

钢混组合桥梁在交通工程中的应用与性能分析

张 帅, 白 飞*

(泰安市泰山路桥建设有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要 钢混组合桥梁融合了钢材高强度、大跨度优势与混凝土刚度大、耐久性强、造价经济的特点, 在交通工程领域应用日益广泛。本文结合交通工程建设实际, 系统分析钢混组合桥梁的核心类型与应用场景, 深入研究其力学性能、耐久性能及施工性能, 重点探讨钢混组合结构设计要点、施工关键环节控制及性能检测方法, 结合工程实践数据验证其应用价值。研究表明, 钢混组合桥梁在承载能力、抗裂性能、经济性等方面优于传统单一材料桥梁, 适配高速公路、城市主干道、跨江跨海等多种交通场景, 能够满足重载交通、复杂地质及大跨度建设需求, 符合现代交通工程绿色低碳、高效耐久的发展理念, 具有极高的推广应用价值。

关键词 钢混组合桥梁; 交通工程; 应用场景; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.034

0 引言

随着我国交通工程建设的快速发展, 高速公路、城市快速路及跨江跨海通道的建设需求日益增长, 对桥梁结构的跨度、承载能力、耐久性 & 经济性提出了更高要求。传统纯钢结构桥梁存在刚度不足、后期维护成本高的问题, 纯混凝土桥梁则受自重限制, 难以满足大跨度、重载交通的使用需求。钢混组合桥梁通过合理搭配钢材与混凝土材料, 实现优势互补, 有效解决了单一材料桥梁的短板, 在工程实践中得到广泛应用, 推动钢混组合桥梁技术的进一步发展, 对国内交通工程的建设意义重大。

1 钢混组合桥梁的核心类型及特点

1.1 核心结构类型

钢混组合桥梁的结构类型主要根据钢材与混凝土的组合方式划分, 主要有钢混组合梁桥、钢混组合拱桥、钢混组合刚构桥三大类。其中, 钢混组合梁桥应用最为广泛, 分为叠合梁、结合梁两种形式: 叠合梁由钢梁与预制混凝土板叠合而成, 施工便捷、工期较短, 适用于中小跨度桥梁; 结合梁通过剪力连接件将钢梁与现浇混凝土板牢固连接, 整体性强, 适用于大跨度、重载交通路段。钢混组合拱桥结合了拱桥的承重优势与钢混组合结构的经济性, 跨度可达百米以上, 多用于跨江、跨河及城市景观桥梁; 钢混组合刚构桥则兼具刚构桥的稳定性与组合结构的轻量化特点, 适用于复杂地形条件下的桥梁建设。

1.2 核心结构特点

钢混组合桥梁的核心优势在于材料性能的互补性: 钢材具有高强度、高韧性、重量轻的特点, 能够有效减小桥梁自重, 提升跨度能力, 适应大跨度建设需求; 混凝土具有刚度大、抗腐蚀性强、造价低廉的优势, 能够提升桥梁的整体刚度, 减少结构变形, 降低后期维护成本。同时, 钢混组合结构通过剪力连接件实现钢材与混凝土的协同工作, 避免两种材料因变形差异产生分离, 确保结构整体性。此外, 钢混组合桥梁施工便捷, 可采用预制拼装与现浇结合的方式, 缩短施工工期, 减少对周边交通及环境的影响, 符合现代交通工程高效、绿色建筑的要求。

1.3 交通工程中的应用优势

钢混组合桥梁的应用优势集中体现在四大方面, 且均有具体工程数据支撑。一是材料协同优势显著, 相较于纯钢结构桥梁, 钢混组合结构整体刚度提升 40% 左右, 后期维护成本降低 35% 以上; 相较于纯混凝土桥梁, 自重减轻 25% ~ 30%, 大跨度施工难度大幅降低, 可减少基础工程投入 15% ~ 20%。二是适配场景广泛, 可灵活适配高速公路、城市交通、跨江跨海、软土地基及旧桥改造等多种场景, 既能满足中小跨度常规通行需求, 也能适配大跨度、重载交通、复杂海洋 / 地质环境的建设要求, 兼顾实用性与美观性。三是综合性能优越, 力学性能、耐久性能及施工性能均优于传统单一材料桥梁。例如: 河南安罗高速公路钢混组合

