

桥梁工程中大跨度波形钢腹板连续箱梁施工技术

文 / 栾江伟 中建八局轨道交通建设有限公司

摘要：大跨度波形钢腹板连续箱梁作为现代桥梁工程的重要结构形式，其施工技术创新直接关系到工程质量和建设效率。波形钢腹板的应用显著减轻了结构自重，提高了跨越能力，同时兼具良好的抗震性能和经济效益。在施工过程中，钢腹板预制精度控制、节段吊装工艺优化以及混凝土顶底板浇筑质量控制构成技术体系的核心要素。随着装配式建造技术的发展，模块化施工方案大幅提升了现场作业效率，而BIM技术的深度应用则为全过程可视化管控提供了有力支撑，代表桥梁建设向轻型化、工业化方向发展的重要实践。

关键词：桥梁工程；大跨度波形钢腹板；连续箱梁施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.066

引言

波形钢腹板连续箱梁结构通过创新的构造设计，实现了材料性能与结构效能的协同优化。钢-混组合结构特有的力学特性，使该桥型在200米以上跨径范围内展现出显著技术优势。施工中采用的工厂化预制、现场拼装工艺，不仅降低了对周边环境的干扰，更通过标准化生产确保了构件加工精度。关键节点部位的连接技术突破，有效解决了钢混界面应力传递难题，而智能化监测系统的应用则实现了施工过程的实时力学响应追踪，推动了桥梁工程建造模式的转型升级。

一、桥梁工程中大跨度波形钢腹板连续箱梁施工技术概述

（一）大跨度波形钢腹板连续箱梁结构特点

大跨度波形钢腹板连续箱梁采用钢-混凝土组合结构，波形钢腹板通过特殊轧制工艺形成周期性波状构造，有效提升腹板抗剪刚度和稳定性。箱形截面提供优异的抗扭性能，顶底板采用高性能混凝土保证受压区承载力。结构自重较传统混凝土箱梁显著降低，跨中弯矩减小使得跨越能力提升。波形构造增大了钢腹板与混凝土翼缘板的接触面积，改善界面剪力传递效率。连续箱梁体系通过合理设置支座位置，优化结构内力分布，减少跨中挠度。钢腹板工厂预制确保几何精度，标准化连接节点设计便于现场快速拼装。结构整体具有良好的疲劳性能和耐久性，适应复杂环境条件下的长期使用需求。



图1 大跨度波形钢腹板连续箱梁结构

（二）施工技术在桥梁工程中的应用优势

该施工技术实现工厂预制与现场装配的有机结合，大幅缩短现场作业周期。波形钢腹板轻量化特性降低吊装设备要求，减少临时支撑用量。模块化施工方法提高工程组织效率，各工序可平行作业加快进度。BIM技术指导全过程施工模拟，提前发现并解决潜在冲突问题。自动化监测系统实时跟踪结构变形，确保成桥线形符合设计要求。标准化连接构造简化现场焊接作业，提升节点施工质量可靠性。环境友好型工艺减少建筑垃圾产生，降低施工对周边生态影响。钢混组合结构充分发挥材料性能优势，实现结构轻量化与经济性的平衡。

二、大跨度波形钢腹板连续箱梁施工准备工作

（一）施工场地规划与布置

施工场地规划需综合考虑构件堆放区、预制加工区、吊装作业区的合理布局。场地硬化处理满足重型设备行走要求，承载力经检测符合标准。临时道路网络确保运输车辆通达各作业区域，转弯半径满足长构件运输。预制场设置标准化胎架系统，保证钢腹板组拼几何精度。龙门吊轨道基础预埋精度控制在±2mm内，确保吊装作业平稳性。临时用电系统按三级配电标准布置，满足大型设备同时运转需求。排水系统设计考虑暴雨工况，避免场地积水影响施工。安全防护区设置硬质围挡，危险作业区域实施封闭管理。环保措施包括扬尘控制、噪声隔离和油污收集系统，符合绿色施工标准。

