

大跨度波形钢腹板箱型组合梁桥施工关键技术研究

彭昊

湖北交投建设集团有限公司路面分公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8312

[摘要] 波形钢腹板箱型组合梁在桥梁建筑工程中具有显著优势，可以用 10–30mm 的波形钢板取代传统的 30–80cm 厚度的混凝土腹板，更好的减轻桥梁的自重。波形钢腹板箱型组合自引入我国以后，以其自重较轻、材料利用率较高等优势，其应用也愈发广泛。研究以“花马湖特大桥”施工项目为背景，结合花马湖特大桥的施工方案，对大跨度波形钢腹板箱型组合梁施工活动展开研究，重点介绍了花马湖特大桥的波形钢腹板构造，并结合大跨度波形钢腹板箱型组合梁施工技术展开研究分析，最后提出波形钢腹板组合梁施工的建议，旨在为类似工程提供参考意见。

[关键词] 大跨度；波形钢腹板箱型组合梁；梁施工技术

Research on Key Construction Technologies for Large Span Corrugated Steel Web Box Composite Beam Bridges

Peng Hao

Hubei Jiaotou Construction Group Co., Ltd. Road Branch

[Abstract] Boyi's steel web box composite beam has significant advantages in bridge construction engineering. It can replace the traditional 30–80cm thick concrete web with 10–30mm corrugated steel plates, which better reduces the weight of the bridge. Since its introduction into China, the box type combination of corrugated steel belly plates has become increasingly widely used due to its advantages of light weight and high material utilization rate. Based on the construction project of the "Huamahu Extra Large Bridge" and combined with the construction plan of the Huamahu Extra Large Bridge, this study focuses on the construction activities of large-span corrugated steel belly plate box type composite beams. The structure of the corrugated steel belly plate of the Huamahu Extra Large Bridge is introduced, and the construction technology of large-span corrugated steel belly plate box type composite beams is analyzed. Finally, suggestions for the construction of corrugated steel belly plate composite beams are proposed, aiming to provide reference opinions for similar projects.

[Key words] large span; Box type composite beam with corrugated steel belly plate; Beam construction technology

一、引言

花马湖特大桥是鄂州市重点交通项目纵三线黄鄂黄快速通道鄂州段 EPC 工程总承包项目中的控制性工程，桥梁全长 778 米，中跨 180 米，边跨 115 米^[1]。全桥布置图见下图 1：

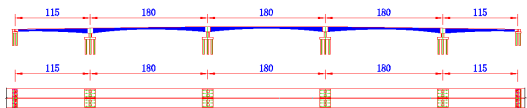


图1 花马湖特大桥全桥布置图（单位：m）

项目起点起于燕矶长江大桥（鄂州-黄冈界），利用燕矶长江大桥下层，向南先、后上跨鄂东大道、吴楚大道、吴都大道，于吴都大道设置部分互通，继续向南接入燕花路，与走马湖东路、机场南路设置十字灯控平交，项目大桥横跨花马湖，并与规划的业北路形成交叉式态；沿着华山大道延伸，最后终点位于迎宾大道。本标段路线长 8.707km，采用 4/6 车道，设计时速 60km/h。

传统混凝土箱梁在大跨度场景下自重大、开裂风险高的问题，而纯钢箱梁则面临成本高、耐久性不足的缺陷。波形钢腹板箱型组合梁通过材料优势互补，兼具轻量化、抗震性好及施工快捷的特点，尤其适合花马湖特大桥这类跨越国家级水产种质资源保护区的快速化施工需求。主要保护花马湖原产花骨鱼及其他水生生物，以及赖以生存的湖泊湿地生态系统。本研究以花马湖特大桥施工工程为例，对波形大跨度波形钢腹板箱型组合梁施工关键技术展开研究，探讨了具体的技术实施方案。

二、花马湖特大桥施工方案

总体施工工艺流程：桩基础施工→承台施工→墩柱施工→施工安装支架浇注主梁 0#、1#梁段→安装桥面吊机→对称悬臂拼装 2~17#梁段→搭设支架进行边跨梁端梁段、22#梁段现浇→边跨合龙段吊装合龙→次中跨合龙段吊装合龙→中跨合龙段吊装合龙。

