

桥梁设计中连续梁与悬臂梁结合结构研究

郭仔翔

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050

[摘要]连续梁与悬臂梁组合结构是桥梁工程中的一个重要的结构类型,融合了这两种典型的结构体系的优点,在这里对它们的形式特征以及受力特点进行系统的剖析。在主梁截面的选择上,节段之间的连接,合龙措施等方面,预应力体系的设计,抗裂抗变形能力的设置,抗震稳定的验算等方面论述关键的设计技术问题;并且对其性能计算与优化方案进行了深入的研究,以便更好地指导类似桥梁的设计与施工工作。

[关键词]连续梁;悬臂梁;组合结构;节段连接;预应力;抗震设计

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19665

中图分类号: U448

文献标识码: A

Research on the Combination Structure of Continuous Beam and Cantilever Beam in Bridge Design

GUO Zixiang

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430050, China

Abstract: The combination structure of continuous beam and cantilever beam is an important structural type in bridge engineering, which combines the advantages of these two typical structural systems. Here, its formal characteristics and stress characteristics are systematically analyzed. Discuss key design technical issues in the selection of main beam section, connection between segments, closure measures, design of prestressed system, setting of crack resistance and deformation resistance, and verification of seismic stability; In-depth research has been conducted on its performance calculation and optimization schemes to better guide the design and construction work of similar bridges.

Keywords: continuous beam; cantilever beam; composite structure; segmental connection; prestressed; seismic design

引言

连续梁桥与悬臂梁桥是大中跨径桥梁常用的两种结构形式。预应力混凝土连续梁桥因具有接缝少、刚度大、行车平顺舒适等优点,在 30~120 m 跨径范围内常作为优选方案。然而,在特定条件下,单一结构体系难以兼顾受力合理与施工便利的要求,于是将连续梁与悬臂梁相结合的新型桥梁结构体系应运而生。从受力角度而言,该结合体系充分发挥了悬臂梁减小跨中正弯矩、连续梁提高整体刚度的优势;从施工角度而言,悬臂浇筑与悬臂拼装工艺与该体系具有高度的契合性,使其具备良好的技术与经济效益。因此,加强对该结合体系设计关键技术的研究,对促进桥梁工程建设技术的发展具有重要意义。

1 连续梁与悬臂梁组合结构的形式、特点与受力机理

1.1 结构形式与构造特点

连续梁与悬臂梁相结合结构在桥梁工程上主要是指

刚构-连续组合梁桥,悬臂拼装连续梁桥,混合梁桥之类。刚构-连续组合梁桥把部分桥墩与主梁连成整体构成刚构结构,剩余桥墩设支座构成连续体系,结合了刚构桥的整体性能良好及连续梁桥的温度敏感性小的优势。连续刚构桥综合了连续梁和悬臂梁的优点,适用于中跨径高的墩柱桥梁。悬臂体系梁桥的特点就是悬臂跨与挂孔跨轮换设置,在一般情况下都是采取奇数跨的形式。

悬臂体系与连续体系相接时产生的一种特殊的受力形式就是:悬臂部分利用负弯矩消除正弯矩,而连续部分则是利用超静定内力重分布来加强整个结构的整体刚度。大跨径悬臂体系、连续体系梁桥的主要特征及构造上的区别主要是体现在受力、变位以及施工方法等几个方面上。在受力上,恒载作用下悬臂体系跨中的弯矩要比简支梁小,活荷载作用下的跨中弯矩也比简支梁要小,弯矩图形面积也有所缩小。表格 1 比较了各种组合结构形式的不同特点。

表 1 不同组合结构形式的特点对比

组合结构形式	构造特点	受力特征	适用跨度 (m)	主要优点	局限性
刚构-连续组合梁桥	墩梁固结与支座布置相结合	整体刚度大, 温度内力分布复杂	80~400	减少支座数量, 抗震性能好	温度效应敏感
悬臂拼装连续梁桥	预制节段逐孔悬臂拼装	负弯矩区需配置预应力	40~200	施工快速, 混凝土质量控制好	接缝耐久性要求高
悬臂浇筑连续梁桥	原位浇筑, 逐节对称延伸	墩顶负弯矩大, 体系多次转换	60~300	整体性好, 适应性广泛	工期较长, 线形控制复杂
混合梁桥	钢-混结合, 跨中设置结合段	材料性能充分利用	100~600	减轻自重, 跨越能力大	连接构造复杂