作者简介: 张帅 (1989-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 交通工程。

*通信作者: 白飞 (1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 交通工程。E-mail: 2350598769@qq.com

桥梁,通过智能化施工优化,顶推工效提升 45% 以上,预制桥面板人力投入减少 70% 以上,单节钢壳混凝土索塔建造工期较传统混凝土桥塔缩短 50%。四是经济性与环保性兼顾,轻量化结构可降低基础工程造价,预制拼装施工减少现场工作量与建筑垃圾,符合绿色施工理念,且设计使用寿命可达 100 年,长期运营性价比突出,相较于纯钢结构桥梁,全生命周期成本降低 20% ~ 28%^[1]。

2 钢混组合桥梁在交通工程中的应用场景及实践

2.1 高速公路桥梁应用

高速公路桥梁对承载能力、通行效率及耐久性要求极高,钢混组合梁桥因其轻量化、大跨度、抗疲劳性能强的特点,成为高速公路桥梁的优选方案。在高速公路互通立交、跨线桥及连续梁桥建设中,钢混组合梁桥可有效减小桥梁自重,降低基础工程造价,同时具备良好的抗车辙、抗开裂能力,能够适应高速公路重载交通、高频次通行的使用需求。例如:某高速公路跨线桥采用钢混组合叠合梁结构,跨度 30 m,钢梁采用 Q355qD 钢材,混凝土板采用 C50 高性能混凝土,通过栓钉连接件实现协同工作,经检测,桥梁承载能力满足公路 - I 级荷载要求,运营期间结构变形量控制在 2 mm 以内,有效保障了高速公路的安全畅通。

2.2 城市交通桥梁应用

钢混组合桥梁是一种可根据城市规划需求,设计成多样化的结构形式,兼顾实用性与美观性,同时采用预制拼装施工,缩短现场施工工期,减少对城市交通的干扰。在城市主干道跨河桥、高架桥建设中,钢混组合刚构桥与组合拱桥应用广泛,既能满足大跨度跨越需求,又能与城市景观相融合。例如:某城市跨河景观桥采用钢混组合拱桥结构,主跨 80 m,钢梁与混凝土拱肋协同受力,桥梁外观简洁大气,既解决了跨河通行问题,又成为城市标志性景观,同时通过优化施工方案,仅用 6 个月完成主体结构施工,最大限度减少了对周边居民生活及交通的影响^[2]。

2.3 特殊场景桥梁应用

在跨江跨海、复杂地质等特殊场景中,钢混组合桥梁的优势更为突出。跨江跨海桥梁要求结构具备良好的抗风、抗浪、抗腐蚀性能,钢混组合结构中,混凝土可有效保护钢材免受海水侵蚀,钢材则提升结构的抗风稳定性与跨度能力,能够适应复杂的海洋环境。在软土地基区域,钢混组合桥梁自重轻的特点可有效减小地基承载力要求,降低基础沉降风险,避免因地基变形导致桥梁结构损坏。例如:某跨海大桥引桥采用钢混组合梁结构,针对海洋高腐蚀环境,对钢梁进

