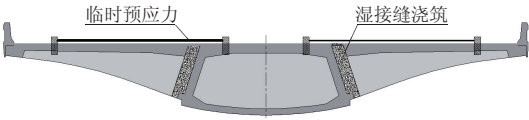


图 2 后装挑臂连接施工示意图

节段梁相对于传统现浇桥梁存在许多特殊之处,一方面节段梁是将桥梁划分成许多小的节段,再通过接缝构造连接起来,存在大量的接缝构造;另一方面,节段梁在制梁场预制,再运输到现场进行起吊拼装,必将存在大量的施工临时孔洞;大量接缝与临时孔洞的存在,降低了节段梁的整体性能,构造与施工上的缺陷都易导致这些部位出现开裂、渗水等病害,进而导致钢筋钢束的锈蚀,使结构发生耐久性失

效^[2];此外,节段梁大量使用体外预应力钢束,其暴露在空气中相比体内束也更易发生腐蚀。

大挑臂复合截面节段梁相比常规节段梁而言,又新增了后装挑臂与核心箱梁之间的接缝,由于拼装误差会导致该处接缝保护层厚度偏差从而产生薄弱点,使接缝处混凝土更易遭受氯盐侵蚀进而导致钢筋锈蚀,影响混凝土结构的使用性能和寿命。因此有必要对大挑臂复合截面节段梁的耐久性进行深入研究,并提出应对措施,对该类桥梁的广泛应用具有指导意义。

1 大挑臂复合截面节段梁耐久性设计体系

节段梁耐久性设计体系重点是对易出现耐久性问题的部位进行优化处理。针对大挑臂复合截面节段梁而言,其耐久性设计体系主要包括核心梁段间接缝耐久性、临时孔洞封堵耐久性、体外预应力耐久性、后装挑臂与核心梁段肋板接缝耐久性等方面^[4],对应的构造细节如图3、图4所示。

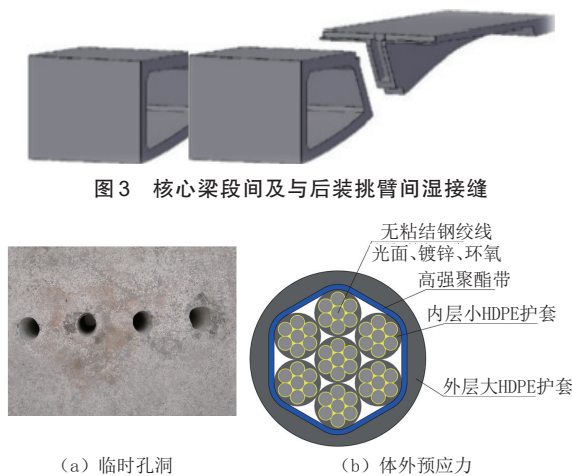


图3 核心梁段间及后装挑臂间接缝

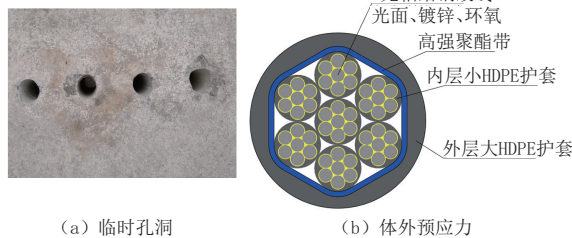


图4 临时孔洞及体外预应力

1.1 核心梁段间接缝耐久性

核心梁段间接缝作为拼装结构中较为薄弱的部位,较易受到损伤和破坏,并逐渐扩展到整体结构的破坏,其耐久性是工程安全性和耐久性的关键。通常接缝的处理主要包含3种方式:湿接缝、胶接缝和干接缝。大量工程中暴露出:节段梁干接缝由于渗水导致的耐久性问题十分突出,目前已经基本不采用该种接缝形式。

(1)湿接缝:根据已有试验研究,湿接缝区域的耐久性能相对不足,其影响因素主要涉及接缝部位混凝土的浇筑效果、新旧界面凿毛工艺的规范性以及受力状态分布。基于现有研究基础,可通过优化结构预应力度度的设计、改进混凝土材料配比参数、深