表 2 节段连接与合龙方式对比

连接方式	施工工艺	受力性能	质量控制要点	适用场景
湿接缝	现浇混凝土连接新、旧节段	整体性好, 刚度接近连续	接缝凿毛处理、浇筑密实、养护充分	悬臂浇筑施工
干接缝	预制梁段直接拼接	传递剪力为主, 抗弯性能较湿接缝弱	匹配面加工精度、涂抹环氧胶	节段预制拼装
环氧树脂接缝	干接缝配合环氧胶黏结	提高接缝密封性和耐久性	涂胶均匀性、挤压压力控制	大跨径预制拼装桥梁
钢梁焊接	现场对接焊接连接	强度高, 刚度连续性好	焊接工艺评定、无损探伤检测	钢-混组合梁

1.2 受力机理与力学特性

连续梁与悬臂梁组合结构受力机制非常复杂。悬臂浇筑法进行施工的预应力混凝土连续梁桥, 在施工过程中存在从静定结构变成超静定结构的体系转换, 受力非常复杂, 容易产生裂缝。在施工期间, 桥梁结构是以 T 形刚构的静定系统受力, 承担着自重、施工荷载及预应力的作用; 成桥以后, 在合龙段施工以及体系转换之后变为超静定连续体系, 内力发生变化。恒载状态下悬臂体系梁体负弯矩区可有效地减少跨中正弯矩, 使得弯矩图形更为均衡。针对主跨 150m 以上的特大跨度桥梁, 在悬臂施工状态下无法以布置预应力的方法将其完全消除, 设计上应控制重量减轻, 防止由于增大截面而造成的过大的重量。预应力混凝土连续梁桥悬臂施工阶段梁体会发生一系列变化, 主梁在悬臂段中的受力状况及形态也会随之变化, 因而悬臂施工时梁体受力及变形情况较难控制。桥梁结构的几个主要力学特征有: 体系转换引起的次内力^[1]、长期作用下的混凝土收缩徐变次内力^[2]、非线性温度梯度下的温度次内力^[3]、由于预应力损失导致的次内力^[4]。特别是超静定结构体系转换引起的次内力是设计时必须考虑的重点问题。

2 组合结构关键设计技术

2.1 主梁截面设计优化

主梁截面形式的选择直接影响到组合结构的内力及用材量大小问题。对于跨径大于 30m 的大桥, 主要使用箱型截面, 普遍使用变高度不等跨梁的形式。箱型截面对抵抗弯曲、扭转有非常好的效果, 在大跨径连续梁和悬臂体系中有较广泛的运用。变高度截面设计就是组合体系主梁的设计中最主要的一个改进方案。悬臂根端(墩顶区域)

布置较大截面尺寸来适应负弯矩以及抗剪要求, 在跨中区域减少截面尺寸来减轻自重、降低正弯矩, 做到合理分配使用材料。箱梁顶底板及腹板宽度、厚度都要在抗压和自重之间找到一个合适的比例。预应力筋管道的合理安排也是一个重要的截面设计方面。受制于结构尺寸设置的预应力钢筋绳具有极限值, 强行增加截面积来布置更多的索孔通常会难以把握结构重量, 所以需要运用精细化的设计思路在满足承载力的基础上最小化截面尺寸, 达到减轻重量的目的。

2.2 节段连接与合龙设计技术

节段连接以及焊接合龙属于组合式梁体结构中的核心技术环节, 也关系到整个桥梁结构的整体性和耐久性。对于悬臂施工而言, 梁体分成若干个节段, 单侧悬臂浇筑节段, 最大的单个节段长度、最重单个节段的重量均须依据现场施工设备条件而定。表 2 总结了节段连接及焊接合龙技术的不同技术特性。