行防腐处理,混凝土采用海工高性能混凝土,经长期运营检测,桥梁结构无明显腐蚀、变形现象,满足跨海通行的长期使用需求。

3 钢混组合桥梁的核心性能分析

3.1 力学性能

钢混组合桥梁的力学性能主要体现在承载能力、抗裂性能及刚度三个方面。在承载能力方面,钢混组合结构协同受力,钢材承担拉力,混凝土承担压力,有效发挥两种材料的力学性能,与同跨度纯混凝土桥梁相比,承载能力提升 30% 以上,与纯钢结构桥梁相比,整体刚度提升 40% 左右。在抗裂性能方面,混凝土板的受压状态可有效抑制钢材的拉伸变形,减少结构裂缝产生,通过合理设置预应力,可实现桥梁全截面无裂缝工作。试验数据表明,钢混组合梁桥在正常使用荷载下,裂缝宽度可控制在 0.1 mm 以内,远低于规范限值。在刚度方面,钢混组合结构的整体刚度较大,结构变形量小,某 30 m 跨度钢混组合梁桥在满载状态下,最大挠度为 1.8 mm,挠度比为 1/1 667,满足规范要求,能够有效保障通行舒适性。

3.2 耐久性性能

钢混组合桥梁的耐久性性能主要取决于钢材防腐、混凝土抗腐蚀及剪力连接件的可靠性。钢材的防腐处理是提升桥梁耐久性的关键,常用的防腐方式有热镀锌、防腐涂料喷涂等,可有效抵御大气、雨水及海洋环境的侵蚀,延长钢材使用寿命;混凝土采用高性能混凝土,添加矿物掺合料,提升混凝土的抗渗、抗冻、抗腐蚀性能,避免混凝土开裂导致钢材暴露腐蚀。剪力连接件的可靠性直接影响结构整体性,栓钉连接件经试验验证,抗剪强度可达 150 kN 以上,能够有效传递剪力,确保钢材与混凝土协同工作,避免因连接件失效导致结构破坏。

3.3 施工性能

钢混组合桥梁的施工性能主要体现在施工便捷性、工期可控性及施工安全性三个方面。与纯混凝土桥梁相比,钢混组合桥梁的钢梁可在工厂预制,现场拼装,减少现场现浇工作量,缩短施工工期,通常比同跨度纯混凝土桥梁工期缩短 20% ~ 30%;与纯钢结构桥梁相比,钢混组合桥梁无需复杂的焊接工艺,施工难度降低,且混凝土板的浇筑可采用满堂支架或挂篮施工,施工安全性更高。例如:大跨钢混组合梁桥采用挂篮悬浇施工,钢梁预制完成后吊装至挂篮,再现浇混凝土板,施工过程中可通过实时监测结构变形,调整施工参数,确保施工质量^[3]。

4 钢混组合桥梁设计与施工关键控制要点

4.1 设计关键要点

钢混组合桥梁的设计核心是实现钢材与混凝土的协同工作,关键控制要点包括结构选型、材料配比及剪力连接件设计。结构选型需结合工程场景、跨度需求及造价预算,中小跨度优先选用叠合梁结构,大跨度选用结合梁或组合拱桥结构;在材料配比方面,钢材选用高强度低合金结构钢,确保高强度与韧性,混凝土选用高性能混凝土,根据使用环境调整配合比,海洋环境需提升抗腐蚀性能,寒冷地区需提升抗冻性能;剪力连接件设计需根据结构受力特点,合理选择栓钉、槽钢等连接件类型,确定连接件间距与数量,确保剪力传递可靠,避免出现连接件剪切破坏。

4.2 施工关键控制要点

钢混组合桥梁的施工关键在于确保钢梁预制精度、混凝土浇筑质量及剪力连接件施工质量。钢梁预制需严格控制尺寸偏差,翼缘板、腹板的焊接质量需符合规范要求,焊接后进行无损检测,避免焊接缺陷导致结构强度下降;混凝土浇筑前,需清理钢梁表面杂物,确保混凝土与钢梁粘结紧密,浇筑过程中采用分层浇筑、振捣密实,避免出现蜂窝、麻面等缺陷,浇筑完成后及时进行养护,养护时间不少于14天,确保混凝土强度达到设计要求;剪力连接件施工中,栓钉焊接需控制焊接温度与时间,确保焊接牢固,焊接后进行拉拔试验,合格率需达到100%^[4]。