化施工技术工艺等途径,显著增强接缝构造的耐久性。

(2)胶接缝:提高节段梁接缝处的耐久性能,必须从材料研发、构造设计、施工工艺等各方面进行研究,保证胶接缝能同结构主体同寿命,桥梁运营过程中不出现渗水等耐久性病害^[5-6]。

1.2 临时孔洞封堵耐久性^[7]

在节段预制拼装桥梁施工中,为满足吊装作业、临时预应力锚固和劲性骨架安装需求,每榀梁体需预留吊装孔、锚固孔等临时孔洞。相较于传统桥梁,这些临时孔洞可能对结构安全和耐久性构成潜在风险,因此孔洞封堵密实性和界面黏结可靠性至关重要。施工完成后需对孔洞进行封闭处理,其施工质量直接决定了桥梁在运营阶段的安全性能与耐久性表现。

封堵材料的选择是封堵设计最为基本的,也是保证封堵性能达到设计要求最为关键的一环。目前工程中应用较为广泛的材料有4种:水泥基渗透结晶型防水材料、快硬型收缩补偿水泥砂浆、水性环氧树脂改性水泥砂浆及无收缩环氧树脂砂浆。经研究表明:几种封堵材料均具有高强特征,7 d抗压强度均达到55 MPa以上;快硬型收缩补偿水泥砂浆和水性环氧树脂改性水泥砂浆具有一定的微膨胀效应,对封堵后的粘结及抗渗性能起到了较好的改善作用;水泥基渗透结晶型防水材料后期的结晶效应会产生许多微结晶并能较好地填充混凝土的孔隙结构;水性环氧树脂改性水泥砂浆、无收缩环氧树脂砂浆与混凝土的粘结能力较强,可保证硬化浆体不脱落。综合研究成果,推荐采用水性环氧树脂改性水泥砂浆用作封堵材料。

封堵构造作为确保材料性能充分释放的关键基础,其科学性和实用性不仅体现在最终的粘结强度上,同时还需兼顾施工过程中的可操作性与便捷性。研究表明,采用图5所示的新型封堵构造,在优化不同材料界面粘结可靠性的同时,显著降低了封堵体在复杂工况下的脱落隐患。

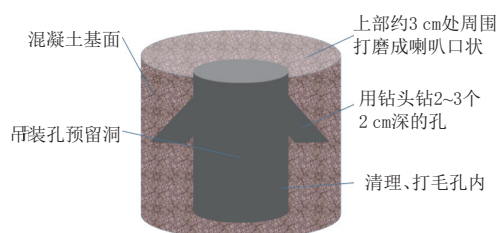


图5 临时封堵构造示意图

1.3 体外预应力耐久性

体外预应力在节段梁中大量采用,一旦由于其自身的腐蚀破坏而导致结构失效,产生的危害与影响会十分巨大。因此,确保体外预应力的耐久性极其重要。

体外预应力体系的耐久性设计应涵盖3个维度:(1)材料防护层面:确保预应力组件(含锚具、转向器等)具备良好的耐腐蚀性能,劣化速度可有效控制,从而延长维护间隔;(2)力学性能层面:通过优化锚固系统长期稳定性,抑制预应力损失,维持结构预应力水平在服役期内持续达标;(3)监测维护层面:建立定期检测与实时监测机制,通过数据支撑精准判定构件更换节点,保障全寿命周期结构安全性^[8]。

1.4 后装挑臂与核心梁段肋板接缝耐久性

大挑臂复合截面节段梁,相比常规节段梁而言,新增了后装挑臂与核心箱梁之间的接缝。由于施工技术,需要在后装挑臂和核心箱梁之间设置湿接缝,接缝对于挑臂和核心箱梁之间的传力和箱梁的整体受力至关重要,因此后装挑臂和核心箱梁处湿接缝的耐久性对于结构的安全性和使用寿命影响很大,目前尚无相关的研究成果可借鉴,需进一步研究。