合龙段指的是对悬臂浇筑施工的连续梁(刚构)类桥进行悬浇施工过程中用于连接各个悬浇部分以及主桥与边跨临时接缝处的部分, 长度一般在 1.5~2.0m 左右。合龙作业按“先边跨再中跨”的次序开展, 在合龙作业阶段应采取钢绞线临时固定的方式操作, 温度环境尽量选择在设计中的最低稳定期内进行作业^[2]。运用预制胶结拼装的方式施工连续梁有着机械化水平高、混凝土强度易于掌握、梁块成型质量佳、合龙以后梁块整体竖向位移较小等诸多优点, 累计竖向变形量远远低于悬臂浇筑法施工连续梁。

2.3 预应力体系布置与优化

预应力体系是保障组合结构承载能力以及抗裂能力

的关键技术措施,在利用节段悬臂施工法建设的预应力混凝土连续梁桥中,典型的纵向预应力布置方式有悬臂束、边跨合龙束及中跨合龙束等几种不同的类型。各个部位预应力筋用量不同以及对成桥后总弯矩的影响程度也存在较大差别,应按施工过程与成桥过程的受力状态的不同分别设置预应力束的数量。预应力优化配置的概念就是:在悬臂施工过程中按 T 构弯矩平衡配置静定束即悬臂束;在成桥过程中按正截面最不利应力配置后期束,在斜截面最不利主拉应力配置抗剪竖向预应力钢筋。这样的分阶段配束方案既可以满足施工过程中受力需求,也能够保证桥梁建成后有足够的储备能力。纵向预应力束以体内束与体外束组合的方式布置,体外束具有易于观察以及方便更换的特点,但是要注意防护措施。体内束利用波纹管制孔,并要求高孔位定型精度及压浆饱满程度的预应力张拉,按分级加载的原则进行。横向预应力主要布置于桥面板增加了桥面板的横向受力性能,避免了纵向裂缝。竖向预应力布置在箱梁腹板上用于提升斜截面抗剪承载能力和主拉应力控制能力。

2.4 抗裂与抗变形设计

防裂、防变位设计是保障组合结构整体性的重要措施,在悬臂浇筑施工过程中混凝土干缩徐变以及非线性温变等计算参数的选择、计算方式的选择是设计难题所在;针对负弯矩区裂缝控制,在沙埕湾跨海大桥南引桥中支点墩顶采取允许负弯矩区混凝土开裂(裂缝宽度限值为0.15mm)的设计手段以及钢底板与混凝土结合断面技术,使得负弯矩区组合梁应力得到缓解,从而延长了桥梁使用寿命。防变形设计主要从防止长期变形和精确线形两方面考虑。在悬臂施工状态下梁端重量,预应力损耗及温度的变化都会造成线形误差,需要通过监控施工和设置预拱度的方式来进行积极调整。使用高强钢与混凝土组成的混合式结构体系,利用不同材料的优点在提高结构受力性能、减少结构自重、使结构施工更加便捷、延长结构耐久时间以及提高经济性等方面有更大的优势。对于大跨径桥梁长期性的挠度需要考虑混凝土徐变收缩时间的影响,合理地进行设置预拱度,控制预应力损失的方式对它进行控制。

2.5 抗震设计与稳定性分析

结合结构进行抗震设计应兼顾连续体系及悬臂体系之间的相互配合能力。连续梁桥的刚度大、抗震能力强,在某一处断面受损的情况下其临近部分能够支撑住整跨桥体而不使其坍塌,但结合结构在体系转换期间有多个重要的施工工况,各个状态下的抗震能力都须分别进行分析,大跨度混合梁连续刚构桥的振动模式比较紊乱,低频振动

主要表现为整体主梁的振动模式,需要考虑更多的阶次来计算振型的质量参与系数。不同形式支承方式对结构自身振动特性也有所改变,桩基与基地的相互作用同样会对自身振动特性造成一定的干扰,因此设计人员要从反应谱的方法,以及时程分析法等方法进行全面考察。施工期内的稳定性分析是最大悬臂状态下抗风稳定与抗震稳定的分析,要同时考虑到几何非线性和材料非线性以求出稳定的可靠性;运营期内的稳定性是指整个体系或者某一构件是否发生破坏,通过验算结构在不同工况下的安全储备来达到目的^[3]。连续梁的动力性能决定了它的振动特性,一阶竖弯模态对桥梁抗风稳定性的作用较大,而一阶横弯模态则对桥梁在风力作用下产生的横向变形起到重要的作用。

