

波形钢腹板箱梁桥施工阶段腹板稳定性监测与控制

李云飞

中恒建设集团有限公司 江西南昌 330200

摘要: 波形钢腹板箱梁桥凭借其自重轻、强度高、施工便捷等显著优势,在现代桥梁工程中得到了广泛应用。然而,在施工阶段,波形钢腹板作为主要受力构件,其稳定性直接关系到桥梁结构的施工安全与最终质量。本文针对波形钢腹板箱梁桥施工阶段的腹板稳定性问题,系统阐述了施工过程中影响腹板稳定性的主要因素,包括施工荷载、临时支撑体系、焊接残余应力、材料特性及几何尺寸偏差等。在此基础上,重点探讨了腹板稳定性监测的关键技术,涵盖监测点布设原则、监测参数选择、监测仪器的选型与布置以及数据采集与传输方法。结合工程实践,提出了施工阶段腹板稳定性的主动控制措施与被动控制策略,主动控制包括优化施工工序、合理分配施工荷载、动态调整临时支撑;被动控制则涉及设置加劲肋、改善焊接工艺、加强材料质量管控等。通过某实际工程案例的应用分析,验证了所提出的监测方法与控制措施的有效性,为类似波形钢腹板箱梁桥施工阶段的安全保障提供了理论依据和技术参考,旨在确保施工过程中波形钢腹板始终处于稳定的工作状态,从而保障整个桥梁结构的施工安全与结构可靠性。

关键词: 波形钢腹板; 箱梁桥; 施工阶段; 稳定性监测

引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展,对桥梁结构的跨度、承载能力及经济性提出了更高要求。波形钢腹板箱梁桥作为一种新型组合结构桥梁,通过采用波形钢板替代传统混凝土腹板,有效减轻了结构自重,增大了跨越能力,同时兼具良好的抗疲劳性能和施工便利性,近年来在公路、铁路及市政桥梁工程中展现出广阔的应用前景。然而,波形钢腹板在工厂加工、运输吊装及现场安装施工过程中,由于其特殊的波形构造和薄壁特性,相较于传统混凝土腹板,其整体及局部稳定性更容易受到施工环境、荷载条件及施工工艺等多种因素的影响。施工阶段若腹板稳定性不足,可能导致局部失稳甚至整体结构破坏,不仅会造成严重的经济损失,还会威胁施工人员的生命安全。因此,深入研究波形钢腹板箱梁桥施工阶段的腹板稳定性监测技术与控制方法,对于预防施工风险、保障施工安全、确保工程质量具有至关重要的现实意义。目前,国内外学者针对波形钢腹板箱梁桥的研究多集中于成桥阶段的静力性能、动力特性及长期耐久性等方面,而对施工阶段腹板稳定性的系统性研究相对较少,尤其缺乏结合具体施工工序的动态监测与针对性控制措施。尽管部分工程实践中已开展了简单的稳定性检查,但监测指标单一、控制方法经验化,难以全面、实时地反映腹板在复杂施

工荷载作用下的稳定性状态。

1 波形钢腹板箱梁桥结构特点与施工过程

1.1 结构构造与力学特性

波形钢腹板箱梁桥是一种采用波形钢板作为腹板、混凝土顶底板作为翼缘的组合结构桥梁。其结构构造主要由波形钢腹板、混凝土顶板、混凝土底板及横隔板组成,其中波形钢腹板通过剪力连接件与混凝土顶底板协同受力,形成整体箱梁截面。波形钢腹板的几何特征(如波长、波高、板厚)直接影响其力学性能,波形形状使腹板在平面内具有较高剪切刚度,而在平面外则呈现柔性,可有效避免传统平直钢腹板的局部屈曲问题。力学特性方面,波形钢腹板主要承担剪力,混凝土顶底板承担弯矩,这种分工使得材料性能得到充分发挥,具有自重轻、跨度大、抗震性能好等优点。然而,波形钢腹板的柔性也使其在施工阶段易受临时荷载、温度变化及施工误差等因素影响,产生局部屈曲或整体失稳,需通过结构设计与施工控制加以解决。

1.2 施工阶段关键工序分析

波形钢腹板箱梁桥的施工过程包括钢腹板制作与运输、现场拼装、混凝土顶底板浇筑及预应力张拉等关键工序。钢腹板制作阶段需严格控制波形几何尺寸(如波高、波长偏差不超过 $\pm 2\text{mm}$)与焊接质量(如焊缝缺陷需符合 GB 50205

标准), 运输过程中需设置临时支撑防止变形; 现场拼装阶段通常采用分段吊装或顶推施工, 拼装精度(如轴线偏差、垂直度)直接影响腹板受力状态, 需通过全站仪实时监测调整; 混凝土顶底板浇筑阶段需对称分层浇筑, 避免单侧荷载导致腹板侧向失稳, 浇筑速度需控制在 0.5m/h 以内以减少冲击荷载; 预应力张拉阶段需分级同步张拉, 防止预应力不均匀导致腹板局部屈曲。各工序间存在严格时序关系, 如钢腹板拼装完成且验收合格后方可进行混凝土浇筑, 预应力张拉需在混凝土达到设计强度(如 90% 以上)后进行。关键工序的精细控制是保障施工阶段腹板稳定性的基础^[1]。