2 后装挑臂接缝耐久性研究

混凝土后装挑臂与核心箱梁之间通过湿接缝进行连接,但湿接缝中可能存在诸多能够使外界有害物质进入混凝土的通道,成为混凝土抵抗环境不利作用的最薄弱环节。近海区域所处环境的氯化物含量较高,混凝土结构易遭受氯盐侵蚀,从而导致钢筋锈蚀,严重影响混凝土结构的使用性能和寿命。本节通过氯离子侵蚀的混凝土寿命预测模型,重点研究氯盐侵蚀对于后装挑臂湿接缝耐久性的影响。

湿接缝耐久性主要通过保证钢筋最小保护层厚度实现。根据目前施工相关经验,对于后装挑臂的双向接缝,因节段梁错台导致的保护层厚度偏差,平直段控制在0.5~1 cm,超高曲线段控制在1~2 cm。本文拟定保护层厚度偏差为±2 cm,并进行研究。

考虑“近海或海洋氯化物环境”环境类别,选取Ⅲ-C、Ⅲ-D、Ⅲ-E 3种环境作用等级进行研究。取《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310—2019)中对设计使用年限为100 a桥梁的最小保护层厚度,叠加施工偏差后的保护层厚度研究范围为5~60 mm。

2.1 大挑臂复合节段梁接缝耐久性研究

根据现有研究成果,氯离子侵蚀混凝土湿接缝

的时间主要与钢筋保护层厚度、接缝材料(水胶比)以及外部环境(年平均温度)有关。

2.1.1 保护层厚度和温度研究

为分析挑臂肋板与核心箱梁的湿接缝耐久性,采用《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS220:2007)中的CECS评定标准方法计算模型,选取不同环境温度和保护层厚度下的普通混凝土结构钢筋开始锈蚀的时间作为混凝土氯离子侵蚀耐久性的评价标准,将其与标准设计年限(100 a)进行比较,若计算腐蚀时间大于100 a,证明此条件下混凝土耐久性符合规范要求。

计算得到环境作用等级为Ⅲ-C、Ⅲ-D和Ⅲ-E时,氯离子侵蚀时间随保护层厚度和年平均温度的变化规律,如图6所示。可以看出,在3种环境作用等级下,钢筋开始锈蚀时间随着混凝土保护层厚度的增加而增加,其原因为混凝土保护层厚度的增加将会增大氯离子的扩散路径,从而使钢筋开始锈蚀时间增加;当年平均温度增加,会直接增大氯离子扩散系数,使得氯离子扩散速率增大,从而使钢筋开始锈蚀的时间减小;环境作用等级从Ⅲ-C增加至Ⅲ-E,环境条件逐渐恶劣,氯离子浓度逐渐增加,故钢筋开始锈蚀时间逐渐缩短。

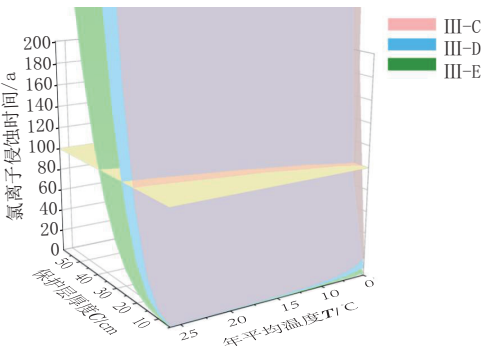


图6 钢筋开始锈蚀时间

选取3个特殊环境(东北地区5℃、江浙地区18℃及南部沿海地区26℃)中考虑偏差后的最小保护层厚度,氯离子侵蚀时间随年平均温度的变化如图7所示,图中数据为在氯离子侵蚀(到达钢筋表面)的时间。

由图7可知,在3种环境作用等级和环境温度下,考虑施工误差导致的保护层厚度偏差后,对于气温较低的东北,耐久性可以满足100 a设计使用年限,对于江浙、南部沿海等气温中等或较高的地方,湿接缝耐久性无法满足100 a设计使用年限,需采取措施提高结构耐久性。