首先在花马湖上搭设钢栈桥（主栈桥、支栈桥）及桩基钻孔平台进行钻孔灌注桩施工，钢栈桥钢管桩采用 80t 汽车吊配合 YZ-110D 振动锤插打施工，分配梁、贝雷片和桥面钢板统一采用 80t 汽车吊钓鱼法配合安装，其中行车道板采用四点起吊、平稳落放方式进行铺设。钢管桩逐墩往前插打，钢栈桥逐段往前接长。按先架设栈桥，后架设施工平台，最后打主桥桥墩钻孔桩钢护筒的顺序施工。

桩基施工完成后拆除钻孔平台，进行水上钢围堰施工，抽水开挖后进行承台、墩柱施工。下构施工完成后，在主墩旁搭设墩旁支架，并在其上浇筑 0 号块、1#节段，其余预制块件（除合龙段及边跨段外）均采用悬臂拼装法对称施工，并张拉各阶段预应力钢束，直至最大悬臂；然后按先边跨后中跨的顺序依次合龙；最后进行桥面系施工。

其中 1~4#节段腹板、底板，5~6#节段底板均采用创新性的钢纤维高性能混凝土（UHPC）后浇施工方案，该方案在材料配比、生产工艺和施工工艺等方面均具有显著技术特点。钢纤维混凝土容重 2500kg/m³，材料配比包含水泥、石英砂、核心掺和料（粉煤灰、硅灰及专利材料）、钢纤维等组分，裸料成本控制在 9000~10000 元/m³。生产工艺采用常规商混站 180 型搅拌机，单次搅拌量 2m³，完整搅拌周期 9 分钟，其中钢纤维采用后掺工艺。混凝土工作性能指标突出，扩展度 550~600mm（大流态达 700mm 以上），出机坍落度 260mm，初凝 8 小时，终凝 13 小时。施工工艺要求采用附着式振捣器轻微振捣 5 秒，避免

钢纤维沉降，但需注意钢纤维含量会影响表面收光效果。养护方案根据季节动态调整，夏季自然养护 8 小时可脱模，冬季采用 60℃蒸汽养护 8~10 小时。针对混凝土高粘性特点（水胶比 0.17），采用移动式拌合机现场拌合，并考虑运输损耗（每车约 800kg）。该方案通过优化配合比和施工参数，在保证结构性能的同时，实现了施工效率与经济性的平衡。

三、花马湖特大桥波形钢腹板箱型组合梁的构造

花马湖特大桥的波形钢腹板箱型组合梁主梁采用单箱双室截面，板宽 18.5m，翼缘悬臂长 3.25m，箱室底宽 12.0m，顶板设 2%横坡。单个梁段由上翼缘板、腹板、底板、底板加劲肋、横隔板及剪力键等组成。根据结构受力特点并兼顾施工便捷性，标准节段分为 4.5m 和 5.4m 两种。

腹板采用 1800 型波形钢板，材料为 Q420qD 钢，通过模压法成形，水平段长 480mm，斜段长 484mm，斜段水平投影 420mm，波高 240mm，弯折半径不小于 15 倍板厚[3]。这种波形设计能够有效提高腹板的抗剪稳定性，同时减轻结构自重。模压成形工艺确保波形钢腹板的尺寸精度和表面质量，提高结构整体性和耐久性。