2.6 施工方法与设计协同

施工方案与设计的一致性在保证组合结构质量的基本条件。悬臂施工方式主要有悬臂浇筑法以及悬臂拼装法,适用于悬臂梁、连续梁、斜拉桥等等。悬臂浇筑法主要包括挂篮前移、模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑、预应力张拉等工序;悬臂拼装法则为把预制梁段运到现场拼装起来。施工方案与设计的一致性体现在各个方面。设计中要考虑到选择施工方案的工艺特点,比如采用悬臂浇筑法时需设置挂篮锚固系统以及临时支撑,采用悬臂拼装法时需设置匹配精度及接缝构造等,设计要有一定的施工变形的空间并依据施工监控情况进行实时变动。基于有限元法对建筑物在不同施工阶段的强度进行计算是确保施工安全的重要方法,在设计中需要综合考虑施工临时设施的设置问题、施工荷载选取问题以及体系转换时间节点等各方面的的问题,做到设计与施工相结合。

3 组合结构桥梁性能分析与优化

组合结构桥梁性能的研究应在施工全过程中以及使用全寿命周期内完成,对于施工过程中的各施工工况下结构应力、变形及稳定性要进行验算,主要对挂篮行走、最大悬臂状况、合龙施工等几个重要时间段进行验算。对于节段预制悬臂拼装连续梁在施工过程中,要通过精细验算并结合实际监测数据,提供不同形式的线性调整措施,采取合理的方式加强对悬臂拼装连续梁的线形调整。对于使用阶段要对组合结构桥梁进行成桥静载试验和长期行为观测,在桥的受力部位布置应力、变形、温度传感器,测量桥梁在不同车辆荷载下的反应数据并与预计结果相比较。龙翔大桥主桥是大节段钢梁作为跨中结合段的大跨径双主跨刚构连续梁组合体系的代表性工程,在悬臂梁施工、钢混结合段吊装、大节段跨中钢梁吊装3个施工阶段实现了快速转换,为类似工程提供了一个成功的案例^[4]。性能

优化应在结构形式的选择、截面参数的优化以及预应力配束方案和施工技术上的改善等多方面进行综合考虑。利用高性能钢-混凝土组合结构体系，充分利用材料各自的特点，既可以保证结构的安全又可以节约成本。采用基于可靠度的设计方法对重要设计指标进行灵敏度研究及优化，使结构更加经济合理，并提高了安全储备。

4 结语

连续梁与悬臂梁相融结构利用两根基本结构体系的优点，在桥梁工程中有很好的技术经济效益。在结构形式上，刚构—连续组合梁桥、悬臂拼装连续梁桥和混合梁桥各有优点，应按桥梁跨径、地质条件及施工条件选用相应的类型，在受力机制上，结合结构经历了从静定结构向超静定结构的变化，内力分布较为复杂，需要进行精准的研究；在关键技术上有：主梁截面设计，节段间的连接及合龙技术，预应力体系配置，裂缝及变形控制设计，抗震性能研究，施工方案的选择等构成了这种桥的设计技术系统。

伴随着新材料科技以及智能化施工技术的进步，连续梁与悬臂梁组合体系设计思路及施工方法也会不断更新，从而促进桥梁工程向着更大的跨径、更高的性能指标以及更长寿命周期等方面迈进。

[参考文献]

- [1]孔琦.高速公路桥梁预应力连续梁悬臂挂篮施工技术[J].科学技术创新,2026(1):134-137.
- [2]王亚东.公路桥梁现浇连续梁悬臂段施工控制技术浅析[J].四川水泥,2019(2):45.
- [3]施德.连续梁悬臂施工抗倾覆施工技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(21):61-63.
- [4]牟昌海.大跨度预应力混凝土连续梁悬臂浇筑施工技术[J].科学技术创新,2024(13):125-128.

作者简介：郭仔翔（1996—）男，汉族，贵州江口人，工程师，路桥中级，2020年毕业于贵州大学，硕士研究生，研究方向为高速公路桥梁结构设计。