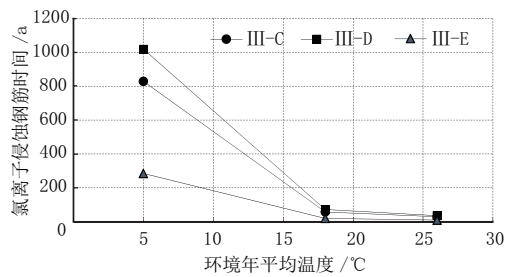


图7 特殊环境下氯离子侵蚀时间图

2.1.2 接缝材料研究

UHPC作为接缝材料具有超高强度、优异耐久性和微膨胀特性,能显著提升接缝处的抗裂性能和结构整体性。

不同于普通混凝土,UHPC具有较低的水胶比,其氯离子扩散系数不适合用CECS评定标准方法中给出的公式进行计算,需要建立适用于UHPC氯离子扩散系数的数值模型。采用考虑多因素影响的UHPC氯离子扩散系数计算模型,计算UHPC的氯离子扩散系数。通过COMSOL软件来模拟接缝处的氯离子扩散的物质扩散场,计算得到在20℃情况下,C50混凝土和UHPC在Ⅲ-C环境作用等级下的侵蚀情况如图8、图9所示^[9-10]。

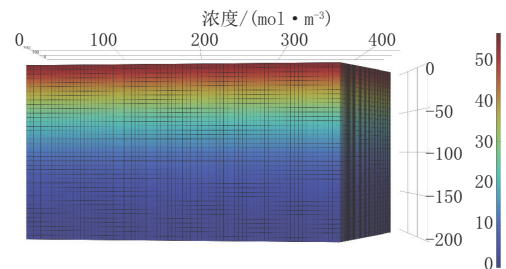


图8 C50混凝土氯离子侵蚀情况

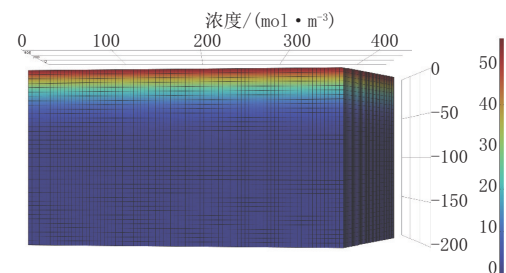


图9 UHPC混凝土氯离子侵蚀情况

由图可知,同等环境作用等级下,UHPC被侵入深度明显小于C50普通硅酸盐混凝土。通过数据分析,得出氯离子浓度随混凝土深度的分布图如图10所示。由图10可知,氯离子浓度随着距混凝土表面深度增加而降低,在相同深度下UHPC的氯离子浓度明显小于C50混凝土,且UHPC的氯离子浓度随深度增加的下降低度更大。

在20℃的环境下,3种环境作用等级下100a后

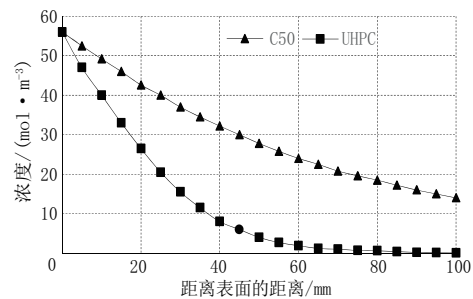


图10 不同材料氯离子浓度随深度分布规律

C50与UHPC经氯离子侵蚀的深度对比如表1所列,表中数据为在氯离子侵蚀到达钢筋表面的深度。

表1 不同接缝材料氯离子侵蚀深度 单位:mm

接缝材料	环境类别		
	Ⅲ-C	Ⅲ-D	Ⅲ-E
	保护层15 mm (偏差下限)	保护层20 mm (偏差下限)	保护层20 mm (偏差下限)
C50混凝土	18.4*	23.1*	33.0*
UHPC混凝土	6.8	8.6	12.2

注:*表示不符合耐久性要求(侵蚀深度大于考虑施工误差的最小保护层厚度)的数据。

由表1可知,考虑施工误差引起的挑臂接缝保护层厚度减小,C50混凝土在3种环境作用等级下,钢筋均遭受氯离子侵蚀,而UHPC混凝土在同等条件下的氯离子侵蚀深度均未到达钢筋表面。证明采用UHPC混凝土可以有效减小氯离子侵蚀效应,提升接缝处耐久性能,可作为提高挑臂接缝耐久性的优选措施。