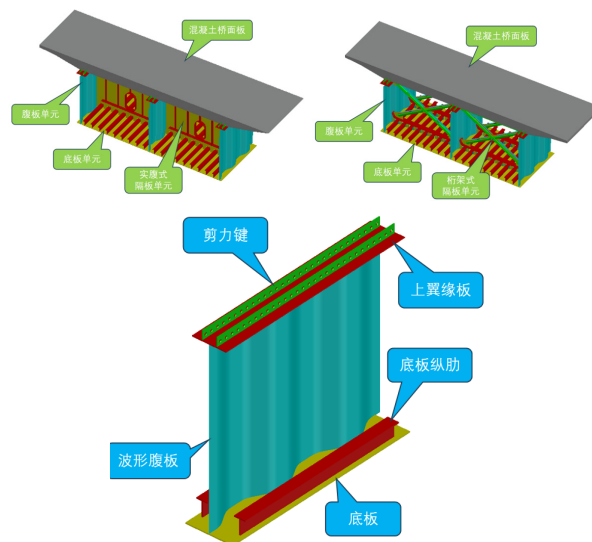


图2 花马湖特大桥主梁截面构造图

四、大跨度波形钢腹板箱型组合梁施工关键技术

（一）预制梁场规划

花马湖特大桥采用 (115+3×180+115)m 的连续梁桥跨布置，分左右两幅同步施工。根据施工组织设计，主桥 2~17#节段及跨中合龙段 18#采用预制悬臂拼装工艺，总计需预制梁段 266 片（计算式：2 幅×16 片/跨×8 跨+10 合龙段=266 片）。为确保工期目标，主梁架设需在 7 个月内完成，这对梁场产能提出严格要求。梁场规划需设置三大功能区：钢梁制造区配备数控切割和自动焊接生产线，确保日产能≥1.2 片；梁板叠合区配置 200 吨级龙门吊和液压模板系统，实现混凝土浇筑与钢梁组装的流水作业；存梁区采用立体堆存方式，容量不少于 16

片梁的周转需求。场地布置遵循“工艺紧凑、物流顺畅”原则，通过 BIM 技术优化设备站位和物料流转路径，在满足月产 30 片梁的进度要求下，将用地规模控制在 40000 m² 以内，并采用装配式临时设施降低建设成本。关键控制点包括钢梁制造精度（长度误差≤2mm）、节段匹配精度（错台≤3mm）及存梁支点反力均衡性（差异≤10%）。

（二）墩柱与系梁施工部署

花马湖特大桥主墩施工采用标准化、模块化的施工组织方案，针对双幅共 8 个主墩（墩高分别为 7m 和 10m 两种规格）的特点，制定了详细的墩柱与系梁施工部署。

在模板配置方面，根据墩高差异采用分段组合方案：7m 高墩柱采用 3.5m+3.5m 两段式模板，10m 高墩柱采用 3.5m+3m+3.5m 三段式模板配置，同时配备四套专业模板系统（含系梁底模），可满足两个主墩同步施工的周转需求。特别值得注意的是，墩柱顶节与系梁模板采用一体化加工工艺，由具备专业资质的模板厂家定制生产，确保模板拼缝精度控制在 2mm 以内，接缝处设置专用止浆条防止漏浆。

施工工艺方面采用“墩柱顶节与系梁同步浇筑”的先进工法，通过精确计算混凝土初凝时间（控制在 6-8 小时），实现墩柱与系梁的无缝衔接浇筑。支架体系选用承插型盘扣式支架，立杆间距按 0.9m×0.9m 标准布置，水平杆步距 1.5m，同时设置竖向斜杆和水平剪刀撑，确保支架系统刚度满足施工荷载要求。针对墩柱与系梁连接部位的特殊构造，在系梁下方 1.5m 范围内加密支架立杆至 0.6m 间距，并增设型钢分配梁增强局部承载力。施工流程严格执行“三阶段控制”：第一阶段完成墩柱下部节段浇筑并预埋连接钢筋；第二阶段安装顶节模板和系梁底模，同步绑扎钢筋；第三阶段采用两台泵车对称浇筑混凝土，控制浇筑速度在 1m/h 以内。质量控制要点包括：模板安装垂直度偏差≤H/1000 且≤15mm，系梁底模预拱度设置按 L/800 控制，混凝土养护采用自动喷淋系统保持湿润状态不少于 7 天。通过这种标准化施工部署，既保证了施工质量，又实现了每个主墩 15-18 天的施工周期目标。

（三）悬臂拼装施工管理

花马湖特大桥采用的波形钢腹板构造通过独特的折皱形态设计，在保证结构强度的同时显著减轻了自重，为悬臂施工创造了有利条件。花马湖特大桥节段梁悬臂拼装的整体流程见下图 3：