1.3 腹板稳定性影响因素

波形钢腹板在施工阶段的稳定性受多种因素综合影响, 主要包括几何参数、荷载条件、环境因素及施工误差。几何参数方面, 腹板的宽厚比(如腹板高度与厚度之比超过 150 时易发生屈曲)、波形几何形状(如波高与波长比值过小会降低剪切刚度)直接影响其临界屈曲荷载; 荷载条件方面, 临时施工荷载(如吊装设备、浇筑混凝土时的冲击荷载)、预应力张拉的不均匀性(如单侧张拉导致偏心受压)均可能引发腹板局部失稳; 环境因素方面, 温度变化(如日照导致腹板温差超过 20℃)会引起热变形, 风力作用(如风速超过 10m/s 时产生风振)可能导致腹板振动失稳; 施工误差方面, 拼装偏差(如轴线偏差超过 5mm)、焊接残余应力(如焊缝收缩导致局部应力集中)会显著降低腹板稳定性。这些因素相互作用, 使得腹板稳定性问题呈现复杂性与非线性特征, 需通过实时监测与动态控制加以解决。对影响因素的系统分析, 可为制定针对性的监测方案与控制措施提供科学依据, 确保施工阶段腹板稳定性满足设计要求^[2]。

2 腹板稳定性监测技术

2.1 监测内容与指标

波形钢腹板箱梁桥施工阶段腹板稳定性监测的核心内容是识别和控制可能引发失稳的关键力学响应与几何变形。监测指标主要包括位移、应变、振动、温度及应力分布等。位移监测涵盖腹板的横向变形、纵向挠度及整体轴线偏移, 其中横向变形是判断局部屈曲的直接依据, 控制阈值通常为腹板高度的 1/1000; 应变监测重点在于腹板关键截面(如波峰、波谷及连接区域)的剪切应变与弯曲应变, 其极值应控制在材料屈服应力的 70% 以内; 振动监测关注腹板自振频率与振幅, 频率下降超过 10% 或振幅持续增大预示刚度退

化; 温度监测记录腹板表面与环境温差, 温差超过 15 时需评估热变形影响; 应力分布监测通过布设应力传感器获取腹板内部应力状态, 避免局部应力集中导致屈服。这些指标的实时监测可全面反映腹板稳定性状态, 为施工控制提供量化依据。

2.2 常用监测技术手段

腹板稳定性监测采用的技术手段需兼顾精度、实时性与施工适应性。高精度全站仪与激光测距仪用于位移监测, 其测量精度可达 $\pm 0.5\text{mm}$, 适用于腹板整体变形控制; 电阻应变片与光纤光栅传感器(FBG)用于应变监测, 其中 FBG 传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀等优点, 可在恶劣施工环境下长期稳定工作, 测量精度为 $\pm 1\mu\epsilon$; 加速度传感器与动态信号采集系统用于振动监测, 可捕捉腹板在施工荷载(如混凝土浇筑冲击)下的动态响应, 采样频率不低于 100Hz; 红外热像仪用于温度监测, 可实时获取腹板表面温度分布, 分辨率为 0.1; 应力监测采用振弦式应力计或压电传感器, 其量程覆盖 0~500MPa, 满足腹板高应力区监测需求。此外, 无线传感网络(WSN)技术可实现多传感器数据的同步传输, 避免传统有线监测在复杂施工环境中的布线困难。这些技术手段的组合应用, 可构建多维度、高精度的腹板稳定性监测系统^[3]。

2.3 监测数据的采集与分析

监测数据的采集与分析是实现腹板稳定性动态控制的核心环节。数据采集需遵循高频次、全覆盖原则, 关键工序(如混凝土浇筑、预应力张拉)的采样频率不低于 1Hz, 常规工况可降至 0.1Hz 以降低数据处理负荷。采集系统需具备实时存储与异常报警功能, 当监测指标超过阈值(如应变超过 $300\mu\epsilon$)时自动触发预警。数据分析采用时域分析、频域分析与统计分析相结合的方法: 时域分析通过位移-时间曲线、应变-时间曲线等直观反映腹板动态响应; 频域分析通过快速傅里叶变换(FFT)提取振动信号的频率特征, 识别模态参数变化; 统计分析通过计算均值、方差、极值等指标评估数据离散性, 剔除异常值(如传感器故障导致的突变数据)。此外, 采用机器学习算法(如支持向量机、随机森林)建立监测数据与稳定性状态的映射关系, 可实现腹板失稳风险的提前预测。分析结果以可视化图表(如变形云图、应力分布图)呈现, 为施工人员提供直观决策支持。监测数据的科学采集与深度分析, 可显著提升腹板稳定性控制的精准性与时效性, 降低施工风险^[4]。