2.2 大挑臂复合节段梁特殊耐久性应对措施

提高混凝土耐久性的措施可以分为“基本措施”和“附加措施”2大类。“基本措施”是指从混凝土自身出发来提高混凝土湿接缝的耐久性,包括采用UHPC混凝土、降低水胶比、增大钢筋保护层厚度、添加矿物掺料等;“附加措施”是指通过外界的辅助,来弥补混凝土结构作为多孔结构无法避免氯离子等有害物质的侵入,包括施加混凝土表面涂层、采用环氧涂层钢筋以及加入阻锈剂等。根据上文分析可知,针对后装挑臂湿接缝,采用UHPC混凝土减小氯离子扩散系数以及增大钢筋保护层厚度以增加氯离子传递路径的方式,可大幅提高接缝的耐久性能。设计时宜优先考虑采用UHPC混凝土和增大钢筋保护层厚度等耐久性提高措施。

3 结 语

本文归纳了大挑臂复合截面节段梁的耐久性设

计体系,给出了核心梁段间接缝、临时孔洞及体外预应力等薄弱部位的耐久性优化思路。同时,对大挑臂复合截面节段梁特有的核心梁段和挑臂间接缝处耐久性能做了深入的研究,主要结论如下:

(1)大挑臂复合截面节段梁由于双向错台施工误差,常常引起挑臂接缝处钢筋保护层厚度小于设计值,成为主梁耐久性的薄弱环节。

(2)温度升高会加速氯离子对于混凝土钢筋的锈蚀,而保护层厚度加大会增大氯离子侵蚀路径,延缓钢筋锈蚀的发生。

(3)挑臂接缝采用普通硅酸盐混凝土时,在Ⅲ-C、Ⅲ-D、Ⅲ-E 环境作用等级下,由于施工误差导致保护层厚度减小后,在气温中等或较高的地区,需采取有效措施提高耐久性。

(4)挑臂接缝采用 UHPC 混凝土时,氯离子浓度随混凝土深度增加而急剧下降,在多种环境作用等级和温度下,氯离子侵蚀深度均小于考虑施工误差后的保护层厚度,可作为提高接缝耐久性的优选措施。

针对大挑臂复合截面的后装挑臂湿接缝耐久性问题,宜优先考虑采用 UHPC 混凝土和增大钢筋保

护层厚度的应对措施。此外也可以结合降低水胶比、施加混凝土表面涂层、添加矿物掺料、采用环氧涂层钢筋以及加入阻锈剂等措施综合处理。

参考文献:

- [1] 吴东升,卢永成,任才.城市高架变宽预制节段梁结构设计与关键技术研究[J].桥梁建设,2021,51(6):99-105.
- [2] 侯玉茹.公路桥梁预制节段拼装施工关键技术[J].交通世界,2025(8):121-123.
- [3] 严搏,郭济,卢永成.大挑臂复合截面节段梁后装挑臂纵向预应力效应研究[J].城市道桥与防洪,2021(10):110-113;16.
- [4] 陈涛.节段预制拼装桥梁耐久性设计要点研究[J].工程建设与设计,2024(1):94-96.
- [5] 姚淑芳,曾兵,王先前,等.预制混凝土节段胶接缝耐久性研究概述[J].中国胶粘剂,2022,31(10):57-64.
- [6] 谢宁.预制混凝土节段胶拼构件接缝粘接机理及耐久性研究[J].粘接,2024,51(5):25-28.
- [7] 吴东升,任才,张智然.节段预制桥梁施工期间临时孔耐久性设计[J].施工技术(中英文),2022,51(6):31-35.
- [8] 徐栋,徐海军.预制节段体外预应力桥梁的耐久性评述[J].同济大学学报(自然科学版),2003(11):1261-1265.
- [9] 殷雨时,杨纪,苏庆田等.装配式节段梁 UHPC 湿接缝界面力学性能数值模拟分析[J].大连理工大学学报,2023,63(1):77-85.
- [10] 颜维毅.氯离子侵蚀下 UHPC 梁的耐久性研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