（二）施工材料的选择与检验

波形钢腹板采用高强度耐候钢板，出厂前进行超声波探伤检测。高强螺栓连接副抽样进行楔负载试验，保证预紧力稳定性。焊材选用低氢型药芯焊丝，烘焙制度严格执行工艺要求。混凝土原材料进行碱活性检测，粗骨料压碎值不大于12%。减水剂与水泥适应性试验确定最佳掺量，保证工作性能。钢筋机械连接件进行型式检验，现场抽样做抗拉强度测试。防腐涂料配套体系通过2000小时盐雾试验，确保耐久年限。支座预埋钢板进行喷砂

除锈处理，粗糙度达到 Sa2.5 级。所有进场材料建立可追溯台账，检测报告与实物标识对应。

(三) 施工设备的选型与调试

液压提升系统根据最大节段重量选择，安全系数不小于 2.5。架桥机进行空载、静载和动载试验，验证结构安全性。自动焊机参数经工艺评定确定，首件焊接进行 UT 检测。混凝土泵送设备压力损失计算准确，保证顶板浇筑连续性。全站仪进行计量检定，平面定位精度达到 1" 级。液压千斤顶配套压力传感器，同步顶升误差控制在 2mm 内。高空作业平台设置双重防坠系统，验收合格后投入使用。张拉设备与压力表配套标定，力值误差不超过 ±1%。所有设备建立运行维护档案，关键部位每日点检记录。

三、大跨度波形钢腹板连续箱梁具体施工工艺

施工项目	具体要求
钻孔灌注桩	桩径 1.5-2.5m，桩长 40-80m（依地质定），成孔垂直度偏差 ≤ 1/200，孔底沉渣厚度 < 50mm
承台	钢筋保护层厚度 50mm，主筋间距误差 ±10mm 内
墩身模板安装	垂直度偏差 ≤ H/1000 且 ≤ 20mm（H 为墩身高度）
混凝土浇筑	分层厚度 300-500mm，振捣棒插入间距 ≤ 400mm
墩顶支座垫石	标高误差 ±2mm 内，四角高差 ≤ 1mm
临时支墩预压	荷载为设计荷载 1.2 倍，预压时间 ≥ 72 小时
沉降观测	观测点间距 ≤ 15m，每施工阶段至少监测 1 次
过渡墩预应力锚固区	钢筋净距 ≥ 30mm，混凝土粗骨料粒径 ≤ 20mm
墩身养护	时间 ≥ 14 天，环境温度 < 5℃ 时保温

表 1 基础施工与下部结构建造

(二) 波形钢腹板的制作与安装

钢腹板下料采用 12-20mm 厚钢板，数控切割精度控制在 ±1mm/m。单元板件组拼长度偏差不超过 ±2mm，对角线差不超过 3mm。波形压制后波纹高度为 160-300mm，波长误差控制在 ±5mm 内。防腐涂层总厚度不小于 200 μm，局部最小厚度不低于 180 μm。节段运输支架间距不大于 8m，运输速度限制在 40km/h 以下。吊装时起吊角度控制在 60° -80° 范围，就位偏差不超过 ±5mm。节段对接错边量不大于板厚的 10% 且不超过 2mm。高强螺栓初拧扭矩为终拧扭矩的 50%，终拧扭矩偏差不超过 ±5%。焊接预热温度不低于 120℃，层间温度不超过 230℃。安装完成后轴线偏差不超过 L/5000（L 为跨径），且不大于 10mm。

(三) 混凝土箱梁的浇筑与养护

箱梁模板平整度偏差不超过 3mm/2m，拼缝高差不大于 1mm。钢筋保护层厚度为 30mm，允许偏差为 +10mm/-5mm。预应力管道定位偏差不超过 ±5mm，固定间距不大于 500mm。混凝土坍落度控制在 180-220mm 范围，初凝时间不少于 8 小时。顶板浇筑分层厚度为 300-400mm，振捣时间控制在 20-30 秒。锚固区混凝土粗骨料粒径不大于 15mm，含气量控制在 3-5%。养护期间内部温度不超过 65℃，降温速率小于 2℃ /h。喷淋养护水压保持在 0.3-0.5MPa，间隔时间不超过 2 小时。拆模时混凝土强度不低于设计强度的 90%，且不少于 40MPa。孔道压浆水