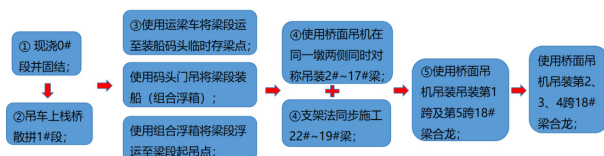


图3 花马湖特大桥节段梁悬臂拼装的整体流程

施工中现浇 0# 段并固结，0# 段作为墩顶首段梁体，其施工精度直接影响后续节段的拼装质量。施工时，先在墩顶搭设

满堂支架，支架体系采用承插型盘扣式结构，立杆间距控制在 0.6m×0.6m，水平杆步距 1.2m，并设置双向斜撑确保支架刚度。钢筋绑扎前，需对墩顶预埋件进行精确测量定位，预埋件平面位置偏差控制在±5mm 以内，高程误差≤±3mm。混凝土浇筑采用钢纤维陶粒轻质高性能混凝土，配合比严格按设计要求执行，水胶比控制在 0.17，坍落度保持 260mm±20mm。浇筑时从梁体两端向中间对称进行，采用附着式振捣器振捣，振捣时间控制在 5-8 秒，避免过振导致钢纤维沉降。浇筑完成后，及时覆盖保湿养护，夏季自然养护 8 小时后可拆除侧模，冬季则采用 60℃ 蒸汽养护 10 小时，确保混凝土强度快速增长。

待 0# 段混凝土强度达到设计强度的 90% 以上时，进行预应力张拉。张拉采用两端对称同步张拉工艺，张拉顺序严格按照设计要求执行，先张拉腹板束，再张拉顶板束，控制张拉力误差≤±1%。张拉完成后及时进行孔道压浆，压浆材料采用专用压浆料，水胶比 0.26-0.28，压浆压力控制在 0.5-0.7MPa，确保孔道填充密实。最后，通过支座灌浆实现 0# 段与墩顶的固结，灌浆料采用无收缩高强灌浆料，28 天抗压强度≥60MPa，灌浆过程中需保持压力稳定，直至排气孔排出饱满浆体为止。

五、波形钢腹板组合梁施工的建议

（1）内衬砼设计长度可适当加长加厚，以使腹板所承受大部分剪力由内衬砼承担。

波形钢腹板组合梁中，内衬混凝土的设计优化是提升结构整体抗剪性能的关键。通过适当增加内衬混凝土的长度和厚度，可显著提高其剪力分担比例，从而降低钢腹板的应力集中风险。一般内衬混凝土厚度增加 20%-30% 时，其承担的剪力占比可有效提升，有效缓解钢腹板的疲劳损伤。此外，加长内衬混凝土的纵向布置范围，建议延伸至弯矩反弯点外 2-3 米，能够改善剪力传递的连续性，减少钢混界面剥离风险。施工中需注意内衬砼的浇筑密实性，可采用自密实混凝土配合附着式高频振捣工艺，确保与波形钢腹板的粘结强度。这一优化不仅延长了结构寿命，还降低了后期维护成本。

（2）进一步优化抗剪连接设计。

抗剪连接件的性能直接影响波形钢腹板与混凝土顶底板的协同工作效果。当前主流设计如栓钉、PBL 键需从材料选型、布置密度和构造细节三方面升级。首先，可选用高强不锈钢栓钉如 ASTM A276 316 型，其耐腐蚀性优于碳钢，适合湖区等潮湿环境。其次，通过有限元分析优化连接件间距，建议在剪力突变区，如支座附近，将密度提高至 150%-200%，而跨中区域可适当降低以节省成本。此外，可探索复合连接形式，例如“栓钉+环氧胶粘层”组合，通过胶层弥补栓钉焊接残余应力导致的局部粘结退化^[5]。此类优化可使界面抗剪强度提升，同时减少焊接热损伤对钢腹板的影响。

（3）波形钢腹板节段间采用“高强度螺栓+贴角焊接缝”

的连接办法。

波形钢腹板节段间的连接质量直接影响桥梁整体结构的受力性能和耐久性。传统的单一连接方式存在明显的局限性：全焊接易产生较大的焊接残余应力，导致腹板局部变形；而全螺栓连接则对施工精度要求极高，且长期动载下可能出现螺栓

松脱。采用“高强度螺栓+贴角焊接缝”的复合连接方法，能够充分发挥两种工艺的优势，高强度螺栓提供初始定位和预紧力，确保节段间紧密贴合；贴角焊缝则补充增强连接面的抗剪和抗弯能力，形成双重保障。

施工注意事项总结见下表 1：

表 1 “高强度螺栓+贴角焊接缝”施工注意事项

施工关键点	注意事项
螺栓预紧力管理	采用扭矩、转角法施加预紧力，确保螺栓达到设计抗滑移要求，建议预紧力控制在 0.7-0.8 倍螺栓屈服强度。
螺栓预紧力管理	贴角焊缝宜采用气体保护焊，如 CO ₂ 焊，焊脚尺寸不小于 6mm，并实施多层多道焊以减少热影响区变形。
防腐协同设计	螺栓连接面应喷涂富锌底漆，焊缝区域需额外增加耐候密封胶，防止缝隙腐蚀。

