

T型刚构桥悬臂施工线形偏差成因及控制措施分析

姬永彪

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650217

【摘要】: T型刚构桥凭借跨越能力强、结构受力合理等优势,在桥梁工程中应用广泛。悬臂施工是其核心施工工艺,但施工过程中易出现线形偏差,直接影响桥梁外观质量与结构安全性。本文结合工程实践,系统分析T型刚构桥悬臂施工线形偏差的主要成因,涵盖设计参数、材料性能、施工工艺、环境因素及监测误差等方面,针对性提出相应控制措施,包括优化施工组织设计、强化材料质量管控、规范施工工艺操作、加强环境影响应对及完善监测与调整机制等,为同类桥梁施工提供参考,以提升悬臂施工线形控制精度。

【关键词】: T型刚构桥;悬臂施工;线形偏差;成因分析;控制措施

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.046

1 引言

T型刚构桥作为一种常见的大跨径桥梁结构,由桥墩与两侧悬臂梁体构成,具有结构轻盈、受力明确、施工便捷等特点,广泛应用于公路、铁路等交通基础设施建设中。悬臂施工法以其无需大型支架、对桥下交通及地形适应性强等优势,成为T型刚构桥施工的主流方法。该方法通过逐段浇筑或拼装悬臂梁段,逐步形成完整桥体结构,但施工过程具有阶段性、连续性特点,受多种因素影响,梁体线形易出现偏差。若偏差超出允许范围,不仅会导致桥梁外观不平整,还可能改变结构受力状态,增加结构应力集中风险,降低桥梁使用寿命,甚至引发安全事故。因此,深入剖析T型刚构桥悬臂施工线形偏差的成因,采取科学有效的控制措施,确保梁体线形符合设计要求,是桥梁施工质量控制的关键环节。本文基于多年桥梁施工经验,结合具体工程案例,对这一问题展开详细分析与探讨。

2 T型刚构桥悬臂施工线形偏差主要成因

T型刚构桥悬臂施工线形偏差的形成是多因素综合作用的结果,贯穿施工全过程。通过对多个工程案例的调研与分析,将其主要成因归纳为以下几个方面。

2.1 设计与计算因素

设计参数选取与计算精度直接影响施工线形控制基准。部分设计过程中,未充分考虑施工阶段的临时荷载,如挂篮自重、施工人员及设备重量、混凝土浇筑冲击力等,导致设计线形与实际施工线形存在偏差。同时,结构计算模型简化不合理,未准确模拟梁体节段浇筑过程中的应力应变变化、挂篮变形等关键环节,计算结果与实际工况存在差异,进而导致施工指导数据不准确。此外,设计图纸中对预拱度设置不合理,未充分结合桥梁跨径、自重、二期恒载及使用阶段的收缩徐变等因素,也会引发后期梁体线形偏差。

2.2 材料性能因素

混凝土与钢材是T型刚构桥的核心材料,其性能波动会直接影响梁体线形。混凝土方面,水泥、骨料、外加剂等原材料

质量不稳定,配合比设计不合理,会导致混凝土强度、弹性模量等指标不符合设计要求。混凝土浇筑后,若养护措施不到位,温湿度控制不当,会加剧混凝土收缩徐变。收缩徐变是混凝土的固有特性,在悬臂施工中,梁体节段逐段形成,各节段收缩徐变程度不同,会导致梁体产生不均匀变形,引发线形偏差。钢材方面,预应力筋的弹性模量、松弛率等指标超标,会导致预应力施加效果不佳,梁体无法获得预期的预压应力,进而产生上拱或下挠偏差;普通钢筋的材质不合格,也会影响梁体结构的承载能力与变形稳定性。

2.3 施工工艺因素

施工工艺是影响悬臂施工线形的最直接因素,涵盖挂篮施工、混凝土浇筑、预应力施加等多个关键环节。

挂篮作为悬臂施工的核心设备,其性能与安装精度至关重要。挂篮设计不合理,刚度不足或稳定性差,在施工荷载作用下会产生过大变形;挂篮拼装过程中,轨道铺设不平整、锚固不牢固,挂篮定位偏差超出允许范围,会直接导致梁体节段浇筑位置偏移。此外,挂篮行走过程中,同步性控制不佳,两侧挂篮行走速度不一致,会引发梁体横向或竖向线形偏差。

混凝土浇筑工艺不当也会造成线形偏差。浇筑顺序不合理,未遵循对称浇筑原则,会导致梁体两侧受力不均,产生不均匀变形;浇筑速度过快,会使混凝土对模板产生过大侧压力,引发模板变形;混凝土振捣不密实,存在蜂窝、麻面等质量缺陷,会降低梁体局部刚度,导致后期变形不均。