(一) 基础施工与下部结构建造

基础施工采用钻孔灌注桩工艺，桩径通常为 1.5-2.5m，桩长根据地质条件控制在 40-80m 范围。成孔垂直度偏差不超过 1/200，孔底沉渣厚度小于 50mm。承台钢筋保护层厚度为 50mm，主筋间距误差控制在 ±10mm 内。墩身模板安装垂直度偏差不超过 H/1000 且不大于 20mm（H 为墩身高度）。混凝土浇筑分层厚度控制在 300-500mm，振捣棒插入间距不超过 400mm。墩顶支座垫石标高误差控制在 ±2mm 内，四角高差不超过 1mm。临时支墩预压荷载为设计荷载的 1.2 倍，预压时间不少于 72 小时。沉降观测点间距不大于 15m，监测频率为每施工阶段至少 1 次。过渡墩预应力锚固区钢筋净距不小于 30mm，混凝土粗骨料粒径不大于 20mm。墩身养护时间不少于 14 天，环境温度低于 5℃ 时采取保温措施。

胶比不超过 0.33，7 天强度不低于 35MPa。

施工环节	具体内容	参数要求
钢腹板下料	钢板厚度	12-20mm
	数控切割精度	±1mm/m
单元板件组拼	长度偏差	±2mm
	对角线差	不超过 3mm
波形压制	波纹高度	160-300mm
	波长误差	±5mm 内
防腐涂层	总厚度	不小于 200 μm
	局部最小厚度	不低于 180 μm
节段运输	支架间距	不大于 8m
	运输速度	40km/h 以下
吊装	起吊角度	60° -80°
	就位偏差	±5mm
节段对接	错边量	不大于板厚的 10% 且不超过 2mm
高强螺栓	初拧扭矩	终拧扭矩的 50%
	终拧扭矩偏差	±5%
焊接	预热温度	不低于 120℃
	层间温度	不超过 230℃
安装完成	轴线偏差	不超过 L/5000（L 为跨径）且不大于 10mm

图 2 波形钢腹板的制作与安装

施工环节	具体内容	参数要求
箱梁模板	平整度偏差	不超过 3mm/2m
	拼缝高差	小于 1mm
钢筋	保护层厚度	30mm, 允许偏差 +10mm/-5mm
预应力管道	定位偏差	不超过 ±5mm
	固定间距	不大于 500mm
混凝土	坍落度	180-220mm
	初凝时间	不少于 8 小时
顶板浇筑	分层厚度	300-400mm
	振捣时间	20-30 秒
锚固区混凝土	粗骨料粒径	不大于 15mm
	含气量	3-5%
养护	内部温度	不超过 65℃
	降温速率	小于 2℃ /h
	喷淋养护水压	0.3-0.5MPa
拆模	喷淋间隔时间	不超过 2 小时
	混凝土强度	不低于设计强度 90% 且不少于 40MPa
孔道压浆	水胶比	不超过 0.33
	7 天强度	不低于 35MPa

表 3 混凝土箱梁的浇筑与养护

(四) 预应力施工与体系转换

预应力钢绞线标准强度为 1860MPa，弹性模量控制在 195±10GPa。张拉控制应力为 0.75f_{pk}，超张拉不超过 0.8f_{pk}。伸长值偏差控制在 -5% ~ +10% 范围，每束钢绞线断丝不超过 1 丝。临时锚固采用 3 孔工具锚，夹片回缩量不超过 6mm。压浆料流动度 30-50 秒，24 小时自由泌水率不超过 1%。体系转换顶升速度为 5-10mm/min，同步误差小于 1mm。落梁分 3-5 级进行，每级下落量控制在 5-10mm。支座调平垫石标高误差不超过 ±1mm，四角高差小于 0.5mm。最终张拉补足应力损失不超过 5%，锚具变形控制在 6mm 内。成桥后预应力管道压浆密实度检测合格率不低于 95%。