该复合连接法已在部分桥梁工程中试点应用，结果显示其疲劳寿命较纯焊接节点可有效提升，且施工效率优于纯螺栓方案，特别适用于跨径大于 200 米的波形钢腹板桥梁。

（4）进一步推进耐候钢等材料在波形钢腹板组合箱梁桥梁中的应用。

ASTM A242、Q355NH 耐候钢凭借其优异的抗大气腐蚀性能，可显著提升波形钢腹板组合梁在恶劣环境下的服役寿命。与传

统钢材相比，耐候钢通过铜、铬等合金元素的添加，能在表面形成致密的锈化保护层，厚度约 50-100 μm，将腐蚀速率降低至普通碳钢的 1/3-1/5。在沿海、工业污染区等高腐蚀环境中，采用耐候钢腹板可减少防腐涂装次数，全寿命周期内维护成本降低 40%以上，并避免因涂层破损导致的局部锈蚀风险。

耐候钢的应用需要注意以下几点，统计见下表 2：

表 2 耐候钢的应用注意事项

耐候钢的应用	注意事项
焊接适应性	耐候钢的合金成分可能增加焊接冷裂倾向，需采用低氢焊材（如 E7018-G）并严格控制预热温度（建议 150-200℃）
与混凝土的兼容性	耐候钢表面锈层可能影响与混凝土的粘结，需在接触面增设剪力键或喷砂处理（粗糙度 Ra≥50 μm）。
成本平衡	虽然耐候钢单价比普通钢高 15%-20%，但可通过减少维护费用和延长换板周期实现全寿命经济性优化。

（5）进一步推进悬臂拼装、顶推等施工工艺。

在波形钢腹板组合梁施工中，应重点推进悬臂拼装和顶推等先进施工工艺的应用与创新。悬臂拼装工艺通过对称分段施工，每节段 3-5m 和智能监控系统，可实现无支架施工，有效控制悬臂端挠度，预拱度建议 L/500-L/800 和线形精度，误差≤L/3000，特别适合跨越江河或交通繁忙区域；顶推施工则需采用模块化临时墩、计算机同步控制系统偏差<2mm 和前端导梁，长度取跨径 0.6-0.7 倍，等关键技术，确保施工精度和安全性。这两种工艺都需要配套研发专用吊装设备和 BIM 动态模拟系统，未来可探索“悬臂拼装+顶推”混合工法，以进一步提升施工效率、拓展复杂地形适应能力，同时应注重施工过程中的同步控制、变形监测和临时支撑体系优化等关键技术环节的精细化管控，以实现高质量、高效率的波形钢腹板组合梁施工。

六、总结

综上所述，本研究所提出的结构是一种比较新颖的桥梁结构，通过代替传统的结构模式，实现了结构自重的显著降低；使两种材料的力学性能得到高效协同利用。自 20 世纪 90 年代引入我国以来，该桥型凭借轻量化、高材料利用率及流畅的景

观效果等突出特点。未来，在国内桥梁建设应用中，可以持续扩大应用，应用于大跨径城市立交和景观桥梁工程，促进良好的技术经济综合效益的实现。

[参考文献]

[1]陈冰.大跨无预应力波形钢腹板组合连续梁桥设计关键技术[J].福建建筑, 2023(5): 112-116.

[2]李 波.波形钢腹板箱型组合梁异步挂篮施工关键技术研究[J].Railway Construction Technology, 2024(7).DOI : 10.3969/j.issn.1009-4539.2024.07.023.

[3]黄景新.宽幅波形钢腹板组合箱梁异步悬臂施工挂篮研究[J].施工技术（中英文）, 2024, 53(15): 37-41.

[4]冀伟,余壮果,罗奎.波形腹板钢箱-混凝土组合梁横向内力计算与分析[J].铁道学报, 2024, 46(8): 161-170.

[5]周舟.波形钢腹板钢-混组合梁施工关键技术分析研究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术, 2023.

作者简介：彭昊，1994.8.16，男，湖北省黄冈市麻城市，汉族，大学本科，湖北交投建设集团黄鄂黄快速通道项目副总工程师，工程师，研究方向：道路桥梁。