预应力施加环节是控制梁体线形的关键。预应力筋张拉前,若未进行精准的张拉设备校准,会导致张拉应力偏差;张拉过程中,未严格按照对称、分级张拉原则操作,会使梁体受到不均匀预应力作用,产生扭曲或弯曲变形;张拉完成后,锚具锚固效果不佳,出现预应力损失,会导致梁体上拱度不足,引发下挠偏差。此外,孔道压浆不饱满,会导致预应力筋锈蚀,影响结构长期稳定性,进一步加剧线形偏差。

2.4 环境因素

施工环境的变化会对 T 型刚构桥悬臂施工线形产生显著影响。温度变化是最主要的环境因素，昼夜温差、季节温差会导致梁体材料热胀冷缩。在悬臂施工中，梁体节段处于外露状态，温度变化会使梁体产生伸缩变形，若施工过程中未充分考虑温度影响，未在适宜温度下进行节段定位与浇筑，会导致温度应力残留，后期温度稳定后引发线形偏差。此外，风力、降雨等天气因素也会影响施工精度，强风会导致挂篮及未浇筑完成的梁体产生晃动，影响节段定位；降雨会改变混凝土含水量，影响混凝土强度与收缩徐变特性，进而间接影响梁体线形。

2.5 监测与控制因素

施工监测是保障悬臂施工线形精度的重要手段，监测数据的准确性与及时性直接影响控制效果。若监测设备精度不足，如全站仪、水准仪等仪器未定期校准，会导致监测数据存在误差；监测点布置不合理，未覆盖梁体关键截面与部位，无法全面反映梁体线形变化情况；监测频率不足，未能及时捕捉梁体变形动态，会导致偏差发现不及时，无法及时采取调整措施。此外，监测数据处理方法不当，未考虑施工荷载、环境温度等因素对监测结果的影响，会导致数据解读偏差，进而影响施工调整决策的科学性。

3 T 型刚构桥悬臂施工线形偏差控制措施

针对上述线形偏差成因，结合工程实践经验，从设计优化、材料管控、工艺规范、环境应对及监测强化等方面，提出以下针对性控制措施。

3.1 优化设计与计算方案

完善设计参数选取，充分考虑施工阶段的各类临时荷载，包括挂篮自重、施工人员及设备重量、混凝土浇筑冲击荷载等，确保设计线形与实际施工工况相匹配。优化结构计算模型，采用精细化计算方法，准确模拟梁体节段浇筑、挂篮变形、预应力施加等全过程，提高计算结果的准确性。科学设置预拱度，结合桥梁跨径、结构自重、二期恒载及混凝土收缩徐变等因素，通过专项计算确定合理的预拱度值，并在施工过程中根据实际监测数据进行动态调整。此外，设计阶段应加强对施工方案的交底与沟通，确保施工单位充分理解设计意图，为线形控制奠定基础。

3.2 强化材料质量与性能管控

严格把控原材料质量，建立完善的原材料进场检验制度，对水泥、骨料、外加剂、预应力筋、锚具等原材料进行严格检测，确保其各项性能指标符合设计与规范要求。优化混凝土配合比设计，根据工程实际工况，通过试验确定合理的配合比，在满足强度要求的前提下，尽量减少水泥用量，降低混凝土收缩徐变风险。加强混凝土养护管理，浇筑完成后及时覆盖保湿，根据环境温度调整养护措施，控制养护温湿度，延长养护时间，

减少混凝土收缩徐变。对于预应力筋，严格按照规范要求进行存放与加工，张拉前对张拉设备进行精准校准，确保预应力施加精度；张拉完成后，及时进行孔道压浆，采用真空压浆工艺，确保压浆饱满，防止预应力损失。

3.3 规范施工工艺操作

3.3.1 挂篮施工控制

挂篮设计阶段，确保其具有足够的刚度、强度与稳定性，通过专项计算与试验验证挂篮性能；挂篮拼装过程中，严格按照拼装方案操作，精准控制轨道铺设精度与挂篮定位偏差，拼装完成后进行荷载试验，检验挂篮变形情况，并根据试验结果进行预压调整，消除非弹性变形。挂篮行走时，采用同步控制系统，确保两侧挂篮行走速度一致，行走完成后及时进行锚固与定位复核，确保挂篮位置准确。

3.3.2 混凝土浇筑控制

严格遵循对称浇筑原则，控制两侧梁体节段浇筑进度与混凝土用量偏差，避免梁体受力不均；合理控制浇筑速度，避免混凝土对模板产生过大侧压力；加强混凝土振捣管理，采用插入式振捣器分层振捣，确保混凝土密实，同时避免过度振捣引发骨料离析。浇筑过程中，实时监测模板变形情况，若发现变形超出允许范围，及时采取调整措施。

3.3.3 预应力施加控制

制定科学的预应力张拉方案，严格按照对称、分级张拉原则操作，控制张拉速度与应力增量，确保张拉过程平稳；张拉过程中，实时监测梁体变形与应力变化，根据监测数据调整张拉参数；张拉完成后，及时检查锚具锚固情况，确保锚固可靠。加强孔道压浆质量控制，严格控制压浆材料配合比与压浆压力，确保孔道内无空隙，提高预应力筋的防腐性能与结构稳定性。