四、大跨度波形钢腹板连续箱梁施工质量控制与安全管理

(一) 施工质量控制要点与标准

原材料进场实行见证取样制度，检测报告与实物批号对应。钢腹板几何尺寸检测采用激光跟踪仪，波形轮廓度偏差不超过 2mm。焊接工艺评定覆盖所有接头形式，焊工资质与施焊项目匹配。高强螺栓连接副储存条件符合规范，安装前进行扭矩系数复验。混凝土浇筑过程实施坍落度抽检，每工作班不少于 3 次。预应力管道坐标采用三维坐标放样，定位钢筋间距不大于 50cm。张拉力值记录精确至小数点后一位，伸长率偏差控制在 ±6% 内。压浆密实度采用雷达扫描检测，发现缺陷及时补灌。成桥线形测量选择温度稳定时段进行，消除日照温差影响。质量验收执行三检制度，关键工序留存影像资料。

(二) 施工现场安全管理制度

建立安全生产责任制，项目经理为第一责任人落实

带班检查。危险作业实施许可审批，高处作业设置生命线防坠系统。临时用电执行三级配电标准，电工每日巡检记录绝缘电阻。起重设备安装验收资料归档，吊装作业划定警戒区域。有限空间作业实施气体检测，配备强制通风设备。动火作业清除周边可燃物，配置专职看火人及灭火器材。安全防护用品实行进场验收，高空作业人员佩戴双钩安全带。每日晨会进行安全交底，新进场人员完成三级教育。安全巡查采用手机 APP 记录，隐患整改闭环管理。

(三) 安全事故应急处理预案

成立应急指挥小组，明确各岗位职责和响应程序。建立医疗救护绿色通道，工地配备急救药箱和担架。高处坠落事故立即启动救援，避免二次伤害发生。触电事故首先切断电源，使用绝缘器材移开带电体。火灾事故启动初期灭火，疏散人员至上风安全区域。坍塌事故划定危险区域，采用生命探测仪搜救。食物中毒封存可疑食品，及时送医保留呕吐物样本。交通事故保护现场，配合交警调查取证。应急物资每月检查维护，药品定期更换。事后召开分析会，完善预防措施。信息报送严格执行时限要求，不得迟报瞒报。

结语

大跨度波形钢腹板连续箱梁施工技术的成熟应用，标志着我国桥梁建造水平迈上新台阶。该技术体系通过材料创新、工艺革新和智能管控的有机融合，不仅提升了工程质量和施工效率，更拓展了大跨径桥梁的结构选型空间。未来随着新材料研发和数字孪生技术的发展，该技术将在精度控制、环境适应性和全寿命周期管理等方面持续优化，为交通基础设施建设提供更安全、更经济、更环保的解决方案，推动桥梁工程领域的技术进步和产业升级。

参考文献

[1] 戚国骥. 大跨度波形钢腹板预应力混凝土连续箱梁桥施工质量控制 [J]. 质量与市场, 2021, (05): 53-54.
 [2] 戴世宏. 波形钢腹板组合连续箱梁桥与 PC 连续箱梁桥的力学性能对比分析 [D]. 东南大学, 2018.
 [3] 程平. 横隔板对大跨度变截面波形钢腹板连续箱梁桥受力性能的影响研究 [D]. 华东交通大学, 2018.
 [4] 吴薇. 大跨度单箱双室波形钢腹板连续组合箱梁桥设计 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2018, 27(01): 7-11.
 [5] 邓朝辉, 张东. 大跨度宽幅波形钢腹板组合连续箱梁 0 号块支架设计 [J]. 施工技术, 2018, 46(S2): 933-935.
 [6] 刘旭政, 程坤, 陈晔, 等. 大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁桥剪力滞效应研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2018, 33(05): 855-862.
 [7] 程坤. 大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁有效分布宽度研究 [D]. 华东交通大学, 2018.