4.3 性能检测要点

钢混组合桥梁的性能检测分为施工阶段检测与运营阶段检测,确保结构性能满足设计与使用要求。施工阶段检测主要包括钢梁焊接质量检测、混凝土强度检测、剪力连接件抗剪强度检测及结构变形检测。焊接质量采用超声波检测,混凝土强度采用回弹法或钻芯法检测,剪力连接件采用拉拔试验检测,结构变形采用全站仪监测;运营阶段检测主要包括结构挠度、应变监测,钢材防腐层检测,混凝土裂缝检测及支座性能检测,定期对桥梁结构进行全面检测,及时发现隐患并进行处理^[5]。

5 工程案例实践

为进一步验证钢混组合桥梁在交通工程中的应用价值、综合性能及施工控制效果,结合河南安罗高速公路钢混组合桥梁典型工程案例,详细阐述其应用实践过程、技术要点及检测成效。

该项目为交通运输部智能交通先导应用试点项目,主要涉及高速公路主线跨线桥及互通立交桥梁,采用钢混组合梁、钢混组合索塔结构,总桥梁长度2.8 km,

其中钢混组合梁段总长1.6 km,设计荷载为公路-I级,设计使用寿命100年。项目核心难点在于需实现智能化施工与重载交通适配,同时控制施工对现有交通的干扰。

在施工过程中,该项目优化钢混组合结构设计,钢梁选用Q355qD高强度低合金结构钢,混凝土板采用C50高性能混凝土,剪力连接件采用栓钉连接,间距控制在150 mm,确保钢材与混凝土协同受力。施工阶段引入150余台智能化步履式顶推设备,实现80台以上设备同步控制,有效控制钢梁拼装偏差在3 mm以内;预制桥面板采用自动化智能生产线,人力投入减少70%以上,钢壳混凝土索塔单节建造工期较传统混凝土桥塔缩短50%,较带纵筋的钢壳塔施工工效提升20%以上。

经施工阶段及运营初期检测,该项目钢混组合梁焊接无损检测合格率达100%,混凝土28天强度达设计强度的105%,栓钉拉拔试验平均抗剪强度达162 kN,合格率100%;钢壳钢板脱空率低于0.6%,结构变形量控制在2 mm以内,顶推工效提升45%以上,完全满足高速公路重载交通、高效施工的需求,同时大幅降低了施工成本与环境影响,验证了钢混组合桥梁在高速公路场景的应用优势与智能化施工的可行性。

6 结束语

钢混组合桥梁凭借钢材与混凝土的优势互补,在承载能力、耐久性、经济性及施工便捷性等方面表现突出,已成为交通工程建设中的核心结构形式之一,有效解决了传统单一材料桥梁在大跨度、重载交通、复杂环境下的应用难题。本文通过对钢混组合桥梁的类型、应用场景及核心性能的深入分析,明确了其设计与施工的关键控制要点,结合工程实践验证了其应用价值。实践表明,钢混组合桥梁能够满足现代交通工程绿色低碳、高效耐久、大跨度的建设需求,不仅可以降低工程造价、缩短施工工期,还能提升桥梁的使用寿命与运营安全性。

参考文献:

- [1] 魏科,冯霄暘,刘黎,等.钢混组合梁高性能桥面板湿接缝界面强化方式[J].铁道建筑,2024,64(12):39-43.
- [2] 王一博,刘世忠,栗振锋,等.钢-混组合结构桥梁连接件发展趋势研究[J].公路交通技术,2021,37(02):45-52.
- [3] 陈发杨.钢-混组合结构栓钉剪力连接件综述[J].广东建材,2022,38(04):66-68.
- [4] 李维维,安小军,王旭.激光清洗技术在钢结构桥梁制造中的应用探讨[J].中国建筑金属结构,2024,23(07):50-52.
- [5] 柴战军,栗明亮,齐敦平,等.桥面板徐变对大跨径钢混组合梁桥力学性能的影响[J].中原工学院学报,2024,35(04):43-52.