3.4 加强环境影响应对

建立环境监测机制，实时监测施工区域的温度、风力、降雨等环境参数，为施工决策提供依据。针对温度变化影响，合理安排施工时间，尽量选择温度稳定的时段进行梁体节段定位、浇筑与预应力张拉；在梁体节段浇筑完成后，及时采取保温隔热措施，减少昼夜温差对梁体的影响；对于大跨径桥梁，可在设计与施工中考虑温度应力补偿措施，降低温度变化引发的线形偏差。遇到强风、暴雨等恶劣天气时，暂停室外高空作业，待天气好转后，对挂篮及梁体位置进行复核，确认无误后再恢复施工。

3.5 完善监测与动态调整机制

建立精细化施工监测体系，合理布置监测点，覆盖梁体悬臂端、跨中、桥墩等关键部位，监测内容包括梁体竖向位移、横向位移、应力应变及挂篮变形等。选用高精度监测设备，并

定期进行校准,确保监测数据准确可靠;提高监测频率,尤其是在节段浇筑、预应力张拉、挂篮行走等关键工序前后,必须进行监测数据采集与分析。建立监测数据处理与反馈机制,采用专业数据处理软件,剔除异常数据,结合施工荷载、环境温度等因素,对监测数据进行深入分析,及时掌握梁体线形变化趋势。若发现线形偏差超出允许范围,立即分析偏差成因,采取针对性调整措施,如调整挂篮定位、优化预应力张拉参数、增设临时支撑等,实现线形动态控制。

表1 T型刚构桥悬臂施工线形监测项目及控制标准

监测项目	监测部位	监测频率	控制标准 (mm)	监测方法
竖向位移	悬臂端、跨中、节段接缝处	节段浇筑前后、张拉前后、每日1次	±10	水准仪、全站仪
横向位移	悬臂端、梁体两侧边缘	节段浇筑前后、张拉前后、每日1次	±5	全站仪
应力应变	梁体腹板、顶板、底板关键截面	节段浇筑前后、张拉前后、每周2次	不超过设计应力的±5%	应变计、应力传感器
挂篮变形	挂篮主桁、底模平台	拼装完成后、预压过程中、行走前后	≤L/4000 (L为挂篮跨度)	水准仪、全站仪

4 工程案例

某高速公路T型刚构桥,主跨径为120m,采用悬臂浇筑施工工艺。施工至第8节段时,监测发现梁体悬臂端竖向位移偏差达18mm,超出控制标准。为解决这一问题,施工单位组织技术人员对偏差成因进行深入分析。通过排查,确定偏差主

要成因包括:挂篮刚度不足,在施工荷载作用下产生过大弹性变形;混凝土养护不到位,收缩徐变加剧;预应力张拉设备未及时校准,张拉应力不足。

针对上述成因,采取以下控制措施:对挂篮进行加固处理,增加主桁杆件截面尺寸,提高挂篮刚度;优化混凝土养护方案,采用覆盖土工布洒水保湿+塑料薄膜密封的养护方式,延长养护时间至14天;对张拉设备进行重新校准,更换老化的张拉千斤顶与压力表,严格按照对称分级张拉原则重新进行预应力施加;加强施工监测,增加监测频率至每8小时1次,实时掌握梁体线形变化。通过上述措施,后续施工中梁体线形偏差得到有效控制,最终桥梁竣工时,梁体线形符合设计与规范要求,外观质量与结构性能良好。

5 结论与展望

T型刚构桥悬臂施工线形偏差成因复杂,涉及设计、材料、施工、环境及监测等多个方面,任一环节出现问题都可能导致线形偏差。因此,在实际施工中,需树立全过程、全方位的质量控制理念,通过优化设计与计算方案、强化材料质量管控、规范施工工艺操作、加强环境影响应对及完善监测与动态调整机制等综合措施,有效控制线形偏差。随着桥梁施工技术的不断发展,智能化监测与控制技术在桥梁工程中的应用日益广泛。未来,可进一步将BIM技术、物联网技术、大数据分析等融入T型刚构桥悬臂施工线形控制中,实现施工过程的智能化监测、精准化控制与信息化管理,大幅提升线形控制精度与施工效率,推动T型刚构桥施工技术向更高质量、更高效益方向发展。

参考文献:

- [1] 黄超.“T”型悬臂盖梁钢结构门式支架设计与施工[J].城市道桥与防洪,2017,(05):195-198+19.
- [2] 李莉,林杉杉,王军,等.基于涡致振动的T型悬臂梁压电俘能结构的仿真与实验研究[J].仪表技术与传感器,2021,(07):32-37.
- [3] 贾瑞华,胡志坚,安艳娜,等.考虑转角-曲率弯矩面积法的大悬臂PC梁简化分析方法[J].交通科技与经济,2026,28(01):55-61.