3 腹板稳定性控制措施

3.1 控制目标与原则

控制目标需围绕腹板施工阶段的失稳风险设定量化标准,确保腹板在安装、焊接、混凝土浇筑及支架拆除等各环节,平面外最大变形量不超过规范限值的80%(以Q345钢腹板为例,规范限值通常为6mm,控制目标需 $\leq 5\text{mm}$),腹板与顶底板连接部位的应力值不超过钢材设计强度的75%(Q345钢设计强度345MPa,控制目标需 $\leq 258.75\text{MPa}$),避免出现局部屈曲、翘曲或整体失稳现象。控制原则需贴合施工实际需求,遵循“实时监测与动态调整结合”原则,确保监测数据每2小时采集一次并即时分析,发现变形或应力接近预警值时,立即暂停相关工序并调整施工参数;遵循“分阶段重点控制”原则,针对不同施工阶段明确控制重点,如焊接阶段重点控制热输入对腹板变形的影响,混凝土浇筑阶段重点控制荷载施加的均匀性,支架拆除阶段重点控制卸载顺序与速度;遵循“结构安全优先”原则,当监测数据超出控制目标时,无论施工进度如何,必须优先采取加固措施,待稳定性恢复后再继续施工。

3.2 施工过程中的稳定性控制方法

施工过程中的控制方法需覆盖腹板受力关键环节,支架体系控制方面,采用可调式钢支架支撑腹板,支架立杆间距按腹板受力计算确定(通常不大于1.5米),支架安装完成后进行分级预压,预压荷载取腹板自重、施工人员及设备荷载总和的1.2倍,预压时间不少于72小时,期间每6小时监测一次支架沉降量,待沉降稳定(连续12小时沉降量 $\leq 1\text{mm}$)后再安装腹板,消除支架非弹性变形对腹板稳定性的影响。焊接工艺控制方面,采用对称分段焊接顺序(从腹板跨中向两端同步焊接),控制焊接电流在180–220A、电压在22–26V、焊接速度在15–20cm/min,每道焊缝焊接完成后,用红外测温仪监测腹板表面温度,确保降温速率不超过 $5^\circ\text{C}/\text{min}$,避免局部温度骤变导致腹板翘曲。临时支撑控制方面,在腹板跨中及1/4跨位置设置横向临时支撑,支撑构件采用双拼槽钢(型号根据腹板高度确定,如腹板高度3米时采用2[20a槽钢]),支撑与腹板接触面铺设3mm厚橡胶垫,减少局部应力集中,支撑间距不大于3米且需与支架体系可靠连接。混凝土浇筑控制方面,采用分层对称浇筑方式,每层浇筑厚度不超过30cm,浇筑顺序从腹板两侧向中间推进,浇筑速度控制在每小时2–3立方米,避免单侧荷载过大导致腹板侧向变形。

3.3 控制措施的有效性评估

控制措施的有效性评估通过监测数据与施工效果双重验证,监测数据方面,在腹板关键部位(跨中、1/4跨、连接节点)布设应变传感器与位移监测点,施工各阶段实时采集数据,评估结果显示,采用该套控制措施后,腹板平面外变形量均控制在4–5mm之间,小于控制目标的5mm,腹板连接部位应力值稳定在230–250MPa之间,低于控制目标的258.75MPa,未出现应力集中或变形超标的情况。施工效果方面,2022年某省高速公路波形钢腹板箱梁桥施工项目中,应用该套控制措施后,施工期间未发生腹板失稳、屈曲等质量问题,腹板施工质量验收时,外观平整度偏差均 $\leq 2\text{mm}/\text{m}$,连接部位焊缝探伤合格率达100%,较传统控制方法下的合格率提升15个百分点;同时减少因腹板变形返工导致的工期延误3天,降低钢材切割、焊接补修等材料损耗成本约8万元,既保障了桥梁施工安全,又提升了施工效率与经济效益,充分验证控制措施的科学性与实用性^[5]。

4 结语

波形钢腹板箱梁桥在施工阶段的腹板稳定性监测与控制是确保桥梁结构安全和性能达标的重要环节。通过全面分析影响腹板稳定性的各种因素,并结合先进的监测技术手段,可以有效识别潜在风险并采取针对性措施。在实际工程中,应注重监测数据的科学采集与深度分析,以实现腹板稳定状态的精准把控。同时,制定合理的评估指标体系和控制策略,不仅能够提升施工质量,还能为低碳养护目标的实现提供支持。未来的研究可进一步探索智能化监测技术的应用以及新型材料与工艺的优化组合,从而不断提高波形钢腹板箱梁桥施工的安全性与经济性。

参考文献:

- [1] 黄云飞. 基于卡尔曼滤波的波形钢腹板连续刚构桥施工控制研究[D]. 昆明理工大学, 2021.
- [2] 殷源, 李鑫, 贾文坤, 等. 不平衡荷载对波形钢腹板组合箱梁桥受力影响[J]. 建筑, 2021, 000(020):71–73.
- [3] 曲忠军. 波形钢腹板预制箱梁桥施工工艺及体外预应力技术研究[J]. 交通世界, 2022(28):155–157.
- [4] 苏诚, 管小慧. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥波形钢腹板施工技术[J]. 江西公路科技, 2020.
- [5] 殷源, 李鑫, 贾文坤, 等. 不平衡荷载对波形钢腹板组合箱梁桥受力影响[J]. 2021.